

BR9532977

INIS-BR--3483

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE
FOTODIODOS NA DETERMINAÇÃO DE
UMIDADE DE SOLOS POR TRANSMISSÃO GAMA**

LUIZ ANTONIO PEREIRA DOS SANTOS

Dissertação apresentada ao Departamento de
Energia Nuclear da Universidade Federal de
Pernambuco, para a obtenção do Título de Mestre
em Ciência e Tecnologia Nuclear.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: APLICAÇÃO DE RADIOISÓTOPOS


ORIENTADOR: HELEN JAMIL KHOURY

CO-ORIENTADOR: CLEMENTE JOSÉ GUSMÃO CARNEIRO DA SILVA

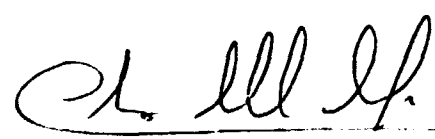
RECIFE - PE

AGOSTO - 1992


Dissertação apresentada ao Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, fazendo parte da Comissão Examinadora os seguintes professores:



JOSE JÚLIO VILAR RODRIGUES - PhD
Departamento de Agronomia - UFRPE



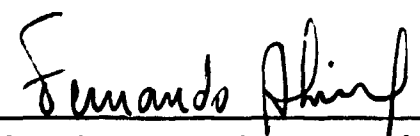
CLOVIS ABRAHÃO HAZIN - PhD
Departamento de Energia Nuclear - UFPE



IGNÁCIO HERNAN SALCEDO - PhD
Departamento de Energia Nuclear - UFPE

Visto e permitida a impressão

Recife, 26 de agosto de 1992



Coordenador do Curso de Mestrado em Ciência e Tecnologia Nucleares do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco.

AGRADECIMENTOS

Expresso a todos os funcionários, técnicos, colegas e professores que contribuíram direta ou indiretamente para realização deste trabalho os meus sinceros agradecimentos e, em especial:

Aos Professores Helen Jamil Khoury e Clemente José Gusmão Carneiro da Silva por suas fundamentais orientações.

Ao Prof. Attilio Dall'Olio por sua incansável disponibilidade e suas sugestões.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

A Maurício Rodrigues, José Ailton e José Alves do Departamento de Energia Nuclear da UFPE e, Anacleto José da Fonseca Jr. do laboratório de Física de Solos da UFRPE por vosso apoio técnico.

Aos meus pais por vossa inesgotável assistência.

À minha esposa pelo seu companheirismo.

Aos meus filhos: MELLYNA, JOSEZINHO e LUAN

À minha esposa, ANDREA

Aos meus Pais

RESUMO

Este estudo foi realizado para verificar a viabilidade do uso de fotodiodos, como detector de radiação gama do ^{241}Am (Energia 60keV), para medir a umidade de solos. Para tanto, foram utilizados fotodiodos com características elétricas e mecânicas distintas, bem como, solos com textura e características diferentes. A boa correlação linear obtida entre o logaritmo do fator de atenuação e o teor de água no solo demonstraram a viabilidade da utilização de fotodiodos e que a sua baixa eficiência de fotopico não é um fator limitante para medir a umidade. Além disso, a estabilidade, a portabilidade e a economia proporcionadas por estes dispositivos semicondutores e sistema eletrônico associado, são características importantes que podem viabilizar a construção de um equipamento de gamametria para ser utilizado em condições de campo.

ABSTRACT

This study was done to verify the viability of photodiodes, as gamma radiation detector (^{241}Am - Energy=60keV), to measure soil water content. The photodiodes used had different mechanical and electrical characteristics, and were tested on soils of different textures. A good linear correlation between the logarithm of the attenuation factor and soil-moisture demonstrated such viability, and that the low photopeak efficiency of these devices is not a limitation to the measurement of soil water content. Furthermore, the stability, the portability, and low cost of such semiconductor devices, including its electronic system, represent relevant characteristics that may justify the development of a reliable gammameter system for field studies.

ÍNDICE

CAPÍTULO	Página
I - INTRODUÇÃO	1
II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 - MÉTODOS DIRETOS DE MEDIDA UMIDADE EM SOLOS	3
2.2 - MÉTODOS INDIRETOS DE MEDIDA UMIDADE EM SOLOS	5
2.2.1 - MÉTODOS NÃO NUCLEARES	5
2.2.2 - MÉTODOS NUCLEARES	7
2.3 - SISTEMA DE DETECÇÃO	12
III - FUNDAMENTOS TEÓRICOS	16
3.1 - MÉTODO DA TRANSMISSÃO GAMA	16
IV - MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1 - CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS ESTUDADOS	22
4.2 - ARRANJO EXPERIMENTAL DO SISTEMA DE DETECÇÃO	23
4.3 - ESPECTRO DA RADIAÇÃO GAMA DO ^{241}Am COM FOTODIODO ..	24
4.4 - REPRODUTIBILIDADE E ESTABILIDADE	25
4.5 - EFEITO DA GEOMETRIA FONTE-DETECTOR SOBRE μ_w E μ_s ..	25
4.6 - CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO GAMA	26
V - RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
5.1 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS SOLO	28
5.2 - ESPECTRO DA RADIAÇÃO DO ^{241}Am	28
5.3 - REPRODUTIBILIDADE E ESTABILIDADE	30
5.4 - EFEITO DA GEOMETRIA FONTE-DETECTOR SOBRE μ_w E μ_s ..	33
5.5 - CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO GAMA	36
VI - CONCLUSÕES	42

BIBLIOGRAFIA	43
APÊNDICE 1	48
APÊNDICE 2	52
ANEXO 1	54
ANEXO 2	55
ANEXO 3	57
ANEXO 4	58
ANEXO 5	60

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Apesar da importância de se conhecer a disponibilidade de água para as plantas, são poucas as técnicas que permitem uma medida pontual, não-destrutiva e em condições de campo da umidade em solos. Entre essas técnicas pode-se citar as que se baseiam: i) no equilíbrio de potenciais da água no solo e em um material poroso que é utilizado como sensor da umidade; ii) na medida da constante dielétrica do solo que é uma função da umidade do solo ou iii) na atenuação da radiação gama a qual depende principalmente do teor de água no solo. Para aplicação dessa última técnica utilizam-se, normalmente, como detectores cristais cintiladores de NaI(Tl) com fotomultiplicadoras.

Com o avanço dos dispositivos semicondutores a partir da década de 60, abriu-se um novo campo de aplicação em detecção e espectrometria de radiações ionizantes. Inicialmente os detectores semicondutores eram utilizados apenas na detecção de partículas carregadas. Porém, diante das vantagens que apresentam em relação aos detectores gasosos e aos cintiladores, ampliou-se o seu uso para radiação gama e X. O princípio de funcionamento destes detectores baseia-se no fato de que seu volume sensível corresponde à região de depleção formada pela junção de um semicondutor tipo N com um do tipo P, dispositivo este conhecido como diodo

semicondutor. A radiação ionizante, ao incidir no volume sensível, produz pares de íons que são coletados pela ação do campo elétrico geralmente aplicado nos terminais do detector. Dentre os dispositivos semicondutores, os fotodiodos vêm sendo estudados visando a sua utilização como detector de radiação ionizante. Devido às suas pequenas dimensões, a eficiência de fotopico na detecção de radiação gama é inferior à eficiência dos cintiladores de NaI(Tl). Entretanto, isto pode tornar-se pouco importante em face das vantagens advindas destas dimensões, que podem permitir o uso do fotodiodo em sistemas portáteis e econômicos de gamametria. Neste trabalho, pretende-se estudar a viabilidade da utilização de fotodiodos na detecção de um feixe de radiação gama de baixa energia, visando seu emprego para o estudo do teor de umidade de solos em laboratório.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A quantidade de água que se encontra retida, através de forças capilares e de adsorção, nos poros do solo em torno da zona das raízes, pode ser considerada como a fonte direta de água que supre as necessidades das plantas. Essa quantidade de água, em qualquer instante do ciclo de uma cultura, pode ser obtida através de medidas pontuais da umidade do solo ao longo do seu perfil. A determinação experimental desta umidade pode ser feita por métodos diretos ou indiretos como descrito por Gardner [1] e Schmutge et alii [2].

2.1 MÉTODOS DIRETOS DE MEDIDA DE UMIDADE EM SOLOS

A principal técnica para medir o teor de água no solo, a qual é o padrão para calibração de todas as outras técnicas de determinação de umidade em solos, é a técnica gravimétrica. Neste método, inicialmente, determina-se a massa de solo úmido M_u numa balança analítica e, em seguida, coloca-se o solo na estufa a 105°C para ir secando até que se obtenha uma massa constante [2,3]. Assim, obtém-se a massa de água M_a pela diferença entre a massa de solo úmido M_u e a massa de solo seco M_s . A relação entre a massa de água e a massa de solo seco em estufa a 105°C é chamada de umidade

mássica ou umidade na base de peso. Em se tratando da relação entre volume de água e volume de solo seco, chama-se de umidade volumétrica ou umidade na base de volume. A partir destas definições pode-se estabelecer as fórmulas associadas às umidades mássica θ_m e volumétrica θ :

$$\theta_m = \frac{M_v}{M_s} \quad (\text{g/g}) \quad (1)$$

$$\theta = \frac{V_v}{V_s} \quad (\text{cm}^3/\text{cm}^3) \quad (2)$$

A conversão de uma base para outra é obtida dividindo-se a equação (2) pela equação (1):

$$\theta = \frac{\rho_g}{\rho_v} \theta_m \quad (3)$$

onde $\rho_v = M_v/V_v$ é a densidade da água e $\rho_g = M_s/V_s$ é a densidade global (ou densidade aparente) do solo seco.

Uma variante da técnica gravimétrica acima é aquela que utiliza o calor gerado na combustão de álcool embebido no solo para extrair a água retida no mesmo. Embora esta técnica permita

determinar a umidade do solo em um curto espaço de tempo, Bouyoucos [4] mostrou que sua precisão é fortemente afetada com o aumento da quantidade de matéria orgânica no solo, principalmente quando esta quantidade for maior que 11%.

As principais vantagens dos métodos diretos são a amostragem através de trados, acarretando um baixo custo na obtenção da mesma e, a facilidade do cálculo do teor de umidade que é obtido por expressões simples. As principais desvantagens destes métodos são a impossibilidade de realizar amostragens ao longo do tempo, por tratar-se de uma técnica destrutiva e, principalmente, a dificuldade no manuseio da amostra.

2.2 MÉTODOS INDIRETOS DE MEDIDA DE UMIDADE EM SOLOS

A determinação por métodos indiretos é feita através da medida de alguma propriedade física ou físico-química que varie com a umidade do solo. Os métodos indiretos podem ser subdivididos, de uma maneira simplificada, em dois grupos: i) métodos não nucleares (técnica tensiométrica, técnicas eletromagnéticas, etc.); ii) métodos nucleares (taxa de moderação de nêutrons e transmissão gama).

2.2.1 MÉTODOS NÃO NUCLEARES

Estes métodos podem ser subdivididos em duas classes:

- a) aqueles que usam um sensor poroso (cápsula porosa, bloco de gesso, etc.) e que se baseiam no equilíbrio de potenciais entre a água no sensor e no meio poroso circundante;
- b) aqueles que se

baseiam na medida de uma propriedade física do solo (constante dielétrica, resistividade, etc.) que é afetada pelo teor de água.

A técnica tensiométrica desenvolvida inicialmente por Richards & Gardner [5], consiste na inserção de uma cápsula porosa no solo, acoplada a um manômetro de mercúrio. Mede-se o potencial matricial, através da altura da coluna de Hg, quando for estabelecido o equilíbrio entre o potencial de pressão da água na cápsula e o potencial mátrico do solo ao redor da cápsula. Hartmann [6] e Vieira & Castro [7], na determinação de curvas características de solos (relação entre o potencial matricial e a umidade do solo), concluíram que a técnica tensiométrica é prática e econômica. Bianchi [8], mostrou a vantagem de usar transdutores de pressão para produzir uma resposta rápida com um pequeno deslocamento de volume de água da cápsula para o solo ou vice-versa. Assim, com um tensiômetro e um transdutor de pressão, pode-se monitorar variações na infiltração, irrigação, recarga d'água e evapotranspiração praticamente em tempo real. Contudo este método apresenta como desvantagens: a fragilidade da cápsula porosa, a limitação da faixa de medição a qual é de 0 a -800mbar, além de requerer o conhecimento da curva característica do solo.

Uma outra técnica para medida de umidade é chamada de TDR (Time-Domain Reflectometry). Ela consiste em associar a constante dielétrica do solo com o teor de umidade. Topp et alii [9] mostraram que a constante dielétrica de vários tipos de solos varia fortemente com a umidade, varia pouco com a densidade, textura, salinidade e, não depende significativamente da temperatura.

