

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
SETOR DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

**JONATHAN CRISTIANO COSTA**

**TAMANHO DO COLIMADOR E ESPESSURA DA AMOSTRA EM MEDIDAS DO  
COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA DO SOLO**

**PONTA GROSSA  
2011**

**JONATHAN CRISTIANO COSTA**

**TAMANHO DO COLIMADOR E ESPESSURA DA AMOSTRA EM MEDIDAS DO  
COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA DO SOLO**

**Dissertação apresentada como requisito  
parcial para obtenção do grau de Mestre na  
Universidade Estadual de Ponta Grossa,  
Programa de Pós-Graduação em Ciências,  
área de concentração: Física.**

**Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Pires**

**PONTA GROSSA  
2011**

Ficha Catalográfica Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

J237t

Costa, Jonathan Cristiano

Tamanho do colimador e espessura da amostra em medidas do coeficiente de atenuação de raios gama do solo / Jonathan Cristiano Costa. Ponta Grossa, 2011.

101f.

Dissertação ( Mestrado em Ciências , área de concentração Física ), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr . Luiz Fernando Pires

1. Propriedades Físicas do Solo. 2. <sup>241</sup>Am. 3. <sup>137</sup>Cs.  
4. XCOM. 5. Medidas Representativas. I. Pires, Luiz Fernando.  
II. T.

CDD: 539.2

## TERMO DE APROVAÇÃO

**JONATHAN CRISTIANO COSTA**

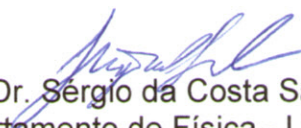
### **“TAMANHO DO COLIMADOR E ESPESSURA DA AMOSTRA EM MEDIDAS DO COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA DO SOLO”**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Ciências - Física da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora.

Orientador:



Prof. Dr. Luiz Fernando Pires  
Departamento de Física - UEPG/PR.



Prof. Dr. Sérgio da Costa Saab  
Departamento de Física - UEPG/PR.



Prof. Dr. Luis Carlos Timm  
Departamento de Engenharia Rural – UFPel/RS

**Ponta Grossa, 15 de abril de 2011.**

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Daniel e Neuli, e ao meu irmão, Daniel, pelo amor, incentivo e confiança.

Ao Prof. Dr. Luiz Fernando Pires, pela orientação e dedicação que tornaram possível a realização deste trabalho.

A Vinicius Krainer, pela orientação gramatical, companheirismo e amizade.

À Caroline Czelusniak, pelas discussões sobre física e reflexões sobre a vida.

À Jaqueline Ap. Ribaski Borges, colega de graduação e mestrado, pela amizade.

Ao Dr. Osny Oliveira Santos Bacchi, chefe do Laboratório de Física do Solo e ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP) por disponibilizarem a infraestrutura necessária para as medidas experimentais.

Ao Dr. Robson Clayton Jacques Arthur pela ajuda na realização do experimento junto ao CENA.

À CAPES, pelo suporte financeiro através de concessão de bolsa de mestrado.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão desta pesquisa.

O Universo é assimétrico e estou persuadido de que a vida, como nós a conhecemos, é resultado direto da assimetria do Universo ou de suas consequências indiretas.

(Louis Pasteur)

## RESUMO

A técnica de atenuação de raios gama se baseia na interação da radiação com a matéria, abrangendo diversos objetivos, dentre eles, a determinação de parâmetros físicos do solo, tais como sua densidade, umidade e porosidade. O coeficiente de atenuação de massa ( $\mu$ ) pode ser definido como a probabilidade de interação por unidade de volume entre um meio material (absorvedor) e o fóton a uma dada energia. Uma medida precisa desse coeficiente é importante para determinações representativas de parâmetros físicos do solo. Normalmente, em determinações destes parâmetros, mede-se o coeficiente de atenuação do meio que fica considerado como constante, mesmo para diferentes tamanhos de amostras ou geometria do sistema nuclear. No presente trabalho, procurou-se analisar a variação do  $\mu$  com o aumento da espessura da amostra e também com o tamanho do colimador para um meio poroso heterogêneo como é o caso do solo. Foram usadas duas fontes de radiação gama emitindo fótons de diferentes energias, sendo elas  $^{241}\text{Am}$  (59,4 keV) e  $^{137}\text{Cs}$  (661,6 keV). Essas duas fontes são as mais comuns usadas para medidas de propriedades físicas do solo. As variações nas espessuras das amostras foram obtidas utilizando-se caixas de acrílico com tamanhos de 2 a 15 cm. Para a variação na espessura do feixe foram usados quatro colimadores circulares com diâmetros de 1 a 4 mm. Foram utilizados nesse estudo dois solos de diferentes texturas, sendo elas, franco-arenosa e argilo-siltosa. Os resultados obtidos mostram que, embora exista influência do tamanho do colimador e espessura da amostra nas medidas de  $\mu$  essas são menores do que 5% (desvio relativo considerando cada valor de  $\mu$  para cada espessura e o valor médio para todas as espessuras) para ambos os solos e fontes radioativas. Para a fonte de  $^{241}\text{Am}$  somente espessuras definidas de amostra (2-12 cm) podem ser usadas na medida do  $\mu$  para o solo quando os colimadores menores (1 e 2 mm) estão sendo usados. Isso ocorre devido a problemas no levantamento do fotopico após determinada espessura de amostra para essa fonte radioativa. Na comparação dos valores experimentais de  $\mu$  obtidos e valores teóricos gerados via XCOM foi observada uma boa concordância entre os dados experimentais e teóricos para a água (3,8% -  $^{241}\text{Am}$  e 6,3% -  $^{137}\text{Cs}$  de desvio relativo considerando o valor teórico como referência) o que representa um bom funcionamento do sistema nuclear. No entanto, o mesmo não foi observado para o solo devido ao levantamento da composição química desse meio poroso ter sido somente qualitativo. Porém, nesse trabalho foi verificado que, mesmo pequenas modificações no valor de  $\mu$ , com o tamanho do colimador e espessura da amostra, podem influenciar de maneira significativa medidas de propriedades físicas do solo como a sua densidade.

Palavras-chave: Propriedades Físicas do Solo.  $^{241}\text{Am}$ .  $^{137}\text{Cs}$ . XCOM. Medidas Representativas.

## ABSTRACT

The gamma-ray attenuation technique is based on the interaction of radiation with matter. In soil physics the technique is mainly used to determine the soil bulk density, porosity, and soil moisture. The mass attenuation coefficient ( $\mu$ ) is defined as the probability of interaction per unit of volume of a photon with a given energy with the matter. An accurate measurement of  $\mu$  is important for evaluation of representative soil physical parameters. Usually,  $\mu$  is considered constant during evaluations of soil physical properties, even for different sample sizes or nuclear system geometry. The main objective of this study was to analyze the effect of sample size and collimator diameter in evaluations of  $\mu$  for a heterogeneous porous medium (soil). The radioactive sources of  $^{241}\text{Am}$  (59,4keV) and  $^{137}\text{Cs}$  (661,6 keV) were used. These sources are chosen because they are the most commonly used for soil physical properties measurements. Sample thickness and solid angle variations were obtained using acrylic boxes with sizes from 2 to 15 cm and four circular collimators (1-4 mm). Two different soil textures (sandy-loam and silty-clay) were also used, besides the different sample sizes and collimator diameters. The results obtained show that the influence of collimator size and sample thickness in the variations of  $\mu$  is less than 5% (relative deviation considering each value for each thickness and the average value calculated for all thicknesses) for both soils and radioactive sources. However, for the  $^{241}\text{Am}$  only specific sample thicknesses (2-12 cm) can be used when collimators with small diameters (1 and 2 mm) are used. This occurs due to problems in the photopeak evaluation after determined soil thickness. In order to compare the obtained experimental results of  $\mu$  with theoretical ones,  $\mu$  theoretical values were generated via XCOM for water and soils. A good agreement was found for water (3,8% -  $^{241}\text{Am}$  and 6,3% -  $^{137}\text{Cs}$ , relative deviation considering the theoretical value as reference), which represents a good gamma-ray system operation. However, for the soil samples the same was not observed. A possible explanation for this result is the qualitative soil chemical composition evaluation used to generate the  $\mu$  via XCOM. To conclude, the results of this work show that even small changes in the  $\mu$  value with the collimator size and sample thickness can cause important changes in measurements of soil physical properties such its bulk density.

Key-words: Soil Physical Properties.  $^{241}\text{Am}$ .  $^{137}\text{Cs}$ . XCOM. Representative Measurements.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- FIGURA 1 - O efeito Compton: um fóton incidente colide com um elétron atômico e transmite energia para ele, o fóton e o elétron são defletidos com ângulos  $\Theta$  e  $\theta$ , respectivamente, para a trajetória do fóton incidente.....20
- FIGURA 2 - Produção de Pares. Conversão do fóton de raio gama em um par elétron-pósitron.....23
- FIGURA 3 - Aniquilação. Interação entre pósitron e elétron e a conversão de suas massas em dois fótons com energia de 0,511 MeV.....25
- FIGURA 4 - Feixe de radiação gama com intensidade  $I_0$  atravessa o material com espessura  $dx$  sendo atenuado e resulta em um feixe com intensidade  $I$ .....28
- FIGURA 5 - Diagrama do sistema de detecção da radiação gama (cadeia nuclear).....32
- FIGURA 6 – Transições atômicas de Raios-X.....33
- FIGURA 7 - Configuração do tubo de raios X e seus respectivos espectros característicos e contínuos.....35
- FIGURA 8 - Castelo de chumbo contendo as fontes radioativas de  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{241}\text{Am}$ , localizadas nas suas extremidades.....36
- FIGURA 9 - Mesa de medidas. Sobre o trilho encontra-se o castelo de chumbo contendo as fontes radioativas. Os blocos de Pb são utilizados para a blindagem do castelo e do detector. ....37
- FIGURA 10 - Mesa de medidas contendo o castelo de chumbo com as fontes radioativas e a blindagem de Pb sobre o detector.....37
- FIGURA 11 - Arranjo contendo fonte, amostra e detector blindado. Abaixo da amostra é possível observar o equipamento que permite a movimentação vertical da amostra.....38
- FIGURA 12 - Colimadores circulares de diferentes diâmetros, utilizados na colimação da saída da fonte.....39
- FIGURA 13 - Componentes que constituem a eletrônica do espectrômetro gama. Da esquerda para a direita: amplificador, temporizador/contador, fonte de alta tensão, e analisador monocanal. Todos esses módulos se encontram acoplados a um bastidor bin.....41
- FIGURA 14 - Exemplo de fotopico e delimitação da região para escolha do mesmo. FWHM (“Full width at half maximum”) representa à largura total a meia altura.....42
- FIGURA 15 - Arranjo experimental: Castelo de chumbo contendo as fontes radioativas, caixa de acrílico com amostra de espessura  $x$ , e cilindro de chumbo contendo o detector. O canto inferior da figura mostra uma visão panorâmica do recipiente que contém a amostra. ....43

FIGURA 16 - Arranjo experimental. Da esquerda para direita: detector blindado com chumbo, recipiente contendo a amostra, castelo de chumbo com fonte radioativa.....	44
FIGURA 17 – Exemplo de uma matriz de densidade obtida via análise tomográfica usada para gerar imagens de distribuição de $\rho_s$ e linha selecionada para análise quantitativa de variação de $\rho_s$ .....	47
FIGURA 18 - Espectros de FRX para as amostras de solo arenoso (solo 1) e argiloso (solo 2). .....	48
FIGURA 19 - Coeficiente de atenuação para a) os solos 1 e 2 e b) água obtido através do XCOM. ....	50
FIGURA 20 - Variação do coeficiente de atenuação de massa da água em função da espessura do material absorvedor para as fontes de a) $^{241}\text{Am}$ ; b) $^{137}\text{Cs}$ e c) desvio em relação à média (DR) do $\mu$ para cada caixa e ambas as fontes. ....	53
FIGURA 21 - Espectros completos apresentando o fotopico para as fontes de a) $^{137}\text{Cs}$ e b) $^{241}\text{Am}$ . Os espectros foram levantados para diferentes períodos de tempo durante a realização das medidas experimentais do coeficiente de atenuação. ....	55
FIGURA 22 - Espectros levantados sem e com presença das amostras de solo arenoso e argiloso para a espessura de amostra de 10 cm e fonte de $^{137}\text{Cs}$ . a) Colimador de 1 mm; b) Colimador de 2 mm; c) Colimador de 3 mm e d) Colimador de 4 mm. O tempo de contagem com amostra é maior do que sem amostra. ....	57
FIGURA 23 - Espectros levantados sem e com presença das amostras de solo arenoso e argiloso para a espessura de amostra de 5 cm e fonte de $^{241}\text{Am}$ . a) Colimador de 1 mm; b) Colimador de 2 mm; c) Colimador de 3 mm e d) Colimador de 4 mm. O tempo de contagem com amostra é maior do que sem amostra. ....	57
FIGURA 24 - Variação da largura total a meia altura (FWHM) dos espectros levantados com a presença das amostras de solo. a) fonte de $^{137}\text{Cs}$ e solo arenoso; b) fonte de $^{137}\text{Cs}$ e solo argiloso; c) fonte de $^{241}\text{Am}$ e solo arenoso e d) fonte de $^{241}\text{Am}$ e solo argiloso. ....	59
FIGURA 25 - Variação do $\mu$ para a fonte de $^{137}\text{Cs}$ em função da espessura da amostra: a) solo arenoso, b) solo argiloso, c) desvio relativo (DR) entre os valores de $\mu$ para o solo arenoso e d) DR entre os valores de $\mu$ para o solo argiloso. As diferenças relativas foram calculadas tomando-se os dados da média dos valores de $\mu$ (todas as espessuras) como referência para o seu cálculo. ....	62
FIGURA 26 - Variação do $\mu$ para a fonte de $^{241}\text{Am}$ em função da espessura da amostra: a) solo arenoso, b) solo argiloso, c) desvio relativo (DR) entre os valores de $\mu$ para o solo arenoso e d) DR entre os valores de $\mu$ para o solo argiloso. ....	66
FIGURA 27 - Correlação entre os valores de $\mu$ para o solo arenoso e fonte de $^{137}\text{Cs}$ . a) correlação entre os colimadores de 1 e 2 mm; b) correlação entre os colimadores de 2 e 3 mm; c) correlação entre os colimadores de 3 e 4 mm. Os pontos selecionados se referem as espessuras de 8 a 15 cm. ....	68

- FIGURA 28 – Correlação entre os valores de  $\mu$  para o solo argiloso e fonte de  $^{137}\text{Cs}$ . a) correlação entre os colimadores de 1 e 2 mm; b) correlação entre os colimadores de 2 e 3 mm; c) correlação entre os colimadores de 3 e 4 mm. Os pontos selecionados se referem as espessuras de 8 a 15 cm.....68
- FIGURA 29 - Correlação entre os valores de  $\mu$  para o solo arenoso e fonte de  $^{241}\text{Am}$ . a) correlação entre os colimadores de 1 e 2 mm; b) correlação entre os colimadores de 2 e 3 mm; c) correlação entre os colimadores de 3 e 4 mm. Os pontos selecionados se referem as espessuras de 2 a 7 cm.....69
- FIGURA 30 - Correlação entre os valores de  $\mu$  para o solo argiloso e fonte de  $^{241}\text{Am}$ . a) correlação entre os colimadores de 1 e 2 mm; b) correlação entre os colimadores de 2 e 3 mm; c) correlação entre os colimadores de 3 e 4 mm. Os pontos selecionados se referem as espessuras de 2 a 7 cm.....70
- FIGURA 31 - Imagem tomográfica representando mapas de densidade do solo ( $\rho_s$ ) para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$  para o solo arenoso. O valor de  $\mu$  do solo usado para gerar os mapas de  $\rho_s$  se refere a espessura de amostra de 8 cm. A escala traz valores de  $\rho_s$ , sendo a cor branca valores de densidade maior e cor preta densidade menor. (a) Colimador de 1 mm; (b) Colimador de 2 mm; (c) Colimador de 3 mm e (d) Colimador de 4 mm.....73
- FIGURA 32 - Imagem tomográfica representando mapas de densidade do solo ( $\rho_s$ ) para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$  para o solo arenoso. O valor de  $\mu$  do solo usado para gerar os mapas de  $\rho_s$  se refere a espessura de amostra de 12 cm. A escala traz valores de  $\rho_s$ , sendo a cor branca valores de densidade maior e cor preta densidade menor. (a) Colimador de 1 mm; (b) Colimador de 2 mm; (c) Colimador de 3 mm e (d) Colimador de 4 mm.....74
- FIGURA 33 - Variações na densidade da amostra em função de diferenças no tamanho do colimador. Col 1-4 representa os colimadores de 1mm até 4 mm. (a) espessura de amostra de 8 cm e (b) espessura de amostra de 12 cm. Amostra de solo arenoso. O eixo x apresenta valores ao longo da linha selecionada na matriz de densidade.....75
- FIGURA 34 - Variações na densidade do solo em função da espessura da amostra. (a) colimador de 1 mm, (b) colimador de 2 mm, (c) colimador de 3 mm e (d) colimador de 4 mm. Solo de textura arenosa. O eixo x apresenta valores ao longo da linha selecionada na matriz de densidade. ....77
- FIGURA 35 - Variações na densidade da amostra em função de diferenças no tamanho do colimador. O valor de  $\mu$  usado se refere à média para: (a) espessura de amostra de 2-7 cm e (b) espessura de amostra de 8-15 cm. Amostra de solo arenoso. O eixo x apresenta valores ao longo da linha selecionada na matriz de densidade. ....78
- FIGURA 36 - Variações na densidade do solo em função da espessura da amostra, levando-se em consideração a média de  $\mu$  para dois intervalos de espessuras; (a) colimador de 1 mm, (b) colimador de 2 mm, (c) colimador de 3 mm e (d) colimador de 4 mm. Solo de textura arenosa. O eixo x apresenta valores ao longo da linha selecionada na matriz de densidade.....79
- FIGURA 37 - Imagem tomográfica representando mapas de densidade do solo ( $\rho_s$ ) para a fonte de  $^{241}\text{Am}$  para o solo arenoso. O valor de  $\mu$  do solo usado para gerar os mapas de  $\rho_s$  se refere a espessura de amostra de 4 cm. A escala traz valores de  $\rho_s$ , sendo a cor branca para

maior densidade e preta para menor densidade. (a) Colimador de 1 mm; (b) Colimador de 2 mm; (c) Colimador de 3 mm e (d) Colimador de 4 mm..... 80

FIGURA 38 - Imagem tomográfica representando mapas de densidade do solo ( $\rho_s$ ) para a fonte de  $^{241}\text{Am}$  para o solo arenoso. O valor de  $\mu$  do solo usado para gerar os mapas de  $\rho_s$  se refere a espessura de amostra de 10 cm. A escala traz valores de  $\rho_s$ , sendo a cor branca referente a valores de maior densidade, e cor preta valores de menor densidade. (a) Colimador de 2 mm; (b) Colimador de 3 mm e (c) Colimador de 4 mm. .... 81

FIGURA 39 - Variações na densidade da amostra em função de diferenças no tamanho do colimador. Col 1-4 representa os colimadores de 1mm até 4 mm. (a) espessura de amostra de 4 cm e (b) espessura de amostra de 10 cm. Amostra de solo arenoso. O eixo x apresenta valores ao longo da linha selecionada da matriz. .... 82

FIGURA 40 - Variações na densidade do solo em função da espessura da amostra. (a) colimador de 2 mm, (b) colimador de 3 mm e (c) colimador de 4 mm. Solo de textura arenosa. O eixo x apresenta valores ao longo da linha selecionada na matriz. .... 83

FIGURA 41 - Variações na densidade da amostra em função de diferenças no tamanho do colimador. (a) espessura de amostra de 2-7 cm e (b) espessura de amostra de 8-12 cm. Amostra de solo arenoso. O eixo x apresenta valores ao longo da linha selecionada na matriz de densidade. .... 85

FIGURA 42 - Variações na densidade do solo em função da espessura da amostra, levando-se em consideração a média de  $\mu$  para dois intervalos de espessuras; (a) colimador de 2 mm, (b) colimador de 3 mm, (c) colimador de 4 mm. Solo de textura arenosa. O eixo x apresenta valores ao longo da linha selecionada na matriz de densidade..... 86

FIGURA 43 - Imagem tomográfica representando mapas de densidade do solo ( $\rho_s$ ) para a fonte de  $^{241}\text{Am}$  para o solo argiloso. O valor de  $\mu$  do solo usado para gerar os mapas de  $\rho_s$  se refere a espessura de amostra de 4 cm. A escala traz valores de  $\rho_s$ , onde a cor branca se refere a valores de maior densidade e a cor preta a valores de menor densidade. (a) Colimador de 1 mm; (b) Colimador de 2 mm; (c) Colimador de 3 mm e (d) Colimador de 4 mm..... 87

FIGURA 44 - Imagem tomográfica representando mapas de densidade do solo ( $\rho_s$ ) para a fonte de  $^{241}\text{Am}$  para o solo argiloso. O valor de  $\mu$  do solo usado para gerar os mapas de  $\rho_s$  se refere a espessura de amostra de 10 cm. A escala traz valores de  $\rho_s$ , onde a cor branca se refere a valores de maior densidade e a cor preta a valores de menor densidade. (a) Colimador de 1 mm; (b) Colimador de 2 mm; (c) Colimador de 3 mm e (d) Colimador de 4 mm..... 88

FIGURA 45 - Variações na densidade da amostra em função de diferenças no tamanho do colimador. Col 1-4 representa os colimadores de 1mm até 4 mm. (a) espessura de amostra de 8 cm e (b) espessura de amostra de 10 cm. Amostra de solo argiloso. O eixo x apresenta valores ao longo da linha selecionada na matriz. .... 89

FIGURA 46 - Variações na densidade do solo em função da espessura da amostra. (a) colimador de 2 mm, (b) colimador de 3 mm e (c) colimador de 4 mm. Solo de textura argilosa. O eixo x apresenta valores ao longo da linha selecionada na matriz..... 90

FIGURA 47 - Variações na densidade da amostra em função de diferenças no tamanho do colimador. (a) espessura de amostra de 2-7 cm e (b) espessura de amostra de 8-12 cm. Amostra de solo argiloso. O eixo x apresenta valores ao longo da linha selecionada na matriz de densidade. .... 92

FIGURA 48 - Variações na densidade do solo em função da espessura da amostra, levando-se em consideração a média de  $\mu$  para dois intervalos de espessuras; (a) colimador de 2 mm, (b) colimador de 3 mm, (c) colimador de 4 mm. Solo de textura argilosa. O eixo x apresenta valores ao longo da linha selecionada na matriz de densidade..... 93

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Dimensões dos recipientes de acrílico confeccionadas para comportar as amostras. ....	43
TABELA 2 – Densidade das amostras de solo. A média se refere aos valores obtidos para todas as caixas, para os colimadores de 1 a 4 mm e para ambos os solos. CV é o coeficiente de variação. Na parte superior estão os valores obtidos para a fonte de $^{137}\text{Cs}$ e na parte inferior para o $^{241}\text{Am}$ . ....	45
TABELA 3 - Resultados quantitativos da FRX. Os valores da concentração média de cada elemento químico em porcentagem com o desvio padrão da média ( $\sigma$ ) aparecem em ordem decrescente para cada solo.....	49
TABELA 4 - Valores de $\mu$ para a água encontrados na literatura e obtidos no presente trabalho. ....	53
TABELA 5 - Diferenças dos valores de coeficiente de atenuação de massa ( $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ ) entre os colimadores de diferentes diâmetros para os solos arenoso e argiloso e fontes radioativas de $^{137}\text{Cs}$ e $^{241}\text{Am}$ . ....	71
TABELA 6 – Valores médios do coeficiente de atenuação de massa ( $\mu$ ) para o solo e para a água obtidos para os diferentes colimadores e seus respectivos erros ( $d\mu$ ). ....	72
TABELA 7 - Valores médios de densidade do solo ( $\rho_s$ ) obtidos para os diferentes tamanhos de colimadores para a amostra de solo arenoso e fonte de $^{137}\text{Cs}$ .....	76
TABELA 8 - Valores médios de densidade do solo ( $\rho_s$ ) obtidos para os diferentes tamanhos de colimadores e intervalos de espessuras para a amostra de solo arenoso e fonte de $^{137}\text{Cs}$ . ..	80
TABELA 9 - Valores médios de densidade do solo ( $\rho_s$ ) obtidos para os diferentes tamanhos de colimadores para a amostra de solo arenoso e fonte de $^{241}\text{Am}$ . ....	83
TABELA 10 - Valores médios de densidade do solo ( $\rho_s$ ) obtidos para os diferentes tamanhos de colimadores e intervalos de espessuras para a amostra de solo arenoso e fonte de $^{241}\text{Am}$ ..	86
TABELA 11 - Valores médios de densidade do solo ( $\rho_s$ ) obtidos para os diferentes tamanhos de colimadores para a amostra de solo argiloso e fonte de $^{241}\text{Am}$ . ....	90
TABELA 12 - Valores médios de densidade do solo ( $\rho_s$ ) obtidos para os diferentes tamanhos de colimadores e intervalos de espessuras para a amostra de solo argiloso e fonte de $^{241}\text{Am}$ . ..	93

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- c: velocidade da luz ( $\text{m s}^{-1}$ );
- CV: coeficiente de variação (%);
- DR: desvio relativo (%);
- E: energia (eV);
- EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária;
- FRX: Fluorescência de Raios-X;
- FWHM: “Full width at half maximum” – largura a meia altura;
- $h$ : constante de Planck (J s)
- I: intensidade do feixe de radiação atenuado (ctg);
- $I_0$ : intensidade do feixe de radiação (ctg);
- k: coeficiente de atenuação linear ( $\text{cm}^{-1}$ );
- $m_0$ : massa de repouso (kg);
- UT: unidade tomográfica;
- $\lambda$ : comprimento de onda (m);
- $\mu$ : coeficiente de atenuação de massa ( $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ );
- $\nu$ : frequência (Hz)
- $\theta$ : umidade ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );
- $\rho_s$ : densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ );
- $\sigma$ : desvio padrão.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	18
2.1	A RADIAÇÃO GAMA .....	18
2.1.1	Principais interações da radiação gama com a matéria .....	18
2.1.1.1	Efeito Fotoelétrico .....	19
2.1.1.2	Efeito Compton .....	20
2.1.1.3	Produção de Pares.....	23
2.2	COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO .....	25
2.3	LEI DE BEER-LAMBERT .....	27
2.4	ERROS ATRIBUÍDOS ÀS MEDIDAS DOS COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO DA ÁGUA E DO SOLO .....	29
2.5	SISTEMA DE DETECÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA (CADEIA NUCLEAR).....	31
2.6	FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX).....	32
3	MATERIAL E MÉTODOS .....	34
3.1	COLETA E PREPARO DAS AMOSTRAS .....	34
3.2	ANÁLISE ELEMENTAR .....	34
3.3	ESPECTRÔMETRO GAMA .....	35
3.3.1	Mesa de medidas .....	35
3.4	CADEIA NUCLEAR .....	39
3.5	LEVANTAMENTO DOS ESPECTROS .....	41
3.6	BACKGROUND .....	42
3.7	MONTAGEM DO EXPERIMENTO E MEDIDAS DO COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO .....	43
3.8	IMAGENS TOMOGRÁFICAS.....	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	48
4.1	ANÁLISE ELEMENTAR .....	48
4.2	COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO DA ÁGUA .....	51
4.3	ESPECTROS DE VARIAÇÃO DA POSIÇÃO E TAMANHO DO FOTOPICO....	54
4.4	VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO DE MASSA ( $\mu$ ) DAS AMOSTRAS DE SOLO.....	60
4.5	INFLUÊNCIA DOS VALORES DE COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO DE MASSA EM MEDIDAS REPRESENTATIVAS DE DENSIDADE DO SOLO.....	72
5	CONCLUSÕES.....	94
6	TRABALHOS FUTUROS .....	96
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	97



## 1 INTRODUÇÃO

A técnica de atenuação de raios gama se baseia na interação da radiação com a matéria, abrangendo diversos objetivos, dentre eles, a determinação de parâmetros físicos do solo, tais como sua densidade, umidade e porosidade. Um dos primeiros experimentos bem sucedidos com esse propósito foi desenvolvido por Belcher et al. (1950) que utilizaram espalhamento de raios gama para a determinação da densidade do solo ( $\rho_s$ ).

A atenuação de raios gama foi primeiramente utilizada por Vomocil (1954) e mais tarde por Bernhard e Chasek (1955), a fim de determinar  $\rho_s$  em condições de campo. Nesses trabalhos, foi utilizada uma fonte de radiação não colimada de  $^{60}\text{Co}$  e um detector do tipo Geiger-Muller (GM) para contar os fótons transmitidos. Van Bavel, Underwood e Ragar (1957), usaram o  $^{137}\text{Cs}$  como fonte de raios gama e um detector do tipo cristal cintilador de iodeto de sódio (NaI), também para determinar  $\rho_s$  sob condições de campo. Aspectos teóricos do uso da atenuação gama na determinação de  $\rho_s$  foram abordados por Korobochkin (1958) e por Van Bavel (1959), tais como a relação das taxas de contagens com a distância entre a fonte e o detector, e, ainda, a influência da densidade do material nestas taxas.

O uso de feixes colimados de radiação gama teve seu início em experimentos conduzidos em laboratório desenvolvidos por Ferguson e Gardner (1960). A obtenção do feixe monoenergético colimado se deu através de colimadores de chumbo (Pb). A fonte de radiação selecionada foi o  $^{137}\text{Cs}$ , devido à energia primária (661,6 keV) relativamente alta dos fótons. O radioisótopo  $^{241}\text{Am}$  foi proposto como fonte de radiação gama por King (1967) para determinar propriedades físicas do solo. Dentre as vantagens da escolha do  $^{241}\text{Am}$  como fonte de radiação gama, destacam-se a baixa energia primária (59,4 keV) dos fótons e a longa meia vida ( $\cong 460$  anos) desse radioisótopo.

No Brasil, o uso da técnica de atenuação de radiação gama na obtenção da densidade e umidade do solo ( $\theta$ ) teve seu início com os trabalhos realizados por Reichardt (1965) e Oliveira (1991). Também se destacam os trabalhos de Vaz et al. (1999), Moreira et al. (2001) e Pires et al. (2005a) que utilizaram a técnica na análise granulométrica do solo, medidas da condutividade hidráulica e curva de retenção da água no solo. O uso da técnica de atenuação de raios gama permite obter informações sobre propriedades físicas do meio material em que o feixe gama está sendo transmitido. Ao atravessar o material absorvedor, os fótons de radiação gama irão interagir com os átomos que constituem esse meio, podendo ser

espalhados ou absorvidos, sofrendo uma conseqüente atenuação da intensidade do feixe gama. Essa atenuação irá ocorrer de acordo com a composição química do material e a energia dos fótons gama do feixe incidente. A propriedade física que caracteriza o material sobre tais circunstâncias é o coeficiente de atenuação linear ( $k$ ), ou ainda, o coeficiente de atenuação de massa ( $\mu$ ).

O coeficiente de atenuação de massa ( $\mu$ ) pode ser definido como a probabilidade de interação por unidade de volume entre um meio material (absorvedor) e o fóton a uma dada energia. Cada material possuirá um coeficiente de atenuação de massa particular, onde seu valor depende da energia dos fótons gama. Esse coeficiente de atenuação é usado na determinação de outros parâmetros físicos do solo, que só terão um valor representativo se sua medida for precisa, ou seja, uma medida precisa desse coeficiente é importante para determinações representativas de parâmetros físicos do solo.

Existem diversos trabalhos na literatura mundial onde são apresentados resultados onde são verificadas variações nos valores medidos de  $\mu$ . Cesareo et al. (1994), mediram a variação do  $\mu$  com o aumento da energia dos fótons incidentes e aumento de  $\rho_s$  e  $\theta$ , para fótons de 59,54 keV. Alam et al. (2001), estudaram a variação do  $\mu$  com o aumento de energia dos fótons incidentes e densidade física para solos e materiais de construção de Bangladesh. Os fótons gama usados nesse trabalho foram provenientes das fontes de  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{60}\text{Co}$ . Foi verificado que os valores do coeficiente de atenuação linear aumente com o aumento da densidade para uma mesma energia dos raios gama, e diminuiu com o aumento da energia dos raios gama para o mesmo material. Appoloni e Rios (1994) e Crestana et al. (1986), utilizando fonte de  $^{241}\text{Am}$ , mediram a influência da composição química do material absorvedor na obtenção do  $\mu$  para fótons de baixa energia. Singh et al. (1996), observaram que a variação do  $\mu$  com a composição química é maior para fótons com energia abaixo de 500 keV e desprezível entre 1 e 10 MeV. Angelone et al. (2001a; 2001b) mediram valores de  $\mu$  para 22 elementos de alta homogeneidade e 4 compostos orgânicos, utilizando uma fonte de raios-X com energia variando entre 15 a 50 keV. Tartari et al. (1998) usaram fótons com energia de 59,54 keV e avaliaram a variação do  $\mu$  para elementos com diferentes valores de número atômico ( $Z$ ) e diferentes compostos orgânicos.

A princípio, a dependência do  $\mu$  deveria estar relacionada apenas com os parâmetros citados, tais como a composição química do material e a energia dos fótons do feixe incidente. No entanto, é possível encontrar trabalhos onde foi analisada a dependência do  $\mu$  com a variação da espessura do absorvedor, bem como Goswami e Chaudhuri (1973), onde as

medidas foram feitas usando  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{46}\text{Sc}$ ,  $^{60}\text{Co}$  e  $^{137}\text{Cs}$  para 49 materiais, sendo que as amostras possuíam pelo menos 99,99% de pureza. Nesse trabalho foi concluído que erros devido ao espalhamento múltiplo dos fótons podem ser minimizados por um feixe de fótons bem colimado e pela transmissão do feixe através de espessuras relativamente pequenas. Gopal e Sanjeevaiah (1973) investigaram as variações do  $\mu$  para amostras de carbono, alumínio, cobre e estanho, e fótons com energias de 411,8 keV, 322 keV, 279,12 keV, 145,41 keV, 129 keV e 84 keV. Varier et al., (1986) usaram fonte de  $^{137}\text{Cs}$  e cobre na investigação da variação do  $\mu$ , chegando a conclusão de que a contribuição de fótons espalhados se torna importante para amostras com dimensões maiores. No trabalho de Sidhu et al., (1999a,b) foi usada uma fonte de  $^{137}\text{Cs}$  e amostra de solo. Neste trabalho, verificou-se um aumento no valor de  $\mu$  devido a contribuição de fótons múltiplos espalhados, sendo que essa contribuição pode ser amenizada diminuindo o ângulo sólido do feixe através do uso de colimadores menores. Abdel-Rahman et al., (2000) investigaram o efeito da espessura da amostra em medidas do coeficiente de atenuação de massa da parafina, Al, Cu, Pb e Hg, com três diferentes energias (59,54, 661,6 e 1332,5 keV). Os valores determinados se mostraram em concordância com os valores obtidos teóricos, exceto pelo Hg, que teve valores de  $\mu$  diminuindo com o aumento da amostra.

Podemos ainda citar trabalhos onde foi analisada a dependência do  $\mu$  em função do diâmetro do colimador, como nos trabalhos de Hosseine, (1998) e Singh et al., (2006), que usou uma fonte de  $^{137}\text{Cs}$  e colimadores com diferentes diâmetros, além de diferentes espessuras de amostras de alumínio, na determinação do  $\mu$ . Ochbelagh, (2009), investigou o efeito do colimador na largura total da meia altura no detector de iodeto de sódio dopado com tálio [Na(Tl)], chegando a conclusão de que essa resolução depende das dimensões do colimador usado, sendo uma função do arranjo geométrico entre a fonte radioativa e o detector.

