EQUIPAMENTOS NUCLEARES NA DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO DE MASSA DE SOLOS E DA ÁGUA

ORGHÊDA LUIZA ARÁUJO DOMINGUES ZUCCHI

Orientador : VIRGÍLIO F. NASCIMENTO F^o

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Energia Nuclear na Agricultura.

P I R A C I C A B A
Estado de São Paulo - Brasil
Fevereiro - 1981

*Aos meus pais,
Ao Roberto, Tiago e Juliana,*

D E D I C O

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. *Virgílio F. Nascimento Fº*, pela orientação, dedicação e estímulo no desenvolvimento deste trabalho,
- ao Prof. *Epaminondas S. B. Ferraz*, pelas sugestões e utilização da blindagem e sistema de colimação,
- ao Prof. *Admar Cervellini*, Diretor do Centro de Energia Nuclear na Agricultura, e ao Dr. *Peter B. Vose*, Diretor do Projeto UNDP/IAEA/BRA78/006, pelos recursos obtidos junto à Comissão Nacional de Energia Nuclear e Agência Internacional de Energia Atômica,
- ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura e à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", pela oportunidade de aperfeiçoamento,
- ao Plano de Formação e Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - PLANFAP/CNEN, pela concessão de bolsas de estudos,
- ao funcionário *José Osório Bertoli*, pela amizade, ajuda na realização de experimentos e serviços de datilografia e
- a todos os funcionários do CENA, que de uma forma ou de outra, contribuíram para a execução deste trabalho.

ÍNDICE

	<u>Página</u>
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
3. TEORIA	14
3.1. Atenuação de um feixe de radiação gama monoenergético ...	14
3.2. Efeito Compton	15
4. MATERIAL E MÉTODOS	20
4.1. Geometria	20
4.2. Equipamentos e detecção	23
4.3. Correção do tempo morto	30
4.4. Tipos de solos e preparação das amostras	31
4.5. Determinação do coeficiente de atenuação de massa	33
5. RESULTADOS	35
5.1. Coeficientes de atenuação de massa para solos	35
5.2. Coeficientes de atenuação de massa para água	54
6. DISCUSSÃO	57
7. CONCLUSÕES	63
8. LITERATURA CITADA	65

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
1 - Representação esquemática do efeito Compton	16
2 - Energia do raio gama espalhado e perda percentual da energia para o raio gama de 0,662 MeV emitido pelo Cs-137, nos diferentes ângulos de espalhamento	19
3 - Esquema da blindagem e colimação utilizadas - dimensões em mm (adaptado de FERRAZ, 1974)	22
4 - Detalhe do posicionamento da amostra para análise	25
5 - Vista geral do equipamento utilizado; à direita, espectrômetro gama e à esquerda o sistema Nuclear Chicago ...	25
6 - Curva para obtenção da alta voltagem de operação (V.O.) do sistema Nuclear Chicago, para os raios gama do Cs-137.	27
7 - Espectro de pulsos eletrônicos devido aos raios gama do Cs-137 obtidos com e sem lâmina de Pb na saída do feixe do bloco III	29
8 - Curvas de taxa de contagem do feixe emergente em função da densidade superficial para determinação do coeficiente de atenuação de massa do solo Podzol Vermelho Amarelo, nos diversos tratamentos	36
9 - Curvas de taxa de contagem do feixe emergente em função da densidade superficial para a determinação do coeficiente	

Figura

Página

	te de atenuação de massa do solo Podzolizado (var. Marília, nos diversos tratamentos	37
10 -	Curvas de taxa de contagem do feixe emergente em função da densidade superficial para a determinação do coeficiente de atenuação de massa do solo Latosol Vermelho Escuro, nos diversos tratamentos	38
11 -	Curvas de taxa de contagem do feixe emergente em função da densidade superficial para determinação do coeficiente de atenuação de massa do solo Terra Roxa Estruturada (ESALQ), nos diversos tratamentos	39
12 -	Curvas de taxa de contagem do feixe emergente em função da densidade superficial para determinação do coeficiente de atenuação de massa do solo Latosol Roxo, nos diversos tratamentos	40
13 -	Curvas de taxa de contagem do feixe emergente em função da densidade superficial para determinação do coeficiente de atenuação de massa do solo Regosol (Cerrado), nos diversos tratamentos	41
14 -	Curvas de taxa de contagem do feixe emergente em função da densidade superficial para determinação do coeficiente de atenuação de massa do solo Terra Roxa Estruturada (Jaboticabal - horizonte 0-30 cm), nos diversos tratamentos	42

Figura

Página

- 15 - Curvas de taxa de contagem do feixe emergente em função da densidade superficial para determinação do coeficiente de atenuação de massa do solo Terra Roxa Estruturada (Jaboticabal - horizonte 30-60 cm), nos diversos tratamentos 43
- 16 - Curvas de taxa de contagem do feixe emergente em função da densidade superficial para determinação do coeficiente de atenuação de massa do solo Terra Roxa Estruturada (Jaboticabal - horizonte 60-90 cm), nos diversos tratamentos 44
- 17 - Curvas de taxa de contagem do feixe emergente em função da densidade superficial para determinação do coeficiente de atenuação de massa do solo Terra Roxa Estruturada (Jaboticabal - horizonte 90-120 cm), nos diversos tratamentos 45
- 18 - Distribuição dos coeficientes de atenuação de massa obtidos para os diferentes solos, em cada um dos tratamentos. 53
- 19 - Curvas de taxa de contagem do feixe emergente em função da densidade superficial para determinação do coeficiente de atenuação de massa da água nos 6 tratamentos .. 55

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela</i>	<i><u>Página</u></i>
1 Taxa de contagem do feixe de raios gama em função da alta voltagem aplicada à válvula fotomultiplicadora do sistema Nuclear Chicago	26
2 - Relação dos solos estudados com as respectivas siglas e horizontes	31
3 - Características dos tubos plásticos utilizados para colocação das amostras de solo	32
4 - Características dos tubos plásticos utilizados para colocação das amostras de água	33
5 - Coeficientes lineares ($\ln I_0$) e angulares ($\overline{\mu}$), respectivos desvios padrões (s) e coeficientes de correlação (r) para o tratamento 1 (Nuclear Chicago com proteção de Pb), para os diferentes solos	46
6 - Coeficientes lineares ($\ln I_0$) e angulares ($\overline{\mu}$), respectivos desvios padrões (s) e coeficientes de correlação (r) para o tratamento 2 (Nuclear Chicago sem proteção de Pb), para os diferentes solos	47
7 - Coeficientes lineares ($\ln I_0$) e angulares ($\overline{\mu}$), respectivos desvios padrões (s) e coeficientes de correlação (r) para o tratamento 3 (Espectrômetro gama, contagem integral, com proteção de Pb), para os diferentes solos	48

8 - Coeficientes lineares ($\ln I_0$) e angulares ($\bar{\mu}$), respectivos desvios padrões (s) e coeficientes de correlação (r) para o tratamento 4 (Espectrômetro gama, contagem integral, sem proteção de Pb), para os diferentes solos	49
9 - Coeficientes lineares ($\ln I_0$) e angulares ($\bar{\mu}$), respectivos desvios padrões (s) e coeficientes de correlação (r) para o tratamento 5 (Espectrômetro gama, contagem na região do fotopico, com proteção de Pb), para os diferentes solos	50
10 - Coeficientes lineares ($\ln I_0$) e angulares ($\bar{\mu}$), respectivos desvios padrões (s) e coeficientes de correlação (r) para o tratamento 6 (Espectrômetro gama, contagem na região do fotopico, sem proteção de Pb), para os diferentes solos	51
11 Distribuição dos valores dos coeficientes de atenuação de massa obtidos para cada tratamento e diferentes solos	52
12 - Valores médios da taxa de contagem (cpm) do feixe emergente e da densidade superficial (g/cm^2) para a água, nos diferentes tratamentos	54
13 - Coeficientes lineares ($\ln I_0$) e angulares ($\bar{\mu}$), respectivos desvios padrões (s) e coeficientes de correlação (r) para a água, obtidos para os diversos tratamentos	56

TabelaPágina

14 - Coeficientes de atenuação de massa para solos, obtidos por diferentes autores para uma fonte de raios gama de 0,662 MeV (Cs-137)	57
15 - Coeficientes de atenuação de massa da água, obtidos por SAXENA <i>et alii</i> (1970), para uma fonte de radiação gama monoenergética do Cs-137	59
16 - Valores relativos de intensidade dos feixes incidentes medidos (I_{0med}) e calculados (I_{0calc}), para os solos e água, nos diversos tratamentos utilizados	62

APÊNDICES

<u>Apêndice</u>	<u>Página</u>
1 - Valores médios da taxa de contagem (cpm) do feixe emergente e incidente e da densidade superficial (g/cm^2) para as diferentes amostras de solos nos diferentes tratamentos .	72
2 - Contrastes entre os valores dos coeficientes de atenuação de massa dos diferentes solos para o tratamento 1	76
3 - Contrastes entre os valores dos coeficientes de atenuação de massa dos diferentes solos para o tratamento 2	77
4 - Contrastes entre os valores dos coeficientes de atenuação de massa dos diferentes solos para o tratamento 3	78
5 - Contrastes entre os valores dos coeficientes de atenuação de massa dos diferentes solos para o tratamento 4	79
6 - Contrastes entre os valores dos coeficientes de atenuação de massa dos diferentes solos para o tratamento 5	80
7 - Contrastes entre os valores dos coeficientes de atenuação de massa dos diferentes solos para o tratamento 6	81
8 - Contrastes obtidos entre os valores dos coeficientes de atenuação de massa geral (10 solos) para os diversos tratamentos	82
9 - Contrastes entre os coeficientes de atenuação de massa da água para os 6 tratamentos	83

EQUIPAMENTOS NUCLEARES NA DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO DE MASSA DE SOLOS E DA ÁGUA

Orghêda L. A. D. Zucchi

Virgílio F. Nascimento Fº

- Orientador -

RESUMO

Com o intuito de se difundir e facilitar o uso da técnica de atenuação da radiação gama, foi desenvolvido um estudo para se determinar a viabilidade de substituição do espectrômetro gama monocal, tradicionalmente usado nesta técnica, por um sistema de contagem integral de custo mais baixo, capaz de ser operado por pessoal com menor especialização.

Fez-se um estudo da determinação dos coeficientes de atenuação de massa para vários tipos de solo e para água, empregando-se três sistemas de detecção: (1) espectrômetro gama monocal, operando em contagem no fotopico ($0,66 \pm 0,07$ MeV); (2) operando em contagem integral (0,1 a 1,0 MeV) e (3) um "scaler" conectado diretamente à fotomultiplicadora. Também foi levado em consideração a eliminação dos raios-X de 32 keV proveniente do Ba-137m, raios gama retroespalhados na blindagem e na fonte e a correção do tempo morto.

Concluiu-se que a substituição do espectrômetro gama monocal pelo "scaler" é perfeitamente viável.

NUCLEAR EQUIPMENT TO DETERMINE SOIL AND WATER MASS ATTENUATION COEFFICIENTS

Orghêda L. A. D. Zucchi

Virgílio F. Nascimento FQ

- Adviser -

SUMMARY

A study was carried out to determine the feasibility of substituting the monochannel gamma spectrometer, traditionally used in the gamma ray attenuation technique, for a less sophisticated and less expensive system of integral counting, which could be operated by a non-specialized person. This was done to make this technique better known and used.