Por outro lado, como outras características elétricas do solo sofrem variações quando o conteúdo de água no solo varia, eletrodos podem ser inseridos no solo para medir a capacitância ou

a resistividade, que são funções da sua umidade. A inserção de eletrodos diretamente no solo não é aconselhável por causa do considerável nível de incerteza no contato elétrico entre os eletrodos e o meio e, pela própria heterogeneidade do meio [1]. Assim, os eletrodos são inseridos em um bloco poroso (gesso ou outro material), para medir a capacitância ou a resistividade do bloco quando seu potencial entrar em equilíbrio com o potencial da água no solo [1,2,10]. A maior desvantagem dessa técnica decorre da necessidade de determinar duas curvas de calibração: uma para o bloco poroso e outra para o solo. Além disso, devido ao fenômeno de histerese inerente do solo, é necessário conhecer o seu histórico de molhamento, pois, caso contrário, o erro introduzido poderá ser maior que 20% como foi mostrado no trabalho de Taylor et alii [11].

2.2.2 MÉTODOS NUCLEARES

A técnica nuclear por moderação de nêutrons baseia-se na determinação da umidade a partir da interação de nêutrons com a água contida no solo. Através desta interação os nêutrons incidentes perdem energia transformando-se em nêutrons térmicos que são detectados por um detector de trifluoreto de boro (BF_3). O número de nêutrons detectados é diretamente proporcional à umidade do solo. Uma vantagem deste método é a possibilidade de se efetuar medidas no campo com sistemas portáteis chamados de sonda de nêutrons [12]. Por outro lado, como a medida é um valor médio de uma região esférica de solo, sua resolução fica praticamente comprometida para um raio de aproximadamente 20cm [1,10]. Assim, para medições próximas à superfície (que são importantes por causa

da alta atividade das raízes das plantas) deve-se utilizar uma sonda de nêutrons chamada de sonda de superfície. Outros fatores que afetam a precisão do método são a quantidade de matéria orgânica contida no solo e a presença de outros elementos químicos que influenciam a probabilidade de interação dos nêutrons, dificultando a obtenção das curvas de calibração [1].

A técnica nuclear por transmissão gama baseia-se na determinação do fator de atenuação que um feixe monoenergético de radiação gama sofre ao atravessar uma amostra de solo. A quantidade de interações da radiação com o sistema solo-água irá depender da espessura do solo, da sua densidade e da espessura de água. O aumento do teor de água no solo aumenta a espessura de água, diminuindo a quantidade de radiação que atravessa o meio. Pode-se, portanto, correlacionar a taxa de contagem de um medidor de radiação gama com o teor de umidade do solo por meio de uma curva de calibração. Os fatores predominantes na precisão e na resolução desse método dependem da geometria do arranjo experimental, da eficiência do sistema de detecção, e da atividade da fonte de radiação [1].

Para um feixe monoenergético, colimado, a equação da atenuação da radiação gama, para um meio homogêneo, é dada por:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (4)$$

onde I_0 é a intensidade do feixe incidente no meio, I é a intensidade atenuada emergente do meio, x é a espessura do meio e μ representa seu coeficiente de atenuação.

Desde a década de 50 a radiação gama tem sido utilizada no estudo das propriedades de diversos materiais, inclusive na determinação de densidade de solos [13]. Trabalhos realizados por Gurr [14] e Ferguson & Gardner [15], entre outros, mostraram a viabilidade de se utilizar este método para avaliação da umidade em solos. Singh & Kumar [16], através de um arranjo experimental utilizando detector cintilador a cristal NaI(Tl), realizaram um estudo em solos argilosos e arenosos com diferentes compactações e umidades. Neste trabalho, concluíram que o método da transmissão gama para o estudo das características do sistema solo-água é viável e preciso.

Durante muitos anos foi utilizado como fonte radioativa, no método da transmissão gama, o ^{137}Cs que emite fótons com 662keV de energia. Porém, trabalhos realizados por King [17] mostraram que o céσιο pode ser substituído pelo ^{241}Am o qual emite fótons com energia de aproximadamente 60keV. A vantagem de se utilizar o amerício é que, devido à baixa energia dos fótons emitidos, a probabilidade de interação da radiação é maior, acarretando uma melhor correlação entre o fator de atenuação e a umidade. Além disso, necessita-se de blindagem mais simples, embora, seja necessário o uso de um sistema eletrônico mais sensível, uma vez que a amplitude do sinal produzido é menor do que com o céσιο.

Para que se possa aplicar a equação (4) é necessário que o feixe seja bem colimado. Entretanto, experimentalmente, este fato acarreta uma dificuldade, uma vez que a taxa de contagem diminui causando um aumento na imprecisão das medidas. Por outro lado, no arranjo experimental em que o feixe é menos colimado, os fótons que sofreram espalhamento Compton ou espalhamento elástico (radiação

secundária I' , Figura 1) em pequenos ângulos podem atingir o detector, aumentando a medida da radiação detectada ($I+I'$), resultando em valores de μ menores que os teóricos [18]. A contribuição dos fótons devido ao espalhamento Compton pode ser

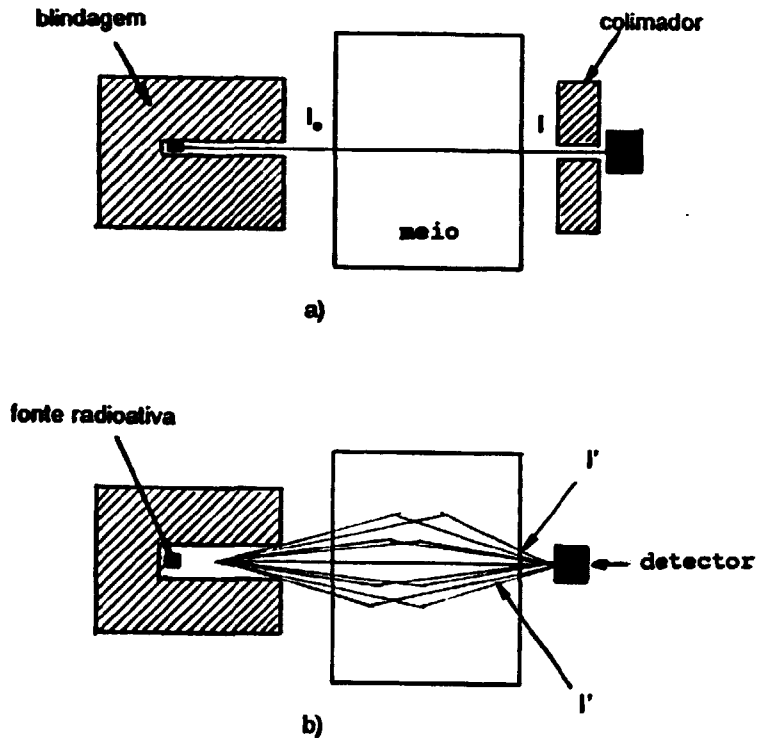


Figura 1. Esquema de um arranjo experimental com:
 a) feixe colimado. b) feixe não colimado.

eliminada efetuando-se apenas as contagens correspondentes ao fotopico, o que não elimina, contudo, a contagem de fótons que sofreram espalhamento coerente, uma vez que estes têm a mesma energia dos fótons incidentes. Este tipo de espalhamento, também chamado de espalhamento Rayleigh, depende do número atômico do meio e da energia da radiação incidente, sendo significativo para

materiais de baixo Z e para fótons de baixa energias [19]. Portanto, ao se utilizar uma geometria de feixe largo, obtém-se um coeficiente de atenuação efetivo denominado μ' menor do que μ . A Figura 2 mostra curvas de atenuação na água, obtidas por Van Dilla [20], da radiação gama do ^{203}Hg (279keV), para geometrias de feixe colimado e sem colimação.

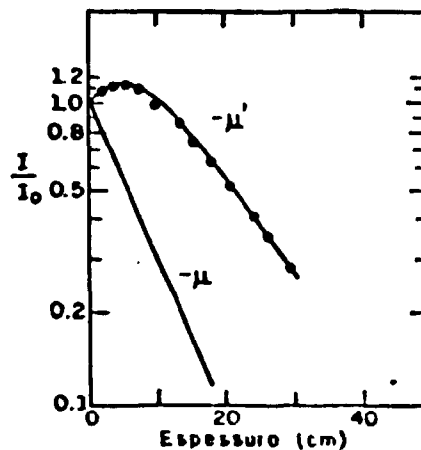


Figura 2. Curvas do coeficiente de atenuação para água [20] com geometrias: feixe não colimado ($-\mu'$); feixe bem colimado ($-\mu$).

Pode-se observar através desse gráfico a influência da radiação espalhada na determinação do coeficiente de atenuação.

Como o solo é composto de vários materiais e cada solo tem composições diferentes, o efeito do espalhamento Rayleigh dependerá de cada tipo de solo, já que este tipo de espalhamento depende do material.

2.3 SISTEMA DE DETECÇÃO

No método de transmissão gama geralmente utilizam-se os cintiladores sólidos de Iodeto de sódio ativado com tálio (NaI(Tl)), para detecção da radiação. O detector é acoplado a um sistema eletrônico composto de pré-amplificador, amplificador, discriminador e contador (Figura 3). A válvula fotomultiplicadora tem a função de converter os fótons produzidos no cintilador em

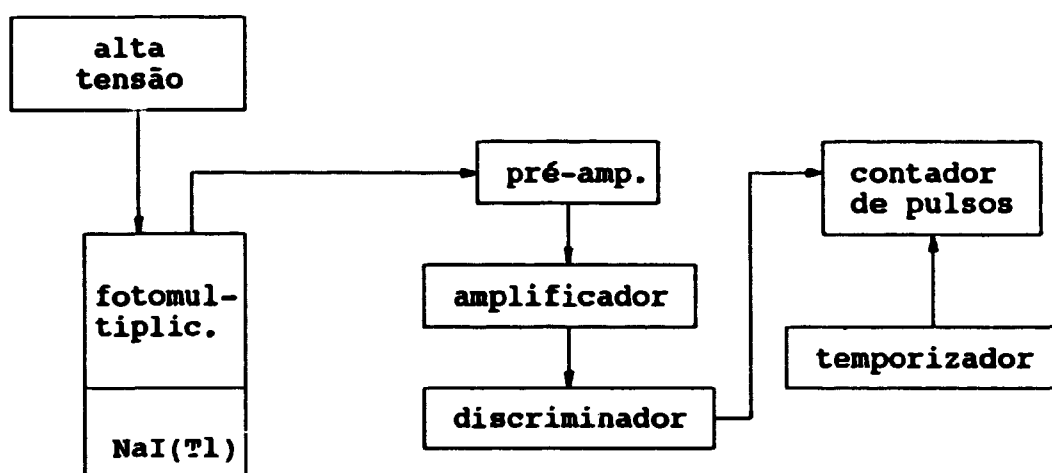


Figura 3. Diagrama de bloco de um sistema de detecção com cintilador de NaI(Tl) .

pulsos elétricos os quais são amplificados, discriminados e registrados no sistema eletrônico. Variações no ganho da fotomultiplicadora acarretam deslocamento do espectro de energia da radiação gama conforme trabalhos realizados por Kirkham & Corey [21], cujos resultados são apresentados na Figura 4. Estas flutuações são decorrentes de variações na temperatura e na diferença de potencial aplicada nos terminais da fotomultiplicadora.

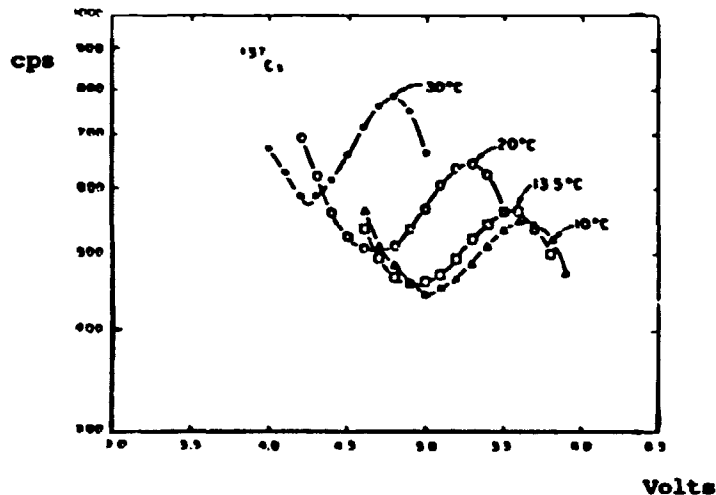


Figura 4. Espectro do ^{137}Cs obtido para diferentes temperaturas de operação da fotomultiplicadora [21].

A radiação gama pode, também, ser detectada por dispositivos semicondutores (diodos, fotodiodos, etc.), cujo princípio de funcionamento baseia-se na produção de pares de elétrons-lacunas, gerados pela interação da radiação com o semicondutor (Apêndice 1).

Estes detectores apresentam vantagens em relação aos cintiladores sólidos, uma vez que eles têm uma resolução em energia melhor. Isto ocorre porque a energia necessária para produzir um par de íons no semicondutor é da ordem de 3eV, enquanto que no cintilador sólido é da ordem de 100eV [22]. Portanto, com os semicondutores, o número de portadores de carga produzido pela radiação que interage é muito maior do que outros detectores, acarretando uma melhor resolução de fotopico.