Praticamente todos os trabalhos abordados que investigam o efeito de diferentes tamanhos de amostras (comprimento e largura) e tamanho do colimador em medidas do coeficiente de atenuação, usam como material absorvedor substâncias homogêneas. Quanto maior a complexidade do meio maior a dificuldade em obter um valor de  $\mu$  representativo. Normalmente em medidas de densidade do solo ( $\rho_s$ ) e umidade ( $\theta$ ) o coeficiente de atenuação do meio é determinado e considerado constante nas medidas dessas propriedades físicas, mesmo para diferentes tamanhos de amostras. No entanto, de acordo com os trabalhos encontrados na literatura, fica evidente de que tais determinações dependem da significância dos valores de  $\mu$  medidos. Por isso, faz-se necessário uma investigação mais detalhada da

variabilidade do coeficiente de atenuação para materiais heterogêneos, tais como o solo. Porém, no Brasil, não existem trabalhos científicos abordando o efeito de diferentes tamanhos de amostras e colimadores em medidas do coeficiente de atenuação do solo.

Tendo em vista que uma medida precisa do coeficiente de atenuação é necessária para uma caracterização significativa do meio material e para a determinação de parâmetros físicos onde essa informação esteja inserida, faz-se necessário uma investigação da variação do coeficiente de atenuação não apenas de materiais homogêneos, tal como foi apresentado anteriormente, mas uma descrição e entendimento desse comportamento também para materiais mais complexos, como o solo.

Portanto, o presente trabalho, tem como objetivo verificar e analisar a variação do coeficiente de atenuação de massa com o aumento da espessura de amostras de um meio poroso heterogêneo, como é o caso do solo, e com diferentes colimadores variando o ângulo sólido de varredura do feixe gama incidente, utilizando-se duas fontes de radiação gama, sendo elas  $^{241}\text{Am}$  e  $^{137}\text{Cs}$ .

Como objetivos secundários, os resultados obtidos experimentalmente para o coeficiente de atenuação do solo e da água foram comparados com resultados teóricos simulados via XCOM. Os resultados para a água tiveram por finalidade verificar se o sistema de detecção de raios gama estava funcionando adequadamente e fornecendo valores representativos de  $\mu$ .

Com o objetivo de verificar se possíveis alterações nos valores de  $\mu$  com a espessura da amostra e tamanho do colimador afetam medidas representativas de propriedades físicas do solo foram construídos mapas de variação de densidade. A partir desses mapas foram obtidos gráficos de  $\rho_s$  para cada valor distinto de  $\mu$ .

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 A RADIAÇÃO GAMA

Processos de decaimento radioativo do núcleo atômico muitas vezes resultam em um núcleo com estado energético excitado (metaestável). Este, por sua vez, cai diretamente para o estado fundamental, ou, em etapas, para níveis de energia mais baixos, através da emissão de fótons gama, que é uma radiação eletromagnética.

Um núcleo em um estado de energia excitado pode ser referido como um isômero nuclear, e a transição (ou decaimento) dos níveis energéticos mais altos para os mais baixos como transição isomérica. Os raios gama são emitidos em energias discretas correspondentes às transições de estado energético que o núcleo pode sofrer quando excitado. A energia do raio gama,  $E_\gamma$ , pode ser descrita como uma diferença nos estados energéticos dos isômeros nucleares:

$$E_\gamma = h\nu = E_1 - E_2 \quad (1)$$

onde  $h$  é a constante de Planck ( $6,62 \times 10^{-34}$  J s) e  $\nu$  a frequência da radiação dada em Hz. O produto  $h\nu$  representa a energia da radiação eletromagnética. Os termos  $E_1$  e  $E_2$  representam os níveis energéticos dos isômeros nucleares. Para o caso da fonte de  $^{137}\text{Cs}$  o termo  $E_1$  representa o nível de energia do  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  ao passo que  $E_2$  representa o do  $^{137}\text{Ba}$ .

#### 2.1.1 Principais interações da radiação gama com a matéria

A falta de carga e massa da radiação gama faz com que a sua interação e dissipação de energia na matéria seja mais tênue do que a que ocorre com as partículas alfa e beta. Consequentemente, a radiação gama tem um poder de penetração e alcance na matéria maior que essas partículas quando possuem uma mesma energia. A partícula beta possui massa e carga de um elétron ao passo que a partícula alfa representa um núcleo de hélio.

Sabe-se que ocorrem muitos processos de interação entre os fótons gama e a matéria (DAVISSON, 1955; HINE, 1967; O'KELLEY, 1962), mas somente alguns deles são

importantes para a determinação de parâmetros físicos tais como a densidade e umidade do solo. O Efeito Compton, o qual inclui absorção e espalhamento, é o principal processo de atenuação, mas o efeito fotoelétrico, produção de pares e efeito Rayleigh também podem se tornar importantes, dependendo do nível de energia.

#### 2.1.1.1 Efeito Fotoelétrico

A energia de um fóton pode ser completamente absorvida por um átomo. Sob tais circunstâncias, a energia do fóton é transferida para um elétron do átomo, sendo este liberado, resultando na formação de um íon. Conseqüentemente, a energia do elétron emitido é igual à energia do fóton incidente menos a energia de ligação do elétron. Isso é descrito pela equação do efeito fotoelétrico de Einstein:

$$E_e = h\nu - \phi \quad (2)$$

onde  $E_e$  é a energia de elétron ejetado,  $h\nu$  é a energia do fóton incidente, e  $\phi$  é a energia de ligação do elétron ou a energia necessária para remover o elétron do átomo. O elétron ejetado é idêntico à partícula beta e produz ionização (ionização secundária nesse caso) no meio circundante.

Quando um elétron de uma camada atômica mais interna K ou L é ejetado, elétrons de outras camadas caem de estados energéticos mais altos para ocupar a “vacância” resultante. Essas transições nos estados energéticos eletrônicos requerem uma liberação de energia pelos elétrons do átomo, que aparece como raios-X (baixa energia). Os raios-X possuem propriedades idênticas à radiação gama, sendo que a diferença essencial está na sua origem e energia. A radiação gama é originada das transformações de estado energético dos núcleos atômicos, enquanto que a radiação-X tem origem nas transformações de estado energético dos elétrons.

### 2.1.1.2 Efeito Compton

Este é o segundo mecanismo pelo qual um fóton gama transfere sua energia para um elétron do orbital atômico. Nessa interação, ilustrada na Figura 1, o fóton, de energia  $E_\gamma$ , transfere somente uma fração da sua energia para o elétron, e, ao fazê-lo, é defletido com energia  $E'_\gamma$  em um ângulo  $\Theta$ , enquanto o elétron colidido (recuo) é ejetado em um ângulo  $\theta$ . Essa interação é conhecida como efeito Compton e/ou espalhamento Compton. O resultado dessa interação é a formação de um íon como no caso do efeito fotoelétrico. No entanto, o fóton defletido continua viajando através da matéria até dissipar totalmente sua energia cinética pela interação com outros elétrons de uma maneira similar ou através de outros mecanismos de interação com a matéria (efeito fotoelétrico). O elétron ejetado, sendo idêntico em propriedades a uma partícula beta, perde sua energia através de ionização secundária.

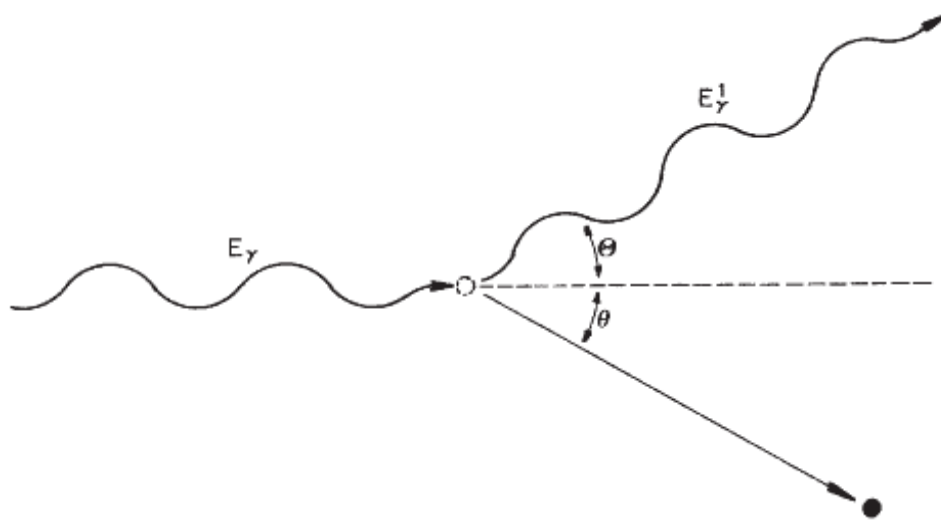


FIGURA 1 - O efeito Compton: um fóton incidente colide com um elétron atômico e transmite energia para ele, o fóton e o elétron são defletidos com ângulos  $\Theta$  e  $\theta$ , respectivamente, para a trajetória do fóton incidente.

Nosso entendimento do efeito Compton vem do trabalho original de Compton (1923), o qual descobriu que fótons de raios-X espalhados por folhas finas sofrem uma mudança no comprimento de onda. A mudança no comprimento de onda do fóton espalhado em relação ao fóton incidente foi uma função do ângulo de espalhamento  $\Theta$ . Para interpretar esse efeito, ele tratou a radiação-X como partículas de fótons ou quanta em concordância à relação Einstein-Planck,  $E = h\nu$ , e o espalhamento ocorrido da colisão fóton-elétron em algo como colisões de bolas de bilhar. Compton derivou a equação que descreve a mudança no comprimento de onda entre os fótons incidentes e espalhados e o ângulo de espalhamento como:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\Theta) \quad (3)$$

onde  $\lambda'$  e  $\lambda$  são os comprimentos de onda dos fótons defletidos e incidentes,  $m_0$  é a massa de repouso do elétron e  $c$  é a velocidade da luz.

O fóton espalhado sempre terá comprimento de onda maior (menor energia) do que o fóton incidente, devido à transferência de energia na colisão com o elétron livre.

Podemos calcular diretamente a energia do fóton espalhado Compton,  $E'_\gamma$ , se conhecermos a energia do fóton de raio gama incidente e o ângulo de espalhamento do fóton, de acordo com a equação (TAIT, 1980):

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + (E_\gamma/mc^2)(1 - \cos\Theta)} \quad (4)$$

onde  $mc^2$  é a energia de repouso do elétron (0,511 MeV).

O ângulo de deflexão do fóton é uma função da energia transmitida para o elétron. Esse ângulo pode variar de  $\Theta = 0^\circ$  para o elétron espalhado com baixa energia até um máximo de  $\Theta = 180^\circ$  para o elétron espalhado com maior energia. Os elétrons espalhados são, portanto, emitidos com energias variando entre zero e um máximo referido como “corte Compton”. O corte Compton representa o elétron espalhado com energia correspondente ao completo retroespalhamento do fóton gama, ou seja,  $\Theta = 180^\circ$ . Com  $\Theta = 180^\circ$  ( $\cos\Theta = -1$ ), a Eq. (4) se reduz a equação descrevendo a energia,  $E'_\gamma$ , do fóton de raio gama no corte Compton (em unidades de MeV):

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \left(\frac{E_\gamma}{0,511 \text{ MeV}}\right)(1 - \cos 180^\circ)} \quad (5)$$

ou

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + 2E_\gamma/0,511} \quad (6)$$

ou

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + 3,914E_\gamma} \quad (7)$$



Como um exemplo, a energia do fóton de raios gama no corte Compton para um raio gama incidente do  $^{137}\text{Cs}$  ( $E_\gamma = 0,662 \text{ MeV}$ ) é calculado de acordo com a Eq. (7), como sendo:

$$E_\gamma = \frac{0,662}{1+3,914(0,662)} = 0,184 \text{ MeV} \quad (8)$$

O espectro das energias dos fótons de espalhamento Compton contém um pico conhecido como pico de retroespalhamento. O pico de retroespalhamento surge do espalhamento Compton no detector de fótons gama [por exemplo, cristal cintilador NaI(Tl)] dos arredores dos materiais de blindagem e armazenamento. O pico de retroespalhamento ocorre com um aumento dos valores de energia (MeV) proporcionalmente com a energia do fóton incidente e se aproxima a um valor constante de 0,25 MeV, de acordo com a Eq. (7), para fótons incidentes com energias maiores que 1 MeV (TAIT, 1980). A energia do elétron Compton,  $E_e$ , pode ser descrita como:

$$E_e = E_\gamma - E'_\gamma - \phi \quad (9)$$

Como a energia de ligação do elétron atômico é relativamente pequena, a energia do elétron ejetado é essencialmente a diferença entre as energias do fóton defletido e incidente. Substituindo o valor de  $E'_\gamma$  da Eq. (4) e ignorando a energia de ligação do elétron, a energia do elétron Compton pode ser expressa como:

$$\begin{aligned} E_e &= E_\gamma - \frac{E_\gamma}{1 + \left(\frac{E_\gamma}{mc^2}\right)(1 - \cos\theta)} \\ &= E_\gamma - \frac{E_\gamma}{1 + \left(\frac{E_\gamma}{0,511 \text{ MeV}}\right)(1 - \cos\theta)} \end{aligned} \quad (10)$$

onde as energias do elétrons são dadas em MeV.

### 2.1.1.3 Produção de Pares

A produção de pares, sendo outro mecanismo de dissipação da energia gama na matéria, resulta na criação de partículas de energia gama. As partículas produzidas, sendo um elétron negativo e um pósitron (Figura 2), resultam da interação de um fóton de raios gama individual que interage com o campo coulombiano do núcleo. Conseqüentemente, esse fenômeno envolve a transformação de energia em massa. A criação de um elétron requer certa quanta de energia do fóton gama, a qual pode ser calculada com o auxílio da equação de Einstein para a equivalência de massa e energia:

$$E = m_e c^2 \quad (11)$$

De acordo com essa equação a energia do elétron (elétron negativo ou pósitron) é calculada como:

$$E = (9,109 \times 10^{-31} \text{ kg})(299.792.458 \text{ m.s}^{-1})^2 = 8,182 \times 10^{-14} \text{ J} \quad (12)$$

Definindo  $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$ , a energia de repouso do elétron em joules é convertida para elétron volts como:

$$8,182 \times 10^{-14} \text{ J} / 1,602 \times 10^{-19} \text{ J eV}^{-1} = 0,511 \text{ MeV} \quad (13)$$

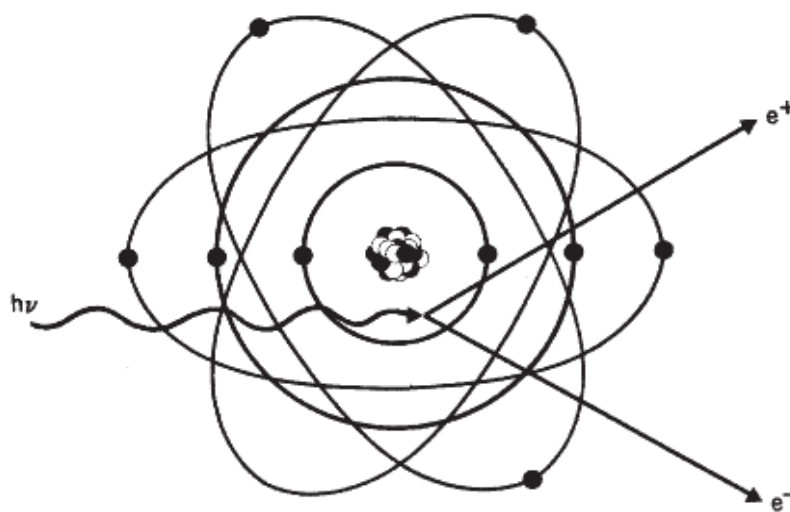


FIGURA 2 - Produção de Pares. Conversão do fóton de raio gama em um par elétron-pósitron.

Portanto, a criação de um elétron (negativo) requer uma energia mínima de 0,511 MeV. No entanto, um raio gama com energia de 0,511 MeV não pode criar sozinho um elétron negativo, já que deve haver também a criação simultânea de sua anti-partícula, o pósitron, de mesma massa e carga contrária. A energia mínima do fóton de raio gama necessária para a criação do par elétron-pósitron é, portanto:

$$E_{par} = m_{e^-}c^2 + m_{e^+}c^2 = 2mc^2 = 2.(0,511 \text{ MeV}) = 1,022 \text{ MeV} \quad (14)$$

onde  $m_{e^-}$  e  $m_{e^+}$  são as massas de repouso de elétron negativo e do pósitron, respectivamente. Logo, a absorção pela matéria da radiação gama de energia maior que 1,022 MeV pode resultar na produção de pares.

A probabilidade da produção de pares aumenta em proporção à magnitude da energia do fóton de raios gama acima de 1,022 MeV e é o mecanismo de absorção predominante para fótons com energia igual ou superior a 5 MeV. Na produção de pares, a energia excedente a 1,022 MeV aparece como energia cinética do elétron negativo e do pósitron produzidos, ou:

$$h\nu = 2mc^2 + E_{e^-} + E_{e^+} \quad (15)$$

onde  $E_{e^-}$  e  $E_{e^+}$  são as energias cinéticas do elétron negativo e pósitron produzidos.

O elétron e o pósitron, depois de produzidos no efeito de produção de pares, perdem sua energia através de ionizações e excitações, porém, o pósitron, no final de seu percurso, interage com um elétron em repouso produzindo dois quanta de radiação devido à aniquilação (Figura 3). Cada um destes dois fótons produzidos possui energia de 0,511 MeV e são resultados da transformação de massa em energia.

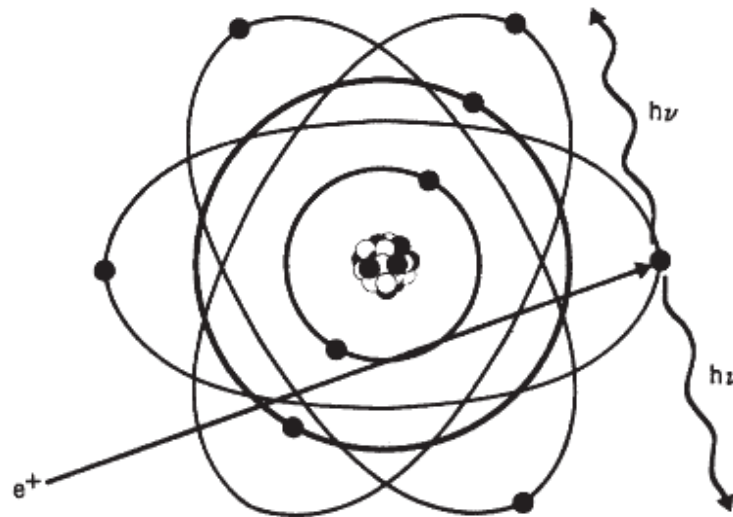


FIGURA 3 - Aniquilação. Interação entre pósitron e elétron e a conversão de suas massas em dois fótons com energia de 0,511 MeV.

## 2.2 COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO

Quando um feixe monoenergético de raios gama passa através de um material homogêneo, os fótons gama interagem com os elétrons, núcleos e campos elétricos, tornando-se espalhados ou absorvidos. Essas interações resultam em uma atenuação da intensidade,  $I_0$ , do feixe incidente de fótons. A fração ( $dI/I_0$ ) dos raios gama atenuados é diretamente proporcional a espessura do material,  $x$ , onde a constante de proporcionalidade,  $k$ , refere-se ao coeficiente de atenuação linear (CHASE E RABINOWITZ, 1968)

$$dI/I = -k dx \quad (16)$$

O coeficiente de atenuação linear, denominado  $k$  ( $\text{cm}^{-1}$ ), para uma dada energia de radiação e para um material homogêneo específico (exemplo: água líquida), é a soma de diversos coeficientes de atenuação individuais, os quais representam individualmente todos os processos de atenuação ocorridos:

$$k = k_C + k_F + k_P + k_R + \dots \quad (17)$$

onde os subscritos  $C$ ,  $F$ ,  $P$ , e  $R$  representam os efeitos Compton, Fotoelétrico, Produção de Pares e Rayleigh. Cada um desses coeficientes, tomados separadamente, representa a

probabilidade estatística para a ocorrência de cada interação individualmente. A soma de todos esses coeficientes representa a probabilidade total para atenuação dos raios gama com uma energia específica durante a transmissão através de um material específico com uma dada composição química.

O coeficiente de atenuação de raios gama pode também ser expresso como um coeficiente de atenuação de massa,  $\mu$ , que é simplesmente o coeficiente de atenuação linear ( $k$ ) dividido pela densidade ( $\rho$ ) do material absorvedor. O coeficiente denominado  $\mu$  tem unidades de  $\text{cm}^2\text{g}^{-1}$  e para uma dada energia de radiação, depende das propriedades químicas do material absorvedor. O coeficiente de atenuação de massa é geralmente independente do estado físico do material. Para muitos objetivos o uso do  $\mu$  pode ser muito mais conveniente do que  $k$ .

O coeficiente de atenuação de massa pode ser definido como a probabilidade por unidade volumétrica para um fóton de energia específica colidir com um dado absorvedor. Essa probabilidade é controlada pela natureza do absorvedor e pela energia do fóton. Para um fóton com uma dada energia, o coeficiente de atenuação de massa para um material heterogêneo, como o solo, é diretamente relacionado com a composição química do material. Por esse motivo, um  $\mu$  teórico pode ser calculado assumindo os produtos dos coeficientes de atenuação de massa e um fator peso (quantidade dos respectivos elementos químicos), pela equação:

$$\mu = \sum_{i=1}^n (M_i \mu_i) = M_1 \mu_1 + M_2 \mu_2 + \dots + M_n \mu_n \quad (18)$$

onde  $n$  é o número de diferentes elementos no absorvedor,  $M_i$  é a porcentagem do  $i$ -ésimo elemento químico no solo e  $\mu_i$  é o coeficiente de atenuação de massa para o  $i$ -ésimo elemento.

Uma determinação apropriada do coeficiente de atenuação de massa requer um pequeno desvio padrão, boa colimação do feixe de radiação, alta intensidade do feixe gama incidente, e o uso da espessura ótima da amostra. A precisão da medida de  $\mu$  depende da natureza do absorvedor. Determinações de  $\mu$  para um material puro e homogêneo, como a água, são relativamente mais simples que para materiais heterogêneos, tais como o solo.

A heterogeneidade do solo, o tamanho das partículas e a compactação da amostra dentro do recipiente que o contém, são algumas das possíveis fontes de erro. Valores experimentais baixos para o coeficiente de atenuação de massa, quando comparados aos valores teóricos, em resumo, indicam colimação e detecção pobres, e grandes magnitudes do

desvio padrão podem indicar falta de uniformidade da densidade volumétrica da amostra de solo, heterogeneidade química do material, número insuficiente de determinações ou baixa intensidade do feixe incidente de radiação gama (FERRAZ e MANSELL, 1979).

Para um dado material absorvedor, as contribuições fracionais de cada um dos vários mecanismos de absorção e espalhamento para a magnitude total do  $\mu$  é fortemente influenciada pelo nível de energia primário dos fótons gama. Por exemplo, durante interações entre fótons com 59,4 keV e água, o Efeito Compton ( $k_C/\rho$ ) contribui com cerca de 89% (81% de espalhamento Compton e 8% de absorção Compton) da atenuação total e os efeitos Fotoelétrico ( $k_F/\rho$ ) e Rayleigh ( $k_R/\rho$ ) com somente 7% e 4%, respectivamente (FERRAZ e MANSELL, 1979).

Para uma região de energia média, tal como 661,6 keV do  $^{137}\text{Cs}$ , o efeito Compton ( $k_C/\rho$ ) contabiliza 100% da atenuação total (62% devido ao espalhamento Compton e 38% devido a absorção Compton), enquanto a ocorrência de outros processos são negligenciáveis. Para fótons gama com níveis energéticos maiores que 1 MeV, a produção de pares ( $k_P/\rho$ ) pode ocorrer, mas se torna importante apenas para níveis energéticos maiores que 3 ou 4 MeV.

Sabe-se que esses processos de interação que resultam em absorção e espalhamento de fótons durante a interação com um material absorvedor específico fornecem a base para o uso da atenuação de raios gama como um excelente método para estudos de propriedades físicas da matéria.

### 2.3 LEI DE BEER-LAMBERT

A lei de atenuação de Beer-Lambert é capaz de relacionar a atenuação produzida por uma amostra às suas características físicas tais como densidade, umidade e espessura.

Quando um feixe colimado de fótons monoenergéticos com intensidade  $I_0$  é transmitido através de uma substância homogênea (Figura 4), com densidade  $\rho$  ( $\text{g cm}^{-3}$ ) e espessura  $x$  (cm), a radiação se torna atenuada em concordância com a Lei de Beer-Lambert:

$$I = I_0 e^{[-\mu\rho x]} \quad (19)$$

onde  $I$  é a intensidade transmitida e  $x$  a espessura da amostra.

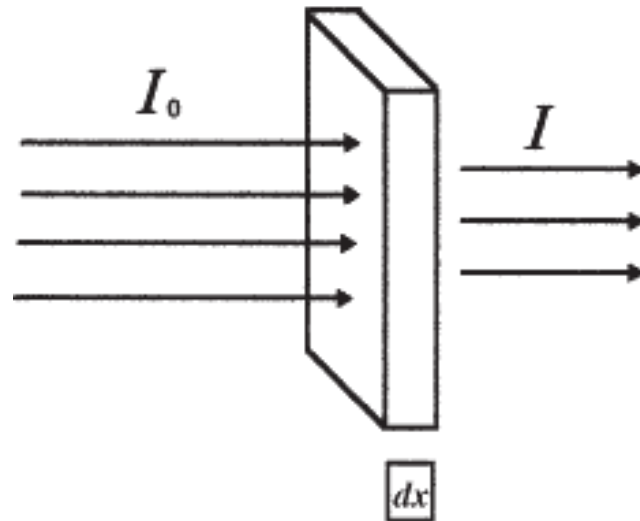


FIGURA 4 - Feixe de radiação gama com intensidade  $I_0$  atravessa o material com espessura  $dx$  sendo atenuado e resulta em um feixe com intensidade  $I$ .

Se o feixe de radiação gama for transmitido através de um material heterogêneo, como o solo, que representa um meio trifásico, a atenuação ocorrerá nos componentes que constituem esse meio poroso: suas partículas sólidas, água e ar. Desde que a atenuação da radiação gama pelo ar seja muito pequena quando comparada aquela das partículas sólidas e água, a influência do ar existente no interior do solo pode ser ignorada.

O coeficiente de atenuação linear para amostras de solo é dado por  $k = \mu_s \rho_s + \mu_a \rho_a$  (STROOSNIJDER e DE SWART, 1974; FERRAZ e MANSELL, 1979) e a expressão da Lei de Beer-Lambert é escrita como segue:

$$\frac{I_0}{I} = e^{(\mu_s \rho_s + \mu_a \rho_a \theta)x} \quad (20)$$

onde  $\mu_s$  é o coeficiente de atenuação de massa para o solo seco,  $\mu_a$  o coeficiente de atenuação de massa para a água,  $\rho_a$  a densidade da água,  $\rho_s$  e  $\theta$  a densidade do solo seco e a umidade volumétrica do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ), respectivamente.

Para a medida do coeficiente de atenuação de massa da água a lei de Beer-Lambert fica:

$$\mu_a = \frac{1}{x \rho_a} \ln \left( \frac{I_0}{I} \right) = \frac{1}{x} \ln \left( \frac{I_0}{I} \right) \quad (21)$$

onde  $\rho_a$  será considerada igual a  $1 \text{ g cm}^{-3}$ .

Para a medida do coeficiente de atenuação de massa do solo, pode-se utilizar um solo seco em estufa; porém, essa prática pode acarretar em mudanças em seus constituintes. Desta forma, recomenda-se utilizar um solo seco ao ar. Na medida do coeficiente de atenuação de massa para o solo estão inseridas informações a respeito da densidade do solo ao longo da secção transversal cruzada pelo feixe gama.

No processo de interação dos fótons gama com uma amostra de solo, a radiação será absorvida pelas partículas sólidas do meio e também pela água – umidade residual ( $\theta_r$ ) – contida na amostra. A expressão para o coeficiente de atenuação de massa do solo oriunda da lei de Beer-Lambert é dada por:

$$\mu_s = \frac{1}{x\rho_s} \left[ \ln \left( \frac{I_0}{I} \right) - x\mu_a\rho_a\theta_r \right] \quad (22)$$

onde  $\rho_s$  é a densidade do solo,  $I_0$  é a intensidade do feixe incidente na amostra de solo de espessura  $x$  e  $I$  é a intensidade do feixe transmitido do solo.

A utilização do método de atenuação de raios gama para a determinação da umidade ( $\theta$ ) de amostras de solo não expansivas, ou seja, solos que não apresentam mudança na densidade com a umidade é obtida a partir da solução da equação:

$$\theta = \frac{1}{x\mu_a\rho_a} \left[ \ln \left( \frac{I_0}{I} \right) - x\mu_s\rho_s \right] \quad (23)$$

Esse método implica na necessidade de uma determinação precisa dos coeficientes de atenuação  $\mu_s$  e  $\mu_a$ , com a vantagem de ser um método não destrutivo de análise.

#### 2.4 ERROS ATRIBUÍDOS ÀS MEDIDAS DOS COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO DA ÁGUA E DO SOLO

A partir da propagação de erros da Eq. (21) é possível obter uma estimativa do erro de  $\mu_a$ , dada por:

$$d\mu_a = \left( \frac{\partial\mu_a}{\partial x} \right) dx + \left( \frac{\partial\mu_a}{\partial\rho_a} \right) d\rho_a + \left( \frac{\partial\mu_a}{\partial I_0} \right) dI_0 + \left( \frac{\partial\mu_a}{\partial I} \right) dI \quad (24)$$



Considerando o valor da densidade da água constante e exato, obtêm-se as seguintes soluções das derivadas:

$$\frac{\partial \mu_a}{\partial \rho_a} = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial \mu_a}{\partial x} = -\frac{1}{x^2 \rho_a} \ln \left( \frac{I_0}{I} \right) \quad (26)$$

$$\frac{\partial \mu_a}{\partial I} = -\frac{1}{x \rho_a I} \quad (27)$$

$$\frac{\partial \mu_a}{\partial I_0} = \frac{1}{x \rho_a I_0} \quad (28)$$

Substituindo essas derivadas parciais na Eq. (24), obtemos:

$$d\mu_a = \left[ -\frac{1}{x^2 \rho_a} \ln \left( \frac{I_0}{I} \right) \right] dx + \left( \frac{1}{x \rho_a I_0} \right) dI_0 + \left( -\frac{1}{x \rho_a I} \right) dI \quad (29)$$

Considerando uma medida absoluta de x, temos:

$$d\mu_a = \left( \frac{1}{x \rho_a I_0} \right) dI_0 + \left( -\frac{1}{x \rho_a I} \right) dI \quad (30)$$

Sendo  $dI \cong \sqrt{I}$ , temos que:

$$\frac{dI}{I} = \frac{\sqrt{I}}{I} = \frac{1}{\sqrt{I}} \longrightarrow \frac{dI}{I} = \frac{1}{\sqrt{I}} \quad (31)$$

Logo,

$$d\mu_a = \frac{1}{x \rho_a \sqrt{I_0}} - \frac{1}{x \rho_a \sqrt{I}} \longrightarrow d\mu_a = \frac{\sqrt{I} - \sqrt{I_0}}{x \rho_a \sqrt{I I_0}} \quad (32)$$

Reescrevendo a Eq. (32) temos, portanto, o erro do coeficiente de atenuação de massa da água:

$$d\mu_a = \frac{1}{x \rho_a} \left[ \frac{\sqrt{I_0}}{I_0} - \frac{\sqrt{I}}{I} \right] \quad (33)$$

A partir da propagação de erros da Eq. (22), é possível obter o erro do coeficiente de atenuação de massa do solo, utilizando-se do mesmo procedimento realizado para a determinação do erro do coeficiente de atenuação de massa da água, onde os termos mais relevantes para esse cálculo estão relacionados com a espessura do recipiente ( $x$ ), taxa de contagem inicial ( $I_0$ ) e taxa de contagem final ( $I$ ):

$$d\mu_s = \left(\frac{\partial\mu_s}{\partial x}\right) dx + \left(\frac{\partial\mu_s}{\partial I_0}\right) dI_0 + \left(\frac{\partial\mu_s}{\partial I}\right) dI \quad (34)$$

Considerando a medida de  $x$  como absoluta, obtêm-se os seguintes resultados da resolução das demais derivadas da equação acima:

$$\frac{\partial\mu_s}{\partial I} = -\frac{1}{x\rho_s I} \quad (35)$$

$$\frac{\partial\mu_s}{\partial I_0} = \frac{1}{x\rho_s I_0} \quad (36)$$

Fazendo as substituições e aproximações da mesma forma que para o  $\mu_a$ , obtemos a equação que fornece o erro do coeficiente de atenuação de massa do solo:

$$d\mu_s = \frac{1}{x\rho_s} \left[ \frac{\sqrt{I_0}}{I_0} - \frac{\sqrt{I}}{I} \right] \quad (37)$$

## 2.5 SISTEMA DE DETECÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA (CADEIA NUCLEAR)

Para que seja possível determinar a atenuação produzida por amostra de qualquer material pela técnica de atenuação de raios gama, é necessário detectar as intensidades da radiação gama  $I$  e  $I_0$ , e para isso, utiliza-se um sistema chamado cadeia nuclear (Figura 5):

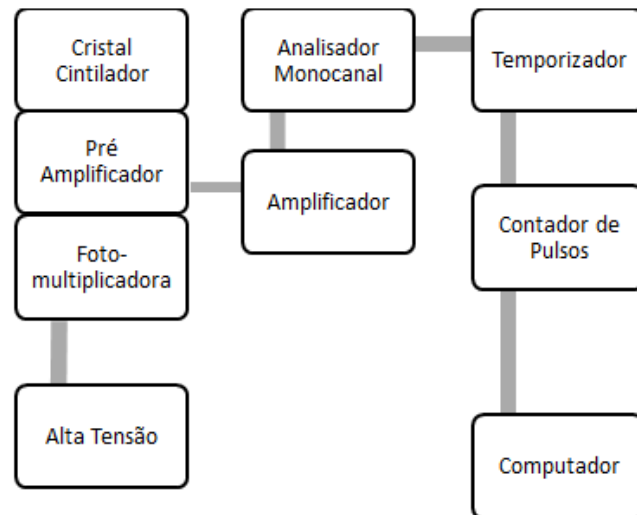


FIGURA 5 - Diagrama do sistema de detecção da radiação gama (cadeia nuclear).

O sistema de detecção de radiação gama é um equipamento que se baseia na propriedade de que determinados materiais apresentam cintilação ou fluorescência quando expostos à radiação ionizante. Um exemplo deste tipo de material é dado pelo detector de NaI(Tl) (Iodeto de Sódio dopado com Tálcio).

Através dos mecanismos de interação da radiação com a matéria, elétrons do interior do cristal cintilador são elevados a estados de maior energia decaindo aos estados de menor energia muito rapidamente. No processo de transição aos níveis de menor energia são emitidos fótons com frequências situadas na faixa de luz visível do espectro eletromagnético.

Os pulsos luminosos gerados da interação da radiação com o material que compõe o cristal possuem intensidades proporcionais à energia da radiação incidente no cristal cintilador. Um amplificador associado a uma válvula fotomultiplicadora faz com que estes pulsos luminosos sejam transformados em pulsos elétricos, que podem ser discriminados através da utilização de um analisador monocanal. Um contador identifica os pulsos discriminados no analisador monocanal e os contabiliza num intervalo de tempo determinado por um temporizador.

## 2.6 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX)

A técnica de Fluorescência de Raios-X pode ser utilizada na análise elementar (química) de amostras de materiais homogêneos ou heterogêneos.

Raios-X são radiações eletromagnéticas com comprimento de onda entre 0,1 a 100 Å, produzidas pela desaceleração de elétrons de alta energia (radiação de Bremsstrahlung) e/ou transições de elétrons nas órbitas mais internas dos átomos. A interação de fótons de raios-X com a matéria em diversos níveis de energia é devido a quatro processos elementares: absorção fotoelétrica, espalhamento incoerente, espalhamento coerente e produção de pares, mas, na faixa de energia considerada neste estudo, a produção de pares não é possível.

A fluorescência de raios-X (FRX) é uma técnica não destrutiva que permite uma análise qualitativa de uma dada amostra, possibilitando identificar e estabelecer a proporção em que cada elemento químico se encontra presente. A região espectral de interesse na espectroscopia de fluorescência de raios-X é de 0,1 Å ( $UK\alpha$ ) a 20 Å ( $FK\alpha$ ) ou 113 Å ( $BeK\alpha$ ), onde os termos entre parênteses representam as transições atômicas (Figura 6).