Three detection systems were used in the determination of the mass attenuation coefficients for different types of soil and for water: (1) monochannel gamma spectrometer, operating at photopeak counting (0.66 ± 0.07 MeV), (2) operating at integral counting (0.1 - 1.0 MeV), and (3) a scaler directly connected to the photomultiplier. Also taken into consideration were: the elimination of X-rays of 32 keV from the Ba-137m, gamma-rays back-scattering in the shield and in the source, and correction of dead time.

After analysis of the results we came to the conclusion that it is perfectly feasible to substitute the monochannel gamma spectrometer for the system using a scaler.

1. INTRODUÇÃO

A técnica de atenuação da radiação gama tem sido empregada, como método não destrutivo, em estudos estáticos e também na estimativa de vários parâmetros de processos dinâmicos de transferência de massa. Na área agrônômica, tem sido utilizada principalmente na determinação da umidade e densidade de solos e madeiras.

O equipamento empregado na detecção da radiação gama é normalmente um espectrômetro gama monocanal, sendo necessário pessoal especializado para o seu manuseio. Além disso, este equipamento é importado, tornando esta técnica pouco disseminada entre nós. Recentemente, a indústria brasileira colocou esse equipamento no mercado, mas ainda a um preço elevado. Para tornar essa técnica mais usual, torna-se necessário o emprego de um sistema detector mais simples e de custo mais acessível.

Este trabalho teve por finalidade verificar a possibilidade de substituição do espectrômetro gama monocanal por um sistema de contagem integral, através da estimativa do coeficiente de atenuação de massa para vários tipos de solo e para água.

2. REVISÃO DE LITERATURA

BERNHARD e CHASEK (1955), conforme FERRAZ e MANSELL (1977), determinaram a densidade do solo no campo com uma fonte não colimada de Co-60 e um detector Geiger-Müller para medida da intensidade da radiação. A fonte de radiação foi colocada dentro de um tubo introduzido verticalmente no solo e o detector colocado em outro tubo paralelo. No campo as determinações da densidade foram efetuadas entre os dois tubos.

DAVISSON (1955) tabelou o coeficiente de absorção para diversos elementos em diferentes energias de radiação.

VOMOCIL (1954) descreveu um método rápido para determinação da densidade de solos, usando uma fonte emissora gama de Co-60 de 1 mCi e um detector Geiger-Müller, "in situ"

BAVEL (1959) apresentou uma técnica para se determinar a densidade do solo "in situ" através da atenuação gama. Foi feita uma adaptação no equipamento básico para determinação da densidade em laboratório, de modo a ser usado em campo. A variação encontrada para o coeficiente de atenuação linear nos dois sistemas acreditaram ser devido à incerteza

teza no valor da distância entre a fonte e o detector. Foi utilizado uma fonte de Cs-137 de 5 mCi e um cristal cintilador de NaI(Tl).

REICHARDT (1960) descreveu um método para determinação da densidade do solo "in loco" por dispersão de raios gama. Essas determinações podem ser feitas na superfície e sub-superfície pela introdução do conjunto fonte-detector no solo. Foi utilizada uma fonte radioativa de 0,5 mCi de Co-60, um detector Geiger-Muller protegido da radiação direta por Pb e um "scaler" para registro dos pulsos. A fonte, a proteção de Pb e o detector foram ajustados de maneira a formar uma geometria constante. Introduzindo-se esse conjunto no solo foi possível relacionar as contagens obtidas com a densidade do solo, através de curvas de calibragem. O autor conclui que para se determinar a densidade do solo no campo é necessário um sistema de contagem sensível e portátil.

BAVEL (1960) discutiu os princípios físicos da atenuação da radiação gama. Apresentou os problemas para a seleção de uma fonte emissora, atividade da fonte, distância do detector, tempo e precisão nas medidas. Analisou os distúrbios que o hidrogênio do solo ocasiona na determinação do coeficiente de atenuação de massa.

BERRY (1961) relacionou graficamente o coeficiente de atenuação de massa teórico com o número atômico do material absorvedor para diferentes energias da radiação gama.

FERGUSON e GARDNER (1962) descreveram o procedimento para obtenção da umidade contida em colunas de solo através da atenuação da radiação gama. Utilizaram uma fonte de Cs-137 e um detector cintila

dor de NaI(Tl), sendo necessário para as medidas uma boa colimação e um tempo pequeno para contagens.

GURR (1962) descreveu uma técnica para medida da água em colunas de solo usando atenuação dos raios gama. Foi utilizado um feixe colimado de Cs-137 de 25 mCi e um cristal cintilador de NaI(Tl). Foram selecionados e contados todos os pulsos correspondentes a uma energia maior que 0,55 MeV. Os valores dos coeficientes de atenuação de massa obtidos para o solo e para a água foram 0,07785 e 0,08559 cm²/g, respectivamente.

DAVIDSON *et alii* (1963) determinaram o coeficiente de atenuação de massa da água e do solo com uma fonte de Cs-137 de 200 mCi e um cristal cintilador de NaI(Tl). O feixe de radiação era colimado e somente raios de energias de $0,66 \pm 0,15$ MeV eram contados. Foram apresentados alguns resultados experimentais satisfatórios para a água movendo-se dentro de uma coluna de solo seco ao ar.

REGINATO e BAVEL (1964) descreveram um método para determinação do volume da água contida em amostras de solo "in situ", sem a colimação do feixe de radiação gama. Usaram um cristal cintilador de NaI(Tl) e uma fonte de Cs-137 de 5 mCi de atividade. Foram realizadas contagens integrais com o nível mínimo do discriminador fixado no limiar do fotopico. Os coeficientes de atenuação de massa obtidos para o feixe de radiação gama não colimada foi de $0,0699 \pm 0,004$ cm²/g para o solo, e de $0,0748 \pm 0,006$ cm²/g para água. Foi possível determinarem o teor de água contido nas amostras de solo com feixe de radiação gama não colimada ao admitirem que os coeficientes de atenuação de massa (solo e água) não

diferem entre si (variação 6,5%).

ROSE (1964) elaborou tabelas de coeficientes de atenuação e de absorção de massa para diversos materiais em diferentes energias. Para alguns desses materiais, foram dados a sua composição química, em porcentagem.

REICHARDT (1965 a,b) utilizou uma fonte de Cs-134 de atividade de 30 mCi para determinação da densidade e umidade de três perfis de solos do município de Piracicaba. Para detecção das radiações gama, empregou-se um detector de cintilação (modelo DS-5) e um analisador de impulsos (modelo 132-B), ambos fabricados pela Nuclear Chicago Corporation. Durante as determinações foram detectadas radiações gama de energias $0,58 \pm 0,01$ MeV. As amostras foram colocadas em posição horizontal e o feixe de radiação passava através de um orifício de colimação de 4 mm de diâmetro. As amostras de solo foram secas à sombra e depois destorroadas em peneira de 2 mm. Para cada tipo de solo, com três diferentes teores de umidade, foram determinadas curvas de absorção da energia da radiação gama, variando-se a espessura da amostra de solo. Foi realizado um estudo da variação dos coeficientes de atenuação linear com o teor de água contida nas amostras. Foi determinado, também, a densidade do solo através do método gravimétrico e os teores de umidade foram obtidos em estufa a 105°C .

GARDNER e CALISSENDORFF (1967) analisaram a possibilidade de emprego de uma fonte emissora gama e neutrons rápidos na determinação de densidade e umidade dos solos. Estudaram o erro nas medidas de densidade e umidade em função da espessura do absorvedor para as fontes gama

de Am-241, Ce-144, Cs-137 e Co-60, além de uma fonte de neutrons rápidos. concluíram que os neutrons rápidos podem ser combinados com os raios gama para a determinação de umidade e densidade, com resultados satisfatórios.

KING (1967) comparou as vantagens e desvantagens de se usar a fonte de Am-241 ou a de Cs-137 na determinação da umidade do solo em laboratório através da atenuação da radiação gama. A maior vantagem apresentada pelo Am-241 sobre o Cs-137 está na menor espessura necessária para blindagem da fonte, tornando-a mais leve. Além disso, possui grande sensibilidade quando se utiliza colunas de solos de espessura em torno de 4,5 a 6,0 cm. Suas desvantagens, entretanto, estão no pré-amplificador especial necessário para os pulsos produzidos pelos raios de 60 keV, na impossibilidade de utilização de colunas de grande diâmetro devido à elevada atenuação dos raios gama pelo solo e impossibilidade de fabricação de fontes intensas (auto-absorção). Para esse experimento, foi utilizado um cristal cintilador de NaI(Tl) de 1 mm de espessura e um espectrômetro gama monocanal.

SOANE (1967) discutiu a viabilidade de se determinar simultaneamente a densidade e umidade do solo através de duas fontes emissoras de raios gama (Cs-137 e Am-241). A atividade do Cs-137 utilizada foi de 30 mCi e a do Am-241 de 350 mCi. A detecção dos raios gama de cada fonte foi feita separadamente. O cristal cintilador empregado foi o NaI(Tl) de 5 cm de espessura.

WACK (1967) descreveu um protótipo para determinação da densidade e umidade de solos. Tal instrumento consta de um tubo metáli-

co que é inserido no solo com duas fontes radioativas: uma fonte de Cs-137 de 20 mCi e outra de Am-Be de 300 mCi. O detector de raios gama foi um Geiger-Müller a gás halogênio e o de neutrons um detector proporcional de BF_3 inserido em um cilindro de parafina. Ambos os detectores foram protegidos por um filtro de cádmio.

FRITTON (1969) utilizou uma fonte de 251 mCi de Cs-137 e um detector de cintilação de NaI(Tl) de $2,5 \times 2,5''$, acoplado a uma fotomultiplicadora, para estudar o fator de correção nas determinações devido ao tempo morto do equipamento eletrônico. Comparou alguns valores já citados em literatura de coeficiente de atenuação de massa do solo e da água quando feita tal correção, para altas taxas de contagem.

GROENEVELT *et alii* (1969) discutiram os problemas que ocorrem quando se utiliza uma fonte emissora de raios gama de baixa energia, como o Am-241 de 60 keV. Dentre as dificuldades estão a determinação do coeficiente de atenuação de massa da água, além do problema de contagens perdidas pelo sistema detector devido ao tempo morto e à geometria do equipamento. Foi utilizada uma fonte de Am-241 de 231 mCi.

SAXENA *et alii* (1970) utilizaram uma fonte de Cs-137 de 250 mCi e um cristal cintilador de NaI(Tl) para determinação do coeficiente de atenuação de massa da água. Tais coeficientes foram determinados para radiações gama na faixa de $0,66 \pm 0,15$ MeV, $0,66 \pm 0,033$ MeV, e também para o detector conectado diretamente ao "scaler". Foi observado o valor do coeficiente de atenuação de massa da água quando se usa a colimação na fonte e detector, somente colimação na fonte ou no detector para os três modos de operação.

REGINATO e STOUT (1970) verificaram que o equipamento usado para medir densidade e umidade pelo método de atenuação gama em laboratório não apresenta bom desempenho quando usado "in situ", devido às flutuações no número de contagens, em função das variações de temperatura.

VACHAJD *et alii* (1970) determinaram o valor do coeficiente de absorção da água usando uma fonte de Am-241 de 100 mCi. Para isso fizeram um estudo da colimação ideal do feixe de radiação para obtenção do coeficiente de atenuação de massa próximo ao teórico.

COREY *et alii* (1971) determinaram simultaneamente, em condições de laboratório, a densidade e umidade do solo por atenuação da radiação gama. Foram utilizadas fontes emissoras gama de Cs-137 e Am-241, cujas atividades eram 70 mCi e 29 mCi, respectivamente. Para essa determinação simultânea foi utilizado um espectrômetro gama multicanal, além de um cristal cintilador de NaI(Tl) e um detector de Ge(Li). Para a obtenção do feixe, a fonte de Cs-137 foi colocada atrás da de Am-241.