Quando se deseja utilizar o semicondutor de junção como detector de radiação ionizante, uma polarização reversa é aplicada aos seus terminais de modo a garantir que os portadores de carga

sejam rapidamente coletados. De fato a barreira de potencial espontânea, formada na junção, que é da ordem de 1V, não é suficiente para fornecer um campo elétrico intenso de modo a evitar a perda de cargas por recombinação. Pares de elétrons-lacunas que são criados num fotodiodo, por causa da passagem de uma radiação nuclear, serão coletados pela ação do campo elétrico. O movimento desses portadores de carga constitui, basicamente, o sinal elétrico produzido pelo detector [22,23].

O aumento da tensão reversa aumenta o volume sensível do fotodiodo e conseqüentemente a taxa de contagem, ou seja, aumenta a eficiência de contagem. A tensão de polarização a partir da qual o detector praticamente não aumenta sua eficiência é chamada de tensão de saturação. Yabe et alii [24] mostraram que utilizando um semiconductor de silício de alta resistividade e à temperatura ambiente, pode-se obter um detector com resolução de 1,6keV para espectrometria de raios X e gama com energias menores que 150keV. Recentemente alguns autores têm efetuado estudos visando a possibilidade da utilização de fotodiodos PIN na detecção e espectroscopia de raios X e γ . Markevich et alii [25], utilizando um fotodiodo HAMAMATSU S1722-N, estudaram a variação da resolução do detector em função da temperatura. Para tanto, colocaram o detector acoplado ao pré-amplificador em câmara resfriada, variando a temperatura entre -40°C até $+30^{\circ}\text{C}$. Os resultados mostraram que a variação na resolução não é significativa. Bilton et alii [26] realizaram um estudo com fotodiodo HAMAMATSU S1723-03. Procurando avaliar a sua resposta para feixes de radiação de baixa energia, eles obtiveram variações na resolução de 10,3% para energia de 60keV do ^{241}Am e de 4% para energia de 122keV do ^{57}Co . Yamamoto et alii [27] também estudaram a resposta de fotodiodos comerciais de

silício para detecção de radiações de baixa energia. Eles obtiveram uma resolução em energia de 1,8keV para 60keV do ^{241}Am .

Com o uso intensivo do detector semiconductor alguns danos no retículo podem ocorrer devido ao efeito da radiação no cristal. A forma mais comum deste dano é o efeito Frenkel que corresponde ao deslocamento de átomos da estrutura cristalina. Estes átomos, ao ocuparem uma posição intersticial, constituem armadilhas para os elétrons. Quando um número suficiente destes defeitos for formado, haverá uma diminuição da resposta do detector e uma deteriorização da resolução de energia. A severidade do dano está relacionada com o tipo de radiação e sua energia, além da dose total absorvida. Este efeito é muito significativo para partículas pesadas, enquanto que para elétrons e radiação γ o dano é relativamente pequeno [23]. Wittenburg [28] utilizou um fotodiodo comercial para estudar os danos causados por radiação gama de 662keV. A partir de seus resultados verifica-se que a corrente de fuga do fotodiodo aumenta imediatamente após a irradiação e diminui em regime transitório para um nível pouco acima de antes da irradiação. Essa observação foi feita quando o semiconductor foi exposto a doses acima de 10^3Gy . Para doses inferiores a 10Gy os resultados não indicaram diferenças significativas na resposta do detector. Yamamoto et alii [27] também verificaram que o fotodiodo HAMAMATSU S1722-01 se mostrou estável quando exposto à radiação gama durante o experimento, que foi de 15 meses. Antonuk et alii [29] estudaram a resposta de um fotodiodo PIN de silício exposto à radiação gama do ^{60}Co com doses até 10^4Gy . Eles observaram que a resposta do fotodiodo permaneceu estável, sendo o detector aplicável para medidas de altas doses para este tipo de radiação.

CAPÍTULO III

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 MÉTODO DA TRANSMISSÃO GAMA

Este método baseia-se na atenuação que um feixe monoenergético de radiação gama (I_0) sofre ao atravessar um dado material. De fato, o feixe ao atravessar o meio sofre interações por efeito fotoelétrico, efeito Compton ou produção de pares, reduzindo a sua intensidade. A relação entre a intensidade do feixe atenuado (I) pelo material e o feixe incidente (I_0) resulta numa função exponencial (equação (4)), cujos parâmetros dependerão do tipo de material, de sua espessura e da energia da radiação [22]. O parâmetro μ da equação (4) representa o coeficiente de atenuação linear total que corresponde à soma dos coeficientes de atenuação dos três principais mecanismos de interação da radiação com o meio.

Como o coeficiente de atenuação linear varia com a densidade do material, geralmente prefere-se usar, em lugar do coeficiente linear, o coeficiente de atenuação mássico do material (μ_m), definido como:

$$\mu_m = \mu/\rho_m \quad (\text{cm}^2/\text{g}) \quad (5)$$

onde ρ_m representa a densidade do material. Desse modo, a equação (4) pode ser escrita como:

$$I = I_0 \exp(-\mu_m \rho_m x) \quad (6)$$

Para um composto ou mistura de elementos (solo, por exemplo), o coeficiente de atenuação mássico total é dado por:

$$\mu_m(\text{total}) = \sum_i p_i \mu_{m,i} \quad (7)$$

onde p_i representa a fração de peso do elemento i do composto e $\mu_{m,i}$ representa o coeficiente de atenuação mássico relativo ao elemento i [23].

Um arranjo experimental utilizado na determinação de umidade em solos por transmissão gama é mostrado na Figura 5. O feixe de fótons emitido pela fonte radioativa, após colimação, incide sobre a amostra de solo a ser analisada. O detector e a fonte são colimados para evitar a detecção de radiação secundária (espalhada). Assim, a radiação detectada deve ser aquela pertencente ao feixe primário que atravessará a amostra e, produzirá um sinal o qual será registrado no sistema eletrônico acoplado ao detector.

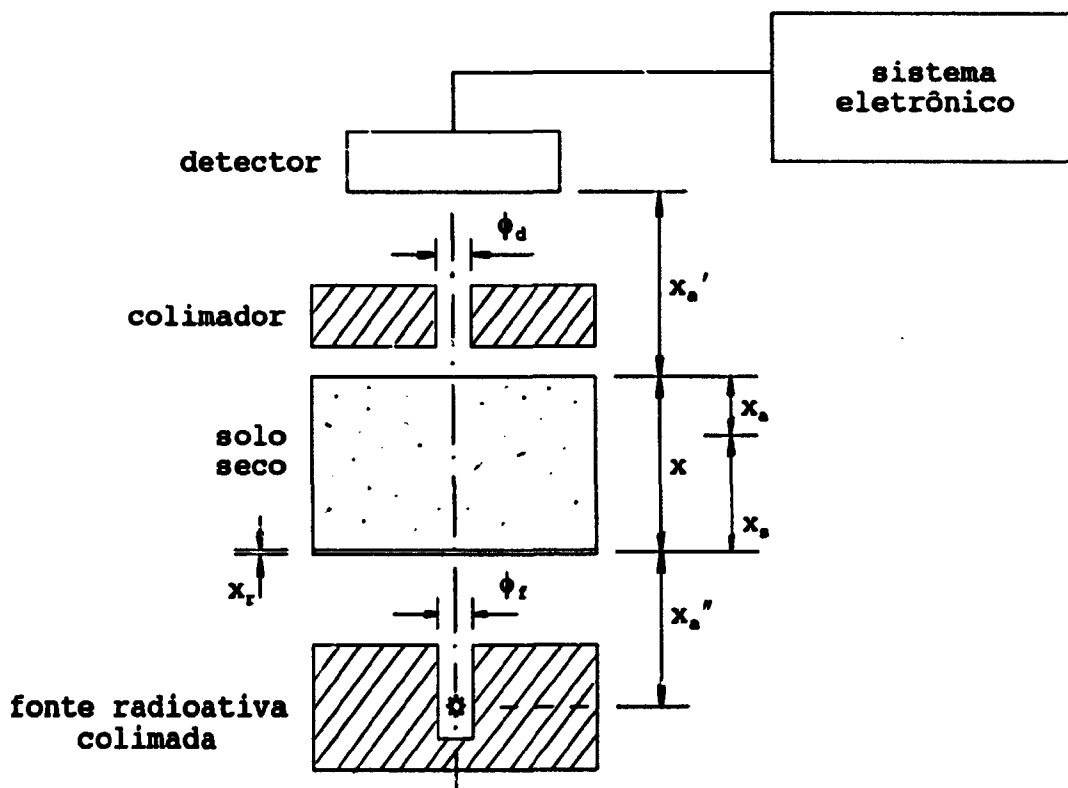


Figura 5. Arranjo experimental utilizado para determinação de umidade em solos pelo método da transmissão gama.

Considerando o arranjo experimental da Figura 5 e uma amostra de solo seco tem-se:

$$I = I_0' \exp[-\mu_a \rho_a x_a - \mu_r \rho_r x_r - \mu_a \rho_a (x_a + x_a' + x_a'')] \quad (8)$$

onde:

- I = intensidade do feixe atenuado (cpm)
- I_0' = intensidade do feixe incidente (cpm)
- μ_s = coeficiente de atenuação mássico do solo (cm^2/g)
- μ_r = coeficiente de atenuação mássico do recipiente (cm^2/g)
- μ_a = coeficiente de atenuação mássico do ar (cm^2/g)
- ρ_s = densidade real do solo (g/cm^3)
- ρ_r = densidade da parede do recipiente (g/cm^3)
- ρ_a = densidade do ar (g/cm^3)
- x = espessura da amostra (cm)
- x_s = espessura de solo (como se fosse compactado) (cm)
- x_r = espessura do recipiente (cm)
- x_a = espessura de ar equivalente nos poros do solo (cm)
- x_s' = distância solo-detector (cm)
- x_s'' = distância fonte-solo (cm)
- ϕ_d = diâmetro do colimador do detector (cm)
- ϕ_f = diâmetro do colimador da fonte (cm)

Como x_s' , x_s'' e x_r são fatores constantes na geometria do arranjo experimental, a equação (8) pode ser escrita como:

$$I = I_0 \exp(-\mu_s \rho_s x_s - \mu_a \rho_a x_a) \quad (9)$$

onde:

$$I_0 = I_0' \exp[-\mu_r \rho_r x_r - \mu_a \rho_a (x_s' + x_s'')] \quad (10)$$

Considerando que $\mu_s \rho_s x_s \gg \mu_v \rho_v x_v$, pode-se aproximar a equação (9) para:

$$I = I_0 \exp(-\mu_s \rho_s x_s) \quad (11)$$

Tomando-se uma amostra de solo úmido, a equação da atenuação gama passa a ser:

$$I = I_0 \exp[-(\mu_s \rho_s x_s + \mu_v \rho_v x_v)] \quad (12)$$

onde:

μ_v = coeficiente de atenuação mássico da água

ρ_v = densidade da água

x_v = espessura de água equivalente nos poros do solo.

A equação (12) pode ainda, ser escrita na forma:

$$I = I_0 \exp\left(-\mu_s \rho_s \frac{x_s}{x} - \mu_v \rho_v \frac{x_v}{x}\right) x \quad (13)$$

onde $\rho_s x_s / x = \rho_g$ é a densidade global do solo e, $x_v / x = \theta$ é a umidade volumétrica do solo, uma vez que a área do recipiente é um fator constante na geometria do arranjo experimental da Figura 5. Como $\rho_v \theta = \rho_g \theta_s$, tem-se que:

$$I = I_0 \exp[-(\mu_s \rho_g + \mu_v \rho_g \theta_s) x] \quad (14)$$

ou ainda:

$$Y = \frac{\ln(I/I_0)}{\rho_s X} = - \mu_s - \mu_v \theta_s \quad (\text{cm}^2/\text{g}) \quad (15)$$

Para efeito de calibração do sistema, a fim de mensurar a umidade com um feixe monoenergético, a matriz do solo deve ser considerada indeformada, isto é, para solos expansivos ρ_s é uma função da umidade e a equação (15) não deve ser aplicada.

Aspectos de incertezas que relacionam a espessura do solo, sua densidade, as taxas de contagens, etc., estão apresentados no Apêndice 2.

CAPÍTULO IV

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS ESTUDADOS

Para este estudo foram utilizados os solos com textura franco-argilo arenoso (FAA), franco argiloso (FARG) e arenoso (ARE), segundo o triângulo de classificação textural [30]. O perfil dos solos FAA e ARE, onde foram coletadas as amostras, está situado na unidade de testes de Itapirema, da Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária (IPA), em Goiana, Zona da Mata Norte do Estado de Pernambuco, enquanto que o perfil do solo FARG situa-se na área de testes do Departamento de Energia Nuclear da UFPE, em Recife.

