



CNEN/SP

ipen Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares

AUTARQUIA ASSOCIADA A UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

MEDIDA DA UMIDADE DO SOLO COM SONDA DE NÊUTRONS

MARCOS DE CASTRO FALLEIROS

Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear.

Orientador:
Dr. Klaus Reichardt

São Paulo
1994

3122

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

MEDIDA DA UMIDADE DO SOLO COM SONDA DE NÊUTRONS

MARCOS DE CASTRO FALLEIROS



Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de "Doutor em Ciências" na Área de Tecnologia Nuclear.

Orientador: Dr. KLAUS REICHARDT

SÃO PAULO

1994

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP - IPEN

À **Angela**, minha esposa, que mostrou,
com carinho, que fazer política
universitária é muito importante,
mas fazer ciência é imprescindível.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

- Ao Professor Dr. KLAUS REICHARDT, pela orientação, estímulo constante, amizade e colaboração durante o trabalho.
- Ao Dr. Júlio C. Hadler Neto, Pedro J. Iunes, Ligia M.S. Navia e Sérgio R. Paulo, do Departamento de Raios Cósmicos e Cronologia do Instituto de Física da UNICAMP, pela essencial colaboração no desenvolvimento do "método do Monitor".
- Ao Dr. Osny O.O. Bacchi, João Eduardo Pilotto e José Ademir Rodrigues, pelas colaborações recebidas.
- Aos colegas contemporâneos da Seção de Física de Solos do CENA/USP, pelo apoio recebido.
- Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) pela oportunidade do estudo e desenvolvimento científico.
- Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura / USP que, através da Seção de Física de Solos, possibilitou a execução deste trabalho.
- Ao técnico Venâncio Ferreira (Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina), e ao desenhista João Geraldo (CENA/USP), pelas colaborações recebidas.
- Aos amigos do Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina, pelo incentivo constante.
- À CAPES, e à Universidade Estadual de Londrina, pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

	Pag.
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUÇÃO	xiii
OBJETIVOS	xv
1. ALGUNS ASPECTOS TEÓRICOS	1
1.1 O SOLO	1
1.1.1 A Umidade do Solo	6
1.1.2 A Compactação do Solo	7
1.1.3 A Porosidade do Solo	8
1.2 OS NÊUTRONS	9
1.2.1 A Produção de Nêutrons	10
1.2.2 A Detecção de Nêutrons	15
1.3 A SONDA DE NÊUTRONS	17
2. MATERIAL E MÉTODOS	21
2.1 A SONDA DE NÊUTRONS SOLO 25	22
2.1.1 Sonda com Blindagem	22
2.1.2 Sistema Eletrônico de Contagem	26
2.2 A ESFERA DE INFLUÊNCIA	28
2.2.1 A Esfera de Influência na água	28
2.2.2 A Esfera de Influência no solo	36
2.3 A CALIBRAÇÃO DA SONDA DE NÊUTRONS	41

Pag.

2.4 A VARIABILIDADE ESPACIAL DA MEDIDA DE UMIDADE DO SOLO	45
2.4.1 Erros envolvidos na determinação da umidade do solo	47
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
3.1 A ESFERA DE INFLUÊNCIA NA ÁGUA	49
3.2 A ESFERA DE INFLUÊNCIA NO SOLO	54
3.3 A CALIBRAÇÃO DA SONDA DE NÊUTRONS	64
3.4 A VARIABILIDADE DA MEDIDA DE UMIDADE	80
CONCLUSÕES	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
APÊNDICE	102

LISTA DE TABELAS

TABELA	Pag.
1 - Limites dos diâmetros das partículas nas classificações granulométricas da Sociedade Internacional de Ciência do Solo e do Departamento de Agricultura dos E.U.A.	3
2 - Composição química aproximada dos principais materiais primários do solo	4
3 - Composição de solos minerais de zonas tropical e temperada	5
4 - Dados de densidade global (dg), densidade das partículas (dp) e a porosidade total (pt) para diversos solos	8
5 - Seção de choque para espalhamento e seção de choque de absorção para nêutrons térmicos com energias de 0,025 eV	14
6 - Número de colisões necessárias para reduzir a energia de um nêutron rápido de 2 MeV para a energia de um nêutron térmico de 0,025 eV	18
7 - Calibrações das sondas de nêutrons 1 e 2 para o Latossolo Vermelho Amarelo utilizando o método da trincheira	72
8 - Calibrações da sonda 1 para Terra Roxa Estruturada (condição solo úmido), para o método da fração perdida e da trincheira	79
9 - Valores médios, variâncias, coeficientes de variação e número de amostras N necessárias para a maior precisão, nas medidas com sondas de nêutrons, em condição de solo seco	85

TABELA	Pag.
10 - Valores médios, variâncias, coeficientes de variação e número de amostras N necessárias para a maior precisão, nas medidas com sondas de nêutrons, em condição de solo úmido	86
11 - Valores obtidos para ρ_1 , ρ'_1 , h' e $N_v \varepsilon$	113

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	Pag.
1 - Esquema da sonda de nêutrons SOLO 25	21
2 - Esquema da sonda de nêutrons no perfil	25
3 - Esquema da sonda de nêutrons no interior de um reservatório com água, destacando a esfera de influência	29
4 - Esquema do posicionamento das sondas 1 e 2 para obter a medida do raio da esfera de influência na água, utilizando o método da aproximação	31
5 - Esquema da montagem experimental para o método do monitor	35
6 - Esquema experimental para o método da aproximação - solo	40
7 - Distribuição dos tubos de acesso de alumínio no campo	46
8 - CONTAGEM (c/s) x DISTÂNCIA ENTRE SONDAS (cm), destacando o intervalo obtido para o valor do raio da esfera de influência, para o método da aproximação	50
9 - Resultado da aplicação do método da interface destacando o raio da esfera de influência para a Sonda 1	51
10 - Resultado da aplicação do método da interface destacando o raio da esfera de influência para a Sonda 2	52
11 - Densidade de traços de fissão / tempo x distância fonte detetor (d)	53
12 - Resultado da aplicação do método da interface- solo, destacando o raio da esfera de influência para a condição solo seco	54

FIGURA	Pag.
13 - Resultado da aplicação do método da interface- solo, destacando o raio da esfera de influência para a condição solo úmido	55
14 - PROFUNDIDADE (cm) x CONTAGEM (c/s), destacando o intervalo obtido para o raio da esfera de influência para o método interface-solo 2 (em condição solo seco -para o recipiente com água) ...	57
15 - PROFUNDIDADE (cm) x CONTAGEM (c/s), destacando o intervalo obtido para o raio da esfera de influência para o método interface-solo 2 (em condição solo seco-para o refletor de nêutrons) ...	58
16 - PROFUNDIDADE (cm) x CONTAGEM (c/s), destacando o intervalo obtido para o raio da esfera de influência para o método interface-solo 2 (em condição solo úmido para o recipiente com água) ...	59
17 - PROFUNDIDADE (cm) x CONTAGEM (c/s), destacando o intervalo obtido para o raio da esfera de influência para o método interface-solo 2 (em condição solo úmido para o refletor de nêutrons) ..	60
18 - CONTAGEM (c/s) x DISTÂNCIA ENTRE SONDAS (cm), destacando o intervalo obtido para o valor do raio da esfera de influência para o método aproximação-solo, em condição solo seco	62
19 - CONTAGEM (c/s) x DISTÂNCIA ENTRE SONDAS (cm), destacando o intervalo obtido para o valor do raio da esfera de influência para o método aproximação-solo, em condição solo úmido	63
20 - Calibração Sonda 1 utilizando o método da trincheira (0 a 150cm de profundidade)	65
21 - Calibração Sonda 1 utilizando o método da trincheira, (0 A 150cm de profundidade)	66
22 - Calibração da Sonda 1 utilizando o método da trincheira (o a 150cm de profundidade)	67

FIGURA	Pag.
23 - Calibração da Sonda 2, utilizando o método da trincheira (0 a 150cm de profundidade)	69
24 - Calibração Sonda 2 utilizando o método da trincheira (25 a 150cm de profundidade)	70
25 - Calibração Sonda 2 utilizando o método da trincheira, utilizando refletor de nêutrons (0 a 150cm de profundidade)	71
26 - Calibração da sonda 1 utilizando o método da fração perdida (0 a 150cm de profundidade)	74
27 - Calibração da sonda 1 utilizando o método da trincheira para o solo Terra Roxa Estruturada (0 a 150cm de profundidade)	76
28 - Calibração da sonda 1 utilizando o método da trincheira para o solo Terra Roxa Estruturada (17 a 150cm de profundidade)	77
29 - Calibração da sonda 1 com refletor, utilizando o método da trincheira para o solo Terra Roxa Estruturada (0 a 150cm de profundidade)	78
30 - Distribuição da medida de umidade do solo, nas profundidades 15, 20, 25 e 30cm, para as condições de solos seco e úmido	81
31 - Distribuição da medida de umidade do solo, nas profundidades 35, 40, 45 e 50cm, para as condições de solos seco e úmido	82
32 - A medida de umidade do solo em função da profundidade para as condições de solos seco e úmido	83
33 - Aplicação do método da fração perdida nos dados obtidos pelo método da trincheira para a Figura 9	92
34 - Aplicação do método da fração perdida nos dados obtidos pelo método da interface para a Figura 10	93

RESUMO

MEDIDA DA UMIDADE DO SOLO COM SONDA DE NÊUTRONS

MARCOS DE CASTRO FALLEIROS

Com o objetivo de discutir e avaliar o problema da medida de umidade do solo com sonda de nêutrons, a metodologia é revista inicialmente a partir da discussão da esfera de influência da sonda de nêutrons para a água e para o solo. A sonda de nêutrons utilizada foi a SOLO 25, de fabricação francesa (NARDEUX). Os resultados para o raio da esfera de influência na água nos mostram que ele é de aproximadamente 10cm, enquanto que para o solo em condição agronomicamente mais seca é de aproximadamente 23cm e para a condição mais úmida, 17cm. O problema da medida de umidade do solo nas proximidades da superfície também é abordado do ponto de vista de sua variabilidade espacial e do "escape" de nêutrons térmicos para a atmosfera. São realizadas e discutidas várias calibrações da sonda de nêutrons para dois solos (Latossolo Vermelho Amarelo e Terra Roxa Estruturada) sendo que um novo método de calibração é apresentado, envolvendo a correção do número de nêutrons térmicos perdidos para a atmosfera, em medidas próximas a superfície do solo.

ABSTRACT

SOIL WATER CONTENT MEASURED THROUGH THE USE OF NEUTRON PROBES

MARCOS DE CASTRO FALLEIROS

With the objective of evaluating and discussing the problem of soil water content measurement through neutron probe, this study initiates the revision of the methodology with the discussion of the "sphere of influence" in water and in the soil. The neutron probe used is of French make (NARDEUX), type SOLO 25. Results indicate a sphere of influence radius in water of the order of 10cm, and for agronomically dry and wet soil, 23 and 17cm, respectively. The problem of soil water content measurement close soil surface is also analysed with respect to spatial variability and thermal neutron "escape" to the atmosphere. Several probe calibrations are made and discussed for two tropical latosols, one of them being newly introduced in the literature through this work. It involves the correction of the number of thermal neutrons lost to the atmosphere, for measurements performed close to soil.

INTRODUÇÃO

Apesar da técnica de moderação de nêutrons aplicada à medida de umidade do solo já estar em uso há mais de três décadas, as sondas de nêutrons encontradas comercialmente ainda possuem problemas técnicos que merecem maior atenção. Seu princípio é bastante simples, estando baseado na perda de energia dos nêutrons rápidos (moderação de nêutrons) através de choques com os núcleos leves no sistema solo-água-ar. Em geral, utiliza-se uma relação empírica entre a contagem de nêutrons térmicos ou moderados e a umidade do solo.

Em muitos estudos de física aplicada que envolvem a dinâmica da água no solo, as medidas de umidade do solo obtidas através desta técnica precisam ser melhor definidas, o que não tem sido feito pela maioria dos usuários de sondas de nêutrons. Um dos melhores manuais sobre sondas de nêutrons foi publicado por GREACEN (1981), entretanto, alguns aspectos nele abordados, precisam ser reconsiderados. Contribuições importantes são ainda as de HAVERCAMP et al.(1984) e de VAUCLIN et al. (1984). Estes últimos enfocaram principalmente os aspectos estatísticos das medidas. Mais recentemente, REICHARDT (1989) apresenta aspectos relevantes sobre o uso da sonda de nêutrons.

Mesmo com todas essas contribuições, o uso racional das sondas de nêutrons pode ser melhorado e o presente trabalho visa exatamente isso, uma vez que é considerável o número de pesquisadores que fazem uso desta metodologia.

OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo aprimorar a técnica de moderação de nêutrons, através dos seguintes aspectos:

- Analisar métodos de calibração e sugerir modificações que possam levar a menores erros na medida da umidade do solo.
- Analisar criticamente o "volume amostrado" pela sonda de nêutrons na medida da umidade do solo.
- Analisar criticamente o "volume amostrado" pela sonda de nêutrons em medidas realizadas na água.
- Procurar melhorar as medidas de umidade, nas proximidades da superfície do solo.

1. ALGUNS ASPECTOS TEÓRICOS

Neste capítulo serão feitas algumas considerações dos aspectos teóricos e dos conhecimentos básicos necessários para o entendimento deste trabalho, que são : o solo, que é o objeto estudado; a medida da umidade do solo, que é o problema abordado; os nêutrons (a moderação de nêutrons e a sonda de nêutrons) que oferecem suporte ao entendimento e descrição da metodologia a ser utilizada.

1.1 O SOLO

O solo é a camada externa e agriculturável da superfície terrestre (REICHARDT, 1985). Originou-se de rochas, que através dos processos físicos, químicos e biológicos de desintegração, decomposição e recombinação, se transformou com o decorrer das eras geológicas, em material poroso de características peculiares. Cinco são os fatores que reconhecidamente atuam na formação do solo.

- Material Original - Rocha (M)
- Tempo - Idade (I)
- Clima (C)
- Topografia (T)
- Organismos Vivos (O)

Simbolicamente o solo (S) pode ser definido como uma função da intensidade de atuação dos fatores acima descritos como:

$$S = f(M, I, C, T, O) \quad (1)$$

Da combinação dos fatores Idade, Topografia, Clima e Organismos Vivos, atuando com diferentes intensidades sobre o Material Original, resultam os diferentes tipos de solo.

O solo é um sistema complexo constituído por materiais sólidos, líquidos e gasosos. As partículas sólidas formam um arranjo poroso, de tal maneira que os espaços vazios têm capacidade de armazenar líquidos e gases.

A parte sólida do solo é constituída de materiais minerais e orgânicos, a parte líquida por uma solução de sais minerais e componentes orgânicos, enquanto a parte gasosa é constituída de ar com a composição um pouco diferenciada em relação à atmosfera circundante (REICHARDT, 1985).

Classifica-se as partículas do solo quanto ao tamanho em: argila, silte e areia. O termo tamanho é definido como sendo o diâmetro da esfera contida no maior comprimento da partícula.

A Tabela 1, apresenta de acordo com a Sociedade Internacional de Ciência do Solo (ISSC) e do Departamento de Agricultura dos E.U.A. (USDA), os limites das classificações granulométricas.

Tabela 1 - Limites dos diâmetros das partículas nas classificações granulométricas da Sociedade Internacional de Ciência do Solo e do Departamento de Agricultura dos E.U.A.

Diâmetro das Partículas (mm)		Tipo de partícula
ISSC	USDA	
$d < 0,002$	$d < 0,002$	Argila
$0,002 < d < 0,02$	$0,002 < d < 0,05$	Limo
$0,02 < d < 0,2$	$0,05 < d < 0,1$	Areia Muito Fina
	$0,1 < d < 0,25$	Areia Fina
$0,2 < d < 2,0$	$0,25 < d < 0,5$	Areia Média
	$0,5 < d < 1,0$	Areia Grossa
$d > 2,0$	$1,0 < d < 2,0$	Areia Muito Grossa
	$d > 2,0$	Cascalho

Essas partículas podem se agrupar por meio de agentes cimentantes, formando os agregados, que são classificados quanto à forma em: prismáticos, laminares, colunares, granulares e em bloco. A disposição de partículas e agregados definem a estrutura do solo. Como o arranjo das partículas do solo é muito complexo para permitir qualquer caracterização geométrica simples, não existe na prática um método para medir a estrutura do solo, por isso, o conceito de estrutura do solo é qualitativo (REICHARDT, 1985). Recentemente esforços têm

sido dirigidos no sentido de descrever quantitativamente o arranjo poroso do solo através da geometria fractal, como em TURCOTTE (1986), TYLER & WEATCRAFT (1989) e TYLER & WEATCRAFT (1990).

Qualitativamente, separamos a fração sólida do solo em quatro sub-frações: matéria primária, óxidos e sais, matéria orgânica e matéria secundária. Segundo REICHARDT (1985) uma descrição qualitativa das espécies de materiais primários existentes no solo é apresentada na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2 - Composição química aproximada dos principais materiais primários do solo (REICHARDT, 1985).

Mineral	SiO ₄	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅
Quartzo	100,0	-	-	-	-	-	-
Ortoclase	64,0	19,0	-	1,5	-	12,0	-
Albita	65,0	23,0	-	4,5	-	2,0	-
Anortita	42,0	33,0	-	15,0	-	1,0	-
Muscovita	45,0	35,5	1,0	-	1,5	9,5	-
Biotita	34,5	21,0	10,0	1,0	11,0	7,5	-
Hornblenda	48,0	9,5	3,0	7,5	14,0	1,0	-
Angita	50,0	6,5	3,0	21,0	13,0	-	-
Olivina	39,0	-	1,5	-	40,0	-	-
Apatita	-	-	-	54,5	-	-	41,0
Magnetita	-	-	69,0	-	-	-	-

Os óxidos, carbonatos e sulfatos podem conter elementos nutrientes. Os óxidos de ferro são

importantes como agentes de cimentação. Na Tabela 3 REICHARDT (1985), apresenta a composição dos principais óxidos encontrados em solos de climas diversos.

TABELA 3 - Composição de solos minerais de zonas tropical e temperada (REICHARDT, 1985).

Óxidos	Solo Tropical	Solo Temperado
SiO_2	3,00 - 30,00	60,00 - 95,00
Al_2O_3	10,00 - 40,00	2,00 - 20,00
FeO	10,00 - 70,00	0,50 - 10,00
CaO	0,05 - 0,50	0,30 - 2,00
MgO	0,10 - 3,00	0,05 - 1,00
K_2O	0,01 - 1,00	0,10 - 2,00
P_2O_5	0,01 - 1,50	0,03 - 0,30

O conteúdo de matéria orgânica na maioria dos solos, varia entre 1 a 10%. A matéria orgânica também possui grande superfície específica que é reativa devido à dissociação de grupos COOH, OH e NH_2 , produzindo ainda complexos com Fe, Mn, Ca, Mg e outros.

A fração do solo que mais decisivamente determina seu comportamento físico-químico é a fração argila, que é predominantemente constituída de matéria secundária. Ela possui a maior área específica da, ordem de $100 \text{ m}^2/\text{g}$, e por isso é a fração mais ativa em processos físico-químicos que ocorrem no solo. Partículas de argila

adsorvem água e íons sendo responsáveis pelos processos de expansão e contração quando um solo ganha ou perde água.

A areia e o silte têm áreas específicas relativamente pequenas (de 1 a 5m²/g) e, conseqüentemente, não mostram grande atividade físico-química. Elas são importantes na macroporosidade do solo onde predominam fenômenos capilares, quando o solo está próximo da saturação.

1.1.1 A Umidade do Solo

A água é retida no solo devido aos fenômenos de capilaridade e adsorção. Esta água retida pode ser medida, e o resultado é a umidade do solo. A umidade do solo pode ser expressa :

- à base de peso (μ) com dimensão g/g

$$\mu(\%) = \frac{m_a}{m_s} \times 100 \quad (2)$$

onde, m_a é a massa de água da amostra de solo e

m_s é a massa das partículas sólidas da amostra

- à base de volume (θ) em cm³/ cm³

$$\theta(\%) = \frac{v}{V} \times 100 \quad (3)$$

onde, v é o volume de água da amostra e

V o volume total da amostra

1.1.2 A Compactação do Solo

A compactação do solo está ligada à sua estrutura. Como o solo é material poroso, a mesma massa de material sólido pode ocupar diversos volumes, por compressão ou expansão, afetando assim sua estrutura, o arranjo dos poros, o volume de poros e as características de retenção de água (REICHARDT, 1987).

Geralmente qualifica-se a compactação através da massa específica, densidade global (dg) ou densidade do solo e através da porosidade total (pt).

A densidade global (dg) é definida pela relação entre a massa de uma amostra de solo e o volume por esta ocupado, sem alterar sua estrutura, assim:

$$dg = \frac{m_s}{V} \quad (4)$$

Da combinação das equações 3 e 4 obtemos a seguinte equação:

$$\theta(\%) = \frac{dg}{\rho_{H_2O}} \times [(m_u - m_s) / m_s] \times 100 \quad (5)$$

onde, ρ_{H_2O} é a densidade da água ;

m_u é a massa da amostra do solo úmido ;

m_s é a massa da amostra do solo seco.

1.1.3 A Porosidade do Solo

A porosidade total (pt) é definida pela relação entre o volume ocupado pelos poros e o volume total de solo definida pela equação abaixo (REICHARDT, 1987):

$$pt(\%) = \left(1 - \frac{dg}{dp} \right) \times 100 \quad (6)$$

onde dp é a massa específica das partículas sólidas do solo, também denominada densidade real do solo.

A Tabela 4 mostra como dg , dp e pt podem variar para alguns solos, para camadas de 0 a 20cm de profundidade (FREIRE *et al*, 1980).

Tabela 4 - Dados de densidade global (dg), densidade das partículas (dp) e a porosidade total (pt) para diversos solos (FREIRE *et al*, 1980).

SOLO	dg ($g \cdot cm^{-3}$)	dp ($g \cdot cm^{-3}$)	pt (%)
Podzólico Vermelho Amarelo	1,2	2,6	53,8
Terra Roxa Estruturada Eutrófico	1,0	2,7	62,9
Latossolo Vermelho Escuro	1,1	2,7	59,2
Latossolo Vermelho Amarelo	1,1	2,6	57,7
Latossolo Roxo Distrófico	1,0	2,8	64,3

1.2 OS NÊUTRONS

A descoberta do nêutron, em 1932, levou à hipótese de que os núcleos atômicos são constituídos por prótons e nêutrons, utilizada pela primeira vez como base de uma teoria do núcleo atômico, por Heisenberg (Kaplan, 1963).

A hipótese próton-nêutron, considera ser o número de massa A de um dado núcleo atômico, o número de prótons Z (carga elétrica nuclear) mais o número de nêutrons, isto é, o número de nêutrons de um dado núcleo atômico é $A - Z$.

Os nêutrons, por serem partículas pesadas e sem carga elétrica, têm propriedades que os tornam de grande interesse na ciência e tecnologia. No estudo dos átomos são importantes as reações nucleares induzidas por nêutrons. Os nuclídeos produzidos artificialmente, além de fornecerem informações sobre os núcleos, têm aplicações em outras áreas da ciência, como : Medicina, Química, Biologia e Agronomia.

1.2.1 A Produção de Nêutrons

Segundo Kaplan (1963) as reações nucleares são as únicas fontes de nêutrons. As fontes de fotonêutrons (onde os nêutrons são produzidos pela desintegração do berílio e deutério induzida por raios gama de nuclídeos radioativos) são frequentemente utilizadas, pois os nêutrons resultantes são praticamente monoenergéticos. A maior parte dessas fontes tem por base as reações ${}^9\text{Be}(\gamma, n){}^8\text{Be}$ e ${}^2\text{H}(\gamma, n){}^1\text{H}$.

Os nêutrons também são produzidos em aceleradores de partículas ou ainda através da fissão nuclear espontânea, como no caso do ${}^{252}\text{Cf}$.

Classifica-se os nêutrons, quanto à sua energia (E_n), como abaixo (BURCHAM, 1974):

- nêutrons térmicos $E_n < 0,1 \text{ eV}$
- nêutrons intermediários $0,1 \text{ eV} \leq E_n < 1 \text{ MeV}$
- nêutrons rápidos $1 \text{ MeV} \leq E_n < 10 \text{ MeV}$
- nêutrons relativísticos $E_n \geq 10 \text{ MeV}$

Os nêutrons produzidos pelas reações (γ, n) descritas acima, em aceleradores de partículas ou resultantes da fissão espontânea, são nêutrons com $E_n > 0,1 \text{ eV}$.

Os nêutrons térmicos podem ser obtidos a partir de nêutrons de energias maiores, passando-os através de materiais nos quais possam perder a maior parte de sua energia em espalhamento por colisões (inelásticas e elásticas).

Os nêutrons perdem energia através de colisões inelásticas com núcleos médios ou pesados e através de colisões elásticas com núcleos leves.

O espalhamento por colisões inelásticas é mais provável para nêutrons com energias superiores a 1,0 MeV, enquanto que o espalhamento por colisões elásticas para energias menores. O processo no qual os nêutrons perdem energia transformando-se em nêutrons térmicos é denominado termalização ou moderação de nêutrons.

Sendo uma fonte de nêutrons rápidos envolvida por uma grande massa de material contendo núcleos leves, os nêutrons se moverão através deste material perdendo energia à medida que vão sofrendo espalhamento por colisões. Caso a seção de choque de absorção (σ_a) do material utilizado para nêutrons rápidos seja pequena, comparada com a seção de choque de espalhamento (σ_s), os nêutrons perdem energia, até que esta seja comparável com a energia do movimento térmico dos núcleos do material. Os nêutrons são assim denominados nêutrons térmicos. Materiais com estas especificações são chamados moderadores. Os moderadores mais frequentemente utilizados na prática são água, parafina, plástico e o grafite.

Para o melhor entendimento do nosso trabalho definimos a seguir alguns parâmetros que entendemos necessários:

O primeiro parâmetro está associado ao Poder de Moderação, que aqui chamaremos de **PM**, definido pela seguinte equação:

$$PM = \zeta N \sigma = \frac{\zeta N_0 \rho \sigma_s}{A} = \zeta \Sigma_s \quad (7)$$

onde N é o número de átomos por centímetro cúbico do moderador, ρ sua densidade, N_0 o número de Avogadro, σ_s a seção de choque para espalhamento, Σ_s a seção macroscópica de choque para espalhamento, ou seja a probabilidade de que um nêutron seja espalhado por centímetro e ζ a perda de energia em $\text{Log } E$ por colisão. Assim a dimensão do Poder de Moderação é cm^{-1} e pode ser interpretado como a perda média em $\text{Log } E$ por centímetro da trajetória do nêutron, ou seja o Poder de Moderação deve ser grande para que um dado material seja considerado um bom moderador.

O segundo parâmetro é a Razão de Moderação que aqui será denominado **RM**, definido pela seguinte equação:

$$RM = \frac{\zeta \Sigma_s}{\Sigma_a} = \frac{\zeta \sigma_s}{\sigma_a} \quad (8)$$

onde σ_a é a seção de choque de absorção.