SWART e GROENEVELT (1971) determinaram a umidade do solo em colunas, utilizando uma fonte de Am-241 de 231 mCi de atividade. Foi utilizado um cristal cintilador de NaI(Tl) de 3 mm de espessura e um espectrômetro gama monocanal. Discutiu também a movimentação automática da fonte e detector ao longo da coluna e, a fim de se reduzir a influência da gravidade no fluxo horizontal da água a coluna foi movimentada radialmente.

GOPAL e SANJEVAIAH (1973) utilizaram um cristal cintilador de NaI(Tl) e uma fonte de Cs-137 de 500 mCi para determinar o coeficiente

de atenuação de massa do carbono, alumínio, cobre, estanho e chumbo para diversas espessuras. Os resultados demonstraram que a resolução do espectrômetro e os coeficientes de atenuação de massa permaneceram constantes quando o produto da espessura pelo próprio coeficiente de atenuação de massa é menor que a unidade, indicando que a condição de feixe colimado é preservado e o número de fótons espalhados, que chegam ao detector, é insignificante.

KIRKHAN e COREY (1973) analisaram os recentes progressos instrumentais nucleares usados na detecção da radiação e a disponibilidade comercial de amostras radioativas.

OLESEN (1973) estudou a variação da umidade volumétrica do solo com e sem correções na densidade, usando uma fonte de Am-241, de 100 mCi e um cristal cintilador de NaI(Tl). Sugeriu a utilização do equipamento com dupla fonte para reduzir os erros nas medidas de densidade e umidade a níveis aceitáveis, para solos expansíveis.

REGINATO (1974 a) determinou a densidade e umidade do solo utilizando três tipos de configuração para as fontes de Am-241 e Cs-137: Am separadamente, Cs separadamente e ambas as fontes. O equipamento nuclear de detecção (método 2 gama) básico foi modificado com a adição de um segundo analisador e um "scaler" para que os fótons provenientes do Am mais Cs fossem contados simultaneamente. Foi utilizado um cristal cintilador de NaI(Tl) de 1 cm de espessura e as atividades das fontes de Cs-137 e Am-241 eram de 5 mCi e 100 mCi, respectivamente. Foram obtidos valores absurdos de densidade e umidade quando utilizadas ambas as fontes emissoras.

REGINATO (1974 b) fez um estudo dos erros que podem influenciar as medidas de densidade e umidade do solo através de um feixe monoenergético de radiação gama. Utilizou para isso uma fonte de 100 mCi de Am-241, distante 14,3 cm de um detector de NaI(Tl) de 1 cm de espessura.

COPPOLA e REINIGER (1974) investigaram a dependência do coeficiente de atenuação de massa para solos de diferentes composições. Utilizaram energias de 10 keV a 3 MeV e concluíram que há influência da composição química do solo para determinação desse coeficiente de atenuação. Tal influência é apreciável quando se utiliza fontes emissoras de de energias inferiores a 300 keV.

FERRAZ (1974 e 1976) desenvolveu um sistema para determinação simultânea da densidade e umidade do solo. Usou para isso duas fontes emissoras gama, Am-241 e Cs-137, cujas atividades eram 100 e 130 mCi, respectivamente. Foi usada uma geometria de 2 feixes paralelos e horizontais, distantes as fontes radioativas 10 mm de centro a centro. Os colimadores eram de secção reta circular em blocos de chumbo. O colimador do Am-241 possuía uma secção reta de 12,4 mm², enquanto que o do Cs-137, 4,5 mm². A detecção foi realizada com um cristal de NaI(Tl), de 2 x 2", acoplado a uma fotomultiplicadora, sendo os impulsos analisados e contados num sistema de dois canais. Nesses trabalhos foram feitos estudos da sensibilidade do método 2 gama para determinação da densidade e umidade de solos. Comentou, ainda, a geometria utilizada e a escolha das fontes de radiação gama mais adequada para se obter uma sensibilidade máxima.

FERRAZ *et alii* (1974) discutiram os problemas ocorridos na utilização de uma fonte colimada de Am-241, tais como a colimação, resolução do detector, os interferentes e os problemas na análise das contagens obtidas. Discutiram, também, as vantagens e desvantagens do método na determinação da densidade e umidade de solos.

GYURCSAK *et alii* (1976) discutiram as técnicas para medidas de umidade e densidade do solo, usando dois detectores independentes, um para raios gama e outro para neutrons térmicos, espaçados a diferentes distâncias da fonte. A resposta do duplo detector é pouco influenciada por fatores como composição do solo, espessura do solo e distúrbios na estrutura do solo causado pela mudança do tubo. Por outro lado, é muito sensível a variação de densidade e umidade.

HERKELRATH e MILLER (1976) demonstraram a viabilidade da utilização de cintiladores plásticos, de tempo morto da ordem de nanossegundos, para detecção de radiações gama emitidas por fontes de 2 Ci de atividade, ao se adaptar um diodo estabilizador no circuito divisor de tensão na válvula fotomultiplicadora. Observaram a influência da temperatura no número de contagens, bem como os fótons espalhados devido ao espalhamento Compton.

SING e CHANDRA (1976) descreveram um experimento para determinar a espessura do solo colocado entre a fonte e o detector, para melhor exatidão do método de atenuação gama.

FERRAZ e MANSELL (1976) descreveram a importância do método de atenuação da radiação gama para determinação simultânea da umidade

e densidade do solo. Discutiram a importância da espessura do material com relação à energia dos raios gama das fontes utilizadas. As fontes emissoras de raios gama utilizadas foram o Cs-137 (0,662 MeV) e Am-241 (60 keV).

FERRAZ e PINTO (1977) estudaram a possibilidade de se determinar a densidade ou umidade do solo "in situ" por atenuação da radiação gama não colimada. Demonstraram, também, que não é necessário conhecimento dos parâmetros densidade e umidade iniciais, bem como o coeficiente de atenuação de massa do solo, para determinação da variação da umidade. Foi utilizada uma fonte de radiação gama de Cs-137 de 5 mCi, e como detector, um cristal de cintilação de NaI(Tl) de 3,81 cm de diâmetro por 1,27 cm de altura, com 23% de resolução, acoplado a um equipamento de contagem portátil.

KANE *et alii* (1977) utilizaram um detector semicondutor de Ge(Li) para determinação do coeficiente de atenuação de alguns elementos. Para o chumbo foram determinados os valores do coeficiente de atenuação para energias de radiação gama de 0,662 MeV; 1,116 MeV e 1,33 MeV e, no caso do tântalo e molibdênio, foram usados energias de 0,662 MeV e 1,116 MeV. Os valores experimentais foram comparados com valores já citados em literatura.

SANTO e SUJO (s.d.) determinaram o coeficiente de atenuação de massa para o solo Molokai e o compararam com valores já publicados e atribuíram as diferenças encontradas à composição mineral do solo. Determinaram também o coeficiente de atenuação de massa da água

fazendo as devidas correções para o tempo morto do equipamento. Citaram que, embora o método não seja destrutivo, possui algumas limitações, tais como ser válido somente para solos não expansivos, equipamento caro e necessidade de uma fonte de Cs-137 de 220 mCi de atividade.

3. TEORIA

3.1. Atenuação de um feixe de radiação gama monoenergético

O método de atenuação da radiação gama é baseado na medida das intensidades dos feixes incidente e emergente ou seja, antes e depois dos raios gama colimados passarem através de um material absorvedor. A atenuação de um feixe de radiação gama monoenergética para uma amostra de solo seco pode ser descrita pela lei de BEER:

$$I = I_0 \cdot e^{-\bar{\mu}_s \rho x} \dots\dots\dots (1)$$

onde:

I, I_0 = intensidade ou taxa de contagem (cpm) do feixe emergente e incidente, respectivamente,

$\bar{\mu}_s$ = coeficiente de atenuação de massa (cm^2/g) para a energia gama considerada,

ρ = densidade (g/cm^3) e

x = espessura (cm) do solo seco.

Quando o solo for úmido e a radiação gama colimada e monoenergética, a equação passa a ser expressa da seguinte maneira:

$$I = I_0 \cdot e^{-x(\bar{\mu}_s \rho + \bar{\mu}_a \theta)} \dots\dots\dots (2)$$

onde:

$\bar{\mu}_a$ = coeficiente de atenuação de massa da água (cm²/g),

θ = umidade volumétrica (cm³ de água/cm³ de solo ou g de água/ cm³ de solo) e

$I, I_0, x, \bar{\mu}_s$ e ρ = já definidos.

Deve ser notado que as equações (1) e (2) são válidas somente para feixes colimados de radiação gama monoenergética. Quando se têm feixes não colimados de radiação gama monoenergética de 0,2 a 2,0 MeV, o efeito Compton se torna de grande importância e devem ser feitas correções para que tais equações sejam válidas.

3.2. Efeito Compton

O efeito Compton se caracteriza pela colisão elástica de um fóton com um elétron livre (Figura 1), ocasionando uma diminuição de sua energia em função do ângulo de espalhamento. Apesar do fóton ter sua energia diminuída, poderá atingir o detector e ser contado, como os demais fótons que não sofreram interação com o material absorvedor, acarretando um acréscimo na intensidade do feixe emergente. Tal possibilidade de dependerá da geometria do sistema utilizado, da faixa de energia de de

tecção ou faixa de amplitude do pulso elétrico adotada para o analisador monocanal.

Figura 1 - Representação esquemática do efeito Compton.

E, E' = energias dos fótons incidente e espalhado,

T_e = energia cinética do elétron ejetado,

ϕ = ângulo formado entre o sentido do fóton incidente e o elétron ejetado e

α = ângulo formado entre o sentido dos fótons incidente e espalhado.

A expressão que permite avaliar a variação do comprimento de onda e, conseqüentemente, a energia do fóton espalhado (KAPLAN, 1978), é:

$$\lambda' - \lambda = \frac{hc}{E_0} (1 - \cos \alpha) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ou

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{E_0} (1 - \cos \alpha)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

onde:

λ, λ' = comprimento de onda do fóton incidente e espalhado,

α = ângulo de espalhamento do fóton em relação ao sentido original,

E_0 = energia de repouso do elétron (0,511 MeV),

h = constante de Plank,

c = velocidade da luz no vácuo ($3,0 \times 10^8$ m/s) e

E, E' = energia do fóton incidente e espalhado.

A equação (4) pode ser escrita em termos de perda percentual de energia do raio gama incidente, isto é:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta E}{E} \cdot 100 &= \frac{\frac{E}{E_0} (1 - \cos \alpha)}{1 + \frac{E}{E_0} (1 - \cos \alpha)} \cdot 100 = \\ &= \frac{1}{1 + \frac{E_0}{E (1 - \cos \alpha)}} \cdot 100 \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

onde $\Delta E = E - E'$.

Através dessas duas últimas equações pode-se verificar que:

- para fótons de baixa energia, a razão E/E_0 é muito menor que 1 e, conseqüentemente, $E' \sim E$, isto é, a energia do fóton espalhado é quase igual

- à energia do fóton incidente,
- para fótons de alta energia, a razão E/E_0 é muito maior que 1 e, consequentemente, $\Delta E/E \approx 1$, ocasionando quase que perda total da energia.

A energia do raio gama espalhado (equação 4) e a perda percentual de energia (equação 5) do raio gama em função do ângulo de espalhamento (α) são apresentadas na Figura 2.