Amostras de 5kg de cada solo foram secas ao ar, destorroadas, em seguida passadas em peneira de 2mm, quarteadas e homogeneizadas. Alíquotas de cada solo foram retiradas, pesadas e colocadas no porta-amostra. As amostras foram colocadas para saturar durante 24 horas. Após a saturação, foram secas em estufa a 105°C a fim de se medir a massa e o volume de cada amostra, obtendo-se assim, suas densidades globais. Em seguida as amostras foram saturadas durante 24 horas e colocadas para evaporar em condições ambientais. As perdas de peso de cada amostra, por evaporação, eram medidas com uma balança digital antes e depois das amostras serem levadas para medição do fator de atenuação (I/I_0) no

arranjo experimental. Essa metodologia, inclusive a secagem em estufa para se medir a densidade global de cada amostra, foi seguida a fim de reduzir a variabilidade na determinação da unidade pelo método da transmissão gama.

4.2 ARRANJO EXPERIMENTAL DO SISTEMA DE DETECÇÃO

Para realização desse estudo foi construído o arranjo experimental mostrado na Figura 6. Na parte superior desse arranjo foi fixado o suporte do detector semicondutor e na parte inferior a blindagem de chumbo com um orifício central de 5,0mm de diâmetro, onde foi colocada a fonte radioativa. Através do parafuso P_1 foi possível ajustar a posição da fonte de modo que a mesma ficasse alinhada com o detector, a uma distância de 7,5cm deste. A fonte radioativa utilizada foi de ^{241}Am ($E=60\text{keV}$) com uma atividade de 7,4GBq.

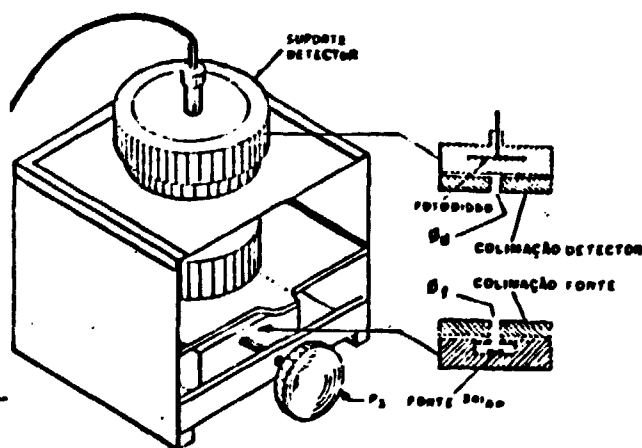


Figura 6. Arranjo experimental para medição de unidade em solos por transmissão γ .

Como detectores utilizaram-se os fotodiodos SFH206 da Siemens [31] e S2551 da Hamamatsu [32], cujas características de fabricação estão indicadas na Tabela I. Um suporte de acrílico com um orifício central de 4,5cm de diâmetro foi colocado entre a fonte e o detector. Este suporte serviu para posicionar o porta-amostra o qual era um recipiente cilíndrico de alumínio de 5,50cm de altura e 5,08cm de diâmetro. Na parte inferior do cilindro foi colocado um tecido de malha fina, para evitar a perda de solo durante o processo de preparação das amostras.

Tabela I - Características dos fotodiodos

fotodiodo	SFH206	S2551
tensão reversa (V)	30	50
dimensões LxAxP(mm ³)	4,8x6,8x3,54	2,7x40,0x3,5
área sensível LxA(mm ²)	2,71x2,71	2,5x30,0

4.3 ESPECTRO DA RADIAÇÃO GAMA DO ²⁴¹Am COM O FOTODIODO

A fim de eliminar a radiação espalhada, devido ao efeito Compton, as contagens foram obtidas no fotopico selecionado a partir do espectro da fonte de ²⁴¹Am. Para tanto, foi traçado para cada fotodiodo, o espectro diferencial da radiação γ do ²⁴¹Am selecionando-se a janela do discriminador correspondente à largura do fotopico.

4.4 REPRODUTIBILIDADE E ESTABILIDADE

Inicialmente foi avaliada a reprodutibilidade da resposta dos fotodiodos a serem utilizados nas medidas de detecção da radiação gama. Para isto o detector foi posicionado na frente da fonte e 30 medidas consecutivas, de 2 minutos cada, foram efetuadas sem a presença do solo (Anexo 1).

Para verificar a estabilidade da resposta do detector ao longo do tempo, um conjunto de 10 medidas foi efetuado, em dias alternados, dentro de um intervalo de 30 dias (Anexo 2).

Avaliou-se, também, a estabilidade dos valores obtidos do fator de atenuação (I/I_0), num intervalo de cinco meses, com os três solos secos.

4.5 EFEITO DA GEOMETRIA FONTE-DETECTOR SOBRE μ_v E μ_a

Antes de efetuar as medidas com amostras de solo, foi realizado um estudo visando a determinação do coeficiente de atenuação mássico da água μ_v , utilizando os dois fotodiodos SFH206 e S2551. Para tanto, com a fonte colimada ($\phi_s=5\text{mm}$) e o detector sem colimação, foi posicionado um becker de 50ml no suporte de acrílico entre a fonte e o detector e foram efetuadas medidas de I/I_0 com diferentes lâminas de água. A partir dos resultados obtidos (Anexo 3) foi traçado o gráfico do logaritmo do fator de atenuação $\ln(I/I_0)$ em função da espessura de água e determinado o coeficiente de atenuação da água.

Como os valores obtidos (Anexo 4) do coeficiente da água (SFH206: $0,1758\text{cm}^2/\text{g}$ e S2551: $0,1857\text{cm}^2/\text{g}$) eram inferiores ao valor

teórico $\mu_v=0,2050\text{cm}^2/\text{g}$ [33], foi efetuado um estudo visando avaliar a influência da geometria de detecção na determinação de μ_v e μ_s . Para este estudo, utilizou-se o fotodiodo SFH206 e colimadores de chumbo com diferentes diâmetros foram posicionados na frente da fonte e do detector. Esses diâmetros foram sistematicamente variados e medidas da intensidade do feixe foram obtidas aumentando-se a espessura de água destilada de 0,50 em 0,50cm. Inicialmente foram feitas medidas com uma colimação no detector ($\phi_d=2,0\text{mm}$) de modo que apenas 43% da sua área sensível fosse atingida. Em seguida, o diâmetro do colimador foi aumentado para 3,0mm, de modo que 97% da área sensível do detector fosse atingida pela radiação. Finalmente foram feitas medidas do detector sem colimação. Para o estudo de μ_s , utilizou-se apenas o solo ARE, com lâminas de 1,17cm, seco em estufa a 105°C, adotando a mesma sistemática nos diâmetros de colimação. Para cada combinação de diâmetros ϕ_f e ϕ_d , obteve-se os coeficientes de atenuação através da regressão linear entre o $\ln(I/I_0)$ e as espessuras de água e solo correspondentes.

4.6 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO GAMA

Fixando-se a colimação da fonte em $\phi_f=5\text{mm}$ e o detector sem colimação, foram realizadas medidas com amostras de solo com diferentes teores de umidade (Anexo 5). O valor do teor de água na amostra foi determinado utilizando o método gravimétrico e os resultados de $\ln(I/I_0)$ foram relacionados com os respectivos valores de umidade. Para este estudo foram preparadas 3 amostras dos solos FAA e FARG, com uma dada umidade e 5 medidas foram

efetuadas. Assim, o fator $\ln(I/I_0)$ associado a uma dada umidade corresponde à média de 15 leituras.

Através da regressão linear entre $\ln(I/I_0)$ e a umidade mássica, determinou-se o coeficiente de atenuação do solo já que este representa o coeficiente linear da equação (15).

Naturalmente, os valores de μ_s e μ_v correspondem a coeficientes efetivos, uma vez que a geometria de feixe bem colimado não foi utilizada. Assim, a equação (15) deveria ser, mais corretamente, escrita na forma:

$$Y = - \mu_s' - C\mu_v' \theta_m \quad (16)$$

onde μ_s' e μ_v' representam os valores dos coeficientes efetivos que incluem os efeitos devidos à geometria particular do feixe, enquanto o fator C inclui outros efeitos devidos, eventualmente, à composição da solução do solo [16,34].

Foram, também, efetuados estudos visando comparar os valores encontrados do fator de atenuação da radiação com o fotodiodo e o detector de cristal cintilador NaI(Tl). Para tanto, medidas foram realizadas nas mesmas condições de geometria e umidade com os dois detectores.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO SOLO

A tabela II mostra as características granulométricas e densidades dos solos utilizados neste estudo.

Tabela II - Características dos solos estudados

solo	origem	granulometria (%)			densidade global (g/cm ³)
		argila	silte	areia	
FAA	Itapirema	20,2	6,8	73,0	1,43
ARE	Itapirema	8,2	3,0	88,8	1,41
FARG	DEN-UPPE	29,4	31,8	38,8	1,27

5.2 ESPECTRO DA RADIAÇÃO DO ²⁴¹Am

As Figuras 6 e 7 mostram os espectros do amerício obtido, respectivamente, com os fotodiodos SFH206 e S2551. Observa-se a partir destes dados que a resolução do fotopico obtido com o fotodiodo SFH206 foi de 19%, enquanto que a do S2551 foi de 24%. Estas resoluções estão acima dos valores normalmente encontrados

com semicondutores. Isto se deve, provavelmente, às flutuações na carga coletada pelos fotodiodos e ao ruído do sistema eletrônico.

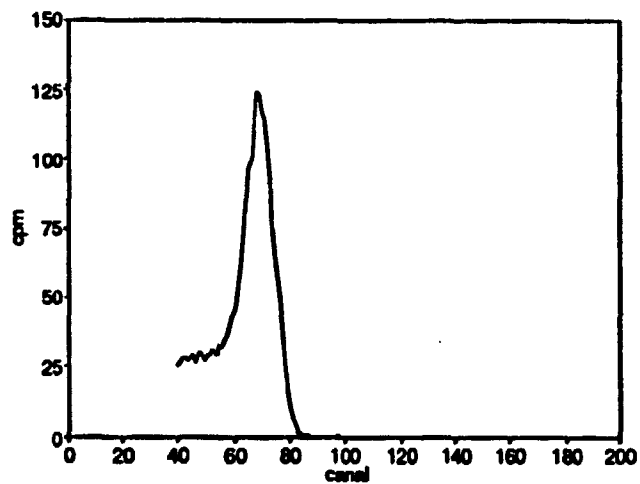


Figura 6. Espectro do ^{241}Am obtido com fotodiodo SFH206 da Siemens. Resolução de 19%.

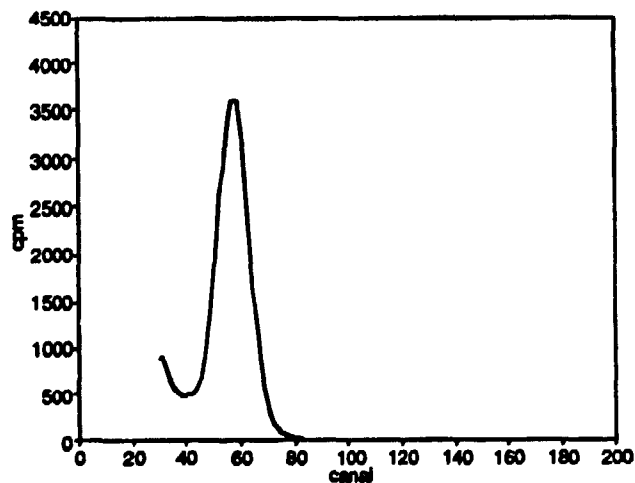


Figura 7. Espectro do ^{241}Am obtido com fotodiodo S2551 da Hamamatsu. Resolução de 24%.

5.3 REPRODUTIBILIDADE E ESTABILIDADE DAS MEDIDAS

As respostas das 30 medidas consecutivas efetuadas com os fotodiodos SFH206 e S2551 são mostradas nas Figuras 8 e 9, respectivamente. Estes resultados foram obtidos sem a amostra de solo entre a fonte e o detector.

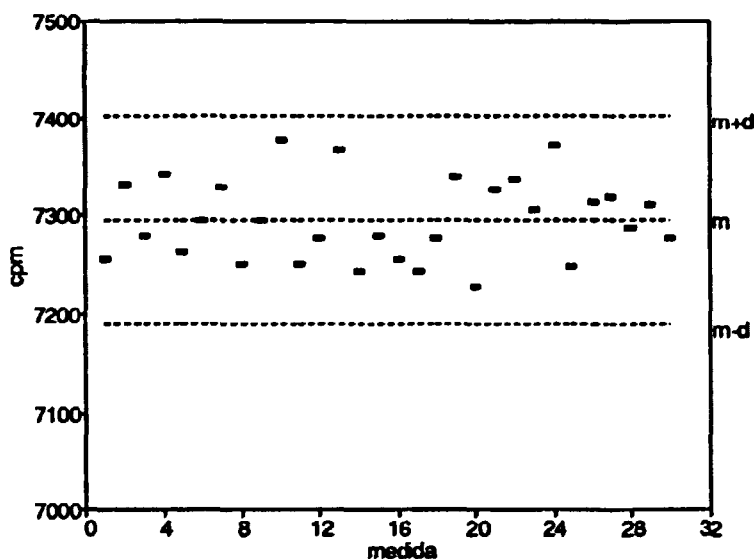


Figura 8. Resultados de 30 medidas consecutivas obtidas com o fotodiodo SFH206.
 m =média; $d=2,58S$.