A Razão de Moderação pode ser interpretada como a medida do Poder de Moderação relativo à capacidade de absorção de nêutrons de um dado material.

O terceiro parâmetro está associado ao número de colisões (**NC**) que um nêutron rápido, de determinada energia (E_{nr}), sofre até reduzir sua energia à de um nêutron térmico (E_{nt}) e é definido pela seguinte equação:

$$NC = \text{Ln} (E_{nr}/E_{nt}) / \zeta \quad (9)$$

A Tabela 5 mostra a seção de choque de espalhamento e seção de choque de absorção para nêutrons térmicos com energia de 0,025 eV (LOVESEY,1986):

TABELA 5 - Seção de choque para espalhamento e seção de choque de absorção para nêutrons térmicos com energias de 0,025 eV (LOVESEY, 1986).

ISÓTOPOS	ABUNDÂNCIA (%)	σ_s (barn)	σ_a (barn)
¹ H	100,00000	81,70	0,3326
³ He	0,00014	5,00	5336,0000
⁷ Li	92,50000	1,40	0,0454
⁹ Be	100,00000	7,10	0,0076
¹² C	98,89000	5,60	0,0035
¹⁴ N	99,63000	11,00	1,9000
¹⁶ O	99,76200	2,40	0,0002
²³ Na	100,00000	0,40	0,5300
²⁴ Mg	78,99000	4,10	0,0510
²⁷ Al	100,00000	1,10	0,2310
²⁸ Si	92,23000	2,20	0,1770
³¹ P	100,00000	3,20	0,1720
³² S	95,02000	1,00	0,5300
³⁵ Cl	75,77000	21,20	44,1000
³⁹ K	93,25800	2,90	2,1000
⁴⁰ Ca	96,94000	3,30	0,4100
⁴⁸ Ti	73,80000	4,24	7,8000
⁵² Cr	83,79000	3,40	0,7600
⁵⁵ Mn	100,00000	2,00	13,3000
⁵⁶ Fe	91,72000	12,80	2,6000
⁵⁹ Co	100,00000	17,60	4,5000
⁶³ Cu	69,17000	5,54	4,5000
⁶⁴ Zn	48,60000	3,44	0,7600
⁷⁹ Br	50,69000	6,12	11,0000
⁸⁸ Sr	82,58000	6,40	0,0580
¹⁰⁷ Ag	51,83000	5,09	38,0000
¹¹⁵ In	95,72000	2,60	202,0000
¹⁹⁷ Au	100,00000	7,81	98,6500
²⁰⁸ Pb	52,40000	11,10	0,0005
²³⁸ U	99,27000	9,20	2,7000

1.2.2 A Detecção de Nêutrons

Por serem partículas eletricamente neutras, a detecção de nêutrons depende de efeitos secundários provenientes de suas interações com a matéria, tais como:

- absorção de nêutrons por núcleos, com emissão imediata de partículas eletricamente carregadas;
- absorção de nêutrons com a fissão dos núcleos compostos resultantes;
- absorção de nêutrons com a formação de nuclídeos radioativos, cujas atividades podem ser medidas;
- espalhamento de nêutrons por núcleos leves, onde o recuo destes produz ionização.

Detetores de nêutrons baseados no primeiro tipo de interação descrita acima pode ser uma câmara de ionização ou um contador proporcional.

O processo de fissão, segunda interação descrita, pode ser utilizado para a detecção de nêutrons, pois os fragmentos de fissão são núcleos eletricamente carregados (este processo será utilizado neste trabalho, e está descrito na seção 2.2.1).

A terceira interação está fundamentada no fato de que muitas reações nucleares induzidas por nêutrons resultam em núcleos produtos radioativos, este método denominado método de ativação, pode ser utilizado para nêutrons nas diferentes faixas de energias, desde que os materiais absorvedores sejam apropriados.

O método mais comum de detecção de nêutrons térmicos, tem por base a ionização produzida pelos prótons que recuam no espalhamento por colisões de nêutrons(quarta interação). Este método será utilizado neste trabalho e está descrito na seção 2.1.1 .

1.3 A SONDA DE NÊUTRONS

A sonda de nêutrons é um cilindro metálico selado contendo: fonte radioativa (que emite nêutrons rápidos), detetor para nêutrons térmicos e pré-amplificador.

A geometria da sonda, atividade de sua fonte de nêutrons, tipo de detetor e pré-amplificador variam conforme o fabricante.

O princípio básico da medida de umidade do solo pela sonda de nêutrons, está no fato de detetar nêutrons termalizados produzidos pela interação com o solo dos nêutrons rápidos de sua própria fonte , através da absorção e do espalhamento de nêutrons por colisões.

Como já abordamos na seção 1.2.2 a absorção de nêutrons pelos núcleos depende de sua energia e do tipo do núcleo alvo, sendo que para haver a captura ou absorção de nêutrons, seria necessário que os elementos presentes no solo tivessem uma seção de choque de absorção (σ_a) maior do que a seção de choque de espalhamento (σ_s), tornando a Razão de Moderação (equação 8) muito baixa.

O espalhamento de nêutrons por colisões elástica ou inelástica é o processo mais importante no qual se baseia o funcionamento da sonda de nêutrons (BACCHI & REICHARDT, 1990).

A Tabela 6 mostra resultados da aplicação da equação 9, que apresenta o número de colisões necessárias para reduzir a energia de um nêutron rápido de 2 MeV para um nêutron térmico de 0,025 eV .

Tabela 6 - Número de colisões necessárias para reduzir a energia de um nêutron rápido de 2MeV para a de um nêutron térmico de 0,025 eV (KAPLAN, 1963).

Elemento	ζ	n ^o de colisões
Hidrogênio	1,0000	18
Deutério	0,7250	25
Hélio	0,4250	43
Lítio	0,2680	67
Berílio	0,2080	87
Carbono	0,1580	114
Oxigênio	0,1200	150
Urânio	0,0084	2150

Assim sendo, utilizando a equação 7, podemos observar, que dos elementos da Tabela 6, o hidrogênio é o que possui maior Poder de Moderação, ou seja, é um bom moderador de nêutrons rápidos. Considerando que a água (H_2O) é constituída por hidrogênio, podemos esperar que quanto maior for a quantidade de água no solo, maior será a probabilidade de termos um número maior de nêutrons na "nuvem" em torno da sonda, sendo maior o número de nêutrons térmicos detetados, pois o número de nêutrons térmicos por unidade de volume em cada ponto desta "nuvem" permanece constante, sendo proporcional ao conteúdo de água no solo (sua umidade).

Uma vez que o detetor de nêutrons térmicos esteja colocado no volume da "nuvem de nêutrons", a taxa de contagem é proporcional ao conteúdo de água (θ) no mesmo volume de solo. O instrumento é então calibrado através de amostras de solo retiradas do volume abrangido pela "nuvem de nêutrons", nas quais são tomadas as medidas de θ através do método gravimétrico.

Outros componentes do solo também apresentam hidrogênio na sua constituição, mas nesses casos, tais componentes não variam em sua concentração e são levados em consideração na calibração da sonda de nêutrons.

A grande vantagem da utilização das sondas de nêutrons na determinação da umidade do solo frente a outros métodos, é o aspecto muito menos destrutivo da técnica que só acontece uma única vez: quando da introdução do tubo de acesso para a sonda.

O tubo de acesso de alumínio é introduzido no solo após ter sido feito um orifício com um trado, cujo diâmetro é compatível com o do tubo. Instalado o tubo de acesso, aí então através deste podemos introduzir a sonda de nêutrons no perfil do solo à profundidade desejada.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 1 mostra esquematicamente a sonda de nêutrons SOLO 25 da Nardeux (França), que foi utilizada no presente trabalho.

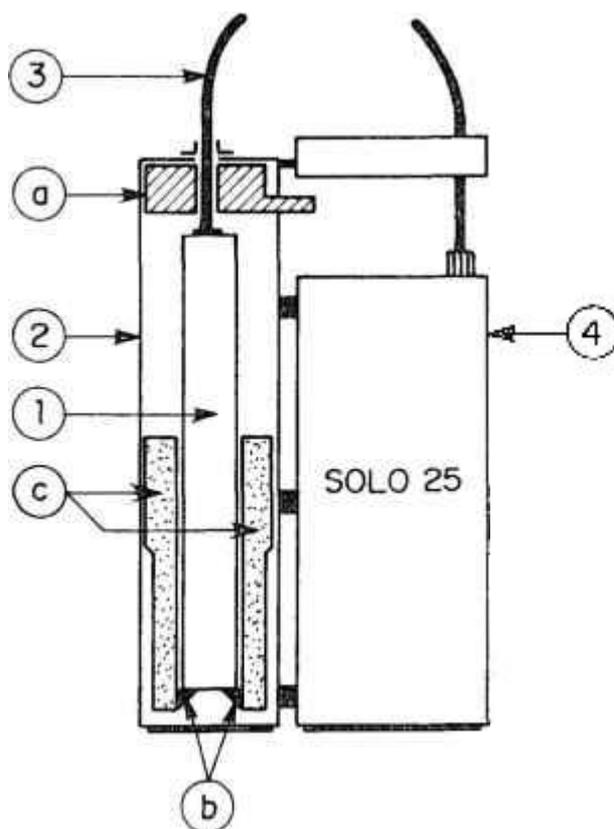


Figura 1 - Esquema da sonda de nêutrons SOLO 25, onde:

- 1- sonda contendo a fonte de Am-Be, o detetor de nêutrons térmicos (^3He) e o pré-amplificador.
- 2- caixa de blindagem composta pelo contador de profundidade (a), dispositivo de trava (b) para manter a sonda dentro da caixa de blindagem de polietileno (c).
- 3- cabo coaxial.
- 4- caixa de aço inox, contendo os circuitos eletrônicos e bateria.

2.1 A SONDA DE NÊUTRONS SOLO 25

A SOLO 25 é constituída basicamente por duas partes: Sonda com blindagem e o sistema eletrônico de contagem.

2.1.1 Sonda com Blindagem

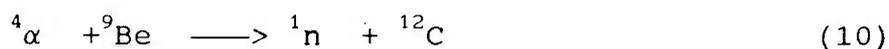
A sonda utilizada é um cilindro metálico selado de 3,9 cm de diâmetro e 30 cm de comprimento. Neste cilindro temos, de acordo com o fabricante:

- Uma fonte de nêutrons do tipo SNA 2 de amerício-berílio com uma atividade de 1,48 GBq com uma emissão neutrônica de $2,3 \times 10^4 \text{ n seg}^{-1} / 4\pi$ localizada a 11cm da base do cilindro metálico (segundo o fabricante).

- Um detetor de nêutrons térmicos a hélio-3 (^3He) com diâmetro de 2,54 cm e comprimento de 15cm a uma pressão de 4 atm.

- Um pré-amplificador. O sinal é conduzido por um cabo de 5m de comprimento ao sistema eletrônico de contagem.

A fonte é uma mistura de amerício-241 (emissor alfa com $E_\alpha = 5,48$ MeV e emissor gama com $E_\gamma = 59,6$ keV) e berílio-9 em pó. As partículas alfa incidem sobre os núcleos de berílio, resultando a seguinte reação:



produzindo nêutrons (^1n) rápidos, com energias que variam de 2 MeV a 10 MeV aproximadamente, apresentando no intervalo de 2 a 3 MeV a energia mais freqüente (LORCH, 1973).

Cabe aqui ressaltar que um ponto muito importante é uma boa proteção radiológica devido, a emissão de partículas alfa, raios gama e nêutrons. A blindagem da sonda, que é sua própria caixa (Figura 1), foi projetada de modo a garantir níveis permissíveis de radiação ao operador, quando a sonda está dentro da blindagem. As sondas são construídas para que a fonte radioativa deixe a blindagem e penetre no tubo de acesso, evitando-se exposição excessiva ao operador (Figura 2).

A sonda é então colocada, através do tubo de acesso, que é de alumínio, na profundidade desejada no perfil do solo (Figura 2). Assim os nêutrons rápidos atravessam as paredes do tubo de alumínio (o alumínio é "transparente" para nêutrons rápidos) interagindo com o solo (BACCHI & REICHARDT,1990) formando o que podemos chamar de uma "nuvem de nêutrons", de forma aproximadamente esférica, com limite externo difuso, sendo difícil de ser definido precisamente. Esta "nuvem de nêutrons" determina o que se chama de "esfera de influência" cujo raio varia principalmente em função do teor de água presente no solo (umidade). É esta interação com o solo que permite estimar a umidade do solo.

Neste trabalho consideraremos o volume da esfera de influência ("núvem de nêutrons"), aquêle determinado por aproximadamente 90% dos nêutrons rápidos que foram termalizados pelos sistemas, água ou água-ar ou água-solo-ar.

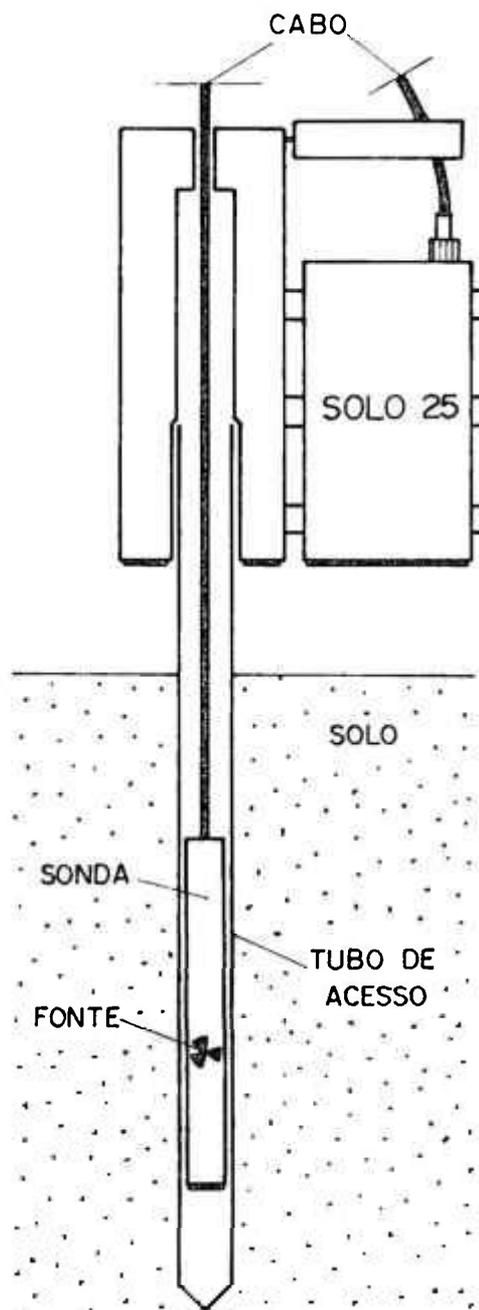


Figura 2 - Esquema da sonda de nêutrons no perfil do solo.

Os nêutrons térmicos resultantes da interação com o solo, incidem em uma câmara que contém ^3He (detetor), que tem alta seção de choque de absorção para nêutrons térmicos (Tabela 5), ocorrendo a seguinte reação nuclear:



Os prótons e trítions resultantes irão ionizar o gás ^3He , e os elétrons da ionização serão então capturados no catodo da câmara, gerando assim um pulso de corrente elétrica, sendo proporcional ao número de incidentes. Cada contagem corresponde a um impulso originado por um nêutron térmico que atingiu o detetor.

2.1.2 Sistema Eletrônico de Contagem

O sistema eletrônico de contagem da SOLO 25 é constituído basicamente por:

- amplificador
- fonte de alta voltagem
- contador
- relógio
- bateria recarregável
- microprocessador

Como o tempo de contagem é crítico do ponto de vista estatístico, a sonda de nêutrons SOLO 25 tem opções para tempo de contagem, para o uso adequado em cada situação diferente.

A função do microprocessador é transformar o número de contagens em contagens por segundo (c/s).

2.2 A ESFERA DE INFLUÊNCIA

O princípio da medida de umidade do solo com sonda de nêutrons envolve o estabelecimento da "nuvem" de nêutrons térmicos em torno da sonda, que define a "esfera de influência" (ver seção 2.1).

Para medidas próximas a superfície do solo, parte da esfera de influência está na atmosfera, o que diminui o número de nêutrons térmicos detectados, podendo acarretar medidas incorretas. É de grande importância conhecer o raio da esfera de influência, para definir quão próximo da superfície podemos realizar medidas sem que nêutrons térmicos escapem para a atmosfera.

2.2.1 A Esfera de Influência na Água

Por ser a água o elemento escolhido neste trabalho como padrão para contagens da SOLO 25, entendemos ser de grande importância o estabelecimento do raio da esfera de influência da sonda na água (Figura 3).

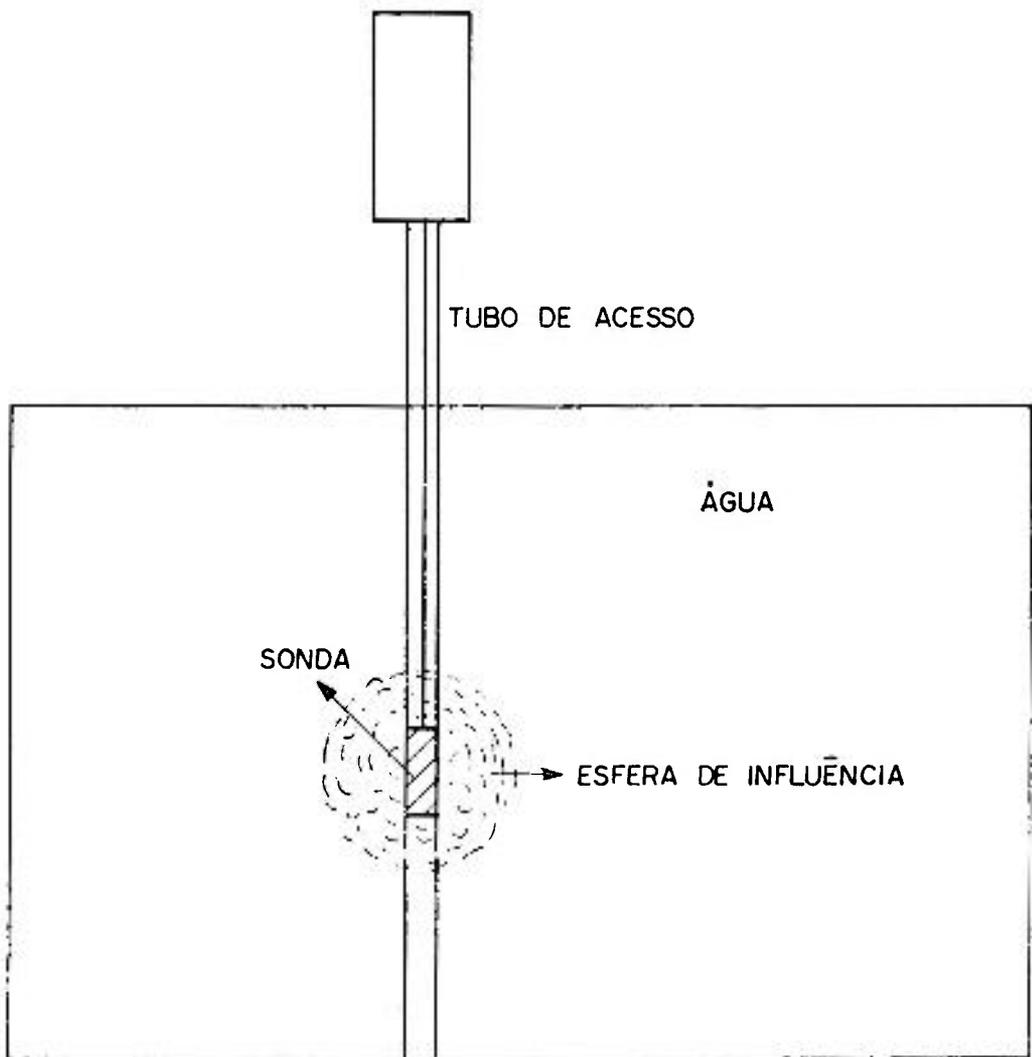


Figura 3 - Esquema da sonda de nêutrons no interior de um reservatório com água, destacando a esfera de influência.

Para tanto utilizamos três métodos de medidas para o estabelecimento do raio da esfera de influência da sonda SOLO 25 na água.

No primeiro método (desenvolvido neste trabalho), aqui denominado "método da aproximação", no qual duas sondas são gradativamente aproximadas até que se observe a influência na contagem de uma sobre a outra, fizemos uso dos seguintes materiais:

- 2 sondas SOLO 25 (Sonda 1 e Sonda 2)
- 2 tubos de acesso de alumínio
- 1 recipiente para água - 500 litros

Inicialmente mantivemos, em posição central (ambas a 30cm de distância das bordas laterais do recipiente) à mesma profundidade, as sondas 1 e 2 separadas por uma distância (d) de 40cm. A sonda 1 foi mantida fixa e a sonda 2 móvel.

A sonda 2 foi, em intervalos de 2cm, movimentada em direção à sonda 1. A cada mudança de posição da sonda 2, eram realizadas 5 medidas consecutivas em ambas as sondas (Figura 4).

O objetivo deste método foi estabelecer a partir de que distância entre as sondas, suas contagens passariam a sofrer influência mútua, podendo indicar assim o raio da esfera de influência.

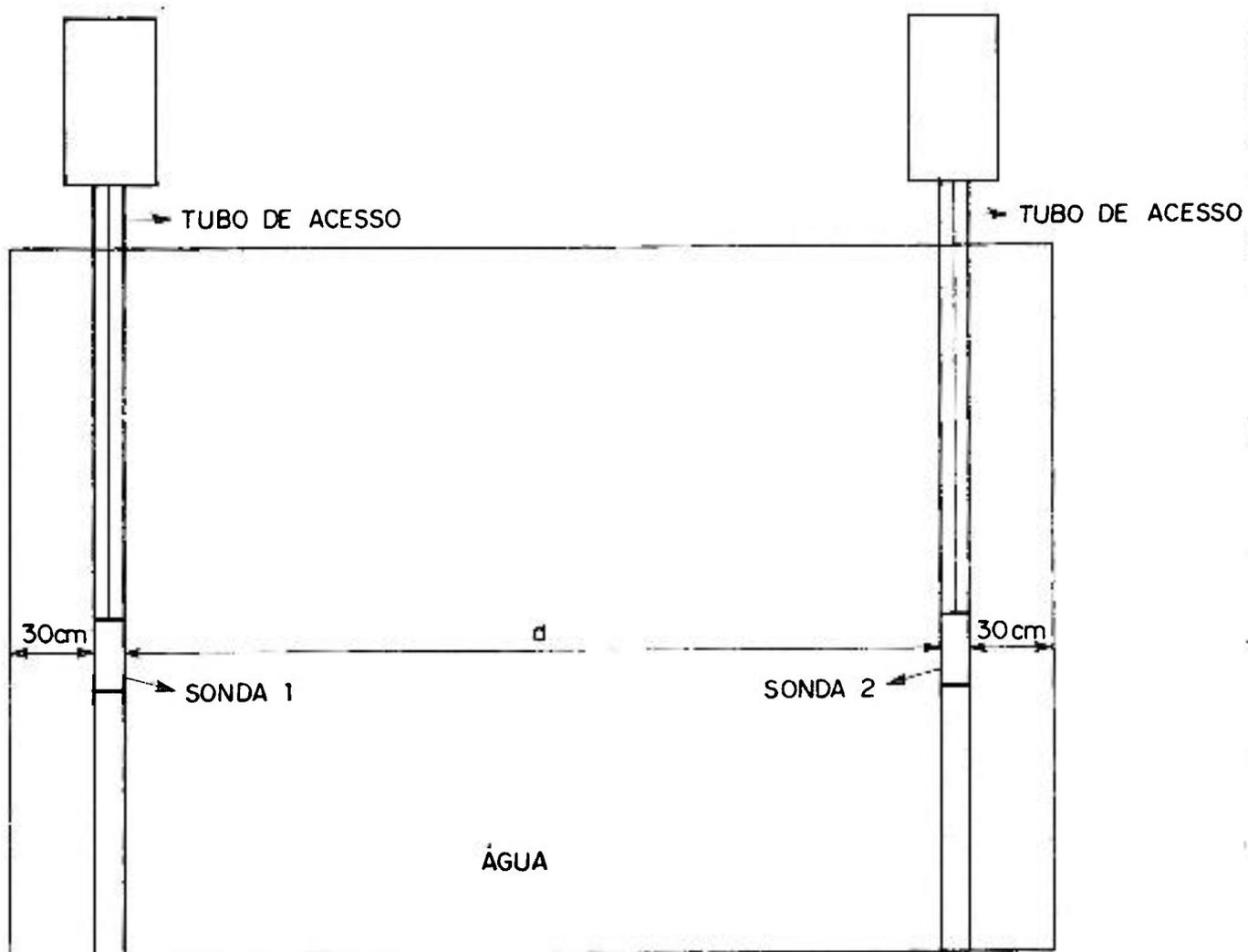


Figura 4 - Esquema do posicionamento das sondas 1 e 2 para obter a medida do raio da esfera de influência na água, utilizando o método da aproximação.

No segundo método utilizado, aqui denominado "método da interface", no qual uma sonda é colocada em profundidade dentro de um tubo de acesso na água e é movimentada em direção a interface água-ar (superfície da água), fizemos uso dos seguintes materiais.

- 2 sondas SOLO 25
- 1 recipiente para água - 250 litros
- 1 tubo de acesso de alumínio

A sonda 1 foi inicialmente colocada a 30cm de profundidade no tubo de acesso na água. Em seguida ela foi movimentada em direção à superfície da água, em intervalos de 1cm. A cada mudança de profundidade, 10 medidas consecutivas eram realizadas na sonda de nêutrons.

O mesmo procedimento para a sonda 1, foi também realizado para a sonda 2.

O objetivo deste método foi estabelecer até que profundidade as contagens das sondas se mantinham aproximadamente constantes, pois na diminuição da contagem em virtude do "escape" de nêutrons para a atmosfera podemos determinar o raio da esfera de influência.

No terceiro método (desenvolvido neste trabalho), aqui denominado "método do monitor", no qual são utilizados detetores de fragmentos de fissão (mica muscovita) para a avaliação da distribuição dos nêutrons térmicos, através de um conversor (U_3O_8), em torno da fonte da sonda, fizemos uso dos seguintes materiais:

- 1 sonda SOLO 25 (Sonda 1)
- 1 recipiente para água - 500 litros
- 1 tubo de acesso de alumínio
- 2 detetores (mica muscovita)
- 1 monitor (ou conversor) de U_3O_8
- 2 filtros de cádmio
- 1 suporte de alumínio
- 1 suporte de alumínio de tamanho variável

Neste trabalho apresentamos uma nova técnica de medida de baixos fluxos estacionários de nêutrons térmicos, em colaboração com o Laboratório de Cronologia (J.C. Hadler Neto., P.J. Iunes, L.M.S. Navia e S.R. Paulo) do Departamento de Raios Cósmicos e Cronologia da UNICAMP. O monitor (ou conversor) de nêutrons utilizado foi o U_3O_8 , com 3,3cm de diâmetro, 0,23cm de altura e $7,2g.cm^{-3}$ de densidade, justaposto a detetores de traços de fissão (lâminas de mica muscovita). A composição isotópica do urânio é natural.