O efeito Compton pode ser contornado utilizando-se um espectrômetro gama monocanal e fazendo-se a detecção do fotopico. Além desse tipo de detecção, normalmente é utilizado uma colimação no feixe emergente com a finalidade de absorver os fótons espalhados, minimizando a detecção dos raios Compton pelo sistema de contagem,

É provável que a eliminação do efeito Compton possa ser feita utilizando-se um espectrômetro gama monocanal com contagem no fotopico e uma colimação pobre ou, então, com um sistema detector com contagem integral e uma colimação adequada. Esse último sistema de detecção, contagem integral, é bem menos requintado do que o espectrômetro gama monocanal, com consequente facilidade de utilização por pessoal não especializado, além de ser de um custo mais acessível.

Figura 2 - Energia do raio gama espalhado e perda percentual de energia para o raio gama de 0,662 MeV emitido pelo Cs-137, nos diferentes ângulos de espalhamento.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Geometria

Foi utilizada uma fonte radioativa emissora de raios gama de Cs-137, cujas características, segundo FERRAZ (1974), são:

- Energia do raio gama 0,662 MeV
- Atividade nominal (01/01/66) 130 mCi
- Atividade atual (01/03/79) 96 mCi
- Cápsula cilíndrica de aço inoxidável:
 - diâmetro externo 6,00 mm
 - altura 8,00 mm
 - espessura da parede de saída
do feixe 0,80 mm
- Dimensões efetivas da fonte:
 - diâmetro 3,00 mm
 - altura 3,00 mm
 - área transversal 7,07 mm²

A blindagem e colimador (Figura 3) são constituídas por 3 blocos de chumbo montados sobre uma base de aço de 12,5 mm de espessura, a qual encontra-se sobre um cavalete de vigas de aço em "U" de 3", com 1,40 x 0,60 m de largura. A fonte de Cs-137 situa-se no bloco III, cujas dimensões são 200 x 100 x 200 mm. Tanto o bloco I como o II atuam como colimadores, para fonte de Cs-137, com $4,45 \text{ m}^2$ de secção reta circular. A distância que o feixe de raios gama percorre até atingir o detector é de 400 mm (FERRAZ, 1974). A amostra a ser analisada é colocada em um suporte situado entre os blocos I e II.

Na desintegração do Cs-137, meia vida de 30,23 anos, após a emissão da partícula beta de 0,511 MeV (94% de intensidade de emissão), há formação do estado meta-estável do Ba-137m (meia vida de 2,55 minutos), passando a Ba-137 por emissão de raios gama de 0,662 MeV ou por emissão de elétrons da camada K (conversão interna), com aproximadamente a mesma energia. A percentagem de decaimento por gama é de 84,8%, enquanto que por conversão interna, é de 9,2% (NASCIMENTO Fº, 1977). Após a conversão interna, ocorre o preenchimento da lacuna da camada K com a emissão de raios-X característicos de 32,19; 31,82; 36,4 e 37,3 keV, com intensidades relativas de 100; 52; 28 e 6%, respectivamente (LEDERER *et alii*, 1967). Por simplicidade, a energia desses raios-X será referida doravante como 32 keV. Outro processo de desintegração do Cs-137 é por emissão de partículas β^- de 1,18 MeV, com intensidade de emissão de 6%, decaindo diretamente a Ba-137.

Figura 3 - Esquema da blindagem e colimação utilizadas- dimensões em mm (adaptado de FERRAZ, 1974).

Devido à alta atividade da fonte de Cs-137, estes raios-X emitidos poderiam ser detectados no sistema Nuclear Chicago de contagem integral, onde o discriminador de entrada é de 0,25 volts, podendo ocasionar desvios na lei de BEER, principalmente na região de baixa densidade superficial. Conforme BERRY (1961), o coeficiente de atenuação de massa do ferro, para uma energia de 30 keV, é de $8,0 \text{ cm}^2/\text{g}$, e como a cápsula radioativa tem uma espessura de aço inoxidável na janela de saída do feixe de 0,8 mm, a transmissão desses raios-X de 32 keV é da ordem de 0,7%.

Na tentativa de se eliminar totalmente este raio-X de 32 keV, na saída do feixe de radiação do bloco III, foi colocada uma pequena lâmina de Pb, de 3,175 mm de espessura. A transmissão dessa lâmina de Pb para a energia de 32 keV é da ordem de $10^{-37}\%$ ($\bar{\mu} = 25 \text{ cm}^2/\text{g}$ - BERRY, 1961), enquanto que para o raio gama de 0,662 MeV, a transmissão é de 67,4% ($\bar{\mu} = 0,11 \text{ cm}^2/\text{g}$ - BERRY, 1961).

Além da função de se eliminar o raio-X de 32 keV, esta lâmina teria também a função de barrar os raios gama retro-espalhados pelo efeito Compton dentro da blindagem.

4.2. Equipamentos e detecção

Para detecção das radiações gama foram montados dois sistemas constituídos de:

a) Conjunto Nuclear Chicago (NC8770), com cristal cintilador de NaI(Tl) de $1 \times 1''$, tipo plano, acoplado a uma válvula fotomulti-

plificadora (N.C. - série 009786), comandado por um cronômetro digital.

b) Espectrômetro gama monocanal:

- cristal cintilador de NaI(Tl) de 3 x 3", tipo plano, acoplado à válvula fotomultiplicadora (Harshaw Chemical Company, modelo 12S 12/3, série GW 422),
- divisor de tensão e pré-amplificador (ORTEC, modelo 276),
- fonte de alta voltagem (HP, modelo 6516 DC),
- amplificador/analizador monocanal (ORTEC, modelo 490 B),
- contador de pulsos (ORTEC, modelo 775) e
- relógio eletrônico (ORTEC, modelo 719).

Antes de se iniciar as leituras no sistema Nuclear Chicago determinou-se o valor da alta voltagem de operação, a fim de detectar o maior número possível de pulsos eletrônicos, devido à interação da radiação gama com o cristal cintilador. Para isso, levantou-se a curva de taxa de contagem do feixe de raios gama em função da alta voltagem aplicada à fotomultiplicadora. Os dados obtidos encontram-se na Tabela 1, e são mostrados na Figura 6. A voltagem de operação escolhida foi de 900 V.

Para esse sistema, as amostras de solo seco foram colocadas em um suporte de plástico entre os blocos I e II (Figuras 4 e 5). Logo na saída do feixe de raios gama do bloco III, foi colocada a lâmina de Pb de 3,175 mm de espessura e, para cada amostra, efetuadas uma série de 10 determinações de 1 minuto, em diferentes posições, e outra série sem a lâmina de Chumbo.

Figura 4 - Detalhe do posicionamento da amostra para análise.

Figura 5 - Vista geral do equipamento utilizado; à direita, espectrômetro gama e à esquerda o sistema Nuclear Chicago.

Tabela 1 - Taxa de contagem do feixe de raios gama em função da alta voltagem aplicada à válvula fotomultiplicadora do sistema Nuclear Chicago.

Alta Voltagem (volt)	Taxa de Contagem (cpm)
600	0
620	2041
660	3631
700	4589
720	4870
740	5207
780	5709
800	5678
840	5754
860	5731
880	5831
900	5882
920	5751
940	5847
960	5909
980	5935
1000	5893
1020	6240

Figura 6 - Curva para obtenção da alta voltagem de operação (V.O.) do sistema Nuclear Chicago, para os raios gama do Cs-137.

Para o sistema gama monocanal levantou-se inicialmente o espectro de pulsos dos raios gama do Cs-137, para um fundo de escala de 1,0 MeV (Figura 7). Fixando-se também o tempo em um minuto, foram efetuadas as contagens para duas situações distintas do espectrômetro gama monocanal: uma denominada de contagem integral (base = 1,0 V e janela = 9,0 V) e outra denominada de contagem no fotopico (base = 5,9 V e janela = 1,4 V). Para essas duas situações as leituras foram efetuadas com e sem a lâmina protetora de Pb, também numa série de 10 determinações em diferentes posições.

Portanto, foram utilizados 6 tratamentos distintos, assim denominados:

- Tratamento 1 (T_1) - sistema Nuclear Chicago, cristal cintilador de NaI(Tl),
1 x 1'', tipo plano, com proteção de chumbo,
- Tratamento 2 (T_2) - idem, sem proteção de chumbo,
- Tratamento 3 (T_3) - sistema espectrômetro gama monocanal, cristal cintilador de NaI(Tl), 3 x 3'', tipo plano, contagem integral, com proteção de chumbo,
- Tratamento 4 (T_4) - idem, sem proteção de chumbo,
- Tratamento 5 (T_5) - sistema espectrômetro gama monocanal, cristal cintilador de NaI(Tl), 3 x 3'', tipo plano, contagem no fotopico, com proteção de chumbo,
- Tratamento 6 (T_6) - idem, sem proteção de chumbo,

Para os tratamentos 3 e 4, a alta voltagem utilizada foi de 900 volts, ganho grosso 32 vezes e ganho fino de 6,6 vezes. Já para

Figura 7 - Espectro de pulsos eletrônicos devido aos raios gama de Cs-137 obtidos com e sem a lâmina de Pb na saída do feixe do bloco III.

os tratamentos 5 e 6 houve variações no ganho fino devido ao deslocamento do fotopico, enquanto que os outros itens permaneceram constantes.

Em todos os tratamentos a temperatura da sala foi mantida em $22 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

4.3. Correção do tempo morto

Segundo FERRAZ (1974), o tempo morto obtido para espectrômetro monocal foi de 5,02 μs . Utilizando-se desse valor na equação (6), pôde-se determinar que para a menor taxa de contagem do feixe obtido neste trabalho (140.000 cpm), o acréscimo devido ao tempo morto não chega a 1%, enquanto que para a maior taxa (360.000 cpm), atinge a casa dos 3%.

$$I = \frac{I'}{1 - I' \tau} \dots\dots\dots (6)$$

onde:

I' , I = taxas de contagem (cpm) obtida e corrigida, respectivamente,

τ = tempo morto (minuto).

Como essa correção é relativamente pequena, optou-se pela não correção do tempo morto nas leituras das taxas de contagem. Além disso, utilizou-se o logarítmo da taxa de contagem, tornando essa correção insignificante.

O acréscimo, em termos percentuais, na taxa de contagem devido ao tempo morto depende do valor desta taxa. Quanto menor o valor

da taxa de contagem, menor será o acréscimo percentual. A lâmina de chumbo de 3,175 mm, além da finalidade de absorver os raios-X de 32 keV do Ba-137, como visto anteriormente, pode ser utilizada com a finalidade de se diminuir a intensidade do feixe incidente da radiação gama.

4.4. Tipos de solos e preparação das amostras

Foram utilizados 10 diferentes tipos de solo (Tabela 2).

Tabela 2 - Relação dos solos estudados com as respectivas siglas e horizontes.

Sigla	Solo	Horizonte (cm)
PVA	Podzólico Vermelho Amarelo	0 - 30
PM	Podzolizado de Lins e Marília, var. Marília	0 - 30
LVE	Latosolo Vermelho Escuro	0 - 30
TRE	Terra Roxa Estruturada (ESALQ)	0 - 30
LR	Latossol Roxo	0 - 30
R	Regosol (Cerrado)	0 - 30
TRE-1	Terra Roxa Estruturada (Jaboticabal)	0 - 30
TRE-2	Terra Roxa Estruturada (Jaboticabal)	30 - 60
TRE-3	Terra Roxa Estruturada (Jaboticabal)	60 - 90
TRE-4	Terra Roxa Estruturada (Jaboticabal)	90 - 120

Primeiramente, o solo foi seco ao ar, destorroado em peneira de 2 mm e depois seco, posteriormente, em estufa a 105°C, por 24 horas. Foram utilizados 3 tubos plásticos para a colocação das amostras de solo, cujas características encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Características dos tubos plásticos utilizados para colocação das amostras de solo.

Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)
2,50	3,40	4,9087
2,90	5,90	6,6052
2,90	7,20	6,6052

Para cada tipo de solo foram preparadas 6 amostras, colocando-se o solo nos tubos plásticos com e sem compactação manual. Através dessas compactações, conseguiu-se variações na densidade de 1,0 até aproximadamente 1,4 g/cm³.

Para as amostras de água foram utilizados 5 tubos plásticos, sendo um de cada tamanho, além de uma testemunha, cujas características são mostradas na Tabela 4.

Depois de vedados os tubos com uma tampa fixa de polietileno, foram feitos 2 orifícios laterais para a injeção da água destilada. Para cada amostra, realizaram-se 4 determinações em diferentes pontos, tirando-se a média aritmética.

Tabela 4 - Características dos tubos plásticos utilizados para colocação das amostras de água.

Tubo (nº)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm²)
1	2,5	3,4	4,9087
2	2,9	5,9	6,6052
3	2,5	6,8	4,9087
4	2,9	7,2	6,6052
5	2,9	9,3	6,6052
T	2,5	3,4	4,9082

4.5. Determinação do coeficiente de atenuação de massa

Linearizando-se a equação de BEER (equação 1) da atenuação de um feixe de raios gama monoenergético e colimado, tem-se:

$$\ln I = \ln I_0 - \bar{\mu} \rho x \quad \dots\dots\dots (7)$$

ou

$$\ln I = \ln I_0 - \bar{\mu} \bar{x} \quad \dots\dots\dots (8)$$

onde $\bar{x} = \rho x$ = densidade superficial (g/cm²).

Correlacionando-se o logaritmo natural das intensidades médias do feixe emergente ($\ln I$) com as densidades superficiais ($\bar{x}$) do absorvedor, tem-se que o coeficiente angular da reta $\ln I$ vs $\bar{x}$ é o coeficiente de atenuação de massa daquele absorvedor.

Devido a possíveis erros ocasionados pela não correção do tempo morto, as taxas de contagem do feixe de radiação gama para densidade superficial nula ($x = 0$) não foram utilizadas nas regressões para estimativa dos coeficientes lineares e angulares e, conseqüentemente, para obtenção do coeficiente de atenuação de massa dos solos e da água.

Para se verificar se os coeficientes de atenuação de massa obtidos diferem estatisticamente para os diversos solos, em um mesmo tratamento, fez-se o contraste através do teste "t" (STEEL e TORRIE, 1960). Verificou-se, também, através do teste "t", se o coeficiente de atenuação de massa geral (dos 10 solos) diferem estatisticamente nos diversos tratamentos.

Para água, foi verificado se os coeficientes de atenuação de massa obtidos diferem estatisticamente para os diferentes tratamentos, pelo mesmo teste estatístico.

5. RESULTADOS

5.1. Coeficientes de atenuação de massa para solos

Os valores médios da intensidade do feixe emergente para 10 posições distintas em cada amostra de solo, nos diferentes tratamentos, bem como os valores da densidade superficial, encontram-se no Apêndice 1. Esses dados são também mostrados graficamente nas Figuras 8 a 17.

Os valores obtidos para os coeficientes lineares ($\ln I_0$) e angulares ($\bar{\mu}$) das retas, bem como seus desvios padrões e coeficientes de correlação para cada tratamento e diferentes solos, encontram-se nas Tabelas 5 a 10. Na Tabela 11 e Figura 18 encontram-se os valores dos coeficientes de atenuação de massa para os diferentes solos, em cada tratamento.

Os contrastes obtidos através do teste estatístico encontram-se nos Apêndices 2 a 7, para o mesmo solo e diferentes tratamentos e no Apêndice 8 estão os contrastes para os coeficientes de atenuação de massa geral (10 solos) para os diversos tratamentos.

Figura 8 - Curvas de taxa de contagem do feixe emergente em função da densidade superficial para determinação do coeficiente de atenuação de massa do solo Podzol Vermelho Amarelo, nos diversos tratamentos.

Figura 9 - Curvas de taxa de contagem do feixe emergente em função da densidade superficial para determinação do coeficiente de atenuação de massa do solo Podzolizado var. Marília, nos diversos tratamentos.

Figura 10 - Curvas de taxa de contagem do feixe emergente em função da densidade superficial para determinação do coeficiente de atenuação de massa do solo Latosol Vermelho Escuro, nos diversos tratamentos.

Figura 11 - Curvas de taxa de contagem do feixe emergente em função da densidade superficial para determinação do coeficiente de atenuação de massa do solo Terra Roxa Estruturada (ESALQ), nos diversos tratamentos.

Figura 12 - Curvas de taxa de contagem do feixe emergente em função da densidade superficial para determinação do coeficiente de atenuação de massa do solo Latosol Roxo, nos diversos tratamentos.

Figura 13 - Curvas de taxa de contagem do feixe emergente em função da densidade superficial para determinação do coeficiente de atenuação de massa do solo Regosol (Cerrado), nos diversos tratamentos.

Figura 14 - Curvas de taxa de contagem do feixe emergente em função da densidade superficial para determinação do coeficiente de atenuação de massa do solo Terra Roxa Estruturada (Jaboticabal-horizonte 0-30 cm), nos diversos tratamentos.

Figura 15 - Curvas de taxa de contagem do feixe emergente em função da densidade superficial para determinação do coeficiente de atenuação de massa do solo Terra Roxa Estruturada (Jaboticabal-horizonte 30-60 cm), nos diversos tratamentos.

Figura 16 - Curvas de taxa de contagem do feixe emergente em função da densidade superficial para determinação do coeficiente de atenuação de massa do solo Terra Roxa Estruturada (Jaboticabal-horizonte 60-90 cm), nos diversos tratamentos.

Figura 17 - Curvas de taxa de contagem do feixe emergente em função da densidade superficial para determinação do coeficiente de atenuação de massa do solo Terra Roxa Estruturada (Jaboticabal-horizonte 90-120 cm), nos diversos tratamentos.

Tabela 5 - Coeficientes lineares ($\ln I_0$) e angulares ($\bar{\mu}$), respectivos desvios padrões (s) e coeficiente de correlação (r) para o tratamento 1 (Nuclear Chicago com proteção de Pb), para os diferentes solos.

Solo	$\ln I_0$	$\bar{\mu}$ (cm ² /g)	s $\ln I_0$	s $\bar{\mu}$ (cm ² /g)	r ¹
PVA	11,806047	0,077639	0,046516	0,006270	-0,987209
PM	11,801076	0,076236	0,042631	0,005007	-0,991483
LVE	11,806705	0,076837	0,043470	0,005468	-0,990020
TRE	11,815725	0,077315	0,023345	0,003217	-0,996556
LR	11,822012	0,078174	0,025942	0,003577	-0,995838
R	11,824835	0,078055	0,030377	0,003607	-0,995757
TRE-1	11,826507	0,079464	0,031536	0,004593	-0,993385
TRE-2	11,826196	0,078953	0,029200	0,004213	-0,994353
TRE-3	11,827125	0,079439	0,021517	0,003228	-0,996715
TRE-4	11,820149	0,077917	0,025282	0,003873	-0,995095
Geral	11,816967	0,077928	0,009236	0,001248	-0,992642

¹ - significativo a 0,1%

Tabela 6 - Coeficientes lineares ($\ln I_0$) e angulares ($\bar{\mu}$), respectivos desvios padrões e coeficiente de correlação (r) para o tratamento 2 (Nuclear Chicago sem protetor de Pb), para os diferentes solos.

Solo	$\ln I_0$	$\bar{\mu}$ (cm ² /g)	s $\ln I_0$	s $\bar{\mu}$ (cm ² /g)	r ¹
PVA	12,199801	0,078323	0,043103	0,005809	-0,989176
PM	12,193806	0,076719	0,041476	0,004871	-0,992033
LVE	12,196602	0,077254	0,040078	0,005042	-0,991589
TRE	12,198582	0,077292	0,031807	0,004382	-0,993631
LR	12,204661	0,078904	0,042539	0,005866	-0,989126
R	12,205575	0,077677	0,030516	0,003623	-0,995677
TRE-1	12,202428	0,078513	0,037243	0,005424	-0,990590
TRE-2	12,197122	0,077654	0,036226	0,005227	-0,991059
TRE-3	12,210455	0,080216	0,034134	0,005120	-0,991950
TRE-4	12,195127	0,077849	0,037060	0,005677	-0,989531
Geral	12,196918	0,077497	0,009667	0,001304	-0,991883

¹ - significativo a 0,1%

Tabela 7 - Coeficientes lineares ($\ln I_0$) e angulares ($\bar{\mu}$), respectivos desvios padrões (s) e coeficiente de correlação (r) para o tratamento 3 (Espectrômetro gama, contagem integral, com proteção de Pb), para os diferentes solos.

Solo	$\ln I_0$	$\bar{\mu}$ (cm ² /s)	s $\ln I_0$	s $\bar{\mu}$ (cm ² /g)	r ¹
PVA	12,345280	0,074856	0,040978	0,005523	-0,989287
PM	12,353368	0,075524	0,041594	0,004885	-0,991736
LVE	12,356409	0,075928	0,037696	0,004742	-0,992288
TRE	12,345263	0,073966	0,04266	0,005282	-0,987828
LR	12,369847	0,078578	0,042450	0,005854	-0,989082
R	12,367174	0,076539	0,032938	0,003911	-0,994819
TRE-1	12,363323	0,077412	0,035442	0,005162	-0,991225
TRE-2	12,380155	0,076582	0,037335	0,005387	-0,990248
TRE-3	12,400606	0,078649	0,029851	0,004478	-0,993580
TRE-4	12,396571	0,076805	0,034382	0,005267	-0,990726
Geral	12,373505	0,077244	0,011185	0,001509	-0,989109

¹ -significativo a 0,1%

Tabela 8 - Coeficientes lineares ($\ln I_0$) e angulares ($\bar{\mu}$), respectivos desvios padrões (s) e coeficiente de correlação (r) para o tratamento 4 (Espectrômetro gama, contagem integral, sem proteção de Pb), para os diferentes solos.

Solo	$\ln I_0$	$\bar{\mu}$ (cm ² /g)	s $\ln I_0$	s $\bar{\mu}$ (cm ² /g)	r ¹
PVA	12,725527	0,074953	0,041433	0,005584	-0,989080
PM	12,740697	0,076584	0,044388	0,005213	-0,990859
LVE	12,728918	0,075150	0,045661	0,005744	-0,988515
TRE	12,750862	0,078003	0,032759	0,004511	-0,993370
LR	12,753708	0,078767	0,038700	0,005337	-0,990944
R	12,750684	0,077168	0,034319	0,004075	-0,994469
TRE-1	12,744864	0,077540	0,038636	0,005627	-0,989632
TRE-2	12,743809	0,077946	0,042015	0,006062	-0,988117
TRE-3	12,756918	0,079486	0,033359	0,005004	-0,992167
TRE-4	12,743683	0,077083	0,037131	0,005688	-0,989285
Geral	12,741097	0,076808	0,010035	0,001354	-0,991106

¹ - significativo a 0,1%

Tabela 9 - Coeficientes lineares ($\ln I_0$) e angulares ($\bar{\mu}$), respectivos desvios padrões (s) e coeficiente de correlação (r) para o tratamento 5 (Espectrômetro gama, contagem na região do fotopico, com proteção de Pb), para os diferentes solos.