Nestes gráficos estão pontilhados os valores correspondentes ao valor médio m e $m \pm 2,58S$, onde S é o desvio padrão. Observa-se a partir destes dados que todas as medidas encontram-se no intervalo de $m \pm 2,58S$ que corresponde ao intervalo de 99% de confiabilidade. O coeficiente de variação destas medidas é de 0,6% para o fotodiodo SFH206 e 0,2% para o S2551.

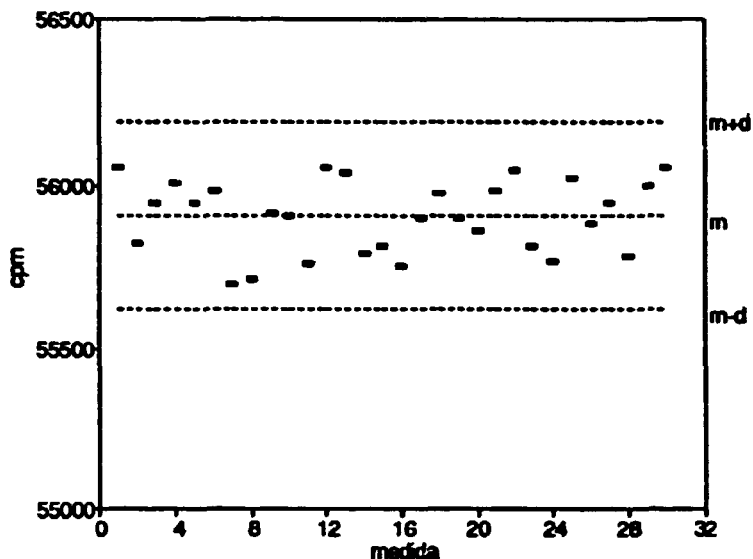


Figura 9. Resultados de 30 medidas consecutivas obtidas com fotodiodo S2551. m =média e $d=2,58S$.

As Figuras 10 e 11 mostram, respectivamente, os resultados da variação da resposta do fotodiodo SFH206 e S2551 ao longo do tempo. Cada ponto deste gráfico corresponde à média de 5 leituras com o desvio associado. No gráfico estão indicados o valor médio m e $m \pm 2,58S_m$ (S_m é o desvio padrão da média de 5 medidas). Observa-se a partir destes dados que a resposta dos fotodiodos é estável ao longo do tempo e, que as flutuações observadas correspondem a aleatoriedade inerente ao decaimento radioativo.

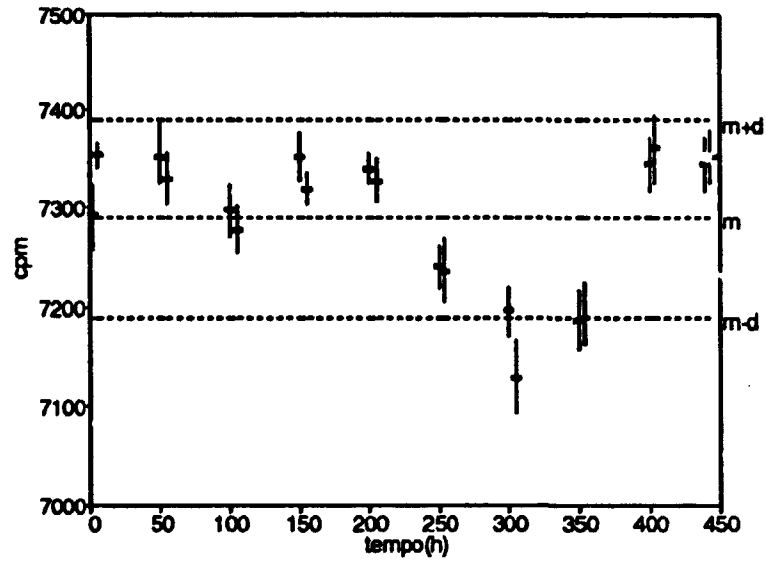


Figura 10. Resposta do fotodiodo SFH206 em função do tempo. m =média; $d=2,58S_p$.

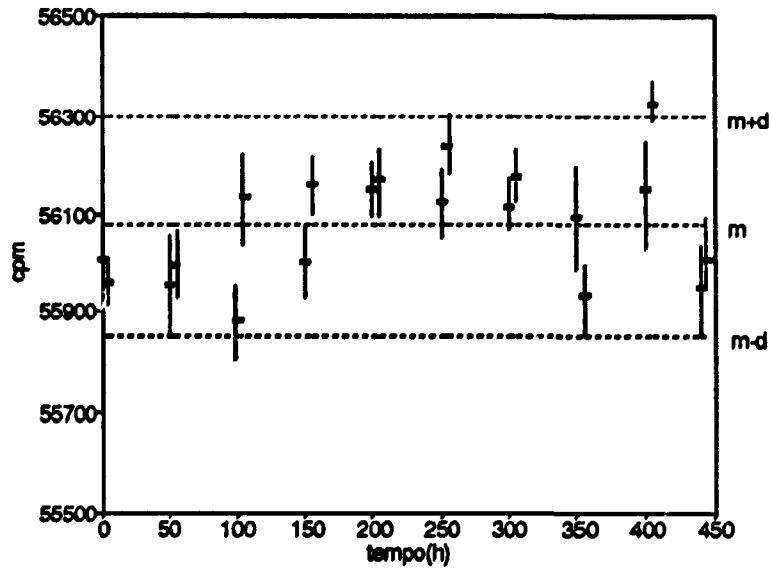


Figura 11. Resposta do fotodiodo S2551 em função do tempo. m =média; $d=2,58S_p$.

Os fatores de atenuação (I/I_0) determinados ao longo de 5 meses para os solos FAA, FARG e ARE estão mostrados na Tabela III.

Tabela III. Variação do fator de atenuação num intervalo de 5 meses.

DATA	I/I ₀ FAA	I/I ₀ FARG	I/I ₀ ARE
27/01/92	0,169±0,003	0,143±0,004	0,230±0,004
29/01/92	0,166±0,003	0,143±0,005	0,232±0,003
03/06/92	0,168±0,003	0,145±0,003	0,228±0,002
05/06/92	0,172±0,004	0,146±0,003	0,226±0,002

A reprodutibilidade dos valores ao longo do tempo evidencia a estabilidade da resposta do sistema de detecção.

5.4 EFEITO DA GEOMETRIA FONTE-DETECTOR SOBRE μ_v E μ_s

Os resultados obtidos do logaritmo do fator de atenuação $\ln(I/I_0)$, para diferentes lâminas d'água e na geometria do detector sem colimação, estão mostradas nas Figuras 12 e 13. O coeficiente de atenuação, determinado a partir da regressão linear entre $\ln(I/I_0)$ e as espessuras de água, foi de $\mu_v=0,1758 \pm 0,0011\text{cm}^2/\text{g}$ para o SFH206 e $\mu_v=0,1857 \pm 0,0023\text{cm}^2/\text{g}$ para o S2551. O coeficiente de determinação r^2 , foi de 0,99983 para o SFH206 e de 0,99939 para o S2551. Os valores do coeficiente de atenuação determinados com os dois fotodiodos são menores do que o valor teórico, determinado por Hubell [33], que é de $0,205\text{cm}^2/\text{g}$.

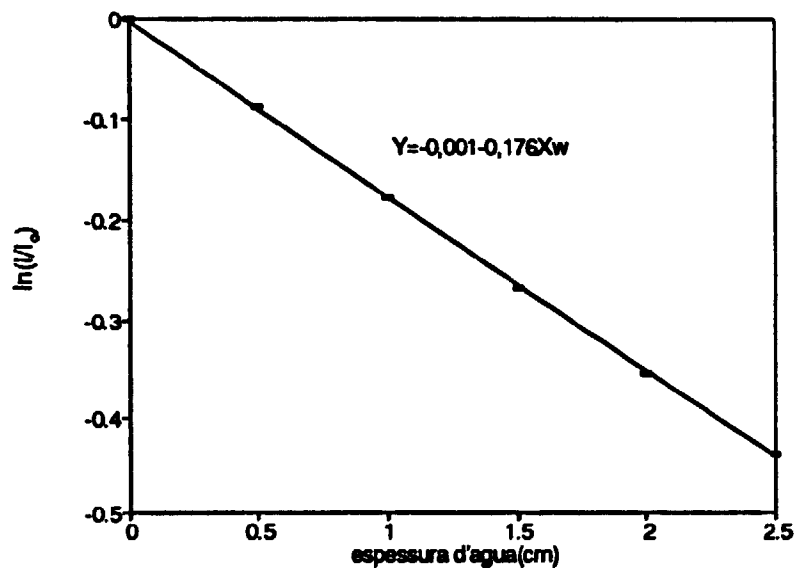


Figura 12. Variação de $\ln(I/I_0)$ em função da espessura de água obtido com fotodiodo SFH206.

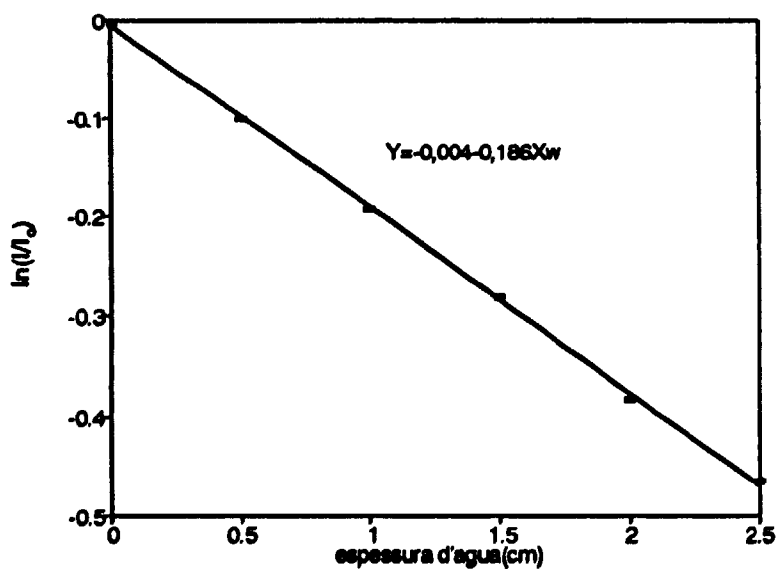


Figura 13. Variação do $\ln(I/I_0)$ em função da espessura de água obtido com fotodiodo S2551.

O fato do valor experimental encontrado para μ_v ser inferior ao valor teórico pode ser explicado pela contribuição do espalhamento elástico nas medidas, conforme evidenciam os resultados encontrados com diferentes geometrias de colimação entre fonte e detector, os quais estão mostrados nas Tabela IV.

Tabela IV. Valores dos coeficientes de atenuação da água e solo ARE obtidos com diferentes condições de colimação na fonte e no detector. σ é o desvio. r^2 é o coeficiente de determinação.

	ϕ_d (mm)	ϕ_r (mm)	μ (cm ² /g)	σ	r^2
ÁGUA	2	2	0,1970	0,0041	0,9982
	2	3	0,1927	0,0036	0,9986
	3	2	0,1973	0,0036	0,9986
	3	3	0,1946	0,0040	0,9983
	3	5	0,1862	0,0009	0,9999
	sc	3	0,1886	0,0032	0,9988
	sc	5	0,1758	0,0011	0,9998
SOLO ARE	3	3	0,2510	0,0022	0,9998
	3	5	0,2452	0,0011	0,9999
	sc	2	0,2394	0,0049	0,9987
	sc	3	0,2358	0,0045	0,9989
	sc	5	0,2255	0,0055	0,9997

sc=sem colimação

Pode-se observar que à medida que os diâmetros dos colimadores da fonte e do detector aumentam, os valores do coeficiente de atenuação diminuem, indicando um aumento da contagem da radiação devido ao espalhamento elástico. A ausência da

colimação do detector, mesmo em detectores do tipo fotodiodo, de dimensões pequenas, acarreta uma importante diminuição, de μ_v e μ_s . Os valores de r^2 próximos da unidade indicam que a lei exponencial pode ser aplicada a todas as geometrias estudadas. Dessa maneira, é possível interpretar o efeito do espalhamento coerente através de um fator de geometria que reduz o valor de μ_v e μ_s em condições ideais de colimação. Isto é, $\mu_v' = G\mu_v$ e $\mu_s' = G\mu_s$. Pela relação entre os coeficientes com $(\phi_d, \phi_t) = (3, 3)$ e $(\phi_d, \phi_t) = (sc, 5)$, observa-se que $G = 0,90 \pm 0,03$ tanto para a água como para o solo.

5.5 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO GAMA

Os resultados de $Y = [\ln(I/I_0)]/\rho_s x$ em função da unidade mássica para o solo FAA, obtidos com fotodiodo SFH206 estão mostrados na Figura 20. A equação da reta é: $Y = -0,234 - 0,1590_m$.