Quando este monitor é irradiado em um fluxo de nêutrons térmicos, as fissões induzidas no ^{235}U são registradas na mica, assim a densidade de traços de fragmentos de fissão é proporcional ao fluxo de nêutrons térmicos (ver Apêndice).

O monitor foi vedado e colocado a uma distância (d) da fonte da sonda durante um intervalo de tempo (t), dentro de um recipiente com água. O arranjo experimental da Figura 5, nos permitiu realizar medidas em diferentes distâncias (d) e tempos (t).

A caracterização do monitor e detalhes da técnica desenvolvida, estão apresentados no Apêndice deste trabalho.

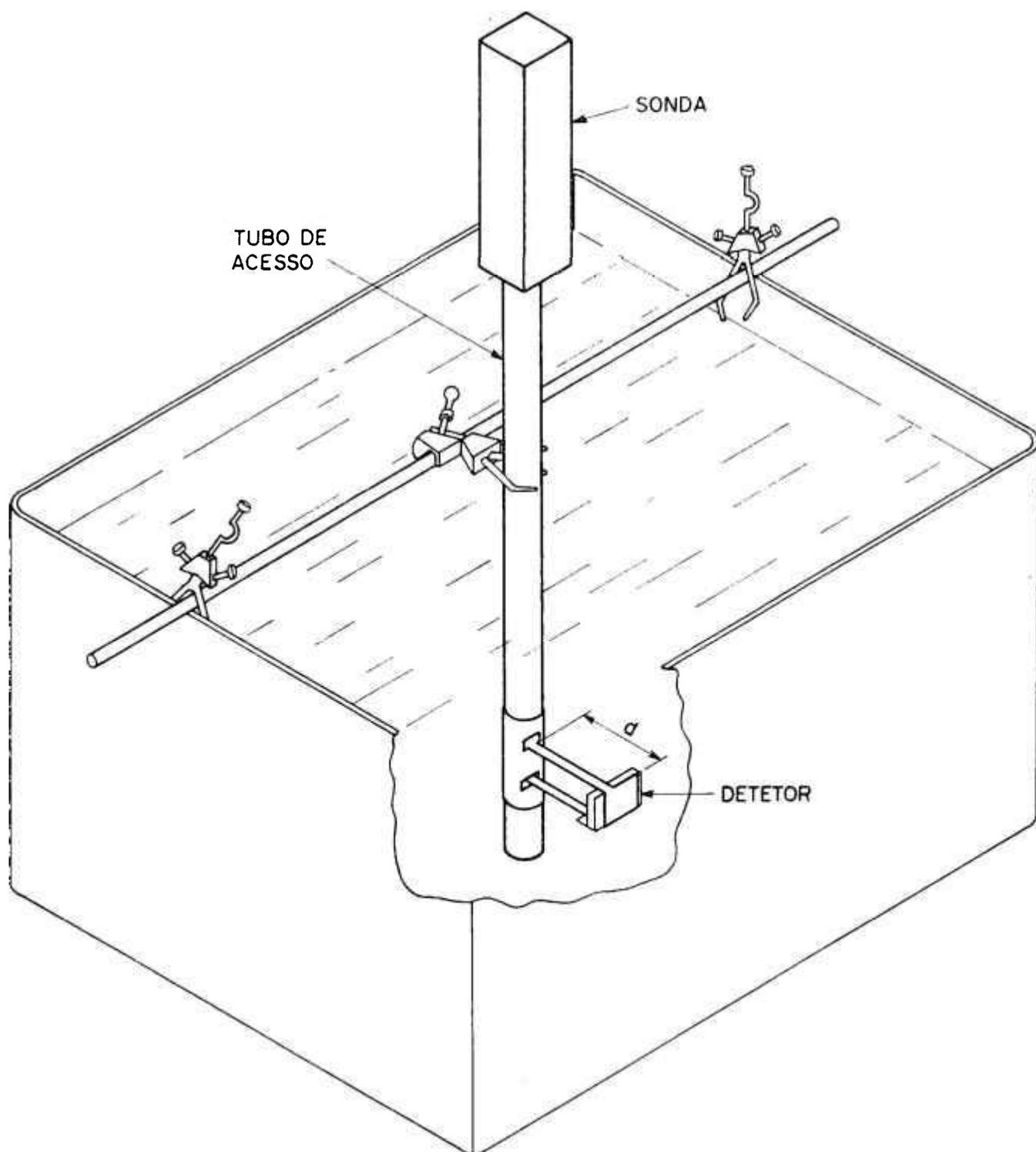


Figura 5 - Esquema da montagem experimental para o método do monitor.

2.2.2 A Esfera de Influência no Solo

Para a determinação da esfera de influência da SOLO 25 para o solo (seco e úmido) desenvolvemos três métodos realizados no Posto Meteorológico da ESALQ, cujo solo é Terra Roxa Estruturada (TRE) com 64% de argila, 7,5% de silte e 28,5% de areia.

Para a esfera de influência no solo o primeiro método desenvolvido, aqui denominado "método da interface - solo", no qual a sonda inicialmente colocada em profundidade no solo é movida em direção à interface solo-ar ou solo-água, fizemos uso dos seguintes materiais:

- 1 sonda SOLO 25 (sonda 1)
- 2 tubos de acesso de alumínio
- 2 trincheiras no solo - 12m³ cada

O tubo de acesso foi instalado na parte central da parcela, estabelecendo neste plano (6m²) a superfície do solo. Inicialmente as medidas foram realizadas em condição de solo seco. Entenda-se condição de solo seco, por um solo agronomicamente seco (época não chuvosa).

Inicialmente a sonda foi colocada a 60cm de profundidade e movimentada em direção à superfície do solo, em intervalos de 1cm. A cada mudança na profundidade da sonda, eram tomadas 5 medidas consecutivas, sendo que a partir de 10cm de profundidade até 20cm acima da superfície do solo, os intervalos de movimentação da

sonda foram de 5cm.

A parcela foi então coberta com uma camada de plástico e inundada com água formando uma reservatório de $12m^3$, sendo em seguida repetido o mesmo procedimento anterior de medidas.

Posteriormente, em época apropriada, o mesmo procedimento foi utilizado para o solo em condição de solo úmido. Entenda-se por condição de solo úmido por medidas tomadas em um solo agronomicamente úmido (em época chuvosa).

No segundo método desenvolvido aqui, denominado "método da interface-solo 2", onde a sonda colocada em profundidade no solo é movida em direção à interface solo-ar, solo-água e solo-refletor de nêutrons, (o refletor de nêutrons utilizado nos experimentos deste trabalho foi uma placa de polietilino de 40cm de largura, 40cm de comprimento e 6cm de altura com um furo central para passar através dos tubos de acesso). Este refletor de nêutrons foi fornecido pelo fabricante da SOLO 25. Fizemos uso dos seguintes materiais:

- 1 sonda SOLO 25 (sonda 1)
- 1 tubo de acesso de alumínio
- 1 parcela de 2m x 2m
- 1 recipiente de plástico para água
- 1 refletor de nêutrons

Introduzido o tubo de acesso na região central da parcela, a sonda de nêutrons foi então colocada a 50cm de profundidade e em intervalos de 5cm foi movimentada em direção à superfície do solo. A cada mudança na profundidade da sonda de nêutrons, 5 medidas eram realizadas consecutivamente.

A seguir, através de um orifício feito na região central do recipiente de plástico, este foi ajustado ao tubo de acesso, vedando a junção entre o recipiente e o tubo de acesso. Em seguida, introduziu-se água, de forma a preencher todo o volume do recipiente.

A sonda foi então colocada novamente a 50cm de profundidade e repetiu-se o mesmo procedimento de medidas.

Comparando a leitura das contagens sem e com o recipiente de plástico com água, podemos determinar o raio da esfera de influência para este solo.

O mesmo procedimento experimental descrito acima, foi também realizado substituindo o recipiente de plástico pelo refletor de nêutrons.

Para este método utilizamos o solo em condições de solo seco e úmido.

No terceiro método desenvolvido, aqui denominado "método da aproximação - solo", fizemos uso dos seguintes materiais:

- 2 sondas SOLO 25 (sonda 1 e sonda 2)
- 5 tubos de acesso de alumínio
- 1 parcela de solo com 2m x 3m

Na parcela experimental de solo foram instalados 5 tubos de acesso paralelos entre si, onde os 4 primeiros tubos tinham 20cm de separação e o quinto 30cm, conforme Figura 6.

Inicialmente as sondas 1 e 2 foram colocadas na mesma profundidade (60cm), nos tubos 1 e 5 respectivamente, separadas de 90cm entre si, em seguida 5 medidas simultâneas foram realizadas em ambas as sondas . A seguir fixamos a sonda 1 , no tubo 1, e a sonda 2 foi retirada do tubo 5 e colocada na mesma profundidade no tubo 4, ficando separadas de 60cm, sendo realizada novamente 5 medidas em cada sonda simultaneamente. Da mesma maneira foram realizadas medidas para a sonda 2 nos tubos 3 e 2, sempre na mesma profundidade da sonda 1 (60cm). Posteriormente a sonda 1 foi colocada a 60cm de profundidade no tubo 3 e a sonda 2, à mesma profundidade nos tubos 5 e 4, e também aqui 5 medidas simultâneas foram realizadas em cada situação, o que nos permitiu a obtenção de medidas com as sondas separadas a 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 90cm entre si.

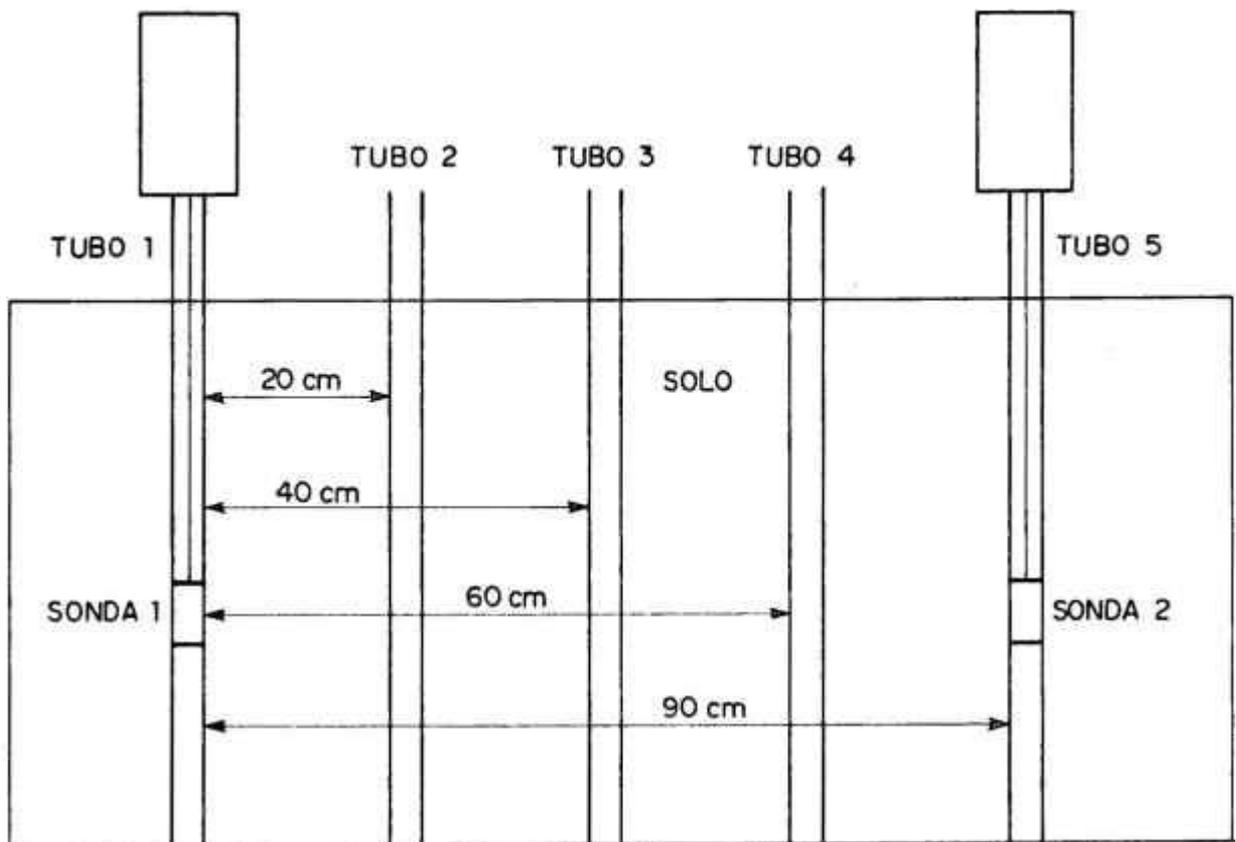


Figura 6 - Esquema experimental para o método da aproximação - solo.

2.3 A CALIBRAÇÃO DA SONDA DE NÊUTRONS

A calibração da sonda de nêutrons consiste em se obter uma relação matemática entre a leitura do aparelho (c/s) e a umidade do solo θ ($\text{cm}^3\text{H}_2\text{O} / \text{cm}^3\text{Solo}$).

A amostragem é o principal problema de uma calibração. A mesma amostra de solo exposta à sonda de nêutrons deve em princípio ser amostrada pelo método gravimétrico para a obtenção do valor de θ pelas equação 2 ou 3.

O método gravimétrico, é um método tradicional de medida da umidade de solo, que consiste na coleta da amostra de solo em anéis volumétricos. Determina-se a massa da amostra de solo úmido (m_u) coletada no perfil do solo, e em seguida esta amostra é colocada em uma estufa à temperatura de 105°C , pelo período de 48 horas, para a obtenção da massa da amostra de solo seco (m_s).

No presente trabalho a determinação das dimensões dos anéis volumétricos foram obtidas através de uma média de três medidas por dimensão por anel volumétrico, utilizando para isto um paquímetro.

Foram realizadas três amostragens por profundidade, por tubo de acesso, em cada período de amostragem (condição de solo seco, condição de solo úmido), tentando com este procedimento obter pelo método gravimétrico, amostras que representassem o mais próximo possível o volume de solo amostrado pela sonda de nêutrons.

Obtida a coleta de pares de dados θ (método gravimétrico) e c/s (sonda de nêutrons), relacionamos este dados para a construção da curva de calibração. Com o objetivo de evitar possíveis distorções causadas por efeitos de variações de temperatura e problemas eletrônicos, preferimos trabalhar com a razão de contagem CR e não diretamente com a taxa de contagem obtida, onde :

$$CR = \frac{\text{c/s obtida no solo}}{\text{c/s obtida em um padrão}} = \frac{C}{C_s} \quad (12)$$

onde C é a taxa de contagem (contagens por unidade de tempo - no caso c/s.) e C_s é a taxa de contagem padrão.

Todas as vezes que se utilizou a sonda, foram realizados testes quanto à sua estabilidade através de contagens feitas em um material padronizado, que no presente trabalho foi a água. A contagem no padrão C_s é praticamente constante ao longo do tempo, oscilando somente dentro dos desvios estatísticos (BACCHI & REICHARDT 1990). Cada fabricante apresenta detalhes desse procedimento para sua sonda.

Neste trabalho utilizamos para a calibração da sonda de nêutrons no solo dois métodos.

No primeiro método, aqui chamado "método da trincheira", utilizamos duas parcelas de 3m x 3m com 1,5m de profundidade cada uma, em um campo experimental junto à AFESALQ, cujo solo é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo , textura média (LVA).

Inicialmente, em condição de solo seco, utilizamos três tubos de acesso paralelos entre si e espaçados de 1m um do outro. Os pares de medidas foram tomados a zero, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 centímetros a partir da superfície (Zero), sendo utilizadas duas sondas SOLO 25 (Sonda 1 e Sonda 2), para comparação futura.

Para a Sonda 1 o tempo de contagem, tanto para o solo quanto para o padrão (água), foi de 21 segundos, enquanto que para a Sonda 2, o tempo de contagem, foi de 19 segundos. Em cada ponto de amostragem, foram realizadas 3 medidas consecutivas com as sondas de nêutrons.

As medidas realizadas com as sondas foram tomadas inicialmente sem a utilização do refletor de nêutrons e depois com o refletor de nêutrons.

Procedimento idêntico foi utilizado para o solo em condição solo úmido para a determinação da curva de calibração das sondas SOLO 25 (sondas 1 e 2).

No segundo método, desenvolvido neste trabalho, aqui chamado " método da fração perdida", utilizamos uma parcela de 3m x 3m em um campo experimental da ESALQ, junto ao Posto Meteorológico, cujo solo é classificado como Terra Roxa Estruturada. Os pares de medidas foram tomados a Zero, 8, 17, 25, 50, 75, 100, 125, 150cm de profundidade, a partir da superfície (Zero) e utilizou-se a Sonda 1.

Como já nos referimos no início deste capítulo, nas medidas de umidade do solo próximas à superfície, parte da esfera de influência está na atmosfera, diminuindo o número de nêutrons térmicos detetados, acarretando medidas incorretas. Portanto conhecido o raio da esfera de influência da sonda de nêutrons para o solo em questão, podemos determinar aproximadamente que fração da esfera de influência está para fora do solo. Assim, para medidas próximas à superfície (interface solo-ar), podemos fazer uma correção nas medidas da sonda, simulando esta esfera de influência totalmente dentro do solo no ponto onde estamos realizando a medida através de um fator de correção (FC) determinado através da parte do volume da esfera de influência que esta fora do solo. Assim procedemos para os pontos de profundidade Zero e 8cm. Para as demais profundidades não houve a necessidade desta correção pois a esfera de influência da sonda de nêutrons já estava totalmente dentro do solo segundo nossas observações.

A calibração através deste método foi realizada apenas para o solo em condição de solo úmido e também fez uso do método gravimétrico para a obtenção dos pares de medidas (3 pares de contagem x umidade por profundidade).

2.4 A Variabilidade Espacial da Medida de Umidade do Solo

Para quantificarmos a variabilidade espacial da medida de umidade do solo, para o solo Terra Roxa Estruturada, fizemos uso de duas parcelas de 7m x 7m, separadas de 2m, cada uma com 9 tubos de acesso de alumínio, distribuídos conforme a Figura 7. Esses tubos de acesso permitiram medidas de sonda de nêutrons desde a superfície até 50cm de profundidade. As medidas foram realizadas em duas condições: em condição solo seco e em condição solo úmido.

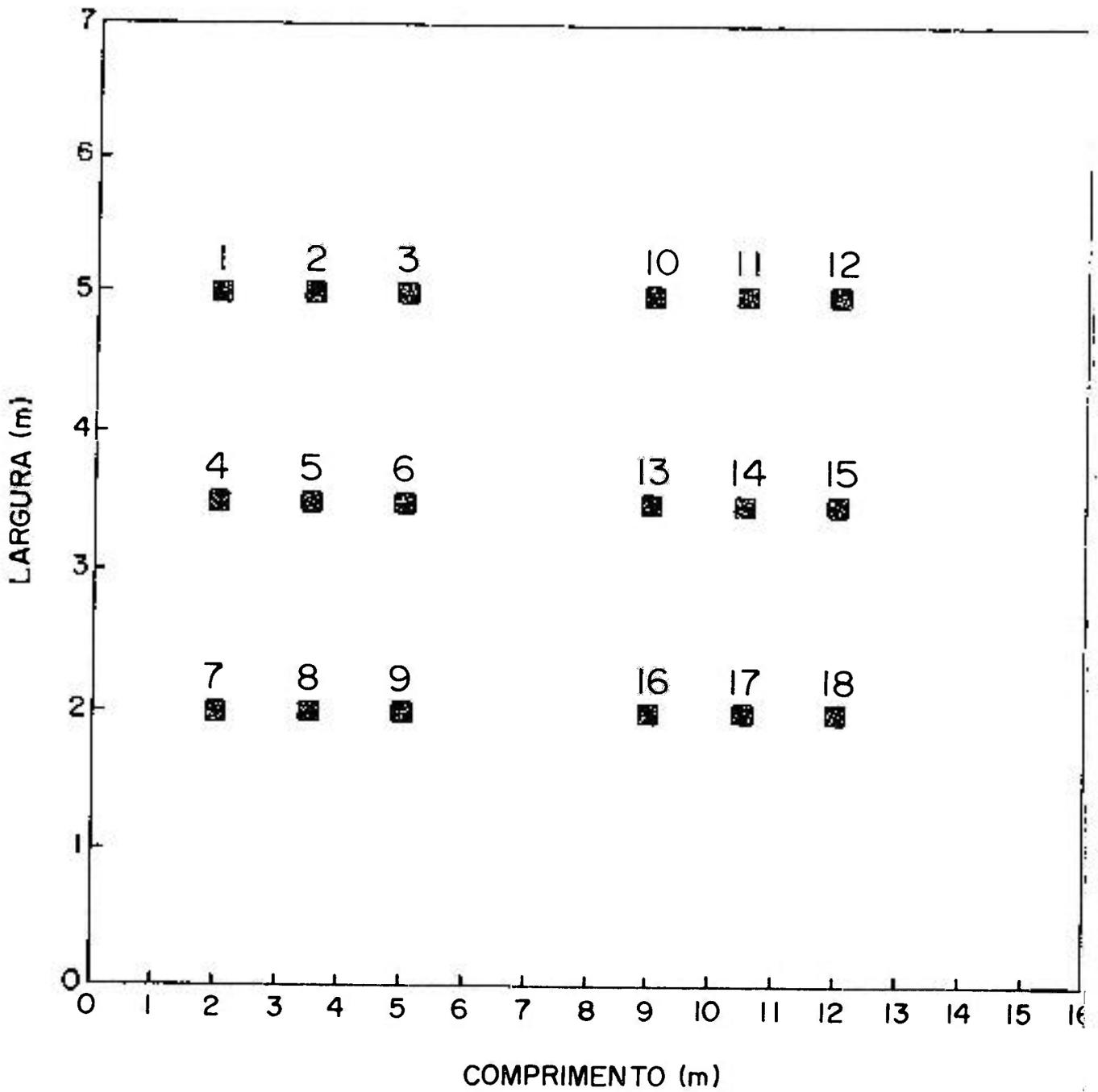


Figura 7: Distribuição dos tubos de acesso de alumínio no campo.

2.4.1 ERROS ENVOLVIDOS NA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DO SOLO

A técnica de determinação da umidade do solo através da moderação de nêutrons envolve muitos processos físicos, desde a produção até a contagem dos nêutrons, passando pela detecção, fotomultiplicação, ampliação e contagens de pulsos. O conjunto de erros envolvidos nesses processos denominaremos aqui "erro instrumental".

A contagem de nêutrons, termalizados pela interação com a água presente no solo, embora do ponto de vista físico possa ser considerada proporcional à umidade do solo, necessita em termos práticos, ser transformada em valores reais de umidade, através da curva de calibração, utilizando-se um outro método como padrão para determinação de θ , que no presente trabalho foi o método gravimétrico. Na calibração outros erros são incorporados, associados à própria regressão linear. A esse conjunto de erros na regressão denominamos aqui "erro de calibração".

Realizada a calibração, a sonda pode ser utilizada na medição da umidade do solo em diferentes locais e em diferentes tubos de acesso, o que introduz novos erros nas medidas. A esse conjunto de erros denominamos aqui "erro local".

Assim a variância total de $\bar{\theta}$ é dada por:

$$s^2(\bar{\theta}) = s_c^2(\bar{\theta}) + s_1^2(\bar{\theta}) + s_L^2(\bar{\theta}) \quad (13)$$

onde,

s_c^2 é a variância devido ao "erro de calibração",

s_1^2 é a variância devido ao "erro instrumental" e

s_L^2 é a variância devido ao "erro local"

Rescrevendo a equação 13 para uma dada regressão linear obtida [$\theta = a + b (CR)$] temos:

$$s^2(\bar{\theta}) = [b^2 + s^2(b)] s^2(\overline{CR}) + s^2(a) + (\overline{CR})^2 s^2(b) + 2 \overline{CR} S(a, b) \quad (14)$$

Através de uma planilha LOTUS podemos obter os erros médios de medidas baseados na equação 14 procedimento semelhante ao adotado por BACCHI & REICHARDT (1990).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 A ESFERA DE INFLUÊNCIA NA ÁGUA

Para o método da aproximação, descrito na seção 2.2.1, o raio da esfera de influência na água está no intervalo entre 11 e 10cm , e pode ser observado na Figura 8 onde é mostrado que a influência mútua nas contagens das sondas 1 e 2, tem início no intervalo entre 22 e 20cm.

Para o método da interface descrito na seção 2.2.1, o raio da esfera de influência na água tanto para a sonda 1 (Figura 9) quanto para a sonda 2 (Figura 10), é de aproximadamente 10cm.

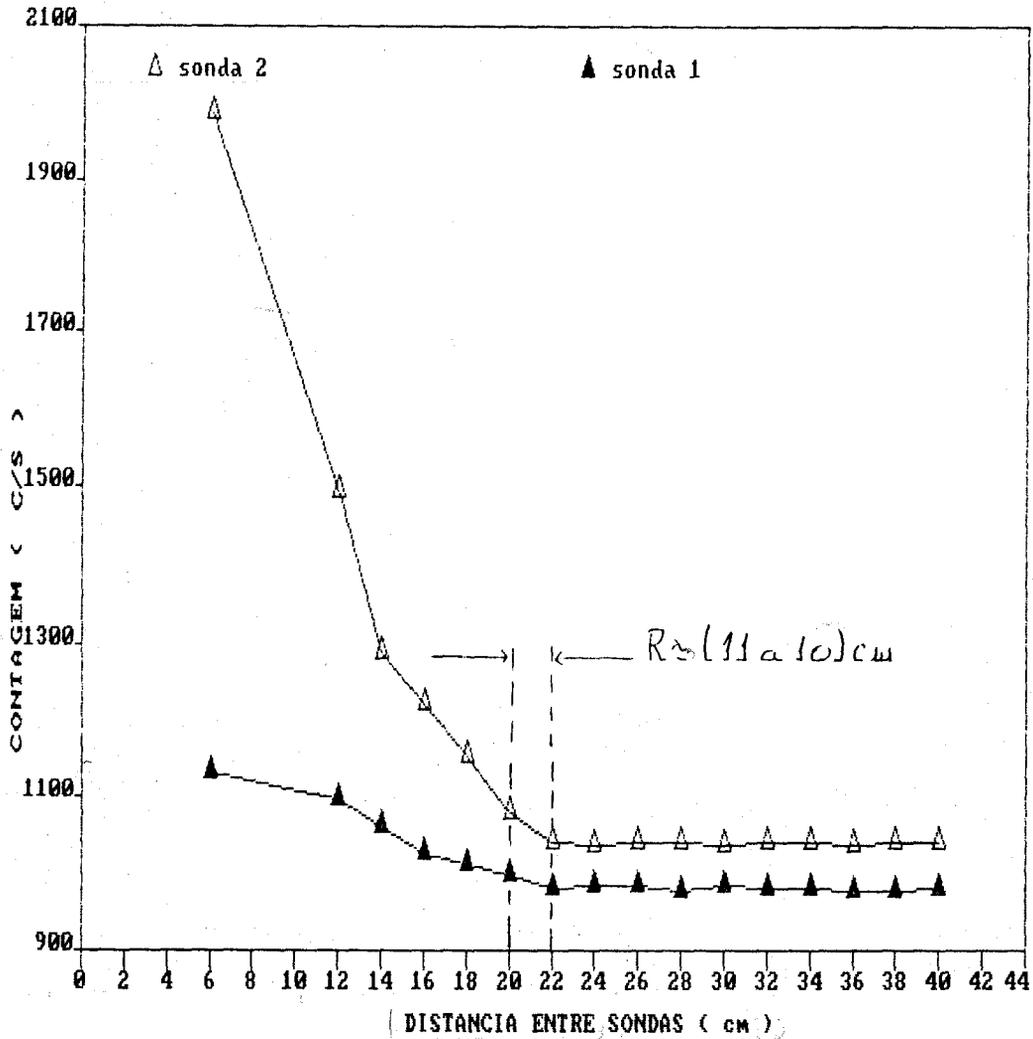


Figura 8 - CONTAGEM (c/s) x DISTÂNCIA ENTRE SONDAS (cm), destacando o intervalo obtido para o valor do raio da esfera de influência, para o método da aproximação.