Solo	$\ln I_0$	$\bar{\mu}$ (cm ² /g)	s $\ln I_0$	s $\bar{\mu}$ (cm ² /g)	r ¹
PVA	11,920761	0,079267	0,045115	0,006080	-0,988435
PM	11,906520	0,075746	0,049945	0,005866	-0,988217
LVE	11,910781	0,076810	0,047756	0,006008	-0,987984
TRE	11,933245	0,078300	0,036853	0,005078	-0,991694
LR	11,952686	0,082992	0,045791	0,006315	-0,988619
R	11,900626	0,074364	0,032937	0,003911	-0,994514
TRE-1	11,922293	0,078673	0,044601	0,006495	-0,986640
TRE-2	11,926067	0,078001	0,042040	0,006066	-0,988120
TRE-3	11,945573	0,081156	0,043445	0,006517	-0,987348
TRE-4	11,924481	0,077206	0,042098	0,006449	-0,986333
Geral	11,922789	0,077910	0,011454	0,001546	-0,988779

¹ - significativo a 0,1%

Tabela 10 - Coeficientes lineares ($\ln I_0$) e angulares ($\bar{\mu}$), respectivos desvios padrões (s) e coeficiente de correlação (r) para o tratamento 6 (Espectrômetro gama, contagem na região do fotopico, sem proteção de Pb), para os diferentes solos.

Solo	$\ln I_0$	$\bar{\mu} \text{ (cm}^2/\text{g)}$	s $\ln I_0$	s $\bar{\mu} \text{ (cm}^2/\text{g)}$	r ¹
PVA	12,274048	0,075495	0,040785	0,005497	-0,989563
PM	12,263763	0,074029	0,046359	0,005445	-0,989353
LVE	12,276464	0,075352	0,045845	0,005767	-0,988485
TRE	12,286751	0,076597	0,033109	0,004562	-0,992980
LR	12,285357	0,076825	0,041613	0,005738	-0,989025
R	12,288505	0,076334	0,037894	0,004499	-0,993123
TRE-1	12,288850	0,077853	0,043322	0,006309	-0,987119
TRE-2	12,290728	0,078550	0,045762	0,006603	-0,986161
TRE-3	12,293314	0,078946	0,045764	0,006865	-0,985212
TRE-4	12,283490	0,077135	0,041240	0,006317	-0,986850
Geral	12,279086	0,076040	0,010854	0,001465	-0,989411

¹ - significativo a 0,1%

Tabela 11 - Distribuição dos valores dos coeficientes de atenuação de massa obtidos para cada tratamento e diferentes solos.

Solo	Coeficientes de atenuação de massa $\bar{\mu}(\text{cm}^2/\text{g})$ para os tratamentos					
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
PVA	0,077639	0,078323	0,074856	0,074953	0,079267	0,075495
PM	0,076236	0,076719	0,075524	0,076584	0,075746	0,074029
LVE	0,076837	0,077254	0,075928	0,075150	0,076810	0,075352
TRE	0,077315	0,077292	0,073966	0,078003	0,078300	0,076597
LR	0,078174	0,078904	0,078578	0,078767	0,082992	0,076825
R	0,078055	0,077677	0,076539	0,077168	0,074364	0,076334
TRE-1	0,079463	0,078513	0,077412	0,077540	0,078673	0,077853
TRE-2	0,078953	0,077654	0,076582	0,077946	0,078001	0,078550
TRE-3	0,079439	0,080216	0,078649	0,079486	0,081156	0,078946
TRE-4	0,077917	0,077849	0,076805	0,077083	0,077206	0,077135

Figura 18 - Distribuição dos coeficientes de atenuação de massa obtidos para os diferentes solos, em cada um dos tratamentos.

5.2. Coeficientes de atenuação de massa para a água

O valor médio da taxa de contagem de 4 repetições obtidas para cada tratamento e o valor da densidade superficial, encontram-se na Tabela 12 e Figura 19.

Na Tabela 13 encontram-se os valores dos coeficientes de atenuação de massa para a água nos diferentes tratamentos. No Apêndice 9 encontram-se os contrastes obtidos para os coeficientes de atenuação de massa para os seis tratamentos utilizados.

Tabela 12 - Valores médios da taxa de contagem (cpm) do feixe emergente e da densidade superficial (g/cm^2) para água, nos diferentes tratamentos.

$\bar{x}$ (g/cm^2)	Tratamentos					
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
3,4	97149	143313	176166	259057	115233	167911
5,9	78500	115527	142303	208947	93017	135782
6,8	72585	106904	131849	193032	86063	125178
7,4	70411	103858	128519	188954	83932	122100
9,3	58481	86018	107071	156672	69521	101476

Figura 19 - Curvas de taxa de contagem do feixe emergente em função da densidade superficial para determinação do coeficiente de atenuação de massa da água nos 6 tratamentos.

Tabela 13 - Coeficientes lineares ($\ln I_0$) e angulares ($\bar{\mu}$), respectivos desvios padrões (s) e coeficiente de correlação (r) para água, obtidos nos diversos tratamentos.

Trat.	$\ln I_0$	$\bar{\mu}$ (cm /g)	$s \ln I_0$	$s \bar{\mu}$ (cm ² /g)	r^1
T ₁	11,775321	0,085081	0,017203	0,002515	-0,998691
T ₂	12,165135	0,085453	0,0188441	0,002755	-0,998444
T ₃	12,362623	0,083345	0,018949	0,002771	-0,998346
T ₄	12,750880	0,084085	0,021803	0,003188	-0,997851
T ₅	11,943386	0,084503	0,020612	0,003014	-0,998097
T ₆	12,319275	0,084312	0,019048	0,002785	-0,998371
Média	-	0,084480	-	-	-

¹ -significativo a 0,1%

6. DISCUSSÃO

Conforme foi previsto anteriormente, item 4.2., a utilização de uma boa colimação para eliminação do efeito Compton, faz com que o uso de um equipamento simples (sistema Nuclear Chicago) e um menos requintado (Espectrômetro gama monocal: contagem integral e no fotopico) forneçam os mesmos coeficientes de atenuação de massa para os diferentes tipos de solo. Alguns valores de coeficientes de atenuação de massa para solos, de diferentes autores, são dados na Tabela 14, sendo que o valor obtido neste trabalho é a média aritmética geral dos 6 tratamentos utilizados ($\bar{\mu}_M = 0,07724 \text{ cm}^2/\text{g}$).

Tabela 14 - Coeficientes de atenuação de massa para solos obtidos por diferentes autores para uma fonte de raios gama de 0,662 MeV (Cs-137).

Autores	$\bar{\mu}$ (cm ² /g)
REGINATO e BAVEL, 1964	0,0772 - 0,0780
COREY <i>et alii</i> , 1971	0,07803

(continua)

Tabela 14 - continuação

Autores	$\bar{\mu}$ (cm ² /g)
DAVIDSON <i>et alii</i> , 1963	0,07690
GURR, 1962	0,07785
KING, 1967	0,077
FERRAZ, 1974	0,07676 - 0,08081
neste trabalho	0,07724

SAXENA *et alii* (1970) determinaram o coeficiente de atenuação de massa da água para uma fonte de Cs-137, de radiação gama monoenergética de 0,66 MeV, com três sistemas de detecção, onde: (1) somente pulsos entre as energias de $0,66 \pm 0,15$ MeV eram contados, (2) pulsos entre $0,66 \pm 0,033$ MeV e (3) quando o detector era conectado diretamente ao contador de pulsos (contagem integral). Para cada um desses sistemas, os coeficientes de atenuação de massa foram determinados com colimação na fonte e detector, somente com colimação no detector e somente na fonte (Tabela 15).

Através desses dados, pode-se observar que os coeficientes de atenuação de massa da água obtidos com a colimação usual (fonte e detector) e com colimação no detector para os três sistemas de detecção variam no máximo de 3,86%. O valor médio obtido para esses dois tipos de colimação foi de 0,0835 cm²/g, muito próximo do valor médio de 0,0845 cm²/g obtido neste trabalho.

Tabela 15 - Coeficientes de atenuação de massa da água, obtidos por SAXENA *et alii* (1970), para uma fonte de radiação gama monoenergética do Cs-137.

Colimação	Coeficiente de atenuação de massa da água (cm^2/g)	Sistemas de Operação	r^1
fonte e	0,0825	1	-1,0000
detector	0,0854	2	-0,9999
	0,0838	3	-0,9999
	0,0830	1	-1,0000
detector	0,0821	2	-0,9998
	0,0843	3	-0,9998
	0,0710	1	-1,0000
fonte	0,0772	2	-0,9969
	0,0744	3	-0,9993

¹ - significativo a 0,1%

Quando a colimação é feita somente na fonte, os valores dos coeficientes de atenuação de massa da água obtidos diferem dos outros tipos de colimação empregados (SAXENA *et alii*, l.c.), e também dos obtidos neste trabalho. O valor mais próximo aos da literatura foi obtido com uma janela estreita (sistema 2). Quando se utilizou uma janela larga (sistema 1) ou a contagem integral (sistema 3) com colimação na fonte, o valor do coeficiente de atenuação de massa afasta-se do teórico.

mente esperado. Isso reforça o que foi salientado no início desse trabalho, onde uma boa colimação, feita junto à fonte e no detector, possibilita a substituição de um espectrômetro gama monocanal por um sistema de contagem integral, menos sofisticado e de custo mais baixo.

A utilização da lâmina de Pb para a eliminação do raio-X de 32 keV do Ba-137m e dos raios gama retroespalhados, principalmente quando se emprega o sistema Nuclear Chicago, não influenciou nos valores obtidos para os coeficientes de atenuação de massa do solo e da água, pois estes não diferem entre si quando se troca os equipamentos.

No sistema onde se emprega o espectrômetro gama monocanal-contagem integral e no fotopico, os pulsos devido ao raio-X são discriminados pelo circuito analisador, mas no sistema Nuclear Chicago poderiam ser contados, pois o discriminador de entrada é de 0,25 volts, inferior à amplitude esperada para os pulsos do raio-X.

Por outro lado, considerando-se como 100% a eficiência intrínseca do cristal cintilador de $1 \times 1''$ e de $3 \times 3''$ para os raios-X de 32 keV, de 50% para os raios gama de 0,662 MeV no cristal de $1 \times 1''$ e de 66% para o de $3 \times 3''$ quando se realiza a contagem integral e de 35% para o mesmo cristal quando em contagem no fotopico (PRICE, 1958; HEATH, 1962), a razão entre a taxa de contagem para os raios gama e raios-X seria ao redor de 660; 870 e 460 para os três casos, respectivamente. Em termos percentuais, a taxa de contagem dos raios-X seria de 0,15; 0,11 e 0,22% em relação a dos raios gama nos sistemas Nuclear Chicago e espectrômetro gama-contagem integral e no fotopico. Portanto, em termos de taxa de contagem, a contribuição dos raios-X seria mínima em todos os sistemas, em

particular no Nuclear Chicago, onde poderiam ter influência.

Quanto aos raios gama retroespalhados na fonte e na blindagem, com uma energia em torno de 180 keV, poderiam ser detectados no sistema Nuclear Chicago e no sistema espectrômetro gama contagem integral. Entretanto, sua influência nos valores dos coeficientes de atenuação é mínima, devido à sua intensidade desprezível, que pode ser verificado no espectro de pulsos do Cs-137 (Figura 7), por volta de 1,8 volts.