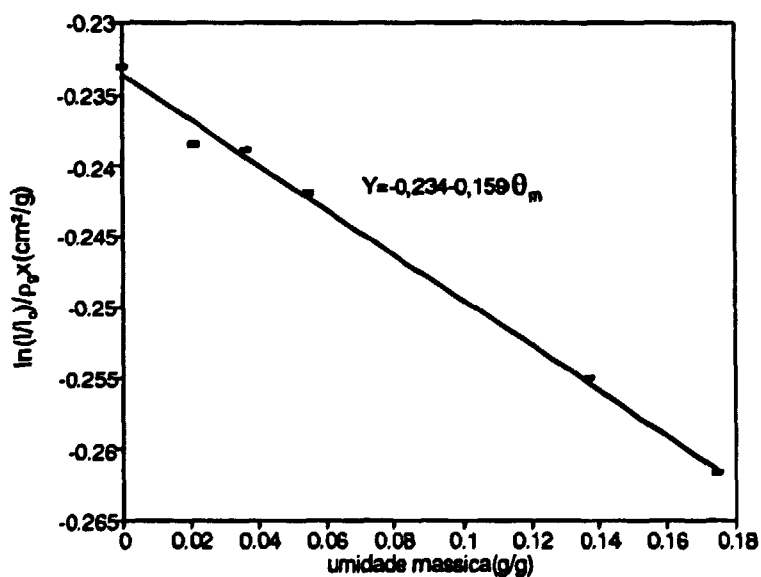


Figura 14. Curva de calibração do solo FAA com fotodiodo SFH206. $r^2 = 0,9948$.

A Figura 15 mostra a curva de calibração deste mesmo solo obtida com fotodiodo S2551. Neste caso a equação da reta é:
 $Y = - 0,236 - 0,1700x_m$.

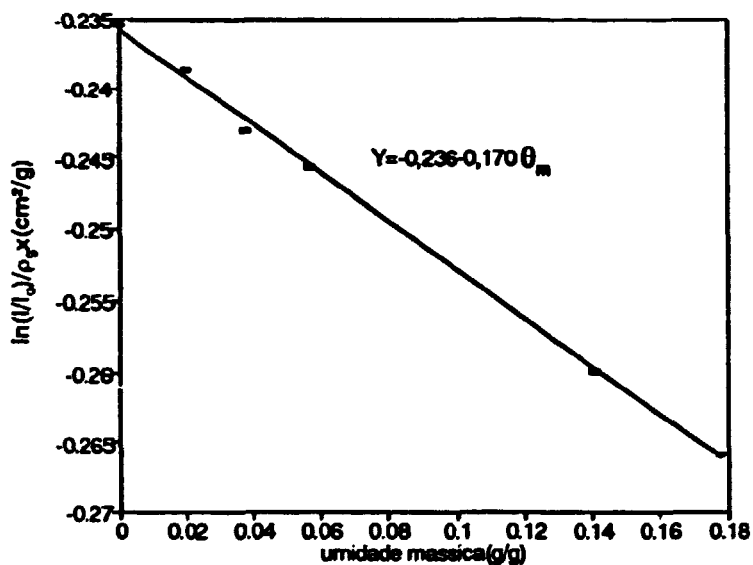


Figura 15. Curva de calibração do solo FAA com fotodiodo S2551. $r^2=0,9979$.

O coeficiente de determinação destas retas é de 0,9948 para o fotodiodo SFH206 e 0,9979 para o S2551, o que demonstra a linearidade da resposta do sistema de transmissão gama com a umidade nos solos.

As curvas de calibração do solo FARG, obtidas com os fotodiodos SFH206 e S2551 estão mostradas, respectivamente, nas Figuras 16 e 17. Os coeficientes de determinação são, respecti-

vamente, 0,9895 e 0,9958. A equação da reta para o solo FARG com o SFH206 é: $Y = -0,286 - 0,1370_m$, enquanto que com o fotodiodo S2551 a reta de calibração é: $Y = -0,289 - 0,1390_m$.

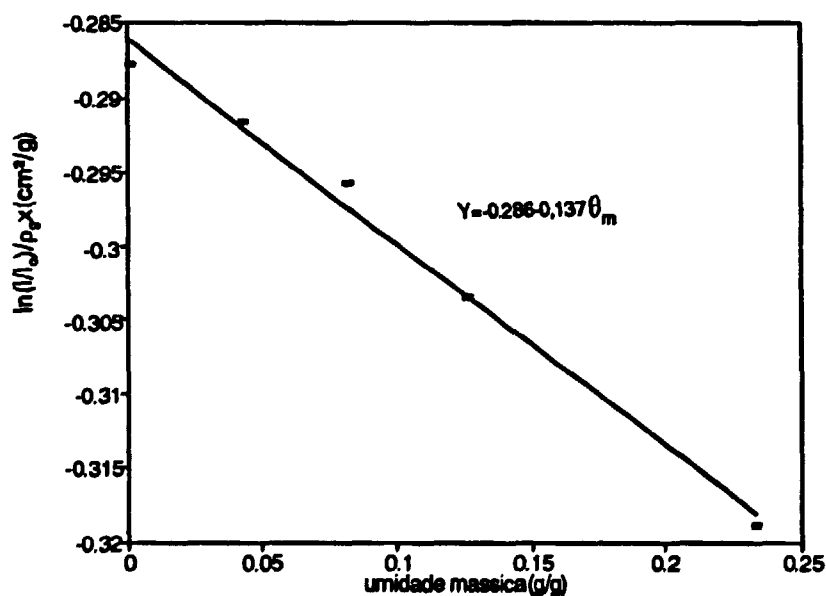


Figura 16. Curva de calibração do solo FARG e fotodiodo SFH206. $r^2=0,9895$.

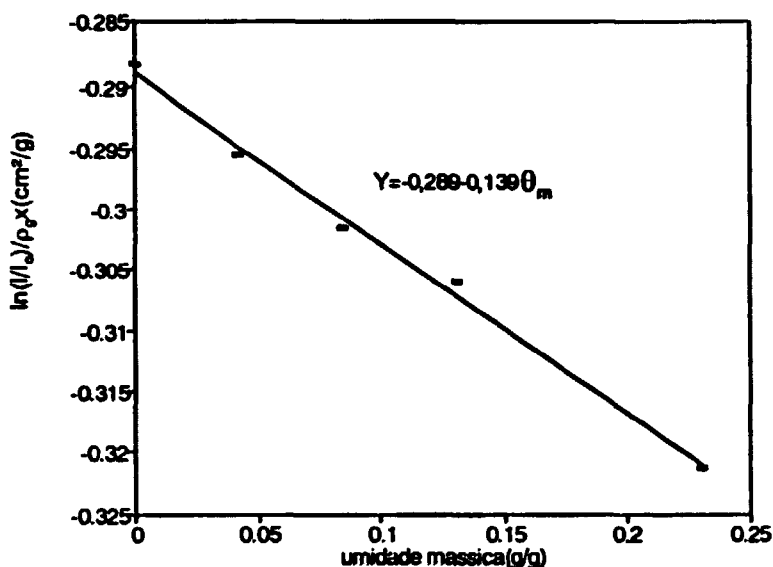


Figura 17. Curva de calibração do solo FARG e fotodiodo S2551. $r^2=0,9958$.

Estes resultados mostram que a inclinação da reta de calibração depende do tipo de solo, uma vez que o fenômeno de atenuação gama depende do número atômico do meio. Por outro lado, observa-se que o coeficiente de atenuação de um solo, obtido com os dois fotodiodos, é pouco influenciado pelas dimensões da junção do semiconductor. De fato apesar da área sensível do fotodiodo S2551 ser maior do que a do SFH206 (vide Tabela I), as retas de calibração dos fotodiodos, para um dado solo, apresentam inclinações semelhantes. Isto ocorre devido à colimação do feixe, de modo que a radiação incide em uma parte da área sensível do fotodiodo S2551, tornando a sua resposta semelhante à do fotodiodo SFH206.

Tomando como base o valor teórico de μ_0 e os valores encontrados com a geometria deste estudo, obtém-se o fator geométrico $G=0,858\pm 0,005$ para o fotodiodo SFH206 e $G=0,906\pm 0,011$ para o S2551. Utilizando este fator de correção, obteve-se os coeficientes de atenuação dos solos que estão na Tabela V. Nesta tabela, também, estão listados os valores do coeficiente de atenuação de solos com texturas semelhantes aos solos estudados e que foram determinados por Ferraz [35].

Tabela V. Valores dos coeficientes de atenuação obtidos neste trabalho e por Ferraz para os solos FAA, ARE e FARG.

SOLO	$\mu(\text{cm}^2/\text{g})$ deste trabalho		$\mu(\text{cm}^2/\text{g})$ obtido por Ferraz
	SFH206	S2551	
ARE	$0,263\pm 0,007$	----	$0,262\pm 0,001$
FAA	$0,273\pm 0,002$	$0,260\pm 0,003$	$0,275\pm 0,002$
FARG	$0,334\pm 0,003$	$0,320\pm 0,004$	$0,335\pm 0,004$

A análise destes dados mostra a concordância entre os valores de μ_0 obtidos neste trabalho com os encontrados por Ferraz [35].

A Figura 18 mostra os resultados obtidos da percentagem de atenuação da radiação incidente no solo FAA, medida com o detector fotodiodo SFH206 e com cintilador de NaI(Tl). A reta obtida tem uma inclinação de 45° , o que mostra concordância entre a resposta do detector semicondutor e do cintilador sólido.

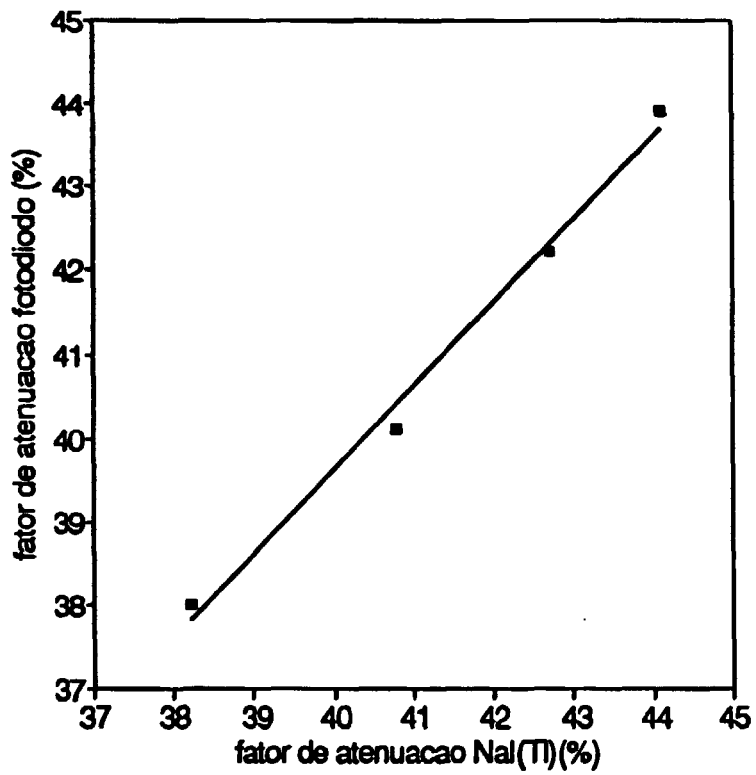


Figura 18. Relação entre o fator de atenuação medido com o fotodiodo e o detector de cristal NaI(Tl) para o solo FAA. $r^2=0,99085$.

CAPITULO VI

CONCLUSÕES

A partir dos resultados encontrados pode-se concluir:

- 1. É viável a utilização dos fotodiodos SFH206 e S2551 para medidas de umidade de solos pelo método da transmissão gama.**
- 2. O baixo custo destes fotodiodos comerciais, as suas pequenas dimensões e a linearidade e estabilidade de sua resposta, sugerem a continuidade dos trabalhos visando o desenvolvimento de um equipamento de campo para medida de umidade de solos pelo método de transmissão gama.**
- 3. O efeito da radiação espalhada na determinação do coeficiente de atenuação da água é mais influenciado pela colimação do detector do que da fonte. As medidas desse coeficiente, em diferentes geometrias, podem ser corrigidas utilizando um fator de geometria que depende dos diâmetros dos colimadores da fonte e do detector.**
- 4. A lei exponencial da atenuação pode ser aplicada, mesmo quando não for possível eliminar os efeitos da radiação secundária, resultante do processo de espalhamento coerente da radiação γ de uma fonte de ^{241}Am .**

BIBLIOGRAFIA

- [1] GARDNER, W. H. Water content. In: BLACK, C. A., ed. **Methods of soil analysis**. Madison, American Society of Agronomy, 1965, Pte. 2, p. 82-127.

- [2] SCHMUGGE, T. J.; JACKSON T. J.; McKIM, H.L. Survey of methods for soil moisture determination. **Water Resources Research**, 16(6):961-79, 1980.

- [3] REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo, Manole, 1987. 188p.

- [4] BOUYOUCOS, G. J. Evaporating the water with burning alcohol as a rapid means of determining moisture content of soils. **Soil Sci.**, 44:377-83, 1937.

- [5] RICHARDS, L. A. & GARDNER, W. Tensiometers for measuring the capillary tension of soil water. **J. Amer. Soc. Agron.**, 28: 352-6, 1936.