Esta técnica se baseia em uma fonte de raios-X, composta por um tubo a vácuo que acelera elétrons termiônicos emitidos por um filamento (cátodo), com uma voltagem na faixa de kV, em direção a um material alvo (anodo) que contém um metal pesado [Tungstênio (W), Ródio (Rh), etc.]. Quando os elétrons são desacelerados neste material ocorre a emissão de raios-X. Estes raios-X possuem um espectro contínuo e o espectro discreto do material contido no anodo. Os raios-X são emitidos sobre os átomos de uma amostra que tem seus elétrons excitados e quando estes retornam aos níveis de menor energia emitem raios-X com linhas espectrais características do material contido na amostra. Por fim é feita a detecção e a obtenção do espectro de fluorescência.

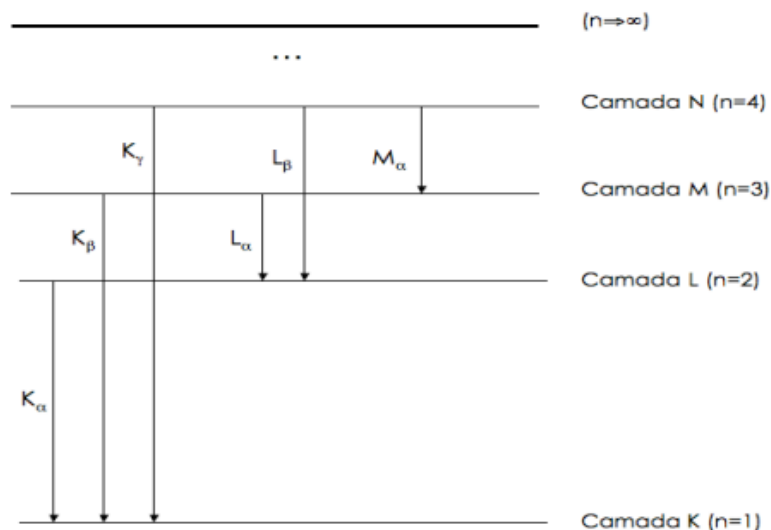


FIGURA 6 – Transições atômicas de Raios-X.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 COLETA E PREPARO DAS AMOSTRAS

As amostras de solo foram coletadas em áreas experimentais situadas nas fazendas Areão e Sertãozinho (22°4'S, 47°34'O, 580 m acima do nível do mar) pertencentes à Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz (ESALQ), situadas em Piracicaba, no Estado de São Paulo.

As amostras deformadas foram coletadas em solos com texturas distintas: 1) franco-arenosa (770 g kg<sup>-1</sup> areia, 50 g kg<sup>-1</sup> silte, 180 g kg<sup>-1</sup> argila) e 2) argilo-siltosa (240 g kg<sup>-1</sup> areia, 330 g kg<sup>-1</sup> silte, 430 g kg<sup>-1</sup> argila). O solo arenoso (solo 1) foi classificado como um Latossolo Vermelho-Amarelo e o argiloso (solo 2) como um Nitossolo Vermelho de acordo com a classificação da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (EMBRAPA, 1997; 2006). As amostras foram coletadas com uma pá na camada superficial (0-10 cm) após raspagem da vegetação existente na superfície do solo.

No procedimento de preparo as amostras foram secadas em estufa a 105°C por um período de 2 dias e passadas em peneira com malha de 1 mm de abertura. Pedras e raízes existentes foram removidas durante o peneiramento. A passagem em peneira de 1 mm foi realizada com o intuito de se obter um preenchimento mais homogêneo das amostras nos recipientes de acrílico usados nas medidas do coeficiente de atenuação do solo.

Após o peneiramento das amostras e durante os testes experimentais as mesmas foram mantidas em recipientes contendo sílica-gel com o intuito de se manter a umidade das amostras a menor possível.

#### 3.2 ANÁLISE ELEMENTAR

A análise elementar das amostras foi realizada no Laboratório de Física Aplicada à Solos e Ciências Ambientais, pertencente do Departamento de Física da UEPG, utilizando-se de um espectrômetro de fluorescência de raios-X com energia dispersiva, marca Shimadzu, modelo EDX-720.

Este equipamento possui em seu tubo o elemento Ródio (Rh) como alvo (Figura 7), sua voltagem (V) varia de 5 a 50 kV e o filamento opera com correntes de 1 a 1000 µA.

Utiliza como detector um semiconductor de Si(Li) que funciona com resfriamento à  $-196^{\circ}\text{C}$  por nitrogênio líquido. Possui filtros primários de Zr, Ni, Ti e Al. As medidas podem ser realizadas tanto em ar como em vácuo e as amostras podem ser sólidas, líquidas ou em pó.



FIGURA 7 - Configuração do tubo de raios X e seus respectivos espectros característicos e contínuos.

As amostras de solo foram moídas em almofariz e colocadas em recipientes próprios fornecidos pelo fabricante do equipamento. Nas partes inferior e superior do porta amostra foram inseridos “mylar” de  $6\ \mu\text{m}$  de espessura. Foram preparadas cinco amostras de cada solo para as medidas experimentais. A quantidade de solo (aproximadamente 2 g) colocada em cada porta-amostra foi praticamente à mesma para todas as repetições.

O espectro de FRX foi obtido para cada amostra em um tempo de 100 s [na faixa de energia do Sódio ao Escândio (Na-Sc), com voltagem de 15 kV] e 100 s [do Titânio ao Urânio (Ti-U), com voltagem de 50 kV] em pressão abaixo de 30 Pa (vácuo) para aumentar a resolução dos espectros. A análise foi realizada no modo “quali-quant”, obtendo a intensidade das linhas de emissão em função da energia (keV), de uma forma automatizada (não necessitando fazer a substituição da amostra a cada análise).

### 3.3 ESPECTRÔMETRO GAMA

#### 3.3.1 Mesa de medidas

O espectrômetro gama usado está situado no Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), da Universidade de São Paulo (USP) em Piracicaba – SP. A mesa de medidas é composta de um castelo de chumbo que contém, em uma de suas extremidades, uma fonte radioativa de  $^{137}\text{Cs}$  com um período de meia vida ( $T_{1/2}$ ) de 30 anos e, na outra extremidade, uma fonte de  $^{241}\text{Am}$  com um período de meia vida ( $T_{1/2}$ ) de 458 anos. A energia do fóton

gama ( $E_\gamma$ ) proveniente da fonte de  $^{137}\text{Cs}$  é de 661,6 keV, sendo que essa fonte possui uma atividade de aproximadamente 11,1 GBq (300 mCi). A energia do fóton gama ( $E_\gamma$ ) proveniente da fonte de  $^{241}\text{Am}$  é de 59,54 keV e sua atividade é de aproximadamente 7,4 GBq.

O castelo de Chumbo (Pb) (Figura 8) onde se encontram as duas fontes radioativas está fixado sobre um trilho que permite o seu movimento linear ao longo da mesa. Também é possível realizar o movimento de rotação do castelo de chumbo sobre o seu próprio eixo, a fim de seleccionar a fonte radioativa de interesse.



FIGURA 8 - Castelo de chumbo contendo as fontes radioativas de  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{241}\text{Am}$ , localizadas nas suas extremidades.

A fonte de  $^{137}\text{Cs}$  está fixada no interior do castelo ao passo que a fonte de  $^{241}\text{Am}$  pode ser removida para posteriormente ser encaixada junto à fonte de Cs-137. Isso geralmente ocorre quando se deseja um feixe com duas energias. Sobre a mesa, está fixada uma estrutura cilíndrica também móvel onde é encaixado um detector de iodeto de sódio ativado com tálio, NaI(Tl), do tipo plano com dimensões de 7,62x7,62 cm (3x3 polegadas) (Figura 9).



FIGURA 9 - Mesa de medidas. Sobre o trilho encontra-se o castelo de chumbo contendo as fontes radioativas. Os blocos de Pb são utilizados para a blindagem do castelo e do detector.

O detector de NaI(Tl) é revestido por um castelo cilíndrico de alumínio e blocos de chumbo são colocados ao seu redor (Figura 10). A blindagem de chumbo é exigida para a minimização da detecção de fótons não provenientes das fontes radioativas, ou seja, radiação de fundo (*background*). Acoplado ao detector, encontra-se uma válvula fotomultiplicadora e um pré-amplificador.



FIGURA 10 - Mesa de medidas contendo o castelo de chumbo com as fontes radioativas e a blindagem de Pb sobre o detector.

Há ainda na mesa de medidas um sistema que permite a movimentação vertical das amostras (Figura 11), para isso, faz-se necessário a utilização de uma manivela.





FIGURA 11 - Arranjo contendo fonte, amostra e detector blindado. Abaixo da amostra é possível observar o equipamento que permite a movimentação vertical da amostra.

Como o castelo de chumbo, contendo as fontes radioativas, e o detector estão fixados em trilhos, é possível variar as suas posições conforme cada situação experimental. Geralmente a movimentação ocorre com a fonte para se evitar a retirada da blindagem de Pb que envolve o detector. Por exemplo, durante a utilização de uma fonte radioativa com fótons gama de baixa energia, como é o caso do  $^{241}\text{Am}$ , é interessante uma distância não muito grande entre a fonte e o detector, sobretudo se a amostra pelo qual o feixe irá interagir possuir grande densidade.

Acoplados à fonte e à estrutura onde se encaixa o detector estão os colimadores. Na entrada do detector está fixado um colimador com diâmetro de 4,5 mm, enquanto que na saída da fonte podem ser acoplados colimadores com diferentes diâmetros (Figura 12). A colimação entre a fonte e o detector é importante porque pode minimizar erros atribuídos nas medidas experimentais. Sistemas mal colimados podem possibilitar a detecção de fótons espalhados como se fossem transmitidos (OCHIANA, 1994; BRAR et al., 1998). Portanto, uma boa colimação é sempre necessária para a realização de medidas mais precisas na utilização do método de atenuação da radiação gama.



FIGURA 12 - Colimadores circulares de diferentes diâmetros, utilizados na colimação da saída da fonte.

### 3.4 CADEIA NUCLEAR

As intensidades de radiação gama ( $I$  e  $I_0$ ) utilizadas na determinação da atenuação produzida pelas amostras de solo são determinadas através de um sistema chamado de cadeia nuclear. O equipamento de detecção de raios gama é baseado na propriedade de que determinados materiais apresentam cintilação ou fluorescência quando expostos à radiação ionizante. Um exemplo deste tipo de material é o detector de NaI(Tl).

O NaI(Tl) usado nesse trabalho é da marca ORTEC e consiste em um cristal que possui características fotoluminescentes. Acoplado ao detector, encontra-se uma válvula fotomultiplicadora (ORTEC, modelo 276). Quando é atingido por fótons de raios-X ou gama, o cristal de NaI(Tl) possui a característica de detectá-los. Estes fótons perdem suas energias de sucessivas excitações, produzindo cintilações no interior do cristal e resultando na emissão de luz na faixa do visível ou do ultravioleta.

A luz proveniente da interação do fóton com as substâncias luminescentes que compõem o cristal pode alcançar o fotocatodo da fotomultiplicadora provocando um impulso elétrico. Desta forma, a energia proveniente do fóton resultante da interação da radiação com o cristal é transferida para o elétron que será arrancado do fotocatodo.

A estrutura da fotomultiplicadora é constituída de vários dinodos que estão conectados a potenciais de tensão positivos crescentes. São estas diferenças de potenciais de tensão que

serão responsáveis pela aceleração dos elétrons, que, por sua vez, irão colidir com os dinodos provocando a emissão de elétrons secundários, e estes, colidirão posteriormente com os dinodos seguintes, provocando na saída da fotomultiplicadora uma grande quantidade de elétrons. Estes elétrons são coletados por um anodo que será responsável pela produção de um sinal elétrico referente à cintilação que foi produzida pela radiação incidente no cristal.

A alimentação da fotomultiplicadora é feita através de uma fonte de alta tensão (ORTEC, modelo 556) com uma tensão de saída entre 50 e 3000 V. Uma vez que os elétrons produzidos no fotocatodo precisam ser atraídos para os dinodos, estes precisam estar alimentados com um determinado valor de tensão. Para um bom funcionamento da fotomultiplicadora geralmente a tensão de trabalho recomendada está em torno de +900 V e essa foi a tensão usada nesse trabalho.

O próximo módulo da cadeia nuclear é o amplificador (ORTEC, modelo 572) que se encontra conectado na saída do pré-amplificador. O amplificador permite um ganho de até 1500 vezes com um ganho fino que pode ser ajustado entre 0,5 a 1,5. O sinal que inicialmente é produzido no anodo é convertido em pulsos lineares com amplitudes e formas que contém informações do processo que os originou. Esse sinal é primeiramente amplificado através de um pré-amplificador que funciona como uma interface entre o detector e a eletrônica que será utilizada para a análise dos pulsos, e depois, no amplificador, o sinal sofre um novo aumento adquirindo uma maior amplitude e forma para ser analisado.

Conectado ao amplificador se encontra o analisador monocanal (ORTEC, modelo 550A) que permite a obtenção de um espectro de energias para uma fonte de radiação gama. O analisador possui quatro modos básicos de operação: integral, normal, janela assimétrica e janela simétrica. O procedimento para a obtenção de um espectro gama consiste em se fazer registros seguidos de contagens que passaram pelo monocanal em intervalos de tempo pré-determinados. O modo de operação assimétrica é geralmente o utilizado para o levantamento dos espectros, pois permite marcar um intervalo invariável no discriminador para o nível superior (0V até 1V) e para o nível inferior (+20mV até +10V). Esses dois discriminadores permitem realizar modificações nas “janelas” em cada medida até a discriminação de todas as amplitudes dos pulsos. Depois de obtido o espectro gama, é possível definir a “janela” com a qual se deseja trabalhar selecionando regiões do espectro com valores de energias determinadas.

Os pulsos que foram discriminados na “janela” do analisador monocanal são convertidos em contagens em um tempo que pode ser definido para cada situação experimental. Esta contagem e o seu tempo são obtidos através de um temporizador e

contador de pulsos (ORTEC, modelo 994) que contém dois canais para as contagens e um para a medida de tempo. A capacidade de contagem do contador é de oito dígitos (0 até 99,999,999) e o temporizador, que é responsável pelo início e término da obtenção de dados, permite definir tempos de contagens de até  $90 \times 10^4$  minutos.

Todos os módulos da eletrônica estão acoplados em um bastidor bin (Figura 13), modelo 4001A da ORTEC, e, através do uso de um microcomputador IBM-PC é possível fazer o controle e estabelecimento dos parâmetros de funcionamento do módulo temporizador-contador.



FIGURA 13 - Componentes que constituem a eletrônica do espectrômetro gama. Da esquerda para a direita: amplificador, temporizador/contador, fonte de alta tensão, e analisador monocanal. Todos esses módulos se encontram acoplados a um bastidor bin.

### 3.5 LEVANTAMENTO DOS ESPECTROS

Foram levantados espectros da radiação diários durante todo o procedimento experimental o que permitiu ajustar as janelas do fotopico nos períodos de medida. Os espectros foram levantados usando o modo de janela assimétrica e selecionando-se um intervalo de valores de voltagem (4,0 a 6,1 V, dependendo da fonte utilizada) sempre maior do que a janela do fotopico obtida para os espectros dos dois radioisótopos. O primeiro espectro completo levantado para o  $^{137}\text{Cs}$  (4,7 a 6,1 V) e para o  $^{241}\text{Am}$  (4,0 a 5,8 V) foi usado como referência para a marcação dos fotopicos.

Para as medidas dos espectros utilizou-se, acoplado à saída do castelo de chumbo contendo as fontes radioativas, tanto para a fonte de  $^{241}\text{Am}$  quanto para o  $^{137}\text{Cs}$ , um colimador

circular possuindo 2 mm de diâmetro, sendo estabelecido um tempo de contagem de 30 s, onde a distância entre a fonte e o detector permaneceu sempre a mesma, nesse caso com o feixe livre (sem amostra), de 23 cm. Para o  $^{241}\text{Am}$ , o ganho da fotomultiplicadora é de 800x, enquanto que para o  $^{137}\text{Cs}$ , 100x.

Os espectros foram levantados tanto para o feixe livre como para cada uma das espessuras das amostras. Esse procedimento foi realizado com o intuito de se analisar o efeito da espessura das amostras na posição do fotopico. O tempo de contagem foi mantido em 30 s ( $^{137}\text{Cs}$ ) e 60 s ( $^{241}\text{Am}$ ) para o levantamento dos novos espectros quando o feixe atravessava as amostras de diferentes diâmetros.

O critério usado para a escolha do fotopico foi sempre selecionar 0,4 V a mais ou menos nos pontos C e D que representam o início de comportamento assintótico de delineamento do fotopico (Figura 14). O intervalo de tensão (janela) usado para cada um dos valores experimentais de contagem obtido durante o levantamento do espectro foi de 0,2 V.

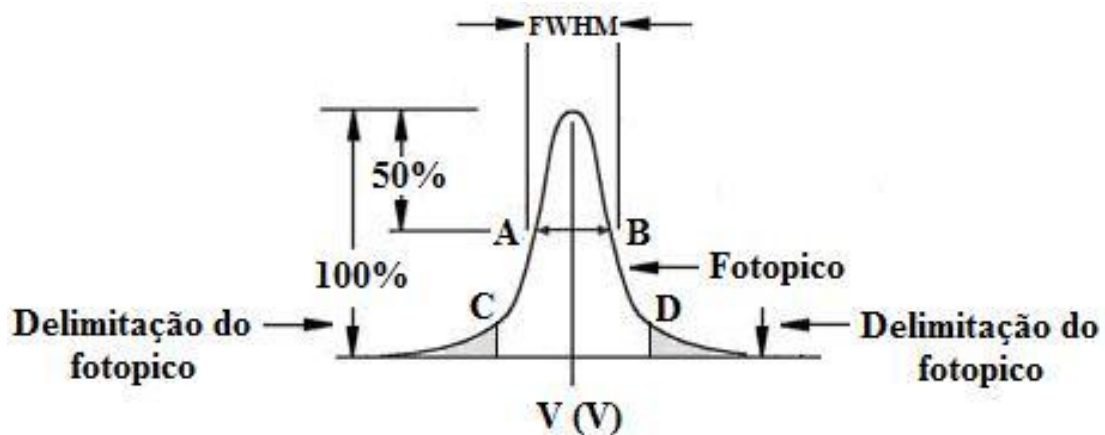


FIGURA 14 - Exemplo de fotopico e delimitação da região para escolha do mesmo. FWHM (“Full width at half maximum”) representa à largura total a meia altura.

### 3.6 BACKGROUND

O monitoramento da radiação de “background” da sala foi realizado diariamente com um tempo de contagem igual ao tempo de contagem das medidas realizadas na obtenção do coeficiente de atenuação de massa, sendo 1200 s para a fonte de  $^{241}\text{Am}$  e 600 s para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$ . Para essa medida, a saída da fonte foi bloqueada com um colimador “cego” e com um bloco de Pb de 10 cm de espessura, e apenas os fótons provenientes da radiação de “background” foram contabilizados.



### 3.7 MONTAGEM DO EXPERIMENTO E MEDIDAS DO COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO

Foram utilizados 4 colimadores (1, 2, 3 e 4 mm de diâmetro) e 14 recipientes (2-15 cm de espessura) nas medidas do coeficiente de atenuação de massa para cada solo. Os recipientes usados para comportar as amostras foram confeccionados em acrílico e vedados com silicone (Figura 15). Cada recipiente de acrílico possuía bordas de 0,5 cm de espessura, com larguras e alturas praticamente fixas (Tabela 1). Portanto, a única variável durante as medidas experimentais foram as espessuras das amostras.



FIGURA 15 - Arranjo experimental: Castelo de chumbo contendo as fontes radioativas, caixa de acrílico com amostra de espessura  $x$ , e cilindro de chumbo contendo o detector. O canto inferior da figura mostra uma visão panorâmica do recipiente que contém a amostra.

TABELA 1 - Dimensões dos recipientes de acrílico confeccionadas para comportar as amostras.

caixa	largura (mm)	altura (mm)	espessura ( $x$ ) (mm)
1	70,57	65,21	<b>20,32</b>
2	69,99	65,51	<b>30,35</b>
3	70,29	65,03	<b>40,32</b>
4	70,38	65,24	<b>50,04</b>
5	70,56	65,33	<b>60,27</b>
6	70,32	65,60	<b>70,15</b>
7	70,28	65,14	<b>80,39</b>
8	70,40	65,27	<b>90,26</b>
9	70,84	65,18	<b>100,17</b>
10	70,36	65,17	<b>110,27</b>
11	70,38	65,16	<b>120,27</b>
12	70,60	65,10	<b>130,10</b>
13	70,11	65,28	<b>140,25</b>
14	70,06	64,82	<b>150,14</b>

As medidas experimentais do  $\mu$  foram feitas primeiramente para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$ , selecionando-se o colimador de 1 mm, e seguindo a ordem crescente das espessuras das amostras do solo 1. Na sequência, o mesmo procedimento foi feito para o solo 2. Em seguida, foi selecionado o colimador de 2 mm e realizada novamente as contagens na ordem crescente das espessuras para ambos os solos. Esse mesmo procedimento foi realizado para os colimadores de 3 e 4 mm, e posteriormente para a fonte de  $^{241}\text{Am}$  seguindo a mesma ordem crescente de espessura da amostra e tamanho do colimador.

Antes de fazer a contagem usando a amostra de solo, foi necessário fazer a medida do feixe atenuado apenas pelo recipiente, medida essa que se refere ao  $I_0$ . Em seguida, fez-se a contagem do  $I$ , onde o recipiente está preenchido com a amostra de solo. A janela fixada para essa medida foi ajustada de acordo com o espectro levantado sem a amostra.

Durante a realização das medidas, cada caixa foi posicionada logo a frente da saída da fonte, encostada ao colimador, de tal forma que o feixe atravessasse aproximadamente o centro da amostra e ortogonalmente a esta posição (Figura 15). A distância entre a fonte e o detector foi mantida a mesma durante todas as medidas, tanto para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$  quanto para a fonte de  $^{241}\text{Am}$ .



FIGURA 16 - Arranjo experimental. Da esquerda para direita: detector blindado com chumbo, recipiente contendo a amostra, castelo de chumbo com fonte radioativa.

Devido ao longo tempo consumido para o levantamento dos espectros e para as medidas experimentais optou-se por somente uma medida de contagem tanto para  $I_0$  quanto para  $I$ . Portanto, os desvios experimentais apresentados nos resultados desse experimento se referem à propagação de erros de  $\mu$  e não devido a repetições (desvio padrão da média).

Como um dos objetivos desse trabalho era analisar o efeito da espessura das amostras nas medidas de  $\mu$ , para um determinado solo, todos os recipientes foram preenchidos de modo que as densidades das amostras fossem mantidas praticamente constantes ao longo do experimento (Tabela 2). Isso é importante na comparação do efeito das diferentes espessuras de amostras nas medidas de  $\mu$ .

TABELA 2 – Densidade das amostras de solo. A média se refere aos valores obtidos para todas as caixas, para os colimadores de 1 a 4 mm e para ambos os solos. CV é o coeficiente de variação. Na parte superior estão os valores obtidos para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$  e na parte inferior para o  $^{241}\text{Am}$ .

$^{137}\text{Cs}$								
colimador	1 mm		2 mm		3 mm		4 mm	
solo	arenoso	argiloso	arenoso	argiloso	arenoso	argiloso	arenoso	argiloso
$\rho_s$ (g cm <sup>-3</sup> )								
média	1,39±0,02	1,23±0,01	1,39±0,01	1,24±0,01	1,39±0,01	1,23±0,01	1,39±0,02	1,24±0,01
CV	1,33	1,07	0,97	1,07	0,68	1,03	1,19	0,82
$^{241}\text{Am}$								
colimador	1 mm		2 mm		3 mm		4 mm	
solo	arenoso	argiloso	arenoso	argiloso	arenoso	argiloso	arenoso	argiloso
$\rho_s$ (g cm <sup>-3</sup> )								
Média	1,39±0,02	1,23±0,01	1,39±0,01	1,24±0,01	1,39±0,02	1,24±0,01	1,39±0,02	1,24±0,01
CV	1,33	1,07	0,96	1,07	1,10	0,9	1,12	1,01

O tempo de contagem selecionado para a fonte de  $^{241}\text{Am}$  foi de 1200 s e para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$  de 600 s. O menor tempo selecionado para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$  se deve a maior atividade da fonte desse radioisótopo e também a maior energia dos fótons gama emitidos.

Com o intuito de se verificar a eficiência do sistema de atenuação de raios gama para as medidas experimentais foram ainda realizadas medidas de coeficiente de atenuação de massa da água para os mesmos 14 recipientes usados para os solos. Os resultados experimentais do  $\mu$  da água foram comparados com resultados teóricos simulados via programa livre XCOM (BERGER et al., 1987; HUBBEL & SELTZER, 1995), que é um software livre disponível na internet. O mesmo procedimento foi feito para os solos.

Para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$ , o colimador usado foi o de 2 mm, e o tempo de contagem igual a 600 s, enquanto que para a fonte de  $^{241}\text{Am}$ , o colimador e o tempo de contagem foram 4 mm e 1200 s, respectivamente. Para cada espessura, ou seja, cada um dos recipientes, primeiramente foi medida a intensidade do feixe atenuado pelo próprio recipiente, e em seguida preenchido com água, para então ser feita a contagem do feixe atenuado também pela água.



### 3.8 IMAGENS TOMOGRÁFICAS

Para gerar as imagens tomográficas foram utilizadas amostras de solo indeformadas. O tomógrafo utilizado é constituído de um sistema de varredura de primeira geração de raios gama, com arranjo fonte e detector fixos. As fontes de raios gama usadas foram de  $^{241}\text{Am}$  (7,4 GBq) e  $^{137}\text{Cs}$  (11,1 GBq). A detecção dos fótons gama foi feita por um detector de cintilação sólida de NaI(Tl) do tipo plano com dimensões de 7,62 x 7,62 cm.

Na saída da fonte e na entrada do detector foram fixados colimadores de chumbo de 1 mm (fonte) e 4,5 mm (detector) de diâmetro para evitar que fótons espalhados de menor energia (secundários) fossem detectados (fator "build up"). Os passos angulares foram de 2,25° até ser alcançada uma rotação completa de 180°.

Os passos lineares foram 0,11 cm (ambas as fontes) para a matriz selecionada de 80 x 80 pontos para se obter a melhor resolução possível. Para uma melhor descrição do sistema tomográfico usado nesse estudo pode ser consultado o trabalho de Crestana et al. (1992).

Na etapa de reconstrução das imagens foi utilizado o programa Microvis (2000), desenvolvido pela EMBRAPA/CNPDIA (São Carlos, SP). Nas imagens os pontos claros representam os maiores valores de densidade e os pontos escuros os menores. A calibração do tomógrafo foi obtida por meio da correlação linear entre os  $\kappa$  e as unidades tomográficas (UTs) de diferentes materiais homogêneos (Crestana et al., 1992).

Para as medidas de  $\kappa$  das amostras usadas na calibração foram selecionadas cinco regiões diferentes das amostras para serem cruzadas pelo feixe de radiação e fizeram-se três repetições de contagens para cada região durante um tempo de 1 minuto. O valor médio de  $\kappa$  para cada material homogêneo é que foi usado na construção do gráfico de calibração. O valor de UT médio para cada material homogêneo foi obtido considerando-se uma matriz de dados (por exemplo, 20x20) selecionada no centro da matriz total de dados (80x80).

A varredura das amostras coletadas nos cilindros foi feita passando-se o feixe de radiação exatamente no centro da amostra com a mesma posicionada inicialmente com o feixe passando ortogonal a sua área da base. Após a finalização da varredura e após reconstrução foi obtida uma imagem 2D da amostra de solo com resolução 80x80.

Para análise da densidade do solo via o método tomográfico à matriz de UT foi convertida em matriz de densidade utilizando-se a seguinte relação:

$$\rho_s = \frac{1}{\mu_s} \left( \frac{UT}{\alpha} - \mu_a \rho_a \theta \right) \quad (38)$$

A partir das matrizes de densidade 80x80 foram selecionadas matrizes menores no interior das imagens para a geração de imagens de distribuição de densidade que permitem uma análise qualitativa da variação da densidade do solo.

Para um estudo quantitativo de variação de  $\rho_s$  foram selecionadas linhas nas matrizes de dados (Figura 17) a partir das quais é possível verificar mudanças nessa propriedade física do solo com resolução de até 1,4 mm.

1.62	1.58	1.58	1.38	1.46	1.25	1.41	1.57	1.61	1.68	1.71	1.73	1.65	1.58	1.74	1.65	1.74	1.75
1.65	1.62	1.62	1.52	1.39	1.45	1.53	1.54	1.62	1.69	1.70	1.66	1.60	1.67	1.66	1.59	1.73	1.80
1.72	1.62	1.70	1.64	1.43	1.52	1.60	1.65	1.63	1.63	1.66	1.70	1.64	1.59	1.64	1.58	1.63	1.73
1.70	1.69	1.62	1.64	1.60	1.47	1.63	1.66	1.48	1.55	1.67	1.74	1.70	1.71	1.71	1.61	1.62	1.73
1.59	1.65	1.69	1.64	1.57	1.50	1.67	1.77	1.65	1.58	1.69	1.74	1.72	1.77	1.74	1.69	1.59	1.74
1.51	1.68	1.76	1.74	1.66	1.54	1.67	1.68	1.74	1.80	1.80	1.73	1.74	1.72	1.71	1.74	1.61	1.63
1.55	1.73	1.69	1.67	1.71	1.59	1.60	1.70	1.68	1.73	1.80	1.72	1.67	1.73	1.81	1.79	1.62	1.66
1.77	1.65	1.71	1.66	1.71	1.63	1.62	1.65	1.74	1.69	1.70	1.82	1.73	1.75	1.74	1.75	1.67	1.78
1.77	1.71	1.70	1.74	1.64	1.58	1.67	1.60	1.59	1.70	1.81	1.78	1.64	1.73	1.75	1.78	1.62	1.80
1.71	1.74	1.67	1.71	1.66	1.67	1.74	1.74	1.72	1.74	1.82	1.77	1.60	1.83	1.74	1.73	1.69	1.77
1.71	1.68	1.78	1.72	1.64	1.67	1.72	1.69	1.75	1.73	1.75	1.80	1.76	1.80	1.71	1.71	1.65	1.77
1.66	1.67	1.70	1.70	1.66	1.57	1.64	1.66	1.62	1.64	1.73	1.80	1.82	1.81	1.71	1.73	1.67	1.78
1.69	1.73	1.62	1.59	1.65	1.58	1.63	1.66	1.69	1.54	1.65	1.76	1.77	1.78	1.76	1.70	1.64	1.74
1.64	1.65	1.58	1.59	1.62	1.54	1.64	1.65	1.65	1.60	1.62	1.65	1.68	1.64	1.71	1.67	1.65	1.51
1.61	1.57	1.64	1.53	1.57	1.53	1.53	1.70	1.66	1.67	1.69	1.72	1.68	1.67	1.60	1.69	1.63	1.43
1.51	1.56	1.67	1.62	1.66	1.56	1.62	1.73	1.67	1.66	1.67	1.80	1.70	1.68	1.68	1.66	1.57	1.34
1.55	1.57	1.70	1.86	1.81	1.61	1.67	1.69	1.62	1.70	1.67	1.73	1.72	1.72	1.76	1.59	1.42	1.34
1.75	1.69	1.88	1.89	1.87	1.68	1.61	1.65	1.69	1.75	1.76	1.68	1.75	1.73	1.68	1.63	1.38	1.29
1.70	1.66	1.85	1.91	1.82	1.71	1.63	1.69	1.76	1.73	1.72	1.71	1.72	1.71	1.59	1.65	1.41	1.39
1.66	1.71	1.78	1.90	1.83	1.82	1.69	1.75	1.83	1.76	1.76	1.79	1.76	1.71	1.65	1.74	1.49	1.51
1.71	1.73	1.66	1.68	1.78	1.68	1.65	1.69	1.79	1.71	1.72	1.73	1.66	1.72	1.69	1.59	1.59	1.55
1.59	1.62	1.65	1.62	1.70	1.64	1.59	1.67	1.69	1.73	1.71	1.71	1.70	1.67	1.72	1.63	1.67	1.63
1.65	1.65	1.64	1.70	1.72	1.70	1.62	1.66	1.73	1.70	1.73	1.69	1.70	1.69	1.74	1.65	1.66	1.72
1.62	1.62	1.63	1.65	1.64	1.60	1.63	1.61	1.63	1.67	1.73	1.59	1.65	1.61	1.70	1.63	1.63	1.76
1.64	1.63	1.64	1.63	1.66	1.66	1.68	1.68	1.70	1.74	1.78	1.70	1.74	1.70	1.66	1.69	1.67	1.72
1.66	1.68	1.62	1.72	1.68	1.65	1.65	1.69	1.76	1.78	1.72	1.67	1.65	1.72	1.71	1.67	1.68	1.67

FIGURA 17 – Exemplo de uma matriz de densidade obtida via análise tomográfica usada para gerar imagens de distribuição de  $\rho_s$  e linha selecionada para análise quantitativa de variação de  $\rho_s$ .

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ANÁLISE ELEMENTAR

A caracterização elementar foi realizada através da técnica de espectroscopia de fluorescência de raios-X, e os espectros obtidos para os dois solos estão apresentados na Figura 17.

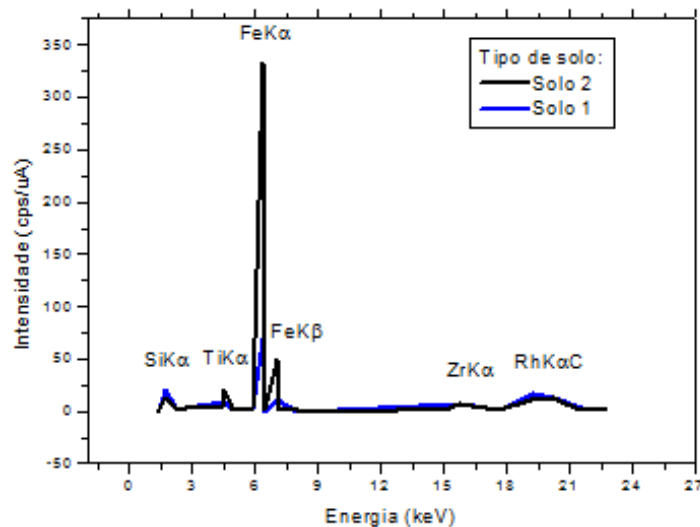


FIGURA 18 - Espectros de FRX para as amostras de solo arenoso (solo 1) e argiloso (solo 2).

Pode-se notar pelo gráfico que em ambos os espectros as linhas de emissão mais intensas estão em níveis de energia semelhantes, porém, apresentam maior intensidade no solo 2 (argiloso) quando comparadas ao solo 1 (arenoso). Também pode ser notado nos espectros obtidos as linhas de emissão do elemento Rh, devido ao fato que o equipamento utiliza este elemento como alvo para emitir o espectro contínuo de raios-X nas amostras.

Outro fato é que o equipamento identifica elementos nas faixas de energia do Sódio (Na) ao Urânio (U), conseqüentemente, os elementos mais leves, que são aqueles que compreendem os elementos desde o H até o Na, não são caracterizados. Com efeito, as intensidades das linhas de emissão destas amostras são acentuadas nas energias dos metais mais presentes. Assim, o equipamento de FRX não fornece informações exatas das intensidades das linhas de emissão e da proporção exata de cada elemento encontrado.

Uma análise mais detalhada das amostras de solo pode ser feita através dos resultados semi-quantitativos de FRX mostrados na Tabela 3, indicando a porcentagem de cada elemento químico encontrado nas amostras dos dois solos.

TABELA 3 - Resultados quantitativos da FRX. Os valores da concentração média de cada elemento químico em porcentagem com o desvio padrão da média ( $\sigma$ ) aparecem em ordem decrescente para cada solo.