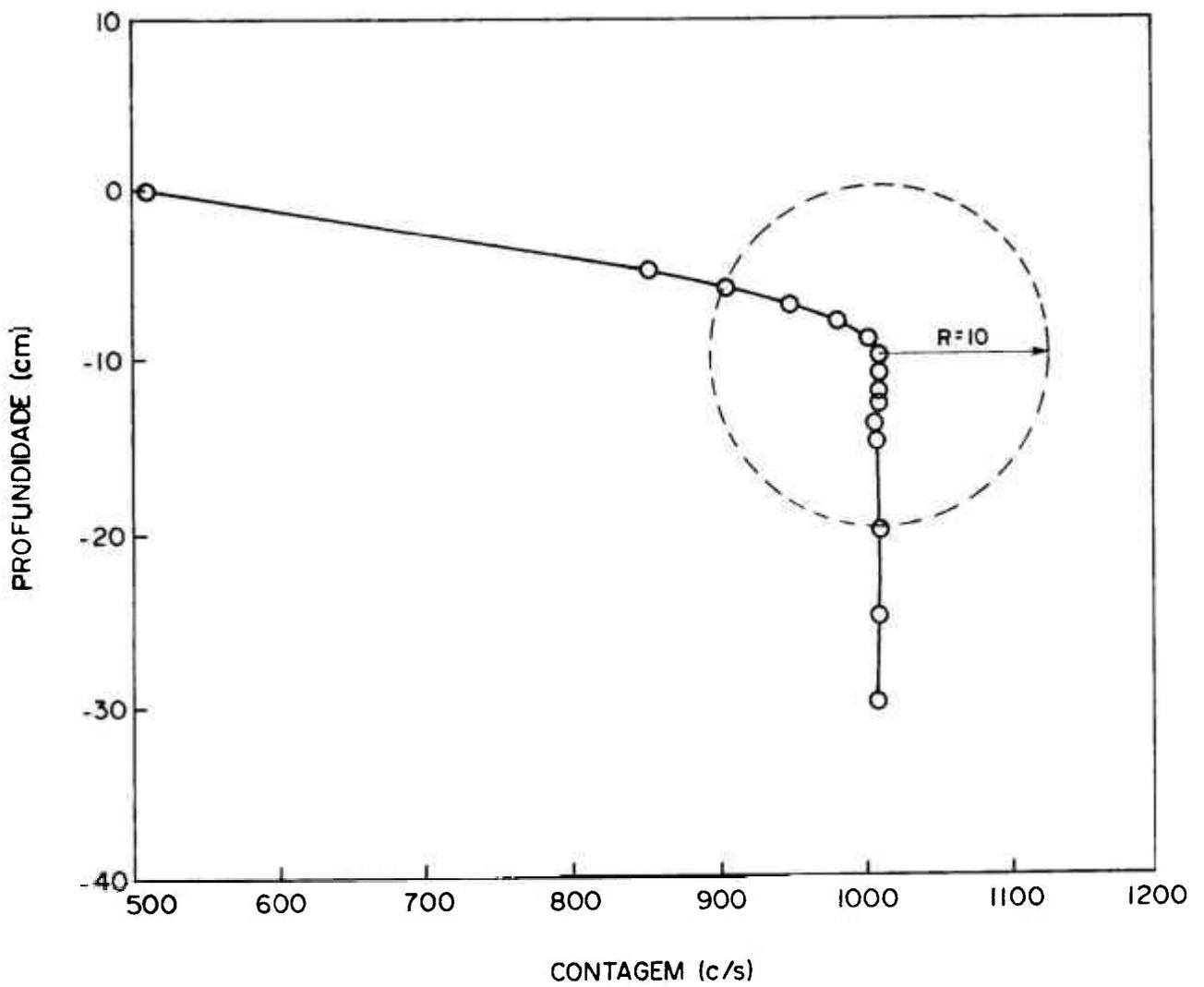


Figura 9 - Resultado da aplicação do método da interface destacando o raio da esfera de influência para a Sonda 1.

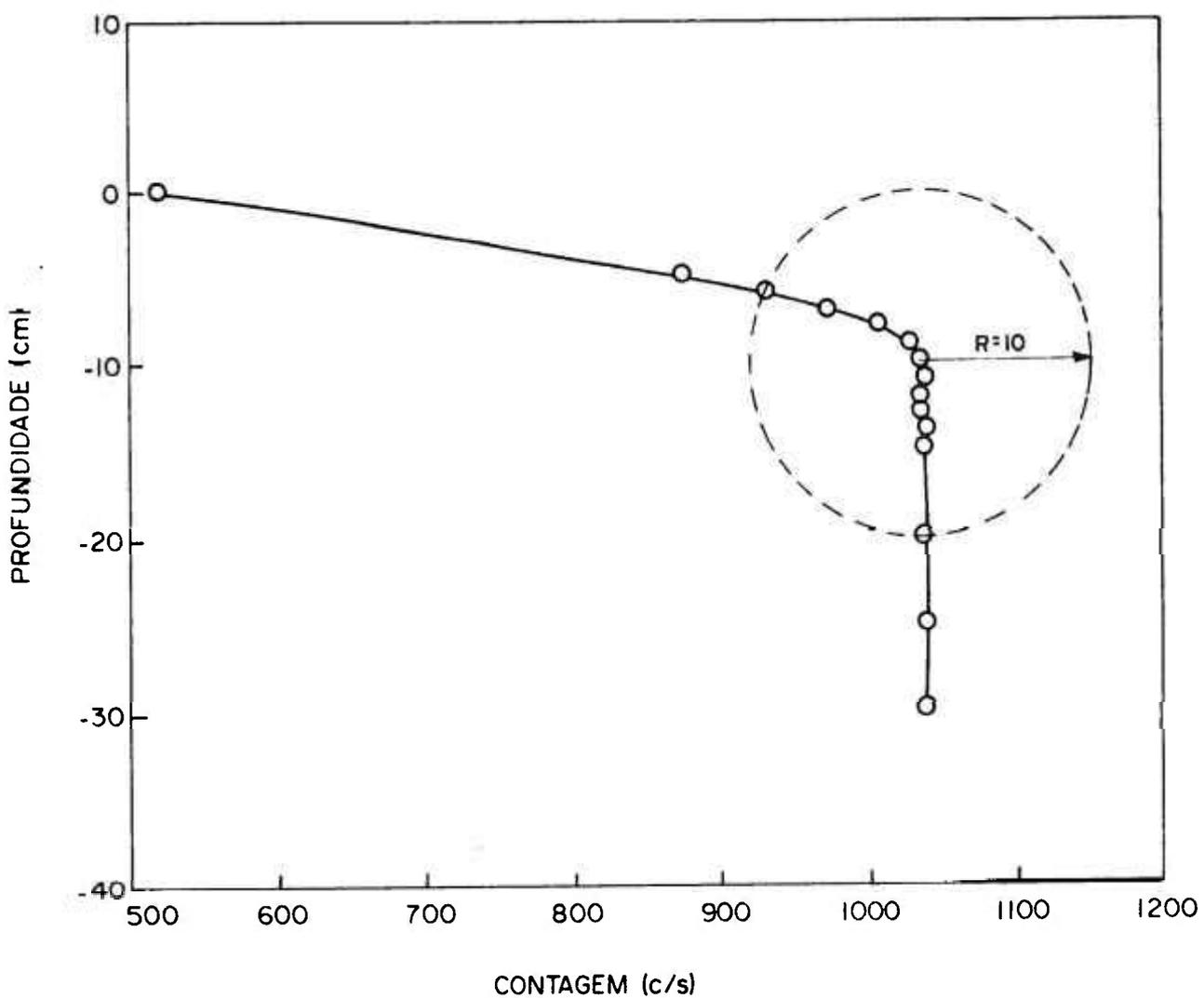


Figura 10 - Resultado da aplicação do método da interface destacando o raio da esfera de influência para a Sonda 2.

A Figura 11 apresenta o resultado da aplicação do método do monitor, descrito na seção 2.2.1., onde os erros de medidas foram obtidos através da estatística de Poisson (EVANS, 1972).

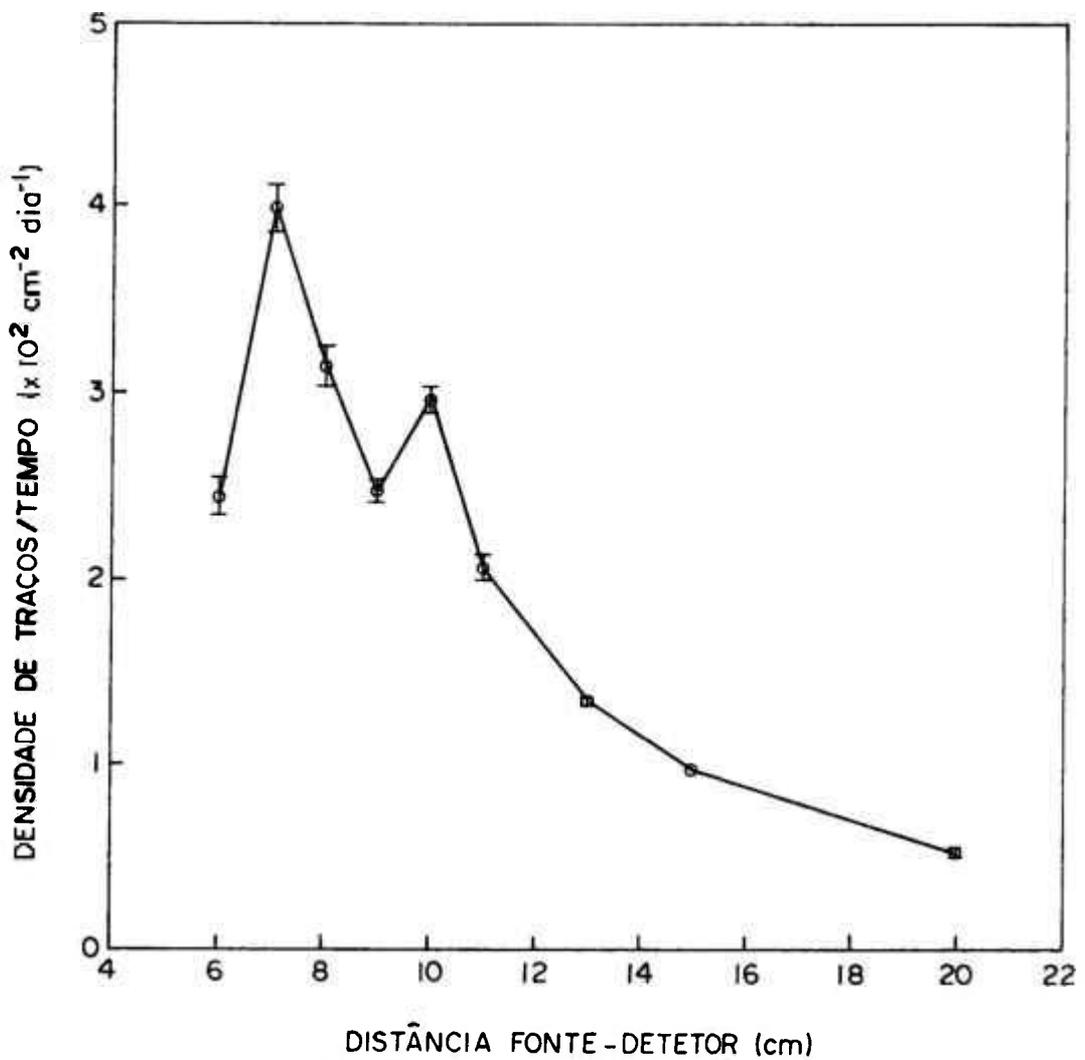


Figura 11-Densidade de traços de fissão / tempo x distância fonte detetor (d).

3.2 A ESFERA DE INFLUÊNCIA NO SOLO

Para o método da interface-solo, descrito na seção 2.2.2 os resultados obtidos para o raio da esfera de influência no solo foram: aproximadamente 23cm para a condição solo seco (Figura 12) e de aproximadamente 17cm para a condição solo úmido (Figura 13).

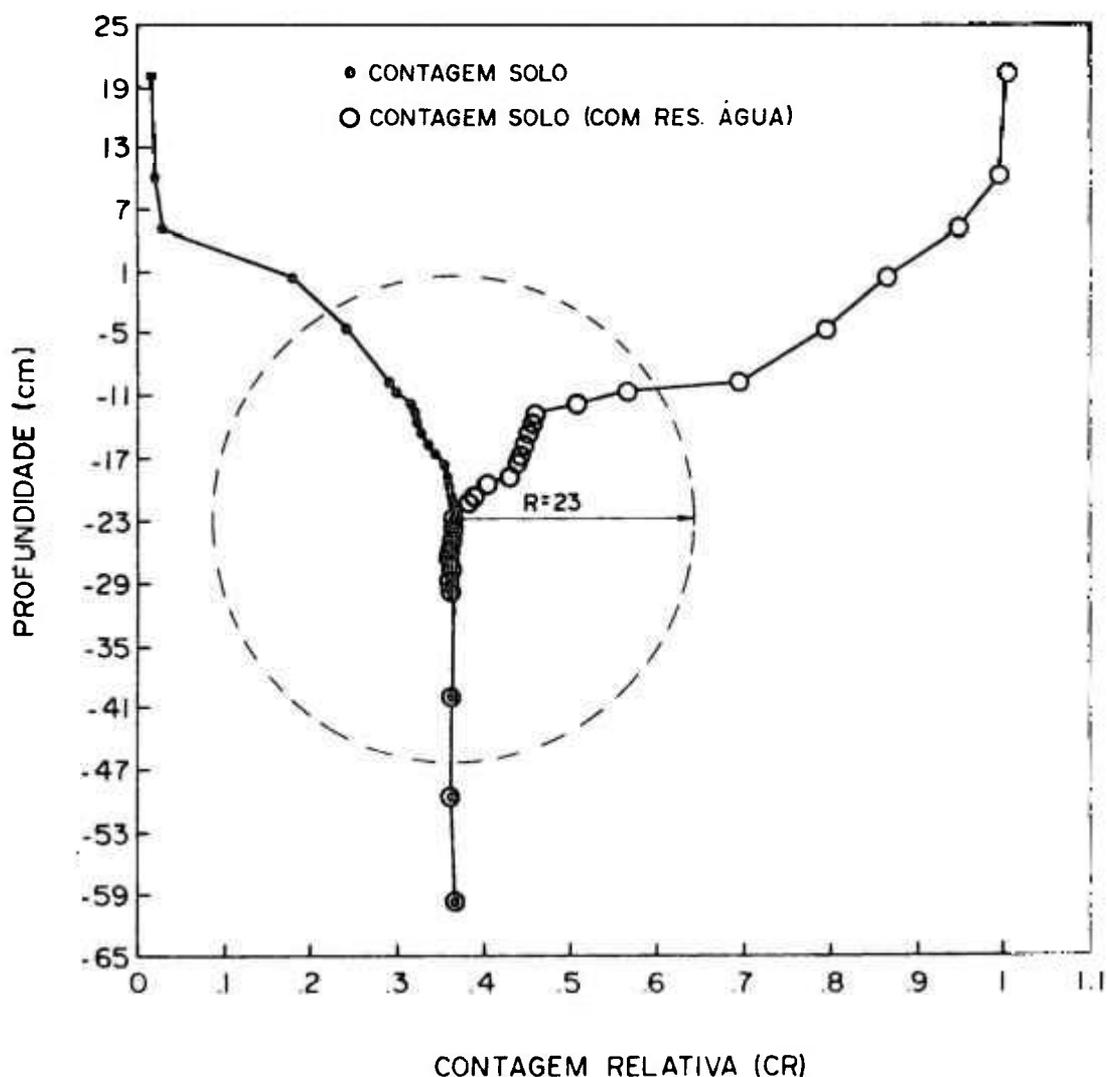


Figura 12 - Resultado da aplicação do método da interface-solo, destacando o raio da esfera de influência para a condição solo seco.

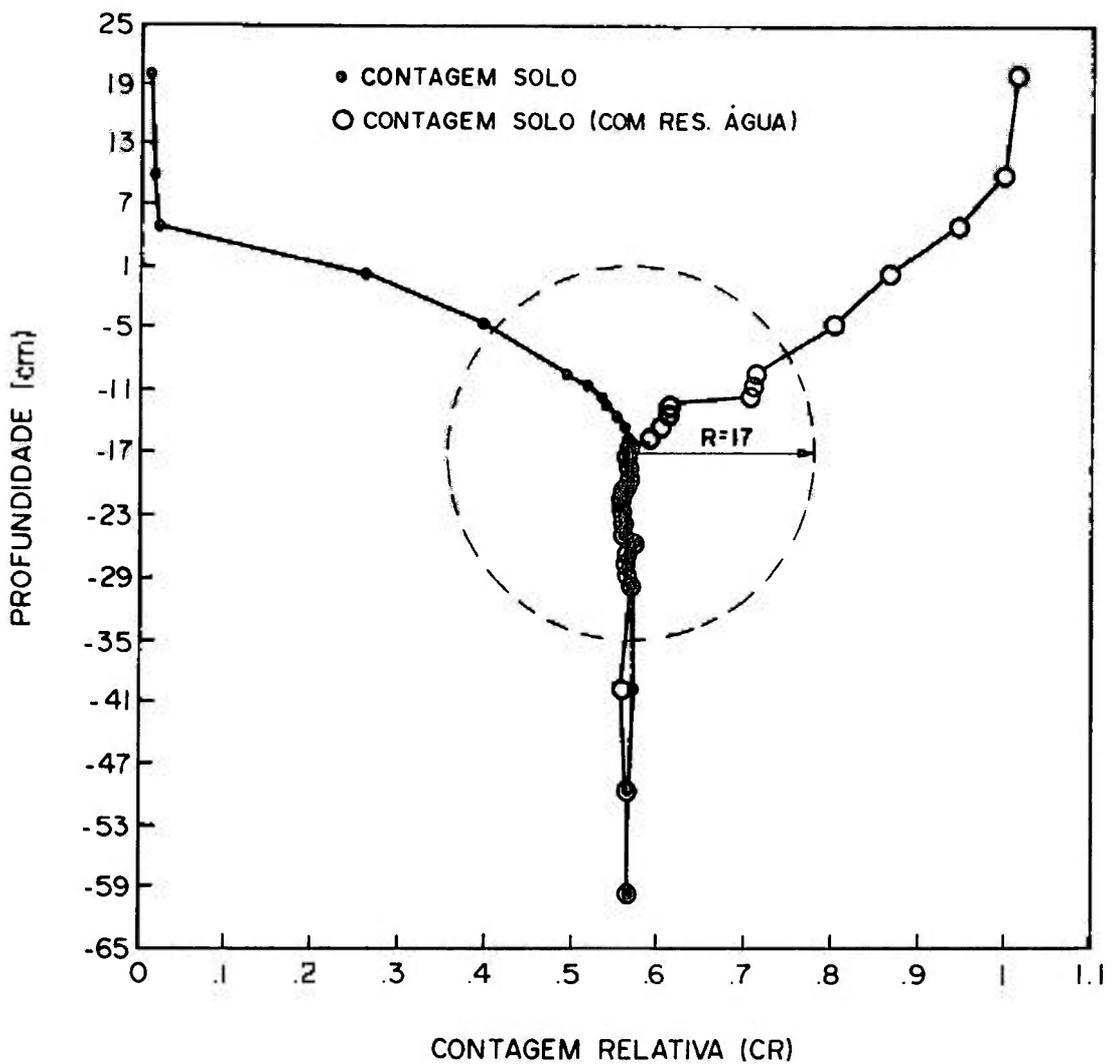


Figura 13 - Resultado da aplicação do método da interface-solo, destacando o raio da esfera de influência para a condição solo úmido.

Para o método da interface-solo2, descrito na seção 2.2.2, os resultados obtidos foram :

Em condição de solo seco, tanto para o recipiente com água (Figura 14) quanto para o refletor de nêutrons (Figura 15), o raio da esfera de influência da sonda de nêutrons situou - se no intervalo entre 25 e 20cm.

Em condição de solo úmido o raio da esfera de influência, tanto para o recipiente com água (Figura 16) quanto para o refletor de nêutrons (Figura 17) situou-se no intervalo entre 20 e 15cm.

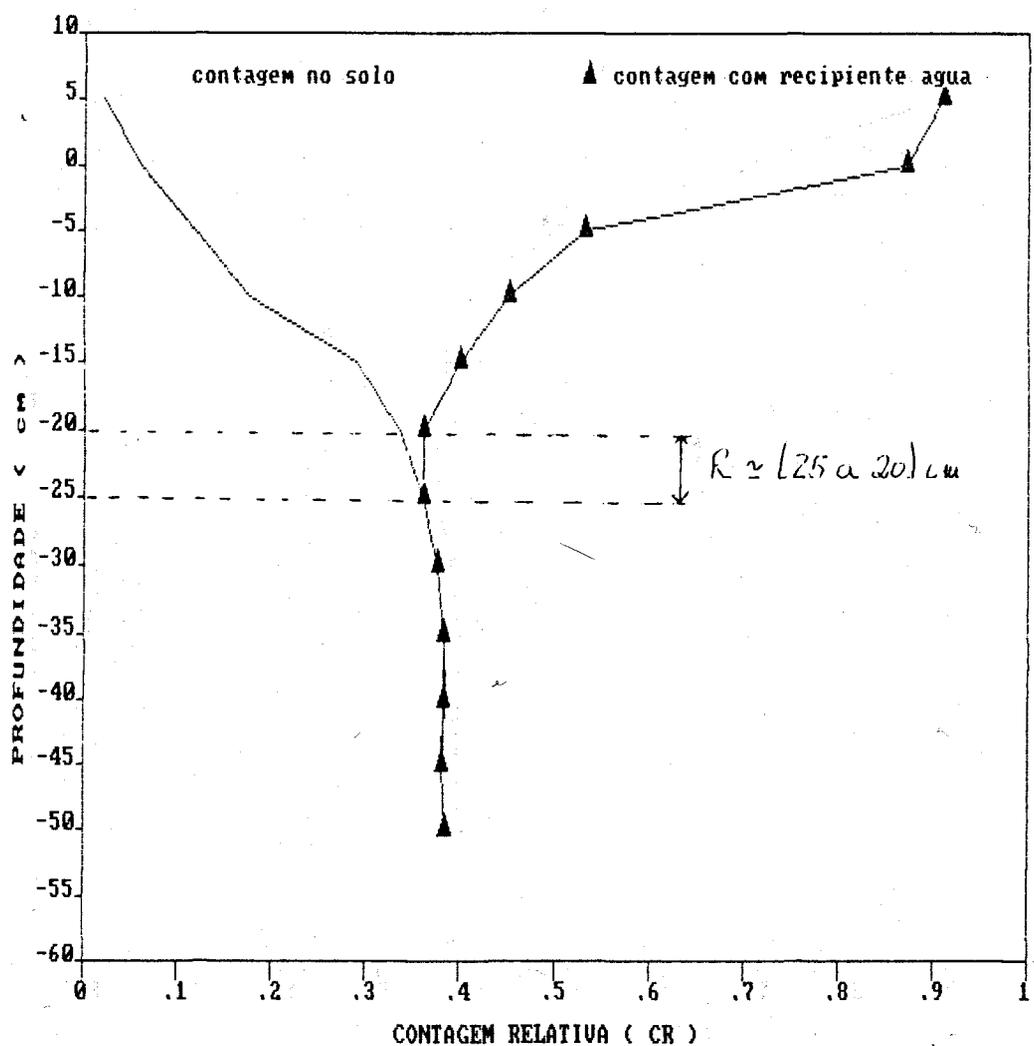


Figura 14 - PROFUNDIDADE (cm) x CONTAGEM (c/s), destacando o intervalo obtido para o raio da esfera de influência para o método interface-solo 2 (em condição solo seco -para o recipiente com água).