- [6] HARTMANN, R. Tensiometer. In: COLLEGE ON SOIL PHYSICS 89, Trieste, 1989. **Preliminary notes**. Trieste, ICTP, 1989.

- [7] VIEIRA, S. R. & CASTRO, O. M. Determinação, em laboratório, de curvas de retenção de água com tensiômetros. **R. bras. Ci. Solo**, 11(2):87-90, 1987.

- [8] BIANCHI, W. B. Measuring soil moisture tension changes. **Agr. Eng.**, 43:398-9, 1962.
- [9] TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A.P. Eletromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, 16(3):574-82, 1980.
- [10] CUENCA, R. H. & NOILHAN, J. Use of soil moisture measurements in hydrologic balance studies. In: COLLEGE ON SOIL PHYSICS 89. Trieste, 1989. Preliminary notes. Trieste, ICTP, 1989.
- [11] TAYLOR, S. A.; EVANS, D. D.; KEMPER, W. D. Evaluating soil water. **Utah Agr. Exp. Sta. Bull.** 426, 1961.
- [12] REICHARDT, K. Neutron probes & their use in agronomy. In: COLLEGE ON SOIL PHYSICS 89. Trieste, 1989. Preliminary notes. Trieste, ICTP, 1989.
- [13] VAN BAVEL, C. H. M.; UNDERWOOD, N.; RAGAR, S.R. Transmission of gamma radiation by soils and soil densitometry. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.**, 21:588-91, 1957.
- [14] GURR, C. G. Use of gamma rays in measuring water content and permeability in unsaturated columns of soil. **Soil Sci.**, 94: 224-9, 1962.

- [15] FERGUSON, H. & GARDNER, W. H. Water content measurement in soil columns by gamma ray absorption. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 26:11-4, 1962.
- [16] SINGH, B. P. & KUMAR, B. Gamma ray transmission method for the study of soil-water characteristics. *Indian J. Pure & Appl. Phys.*, 26:376-9, 1988.
- [17] KING, L. G. 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*, 1973. p.17-29.
- [18] ATTIX, F. H. Introduction to radiological physics and radiation dosimetry. New York, John Wiley, 1986. 607p.
- [19] HOBBIE, RUSSELL K. Intermediate physics for medicine and biology. 2. ed. New York, John Wiley, 1989. 623p.
- [20] VAN DILLA, M. A. In: EVANS, R. D. The atomic nucleus. New York, McGraw-Hill, 1955. 972p. (capítulo 24).
- [21] KIRKHAM, D. & COREY, J. C. Recent progress in the design of radiation equipment and its practical implication. In: SOIL-MOISTURE AND IRRIGATION STUDIES II, Vienna, 1973. *Anais. Vienna, IAEA*, 1973. p. 17-39.
- [22] KNOLL, G. F. Radiation detection and measurement. 2. ed. New York, John Wiley, 1986. 754p.

- [23] PRICE, W. J. Nuclear radiation detection. 2. ed. New York, McGraw-Hill, 1964. 430p.
- [24] YABE, M.; SATO, N.; KAMIJO, H.; TAKECHI, T. & SHIRAISHI, F. A silicon X- and gamma-ray detector for room temperature and low voltage operation. Nucl. Instr. and Meth., 193:63-7, 1982.
- [25] MARKEVICH, N.; GERTNER, I.; FELSTEINER, J. Low energy X-ray and γ spectroscopy using silicon PIN photodiodes. Nucl. Instr. and Meth., A269:219-21, 1988.
- [26] BILTON, C.; HEDGES, S.; HOBSON, P. R.; IMRIE, D. C. Low-cost silicon photodiodes for X-ray detection. J. Phys. E: Sci. Instrum., 21:809-11, 1988.
- [27] YAMAMOTO, H.; HATAKEYAMA, S.; NORIMURA, T.; TSUCHIYA, T. Low-energy nuclear radiation detection with a silicon photodiode. Nucl. Instr. and Meth., A281:128-32, 1989.
- [28] WITTENBURG, K. Radiation damage in PIN photodiodes. Nucl. Instr. and Meth., A270:56-61, 1988.
- [29] ANTONUK, L. E.; BOUDRY, J.; YORKSTON, J.; WILD, C. F. Radiation damage studies of amorphous-silicon photodiode sensors for applications in raditherapy X-ray imaging. Nucl. Instr. and Meth., A299:143-6, 1990.

- [30] HILLEL, D. **Soil and water**. New York, Academic Press, 1971, p. 14-5.
- [31] SIEMENS. **Silicon Photodetectors**. Alemanha, Siemens, 1986. 23p. (Catalogo)
- [32] HAMAMATSU. **Silicon Photocells**. Japão, Hamamatsu, 1983. 34p. (Catalogo)
- [33] HUBELL, J. H. *op. cit.* [28]. p. 556-561 (Apêndice D.3.)
- [34] SINGH, B. P. & KUMAR, B. Movement of the water pulse in soil column by gamma ray transmission method. **Indian J. Pure & Appl. Phys.**, 28:293-8, 1990.
- [35] FERRAZ, E. S. B. **Determinação simultânea de densidade e umidade de solos por atenuação de raios gama do ^{137}Cs e ^{241}Am** . São Paulo, 1974. 120p. (Tese de livre docência - USP).
- [36] SZE, S. M. **Physics of semiconductor devices**. 2. ed. New York, John Wiley, 1981. 868p.
- [37] MILLMAN, J. & HALKIAS, C. C. **Integrated electronics**, New York, McGraw-Hill, 1972.

APÊNDICE 1

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS SEMICONDUTORES

Os materiais semicondutores se caracterizam por apresentar uma estrutura de bandas de energia da rede cristalina [36] como mostrado no diagrama simplificado da Figura 19. A banda de valência corresponde a elétrons presos a rede cristalina do material e E_v é a energia máxima desses elétrons. A banda de condução representa a região de elétrons livres os quais contribuem para a condutividade elétrica do material e, E_c corresponde ao menor valor para elétrons de condução. A banda de energia proibida ($E_g = E_c - E_v$) representa a faixa de estados energéticos onde não são encontrados elétrons. Para os semicondutores a largura da banda proibida é de aproximadamente 1eV dependendo do material e da temperatura em que ele se encontra.

Os principais materiais semicondutores são: o germânio (Ge), o silício (Si) e o arseneto de gálio (GaAs). À temperatura ambiente, um elétron da banda de valência pode ser transferido (excitado) termicamente para banda de condução deixando uma lacuna (ausência de um elétron) na banda de valência. Este fenômeno é conhecido como geração térmica de pares elétrons-lacunas. Em um semicondutor puro (semicondutor intrínseco) o número de elétrons livres n é igual ao número de lacunas p e a geração térmica é equilibrada pela recombinação (desexcitação de elétrons).

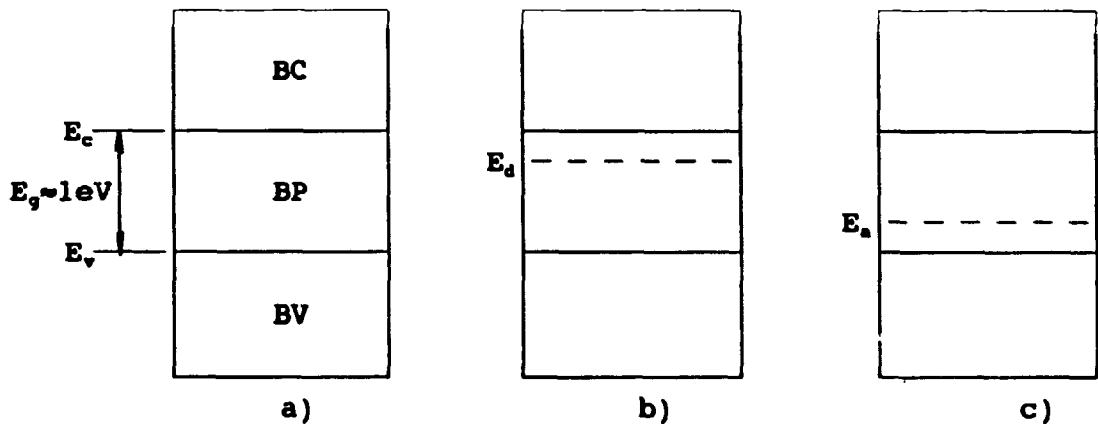


Figura 19. Diagrama simplificado de bandas de energia: BC - banda de condução; BP - banda proibida; BV - banda de valência; a) semicondutor puro; b) semicondutor tipo N; c) semicondutor tipo P.

Um semicondutor é chamado do tipo N quando ao cristal puro são adicionados átomos de impurezas pentavalente como antimônio (Sb), Fósforo (P), etc. Este processo é chamado de dopagem. O semicondutor dopado tipo N, apresenta um nível de energia discreto para elétrons na banda proibida bem próximo a banda de condução, chamado de nível doador E_d , como mostrado na Figura 19b. Neste tipo de semicondutor $n > p$.

O semicondutor tipo P é obtido pela adição de impurezas trivalentes (Boro, Índio, etc.) ao semicondutor intrínseco. Este tipo de impureza gera um nível de energia discreto na banda proibida próximo ao nível de valência como mostrado na Figura 19c, chamado de nível aceitador e, para este tipo de semicondutor $n < p$.

A junção PN é formada pela difusão ou implantação iônica de impurezas do tipo N em um semicondutor do tipo P ou vice-versa. No instante em que o diodo semicondutor é formado, os elétrons do material tipo N difundem-se para o material tipo P e as lacunas em

sentido contrário até que a ação do campo elétrico, gerado por esses portadores de carga que atravessam a junção, estabelece o equilíbrio estático próximo à junção como ilustra a Figura 20. A região neutra entre as cargas em equilíbrio, cuja largura é representada por L na Figura 20a, é chamada de região de depleção

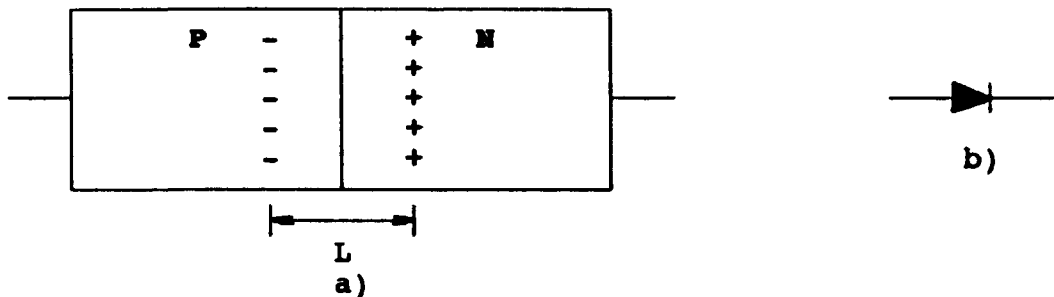
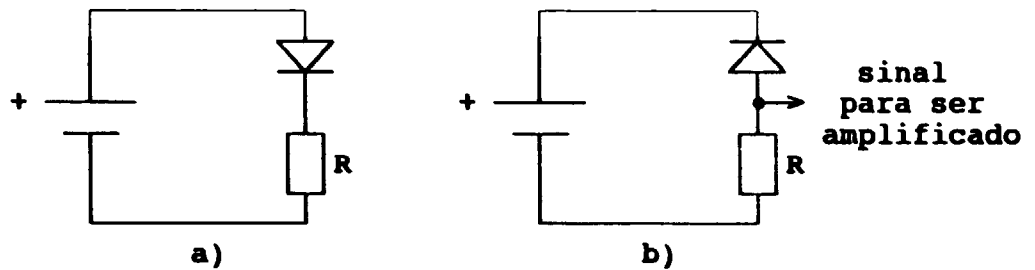


Figura 20. a) Esquema de uma Junção PN;
b) Simbologia do diodo semiconductor.

ou região de transição. Na ausência de um campo elétrico externo haverá uma diferença de potencial espontânea, chamada de barreira de potencial do diodo, devido às cargas em equilíbrio. Na Figura 20b temos a simbologia do diodo semiconductor.

Quando se aplica uma tensão (maior que a barreira de potencial) conforme a Figura 21a, o diodo fica altamente condutor e diz-se que ele está sob uma polarização direta. Ao se aplicar tensão conforme a Figura 21b dizemos que o diodo está sob uma polarização reversa e ele praticamente não conduz. Na verdade, nesta polarização, há uma pequena corrente, chamada de corrente



**Figura 21. Polarizações de diodos semicondutores:
a) direta; b) Reversa.**

reversa de saturação (ou corrente de fuga), causada pelo movimento aleatório dos portadores de carga e pelos seus processos de geração e recombinação [23,36,37].

O fotodiodo consiste de um diodo, geralmente tipo PIN, para detecção de sinais ópticos. O semicondutor intrínseco I, entre a junção PN dos fotodiodos, serve para melhorar a eficiência quântica de detecção de luz do dispositivo e aumentar a sua velocidade de resposta [36].