Solo 1 (arenoso)			solo 2 (argiloso)		
elemento	média (%)	$\sigma$ (%)	elemento	média (%)	$\sigma$ (%)
Si	64,74	0,70	Si	38,34	0,75
Al	21,69	0,54	Al	26,83	0,58
Fe	6,65	0,23	Fe	26,72	0,67
Ti	3,15	0,32	Ti	4,20	0,30
S	2,04	0,32	S	1,29	0,23
Ca	0,70	0,04	Ba	1,13	0,63
Cs	0,06	0,13	Mn	0,42	0,01
P	0,42	0,22	P	0,27	0,18
K	0,26	0,01	Ca	0,25	0,02
Zr	0,15	0,04	K	0,19	0,01
Mn	0,12	0,00	Zr	0,16	0,01
Zn	0,01	0,01	Tm	0,14	0,13
-	-	-	Zn	0,02	0,00
-	-	-	Cu	0,02	0,03
-	-	-	Y	0,01	0,01
-	-	-	Cr	0,01	0,01

Com os dados de composição química obtidos a partir da análise elementar, foi possível prever, através do programa XCOM, valores teóricos para o coeficiente de atenuação para ambos os solos. Através desse programa, é possível realizar uma análise da variação do  $\mu$  com a energia da radiação incidente, cujo interesse, neste caso, compreende a faixa de energia dos fótons do  $^{241}\text{Am}$  e  $^{137}\text{Cs}$ . O mesmo procedimento de previsão de valores teóricos do  $\mu$  foi feito para a água, que, por ser uma substância homogênea e de composição química bem conhecida, possui uma complexidade de determinação teórica do  $\mu$  relativamente mais simples do que para as amostras de solo. Os dados obtidos através dessa análise são apresentados na Figura 19:

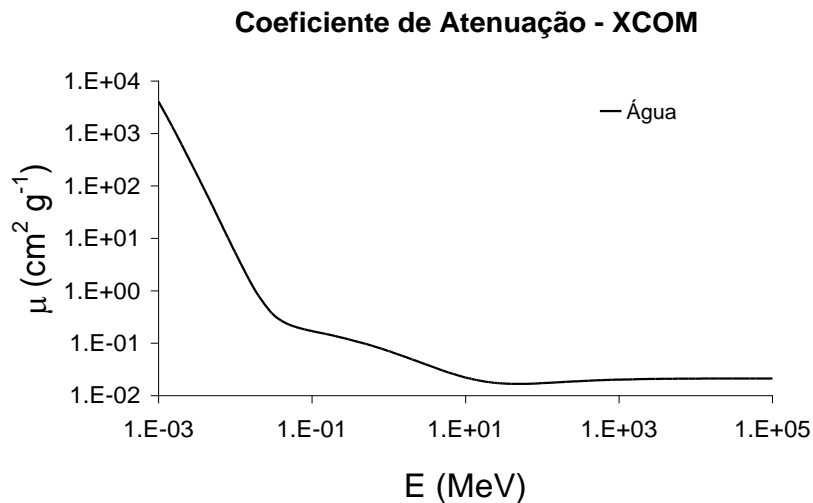
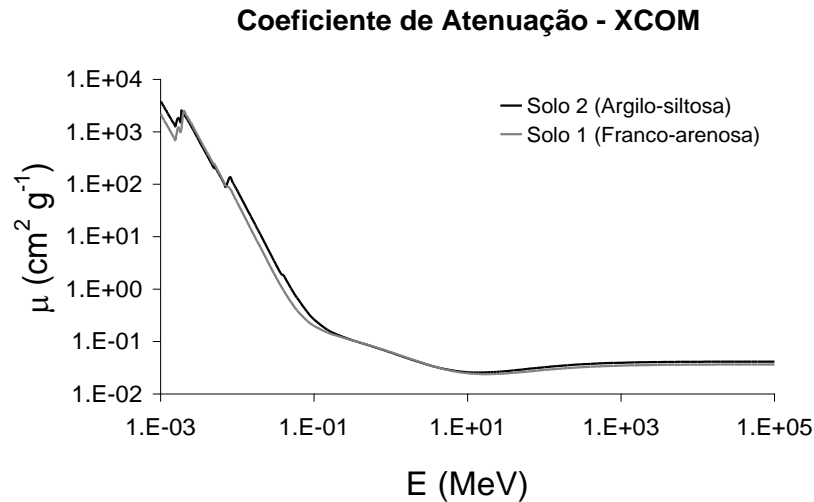


FIGURA 19 - Coeficiente de atenuação para a) os solos 1 e 2 e b) água obtido através do XCOM.

As maiores variações no valor do  $\mu$  ocorrem nas regiões de menor energia como era de se esperar para esses tipos de materiais (solo e água). De acordo com Ferraz e Mansell (1979) durante interação de fótons de 59,4 keV ( $^{241}\text{Am}$ ) com a água o efeito Compton contribui com 89% da atenuação total e os efeitos fotoelétrico e Rayleigh com somente 7% e 4%, respectivamente. Para a região de médias energias, tal como os fótons gama de 661,6 keV provenientes da fonte de  $^{137}\text{Cs}$ , o efeito Compton é responsável por 100% da atenuação total.

Para o caso dos dois tipos de solos usados neste estudo, foram obtidos via XCOM os seguintes resultados: **solo 1** - para os fótons de 59,4 keV o efeito fotoelétrico contribui com 51% da atenuação total e os efeitos Compton e Rayleigh com 38% e 11%; para os fótons de 661,6 keV o efeito Compton contribui com 99,1% da atenuação total e os efeitos fotoelétrico

e Rayleigh com 0,3% e 0,7%; **solo 2** - para os fótons de 59,4 keV o efeito fotoelétrico contribui com 70,6% da atenuação total e os efeitos Compton e Rayleigh com 21,1% e 8,3%; e para os fótons de 661,6 keV o efeito Compton contribui com 98,4% da atenuação total e os efeitos fotoelétrico e Rayleigh com 0,8% e 0,8%.

Pelos resultados descritos no último parágrafo é possível observar que quanto mais pesados forem os elementos que compõem um determinado meio, como é o caso dos solos, o efeito fotoelétrico será o responsável pela maior contribuição da atenuação total para os fótons de menor energia (provenientes da fonte de  $^{241}\text{Am}$ ). Esse resultado é coerente uma vez que a probabilidade de ocorrência do efeito fotoelétrico para fótons de baixa energia aumenta rapidamente com o aumento do número atômico ( $Z^4$ ) dos elementos que constituem um determinado material (KAPLAN, 1963).

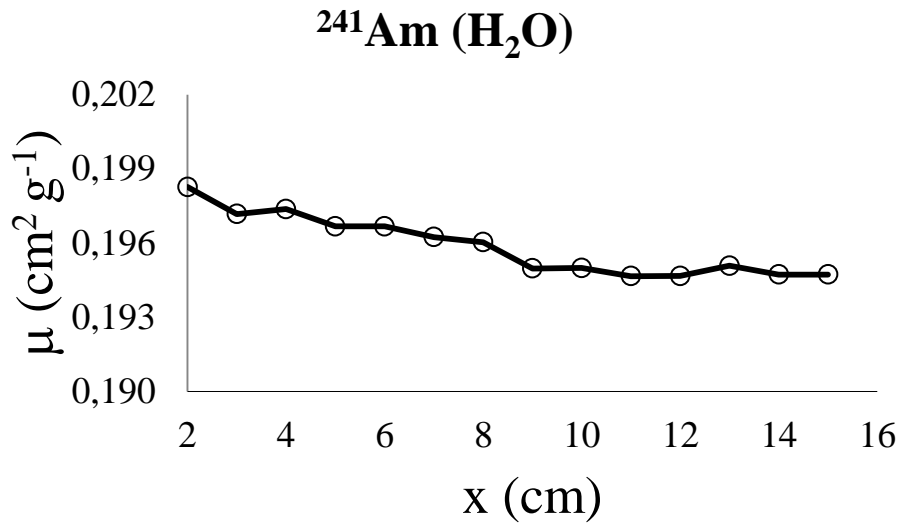
O valor teórico do  $\mu$  da água obtido via XCOM é de  $0,206 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$  para o  $^{241}\text{Am}$  e  $0,0892 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$  para o  $^{137}\text{Cs}$ . Já para os dois solos os seguintes resultados foram obtidos: 1)  $0,394 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$  ( $^{241}\text{Am}$ ) e  $0,0797 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$  ( $^{137}\text{Cs}$ ) para o solo 1 e 2)  $0,686 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$  ( $^{241}\text{Am}$ ) e  $0,0788 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$  ( $^{137}\text{Cs}$ ) para o solo 2. Os resultados teóricos obtidos foram calculados a partir da inserção dos valores médios da composição química dos solos (5 repetições) no programa XCOM (Tabela 3).

Os resultados obtidos mostram que para fótons de baixa energia, como é o caso do  $^{241}\text{Am}$ , o solo 2 possui maior atenuação total da radiação em relação ao solo 1 (diferença relativa de 43% tomando o solo 2 como referência) e para fótons de média energia esse resultado se inverte (diferença relativa de 1,1% tomando o solo 2 como referência). Uma possível explicação para esse resultado pode ser a maior quantidade de Fe presente no solo 2 ( $26,72 \pm 0,67$  %) em relação ao solo 1 (diferença relativa de 76% tomando o solo 2 como referência) para as baixas energias (HUBBEL e SELTZER, 1995). Já para valores de energia da ordem daquela encontrada para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$  as diferenças na composição química do dois solos interfere pouco nos valores de  $\mu$  para ambos os solos.

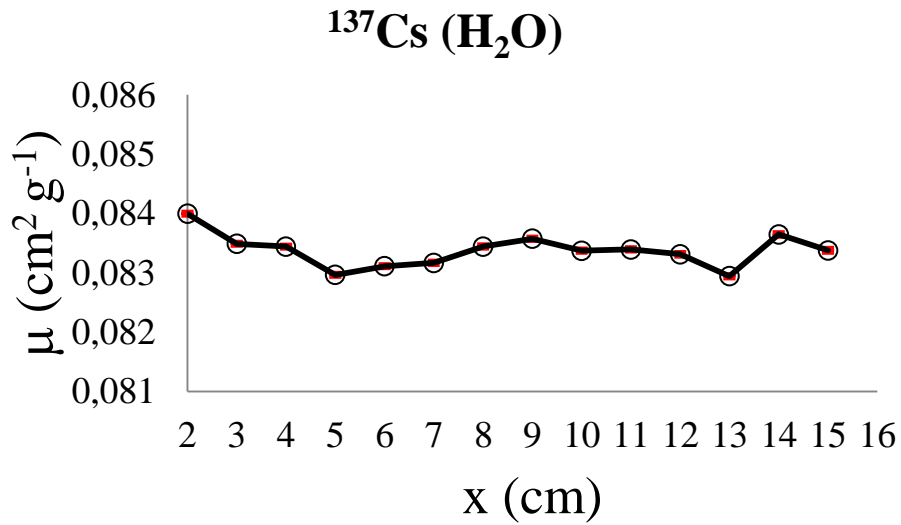
#### 4.2 COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO DA ÁGUA

Com o objetivo de se verificar o bom funcionamento do sistema de atenuação de raios gama para o estudo proposto nesse trabalho foram feitas medidas de  $\mu$  para a água para as

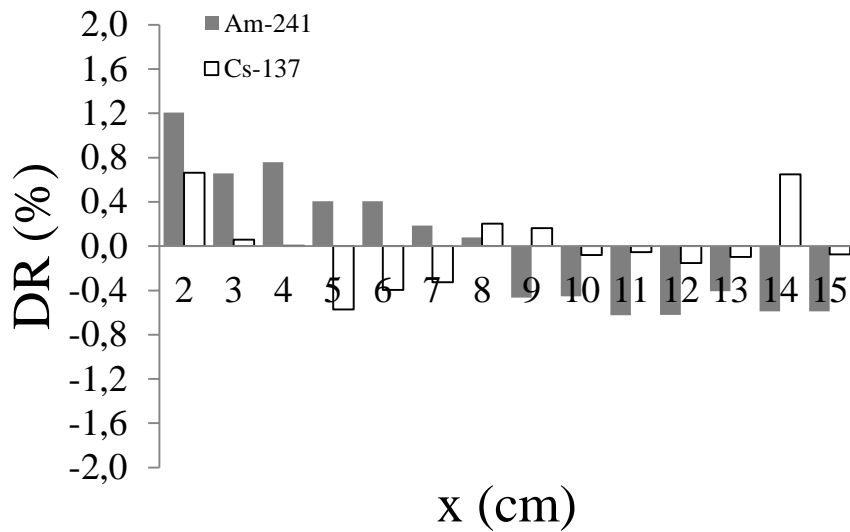
diferentes espessuras de amostras usadas. Essas medidas foram feitas para ambas as fontes de radiação (Figura 20).



(a)



(b)



(c)

FIGURA 20 - Variação do coeficiente de atenuação de massa da água em função da espessura do material absorvedor para as fontes de a)  $^{241}\text{Am}$ ; b)  $^{137}\text{Cs}$  e c) desvio em relação à média (DR) do  $\mu$  para cada caixa e ambas as fontes.

A partir da análise da Figura 20a é possível observar que os valores de  $\mu$  para a fonte de  $^{241}\text{Am}$  apresentam uma leve tendência de queda com a espessura do absorvedor; essa mesma tendência de queda, embora mais tênue, pode ser observada para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$  (Figura 20b).

Na tabela 4 são apresentados alguns valores medidos de  $\mu$  para água encontrados na literatura, valores simulados e os obtidos nesse trabalho para as fontes de  $^{241}\text{Am}$  e  $^{137}\text{Cs}$ .

TABELA 4 - Valores de  $\mu$  para a água encontrados na literatura e obtidos no presente trabalho.

Radioisótopo - $\mu$ ( $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )		Fonte
$^{241}\text{Am}$	$^{137}\text{Cs}$	
0,2060	0,0896	XCOM
0,1983	0,0840	Presente trabalho considerando espessura de amostra de 2 cm
$0,1959 \pm 0,0012$	$0,0834 \pm 0,003$	Presente trabalho considerando todas as espessuras de amostra analisadas (2-15 cm)
0,20015	0,08535	Ferraz e Mansell (1979)
0,19730	-	Crestana et al. (1992)
0,19987	-	Pedrotti et al. (2005)
-	0,08234	Pires et al. (2002)

Considerando o valor de  $\mu$  medido para a menor espessura (2 cm) como referência para a obtenção do valor representativo experimental dessa propriedade física, o desvio relativo percentual entre o valor teórico (XCOM) e o valor experimental de  $\mu$  é de 3,8% para o  $^{241}\text{Am}$  e 6,3% para o  $^{137}\text{Cs}$ . Já considerando o valor médio obtido para todas as espessuras



como referência, os desvios relativos percentuais tornam-se 4,9% ( $^{241}\text{Am}$ ) e 6,9% ( $^{137}\text{Cs}$ ), respectivamente.

Caso sejam considerados como referência os valores experimentais de  $\mu$  obtidos por Ferraz e Mansell (1979) os desvios relativos percentuais tornam-se 2,1% ( $^{241}\text{Am}$ ) e 2,2% ( $^{137}\text{Cs}$ ), respectivamente, considerando os valores médios de  $\mu$ . Esses valores permitem concluir que o sistema de atenuação de raios gama usado nesse trabalho está em perfeito funcionamento para todas as espessuras do absorvedor analisadas, já que os valores obtidos possuem baixos desvios relativos (Figura 20c) e estão em concordância com aqueles encontrados na literatura (Tabela 4).

Com relação às variações do  $\mu$  da água com o aumento da espessura das amostras Sidhu et al. (1999) observaram um aumento no valor de  $\mu$  com o aumento da espessura do absorvedor para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$ . Esse aumento no valor de  $\mu$  com a espessura é atribuído ao espalhamento múltiplo dos fótons gama após interação com o material absorvedor e esse efeito é amplificado quando se utilizam colimadores maiores. No presente trabalho não foi observada essa tendência refletindo uma boa colimação entre a fonte e o detector. Ao contrário do trabalho de Sidhu et al. (1999), Varier et al. (1986) mostraram que o valor de  $\mu$  diminui com o aumento da espessura do absorvedor ao passo que Gopal e Sanjeevaiah (1973) obtiveram resultados similares ao trabalho dos primeiros autores.

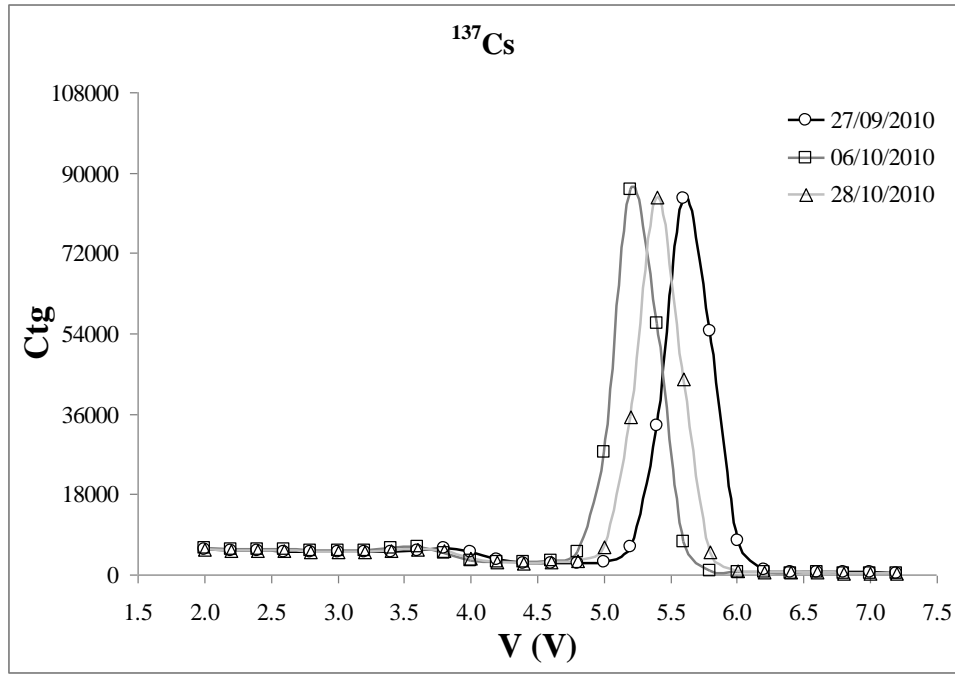
#### 4.3 ESPECTROS DE VARIAÇÃO DA POSIÇÃO E TAMANHO DO FOTOPICO

O levantamento dos espectros para as fontes de  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{241}\text{Am}$  foi necessário para o ajuste das janelas contendo o fotopico. Para que essa janela fosse escolhida de forma apropriada, os espectros foram levantados diariamente no decorrer das medidas experimentais, dessa forma, foi possível variar a janela de acordo com as variações na posição do fotopico.

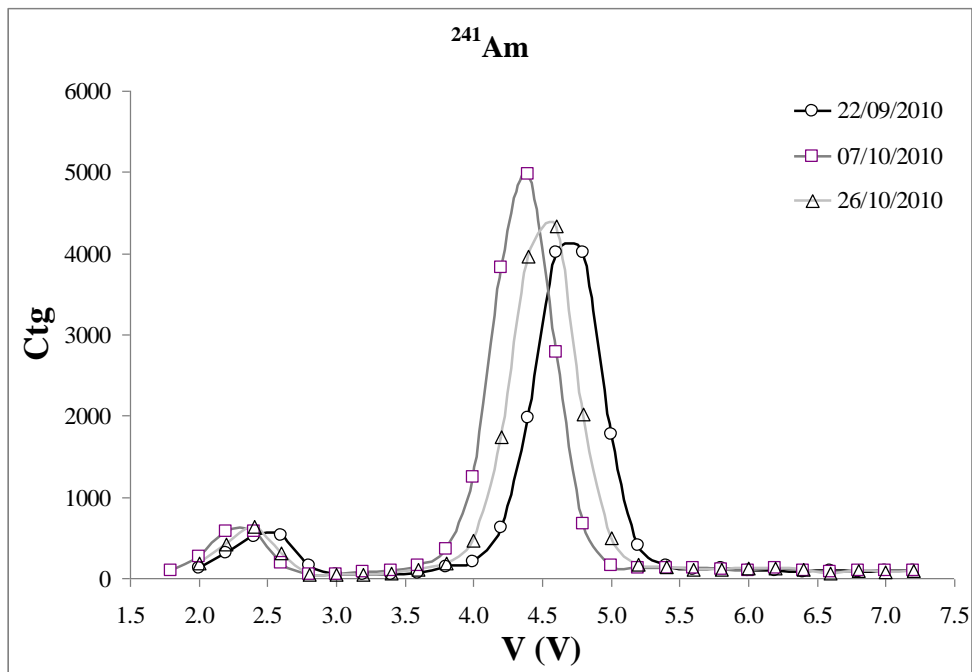
Esses ajustes foram realizados com o intuito de evitar erros na determinação do  $\mu$  que possam ser atribuídos a uma diminuição da contagem dos fótons detectados pelo sistema por movimentação do fotopico. Geralmente em medidas pela técnica de atenuação de raios gama a janela que define o fotopico é mantida fixa após levantamento do espectro para todas as medidas, no entanto, quando as medidas são realizadas durante várias horas ou dias, fatores

como alterações na tensão da rede ou temperatura do laboratório podem alterar a posição do fotopico com o mesmo se deslocando da janela inicialmente fixada.

A Figura 21 mostra a variação da posição e também do tamanho do fotopico para alguns dias seleccionados no período no qual as medidas experimentais foram realizadas.



(a)



(b)

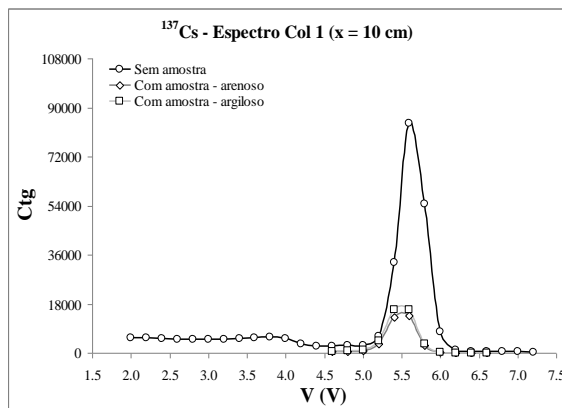
FIGURA 21 - Espectros completos apresentando o fotopico para as fontes de a)  $^{137}\text{Cs}$  e b)  $^{241}\text{Am}$ . Os espectros foram levantados para diferentes períodos de tempo durante a realização das medidas experimentais do coeficiente de atenuação.

Nos resultados da Figura 21 foram somente selecionados os espectros que apresentaram as variações mais extremas na posição do fotopico. Como pode ser observado para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$  (Figura 21a) o espectro apresentou como valor mínimo para a posição do fotopico aproximadamente 4,5 V e como valor máximo 6,5 V. Já para a fonte de  $^{241}\text{Am}$  (Figura 21b) esses valores foram 3,4 V e 5,7 V. Como dito anteriormente as variações na posição do fotopico são oriundas de vários fatores, entre eles pode-se destacar variações na temperatura do laboratório, alterações na tensão da rede, falta de estabilidade na fonte de alta tensão, etc.

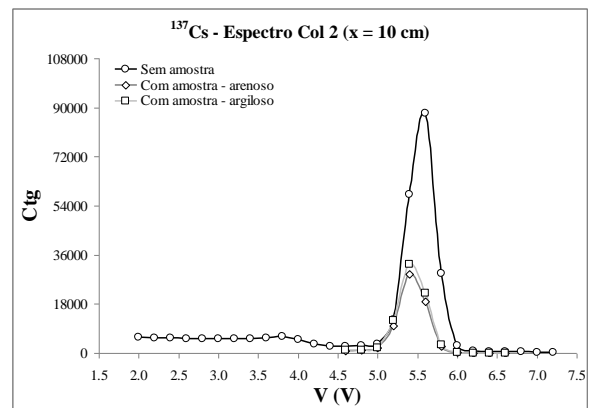
No entanto, como os fotopicos foram levantados para cada dia de medida e período do dia de medida (manhã e tarde) as janelas que definem o fotopico para ambas as fontes foram corrigidas todos os dias durante as medidas experimentais com o intuito de se evitar problemas nas contagens devido a modificações na posição do fotopico.

Ainda com o intuito de verificar se a presença da amostra causa alterações importantes na posição do fotopico foram levantados também espectros com a presença das amostras para cada espessura e dia de medida (Figuras 22 e 23).

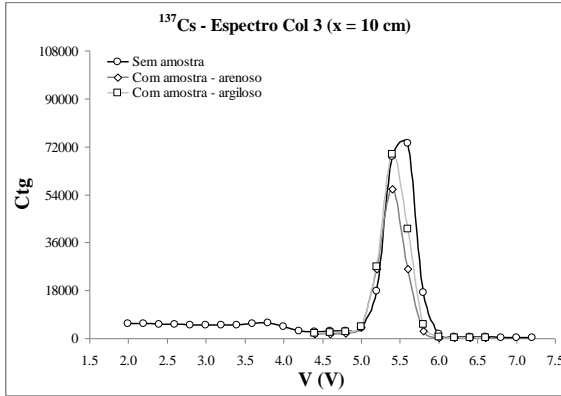
O tempo de contagem determinado para esses levantamentos difere sob a circunstância do feixe atravessar a amostra ou não, sendo que, com o feixe de fótons gama atravessando as caixas de acrílico sem amostra, o tempo selecionado para ambas as fontes foi de 30 s, enquanto que, para o feixe atravessando a amostra, o tempo de contagem foi de 600 s para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$  e 1200 s para a fonte de  $^{241}\text{Am}$ .



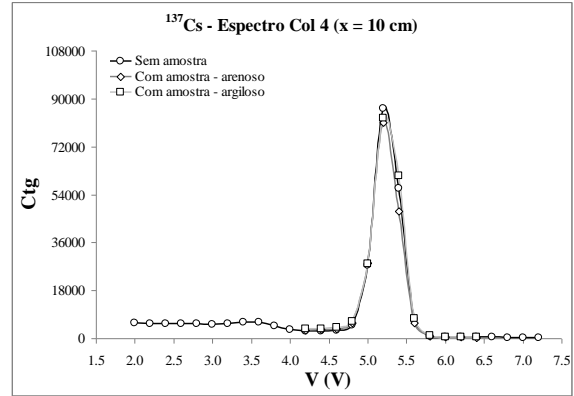
(a)



(b)

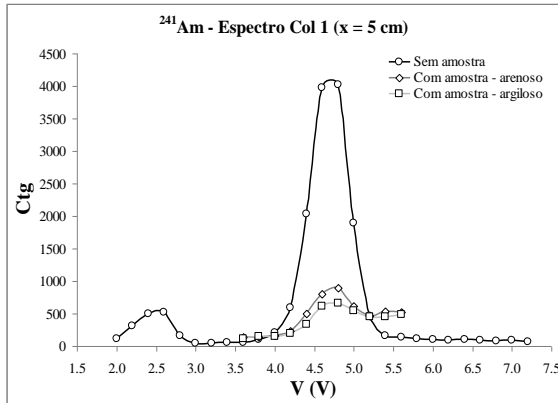


(c)

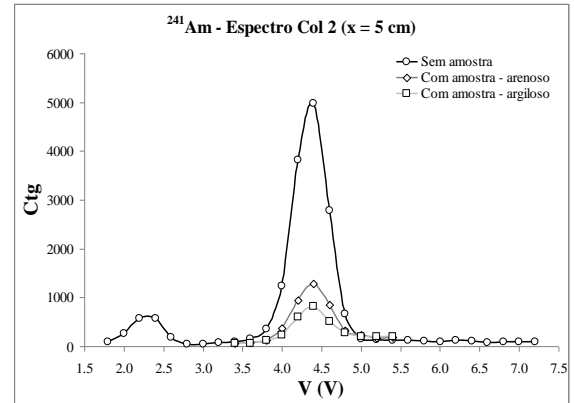


(d)

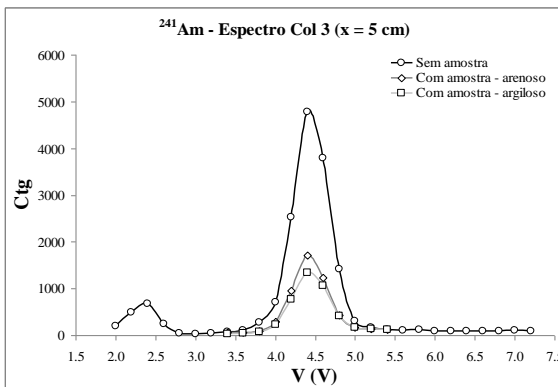
FIGURA 22 - Espectros levantados sem e com presença das amostras de solo arenoso e argiloso para a espessura de amostra de 10 cm e fonte de  $^{137}\text{Cs}$ . a) Colimador de 1 mm; b) Colimador de 2 mm; c) Colimador de 3 mm e d) Colimador de 4 mm. O tempo de contagem com amostra é maior do que sem amostra.



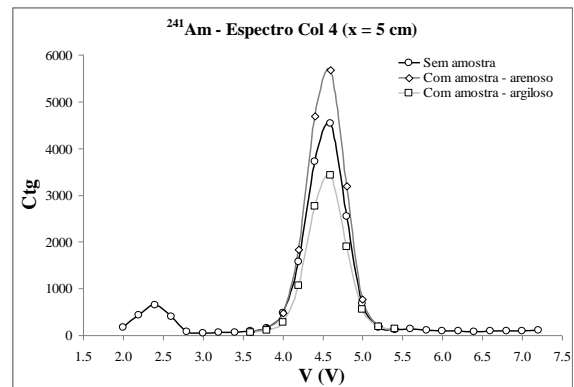
(a)



(b)



(c)



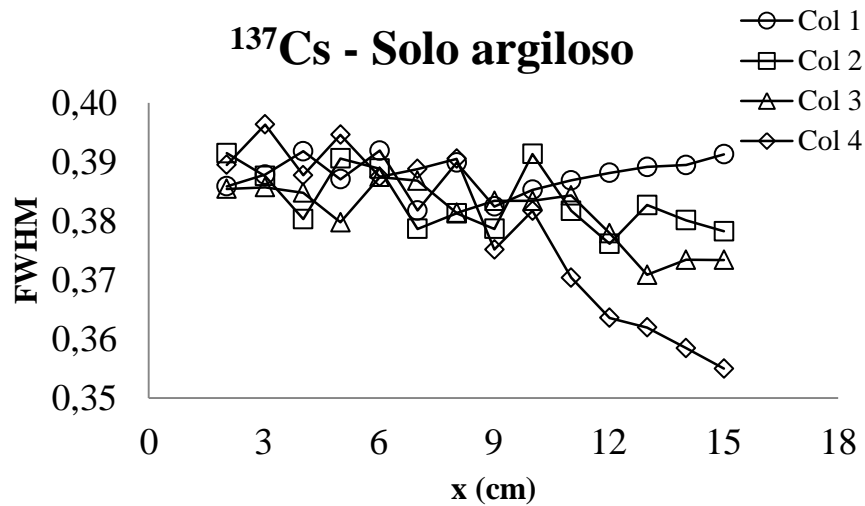
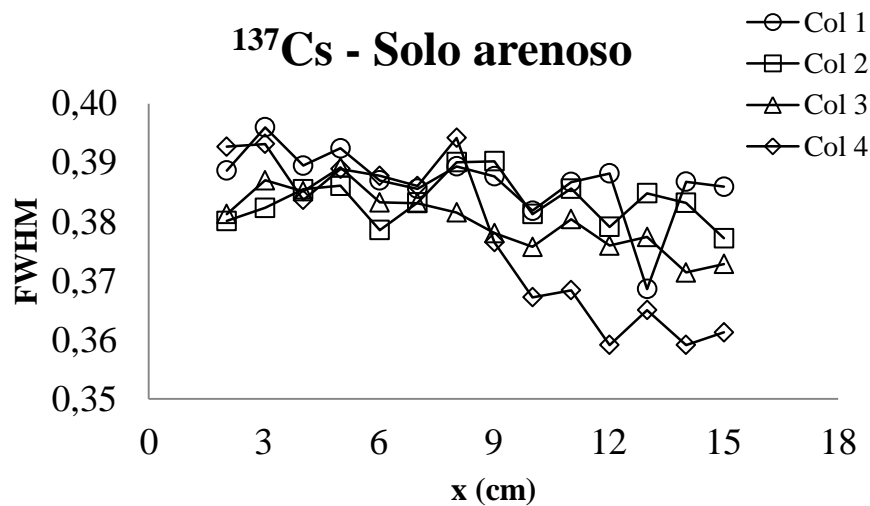
(d)

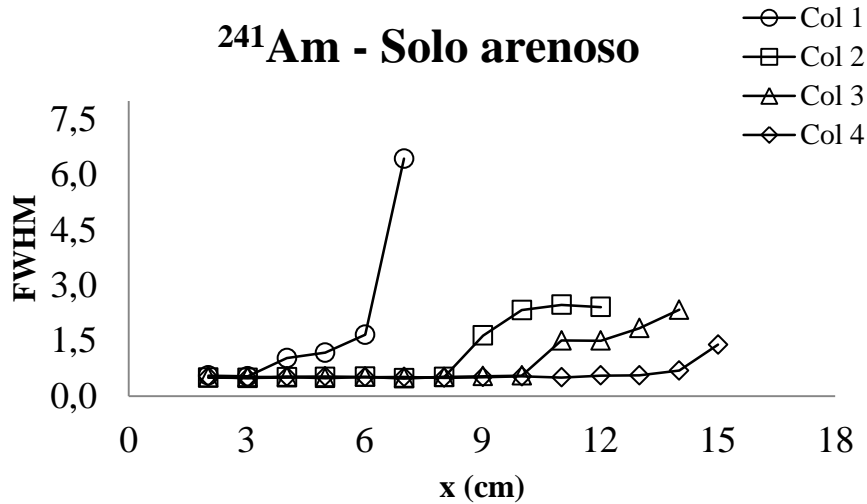
FIGURA 23 - Espectros levantados sem e com presença das amostras de solo arenoso e argiloso para a espessura de amostra de 5 cm e fonte de  $^{241}\text{Am}$ . a) Colimador de 1 mm; b) Colimador de 2 mm; c) Colimador de 3 mm e d) Colimador de 4 mm. O tempo de contagem com amostra é maior do que sem amostra.

A partir da Figura 22 é possível observar que, para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$ , nos colimadores de 1 até 3 mm de espessura ocorre mudanças na posição do fotopico em relação ao levantamento do espectro sem a amostra e modificação na sua resolução (FWHM) tanto para o solo argiloso quanto para o arenoso (Figuras 22a-c). Já para o colimador de 4 mm (Figura 22d) praticamente não existem diferenças na posição e resolução do espectro com e sem amostra.

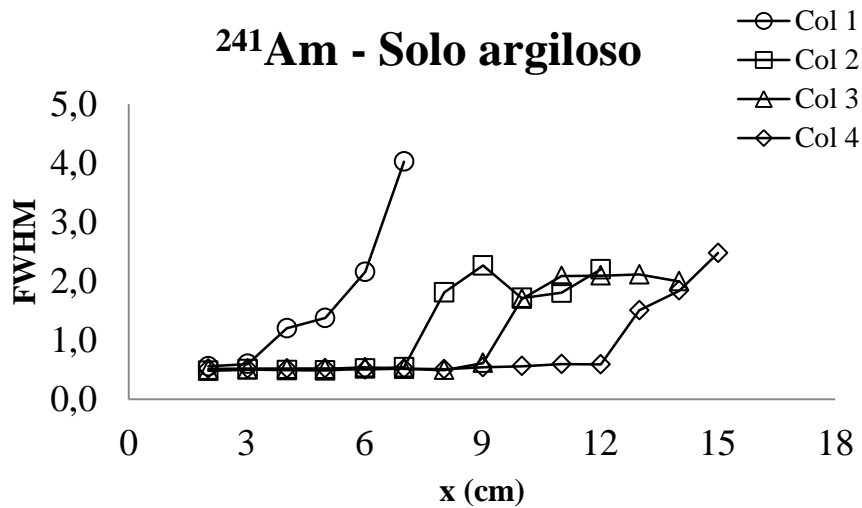
Para a fonte de  $^{241}\text{Am}$  o colimador de 1 mm (Figura 23a) apresenta uma indefinição do fotopico para as mais altas tensões para a espessura de solo selecionada. Para os demais colimadores (Figuras 23b-d) a janela do fotopico não apresentou modificações apreciáveis entre o levantamento com e sem amostra.