A utilização da lâmina de chumbo com intuito de se evitar a correção devido ao tempo morto, também é desnecessária. Isto pode ser mostrado através da comparação relativa da intensidade dos feixes incidentes medidos e calculados (Tabela 16). Os valores calculados foram obtidos através do coeficiente linear da reta $\ln I \times x$ para cada tratamento, enquanto que os medidos são valores médios de 10 determinações (Apêndice 1) por tratamento. Com exceção dos tratamentos 5 e 6 (espectrômetro gama monocalcanal-contagem no fotopico com e sem a lâmina de Pb) para água, a taxa de contagem do feixe incidente medido experimentalmente foi maior que o calculado; o inverso seria esperado, caso a correção devido ao tempo morto fosse significativa.

Tabela 16 - Valores relativos da intensidade dos feixes incidentes medidos (I_{0med}) e calculados (I_{0calc}), para os solos e água, nos diversos tratamentos utilizados.

Tratamento	Solo		Água	
	I_{0calc}	I_{0med}	I_{0calc}	I_{0med}
T1	98,1	100,0	94,2	100,0
T2	97,5	100,0	94,4	100,0
T3	98,9	100,0	97,7	100,0
T4	97,0	100,0	98,0	100,0
T5	96,6	100,0	101,2	100,0
T6	96,5	100,0	102,3	100,0

7. CONCLUSÕES

Da discussão dos resultados permite-se concluir que:

- 1) Através do teste "t" tem-se que os coeficientes de atenuação de massa obtidos para os diversos solos não diferem estatisticamente para um mesmo tratamento,
- 2) os coeficientes de atenuação de massa dos solos não diferem estatisticamente para os diversos tratamentos. O mesmo ocorre com o coeficiente de atenuação de massa da água,
- 3) é desnecessária a utilização da lâmina de Pb com o objetivo de se eliminar os raios-X de 32 keV do feixe de raios gama de 0,662 MeV provenientes do Ba-137m,
- 4) também é desnecessária a utilização da lâmina de Pb com o objetivo de se evitar a correção do tempo morto, pois mesmo para altas taxas de contagem (350.000 cpm) não foi necessária esta correção e
- 5) na determinação da umidade e densidade do solo pode-se

utilizar um sistema de contagem integral, menos sofisticado e de custo mais baixo, em substituição ao espectrômetro gama monocanal.

8. LITERATURA CITADA

BAVEL, C.H.M. van, 1959. Soil densitometry by gamma-ray transmission. *Soil Sci.*, New Brunswick, 87: 50-58.

BAVEL, C.H.M. van, 1960. Soil density measurement with gamma radiation. In: International Congress of Soil Science, 7º, Ariz., 1960. *Anais*, Ariz., p. 284-289.

BERNARD, R.K. e M. CHASEK, 1955. Soil density determination by direct transmission of gamma ray. ASTM Philadelphia, Pa. Preprint Nº 86.

BERRY, P.F., 1961. Gamma-ray attenuation coefficients. *Nucleonics*, New York, 19: 62.

COPPOLA, M. e P. REININGER, 1974. Influence of the chemical composition on the gamma-ray attenuation by soils. *Soil Sci.*, Baltimore, 117(6): 331-335.

COREY, J.C.; S.F. PETERSON e M.A. WAKAT, 1971. Measurement of attenuation of ^{137}Cs and ^{241}Am gamma-rays for soil density and water content determinations. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Madison, 35: 215-219.

DAVIDSON, J.M.; J.W. BIGGAR e D.R. NIELSEN, 1963. Gamma radiation attenuation for measuring bulk density and transient water flow in porous materials. *J. Geophys. Res.*, Washington, 68(16): 477-483.

DAVISSON, C.M., 1955. γ -ray absorption coefficients: In: SIEGBAHN., ed. *Beta and gamma ray spectroscopy*. Amsterdam, cap. 11, p. 858-873.

FERGUSON, H. e W. H. GARDNER, 1962. Water content measurement in soil columns by gamma ray absorption. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Madison, 26: 11-14.

FERRAZ, E.S.B., 1974. Determinação simultânea de densidade e umidade de solos por atenuação de raios gama do ^{137}Cs e ^{241}Am . Piracicaba, ESALQ/USP, 120 p. (Tese de Livre Docência).

FERRAZ, E.S.B.; M.L. ALMEIDA e I.A. GUERRINI, 1974. Uso de uma fonte de radiação gama de 60 keV para determinação de umidade e densidade de solos. In: Reunião da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, 26a., Recife, p. 569-570 (Resumo).

FERRAZ, E.S.B., 1976. A sensibilidade do método 2γ de medida simultânea de densidade e umidade de solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊN- CIA DO SOLO, 15º, Campinas, 1976. *Anais*, Campinas, p. 43-49.

FERRAZ, E.S.B. e R.S. MANSELL, 1976. Gamma-ray attenuation methods for determining water content and bulk density of soil. CENA-PLANFAP, Piracicaba, 69 p.

FERRAZ, E.S.B. e F.A. PINTO, 1977. Determinação de variação de umidade

do solo "in situ" por atenuação gama. *Científica*, Jaboticabal, (Nº Especial): 49-52.

FRITTON, D.D., 1969. Resolving time, mass absorption coefficient and water content with gamma-ray attenuation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Madison, 33: 651-654.

GARDNER, W.H. e C. CALISSENDORFF, 1967. Gamma-ray and neutron attenuation in measurement of soil bulk density and water content. In: Symposium on the soil Physics and Irrigation Studies, Istambul, 1967. *Annals*, Vienna, IAEA, p. 101-113.

GOPAL, S. e B. SANJEVAIAH, 1973. A method to determine the γ -ray attenuation coefficients. *Nucl. Instrum. Meth.*, Amsterdam, 107: 221-225.

GROENEVELT, P.H.; J.G. de SWART e J. CISLER, 1969. Water content measurement with 60 keV gamma ray attenuation. *Bull. int. Ass. scient. Hydral.*, London, 14(2): 67-77.

GURR, C.G., 1962. Use of gamma rays in measurement water content and permeability in insaturated columns of soil. *Soil Sci.*, New Brunswick, 94: 224-229.

GYURCSAK, J.; R. KRASOWSKI; A. KREFT e J. WOZNIK, 1976. Two-detector gauges for measuring soil density and water content. INT-97/1, (s.l.) 9-29. (apud ATOMINDEX, 1977, Vienna, 8(8): 2198).

HEATH, 1962. Scintillation spectrometry gamma-ray spectrum. Catalogue, Idaho Falls, Philips Petroleum Company, Atomic Energy Division, IDO-16408.

- HERKELRATH, W.N. e E.E. MILLER, 1976. High performance gamma system for soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 40: 331-332.
- KANE, P.P.; G. BASAVARAJU e K. M. VARIER, 1977. Gamma ray attenuation measurements. *Nucl. Instrum. Meth.*, Amsterdam, 147(3): 507-511 (apud ATOMINDEX, 1978, Vienna, 9(9): 2318).
- KAPLAN, I. *Física Nuclear*, Rio de Janeiro, Guanabara Dois. 633 p.
- KING, L.G., 1967. Gamma ray attenuation for soil-water-content measurements using ^{241}Am . In: Symposium on the use of isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies. Istanbul, 1967, *Anais*, Vienna, IAEA, p. 17-29.
- KIRKMAN, D. e J.C. COREY, 1973. Recent progress in the design of radiation equipment and its practical implication. In: Soil-moisture and irrigation studies II, Vienna, 1973. *Anais*, Vienna, IAEA, p. 17-39.
- LEDERER, C.M.; J.M.H. HOLLANDER e I. PERLMAN, 1967. Table of isotopes. 6a. ed. New York, John Wiley, 594 p.
- NASCIMENTO Fº, V.F., 1977. Características dos principais radioisótopos utilizados em ciências biológicas. BT-009, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, USP/CNEN, 8 p. Piracicaba (SP).
- OLESEN, D.E., 1973. Gamma radiation for measuring water contents in soil columns with changing bulk density. *J. Soil Sci.*, Oxford, 24(24): 461-469.
- PRICE, W.J., 1958. Scintillations detectors. In: *Nuclear Radiation*

- Detection*. New York, Mac Graw-Hill, 1958. p. 189-193.
- REGINATO, R.J., 1974 a. Gamma radiation measurement of bulk density changes in soil pedon following irrigation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Madison, 38: 24-28.
- REGINATO, R.J., 1974 b. Count-rate instability in gamma-ray transmission equipment. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Madison, 38: 156-157.
- REGINATO, R.J. e K. STOUT, 1970. Temperature stabilization of gamma ray transmission equipment. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Madison, 152-153.
- REGINATO, R.J. e C.H.M. van BAVEL, 1964. Soil water measurement with gamma attenuation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Madison, 28: 721-724.
- REICHARDT, K., 1960. Determinação da densidade de solos. *O Solo*, Piracicaba, 52(1): 3-8.
- REICHARDT, K., 1965 a. Uso da radiação gama na determinação da densidade e umidade do solo. Piracicaba, ESALQ/USP, 34 p. (Tese de Doutorado).
- REICHARDT, K., 1965 b. Uso da radiação gama na determinação da densidade aparente e da umidade do solo. Piracicaba, ESALQ/USP, 9 p. (mimeografado).
- ROSE, R.G., 1964. Gamma-ray attenuation coefficients. *Nucleonics*, New York, 22(8): 126-127.

- SANTO, L.T. e G.Y. TSUJI, (s.d.). Soil bulk density and water content measurements by gamma ray attenuation techniques. *Technical Bulletin*, Nº 98. Hawaii Agricultural Experiment Station, Hawaii, p. 1-17.
- SAXENA, G.S.; R.E. FRANKLIN e G.S. TAYLOR, 1970. Importance of pulse-height analysis in the gamma ray attenuation technique for measurement of soil moisture. *Soil Sci.*, New Brunswick, 110(4): 283-286.
- SING, B.P. e S. CHANDRA, 1976. Evaluation of the optimal thickness of soil between source and detector in the gamma-ray transmission method. *J. Hydrol.*, Amsterdam, 32: 189-191.
- SOANE, B.D., 1967. Dual energy gamma-ray transmission for coincident measurement of water content and dry bulk density in soil. *Nature*, London, 214: 1273-1274.
- STEEL, R.W. e K.L. TORRIE, 1960. *Principle and Procedures of Statistics*. New York, Mac-Graw Hill Book Company. 481 p.
- SWART, J.G. de e P.H. GROENEVELT, 1971. Column scanning with 60 keV gamma radiation. *Soil Sci.*, New Brunswick, 112(6): 419-424.
- VACHAUD, G.; J. CISLER; J.L. THONY e L. de BACKER, 1970. Utilisation de l'emission gama de l'americium-241 pour la mesure de la teneur en eau d'echantillons de sols non satures. In: Symposium on Use of Isotope in Hydrology, Vienna, 1970. *Annals*, Vienna, IAEA, p. 1-30.
- VOMOCIL, J.A., 1954. In situ measurement of soil bulk density. *Soil Sci.*, New Brunswick, 77: 341-342.

WACK, B., 1967. Mesure de la densité et de l'humidité des sols par transmission de rayonnement. Application au contrôle du compactage. *Anais*, Istanbul, n° 23, 595-601, 1967.

APÊNDICE 1

Valores médios da taxa de contagem (cpm) do feixe emergente e incidente e da densidade superficial (g/cm^2) para as diferentes amostras de solo, nos diferentes tratamentos.