APÊNDICE 2

ERROS NAS MEDIDAS

A precisão do método da atenuação de raios gama para determinação da umidade de solos, basicamente varia com a espessura e a densidade da coluna de solo, característica de adsorção do solo e com as taxas de contagens I_0 e I [1].

Utilizando a expressão da equação (15), o desvio em θ_m será dado por:

$$\sigma(\theta_m) = \frac{\sigma_I}{\mu_v} \quad (17)$$

ou ainda:

$$\sigma(\theta_m) = \frac{1}{\mu_v \rho_s x} \sigma_f \quad (18)$$

onde $f = \ln(I/I_0) = \ln(I) - \ln(I_0)$.

Tomando-se $I=x$ e $I_0=y$, ao aplicarmos a teoria de propagação de erros para o cálculo do desvio em f , tem-se que:

$$\sigma_f^2 = \left[\frac{\partial f}{\partial x} \right]^2 \sigma_x^2 + \left[\frac{\partial f}{\partial y} \right]^2 \sigma_y^2 = \left(\frac{1}{x} \right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{1}{y} \right)^2 \sigma_y^2 \quad (19)$$

Como em medidas de contagem x e y têm, normalmente, distribuição de Poisson, então, $\sigma_x^2=x$ e $\sigma_y^2=y$. Assim, tem-se que:

$$\sigma_f = \left[\frac{1}{I} + \frac{1}{I_0} \right]^{1/2} \quad (20)$$

Se I_0 é da ordem de 6 vezes o valor de I , então, pode-se aproximar σ_f com erro menor que 10%, para $\sigma_f = (1/I)^{1/2}$. Assim, o desvio em θ_m será aproximadamente:

$$\sigma_{\theta_m} = \frac{1}{\mu_v \rho_g x I^{1/2}} \quad (21)$$

Substituindo I pela equação (14) e aplicando em (21), tem-se que:

$$\sigma_{\theta_m} = \frac{1}{\mu_v \rho_g x I_0^{1/2}} \exp[(\mu_s + \mu_v \theta_m) \rho_g x / 2] \quad (22)$$

Uma vez fixada a geometria do arranjo experimental, a espessura ótima da coluna de solo, isto é, dimensões as quais se tem o erro minimizado, pode ser obtida diferenciando (22) em relação a x e igualando a zero. Logo, tem-se que:

$$\frac{d\sigma(\theta_m)}{dx} = 0 \Rightarrow \rho_g x (\mu_s + \mu_v \theta_m) / 2 - 1 = 0 \quad (23)$$

De onde pode-se concluir que:

$$x' = \frac{2}{\rho_g (\mu_s + \mu_v \theta_m)} \quad (24)$$

onde x' é a espessura ótima.

ANEXO 1

Medidas da reprodutibilidade dos fotodiodos utilizados.

Fotodiodo SFH206			Fotodiodo S2551		
t=2min			t=2min		
Nº	medida	cpm	Nº	medida	cpm
1	14511	7256	1	112114	56057
2	14660	7330	2	111647	55824
3	14555	7278	3	111885	55943
4	14684	7342	4	112017	56009
5	14525	7263	5	111887	55944
6	14588	7294	6	111967	55984
7	14653	7327	7	111400	55700
8	14500	7250	8	111416	55708
9	14590	7295	9	111826	55913
10	14756	7378	10	111818	55909
11	14503	7252	11	111521	55761
12	14553	7277	12	112105	56053
13	14730	7365	13	112082	56041
14	14486	7243	14	111577	55789
15	14557	7279	15	111624	55812
16	14513	7257	16	111502	55751
17	14485	7243	17	111800	55900
18	14554	7277	18	111953	55977
19	14677	7339	19	111804	55902
20	14457	7229	20	111726	55863
21	14648	7324	21	111963	55982
22	14673	7337	22	112095	56048
23	14609	7305	23	111625	55813
24	14741	7371	24	111538	55769
25	14494	7247	25	112046	56023
26	14626	7313	26	111759	55880
27	14636	7318	27	111890	55945
28	14572	7286	28	111564	55782
29	14621	7311	29	111998	55999
30	14550	7275	30	112113	56057
m =	14590	7295	m =	111809	55904
s =	83	41	s =	223	112
2,58*s =	213	107	2,58*s =	575	288
max =	14803	7402	max =	112384	56192
min =	14377	7189	min =	111233	55617

ANEXO 2

Medidas da estabilidade do fotodiodo SFH206:

Fotodiodo SFH206					tempo(h)	cpm	desvio
14586	14752	14639	14514	14626	1	7291	28
14377	14502	14715	14376	14605	5	7353	14
14710	14607	14670	14399	14494	50	7350	33
14661	14426	14714	14234	14902	55	7329	25
14571	14678	14634	14425	14797	100	7297	29
14804	14626	14559	14180	14441	105	7276	20
14647	14593	14718	14121	14963	150	7352	19
14670	14427	14745	14155	14556	155	7318	11
14728	14624	14607	14457	15046	200	7337	9
14679	14485	14626	14373	14602	205	7326	17
14682	14577	14509	14383	14829	250	7239	14
14624	14792	14382	14223	14466	255	7234	23
14952	14654	14487	14360	14608	300	7195	23
14676	14736	14463	14397	14706	305	7129	33
14567	14757	14551	14493	14816	350	7186	22
14596	14696	14431	14485	14751	355	7189	23
14538	14597	14395	14355	14571	400	7342	36
14618	14643	14504	14431	14778	405	7361	60
14712	14673	14631	14400	14607	440	7343	34
14824	14573	14383	14215	14811	445	7352	24
					m =	7290	
					S =	88	
					Sm =	39	
					2,58Sm =	101	
					max =	7391	
					min =	7189	

ANEXO 2 (Cont.)

Medidas da estabilidade do fotodiodo S2551:

Fotodiodo S2551					tempo(h)	cpm	desvio
111775	111476	112118	112307	112029	1	56004	46
111889	111769	112329	112388	111654	5	55959	58
111919	112326	112002	112267	113151	50	55950	116
112246	111545	112519	111743	112441	55	55992	79
112206	111688	112533	112409	112219	100	55880	75
112039	112262	111940	111997	112675	105	56130	73
111606	112676	112320	112710	112480	150	56000	86
111683	111687	112695	112122	112623	155	56158	80
112082	112640	112322	112396	112996	200	56150	53
112184	112038	112403	112513	112472	205	56168	60
112082	111646	111920	111687	112394	250	56122	64
111785	112537	112136	111970	111431	255	56238	44
112607	112268	112088	112635	111366	300	56111	61
111848	111754	112448	112129	111958	305	56174	65
111178	111793	112623	112489	112322	350	56091	86
112094	112851	112269	111685	112289	355	55929	82
111704	111846	112771	111585	111497	400	56149	125
112262	112303	112510	112502	112239	405	56325	48
111524	112297	112516	111761	112435	440	55947	108
112337	112284	112316	111755	111590	445	56005	97
					m =	56074	
					S =	197	
					Sm =	88	
					2,585m =	227	
					max =	56301	
					min =	55847	

ANEXO 3

Contagens obtidas para diversas lâminas água e solo ARE:

Água (cm)	Fotodiodo SFH206			
	Contagens t=5min		media	desvio
	C1	C2		
0.00	30975	30735	30855.0	169.7
0.50	28267	28228	28247.5	27.6
1.00	25715	25927	25821.0	149.9
1.50	23646	23608	23627.0	26.9
2.00	21478	21784	21631.0	216.4
2.50	19668	20173	19920.5	357.1

Água (cm)	Fotodiodo S2551				
	Contagens t=2min			media	desvio
	C1	C2	C3		
0.00	105682	106222	106238	106047.3	381.8
0.50	95333	96124	96402	95953.0	559.3
1.00	87511	87228	87472	87403.7	200.1
1.50	80344	79844	79774	79987.3	353.6
2.00	72474	72451	72384	72436.3	16.3
2.50	66541	66976	66601	66706.0	307.6

SOLO ARE (FOTOD. SFH206)

x (cm)	<cpm>	desvio
0	7319	24
1.172	5038	26
2.344	3359	29
3.508	2314	29
4.673	1693	31

ANEIO 4

Regressão do fator de atenuação obtido com a água:

Fotodiodo SFH206						
agua			Pontos da	Parametros		
(cm)	I/I ₀	Y=ln(I/I ₀)	Regressao		Coef.	desvio
0.00	1.00000	0.00000	-0.00121	Linear	-0.0012	0.0024
0.50	0.91549	-0.08829	-0.08913	Angular	0.1758	0.0011
1.00	0.83685	-0.17811	-0.17705	Determ.	0.9998	-
1.50	0.76574	-0.26691	-0.26497			
2.00	0.70105	-0.35517	-0.35288			
2.50	0.64562	-0.43755	-0.44080			

Fotodiodo S2551						
agua			Pontos da	Parametros		
(cm)	I/I ₀	Y=Ln(I/I ₀)	Regressao		Coef.	desvio
0.00	1.00000	0.00000	-0.00455	Linear	-0.0045	0.0048
0.50	0.90481	-0.10003	-0.09741	Angular	-0.1857	0.0023
1.00	0.82420	-0.19335	-0.19027	Determ.	0.9774	-
1.50	0.75426	-0.28202	-0.28313			
2.00	0.68306	-0.38118	-0.37599			
2.50	0.62902	-0.46359	-0.46885			

ANEXO 4 (Cont.)

Regressão do fator de atenuação obtido com o solo ARE:

x (cm)	I/I ₀	Y=Ln(I/I ₀)	Pontos da Regressao	Parametros	
				Coef.	desvio
0	1.00000	0.00000	-0.00808	Linear	-0.008 0.020
1.172	0.68829	-0.26492	-0.27176	Angular	-0.2250 0.0055
2.344	0.45897	-0.55232	-0.53543	Determ.	0.9982
3.508	0.31621	-0.81656	-0.79731		
4.673	0.23133	-1.03823	-1.05941		

ANEXO 5

Umidade média das amostras dos solos utilizados (FAA, FARG):

SOLOS -->	FOTODIODO		SFH206	
	Massa de agua(g)		umidade massica (g/g)	
	FAA	FARG	FAA	FARG
	24.402	28.578	0.175	0.234
	19.197	15.488	0.137	0.127
	7.657	10.095	0.055	0.083
	5.092	5.302	0.036	0.043
	2.928	0.132	0.021	0.001
	0.044		0.000	

SOLO -->	FOTODIODO		S2551	
	Massa de agua(g)		umidade massica (g/g)	
	FAA	FARG	FAA	FARG
	24.87	28.19	0.178	0.231
	19.70	15.98	0.141	0.131
	7.96	10.30	0.057	0.084
	5.27	5.15	0.038	0.042
	2.82	0.02	0.020	0.000
	0.01		0.000	

ANEXO 5 (Cont.)

Valores de I/I_0 e $Y=f/\rho_p X$ ($f=\ln(I/I_0)$) obtidos com os solos FAA e FARG:

FOTODIODO SFH206					
<I>/<I ₀ >			Y		
SOLOS -->	FAA	FARG	SOLOS -->	FAA	FARG
	0.133781	0.117066		-0.26151	-0.31882
	0.140546	0.129875		-0.25510	-0.30339
	0.155485	0.136862		-0.24197	-0.29560
	0.159298	0.140715		-0.23882	-0.29147
	0.159807	0.144283		-0.23840	-0.28775
	0.166586			-0.23300	

FOTODIODO S2551					
<I>/<I ₀ >			Y		
SOLO -->	FAA	FARG	SOLO -->	FAA	FARG
	0.12950	0.11517		-0.26574	-0.32125
	0.13544	0.12753		-0.25991	-0.30610
	0.15122	0.13160		-0.24558	-0.30142
	0.15412	0.13693		-0.24312	-0.29552
	0.15958	0.14372		-0.23859	-0.28833
	0.16357			-0.23537	

ANEXO 5 (Cont.)

Regressão de Y em função de θ_{μ} obtidos com os solos FAA

e FARG:

		FOTODIODO SFH206				
SOLOS -->	Pontos da regressao		Parametros da regressao			
	FAA	FARG	SOLO	FAA		
	-0.26127	-0.31807	Coeficiente		desvio	
	-0.25537	-0.30338	Linear	-0.234	0.001	
	-0.24227	-0.29733	Angular	-0.159	0.006	
	-0.23936	-0.29195	Determ.	0.9948	-	
	-0.23690	-0.28615				
	-0.23363		SOLO	FARG		
			Coeficiente		desvio	
			Linear	-0.286	0.001	
			Angular	-0.137	0.008	
			Determ.	0.9895	-	

		FOTODIODO S2551				
SOLO -->	Pontos da regressao		Parametros da regressao			
	FAA	FARG	SOLO	FAA		
	-0.26604	-0.32103	Coeficiente		desvio	
	-0.25974	-0.30711	Linear	-0.236	0.001	
	-0.24543	-0.30064	Angular	-0.170	0.004	
	-0.24215	-0.29477	Determ.	0.9979	-	
	-0.23917	-0.28892				
	-0.23574		SOLO	FARG		
			Coeficiente		desvio	
			Linear	-0.289	0.001	
			Angular	-0.139	0.005	
			Determ.	0.9958	-	