Ainda para verificar a influencia da espessura das amostras na resolução do fotopico, calculou-se a largura total a meia altura (FWHM – “Full width at half maximum”) dos espectros levantados com o feixe atravessando a amostra (Figura 24).





(c)



(d)

FIGURA 24 - Variação da largura total a meia altura (FWHM) dos espectros levantados com a presença das amostras de solo. a) fonte de  $^{137}\text{Cs}$  e solo arenoso; b) fonte de  $^{137}\text{Cs}$  e solo argiloso; c) fonte de  $^{241}\text{Am}$  e solo arenoso e d) fonte de  $^{241}\text{Am}$  e solo argiloso.

É possível observar para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$  uma tendência de queda no FWHM com o aumento da espessura das amostras para todos os colimadores, (1, 2, 3 e 4 mm), isso para o solo arenoso (Figura 24a) sendo que, essa mesma tendência foi observada para os colimadores de 3 e 4 mm no caso do solo argiloso (Figura 24b).

Para a fonte de  $^{241}\text{Am}$  (Figuras 24c e 24d) pode-se verificar para cada colimador, que a FWHM sofre uma grande variação a partir de uma dada espessura. Tanto para o solo arenoso quanto para o solo argiloso, essa variação depende não só da espessura da amostra, mas também do colimador usado, o que está de acordo com o trabalho de Ochbelagh (2009), o qual usou diferentes colimadores para testar a resolução do detector de NaI(Tl), concluindo que essa resolução depende das dimensões do colimador. O fato de colimadores com maiores

diâmetros fornecerem uma boa resolução do espectro, dentro de uma faixa maior de espessura da amostra, é consequência de o ângulo sólido do feixe gama possuir maior intensidade.

No caso do solo arenoso (Figura 24c), para o colimador de 1 mm, verifica-se que a partir da espessura de 3 cm o espectro não é mais discriminado, pois a variação da FWHM é muito abrupta. Para o colimador de 2 mm, essa espessura limite é de 8 cm, enquanto que para os colimadores de 3 e 4 mm, as espessuras são 10 e 14 cm, respectivamente. Observando o mesmo para o solo argiloso (Figura 24d), tem-se que para o colimador de 1 mm, a espessura limite em que a FWHM não apresente uma variação abrupta, é de 3 cm. Para os colimadores de 2, 3 e 4 mm, as espessuras são 7, 9 e 12 cm, respectivamente.

De acordo com o trabalho de Ochbelagh, (2009), resultados teóricos mostraram que a FWHM é função do arranjo geométrico entre a fonte radioativa e o detector, e também das dimensões do colimador. Isso se deve ao fato desses parâmetros influenciarem no número de fótons espalhados que acabam sendo contabilizados pelo detector, como se fossem fótons transmitidos, mostrando também uma dependência da espessura da amostra.

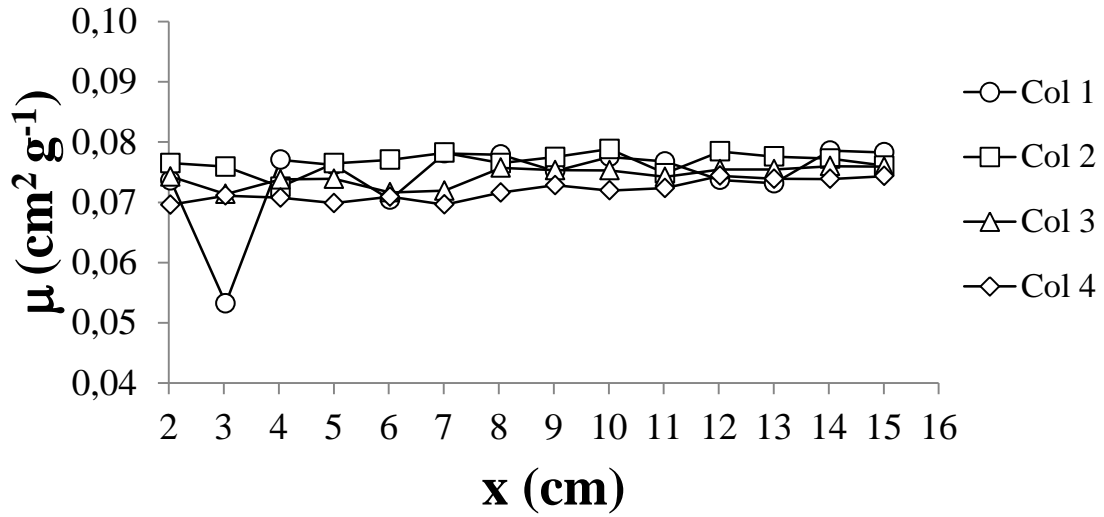
Portanto, através dos dados da variação da FWHM, pode-se concluir que, para a fonte de  $^{241}\text{Am}$ , a partir de determinadas espessuras, não é possível discriminar um espectro que esteja dentro da faixa de variação em que estão os fotopicos, e por isso não é possível obter um valor representativo de  $\mu$ . Já para o  $^{137}\text{Cs}$ , não é possível identificar uma influência significativa da espessura das amostras no levantamento do fotopico, levando-se em consideração as espessuras abordadas nesse trabalho, em que ocorra uma variação significativa da FWHM.

Os resultados descritos nesse item reforçam ainda a ideia da necessidade de se levantar com periodicidade o espectro de radiação em medidas do coeficiente de atenuação do solo. Isso decorre do fato de movimentação do fotopico e também mudança na sua resolução quando da interação com um determinado meio material.

#### 4.4 VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO DE MASSA ( $\mu$ ) DAS AMOSTRAS DE SOLO

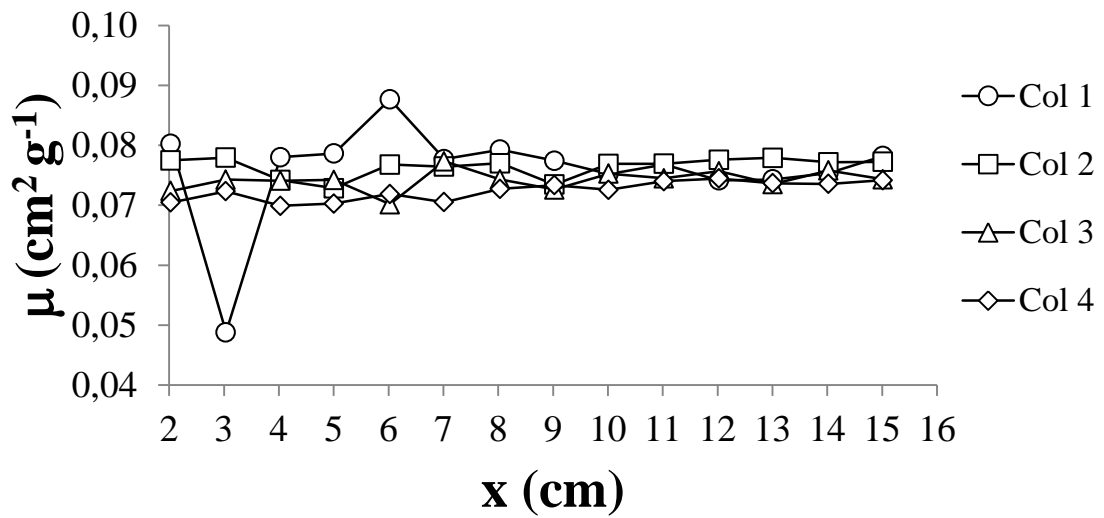
A Figura 25 mostra os valores obtidos experimentalmente para o coeficiente de atenuação de massa das amostras de solo, utilizando-se a fonte de  $^{137}\text{Cs}$ :

### $^{137}\text{Cs}$ - Solo arenoso



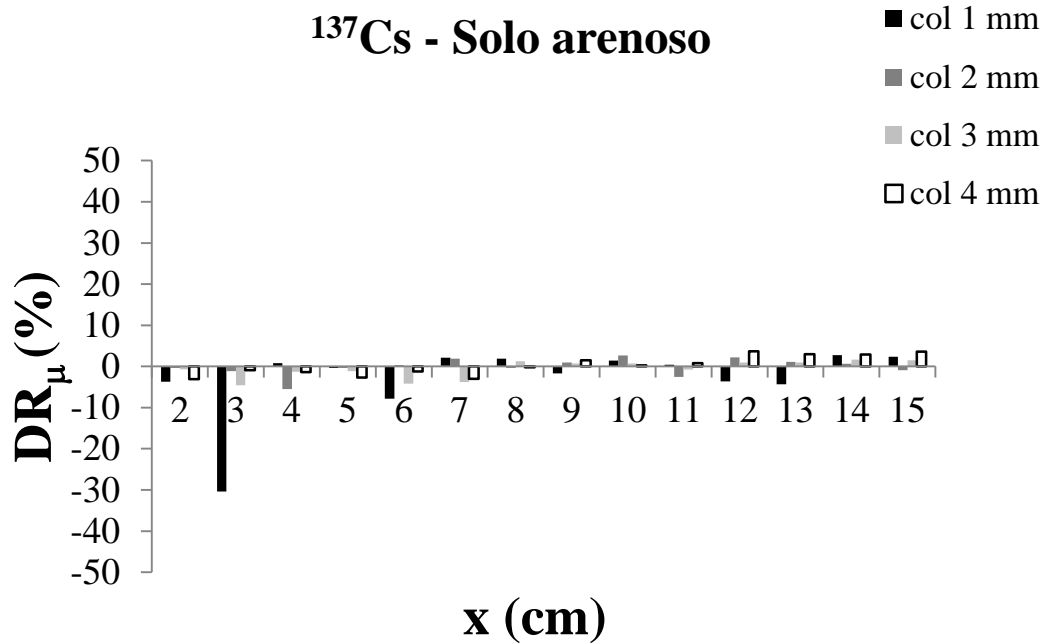
(a)

### $^{137}\text{Cs}$ - Solo argiloso

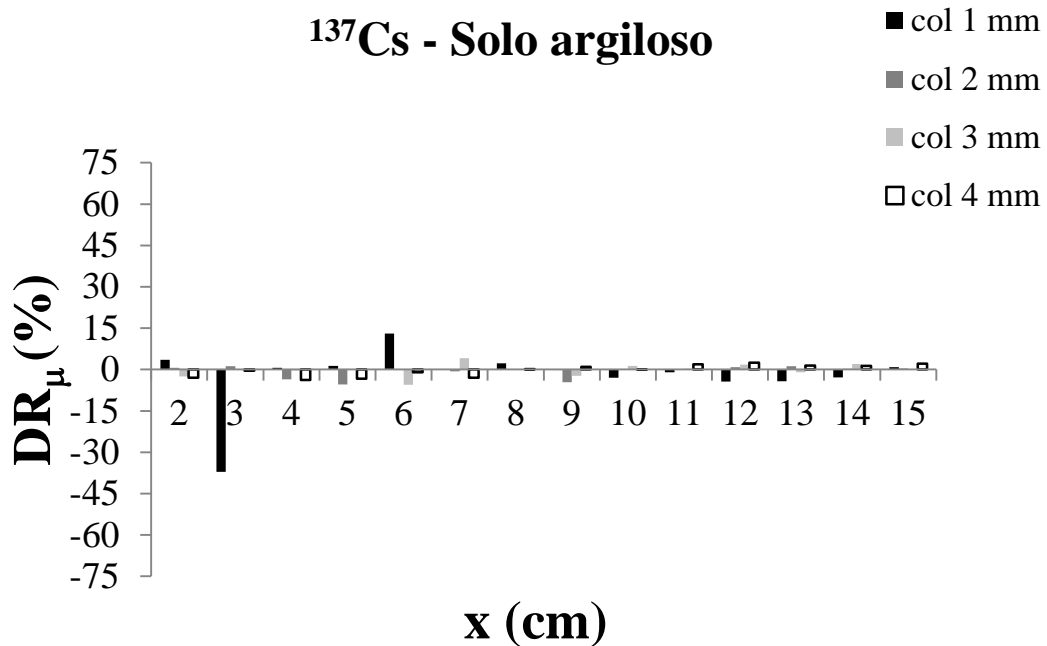


(b)





(c)



(d)

FIGURA 25 - Variação do  $\mu$  para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$  em função da espessura da amostra: a) solo arenoso, b) solo argiloso, c) desvio relativo (DR) entre os valores de  $\mu$  para o solo arenoso e d) DR entre os valores de  $\mu$  para o solo argiloso. As diferenças relativas foram calculadas tomando-se os dados da média dos valores de  $\mu$  (todas as espessuras) como referência para o seu cálculo.

Analisando os resultados apresentados de variação do  $\mu$  com a espessura da amostra para ambos os solos é possível verificar que tanto para o solo arenoso (Figura 25a) quanto

para o solo argiloso (Figura 25b), há uma variação abrupta do  $\mu$  com o uso do colimador de 1 mm para a espessura de 3 cm (ambos os solos) e 6 cm (solo argiloso). As variações entre os valores de  $\mu$  são mais acentuadas para espessuras menores, independente do colimador selecionado, indicando uma tendência a um valor comum de  $\mu$  com o aumento da espessura, o que está de acordo com os trabalhos encontrados na literatura (GOSWAMI e CHAUDHURI, 1973; GOPAL e SANJEEVAIAH, 1973; VARIER et al., 1986; SIDHU et al., 1999a,b; ABDEL-RAHMAN et al., 2000).

Quando a fonte de  $^{137}\text{Cs}$  está sendo empregada em medidas usando a técnica de atenuação gama é definido que os valores ótimos de espessura de amostra situam-se acima de 10 cm (FERRAZ e MANSELL, 1979). No entanto, nesse trabalho é possível observar que praticamente todos os valores de DR estiveram abaixo de 5% para todos os tamanhos de colimadores (Figuras 25c e 25d). Isso mostra que nesse estudo, para os tipos de solos analisados, praticamente todas as espessuras analisadas apresentaram bons resultados na medida de  $\mu$  independente do tamanho do colimador.

A maior proximidade entre os valores de  $\mu$  para os diferentes colimadores também revelam que o aumento no tamanho do colimador não afeta os valores médios de  $\mu$ . Esse resultado está em concordância com os encontrados por Sidhu et al. (1999) para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$  para amostra de solo. No entanto, esses autores observaram que para amostras maiores do que as usadas nesta dissertação ocorre um aumento do  $\mu$  com a espessura e esse se torna mais pronunciado com o aumento do tamanho do colimador.

Com o aumento do tamanho do colimador, o número de eventos de fótons espalhados aumenta, já que a contribuição desses fótons espalhados é obtida de um volume maior da amostra, o que aumenta o ângulo de aceitação na face do detector que, por sua vez, resulta em um aumento no número de fótons espalhados detectados. Portanto, para cada colimador, o espalhamento múltiplo aumenta com o aumento na espessura da amostra, e satura após um determinado valor, chamado de espessura de saturação (SINGH et al., 2006).

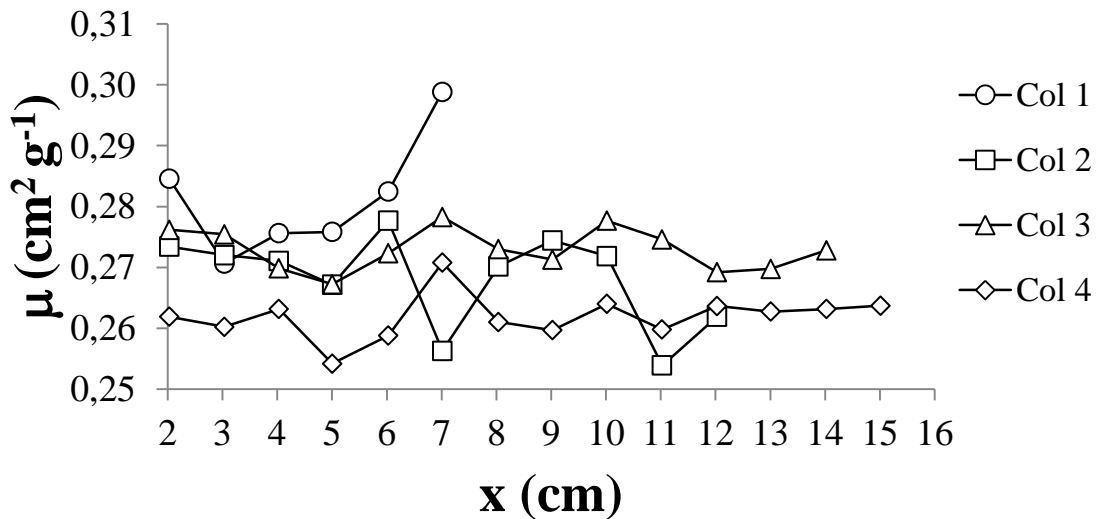
Acima de certas espessuras, o número de fótons múltiplos espalhados emergindo do aumento da espessura da amostra, aumenta devido a interação do feixe gama. No entanto, depois da espessura de saturação, esse número de fótons múltiplos espalhados não aumenta mais, pois a probabilidade de absorção dentro da amostra é reforçada. Assim, um estágio é alcançado quando a espessura da amostra se torna suficientemente grande para compensar o aumento de fótons múltiplos espalhados. No entanto, para os solos usados nesse estudo, para

a fonte de  $^{137}\text{Cs}$ , o efeito da espessura e tamanho dos colimadores não afetou as medidas de  $\mu$  devido a detecção de fótons secundários.

Uma vez que os dois solos apresentaram o mesmo comportamento após 10 cm de espessura (aproximação dos valores de  $\mu$  para os diferentes colimadores) é possível concluir que a diferença de composição química de ambos não apresenta diferenças importantes nas medidas de variação de  $\mu$  com a espessura da amostra para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$ .

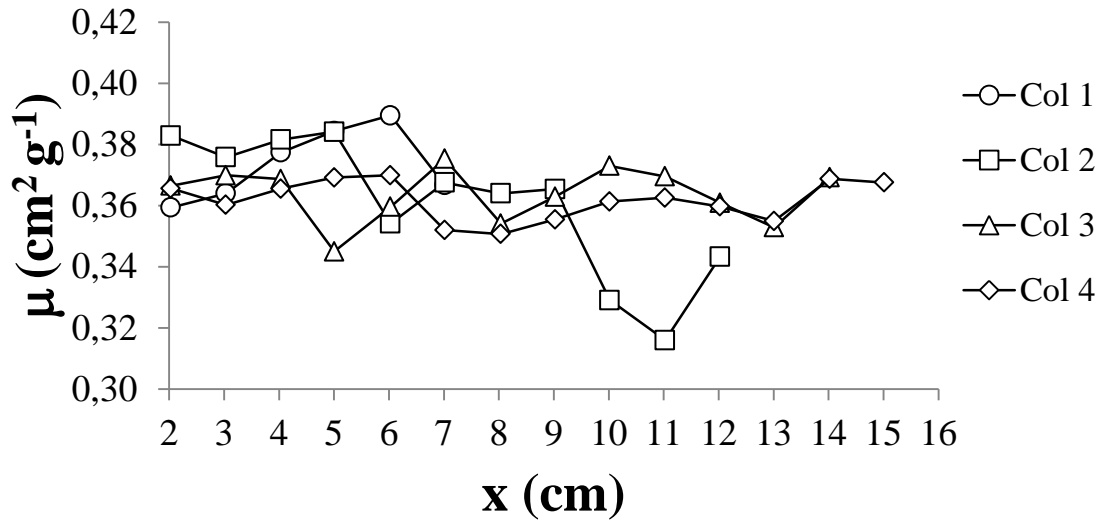
A Figura 25 traz os valores experimentais de variação do coeficiente de atenuação de massa das amostras de solo arenoso e argiloso para a fonte de  $^{241}\text{Am}$ .

### $^{241}\text{Am}$ - Solo arenoso



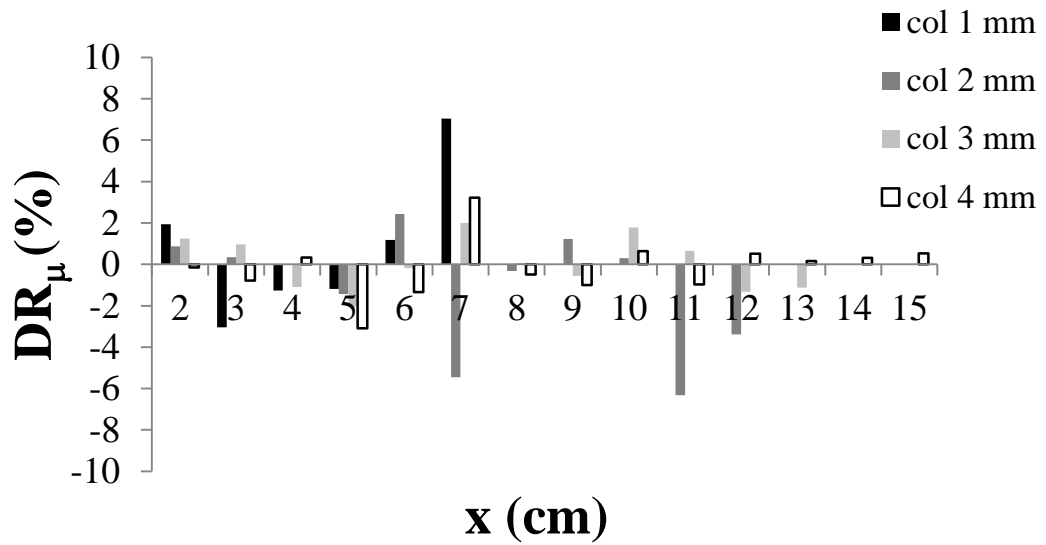
(a)

### $^{241}\text{Am}$ - Solo argiloso



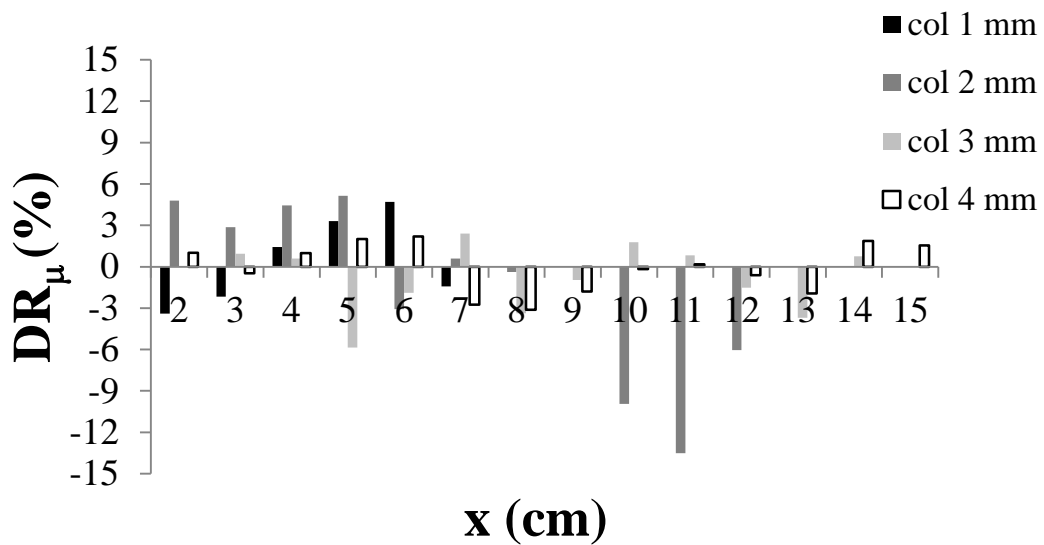
(b)

### $^{241}\text{Am}$ - Solo arenoso



(c)

## $^{241}\text{Am}$ - Solo argiloso



(d)

FIGURA 26 - Variação do  $\mu$  para a fonte de  $^{241}\text{Am}$  em função da espessura da amostra: a) solo arenoso, b) solo argiloso, c) desvio relativo (DR) entre os valores de  $\mu$  para o solo arenoso e d) DR entre os valores de  $\mu$  para o solo argiloso.

Para a fonte de  $^{241}\text{Am}$  (Figuras 26a e 26b) fica mais evidente a dependência dos valores experimentais de  $\mu$  com as variações no tamanho do colimador e espessura das amostras. Ao contrário dos valores obtidos para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$ , os melhores valores de  $\mu$  são aqueles determinados a partir das menores espessuras para os colimadores menores, tanto para o solo arenoso quanto para o argiloso. Esse resultado está em concordância com o trabalho de Pedrotti et al. (2003), no qual os autores determinaram que, com o uso da fonte de  $^{241}\text{Am}$ , a espessura ótima para a determinação da densidade de um determinado planossolo é de 4 ou 6 cm, dependendo do horizonte estudado (A ou B).

Ferraz e Mansell (1979) também descrevem em seu boletim que as espessuras menores (<10 cm) são as que apresentam os melhores resultados em medidas de propriedades físicas do solo pela técnica de atenuação de raios gama. No entanto, é válido observar que os valores de  $\mu$  mesmo para a fonte de  $^{241}\text{Am}$ , para os colimadores maiores (3 e 4 mm), apresentam a tendência de se aproximarem para um valor em comum e com menores variações para  $\mu$  em relação aos colimadores menores. Esse resultado representa uma evidência de que para colimadores maiores talvez esse intervalo ótimo de medida do  $\mu$  dependendo do tipo de solo possa ser aumentado. Esse resultado é importante

principalmente em medidas de umidade pela técnica de atenuação de raios gama (PIRES et al., 2005b).

Para o solo arenoso (Figura 26a) as menores variações de  $\mu$  são determinadas para a espessura de 3 cm com os colimadores de 1, 2 e 3 mm, enquanto que para o colimador de 4 mm, o valor de  $\mu$  se torna próximo a estes na espessura de 7 cm. Para o solo argiloso (Figura 23b), os colimadores 1, 3 e 4 apresentam uma menor variação do  $\mu$  para a espessura de 2 cm, e o colimador de 2 mm apresenta um valor de  $\mu$  maior para essa espessura, diminuindo em 3 cm e tornando a aumentar nas próximas espessuras, até atingir um valor próximo aos colimadores 1 e 3 em 7 cm, e ao colimador 4 em 9 cm. Nas Figuras 26c, d, fica evidente que a variação entre as medidas de  $\mu$  é menor para as espessuras menores (<5 cm), aumentando com o aumento da espessura da amostra.

A dependência dos valores de  $\mu$  obtidos através de diferentes espessuras e tamanhos de colimadores, consiste no fato de que esses fatores alteram a quantidade de fótons espalhados que são contabilizados pelo detector (GOPAL e SANJEEVAIAH, 1973; VARIER et al., 1986; SINGH e MUDAHAR, 1993; SIDHU et al., 1999a; SIDHU et al., 1999b; SINGH et al., 2006).

As diferenças entre os valores de  $\mu$  entre os colimadores de diferentes diâmetros para os dois solos são apresentadas na Tabela 5. As Figuras 27 e 28 apresentam a correlação linear entre os valores de  $\mu$  determinados a partir dos diferentes tamanhos de colimadores para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$  considerando valores de espessura de amostra entre 8 e 15 cm.

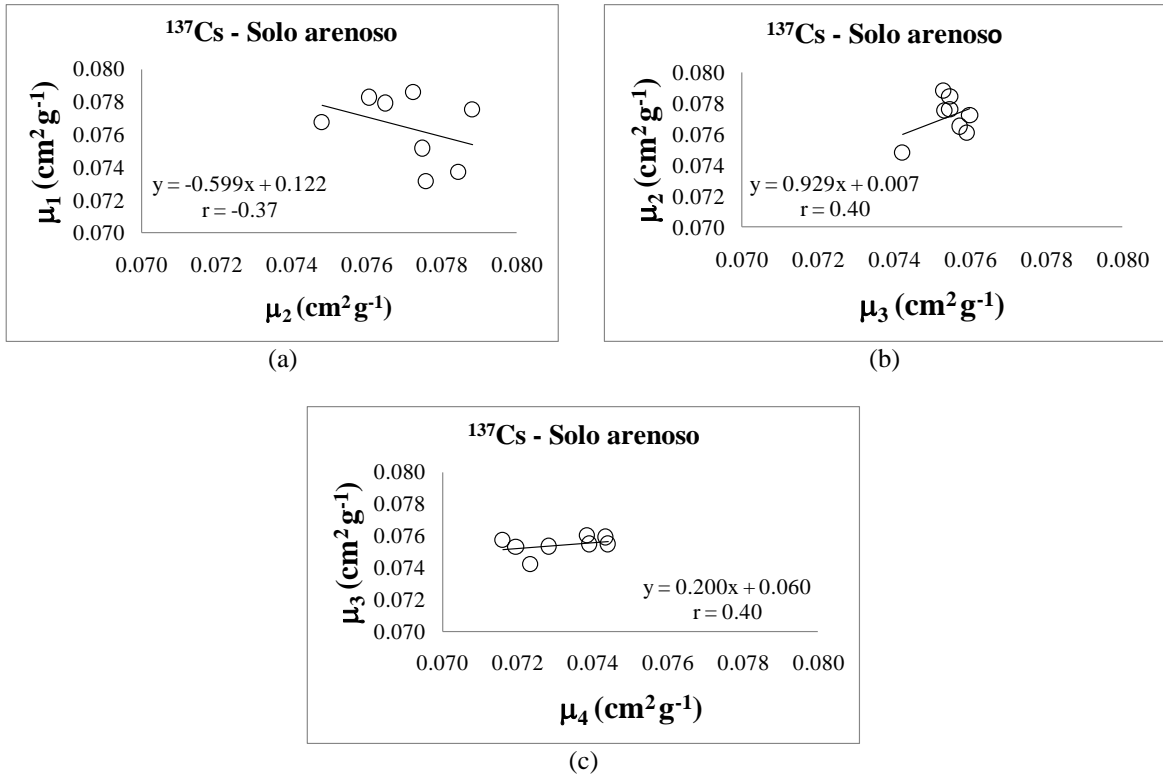


FIGURA 27 - Correlação entre os valores de  $\mu$  para o solo arenoso e fonte de <sup>137</sup>Cs. a) correlação entre os colimadores de 1 e 2 mm; b) correlação entre os colimadores de 2 e 3 mm; c) correlação entre os colimadores de 3 e 4 mm. Os pontos selecionados se referem as espessuras de 8 a 15 cm.

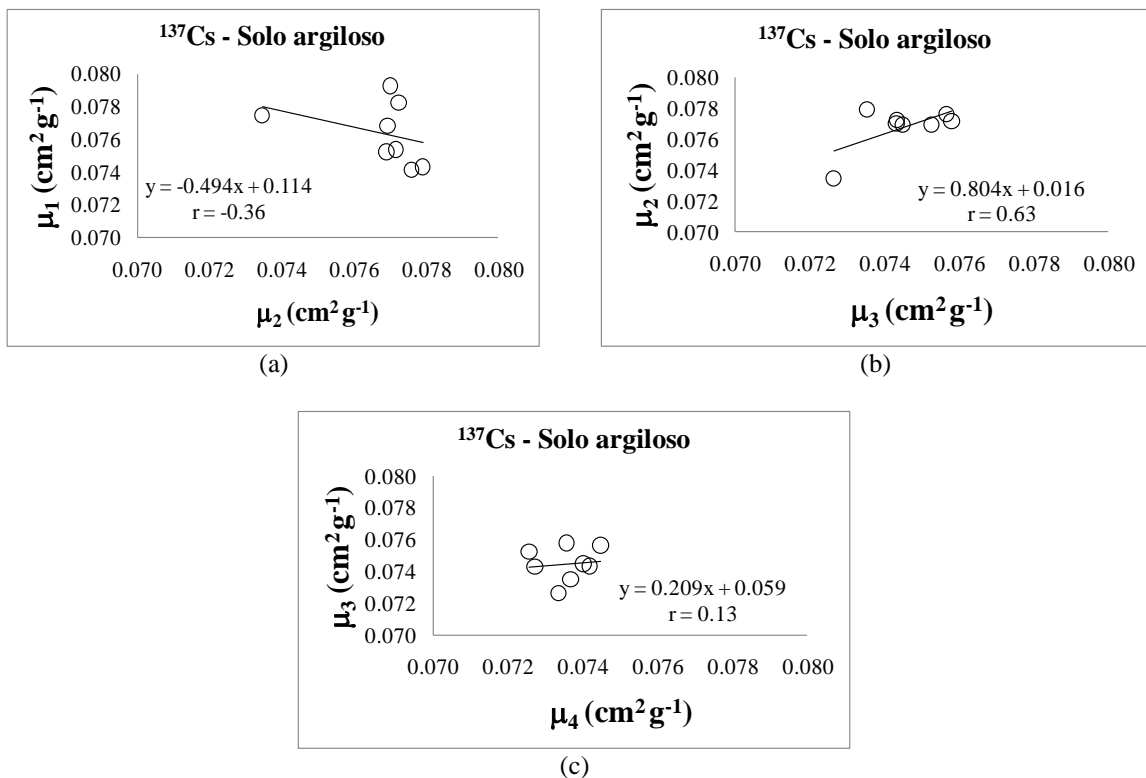


FIGURA 28 – Correlação entre os valores de  $\mu$  para o solo argiloso e fonte de <sup>137</sup>Cs. a) correlação entre os colimadores de 1 e 2 mm; b) correlação entre os colimadores de 2 e 3 mm; c) correlação entre os colimadores de 3 e 4 mm. Os pontos selecionados se referem as espessuras de 8 a 15 cm.

Analisando as Figuras 27 e 28 é possível observar que somente existem correlações fracas entre os coeficientes de atenuação sendo que para o solo arenoso o aumento no tamanho dos colimadores torna os valores de coeficiente de correlação ( $r$ ) ligeiramente maiores (Figuras 27b e 27c). Porém, essa tendência não ocorre para o solo de textura argilosa que apresenta maior valor de  $r$  na correlação entre os colimadores de 2 e 3 mm (Figura 28b). Ainda é possível notar que para ambos os solos existe correlação negativa entre os colimadores de 1 e 2 mm (Figuras 27a e 28a). Isso indica que o aumento no tamanho do colimador ocasiona maiores valores de  $\mu$ . Para as demais correlações o aumento no tamanho do colimador ocasiona uma diminuição no valor de  $\mu$  (Tabela 6).

As Figuras 29 e 30 mostram resultados de correlação linear entre os valores de  $\mu$  determinados a partir dos diferentes tamanhos de colimadores para a fonte de  $^{241}\text{Am}$  considerando valores de espessura de amostra entre 2 e 7 cm.