Solo	$\bar{x}(\text{g/cm}^2)$	Tratamentos					
		T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
PVA	3,6947	100512	148798	173885	253870	111761	161557
	4,8976	95048	139877	164998	241353	106247	152926
	6,4741	77192	114399	134972	197791	86445	125693
	8,3613	71079	104749	123939	181913	76232	115337
	8,8124	66234	97577	118313	171550	74052	108301
	10,1579	62183	91496	108734	159186	69207	101036
PM	4,4370	94469	139945	165394	243028	105824	152234
	5,7376	89105	131248	154729	226813	99338	143343
	7,6824	72204	106378	126020	182997	79579	115428
	9,4971	65551	96724	114544	167030	73509	106530
	9,6904	61619	90960	107739	157219	68564	100176
	11,8002	55412	81563	97283	141792	62213	90511
LVE	4,0984	97803	143863	169379	246222	108144	156842
	5,2653	91744	135199	159978	233908	102662	148998
	7,3481	74604	110205	130619	190121	82090	119493
	8,8539	69107	101514	120235	177388	76888	112294
	8,9770	64420	95098	113389	164272	71665	105043
	11,0283	58966	86441	102729	150450	65415	95628

(continua)

Apêndice 1 - continuação

Solo	$\bar{x}(\text{g/cm}^2)$	Tratamentos					
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
TRE	3,9077	99345	145680	171608	252809	111442	159659
	4,9972	93592	137619	162654	238280	105270	150919
	6,8734	78574	115258	135376	197992	86825	125792
	7,8953	74335	109269	129461	189160	83633	120397
	8,4167	69429	100647	118864	174208	76604	110760
	9,7678	64160	94773	114778	163487	72003	104116
LR	3,9006	99912	145843	172378	252864	111046	159530
	4,9213	94669	139430	164190	240929	106457	152478
	6,7084	78920	114418	135929	198889	87083	125773
	8,1284	72621	106795	126593	184794	80627	117823
	8,4109	69692	99616	117260	173121	74264	109967
	9,7095	64526	94888	112329	164282	70826	104883
R	4,4710	96114	140425	166196	243578	105338	154001
	5,8360	88330	129800	153666	324452	97066	142112
	7,9596	71670	105771	124749	181992	80327	115831
	9,2302	67327	98768	117560	171621	75528	109001
	9,5806	63378	92738	110293	160512	70049	101084
	11,4543	56654	83263	99252	144858	63805	92470

(continua)

Apêndice 1 - continuação

Solo	$\bar{x}(\text{g/cm}^2)$	Tratamentos					
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
TRE-1	3,6753	101970	148042	175083	255719	111782	162215
	4,7626	96008	141475	166764	244990	107307	155324
	6,2956	80707	118614	139640	204017	89013	128409
	7,7103	74566	109948	129866	190356	83358	120427
	7,7846	72572	105548	125895	183912	79230	115878
	9,3286	66217	97282	115397	168771	73598	107092
TRE-2	3,6454	102319	148587	179125	255972	112776	162086
	4,6764	96480	141466	170784	245334	108283	155314
	6,4687	79776	116160	140887	199532	88343	127479
	7,5762	76082	111788	135156	192879	85276	122686
	8,0434	71260	104102	125295	178705	78608	111381
	9,4392	65722	96697	117722	167130	73688	106014
TRE-3	3,6721	101866	149152	181171	257695	113883	162789
	4,6460	96129	141377	172005	245057	108504	155203
	6,2920	81691	117787	144857	205550	89583	128319
	7,4843	76126	111752	136368	194274	85615	123300
	7,6997	73439	106501	130296	184185	80263	115380
	8,7579	68885	100888	123615	175294	77160	111639

(continua)

Apêndice 1 - continuação

Solo	$\bar{x}(\text{g/cm}^2)$	Tratamentos					
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
TRE-4	3,4881	103164	150287	184067	259800	114386	163843
	4,5839	97022	142137	174304	247220	109193	156127
	6,0091	83332	119876	149011	209787	92125	132441
	7,1681	78496	114788	141639	200180	88504	126826
	7,5495	74579	107917	132221	186820	81928	117080
	8,8343	68931	100916	124540	175749	77488	111075
	l _o solo	138078	203262	238921	351890	155946	22890
	l _o água	138058	203291	239305	351860	151929	218938

APÊNDICE 2

Contrastes entre os valores dos coeficientes de atenuação de massa dos diferentes solos para o tratamento 1

	PVA	PM	LVE	TRE	LR	R	TRE - 1	TRE - 2	TRE - 3	TRE - 4
PVA	-	-0,1759	-0,0966	-0,0440	0,0717	0,0581	0,2263	0,1683	0,2325	0,0352
PM	-	-	0,0810	0,1696	0,2983	0,2914	0,4543	0,3967	0,4769	0,2432
LVE	-	-	-	0,0719	0,1968	0,1861	0,3548	0,2960	0,3711	0,1499
TRE	-	-	-	-	0,1783	0,1498	0,3857	0,3093	0,4627	0,1200
LR	-	-	-	-	-	-0,0230	0,2229	0,1412	0,2586	-0,0485
R	-	-	-	-	-	-	-0,2423	0,1616	0,2711	-0,0254
TRE-1	-	-	-	-	-	-	-	-0,0822	-0,0045	-0,2559
TRE-2	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0898	-0,1795
TRE-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,3012
TRE-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

APÊNDICE 3

Contrastes entre os valores dos coeficientes de atenuação de massa dos diferentes solos para o tratamento 2

	PVA	PM	LVE	TRE	LR	R	TRE - 1	TRE - 2	TRE - 3	TRE - 4
PVA	-	-0,2124	-0,1392	-0,1384	0,0701	-0,0949	0,0235	-0,0843	0,2341	-0,0568
PM	-	-	0,0763	0,0844	0,2860	0,1562	0,2413	0,1285	0,4715	0,1472
LVE	-	-	-	0,0054	0,2134	0,0681	0,1679	0,0544	0,3976	0,0769
TRE	-	-	-	-	0,2199	0,0680	0,1759	0,0531	0,4348	0,0783
LR	-	-	-	-	-	-0,1821	-0,0488	-0,1589	0,1656	-0,1282
R	-	-	-	-	-	-	0,1307	-0,0038	0,4084	0,0261
TRE-1	-	-	-	-	-	-	-	-0,1141	0,2271	-0,0846
TRE-2	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3477	0,0253
TRE-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,3092
TRE-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

APÊNDICE 4

Contrastes entre os valores dos coeficientes de atenuação de massa dos diferentes solos para o tratamento 3

	PVA	PM	LVE	TRE	LR	R	TRE - 1	TRE - 2	TRE - 3	TRE - 4
PVA	-	0,0907	0,1476	-0,1103	0,4611	0,2499	0,3318	0,2214	0,5061	0,2479
PM	-	-	0,0592	-0,2039	0,3994	0,1607	0,2586	0,1434	0,4395	0,1715
LVE	-	-	-	-0,2621	0,3534	0,0993	0,2093	0,0908	0,3986	0,1213
TRE	-	-	-	-	0,5584	0,3733	0,4412	0,3295	0,6234	0,3578
LR	-	-	-	-	-	-0,2950	-0,1487	-0,2506	0,0095	-0,2224
R	-	-	-	-	-	-	0,1360	0,0067	0,3482	0,0409
TRE-1	-	-	-	-	-	-	-	-0,1111	0,1796	-0,0822
TRE-2	-	-	-	-	-	-	-	-	0,2905	0,0294
TRE-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,2664
TRE-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

APÊNDICE 5

Contrastes entre os valores dos coeficientes de atenuação de massa dos diferentes solos para o tratamento 4

	PVA	PM	LVE	TRE	LR	R	TRE - 1	TRE - 2	TRE - 3	TRE - 4
PVA	-	0,2131	0,0246	0,4164	0,4895	0,3220	0,3222	0,3619	0,5799	0,2613
PM	-	-	-0,1850	0,1980	0,2870	0,0875	0,1844	0,1688	0,3771	0,0623
LVE	-	-	-	0,3787	0,4539	0,2865	0,2908	0,3315	0,5380	0,2310
TRE	-	-	-	-	0,1091	-0,1367	-0,0644	-0,0076	0,2198	-0,1276
LR	-	-	-	-	-	-0,2402	-0,1581	-0,1017	0,0971	-0,2153
R	-	-	-	-	-	-	0,0542	0,1085	0,3556	-0,0123
TRE-1	-	-	-	-	-	-	-	0,0490	0,2565	-0,0571
TRE-2	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1928	-0,1031
TRE-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,3168
TRE-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

APÊNDICE 6

Contrastes entre os valores dos coeficientes de atenuação de massa dos diferentes solos para o tratamento 5

	PVA	PM	LVE	TRE	LR	R	TRE - 1	TRE - 2	TRE - 3	TRE - 4
PVA	-	-0,4626	-0,3340	-0,1693	0,3779	0,7385	-0,1107	-0,1922	0,1637	-0,2726
PM	-	-	0,1267	0,3167	0,8291	-0,1934	0,3276	0,2613	0,5934	0,1616
LVE	-	-	-	0,1847	0,7042	-0,3196	0,2080	0,1376	0,4773	0,0438
TRE	-	-	-	-	0,5783	0,6191	0,0454	-0,0379	0,8483	-0,1343
LR	-	-	-	-	-	-1,1885	-0,4765	-0,5697	-0,2011	-0,6379
R	-	-	-	-	-	-	0,5845	0,5149	0,9209	0,3880
TRE-1	-	-	-	-	-	-	-	0,0757	0,2691	-0,1600
TRE-2	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3537	-0,0897
TRE-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,4308
TRE-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

APÊNDICE 7

Contrastes entre os valores dos coeficientes de atenuação de massa dos diferentes solos para o tratamento 6

PVA	PM	LVE	TRE	LR	R	TRE - 1	TRE - 2	TRE - 3	TRE - 4
PVA	-	-0,1887	0,1514	0,1667	0,1184	0,2812	0,3567	0,3915	0,1940
PM	-	0,1668	0,3465	0,3478	0,3238	0,4521	0,5260	0,5513	0,3625
LVE	-	-	0,1643	0,1790	0,1342	0,2894	0,3637	0,3952	0,2040
TRE	-	-	-	0,0310	-0,0406	0,1623	0,2438	0,2897	0,0698
LR	-	-	-	-	-0,0678	0,1207	0,1974	0,2378	0,0363
R	-	-	-	-	-	0,1987	0,2822	0,3244	0,1044
TRE-1	-	-	-	-	-	-	0,0762	0,1172	-0,0803
TRE-2	-	-	-	-	-	-	-	0,0414	-0,1539
TRE-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,1943
TRE-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Os coeficientes de atenuação de massa dos solos estudados não diferem estatisticamente ao nível de 1% para o mesmo tratamento.

APÊNDICE 8

Contrastes obtidos entre os valores dos coeficientes de atenuação de massa geral (10 solos), para os diversos solos.

	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
T_1	-	-0,0158	-0,1109	-0,2849	0,1397	-0,5712
T_2	-	-	-0,1271	-0,3668	0,2040	-0,7428
T_3	-	-	-	-0,2151	0,3083	-0,5722
T_4	-	-	-	-	0,5364	-0,3848
T_5	-	-	-	-	-	-0,8780
T_6	-	-	-	-	-	-

Os coeficientes de atenuação de massa geral do solo não diferem estatisticamente ao nível de 1% para os diferentes tratamentos.

APÊNDICE 9

Contrastes entre os coeficientes de atenuação de massa da água para os 6 tratamentos.

	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
T ₁	-	0,0995	-0,4639	-0,2454	-0,1474	-0,1784
T ₂	-	-	-0,5393	-0,3246	-0,2326	-0,2656
T ₃	-	-	-	0,1751	0,2828	0,2715
T ₄	-	-	-	-	0,0953	0,0773
T ₅	-	-	-	-	-	-0,0222
T ₆	-	-	-	-	-	-

O coeficiente de atenuação de massa da água não difere estatisticamente ao nível de 1% para os diferentes solos.