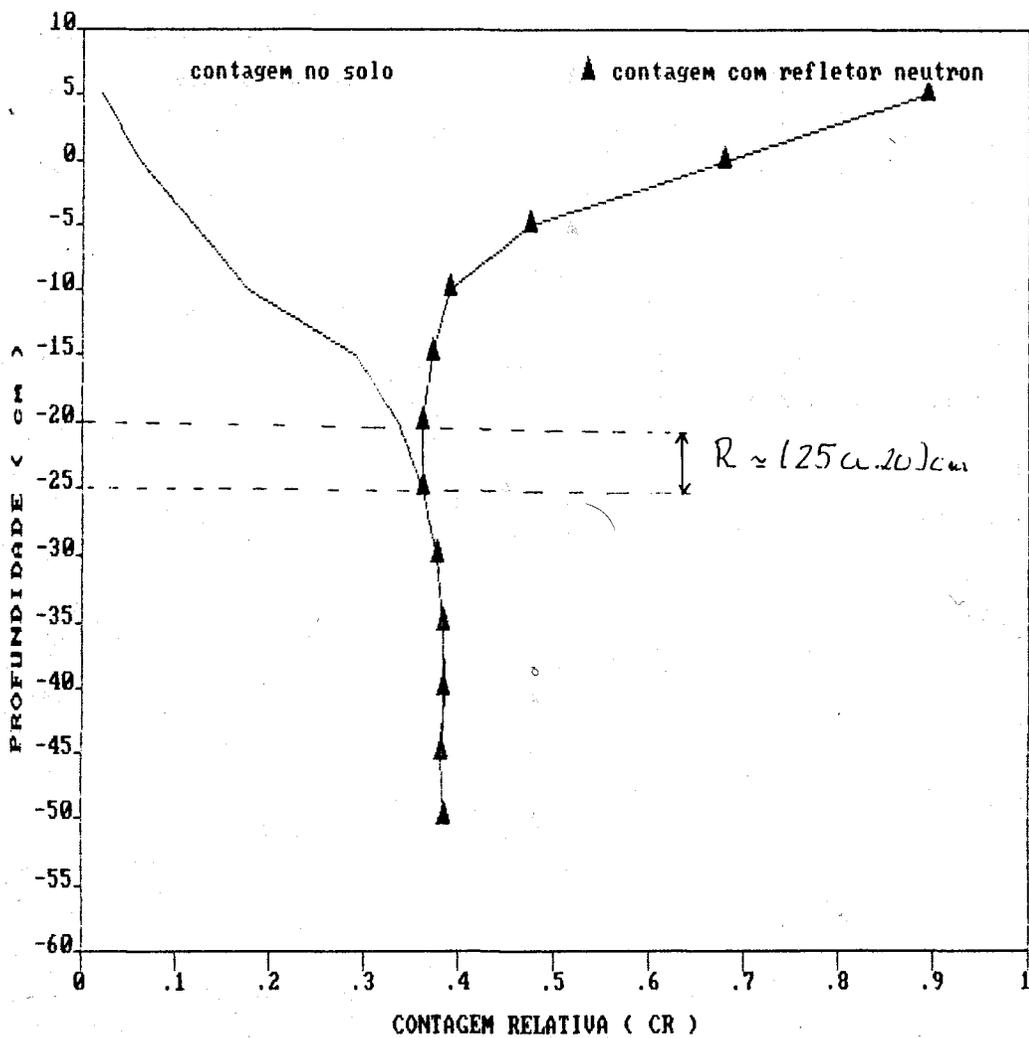


Figura 15 - PROFUNDIDADE (cm) x CONTAGEM (c/s), destacando o intervalo obtido para o raio da esfera de influência para o método interface-solo 2 (em condição solo seco-para o refletor de nêutrons).

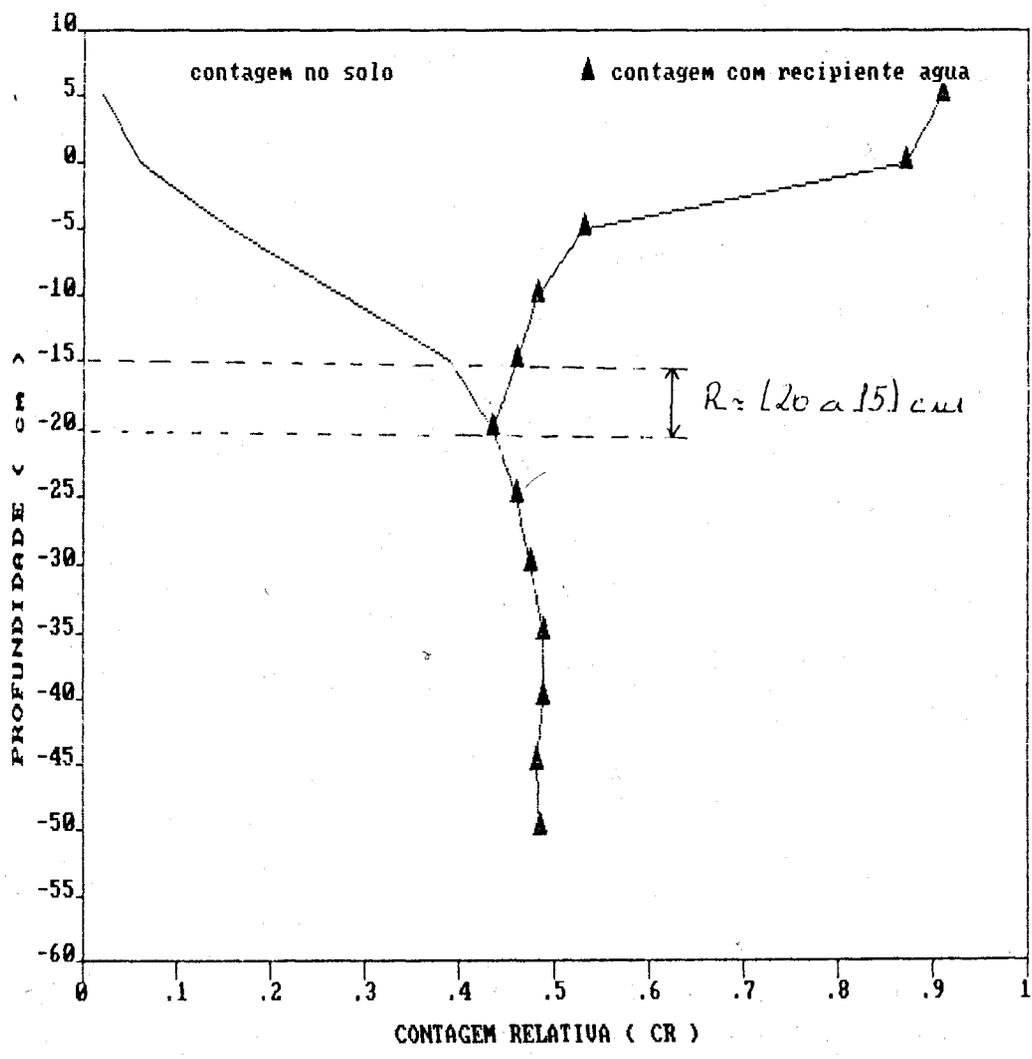


Figura 16 - PROFUNDIDADE (cm) x CONTAGEM (c/s), destacando o intervalo obtido para o raio da esfera de influência para o método interface-solo 2 (em condição solo úmido para o recipiente com água).

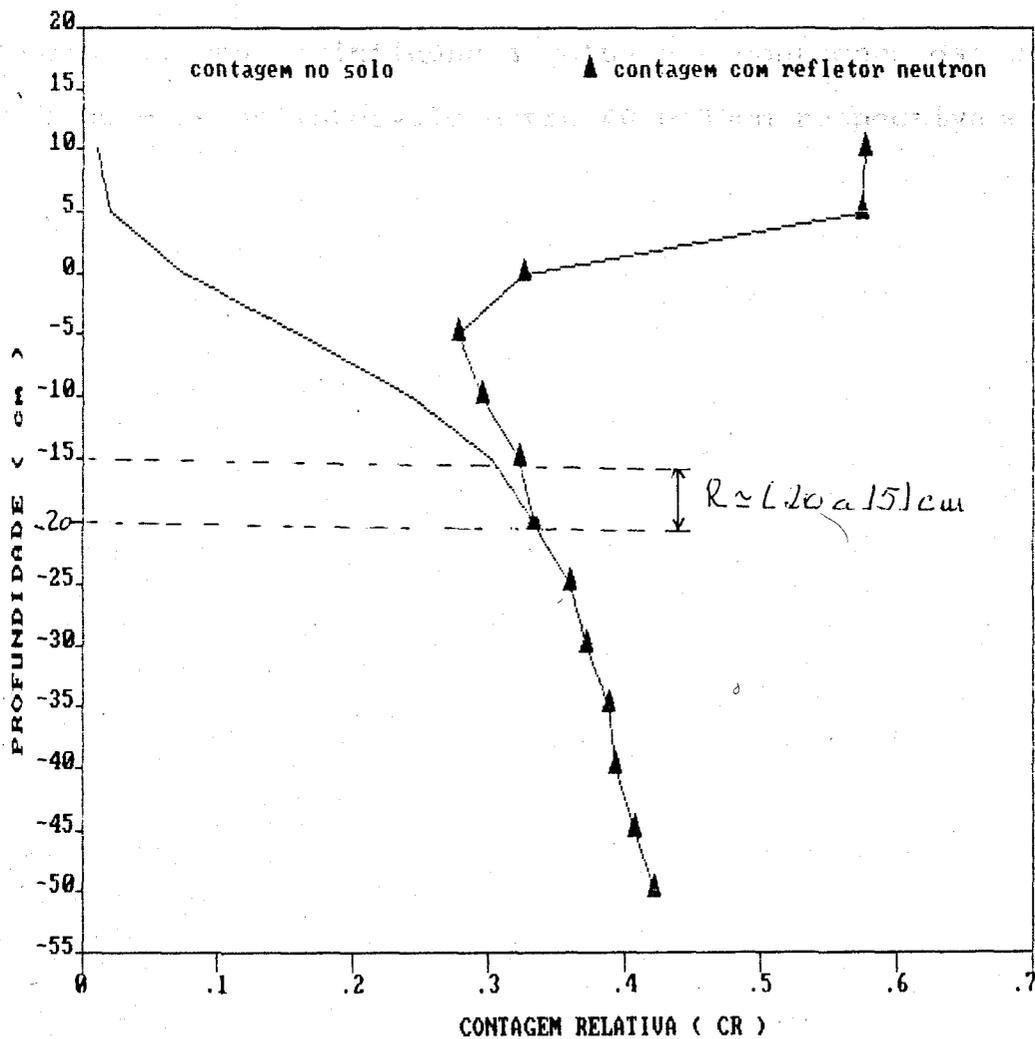


Figura 17 - PROFUNDIDADE (cm) x CONTAGEM (c/s), destacando o intervalo obtido para o raio da esfera de influência para o método interface-solo 2 (em condição solo úmido para o refletor de nêutrons).

Para o método da aproximação-solo, descrito na seção 2.2.2 o resultado obtido em condição solo seco para o raio da esfera de influência, situou - se no intervalo entre 25 e 20cm e para a condição solo úmido, no intervalo entre 20 e 15cm que podem ser observados nas Figuras 18, onde a influência mútua nas contagens das sondas iniciou-se no intervalo entre 50 e 40cm, e na Figura 19, onde a influência mútua nas contagens das sondas iniciou - se no intervalo entre 40 e 30cm respectivamente.

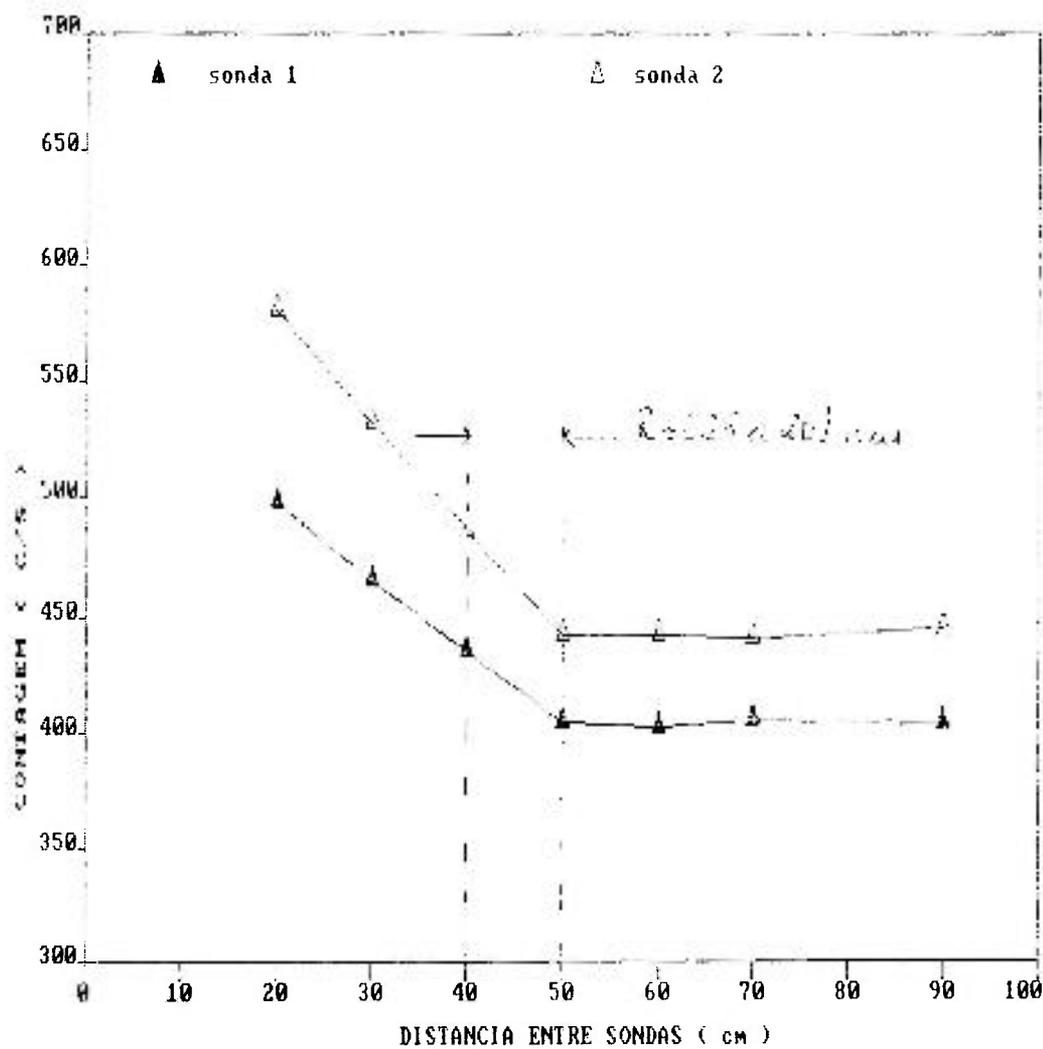


Figura 18 - CONTAGEM (c/s) x DISTÂNCIA ENTRE SONDAS (cm), destacando o intervalo obtido para o valor do raio da esfera de influência para o método aproximação-solo, em condição solo seco.

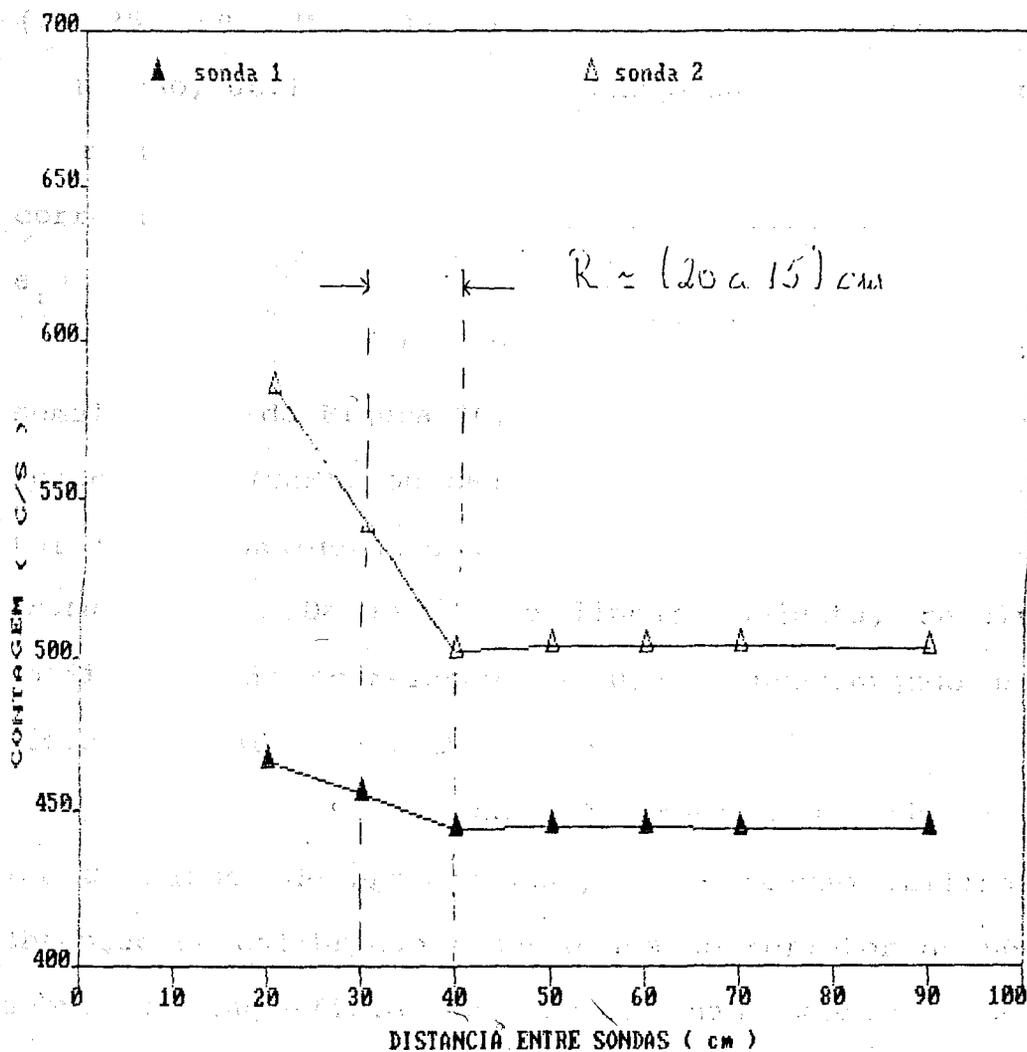


Figura 19. - CONTAGEM (c/s) x DISTÂNCIA ENTRE SONDAS (cm), destacando o intervalo obtido para o valor do raio da esfera de influência para o método aproximação-solo, em condição solo úmido.

3.3 A CALIBRAÇÃO da SONDA de NÊUTRONS

Para o método da trincheira, apresentado na seção 2.3 obtivemos os seguintes resultados para a sonda 1 (o erro médio das medidas foi calculado utilizando a equação 14) :

A Figura 20 apresenta 14 pares de dados (0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150cm de profundidade) de regressão, utilizados para obtenção da curva de calibração. Da regressão linear conjunta, resultou um coeficiente de correlação $r_1 = 0,53$, apresentando um erro médio de medida $e_1 = 28,4\%$.

A Figura 21 apresenta situação semelhante à da Figura 20, porém sem considerar os dados de superfícies (0cm), ou seja, a regressão linear neste caso foi feita considerando 12 pares de pontos (25 à 150cm de profundidade). Da regressão linear conjunta, resultou um coeficiente de correlação $r_2 = 0,96$, apresentando um erro médio de medida $e_2 = 3,62\%$.

A Figura 22 apresenta 14 pares de dados (de 0 à 150cm de profundidade) de regressão utilizados na obtenção da calibração fazendo uso do refletor de nêutrons sobre a superfície do solo, nas mesmas condições metodológicas das Figuras 20 e 21. Da regressão linear conjunta, resultou um coeficiente de correlação $r_3 = 0,88$ e um erro médio de medida $e_3 = 9,3\%$.

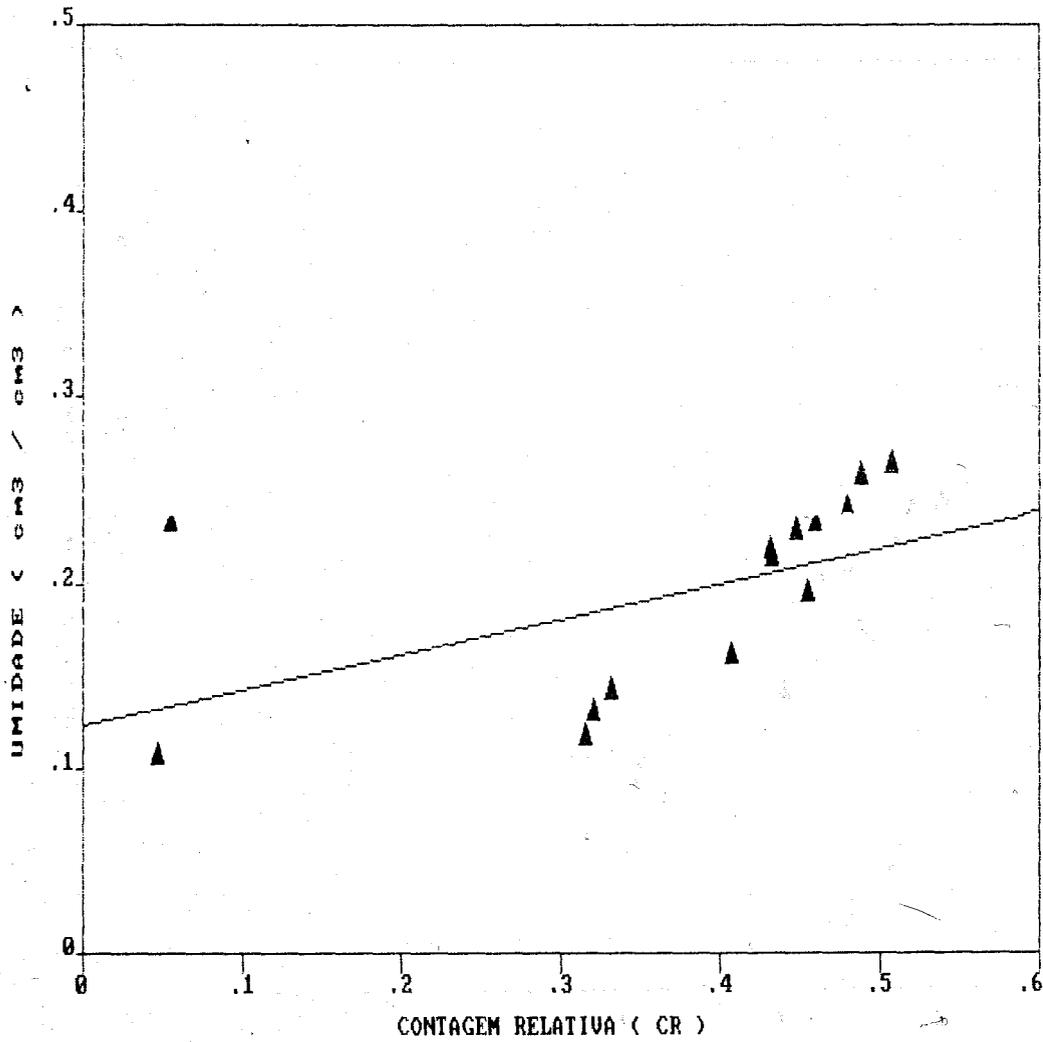


Figura 20 -Calibração da Sonda 1 utilizando o método da trincheira (0 a 150cm de profundidade) para o solo LVA.

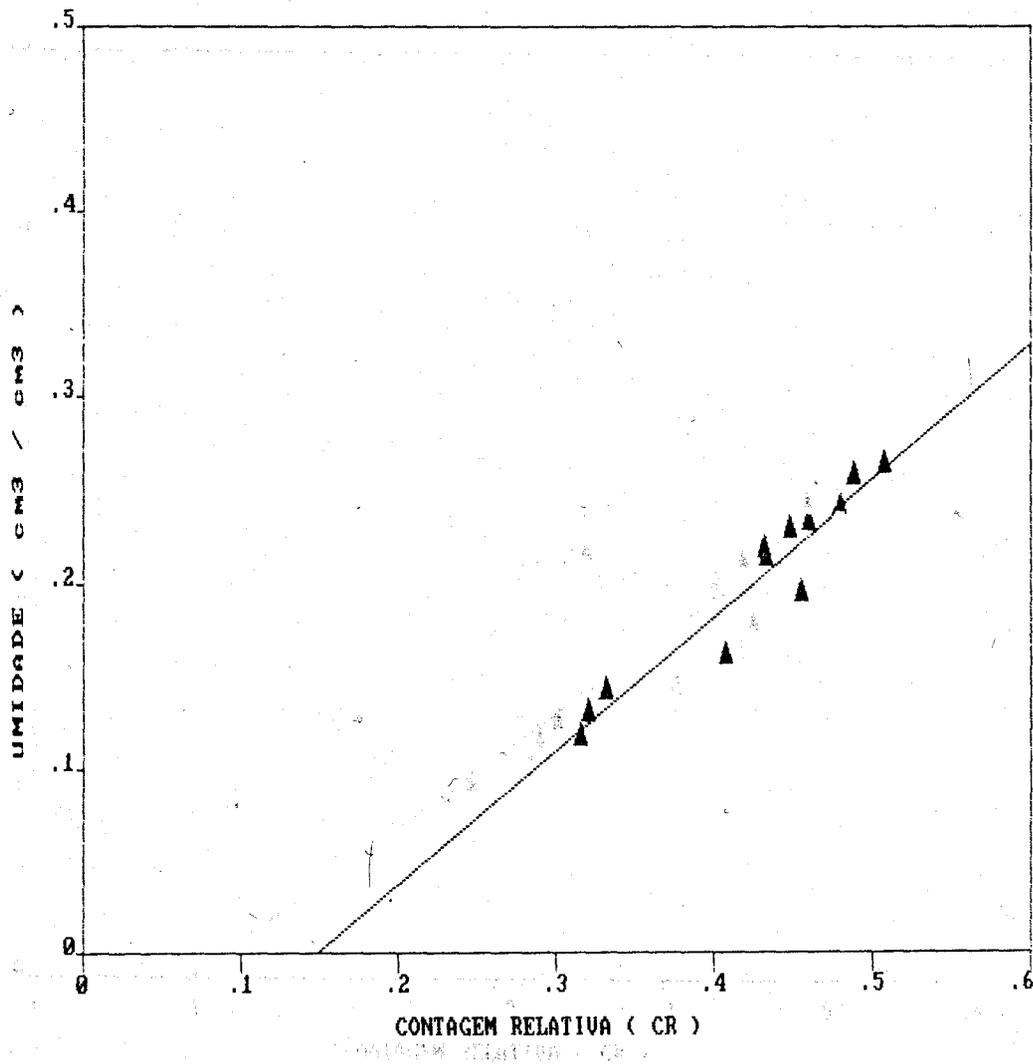


Figura 21 - Calibração Sonda 1 utilizando o método da trincheira (25 a 150cm de profundidade) para o solo LVA.