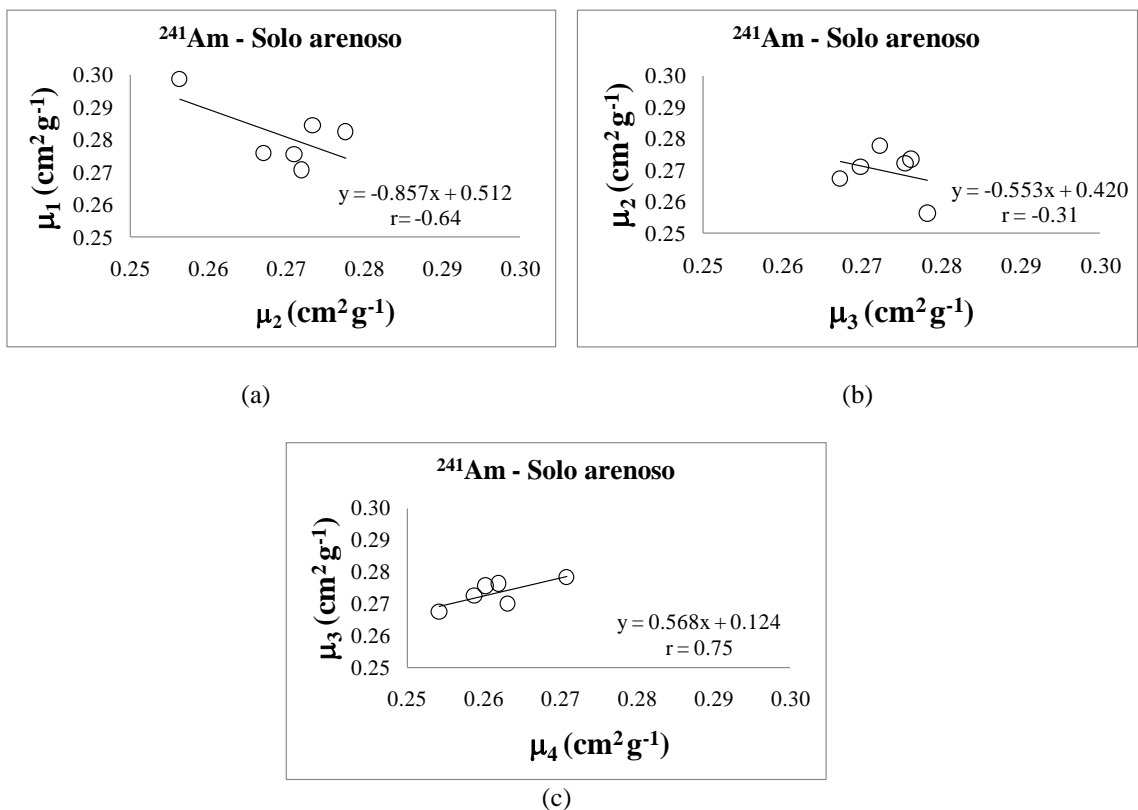


FIGURA 29 - Correlação entre os valores de  $\mu$  para o solo arenoso e fonte de  $^{241}\text{Am}$ . a) correlação entre os colimadores de 1 e 2 mm; b) correlação entre os colimadores de 2 e 3 mm; c) correlação entre os colimadores de 3 e 4 mm. Os pontos selecionados se referem as espessuras de 2 a 7 cm.



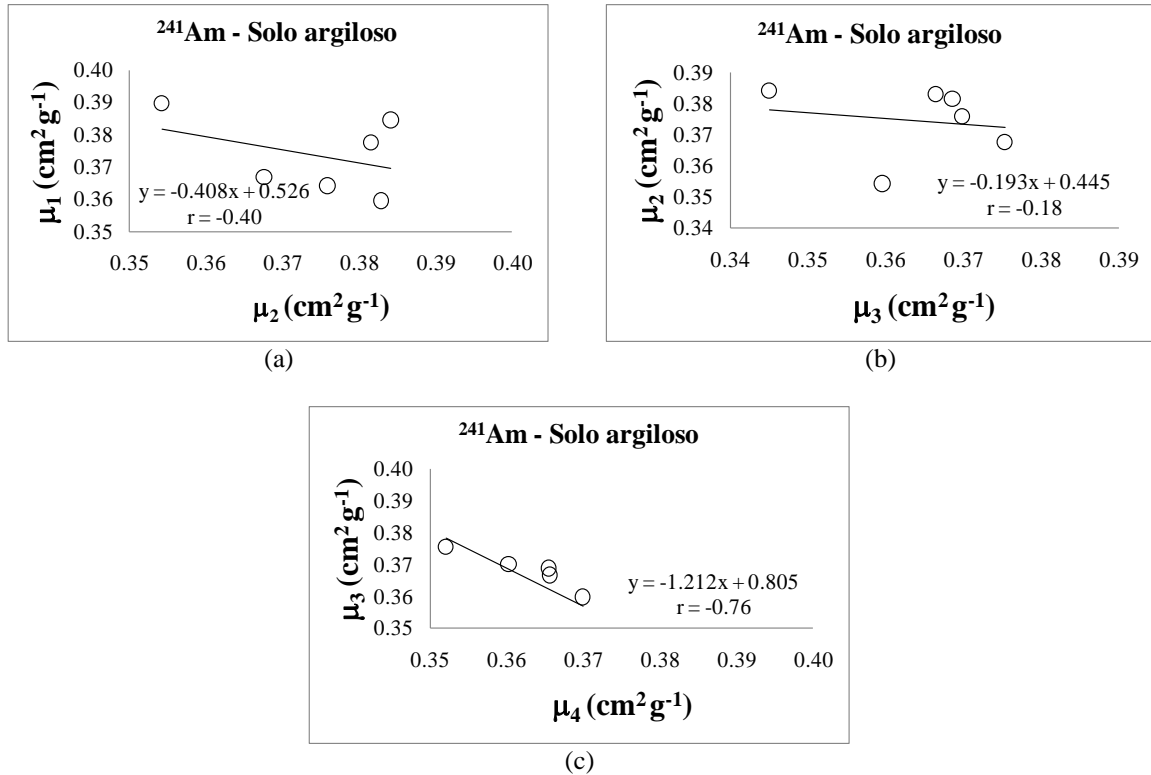


FIGURA 30 - Correlação entre os valores de  $\mu$  para o solo argiloso e fonte de <sup>241</sup>Am. a) correlação entre os colimadores de 1 e 2 mm; b) correlação entre os colimadores de 2 e 3 mm; c) correlação entre os colimadores de 3 e 4 mm. Os pontos selecionados se referem as espessuras de 2 a 7 cm.

Para a fonte de <sup>241</sup>Am o que se observa são correlações negativas (Figuras 29 e 30) para os solos para os diferentes colimadores sendo exceção o solo arenoso para os colimadores de 3 e 4 mm (Figura 28c). As correlações são médias ou fracas sem tendência de aumento com o aumento do tamanho do colimador, embora as correlações mais fortes tenham sido observadas para os colimadores maiores para ambos os solos (Figuras 28c e 29c). O que se observa para a fonte de <sup>241</sup>Am, no geral, é uma diminuição no valor de  $\mu$  com o tamanho da amostra e aumento do tamanho do colimador para o solo arenoso. Porém, o mesmo não pode ser dito para o solo de textura argilosa (Tabela 5).

TABELA 5 - Diferenças dos valores de coeficiente de atenuação de massa ( $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ ) entre os colimadores de diferentes diâmetros para os solos arenoso e argiloso e fontes radioativas de  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{241}\text{Am}$ .

Espessura x (cm)	Solo arenoso ( $^{137}\text{Cs}$ )					
	$\mu_i - \mu_{i+1}$ ( $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ )					
	(1-2)*	(1-3)	(1-4)	(2-3)	(2-4)	(3-4)
8	0,0014	0,0022	0,0063	0,0008	0,0049	0,0041
9	-0,0023	-0,0002	0,0023	0,0022	0,0047	0,0025
10	-0,0013	0,0022	0,0056	0,0035	0,0069	0,0033
11	0,0019	0,0025	0,0044	0,0006	0,0025	0,0019
12	-0,0048	-0,0018	-0,0007	0,0030	0,0040	0,0011
13	-0,0045	-0,0023	-0,0008	0,0021	0,0037	0,0016
14	0,0013	0,0026	0,0047	0,0012	0,0034	0,0021
15	0,0022	0,0024	0,0039	0,0002	0,0017	0,0016
	Solo argiloso ( $^{137}\text{Cs}$ )					
8	0,0023	0,0049	0,0065	0,0027	0,0043	0,0016
9	-0,0735	-0,0726	-0,0733	0,0008	0,0001	-0,0007
10	-0,0017	0,0000	0,0026	0,0016	0,0043	0,0027
11	-0,0001	0,0023	0,0028	0,0025	0,0029	0,0005
12	-0,0035	-0,0015	-0,0003	0,0019	0,0031	0,0012
13	-0,0036	0,0008	0,0006	0,0044	0,0042	-0,0002
14	-0,0018	-0,0004	0,0018	0,0014	0,0036	0,0022
15	0,0010	0,0039	0,0041	0,0029	0,0031	0,0002
	Solo arenoso ( $^{241}\text{Am}$ )					
2	0,011	0,008	0,023	-0,003	0,011	0,014
3	-0,272	-0,275	-0,260	-0,003	0,012	0,015
4	0,005	0,006	0,012	0,001	0,008	0,007
5	0,009	0,009	0,022	0,000	0,013	0,013
6	0,005	0,010	0,024	0,005	0,019	0,014
7	0,043	0,021	0,028	-0,022	-0,014	0,008
	Solo argiloso ( $^{241}\text{Am}$ )					
2	-0,024	-0,007	-0,006	0,016	0,017	0,001
3	-0,012	-0,006	0,004	0,006	0,016	0,010
4	-0,004	0,009	0,012	0,013	0,016	0,003
5	0,000	0,039	0,015	-0,345	-0,369	-0,024
6	0,035	0,030	0,020	-0,005	-0,016	-0,010
7	-0,001	-0,009	0,015	-0,008	0,016	0,023

\* Os termos entre parênteses representam os colimadores i menos i+1, ou seja, nesse caso o valor de  $\mu$  para o colimador de 1 mm menos de 2 mm.

A Tabela 6 apresenta valores médios de  $\mu$  e os erros ( $d\mu$ ) obtidos através das Equações (33) e (37) para a água e solo, respectivamente. Para cada  $\mu$  obtido experimentalmente foi determinada a estimativa do erro atribuído à medida. Os valores apresentados (Tabela 6) foram obtidos através de uma média de  $d\mu$  para cada média de  $\mu$ . Pode-se verificar que os menores erros, tanto no caso do solo quanto para a água são aqueles referentes à fonte de  $^{137}\text{Cs}$ . Para esta fonte, ambos os solos apresentaram valores muito próximos. Os valores de erro do solo arenoso, para a fonte de  $^{241}\text{Am}$ , apesar de serem maiores, ainda estão abaixo de 0,0008 para o colimador 1 mm e abaixo de 0,0005 para os demais colimadores, havendo um aumento para o solo argiloso, com valores permanecendo abaixo de 0,001 para o colimador de 1 mm e abaixo de 0,0007 para os demais colimadores.

TABELA 6 – Valores médios do coeficiente de atenuação de massa ( $\mu$ ) para o solo e para a água obtidos para os diferentes colimadores e seus respectivos erros ( $d\mu$ ).

Fonte: $^{137}\text{Cs}$						
Colimador	Solo arenoso		Solo argiloso		Água	
(mm)	$\mu (\text{cm}^2 \text{g}^{-1})^*$	$d\mu (\text{cm}^2 \text{g}^{-1})$	$\mu (\text{cm}^2 \text{g}^{-1})$	$d\mu (\text{cm}^2 \text{g}^{-1})$	$\mu (\text{cm}^2 \text{g}^{-1})$	$d\mu (\text{cm}^2 \text{g}^{-1})$
1	0,0765	0,00003	0,0776	0,00003	-	-
2	0,0768	0,00003	0,0770	0,00002	0,08270	0,00003
3	0,0748	0,00002	0,0743	0,00002	-	-
4	0,0718	0,00001	0,0726	0,00001	-	-
Fonte: $^{241}\text{Am}$						
	$\mu (\text{cm}^2 \text{g}^{-1})$	$d\mu (\text{cm}^2 \text{g}^{-1})$	$\mu (\text{cm}^2 \text{g}^{-1})$	$d\mu (\text{cm}^2 \text{g}^{-1})$	$\mu (\text{cm}^2 \text{g}^{-1})$	$d\mu (\text{cm}^2 \text{g}^{-1})$
1	0,2792	0,0007	0,3721	0,001	-	-
2	0,2711	0,0004	0,3654	0,0006	-	-
3	0,2728	0,0003	0,3665	0,0005	-	-
4	0,2623	0,0002	0,3620	0,0003	0,1947	0,0001

\* Cada valor médio de  $\mu$ , para um diâmetro específico de colimador, corresponde a uma média de todas as espessuras

#### 4.5 INFLUÊNCIA DOS VALORES DE COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO DE MASSA EM MEDIDAS REPRESENTATIVAS DE DENSIDADE DO SOLO

Neste item será analisada primeiramente a influência da abertura do colimador (ângulo sólido) nas medidas de  $\mu$  e conseqüentemente de  $\rho_s$  e depois será analisada a influência da espessura das amostras nas medidas de  $\rho_s$ .

O critério para escolha das espessuras de amostras para análise do primeiro item foi baseado no fato de que amostras menores (<10 cm) fornecem resultados melhores de densidade e/ou umidade do solo quando a fonte de  $^{241}\text{Am}$  está sendo usada ao passo que espessuras maiores de amostras (10-25 cm) fornecem resultados melhores para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$  (FERRAZ e MANSELL, 1979).

Na seqüência são apresentadas imagens tomográficas que representam variações em tons de cinza na densidade das amostras de solo. A cor preta representa densidade zero e a cor branca a máxima. As primeiras imagens (Figuras 31 e 32) se referem às amostras de solo arenoso usando como fonte de radiação para determinação de  $\rho_s$  o  $^{137}\text{Cs}$ .

Os mapas de  $\rho_s$  foram gerados usando valores distintos de  $\mu$  devido a variações com o tamanho do colimador e também com a espessura das amostras. Para a amostra de solo arenoso e fonte de  $^{137}\text{Cs}$  foi selecionada uma matriz de UT (26x18) no centro da imagem e os seguintes parâmetros foram usados para converter os valores de UT em  $\rho_s$ :  $\mu$  da água de  $0,08535 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$  (FERRAZ e MANSELL, 1979), umidade de  $0,1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (PIRES et al., 2004) e parâmetro de calibração do TC de  $1,067 \text{ cm}$  (PIRES et al., 2002).

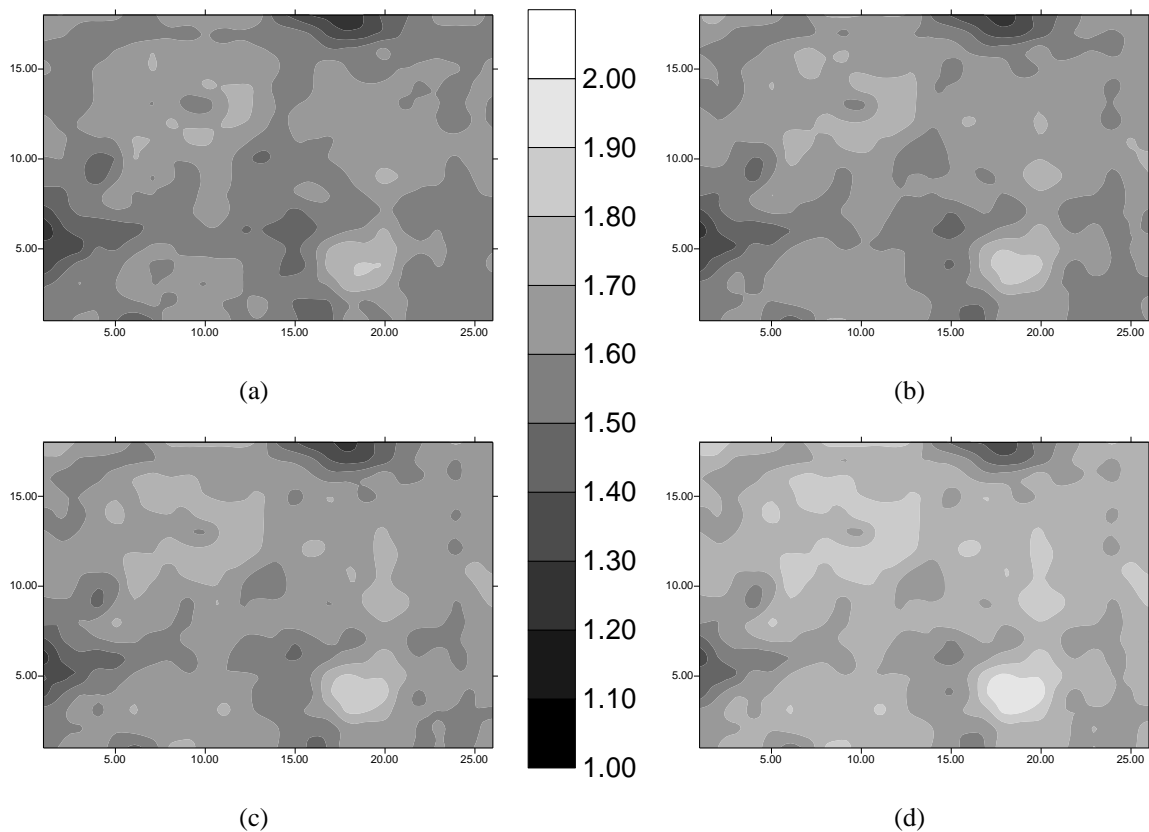


FIGURA 31 - Imagem tomográfica representando mapas de densidade do solo ( $\rho_s$ ) para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$  para o solo arenoso. O valor de  $\mu$  do solo usado para gerar os mapas de  $\rho_s$  se refere a espessura de amostra de 8 cm. A escala traz valores de  $\rho_s$ , sendo a cor branca valores de densidade maior e cor preta densidade menor. (a) Colimador de 1 mm; (b) Colimador de 2 mm; (c) Colimador de 3 mm e (d) Colimador de 4 mm.

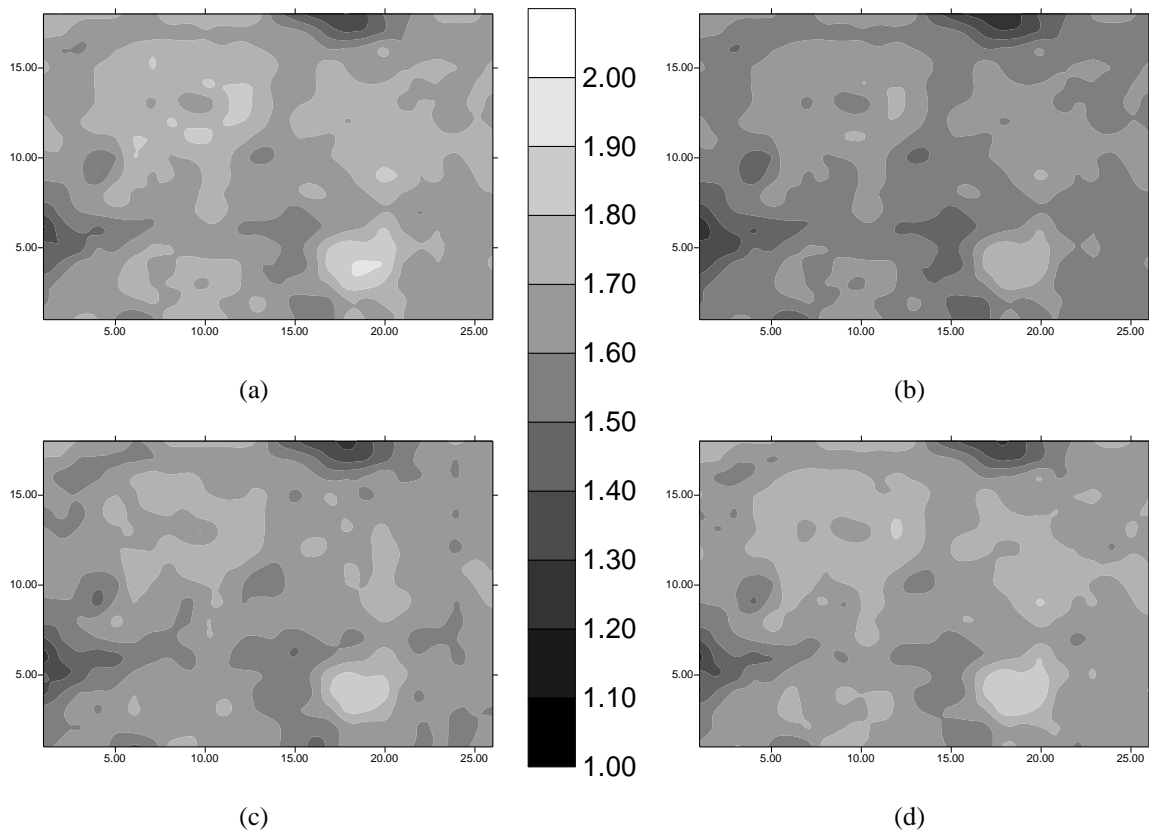


FIGURA 32 - Imagem tomográfica representando mapas de densidade do solo ( $\rho_s$ ) para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$  para o solo arenoso. O valor de  $\mu$  do solo usado para gerar os mapas de  $\rho_s$  se refere a espessura de amostra de 12 cm. A escala traz valores de  $\rho_s$ , sendo a cor branca valores de densidade maior e cor preta densidade menor. (a) Colimador de 1 mm; (b) Colimador de 2 mm; (c) Colimador de 3 mm e (d) Colimador de 4 mm.

As Figuras 31 e 32 possibilitam uma análise qualitativa das variações no  $\mu$  e consequentemente nos mapas de  $\rho_s$ . Como pode ser observado para a espessura de 8 cm da amostra (Figura 31) o colimador de 1 mm é que apresenta as maiores diferenças na distribuição de  $\rho_s$  quando em comparação com os outros colimadores. Para a amostra de 12 cm de espessura (Figura 32) o colimador de 3 mm é que apresenta maiores variações de  $\rho_s$  em relação aos demais colimadores. Esse tipo de informação é importante em estudos de variabilidade espacial desse parâmetro físico analisado.

A Figura 33 mostra os gráficos de variação de  $\rho_s$  para uma linha da matriz de dados (linha 15) selecionada considerando o valor médio da densidade para todos os valores de  $\rho_s$  que compõem a matriz de dados. A mesma linha foi selecionada para todas as imagens geradas (Figuras 31 e 32). Esses gráficos permitem uma análise quantitativa do efeito de diferentes tamanhos de colimadores nas medidas de  $\rho_s$ .

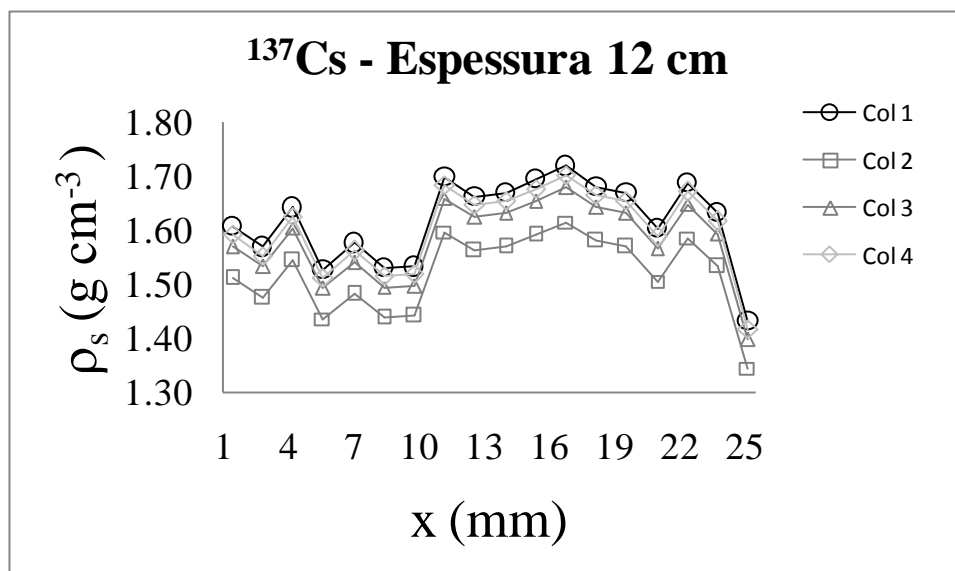
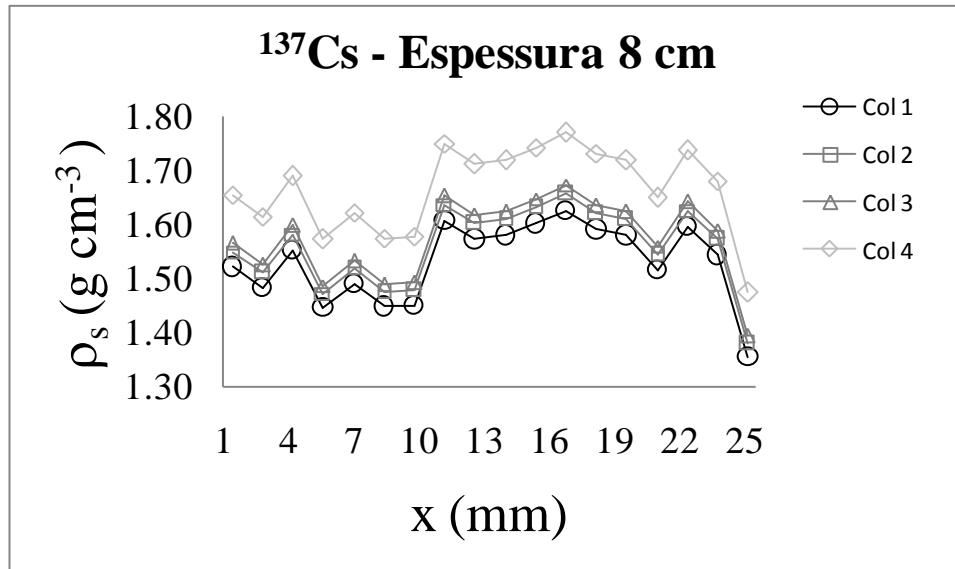


FIGURA 33 - Variações na densidade da amostra em função de diferenças no tamanho do colimador. Col 1-4 representa os colimadores de 1mm até 4 mm. (a) espessura de amostra de 8 cm e (b) espessura de amostra de 12 cm. Amostra de solo arenoso. O eixo x apresenta valores ao longo da linha selecionada na matriz de densidade.

Pela análise da Figura 33 é possível observar que para a espessura de 8 cm (Figura 33a) o colimador de 4 mm é que apresenta valores de  $\rho_s$  mais distantes dos valores encontrados para os demais colimadores. Esse resultado ocorreu em virtude do  $\mu$  do solo para esse colimador ter sido o menor encontrado para essa espessura de amostra. Por esse motivo a escolha desse colimador para medir a densidade do solo para essa espessura de amostra irá

gerar valores superestimados (Tabela 7) dessa propriedade física. Para os colimadores de 1 a 3 mm praticamente não existem diferenças entre os valores de  $\rho_s$ . Isso demonstra que o uso de qualquer um desses 3 últimos colimadores irá apresentar praticamente os mesmos valores de  $\rho_s$  para essa espessura de amostra.

Para a espessura de 12 cm (Figura 33b) o valor mais discrepante de  $\rho_s$  ocorre para o colimador de 2 mm e isso se deve ao maior valor de  $\mu$  encontrado para essa espessura e colimador. Nesse caso específico, o uso desse colimador fornecerá resultados subestimados (Tabela 7) de  $\rho_s$ . Os outros três colimadores praticamente não apresentaram diferenças importantes nos valores de  $\rho_s$  com as diferenças no tamanho do colimador.

TABELA 7 - Valores médios de densidade do solo ( $\rho_s$ ) obtidos para os diferentes tamanhos de colimadores para a amostra de solo arenoso e fonte de  $^{137}\text{Cs}$ .

Amostra	$\rho_s$ (g.cm <sup>3</sup> )			
	1 mm*	2 mm	3 mm	4 mm
Espessura 8 cm	1,53±0,07	1,56±0,07	1,58±0,08	1,67±0,08
Espessura 12 cm	1,62±0,08	1,52±0,07	1,58±0,08	1,60±0,08

\* Os valores de  $\rho_s$  são referentes ao valor médio do transcepto linear (linha 15) usado para verificar as variações da densidade com o tamanho do colimador. Esse valor médio se refere a 18 valores de  $\rho_s$  (1,4 – 25,2 mm) analisados na linha da matriz.

Na comparação das duas espessuras e tamanho de colimadores é possível observar que os melhores resultados são obtidos para os colimadores de 2 e 3 mm, pois são os que apresentam valores mais próximos de  $\rho_s$ , embora todos os valores determinados estão dentro da faixa de erro, fornecendo bons resultados.

A Figura 34 mostra os gráficos de variação de  $\rho_s$  em função da espessura da amostra considerando o mesmo colimador para cada espessura.

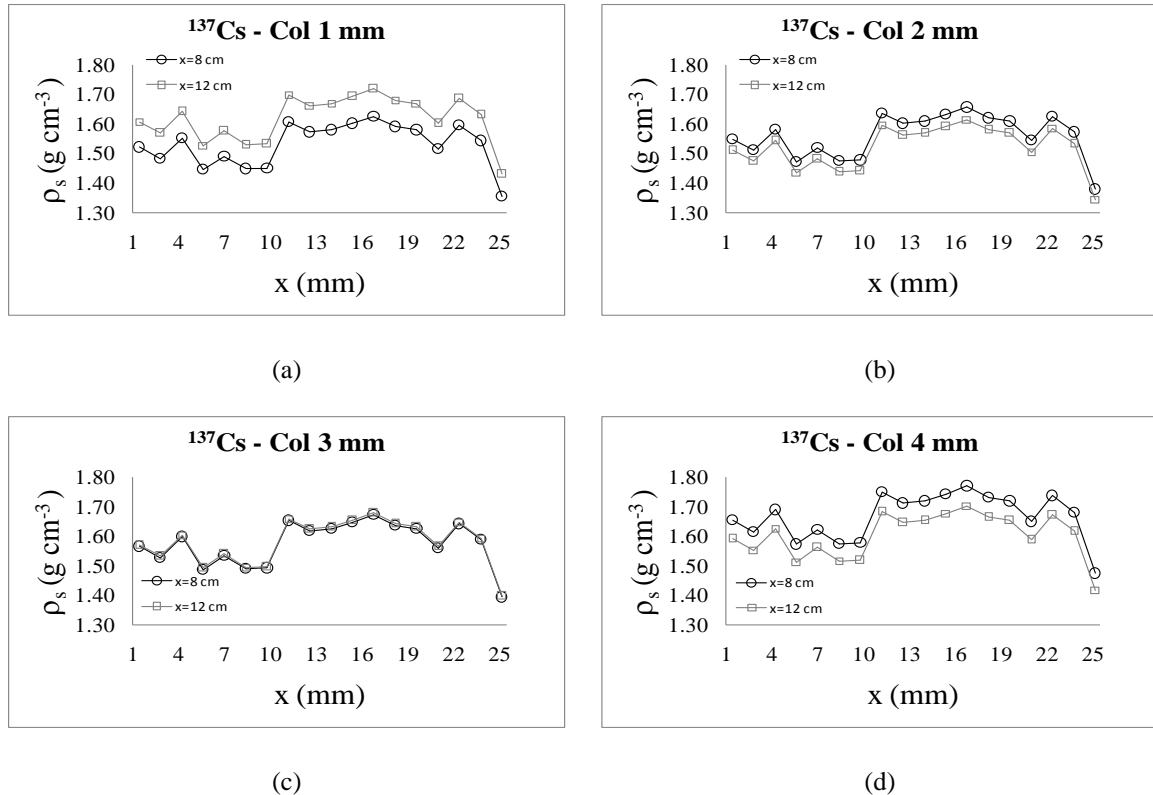
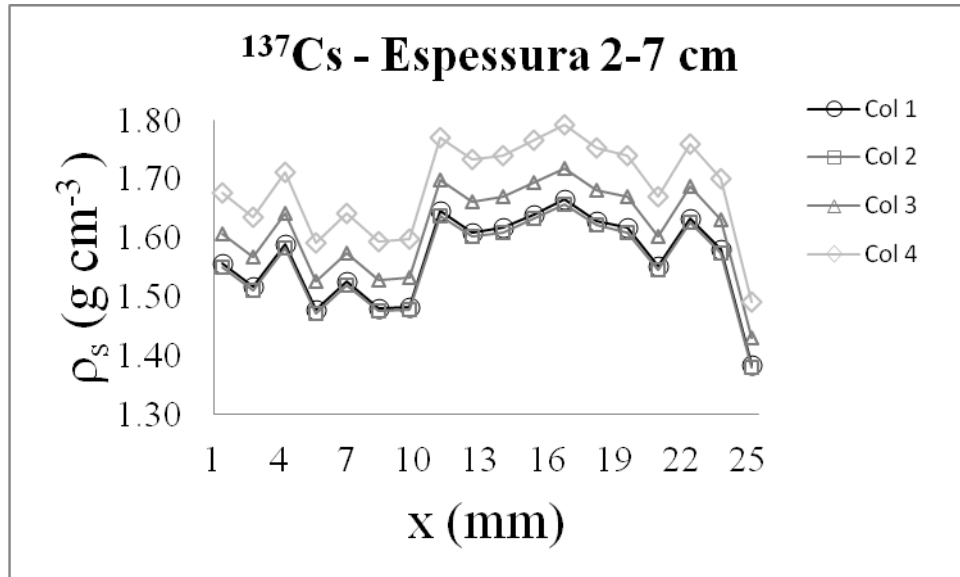


FIGURA 34 - Variações na densidade do solo em função da espessura da amostra. (a) colimador de 1 mm, (b) colimador de 2 mm, (c) colimador de 3 mm e (d) colimador de 4 mm. Solo de textura arenosa. O eixo x apresenta valores ao longo da linha selecionada na matriz de densidade.

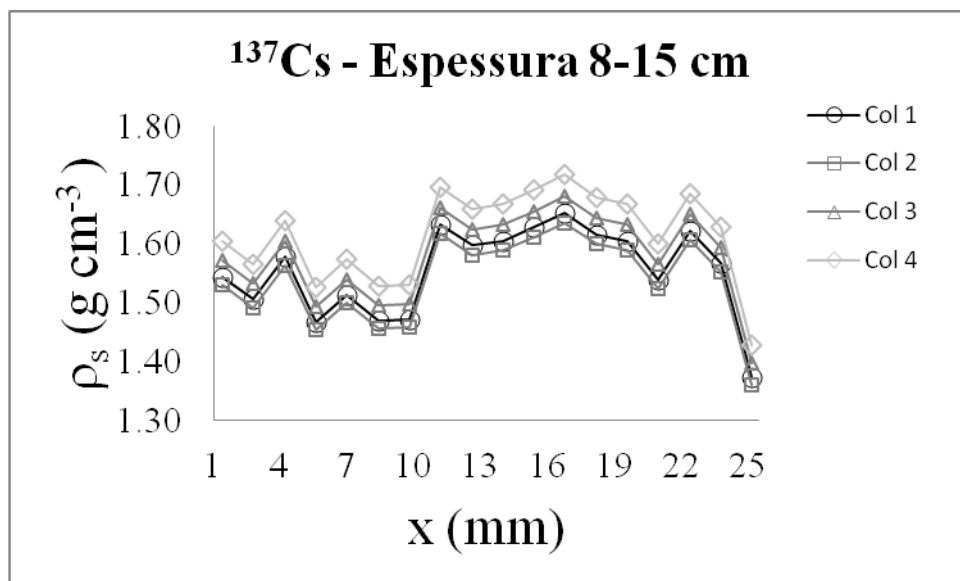
Ao analisar os resultados quantitativos da Figura 34 é possível observar que para o colimador de 1 mm (Figura 34a) a influência da espessura é representada por um aumento no valor de  $\rho_s$  em função do aumento da espessura da amostra. Esse resultado se deve as maiores flutuações nos valores de  $\mu$  para esse tamanho de colimador. Os colimadores de 2 e 4 mm (Figuras 34b e 34d) exibem comportamento inverso em relação ao colimador de 1 mm, onde a menor espessura apresenta os maiores valores de densidade. Para o colimador de 2 mm os resultados de  $\rho_s$  na comparação da variação com a espessura estão mais próximos do que no caso do colimador de 4 mm. Esse resultado se explica devido ao fato de que embora as flutuações nos valores de  $\mu$  para o colimador de 2 mm sejam maiores do que para o de 4 mm, o último apresenta uma tendência de aumento do valor de  $\mu$  com a espessura da amostra influenciando a maior discrepância dos valores de  $\rho_s$  com o aumento da espessura da amostra. Já para o colimador de 3 mm (Figura 34c) não existem diferenças nos valores de  $\rho_s$  com o aumento da espessura da amostra. Esse resultado se deve único e exclusivamente a baixa flutuação dos valores de  $\mu$  para essa espessura de amostra ( $y=0,0003x+0,0720$ ,  $r=0,69$ ).



Fazendo uma média dos valores de  $\mu$  para as espessuras menores (2-7 cm) e para as maiores (8-15 cm), é possível comparar as diferenças nos valores de  $\rho_s$  levando em consideração esses dois intervalos de espessuras (Figura 35).



(a)



(b)

FIGURA 35 - Variações na densidade da amostra em função de diferenças no tamanho do colimador. O valor de  $\mu$  usado se refere à média para: (a) espessura de amostra de 2-7 cm e (b) espessura de amostra de 8-15 cm. Amostra de solo arenoso. O eixo x apresenta valores ao longo da linha selecionada na matriz de densidade.

De acordo com os gráficos apresentados, fica evidente que os valores de  $\rho_s$  determinados a partir do valor médio de  $\mu$  para as espessuras menores (Figura 35a) apresentam maiores discrepâncias entre os colimadores quando comparados àqueles determinados a partir do valor médio de  $\mu$  para espessuras maiores (Figura 35b). Essa

informação entra em concordância com trabalhos encontrados na literatura que dizem que espessuras maiores de 10 cm são mais indicadas para a determinação de parâmetros físicos do solo tais como densidade e umidade (FERRAZ e MANSEL, 1979).

Na Figura 36 são apresentadas comparações entre as variações de  $\rho_s$  para cada colimador, obtidos através das médias de  $\mu$  para espessuras menores e maiores:

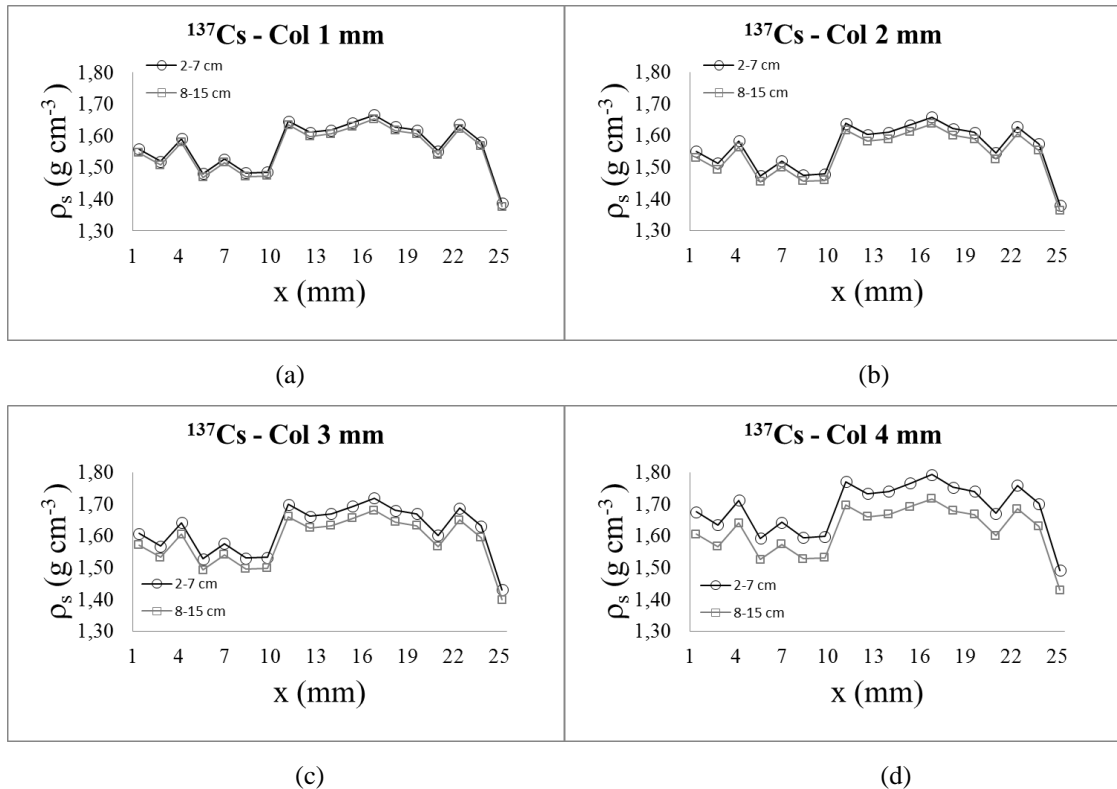


FIGURA 36 - Variações na densidade do solo em função da espessura da amostra, levando-se em consideração a média de  $\mu$  para dois intervalos de espessuras; (a) colimador de 1 mm, (b) colimador de 2 mm, (c) colimador de 3 mm e (d) colimador de 4 mm. Solo de textura arenosa. O eixo x apresenta valores ao longo da linha selecionada na matriz de densidade.

De acordo com a Figura 36, os valores de  $\rho_s$  apresentam uma variação com o aumento do colimador quando comparados os dois intervalos de espessuras. Para o colimador de 1 mm (Figura 36a) praticamente não há diferenças entre os valores de  $\rho_s$  se tomadas as médias de  $\mu$  para as espessuras menores (2-7 cm) ou para as maiores (8-15 cm) – diferença de 1,27% (Tabela 8). Para o colimador de 2 mm (Figura 36b), os valores de  $\rho_s$  começam a se tornar discrepantes ao comparar os dois intervalos de espessuras, sendo que essa discrepância aumenta para o colimador de 3 mm (Figura 36c), e é maior quando selecionado o colimador de 4 mm (Figura 36d).

TABELA 8 - Valores médios de densidade do solo ( $\rho_s$ ) obtidos para os diferentes tamanhos de colimadores e intervalos de espessuras para a amostra de solo arenoso e fonte de  $^{137}\text{Cs}$ .

Espessura	$\rho_s$ (g.cm <sup>3</sup> )			
	1 mm*	2 mm	3 mm	4 mm
2-7 cm	1,57±0,08	1,56±0,07	1,62±0,08	1,69±0,08
8-15 cm	1,55±0,07	1,54±0,07	1,58±0,08	1,62±0,08

\* Os valores de  $\rho_s$  são referentes ao valor médio do transcepto linear (linha 15) usado para verificar as variações da densidade com o tamanho do colimador.

Para a amostra de solo arenoso e fonte de  $^{241}\text{Am}$  (Figuras 37 e 38) foi selecionada uma matriz de UT (26x18) no centro da imagem e os seguintes parâmetros foram usados para converter os valores de UT em  $\rho_s$ :  $\mu$  da água de 0,1989 cm<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>, umidade de 0,109 cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup> e parâmetro de calibração do TC de 0,923 cm (PIRES et al., 2004).

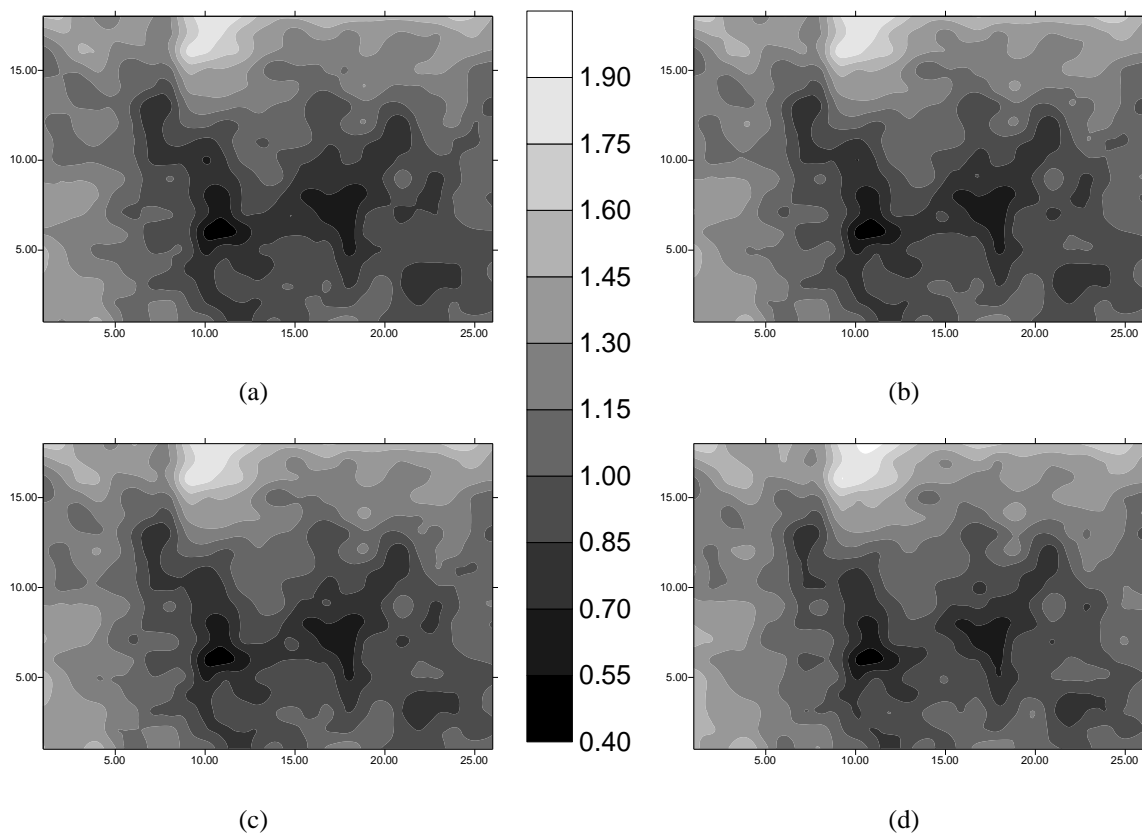


FIGURA 37 - Imagem tomográfica representando mapas de densidade do solo ( $\rho_s$ ) para a fonte de  $^{241}\text{Am}$  para o solo arenoso. O valor de  $\mu$  do solo usado para gerar os mapas de  $\rho_s$  se refere a espessura de amostra de 4 cm. A escala traz valores de  $\rho_s$ , sendo a cor branca para maior densidade e preta para menor densidade. (a) Colimador de 1 mm; (b) Colimador de 2 mm; (c) Colimador de 3 mm e (d) Colimador de 4 mm.

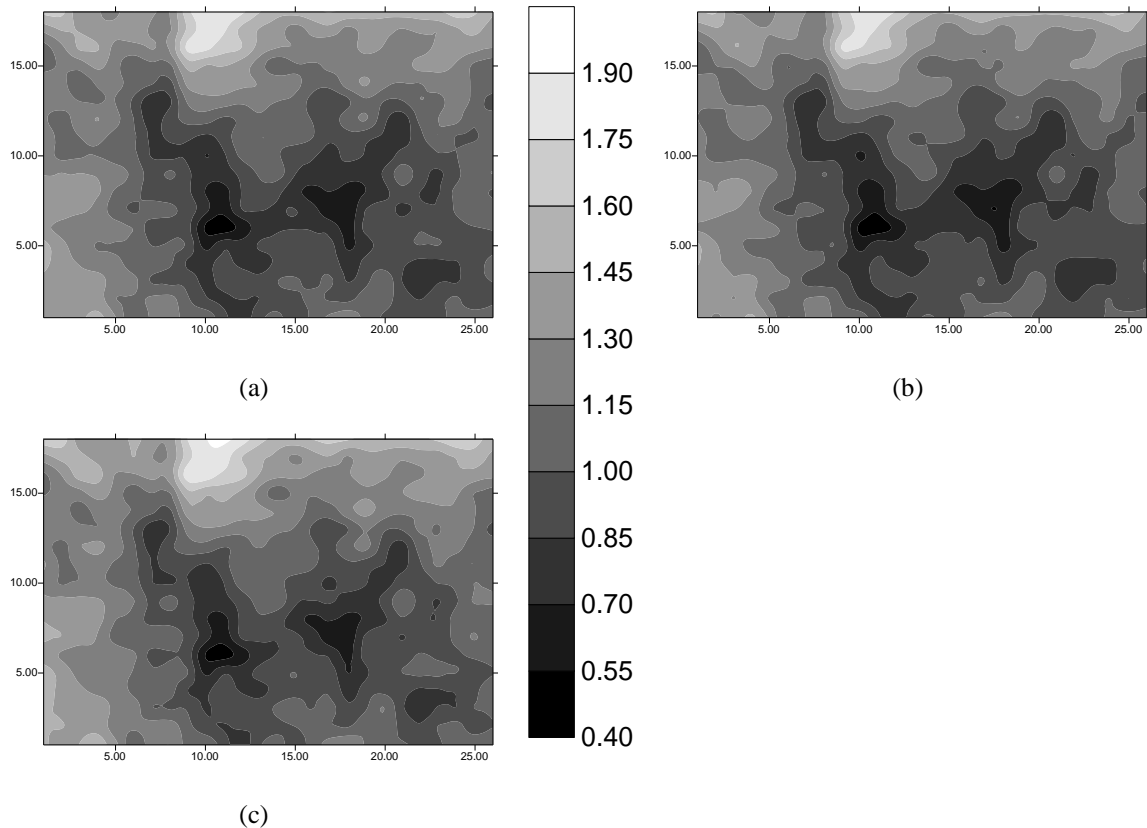
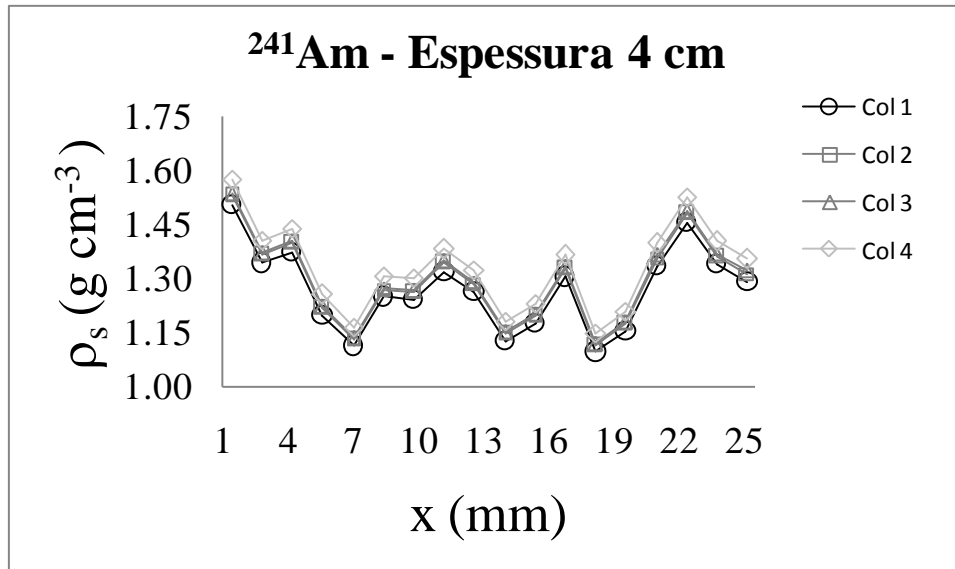


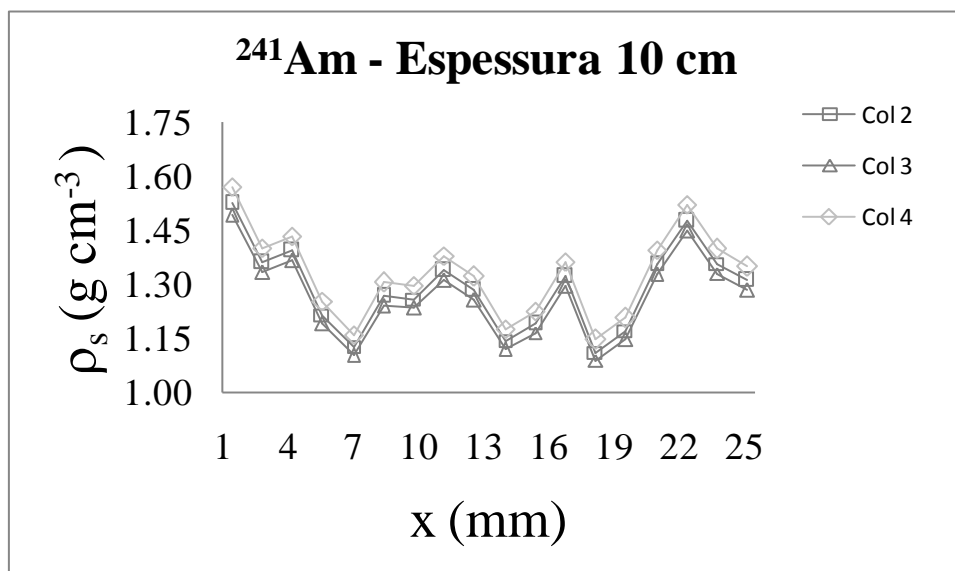
FIGURA 38 - Imagem tomográfica representando mapas de densidade do solo ( $\rho_s$ ) para a fonte de  $^{241}\text{Am}$  para o solo arenoso. O valor de  $\mu$  do solo usado para gerar os mapas de  $\rho_s$  se refere a espessura de amostra de 10 cm. A escala traz valores de  $\rho_s$ , sendo a cor branca referente a valores de maior densidade, e cor preta valores de menor densidade. (a) Colimador de 2 mm; (b) Colimador de 3 mm e (c) Colimador de 4 mm.

As Figuras 37 e 38 da mesma forma que as figuras 31 e 32 também possibilitam uma análise qualitativa das variações no valor de  $\mu$  e conseqüentemente nos mapas de  $\rho_s$ . Como pode ser observado para a espessura de 4 cm (Figura 37) o colimador de 4 mm é que apresenta as maiores diferenças na distribuição de  $\rho_s$  quando em comparação com os outros colimadores. O mesmo resultado é observado para a amostra de 10 cm de espessura (Figura 38).

A Figura 39 mostra os gráficos de variação de  $\rho_s$  para uma linha da matriz de dados (linha 4) selecionada considerando o valor médio da densidade para todos os valores de  $\rho_s$  que compõem a matriz de dados. A mesma linha foi selecionada para todas as imagens geradas (Figuras 376 e 387). Esses gráficos permitem uma análise quantitativa do efeito de diferentes tamanhos de colimadores nas medidas de  $\rho_s$ .



(a)



(b)

FIGURA 39 - Variações na densidade da amostra em função de diferenças no tamanho do colimador. Col 1-4 representa os colimadores de 1mm até 4 mm. (a) espessura de amostra de 4 cm e (b) espessura de amostra de 10 cm. Amostra de solo arenoso. O eixo x apresenta valores ao longo da linha selecionada da matriz.

Pela análise da Figura 39a pode ser observado que para a espessura de 4 cm praticamente não existem diferenças nos valores de  $\rho_s$  considerando as diferenças nos valores de  $\mu$  devido a abertura do colimador. Esse resultado ocorre porque para essa espessura de amostra praticamente não ocorre diferenças no valor de  $\mu$  entre os colimadores sendo uma exceção o menor valor encontrado para o colimador de 4 mm, o que causa um aumento no

valor de  $\rho_s$  (Tabela 9). Considerando a amostra de espessura de 10 cm praticamente o mesmo resultado foi observado para as variações de  $\rho_s$  (Tabela 9) em comparação com a amostra de espessura 4 cm. Esse resultado mostra que a mudança no tamanho do colimador praticamente não afeta o valor de  $\rho_s$  medido, sendo a diferença relativa (tomando o maior valor de  $\rho_s$  como referência) entre as medidas extremas (colimador de 1 mm e 4 mm) para a espessura de amostra de 4 cm de 4,5% e para 10 cm (colimador de 3 mm e 4 mm) de 5,3%.

TABELA 9 - Valores médios de densidade do solo ( $\rho_s$ ) obtidos para os diferentes tamanhos de colimadores para a amostra de solo arenoso e fonte de  $^{241}\text{Am}$ .

Amostra	$\rho_s$ (g.cm <sup>3</sup> )			
	1 mm*	2 mm	3 mm	4 mm
Espessura 4 cm	1,27±0,11	1,29±0,12	1,30±0,12	1,33±0,12
Espessura 10 cm	-	1,29±0,12	1,26±0,11	1,33±0,12

\* Os valores de  $\rho_s$  são referentes ao valor médio do transecto linear (linha 4) usado para verificar as variações da densidade com o tamanho do colimador. Esse valor médio se refere a 18 valores de  $\rho_s$  (1,4 – 25, 2 mm) analisados na linha da matriz.

A Figura 40 apresenta os gráficos de variação de  $\rho_s$  em função da espessura da amostra considerando o mesmo colimador para cada espessura.

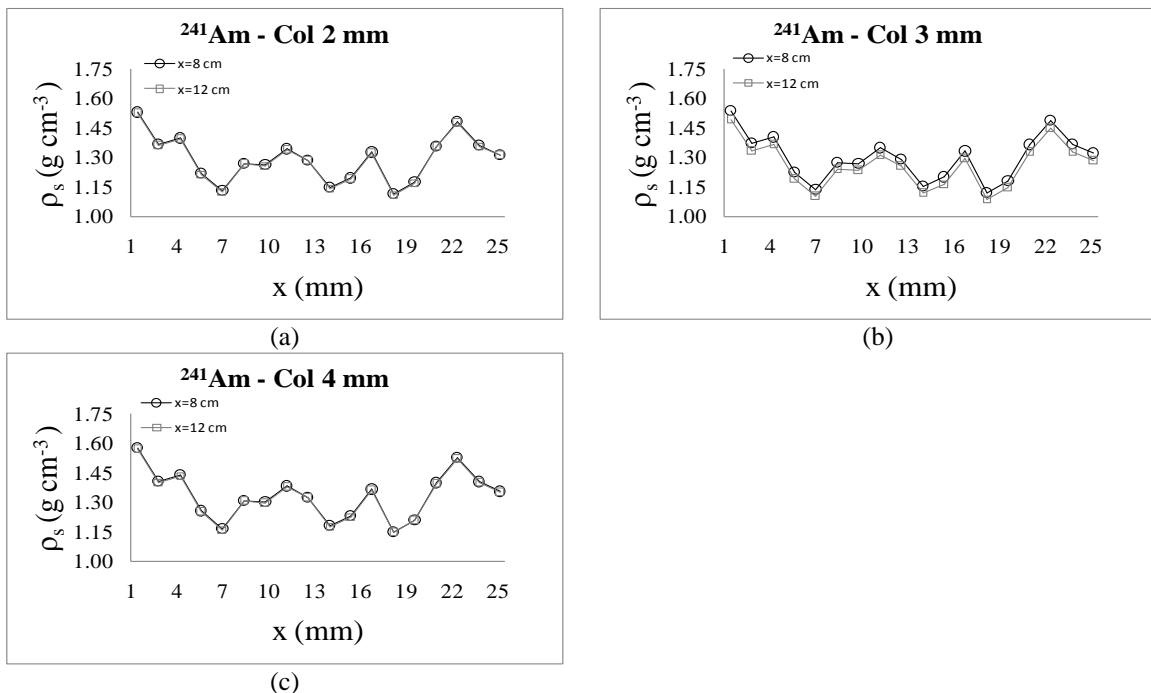
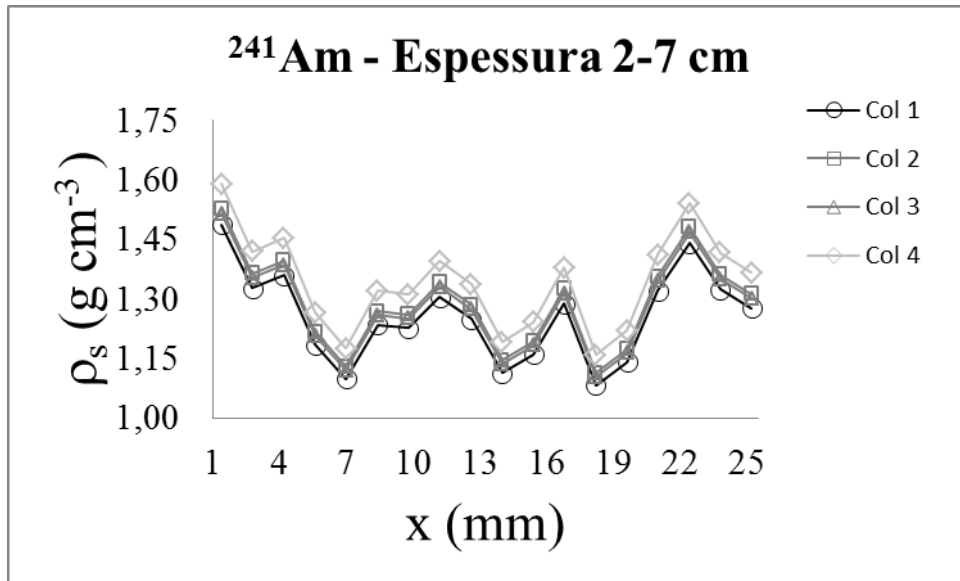


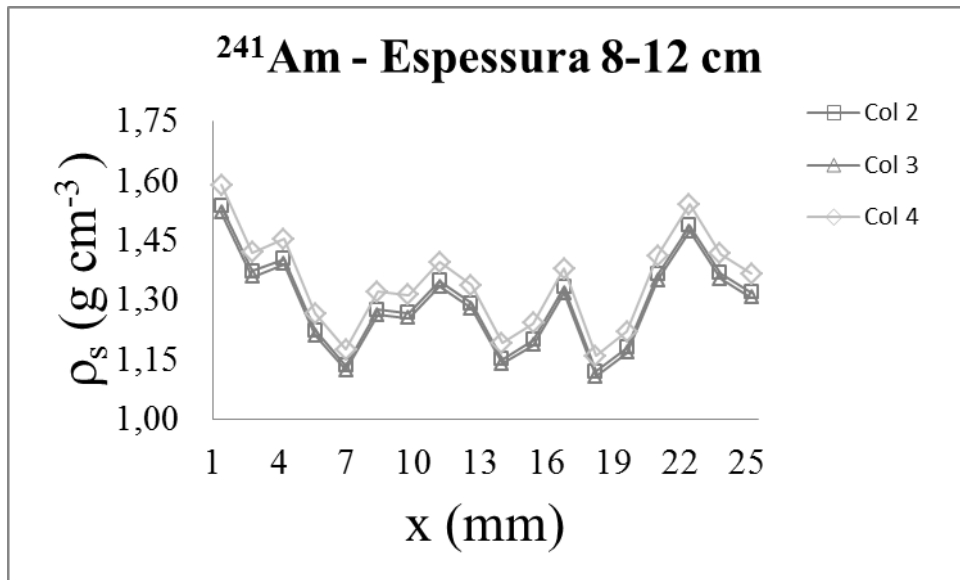
FIGURA 40 - Variações na densidade do solo em função da espessura da amostra. (a) colimador de 2 mm, (b) colimador de 3 mm e (c) colimador de 4 mm. Solo de textura arenosa. O eixo x apresenta valores ao longo da linha selecionada na matriz.

A partir da análise da Figura 409 é possível observar que para os colimadores de 2 e 4 mm (Figuras 40a e 41c) não existem diferenças nos valores de  $\rho_s$  com a espessura da amostra. Já para o colimador de 3 mm (Figura 40b) essas diferenças embora pequenas são mais visíveis. Uma explicação para o primeiro resultado é que coincidentemente, para o colimador de 2 mm que apresenta uma variação de  $\mu$  com a espessura da amostra relativamente acentuada, o valor de  $\mu$  é praticamente igual para as espessuras de 4 e 10 cm de amostra. Já para o colimador de 4 mm as flutuações de  $\mu$  com a espessura da amostra se dão praticamente em torno de um valor médio sendo o mesmo resultado observado para o colimador de 3 mm.

Da mesma forma que foi feito para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$  foram selecionadas duas faixas de espessuras, sendo as espessuras menores de 2-7 cm e as maiores de 8-12 cm, para comparar os valores de densidade obtidos usando a média de  $\mu$  para cada um desses intervalos (Figura 41).



(a)



(b)

FIGURA 41 - Variações na densidade da amostra em função de diferenças no tamanho do colimador. (a) espessura de amostra de 2-7 cm e (b) espessura de amostra de 8-12 cm. Amostra de solo arenoso. O eixo x apresenta valores ao longo da linha selecionada na matriz de densidade.

Como pode ser verificado através dos gráficos apresentados na Figura 40, os colimadores de 2 e 3 mm são os que apresentam valores de densidade mais próximos se comparados os dois intervalos de espessuras. Essa comparação não pode ser feita para o colimador de 1 mm, pois este só possui valores de  $\mu$  representativos se a faixa de espessura selecionada for a menor, uma vez que ocorreram problemas na resolução do fotopico durante o levantamento do espectro quando usadas espessuras maiores. Uma visão mais detalhada da



variação da densidade em função da espessura pode ser dada pela análise de sua variação com o tamanho dos colimadores (Figura 42).

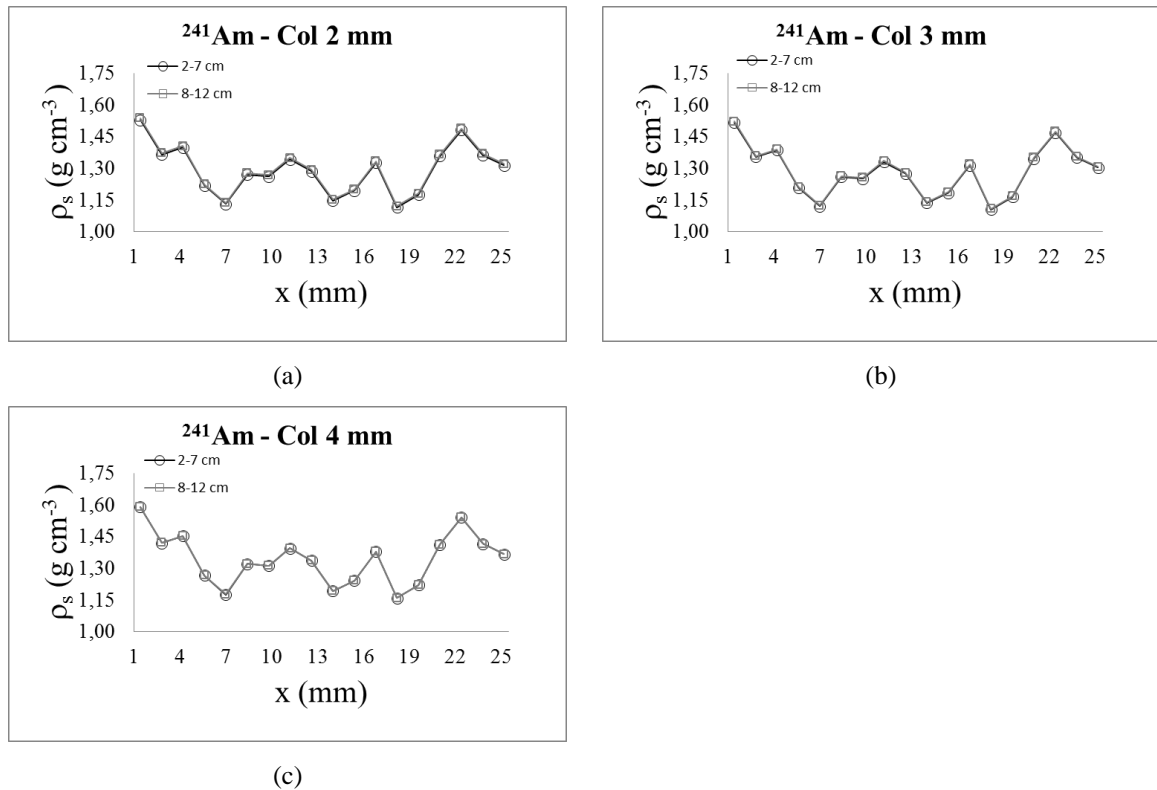


FIGURA 42 - Variações na densidade do solo em função da espessura da amostra, levando-se em consideração a média de  $\mu$  para dois intervalos de espessuras; (a) colimador de 2 mm, (b) colimador de 3 mm, (c) colimador de 4 mm. Solo de textura arenosa. O eixo x apresenta valores ao longo da linha selecionada na matriz de densidade.

De acordo com os dados apresentados na Figura 42, verifica-se que praticamente não existem diferenças nos valores de densidade quando selecionadas espessuras menores e maiores independente do colimador usado (Tabela 10).

TABELA 10 - Valores médios de densidade do solo ( $\rho_s$ ) obtidos para os diferentes tamanhos de colimadores e intervalos de espessuras para a amostra de solo arenoso e fonte de  $^{241}\text{Am}$ .

Espessura	$\rho_s$ (g.cm <sup>3</sup> )			
	1 mm*	2 mm	3 mm	4 mm
2-7 cm	1,26±0,11	1,29±0,12	1,28±0,12	1,34±0,12
8-12 cm	-	1,30±0,12	1,28±0,08	1,34±0,12

\* Os valores de  $\rho_s$  são referentes ao valor médio do transecto linear (linha 4) usado para verificar as variações da densidade com o tamanho do colimador.

Para a amostra de solo argiloso e fonte de  $^{241}\text{Am}$  (Figuras 43 e 44) foi selecionada uma matriz de UT (26x18) no centro da imagem e os seguintes parâmetros foram usados para converter os valores de UT em  $\rho_s$ :  $\mu$  da água de  $0,1989 \text{ cm}^2.\text{g}^{-1}$ , umidade de  $0,01 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$  e parâmetro de calibração do TC de  $0,955 \text{ cm}$ .

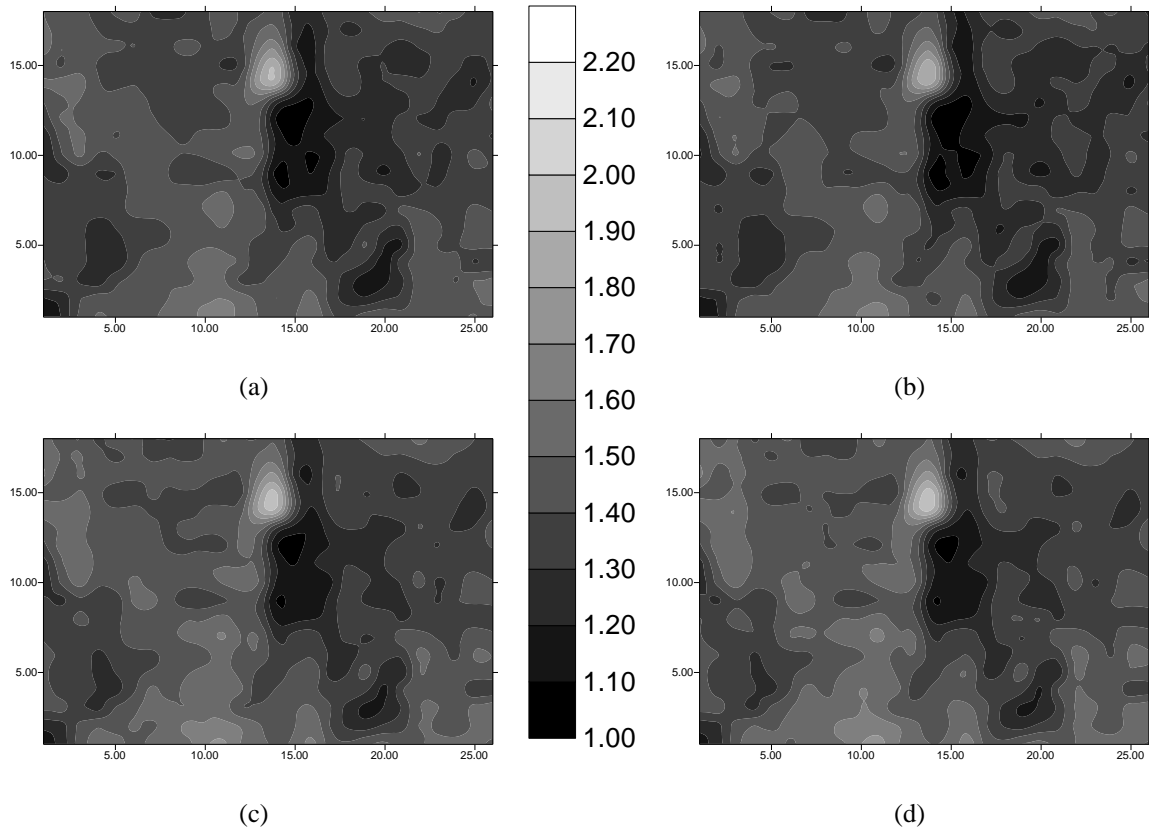


FIGURA 43 - Imagem tomográfica representando mapas de densidade do solo ( $\rho_s$ ) para a fonte de  $^{241}\text{Am}$  para o solo argiloso. O valor de  $\mu$  do solo usado para gerar os mapas de  $\rho_s$  se refere a espessura de amostra de  $4 \text{ cm}$ . A escala traz valores de  $\rho_s$ , onde a cor branca se refere a valores de maior densidade e a cor preta a valores de menor densidade. (a) Colimador de  $1 \text{ mm}$ ; (b) Colimador de  $2 \text{ mm}$ ; (c) Colimador de  $3 \text{ mm}$  e (d) Colimador de  $4 \text{ mm}$ .