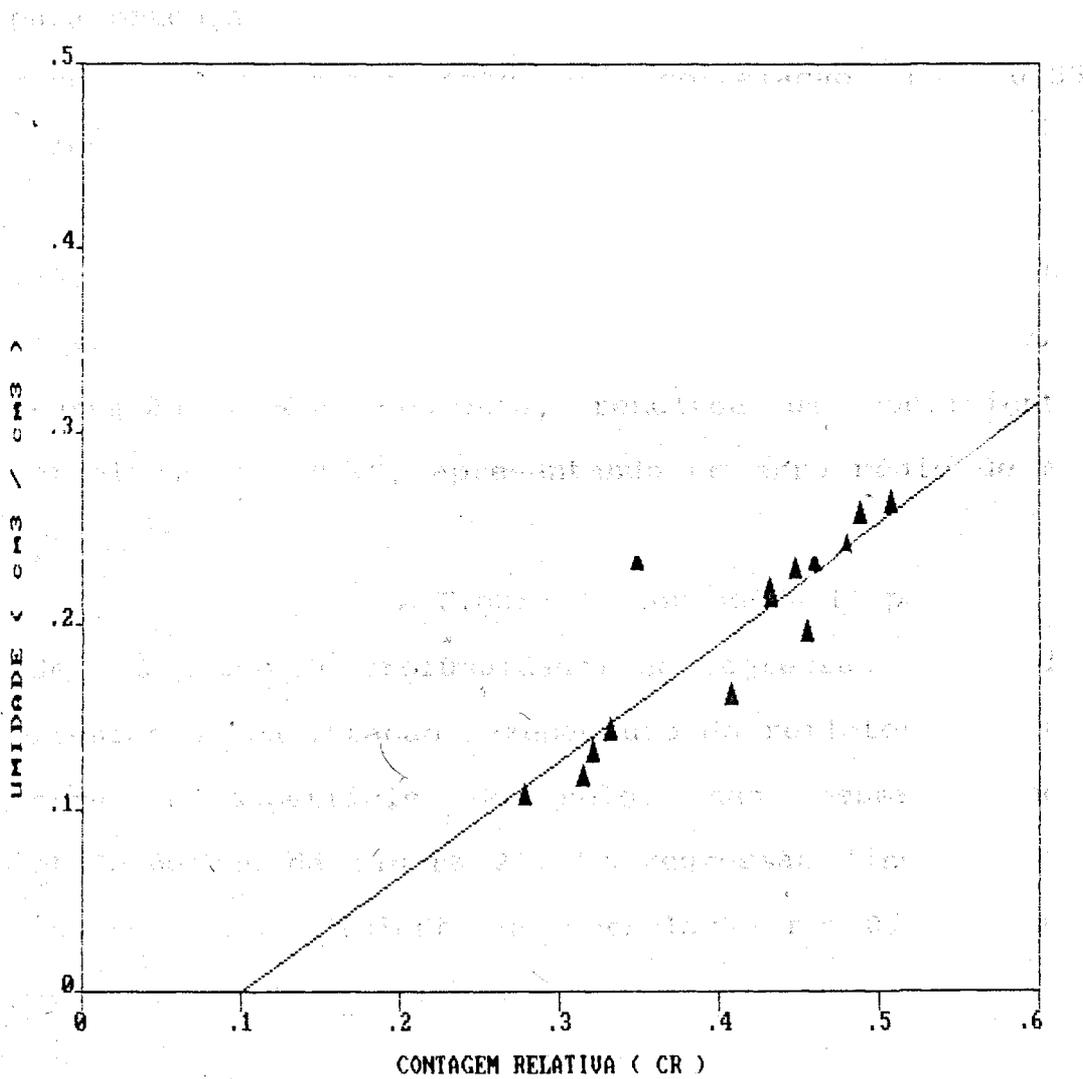


Figura 22 - Calibração da SONDA 1 utilizando o método da trincheira, com refletor de nêutrons (0 a 150cm de profundidade) para o solo LVA.

Para o método da trincheira, discutido na seção 2.3 obtivemos os seguintes resultados para a sonda 2 (o erro médio das medidas foi calculado através da equação 14) :

A Figura 23 mostra 14 pares de dados (0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150cm) de regressão utilizados para obtenção da calibração. Da regressão linear conjunta, resultou um coeficiente de correlação $r_4 = 0,55$, apresentando um erro médio de medida $e_4 = 27,1\%$.

A Figura 24 mostra 12 pares de dados (25, 50, 75, 100, 125 e 150cm) de regressão para obtenção da calibração, sem considerar os pontos de superfície. Da regressão linear conjunta, resultou um coeficiente de correlação $r_5 = 0,98$, apresentando um erro médio de medida $e_5 = 3,18\%$.

A Figura 25 apresenta 14 pares de dados (de 0 à 150cm de profundidade) de regressão utilizados na obtenção da calibração fazendo uso do refletor de nêutrons sobre a superfície do solo, nas mesmas condições metodológicas da Figura 22. Da regressão linear conjunta, resultou um coeficiente de correlação $r_6 = 0,80$ e um erro médio de medida $e_6 = 11,08\%$.

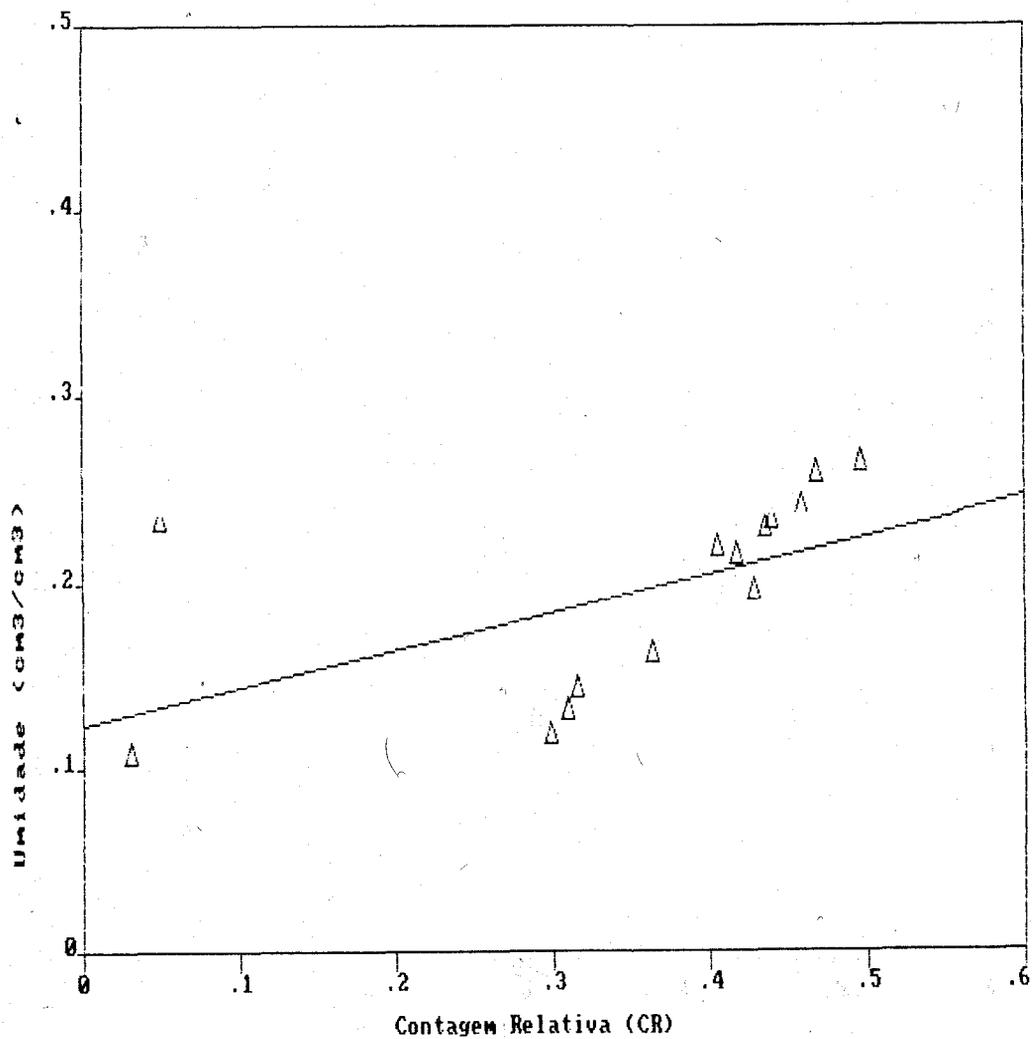


Figura 23. -Calibração da Sonda 2 utilizando o método da trincheira (0 a 150cm de profundidade) para o solo LVA.

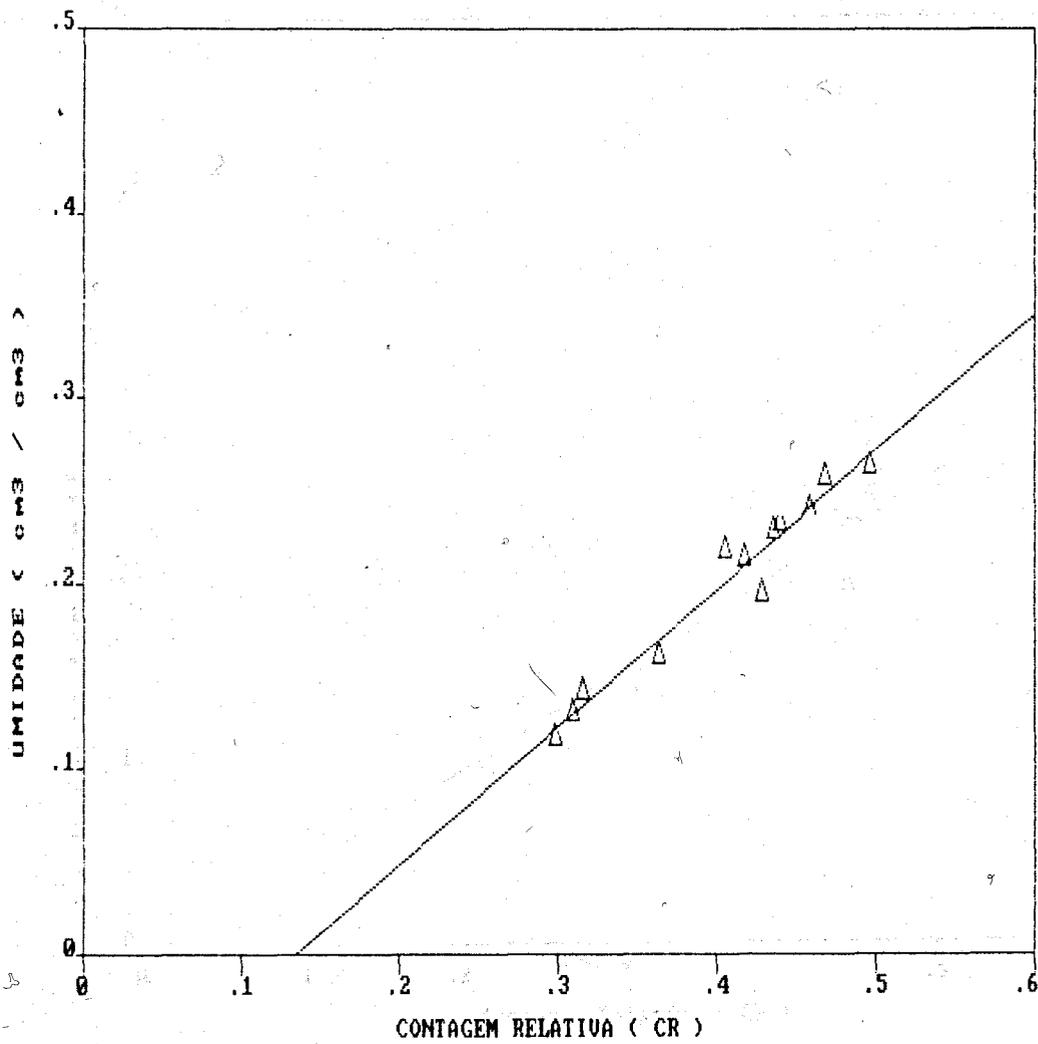


Figura 24 - Calibração Sonda 22 utilizando o método da trincheira (25 a 150cm de profundidade) para o solo LVA. (solo 1) para o solo IV.

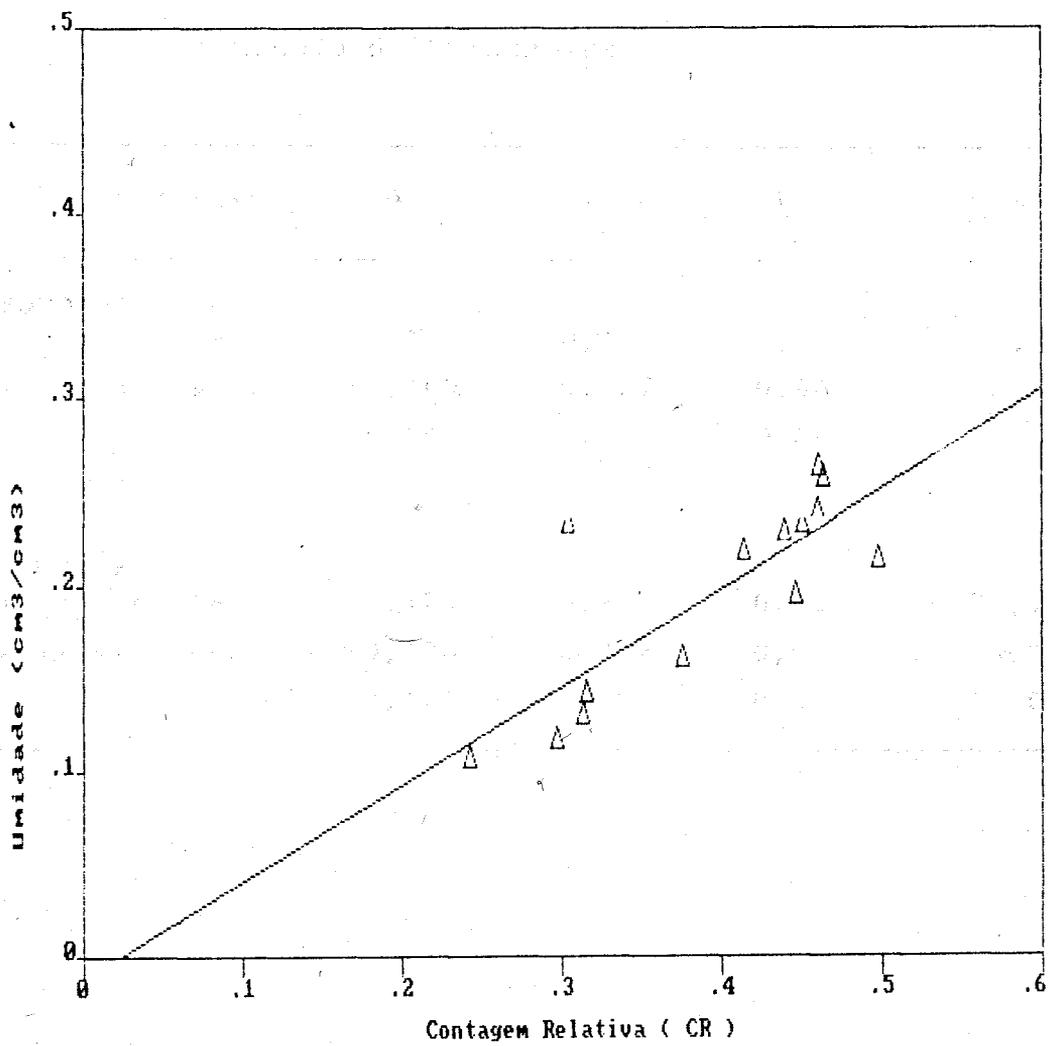


Figura 25 - Calibração da Sonda 2 utilizando o método da trincheira, com refletor de nêutrons (0 a 150cm de profundidade) para o solo LVA.

A Tabela 7, apresenta um resumo dos dados obtidos para calibrações que foram realizadas utilizando o método da trincheira apresentado na seção 2.3 para o solo Latossolo Vermelho Amarelo.

Tabela 7 - Calibrações das sondas de nêutrons 1 e 2 para o solo Latossolo Vermelho Amarelo, utilizando o método da trincheira.

$\theta = a + b(\text{CR})$	a	b	r	e(%)
SONDA 1				
dados completos	0,124	0,192	0,53	28,40
s/dados superf.	-0,109	0,727	0,96	3,62
com refletor	-0,064	0,634	0,88	9,30
Sonda 2				
dados completos	0,123	0,203	0,55	27,10
s/dados superf.	-0,100	0,742	0,98	3,18
com refletor	-0,121	0,527	0,80	11,08

Para o método da fração perdida, apresentado na seção 2.3 obtivemos o seguinte resultado (o erro médio das medidas foi calculado através da equação 14):

A Figura 26 apresenta 9 pares de dados (0, 8, 17, 25, 50, 75, 100, 125 e 150cm de profundidade) de regressão utilizados na obtenção da curva de calibração da Sonda 1, introduzindo o fator de correção para as medidas realizadas próximas à superfície (0 e 8cm de profundidade), conforme prevê o nosso método da fração perdida. Da regressão linear conjunta, resultou um coeficiente de correlação $r_7 = 0,99$, apresentando um erro médio de medida $e_7 = 2,81\%$. O fator de correção (multiplicativo) na medida de contagem para o ponto Zero (superfície) é de 2.0 e para o ponto 8cm de profundidade é de 1,209. O fator de correção (FC) foi calculado baseando-se no volume da esfera de influência que esta fora do solo em cada profundidade (ver seção 2.3).

Para efeito de comparação com o resultado apresentado na Figura 26, apresentamos os resultados da aplicação do método da trincheira para a Terra Roxa Estruturada (parte úmida) que apresentaram os seguintes resultados (o erro médio das medidas foi calculado através da equação 14) :

A Figura 27 apresenta 9 pares de dados (0, 8, 17, 25, 50, 75, 100, 125 e 150cm de profundidade) de regressão utilizados na obtenção da curva de calibração da sonda 1. Da regressão linear conjunta, resultou um coeficiente de correlação $r_8 = 0,11$ apresentando um erro médio de medida $e_8 = 23,14\%$.

A Figura 28 apresenta 7 pares de dados (17, 25, 50, 75, 100, 125 e 150cm de profundidade) de regressão utilizados na obtenção da curva de calibração da Sonda 1. Da regressão linear conjunta, resultou um coeficiente de correlação $r_9 = 0,99$ apresentando um erro médio de medida $e_9 = 2,63\%$.

A Figura 29 apresenta 9 pares de dados (0, 8, 17, 25, 50, 75, 100, 125 e 150cm de profundidade) de regressão utilizados na obtenção da curva de calibração da Sonda 1, fazendo uso do refletor de nêutrons. Da regressão linear conjunta, resultou um coeficiente de correlação $r_{10} = 0,72$ apresentando um erro médio de medida $e_{10} = 8,45\%$.

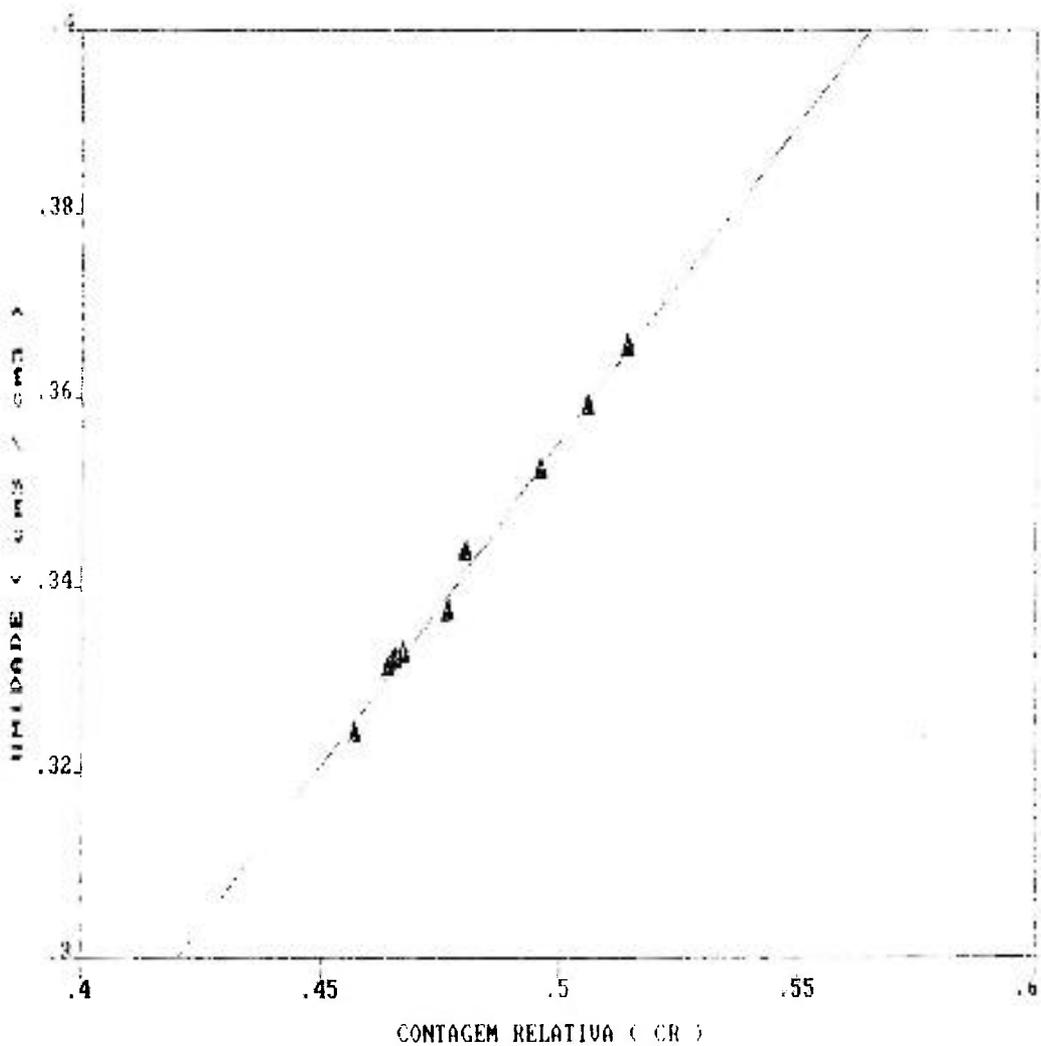


Figura 26 - Calibração da sonda 1 utilizando o método da fração perdida (0 a 150cm de profundidade) para o solo TRE.

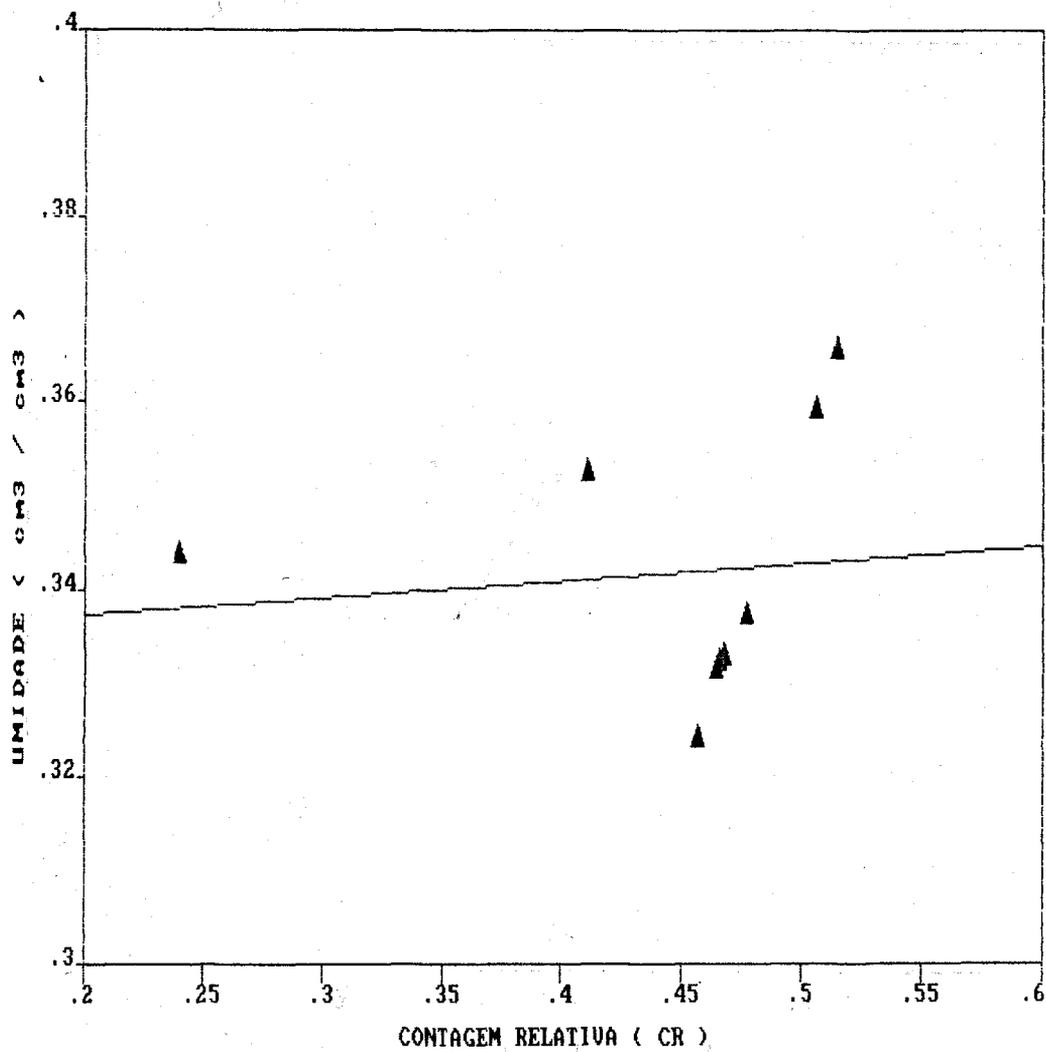


Figura 27 - Calibração da sonda 1 utilizando o método da trincheira para o solo Terra Roxa Estruturada (0 a 150cm de profundidade) para o solo TRE.

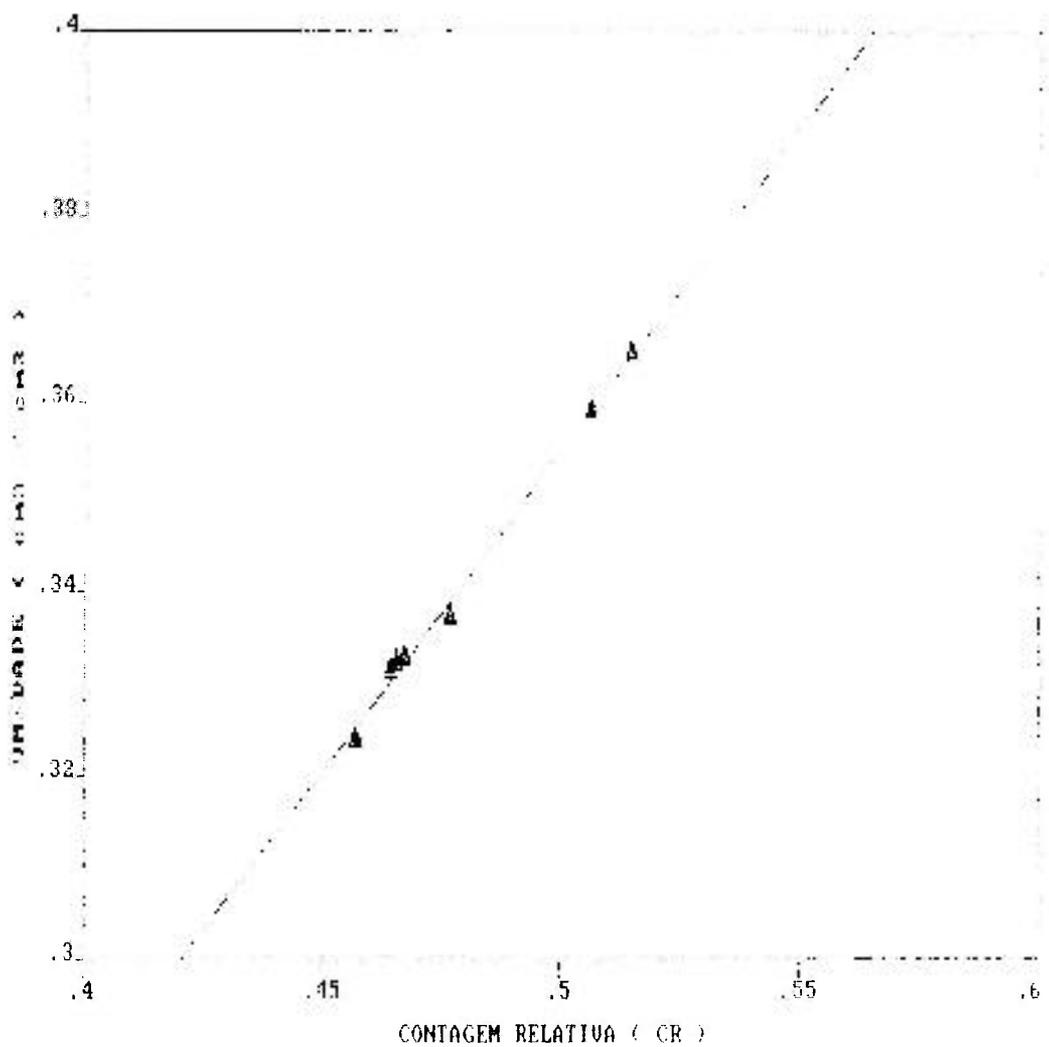


Figura 28 - Calibração da sonda 1 utilizando o método da trincheira para o solo Terra Roxa Estruturada (17 a 150cm de profundidade) para o solo TRE.