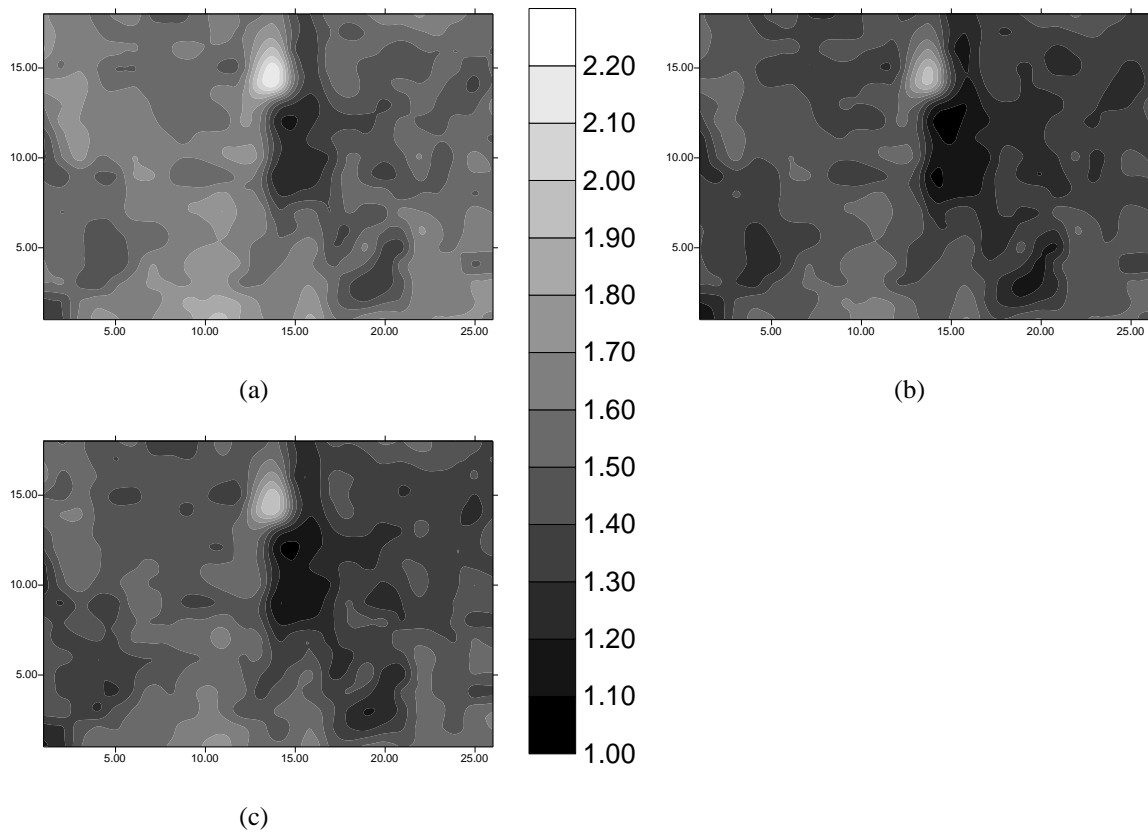
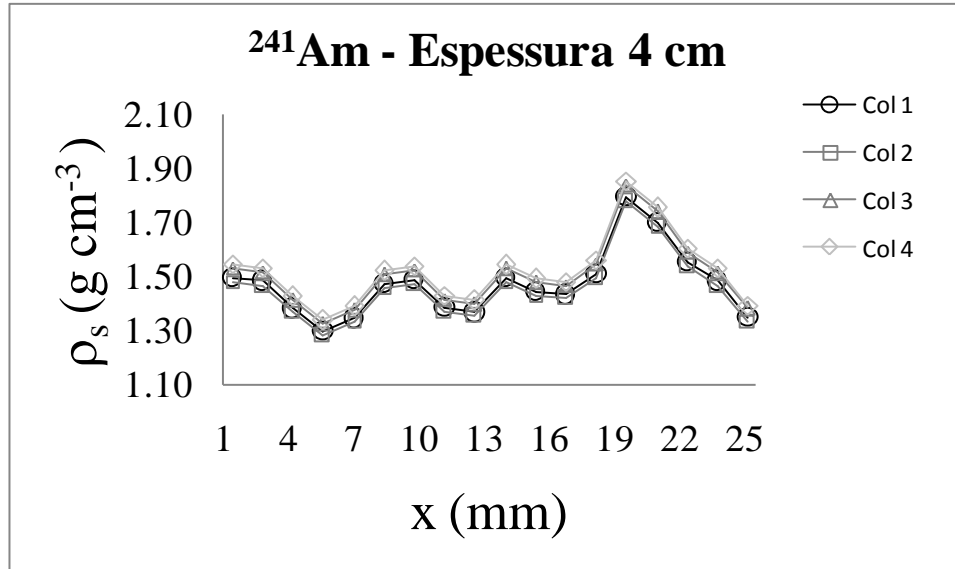


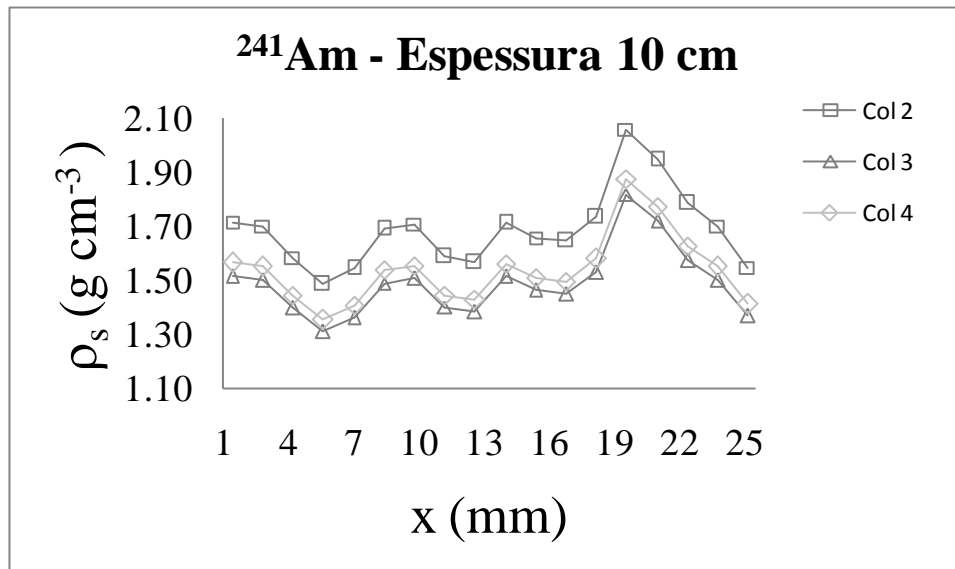
FIGURA 44 - Imagem tomográfica representando mapas de densidade do solo ( $\rho_s$ ) para a fonte de  $^{241}\text{Am}$  para o solo argiloso. O valor de  $\mu$  do solo usado para gerar os mapas de  $\rho_s$  se refere a espessura de amostra de 10 cm. A escala traz valores de  $\rho_s$ , onde a cor branca se refere a valores de maior densidade e a cor preta a valores de menor densidade. (a) Colimador de 1 mm; (b) Colimador de 2 mm; (c) Colimador de 3 mm e (d) Colimador de 4 mm.

Ao contrário das imagens anteriores, para o solo argiloso e fonte de  $^{241}\text{Am}$  (Figuras 43 e 44) são observadas maiores diferenças qualitativas nos mapas de  $\rho_s$  com as variações no tamanho dos colimadores. Isso se deve as maiores flutuações dos valores de  $\mu$  com a variação da espessura da amostra.

A Figura 45 mostra os gráficos de variação de  $\rho_s$  para uma linha da matriz de dados (linha 14) selecionada considerando o valor médio da densidade para todos os valores de  $\rho_s$  que compõem a matriz de dados. A mesma linha foi selecionada para todas as imagens geradas (Figuras 432 e 443). Esses gráficos permitem uma análise quantitativa do efeito de diferentes tamanhos de colimadores nas medidas de  $\rho_s$ .



(a)



(b)

FIGURA 45 - Variações na densidade da amostra em função de diferenças no tamanho do colimador. Col 1-4 representa os colimadores de 1mm até 4 mm. (a) espessura de amostra de 8 cm e (b) espessura de amostra de 10 cm. Amostra de solo argiloso. O eixo x apresenta valores ao longo da linha selecionada na matriz.

A análise dos resultados para a espessura de 4 cm (Figura 45a) mostra que praticamente não existem diferenças marcantes nos valores de  $\rho_s$  com as variações no tamanho dos colimadores (Tabela 11). Esse resultado é devido aos valores de  $\mu$ , para os diferentes colimadores, estarem bastantes próximos uns dos outros para essa espessura de amostra. Já para a espessura de 10 cm as diferenças mais marcantes ocorrem para o colimador

de 2 mm em relação aos outros dois (Figura 45b). Esse resultado deve-se a uma queda abrupta do valor de  $\mu$  para a espessura de amostra maior do que 9 cm. Essa queda abrupta explica o maior valor de  $\rho_s$  para esse tamanho de colimador (Tabela 11).

TABELA 11 - Valores médios de densidade do solo ( $\rho_s$ ) obtidos para os diferentes tamanhos de colimadores para a amostra de solo argiloso e fonte de  $^{241}\text{Am}$ .

Amostra	$\rho_s$ (g.cm <sup>3</sup> )			
	1 mm*	2 mm	3 mm	4 mm
Espessura 4 cm	1,47±0,12	1,46±0,12	1,51±0,13	1,52±0,13
Espessura 10 cm	-	1,69±0,14	1,49±0,13	1,54±0,13

\* Os valores de  $\rho_s$  são referentes ao valor médio do transcepto linear (linha 14) usado para verificar as variações da densidade com o tamanho do colimador. Esse valor médio se refere a 18 valores de  $\rho_s$  (1,4 – 25,2 mm) analisados na linha da matriz.

A figura 45 apresenta os gráficos de variação de  $\rho_s$  em função da espessura da amostra considerando o mesmo colimador para cada espessura.

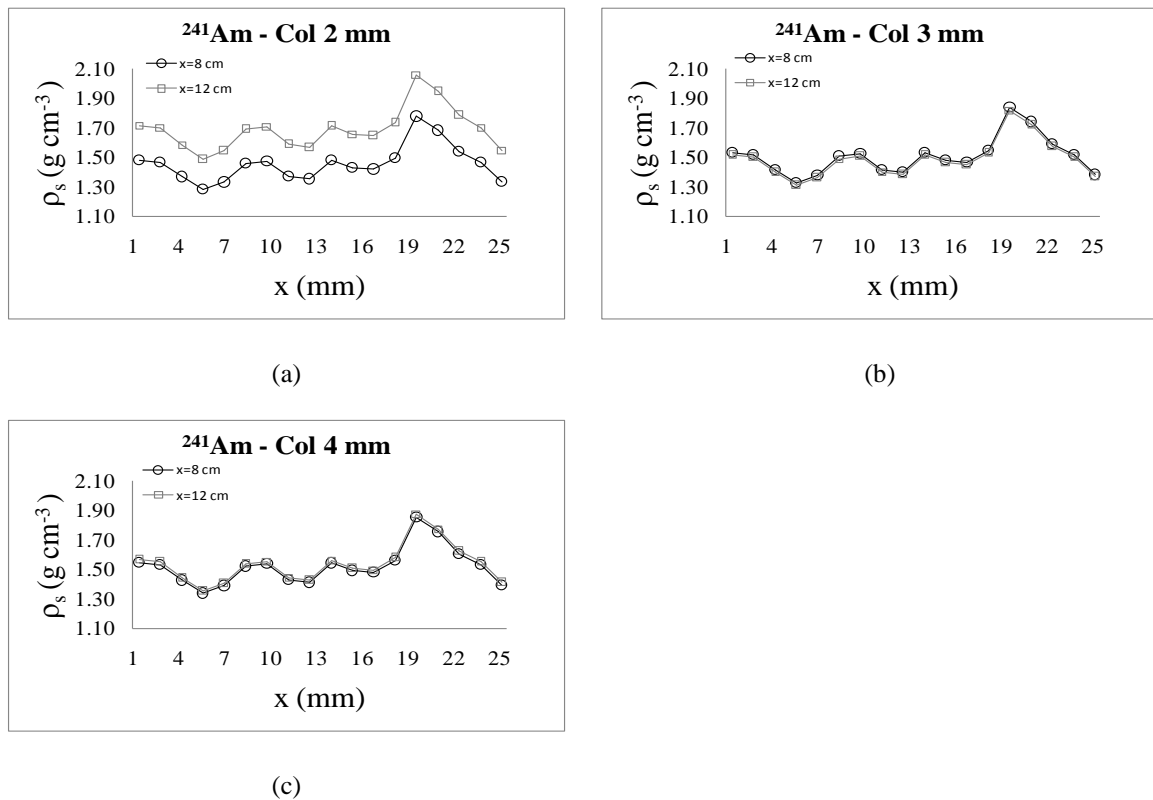
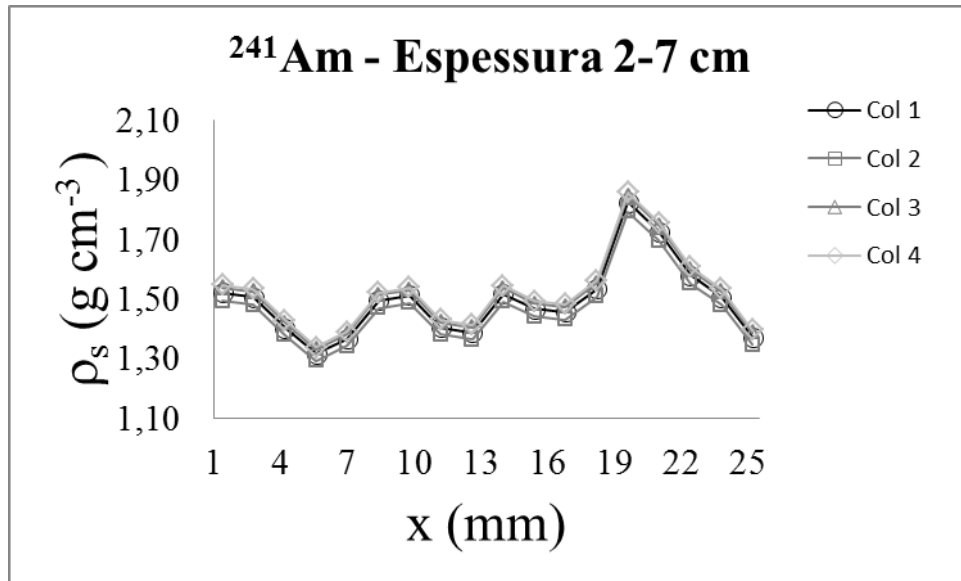


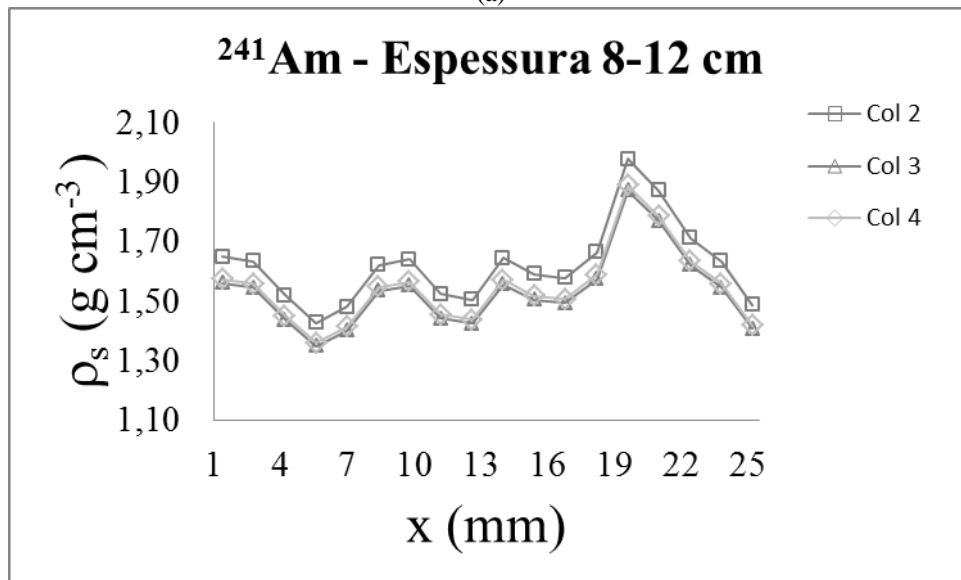
FIGURA 46 - Variações na densidade do solo em função da espessura da amostra. (a) colimador de 2 mm, (b) colimador de 3 mm e (c) colimador de 4 mm. Solo de textura argilosa. O eixo x apresenta valores ao longo da linha selecionada na matriz.

Uma análise dos resultados da Figura 46 mostra que para os colimadores de 3 e 4 mm (Figuras 46b e 46c) não existem diferenças nos valores de  $\rho_s$  com a espessura da amostra. Esse resultado ocorre porque ambos os colimadores (3 e 4 mm) apresentam flutuações nos valores de  $\mu$  em torno de um valor médio e para as espessuras de 4 e 10 cm os valores de  $\mu$  são praticamente os mesmos para ambos os colimadores. O colimador de 2 mm (Figura 46b) é que apresenta as maiores diferenças nos valores de  $\rho_s$  com o aumento da espessura da amostra. Esse colimador além de apresentar grandes flutuações nos valores de  $\mu$  com a espessura da amostra, também apresenta uma tendência de queda nesse parâmetro físico quando do aumento da espessura da amostra ( $y=-0,0057x+0,4002$ ,  $r=0,83$ ).

Utilizando o  $\mu$  obtido através da média para espessuras menores (2-7 cm) e maiores (8-12 cm), temos as variações de  $\rho_s$  para cada colimador e faixa de espessura selecionada (Figura 47).



(a)



(b)

FIGURA 47 - Variações na densidade da amostra em função de diferenças no tamanho do colimador. (a) espessura de amostra de 2-7 cm e (b) espessura de amostra de 8-12 cm. Amostra de solo argiloso. O eixo x apresenta valores ao longo da linha selecionada na matriz de densidade.

A partir de uma análise da Figura 47, é possível verificar que todos os colimadores selecionados apresentam valores próximos de  $\rho_s$  se forem utilizados valores médios de  $\mu$  obtidos para as espessuras menores (2-7 cm), o que está em concordância com os trabalhos encontrados na literatura, os quais dizem que espessuras menores são as mais indicadas na determinação de parâmetros físicos tais como densidade e umidade quando o feixe de radiação gama usado é proveniente da fonte de <sup>241</sup>Am (FERRAZ e MANSEL, 1979). Uma análise mais detalhada dessa variação em função do colimador é apresentada na Figura 48.

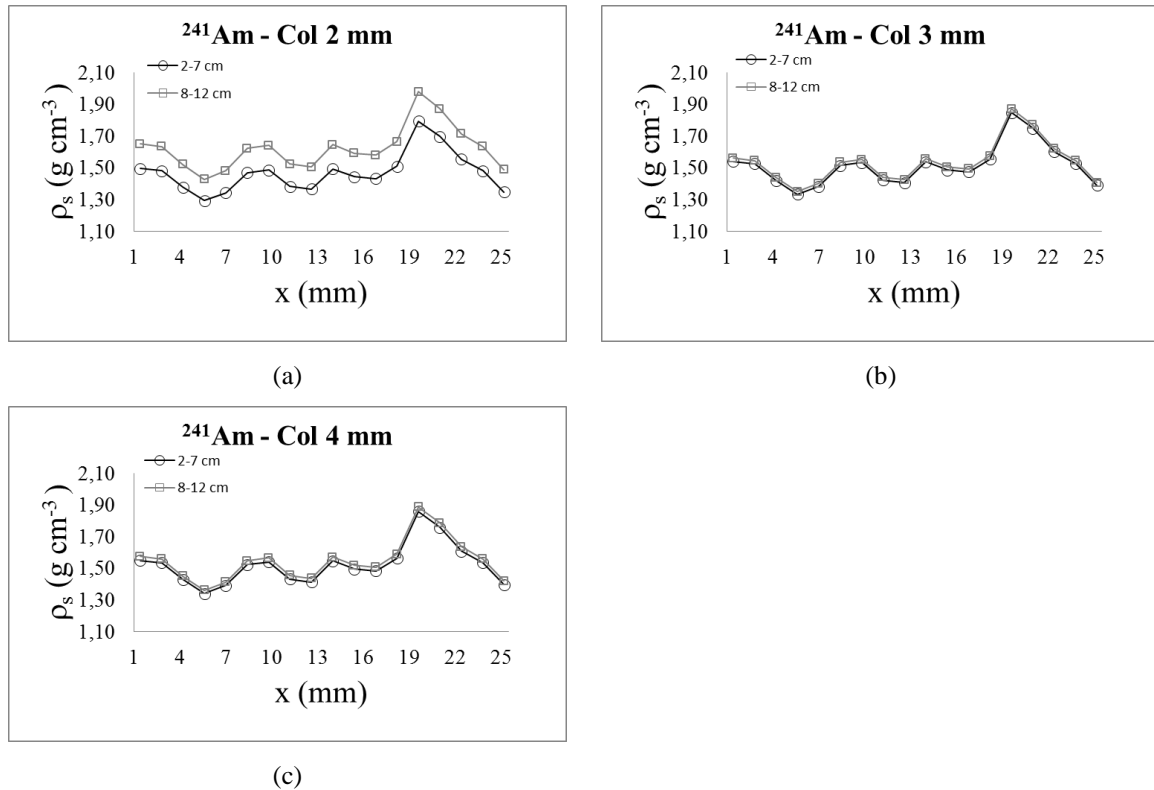


FIGURA 48 - Variações na densidade do solo em função da espessura da amostra, levando-se em consideração a média de  $\mu$  para dois intervalos de espessuras; (a) colimador de 2 mm, (b) colimador de 3 mm, (c) colimador de 4 mm. Solo de textura argilosa. O eixo x apresenta valores ao longo da linha selecionada na matriz de densidade.

Através da Figura 48, verifica-se que o colimador de 2 mm (Figura 48a) apresenta uma maior discrepância entre os valores obtidos de  $\rho_s$  para espessuras menores e maiores (diferença de 10,2% - Tabela 12), enquanto esses valores se tornam mais próximos para os colimadores de 3 e 4 mm (Figura 48b e 48c).

TABELA 12 - Valores médios de densidade do solo ( $\rho_s$ ) obtidos para os diferentes tamanhos de colimadores e intervalos de espessuras para a amostra de solo argiloso e fonte de  $^{241}\text{Am}$ .

Espessura	$\rho_s$ (g.cm <sup>3</sup> )			
	1 mm*	2 mm	3 mm	4 mm
2-7 cm	1,49±0,13	1,47±0,12	1,51±0,13	1,52±0,13
8-12 cm	-	1,62±0,14	1,53±0,13	1,54±0,13

\* Os valores de  $\rho_s$  são referentes ao valor médio do transcepto linear (linha 13) usado para verificar as variações da densidade com o tamanho do colimador.



## 5 CONCLUSÕES

Foi observada uma leve tendência de queda nos valores de  $\mu$  da água com o aumento da espessura para ambas as fontes. Os valores médios obtidos experimentalmente para o  $\mu$  da água foram:  $0,1959 \pm 0,0012 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$  para a fonte de  $^{241}\text{Am}$  e  $0,0834 \pm 0,003 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$  para a fonte de  $^{137}\text{Cs}$ . Esses valores estão em concordância com os encontrados na literatura, e demonstram que o sistema de detecção gama está em perfeito funcionamento.

A obtenção de valores experimentais representativos de  $\mu$  para os solos mostrou-se dependente da espessura utilizada e do colimador selecionado para cada fonte de raios gama. Temos que:

- Fonte de  $^{137}\text{Cs}$ : a diferença na composição química dos solos de texturas argilosa e arenosa não afetou significativamente o comportamento verificado nas variações do  $\mu$ . Essas variações não foram afetadas pelas diferenças nos diâmetros dos colimadores, mas pelo aumento da espessura das amostras de solo. Com esse aumento na espessura, os valores de  $\mu$  tendem a um valor comum, portanto, mesmo que todas as espessuras tenham fornecido valores representativos de  $\mu$ , os melhores resultados foram obtidos a partir das espessuras maiores ( $> 10 \text{ cm}$ ).
- Fonte de  $^{241}\text{Am}$ : os valores representativos de  $\mu$  dos solos mostraram-se dependentes não só da espessura da amostra, mas também do diâmetro do colimador. No caso do solo arenoso, a espessura limite (a partir dessa espessura não ocorre definição do espectro) para obtenção do  $\mu$  é de 3 cm quando selecionado o colimador de 1 mm. Essa espessura limite aumenta com o aumento do colimador, sendo elas 8, 10 e 14 cm, para os colimadores de 2, 3 e 4 mm, respectivamente. Já para o solo argiloso, as espessuras limites na obtenção do  $\mu$  são 3, 7, 9 e 12 cm, para os colimadores de diâmetros 1, 2, 3 e 4 mm, respectivamente. Os melhores valores de  $\mu$  dos solos foram determinados a partir das menores espessuras para os colimadores menores (1 e 2 mm), sendo que os valores de  $\mu$  para os colimadores maiores (3 e 4 mm) apresentaram uma tendência de aproximação e menor variação em relação aos colimadores menores com o aumento da espessura.

Na determinação da densidade do solo,  $\rho_s$ , (com a influência nas variações de  $\mu$ ) foi observado que:

- Fonte de  $^{137}\text{Cs}$  e solo arenoso: os valores de  $\rho_s$  determinados a partir do valor médio de  $\mu$  para as espessuras menores (2-7 cm) apresentam maiores discrepâncias entre os colimadores quando comparados àqueles determinados a partir do valor médio de  $\mu$  para espessuras maiores (8-15 cm).
- Fonte de  $^{241}\text{Am}$  e solo arenoso: os valores médios de  $\mu$  obtidos através dos colimadores de 2 e 3 mm de diâmetro apresentaram valores de  $\rho_s$  mais próximos se comparados os intervalos de 2-7 cm e 8-12 cm de espessura. O colimador de 4 mm apresentou uma discrepância nos valores médios de  $\mu$  que se manteve independente da faixa de espessura selecionada.
- Fonte de  $^{241}\text{Am}$  e solo argiloso: todos os colimadores selecionados apresentaram valores de  $\rho_s$  muito próximos quando foram usados valores médios de  $\mu$  obtidos para as espessuras menores (2-7 cm). Quando a faixa de espessura selecionada foi a maior, surgiu uma discrepância nos valores de  $\rho_s$  para o colimador de 2 mm de diâmetro.

## **6 TRABALHOS FUTUROS**

Realizar uma análise mais detalhada sobre a influência do tamanho da espessura da amostra e da colimação variando a largura e altura da amostra, bem como o formato do colimador.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-RAHMAN, M.A. et al. Effect of sample thickness on the measured mass attenuation coefficients of some compounds and elements for 59.54, 661.6 and 1332.5 keV  $\gamma$ -rays. **Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A**, v.447, p.432-436, 2000.

ALAM, M.N. et al. Attenuation coefficients of soils and some building materials of Bangladesh in the energy range 276-1332 keV. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 54, p. 973-976, 2001.

ANGELONE, M.; BUBBA, T.; ESPOSITO, A. Measurement of the mass attenuation coefficient for elemental materials in the range  $6 < Z < 82$  using X-rays from 13 up to 50 keV. **Applied Radiation and Isotopes**, v.55, p.505-511, 2001a.

ANGELONE, M.; ESPOSITO, A.; CHITI, M.; GENTILE, A. Measurement of the mass attenuation coefficients for four mixtures using X-rays from 13 keV up to 40 keV. **Radiation Physics and Chemistry**, v.61, p.547-548, 2001b.

APPOLONI, C.R.; RIOS, E.A. Mass attenuation coefficients of Brazilian soils in the range 10-1450 KeV. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 45, p. 287-291, 1994.

BELCHER, D.J.; CUYKENDALL, T.R.; SACK, H.S. **The measurement of soil moisture and density by neutron and gamma ray scattering**. Technical Development Report no. 127, Civil Aeronautics Administrations, Washington, D.C., 1950.

BERGER, M.J.; HUBBELL, J.H. **Photon cross sections on a personal computer**. National Institute of Standards, Gaithersburg, MD, USA, 1987.

Disponível em: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html>

BERNHARD, R. K.; CHASEK, M. Soil density determination by direct transmission of gamma ray. **American Society for Testing Materials**. Preprint No. 86. Philadelphia, Pa., 1955.

BRAR, G. S. Variation of Buildup Factors of Soils with Weight Fractions os Iron and Silicon. **Applied Radiation and Isotopes**. V 49, p. 977-980, Elsevier, 1998.

CESAREO, R.; De ASSIS, J.T.; CRESTANA, S. Attenuation coefficients and tomographic measurements for soil in the energy range 10-300 keV. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 45, p. 613-620, 1994.

CHASE, G. D.; RABINOWITZ, J. L. **Principles of Radioisotope Methodology**. Burgess Publishing Company, 3ª ed. P. 140-143, Minneapolis, 1968.

COMPTON, A. H. The spectrum of scattered x-rays. **Physics Review**, v. 5, p. 409–413, 1923.

CRESTANA, S. et al. Calibração e uso de um tomógrafo computadorizado em ciência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 16, p. 161-167, 1992.

CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; POZZI-MUCELLI, R.S. Using a computed miniscanner in soil science. **Soil Science**, v.142, p.52-61, 1986.

DAVISSON, C.M. **Interaction of  $\gamma$ -radiation with matter**. In Siegbahn, ed. Beta and gamma-ray spectroscopy. Amsterdam, Noth-Holland, p. 24-51, 1955.

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, CNPS, 1997. 212p.

FERGUSON, H.; GARDNER, W.H. Water content measurement in soil columns by gamma ray absorption. **Soil Science Society of America Journal**, v.26, p.11-14, 1962.

FERRAZ, E.S.B.; MANSELL, R.S. **Determining water content and bulk density of soil by gamma ray attenuation methods**. Flórida: IFAS - Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, 1979. 51p.

GOPAL, S.; SANJEEVAIAH, B. Gamma-ray attenuation coeficiente measurements. **Physics Review**. v. 6, p. 2814-2818, 1973.

GOSWAMI B.; CHAUDHURI N. Measurement of gamma-ray attenuation coefficients (0.662-1.332 MeV). **Physics Review**, 1973.

GURR, C.G. Use of gamma rays in measurement of water content and permeability in unsaturated columns of soil. **Soil Science**, v. 94, p. 224-229, 1962.

HINE, G. J. Instrumentation in nuclear medicine. **Academic Press**, v. 1, p. 104, 1967.

HOSSEINI-ASHRAFI, M. E. Quantitative Consideration of Collimator Parameters in Radio-isotope Imaging and its Application to Collimator Optimization. **Applied Radiation and Isotopes**. v. 49, p. 939-954, 1998.

HUBBEL, J.H.; SELTZER, S.M. **Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements z=1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest**. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1995. 111p.

KAPLAN, I. **Física nuclear**. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983. 633p.

KING, L.G. **Gamma ray attenuation for soil-water-content measurement using <sup>241</sup>Am**. In: Symposium on the Use of Isotope and Radiation Techniques in Soil Physics and Irrigation Studies, Istanbul, 1967. Vienna: International Atomic Energy Association, 1967. p. 17-29.

KOROBOCHKIN, I. V. **The possibility of investigating the dynamics of soil moisture and compaction by gamma-ray of diferente energies**. Dokl. Akond. S. Kh. Nank, v. 9, p. 19-23, 1958.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 2.ed. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Física e Meteorologia, 2000. 509p.

MOREIRA, A.C. et al. Hydraulic conductivity of undeformed soil columns by gamma ray transmission. **Radiation Physics and Chemistry**, V. 61, p. 693-695, 2001.

OCHIANA, G. Build Up Factor for Wide Conical Gamma Photon Beams Penetrating Two-layered Plane Parellel Shields. **Journal of Physics**. V. 39, p. 243-251, 1994.

O'KELLEY, G. D. **Detection and measurement of nuclear radiation**. Nuclear Science Series, Radiochemical Techniques, United States Atomic Energy Comission Report NAS-NS 3105, 1962.

OCHBELAGH, D. R. Investigation of Collimator Effect on Full-Width at Half-Maximum of NaI(Tl) Detector. **Asian Journal of Experimental Sciencies.**, v. 23, p. 357-362, 2009.

OLIVEIRA, J.C.M. **Determinação de parâmetros do solo durante a infiltração horizontal e redistribuição da água por atenuação de raios gama e tensiometria**. 76p. Dissertação (Mestrado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1991.

PEDROTTI, A. et al. Evaluation of bulk density of Albaqualf soil under different tillage systems using the volumetric ring and computadorized tomography methods. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 80, p. 115-123, 2005.

PEDROTTI, A. et al. Planosol soil sample size for computerized tomography measurement of physical parameters. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, p. 735-740, 2003.

PIRES, L.F. et al. Gamma-ray computed tomography to characterize soil surface sealing. **Applied Radiation and Isotopes**, Oxford, v.57, p. 375-380, 2002.

PIRES, L.F. et al. The use of gamma ray computed tomography to investigate soil compaction due to core sampling devices. **Brazilian Journal of Physics**, São Paulo, v. 34, p. 728-731, 2004.

PIRES, L.F.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. Soil water retention curve determined by gamma-ray beam attenuation. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, p. 89-97, 2005a.

PIRES, L.F.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. Gamma ray computed tomography to evaluate wetting/drying soil structure changes. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, Oxford, v. 229, p. 443-456, 2005b.

REICHARDT, K. **Uso da radiação gama na determinação da densidade aparente e da umidade do solo**. Piracicaba, 1965. 34p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

SIDHU, G. S. et al. Effect of collimator size and absorber thickness on gamma ray attenuation measurements. **Radiation Physics and Chemistry**, Oxford, v. 56, p. 535-537, 1999a.

SIDHU, G. S. et al. Effect of collimator size and absorber thickness on gamma ray attenuation measurements for bakelite and Perspex. **Pramana Journal of Physics**, v. 53, p. 851-855, 1999b.

SINGH, M.; MUDAHAR, G.S. Effect of sample thickness on the measured mass attenuation coefficients of perspex and bakelite. **International Journal of Physics**. 1993.

SINGH, K. et al. Study of effective atomic numbers and mass attenuation coefficients in some compounds. **Radiation Physics and Chemistry**, Oxford, v. 47, p. 535-541, 1996.

SINGH, M. et al. Effect of detector collimator and sample thickness on 0.662 MeV multiply Compton-scattered gamma rays. **Applied Radiation and Isotopes**, Elsevier, v 64, p. 373-378, 2006.

STROOSNIJDER, L.; DE SWART, J.G. Column scanning with simultaneous use of  $^{241}\text{Am}$  and  $^{137}\text{Cs}$  gamma radiation. **Soil Science**, v. 118, p. 61-69, 1974.

TAIT, W. H. **Radiation Detection**. Butterworth, London. 1980.

TARTARI, A. et al. Z dependence of mass attenuation coefficient at 59.54 keV photon energy: experimental assessment of binding energy effects. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 53, p. 445-448, 1998.

VAN BAVEL, C.H.M. Soil densitometry by gamma transmission. **Soil Science**, v. 87, p. 50-58, 1959.

VAN BAVEL, C.H.M.; UNDERWOOD, N.; RAGAR, S.R. Transmission of gamma radiation by soils and soil densitometry. **Soil Science Society of America Journal**, v. 21, p. 588-591, 1957.

VARIER, K.M.; KUNJU, S.N.; MADHUSUDANAN, K. Effect of finite absorber dimensions on Gamma ray attenuation measurements. **Physics Review A**, 1986.

VAZ, C.M.P.; NAIME, J.M.; MACEDO, A. Soil particle size fractions determined by gamma-ray attenuation. **Soil Science**, v. 164, p. 403-410, 1999.

VOMOCIL, J.A. In situ measurement of bulk density of soil by gamma absorption technique. **Soil Science**, v. 77, p. 341-342, 1954.