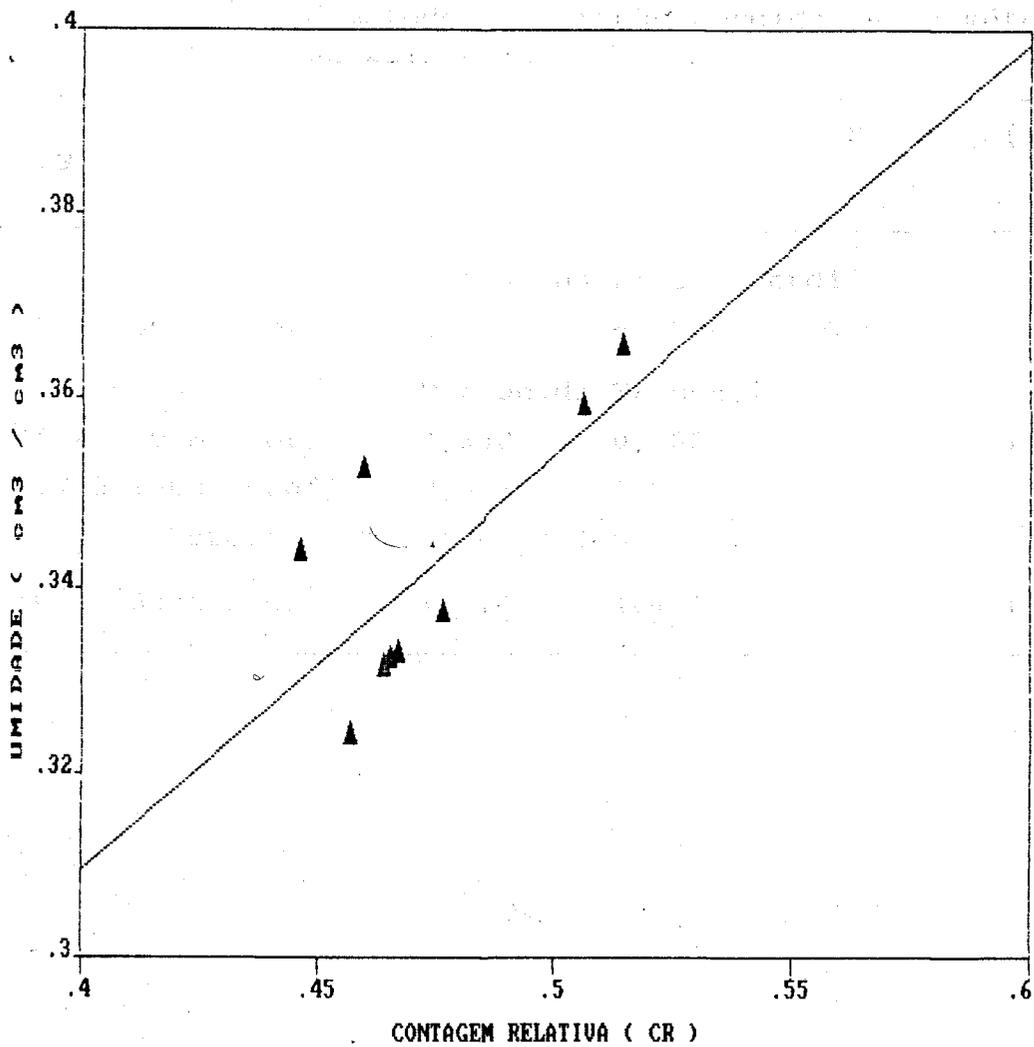


Figura 29 - Calibração da sonda 1 com refletor, utilizando o método da trincheira para o solo Terra Roxa Estruturada (0 a 150cm de profundidade) para o solo TRE.

A Tabela 8 apresenta um resumo dos dados obtidos para calibrações que foram realizadas utilizando os métodos da fração perdida e da trincheira para o solo Terra Roxa Estruturada.

Tabela 8 - Calibrações da sonda 1 para Terra Roxa Estruturada (condição solo úmido), para o método da fração perdida e o método da trincheira.

$\theta = a + b(\text{CR})$	a ($\times 10^{-1}$)	b ($\times 10^{-1}$)	r	e(%)
	Método da Fração Perdida			
(0 à 150cm prof)	0,108	6,8860	0,99	2,81
	Método da Trincheira			
(0 à 150cm prof)	3,338	0,1826	0,11	23,14
(17 à 150cm prof)	0,098	6,9040	0,99	2,63
	Método da Trincheira (com refletor de nêutrons)			
(0 à 150cm prof)	1,314	4,4510	0,72	8,45

3.4 VARIABILIDADE da MEDIDA de UMIDADE

A Figura 30 apresenta a distribuição da medida de umidade do solo, nas profundidades 15, 20, 25 e 30cm, para as condições de solos seco e úmido.

A Figura 31 apresenta a distribuição da medida de umidade do solo, nas profundidades 35, 40, 45 e 50cm, para as condições de solos seco e úmido.

A Figura 32 apresenta a contagem relativa para o solo em função da profundidade, para as condições de solos seco e úmido.

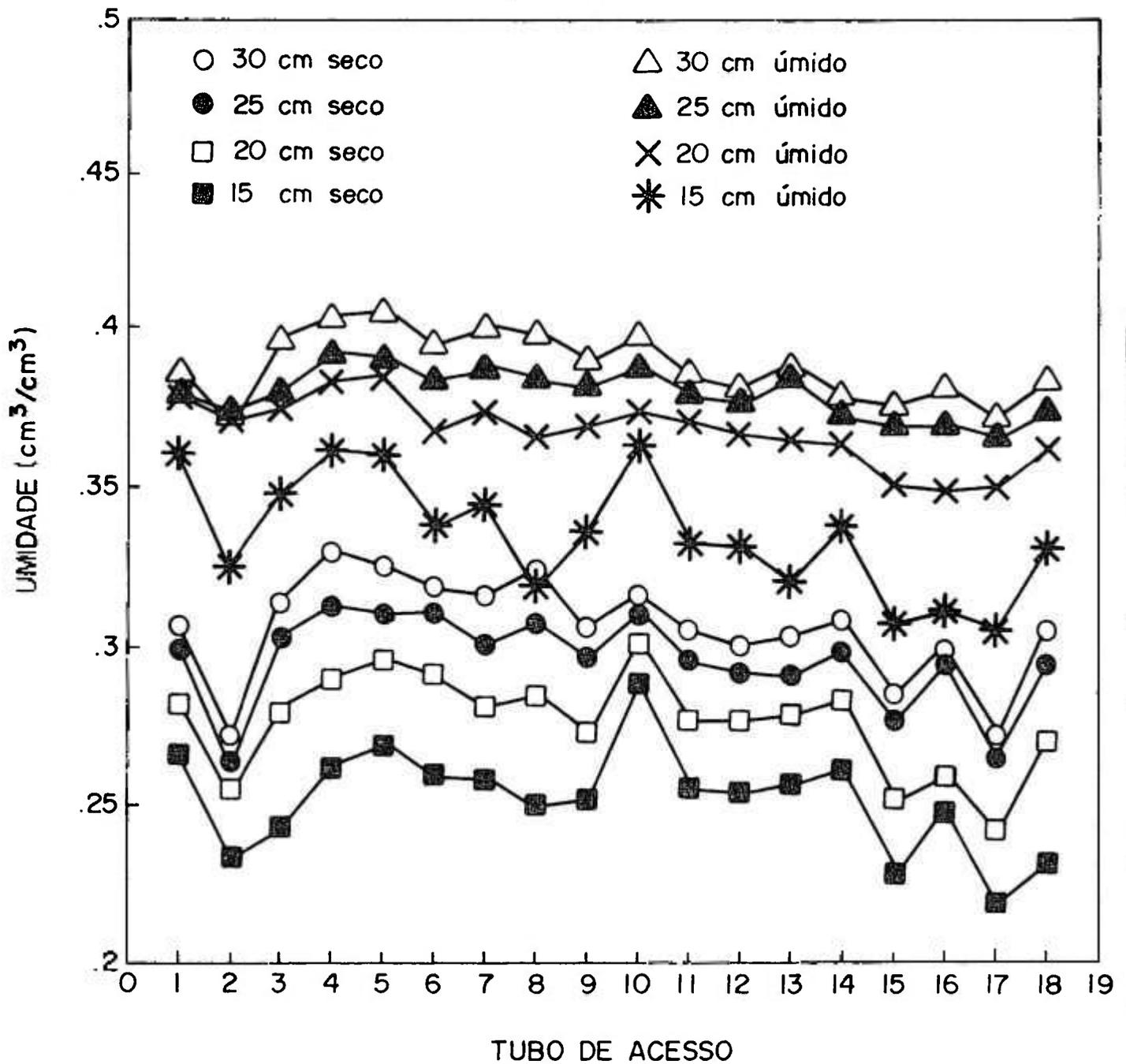


Figura 30: Distribuição da medida de umidade do solo, nas profundidades 15, 20, 25 e 30 cm, para condições seca e úmida.

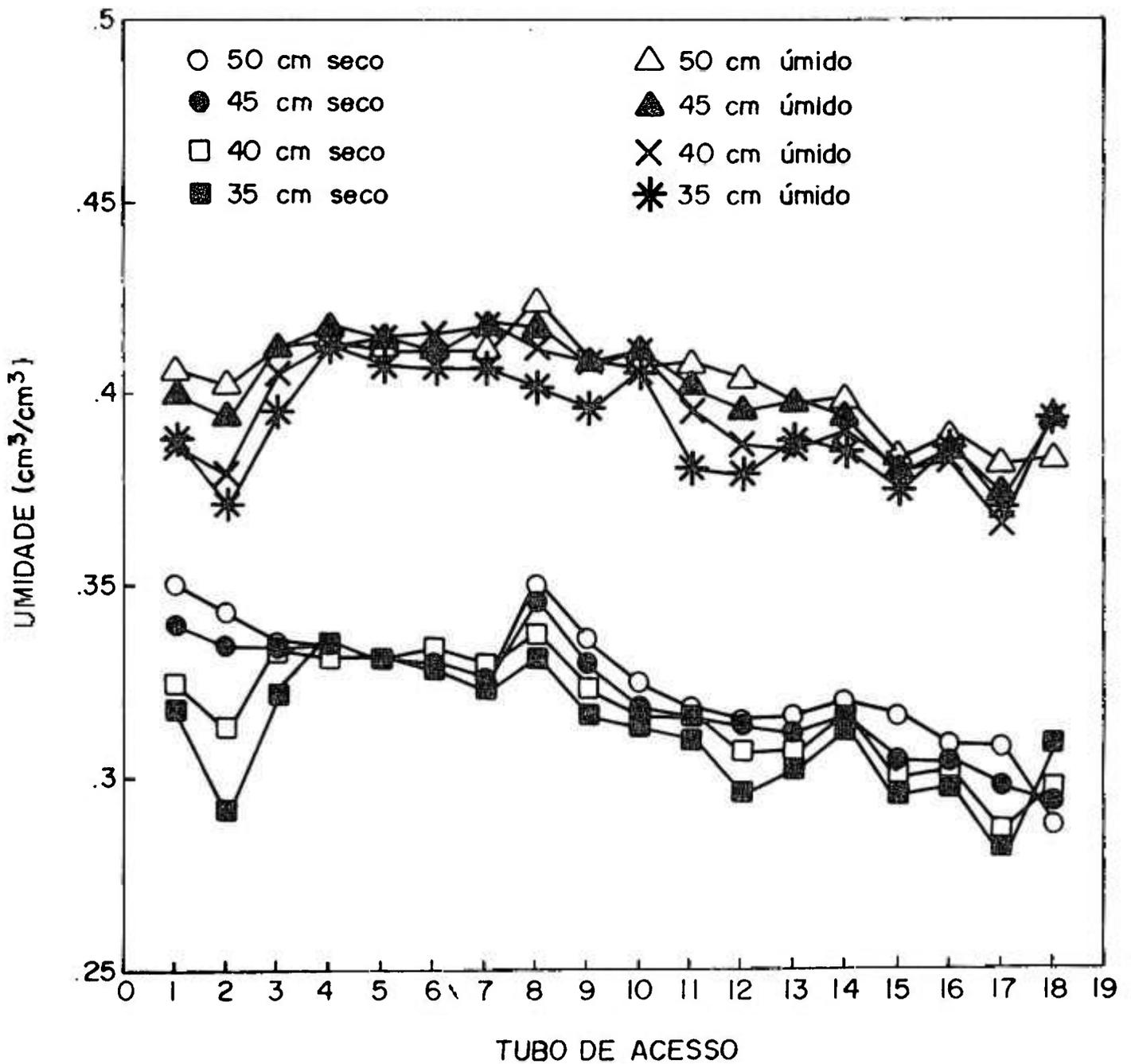


Figura 31: Distribuição da medida de umidade do solo, nas profundidades 35, 40, 45 e 50 cm, para condições seca e úmida.

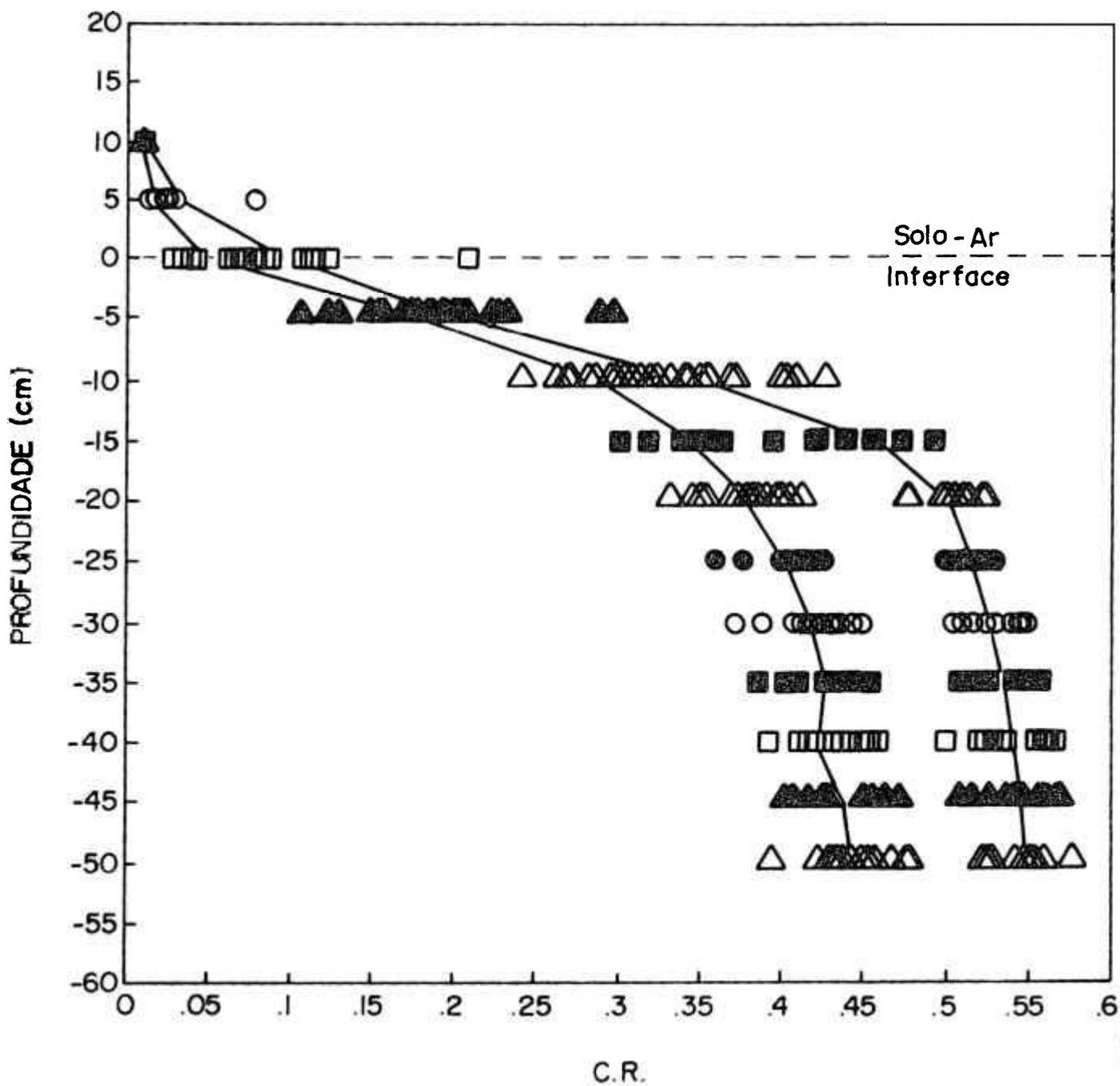


Figura 32: A medida de umidade do solo em função da profundidade para condições seca e úmida.

Nas Tabelas 9 e 10 estão quantificadas a variabilidade das medidas de umidade do solo apresentadas nas Figuras 30 e 31, onde calculamos o valor de N (nº de medidas necessárias para obter um novo valor médio dentro de um desvio (d%) para a estimativa de um ajuste médio. N foi calculado de acordo com WARRICK & NIELSEN (1980), utilizando a equação 15:

$$N = x_{\alpha}^2 \sigma^2 / d^2 \quad (15)$$

onde $x_{\alpha} = 1,96$ e σ^2 a variância. Os valores de N mostrados nessas tabelas são balizamentos para a questão mais comum, que é a recomendação do número de tubos de acesso necessários para determinada condição de solo.

Tabela 9 - Valores médios, variâncias, coeficientes de variação e número de amostras N necessárias para a maior precisão, nas medidas com sondas de nêutrons, na condição de solo seco.

CONDIÇÃO SOLO SECO						
PROF. (cm)	UMIDADE (cm ³ /cm ³)	VAR. x 10 ⁻⁴	C.V. %	n ^o de AMOSTRAS		
				M 5%	M 2%	M 1%
50	0,3244	0,62	4,68	1	6	23
45	0,3208	0,38	3,79	1	4	15
40	0,3171	0,76	4,48	2	8	29
35	0,3124	1,46	4,67	3	15	58
30	0,3052	2,16	5,21	4	23	89
25	0,2945	1,81	4,85	4	20	80
20	0,2763	1,78	5,46	4	23	90
15	0,2523	2,10	6,26	5	27	127

Tabela 10 - Valores médios, variâncias, coeficientes de variação e número de amostras N necessárias para a maior precisão, nas medidas com sondas de nêutrons, na condição de solo úmido.

PROF. (cm)	UMIDADE (cm ³ /cm ³)	CONDIÇÃO SOLO ÚMIDO				
		VAR. x 10 ⁻⁴	C.V. %	n ^o de AMOSTRAS		
				M 5%	M 2%	M 1%
50	0,4023	0,58	2,83	1	4	14
45	0,4011	0,97	3,22	1	6	24
40	0,3974	1,73	3,75	2	11	42
35	0,3924	1,42	3,29	2	9	36
30	0,3869	0,87	2,71	1	6	23
25	0,3787	0,33	1,90	1	3	9
20	0,3679	0,36	2,77	1	3	11
15	0,3354	1,94	5,40	3	7	67

Alguns autores como HAVERCAMP et al (1984), MENDES et al (1992) e TURATTI & REICHARDT (1992) consideram a medida superficial (medida realizada a 0cm de profundidade), tal qual a primeira medida feita em profundidade. KIRDA & REICHARDT (1992) compararam medidas de sondas de nêutrons com outras medidas, utilizando metodologias não-nucleares, evitando discutir medidas de superfície com sondas de nêutrons.

Neste trabalho apresentamos novas metodologias experimentais para a obtenção da esfera de influência da sonda de nêutrons para a água e para o solo. Os resultados obtidos com esta finalidade, apresentaram boa precisão e permitem com segurança estabelecer a partir de que profundidade, podemos ter uma calibração para a sonda de nêutrons com o menor erro possível. Os erros envolvidos nas medidas de contagens (c/s) realizadas na água foram em média 1,31%, enquanto que para as medidas de contagens (c/s) realizadas no solo, os erros foram em média 1,64% .

O monitor de U_3O_8 apresentado pode ser utilizado em densidades de fluxo de 1 a 10^9 n/cm² s. Acima deste intervalo, o tempo de irradiação deverá ser menor que 1 minuto, para se obter uma densidade de traços razoável, o que nem sempre é possível. Abaixo deste intervalo deve-se levar em consideração a influência da fissão espontânea do ^{238}U no número total de traços contados no detetor.

Para densidades de fluxo maiores que

10^9 n/cm².s os procedimentos adotados neste trabalho podem ser usados para se calibrar cilindros com baixo número de átomos de urânio por volume. Para densidades de fluxos menores que 1 n/cm².s pode-se utilizar, ao invés de urânio, o boro ou lítio. Nestes casos os carregamentos de emulsões também são conhecidos em BARKAS (1963) e pode-se, por exemplo, utilizar como SSNTD, o CR-39, LR-115 ou o CN-85.

Quanto ao resultado obtido na operação do monitor U_3O_8 , mesmo efetuando contagens pequenas (± 200 traços sem o filtro de cádmio e ± 100 traços com o filtro) e utilizando um erro grande de aproximadamente 20% para os parâmetros envolvidos no cálculo de H (ver apêndice), obtivemos um erro razoável de aproximadamente 4% para as medidas de fluxo.

A Figura 11 nos mostra uma concordância quanto ao raio da esfera de influência na água, entre o método do monitor e os demais métodos apresentados com o mesmo objetivo, pois podemos observar que até a distância entre a fonte e o detetor (d) igual a 11cm temos os dois picos de traços de fissão. Em termos de número de nêutrons podemos observar que até este ponto, aproximadamente 90% dos nêutrons térmicos, foram detetados. A existência de nêutrons térmicos detetados a partir de 11cm pode explicar, em termos de aplicação do método monitor neste trabalho, o fato da esfera de influência apresentar seu limite externo difuso, fato este citado na seção 2.1.1 .

O resultado obtido para o método do

monitor na Figura 11, concorda com o resultado do espectro de energia para a fonte de Am-Be apresentado por LORCH (1973).

Quanto ao raio da esfera de influência para a água, os resultados obtidos neste trabalho estão de acordo com os resultados de Salati (1960), que utilizou como fonte de nêutrons rápidos uma fonte de rádio-berílio, e como detetor de nêutrons térmicos placas de índio.

Devido aos processos de interação dos nêutrons com os componentes do solo, geometria da sonda, tipo de detetor, eletrônica, etc, cada solo apresenta uma curva de calibração específica para cada sonda de nêutrons.

Analisando os dados obtidos através da Tabela 7, podemos dizer que na calibração da sonda SOLO 25 através do método da trincheira apresentado na seção 2.3, seja a Sonda 1 ou a Sonda 2, os pontos de superfície não devem entrar na calibração, tanto no uso do refletor como sem seu uso. Os pontos de superfície quando são amostrados pela sonda de nêutrons, tem grande parte da esfera de influência fora do solo, na atmosfera, o que além de aumentar o erro na medida não nos fornece praticamente nenhuma informação a respeito da umidade desses pontos.

Os resultados obtidos para as calibrações das sondas com o uso de refletores, nos mostra que não existe uma melhora nos resultados. O que é importante ressaltar no uso dos refletores, é sua utilidade

na proteção radiológica mais efetiva, para medidas próximas à superfície.

Os resultados obtidos para a calibração das sondas considerando pontos a partir de 25cm de profundidade até 150cm, mostraram que entre as duas sondas os resultados obtidos não são discrepantes, pois as contagens com as sondas são sempre consideradas em relação a um padrão, que no caso é a água. A sonda 2 mostrou um coeficiente de correlação (r) melhor, bem como uma variância menor que a apresentada pela sonda 1. Os coeficientes de correlações obtidos (0,96 para a sonda 1 e 0,98 para a sonda 2), podem ser considerados muito bons, significando uma baixa dispersão dos dados. Calibrações de laboratório, com solo homogêneo, apresentam valores para o coeficiente de correlação (r) da ordem de 0,99 (TURATTI et al 1990). As calibrações de sondas no solo encontradas na literatura, apresentaram dispersão maior dos dados, como para BABALOLA (1978), HAVERCAMP et al.(1984), CARNEIRO & De JONG (1985), CHAWLA & TRIPATHI (1987) e TURATTI et al. (1990).

Quanto ao método da fração perdida, desenvolvido neste trabalho, para a obtenção da calibração da sonda de nêutrons, em princípio nos parece encorajador pois mesmo com os pontos de superfície (0 e 8cm) a curva de calibração foi bastante semelhante à obtida sem a correção pelo método da trincheira a partir de 17cm de profundidade (Tabela 8), profundidade esta em que a esfera de influência

para o solo Terra Roxa Estruturada está totalmente dentro do solo, segundo nossos resultados.

As Figuras 33 e 34 nos mostram a aplicação do método da fração perdida sobre os dados obtidos pelo método da interface nas Figuras 9 e 10, respectivamente, onde observamos que a aplicação deste método mais uma vez (e agora para a água) mostrou-se eficaz, cujo objetivo foi a recomposição da esfera de influência da sonda de nêutrons em termos de contagem, mantendo-a praticamente constante desde 30cm de profundidade até a interface água-ar (superfície da água). Este fato pode ainda ser constatado estatisticamente pelos desvios padrões percentuais apresentados nas Figuras 33 (0.11% - para a sonda 1) e 34 (0,16% para a sonda 2). O fatores de correção para o método da fração perdida para a água utilizados nas Figuras 33 e 34 foram: 1,007303 para a profundidade 9cm, 1,028806 para 8cm de profundidade, 1,06468 para 7cm de profundidade, 1,116072 para 6cm de profundidade, 1,185185 para 5cm de profundidade e 2,0 para Zero cm de profundidade.

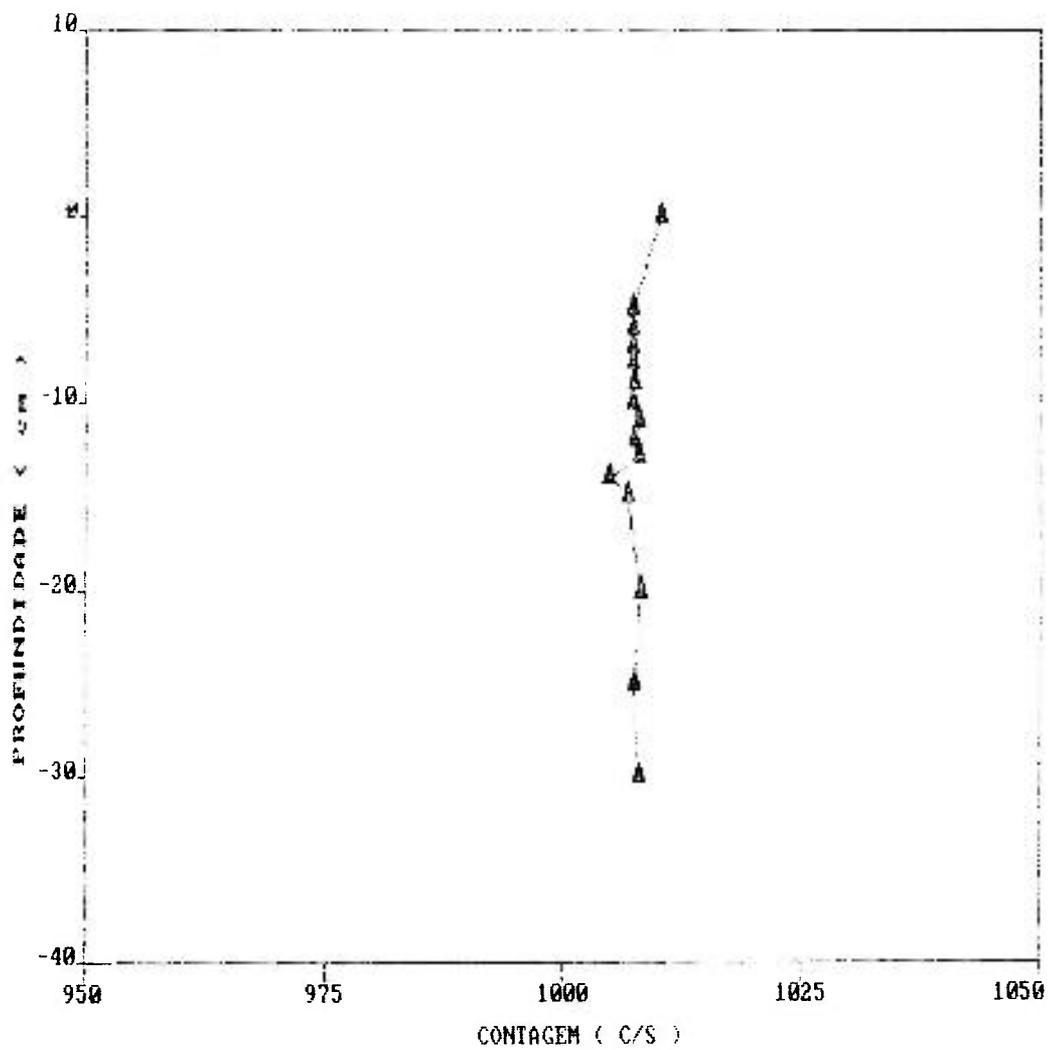


Figura 33 - Aplicação do método da fração perdida nos dados obtidos pelo método da interface para a Figura 9.

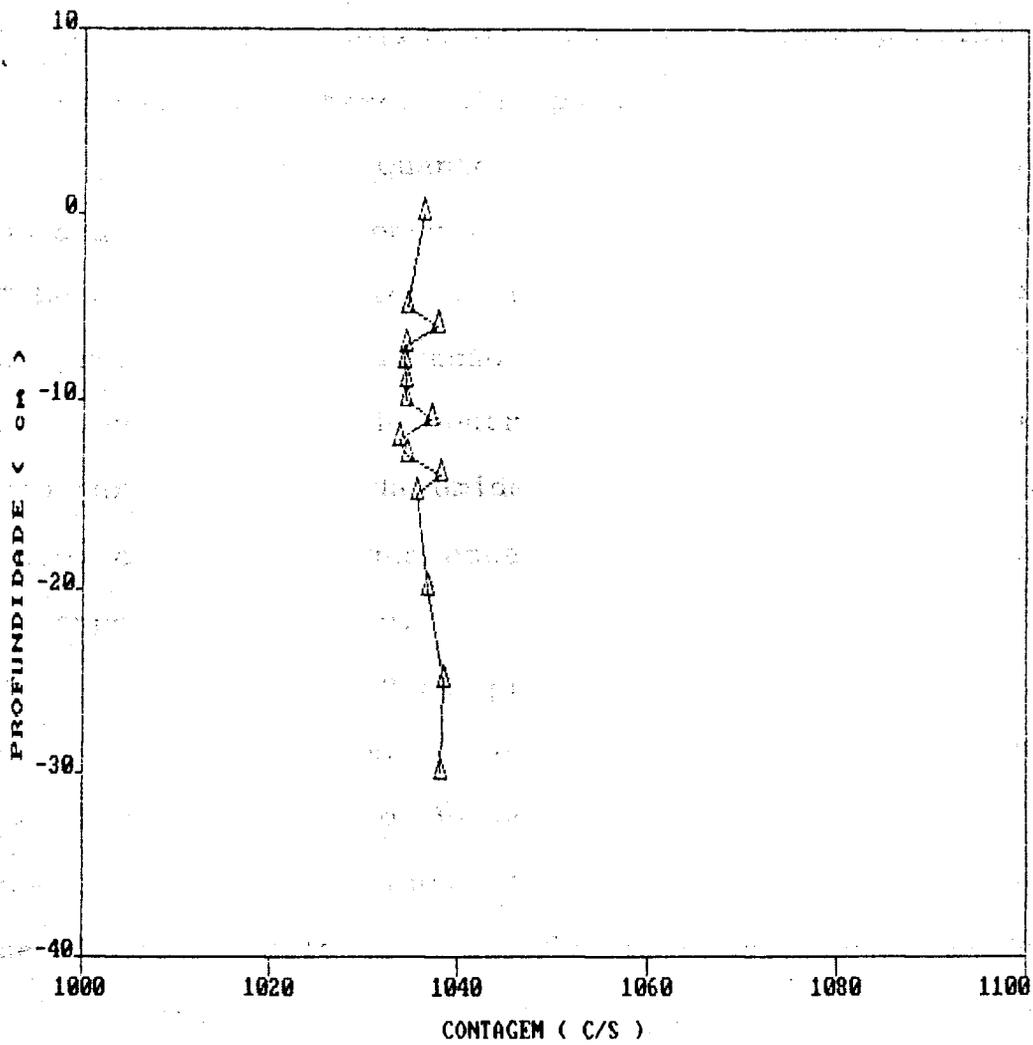


Figura 34 - Aplicação do método da fração perdida nos dados obtidos pelo método da interface para a Figura 10.

Não nos foi possível estabelecer comparações entre a sonda 1 e a sonda 2 tanto para a esfera de influência no solo quanto para a calibração da sonda pelo método da fração perdida, pois a sonda 2, nesta fase do trabalho, deixou de funcionar.

Não nos foi possível completar a calibração da sonda 1 pelo método da fração perdida porque também a sonda 1 deixou de funcionar, sem a possibilidade de recuperação à tempo hábil para este trabalho.

Quanto a variabilidade espacial da umidade do solo podemos observar, a partir da análise das Tabelas 9 e 10, a tendência do crescimento de C.V. de 50cm de profundidade em direção à superfície do solo, que pode ser devida a perda de nêutrons para a atmosfera. É difícil separar os efeitos da umidade dos efeitos de densidade do solo, considerando que estes parâmetros são mais variáveis na superfície do solo.

Para profundidades maiores que 30cm, para as quais temos a certeza que a nuvem de nêutrons térmicos está dentro do solo (esfera de influência), os coeficientes de variação foram da ordem de 4,5% para a condição de solo seco e de 3,0% para a condição de solo úmido.

CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos para a esfera de influência da SOLO 25 através dos métodos apresentados neste trabalho, podemos concluir que são concordantes entre si e nos indicam que:

- O raio da esfera de influência para a água foi de aproximadamente 10cm.

- O raio da esfera de influência para o solo Terra Roxa Estruturada em condição de solo seco foi de aproximadamente 23cm.

- O raio da esfera de influência para o solo Terra Roxa Estruturada em condição de solo úmido foi de aproximadamente 17cm.

Os resultados obtidos para as calibrações da SOLO 25 utilizando o método da trincheira, nos mostram que este método só é válido para calibrações feitas após a determinação do raio da esfera de influência para o solo em condição de solo seco. Para o solo Terra Roxa Estruturada este método é válido para calibrações feitas a partir de 23cm de profundidade.

O resultado obtido para o método da fração perdida, mesmo que tenhamos apenas resultado parcial para a calibração, nos indica que este método poderá ser utilizado para calibração de sonda de nêutrons em qualquer profundidade no solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BABALOLA, O. Field calibration and use of the neutron moisture meter on some Nigerian soils. *Soil Sci.*, 126 (2) : 118-123, 1978.
- BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. A sonda de nêutrons e seu uso na pesquisa agronômica. *Boletim Didático* nº 22, Piracicaba, CENA/USP, 1990.
- BARKAS, W.H. *Nuclear Research Emulsion :Part I*, Academic Press, 1963.
- BURCHAM, W.E. *Física Nuclear*. Madri, Editora Reverté, 1974.
- CARNEIRO, C.; DE JONG, E. "In situ" determination of the slope of the calibration curve of a neutron probe using a volumetric technique. *Soil Sci.*, Baltimore, 139 :250-254, 1985
- CHAWLA, A.S.; TRIPATHI, S.K. Neutron moisture probe calibration for crop water management. In: *International Conference on Measurement of Soil and Plant Water Status. Soils. Logan, Proceedings. 1* : 29-35, 1987.

COWAN, G.A. , ADLER H.H., The variability of the natural abundance of ^{235}U . *Geochim. Cosmochim. Acta*, 40: 1487-1488, 1976.

De CARVALHO, H.G. The Preceding Loading of Nuclear Emulsion, *Progress in Nuclear Technique and Instrumentation 1* North Holland, Amsterdam, :247, 1965.

DRAGU, A. Absolute measurement of thermal and fast neutron fluence with LR - 115. *Nuclear Tracks Radiation Measurements*. 19 :461-463, 1991.

EVANS, R.D. *THE ATOMIC NUCLEUS*, New York, Mc Graw-Hill, 1972.

FREIRE, J.C.; RIBEIRO M.A.V.; BAHIA V.G.; AQUINO L.H. Resposta do milho cultivado em casa-de-vegetação a níveis de água em solos da região de lavras. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Campinas, 4 : 5-8, 1980.

GREACEN, E.L. *Soil Water Assessment by Neutron Method*. Adelaide Austrália, CSIRO, 1981.

HADLER NETO, J.C. *Estudo sobre traços anômalos observados em emulsões nucleares carregadas com urânio*. Campinas, 1979. (Dissertação de mestrado, Instituto de Física, Universidade Estadual de Campinas).

HADLER NETO, J.C. Medida de constante de desintegração do ^{238}U por fissão espontânea. Campinas, 1982. (Tese de doutorado, Instituto de Física, Universidade Estadual de Campinas).

HAVERCAMP, R.; VAUCLIN, M.; VACHAUD G. Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements: Local standpoint. Soil. Sci., 137 (2) : 78-90, 1984

HOLDEN, N.E. , HOLDEN K.A. Reexamination of 2200 meter/second cross section experiments from neutron capture and fission standards. Rep. BNL-NCS-36865 presented at 33rd IUPAC., : 143, 1985.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Neutron Fluence Measurements, Technical Reports Seriesn^o 107 Viena 1970.

KAPLAN, I. Física Nuclear. 2^a ed. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1963.

KIRDA, C.; REICHARDT, K. Comparison of neutron moisture gauges with non-nuclear methods to measure field soil water status. Sci.Agr., Piracicaba, 49 (1), :111-121, 1992.

LORCH, E.A. Int. J. Appl. Radiat. Isotopes 24 , :588-589,
1973.

LOVESEY, S.W. Theory of Neutron Scattering from Condensed
Matter, Clarendon Press. Oxford, 1986.

MENDES, M.E.G., VILLAGRA, M.M., SOUZA, M.D., BACCHI, O.O.S.,
REICHARDT, K. Relações hídricas em seringal no município
de Piracicaba, S.P. Sci.Agr., Piracicaba, 49 (1), :
103-109, 1992.

REICHARDT, K. Processos de Transferência no Sistema
Solo-Planta-Atmosfera. 4^a edição, Campinas, Fundação
Cargill, 1985.

REICHARDT, K. A Água em Sistemas Agrícolas. São Paulo
Editora Manole, São Paulo, 1987.

REICHARDT, K. Neutron probes and their use in Agronomy.
Notes from the "College on Soil Physics", Trieste, Italy
ICTP, 1989.

RITCHIE, R. H., ELDRIDGE, H.B. Nuclear Sci. Eng. 9, : 198
In: K.H.Beckurts and K.Wirtz. Neutron Physics. Berlin,
Göttingen Heildelberg, 1964.

SALATI, E. Introdução ao Estudo da Água do Solo pela Moderação de Nêutrons. Piracicaba, 1960. (Tese de Livre Docência, ESALQ, Universidade de São Paulo), 1960.

TURATTI, A.L.; VILLAGRA, M.M.; PONCE, J.E.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. Variabilidade do solo e sua aplicação na calibração de sonda de nêutron. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, 14 : 259-262, 1990.

TURATTI, A.L.; REICHARDT, K. Soil water storage variability in Terra Roxa Estruturada. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Campinas, 15(3) : 253-257, 1991.

TURCOTTE, D.L. Fractals and fragmentation. *Journal of Geophysic Research*, 91(2) : 1921-1926, 1986.

TYLER, W.S.; WHEATCRFT S.W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. *Soil Science Society of America Journal*, 3 : 987-996, (1989).

TYLER, W.S.; WHEATCRFT S.W. Fractal processes in soil water retention. *Water Resources Research*, 26 (5), : 1047-1054, 1990.

U.S. ATOMIC ENERGY COMMISSION, Reactor Physics Constants, Report ANL- 5800, Vermont, 1958.

VAUCLIN, M.; HAVERCAMP, R.; VACHAUD, G. Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements: 2. Spatial standpoint. *Soil. Sci.*, 137 (3) : 141-148, 1984.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: **Application of Soil Physics**. New York, Academic Press, 1980. Capítulo 13 :319-344, 1980.

WESTCOTT, C.H., **Effective Cross-Section Values For Well-Moderated Thermal Reactor Spectra**. Atomic Energy of Canada Ltda (3rd edition), AECL Report 1101, 1960.

APÊNDICE

INTRODUÇÃO

Baixas densidades de fluxo estacionário de nêutrons térmicos (BDFENT) são densidades de fluxo $\leq 10^{10}$ n .cm⁻².s⁻¹, cujas medidas são importantes em vários estudos relacionados com a física de nêutrons (IAEA, 1970).

Em 1991, a utilização de Solid State Nuclear Track Detectors (SSNTD) foi apresentada como uma alternativa às técnicas convencionais de medidas de BDFENT (DRAGU, 1991). Foi demonstrado que filmes finos (filmes onde a auto-absorção é negligenciável para partículas alfa, no caso) de LiF acoplados a SSNTD podem ser utilizados como monitores de nêutrons térmicos. Esta técnica pode ser estendida para outros conversores, além do Li, desde que seja satisfeita a condição de que não exista auto-absorção no filme utilizado.

Neste trabalho apresentamos uma nova técnica de medida absoluta de BDFENT utilizando SSNTD onde o conversor é um filme onde existe auto-absorção. O conversor utilizado neste trabalho foi o ²³⁵U.

Os procedimentos adotados neste trabalho podem ser estendido para outros conversores, como por exemplo o Li ou B.

1. CARACTERIZAÇÃO DO MONITOR

O monitor utilizado neste trabalho é constituído de um cilindro de U_3O_8 com $(0,23 \pm 0,01)$ cm de espessura, $(3,3 \pm 0,1)$ cm de diâmetro e $(7,16 \pm 0,05)$ g.cm⁻³ de densidade, sendo colocado justaposto a um SSNTD para fragmentos de fissão (lâmina de mica muscovita). A composição isotópica do urânio presente no cilindro é natural.

Quando este monitor é irradiado em um fluxo estacionário de nêutrons térmicos, a densidade superficial de fissão registrada pela mica, depois de um ataque químico conveniente, é dado por:

$$\rho_f = N_v \epsilon C_{235} \psi \tau \sigma H \quad (16)$$

onde,

N_v é o número de átomos de urânio por unidade de volume, presente no cilindro;

ϵ é um fator de eficiência de detecção, que representa a razão entre o número de traços de fissão por unidade de superfície observados na mica e o número de fissões por unidade de volume, ocorridas no cilindro;

C_{235} é a concentração isotópica do ^{235}U no urânio contido no cilindro;

ψ é a densidade de fluxo de nêutrons térmicos;

t é o tempo de irradiação;

σ é a seção de choque do ^{235}U para fissão por nêutrons térmicos;

H é o coeficiente de depressão do fluxo, sendo definido como a razão entre o fluxo na superfície do detetor e o fluxo no meio sem a presença do detetor.

O cálculo de H para o cilindro pode ser efetuado com o auxílio das equações abaixo (IAEA, 1970):

$$H = [1 + g \ x \ G \ (\Sigma_c / \Sigma_t)]^{-1} \quad (17)$$

$$G = \frac{1 - P_c}{1 - (1 - \Sigma_c / \Sigma_t) P_c} \quad (18)$$

$$P_c = (4/3) \ x + [\ln(x/2) - 0.673] \ x^2/2 \quad (19)$$

$$x = (2V/S) \ \Sigma_t \quad (20)$$

$$g = (4/\pi) \ (R/\lambda_t) \ [1 - (3\pi/16) (R/L)] - K(2R/\lambda_t) \ \gamma \quad (21)$$

onde,

Σ_c é a seção de choque macroscópica para captura do cilindro;

Σ_t é a seção de choque macroscópica total do cilindro;

V é o volume do cilindro;

S é a área superficial do cilindro;

R é o raio do cilindro;

λ_t é o livre caminho médio para transporte do meio que circunda o cilindro;

L é o comprimento de difusão térmica do meio;

K é o coeficiente determinado a partir de curvas obtidas como função de $2R/\lambda_t$ para diferentes valores de γ (RITCHIE & ELDRIDGE, 1961);

γ é a razão entre a seção de choque de difusão e total do meio.

Em casos onde a contribuição de nêutrons epitérmicos não seja negligenciável, este monitor pode ser utilizado com o auxílio de um filtro de cádmio, IAEA (1970). A densidade de fluxo de nêutrons térmicos neste caso é dado por:

$$\varphi = \frac{[(\rho_1 / t) - (\rho_1 / t)_{cd}]}{N_v \epsilon C_{235} \sigma H} \quad (22)$$

onde (ρ_I/t) e $(\rho_I/t)_{\text{em}}$ se referem às razões entre densidades de traços e tempo de irradiação correspondentes a irradiação feitas sem e com a presença de filtros de cádmio, respectivamente.

2. OPERACIONALIZAÇÃO DO MONITOR

Pelas equações descritas acima vemos que o monitor apresentado pode ser utilizado na medida de densidade de fluxos estacionários de nêutrons térmicos se a quantidade $N_v \epsilon$ for determinada.

Neste trabalho o valor de $N_v \epsilon$ foi obtido com o auxílio de emulsão nuclear carregada com urânio.

As técnicas de carregamento de emulsões nucleares são bastante conhecidas (BARKAS, 1963), sendo particularmente usada neste trabalho a técnica desenvolvida por De CARVALHO (1965).

Emulsões nucleares carregadas com urânio podem ser utilizadas como monitores de nêutrons térmicos HADLER NETO.(1982). Porém as condições nas quais isto é possível, temperatura $\leq 15^{\circ}\text{C}$ e baixo fluxo de radiação ionizante, nem sempre são encontradas na prática.

Quando irradiamos com nêutrons térmicos (nas condições especificadas acima) uma emulsão nuclear carregada com urânio natural, a densidade superficial de traços de fissão induzidas é dado por:

$$\rho'_I = N'_v \epsilon' h' C_{235} \sigma \varphi' t \quad (23)$$

onde,

N'_v é o número de átomos de urânio por unidade de volume da emulsão carregada;

h' é a espessura da emulsão;

ϵ' é a razão entre o número de traços de fissão registrados na emulsão e o número de fissões ocorridas;

φ' é o fluxo de nêutrons térmicos no interior da emulsão.

Quando irradiamos com nêutrons térmicos uma emulsão carregada justaposta a uma mica acoplada a um dos lados do cilindro de U_3O_8 , o fluxo de nêutrons térmicos no interior da emulsão (φ') é igual ao fluxo de nêutrons na superfície do cilindro (φH). Desta forma, das equações (16) e (20) tem-se que:

$$N_v \epsilon = (\rho_I / \rho'_I) N'_v \epsilon' h' \quad (24)$$

Devido à grande massa e carga dos fragmentos de fissão, as emulsões nucleares são mais sensíveis a estes que às partículas alfa. Desta forma, é possível efetuar tratamentos químicos em emulsões, que possuem traços de fragmentos de fissão e de partículas

alfa, de tal forma que somente os traços de fragmentos de fissão sejam revelados, De CARVALHO (1965).

Neste trabalho foram utilizadas emulsões K0 da Ilford e os processos de revelações adotados foram desenvolvidos na Universidade Estadual de Campinas por HADLER NETO (1982) e estão descritas abaixo.

Na revelação para partículas alfa a emulsão é colocada no revelador por 50 minutos, no freiador por 5 minutos e no fixador por aproximadamente 25 minutos (a temperatura é mantida à 20°C). Em um litro de revelador tem-se 12g de ácido bórico, 7g de sulfito de sódio, 0,2g de brometo de potássio e 2,5g de amidol dissolvidos em água. No freiador em um litro tem-se 5g de sulfito de sódio e aproximadamente 10ml de ácido acético dissolvido em água (o ácido acético em quantidade suficiente para que o pH seja 4). No fixador em um litro tem-se 400g de hipossulfito de sódio e 5g de sulfito de sódio dissolvidos em água.

Na revelação para fragmentos de fissão a emulsão é imersa no revelador por 240 minutos à 8°C, no freiador por 15 minutos à 10°C e no fixador por 40 minutos à 12°C. Um litro de revelador, neste caso, consiste de 6g de ácido bórico, 17g de sulfito de sódio, 1,2g de brometo de potássio e 0,3g de amidol dissolvidos em água, sendo que o freiador e o fixador são iguais aos utilizados na revelação de partículas alfa.

Após a fixação nos dois casos as emulsões são imersas em água desmineralizada por 20 minutos aproximadamente a 15°C e em seguida em uma solução com composições volumétricas de 20% de água, 75% de álcool etílico e 5% de glicerina, durante 10 minutos a 17°C.

Os processos de revelações descritos acima fazem com que os traços de fissão e de partículas alfa tenham uma densidade de grãos muito elevada e sejam facilmente observados ao microscópio. Apesar da densidade de grãos ser elevada nos dois casos, o comprimento médio dos traços de fragmentos de fissão $(24,20 \pm 0,13)\mu\text{m}$ é maior que os traços das partículas alfa do urânio $(17,0 \pm 1,0)\mu\text{m}$, o que os coloca em melhores condições de distinção na observação ao microscópio.

Desta forma podemos afirmar que a eficiência para detecção de fragmentos de fissão no nosso caso é maior ou igual a eficiência para detecção de partículas alfa do urânio, ϵ'_{α} , e como será mostrado abaixo $\epsilon'_{\alpha} = 1$, portanto $\epsilon' = 1$.

A densidade de traços de partículas alfa em uma emulsão carregada com urânio natural revelada a um tempo t' contado a partir do carregamento é dada por:

$$\rho'_{\alpha} = N'_{\nu} \epsilon'_{\alpha} h' t' (2 C_{238} \lambda_{238} + C_{235} \lambda_{235}) \quad (25)$$

onde,

C_{238} é a concentração isotópica do ^{238}U no urânio natural;

λ_{238} é a constante de decaimento alfa do ^{238}U ;

λ_{235} é a constante de decaimento alfa do ^{235}U .

Nesta equação assumimos que o ^{234}U e o ^{238}U estão em equilíbrio secular, já que o ^{234}U pertence à cadeia radioativa do ^{238}U .

Substituindo os valores das constantes na equação (25) temos que:

$$\rho'_{\alpha} = (8,58 \pm 0,04) \times 10^{-13} N'_{\nu} \epsilon'_{\alpha} h' t' \quad (26)$$

Neste trabalho, N'_{ν} foi obtido à gravimetria e o resultado foi:

$$N'_{\nu} = (2,606 \pm 0,025) \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

Para obter ϵ'_{α} foram efetuadas duas revelações para tempos t' iguais a 1,318 e 2,273 dias e os valores de ρ'_{α} obtidos foram respectivamente $(1,559 \pm 0,038) \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ e $(2,753 \pm 0,067) \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$.

Os valores de ρ'_{α} foram medidos (através de um microscópio Wild 8 x 40), para cada revelação, em vários pontos da emulsão, obtidos equidistantemente ao centro e entre si. Desta forma para essas revelações o valor h' a ser utilizado é o valor médio igual a $(53,6 \pm 0,7) \mu\text{m}$ obtido através do volume total de emulsão

seca utilizado, $(0,801 \pm 0,005)\text{cm}^3$, e da área da base de vidro na qual foi espalhada a emulsão, $(149,6 \pm 1,1)\text{cm}^2$.

Substituindo os valores acima na equação (23) obtemos:

$$\varepsilon'_{\alpha} = 0,987 \pm 0,029 \quad \text{e} \quad \varepsilon'_{\alpha} = 1,011 \pm 0,030$$

onde o valor médio $\varepsilon'_{\alpha} = 0,999 \pm 0,021$.

Desta forma, temos que $\varepsilon = 1,00 \pm 0,02$

Para se obter o valor de $N_v \varepsilon$ conjuntos de emulsões carregadas justapostas a micas acopladas a um lado do cilindro de U_3O_8 foram irradiadas com nêutrons térmicos no beam hole do reator do IPEN/CNEN em São Paulo. Antes de todas as irradiações efetuadas neste trabalho as micas foram submetidas a um ataque químico por 400 minutos a 15°C em HF 48%, para que os traços fósseis fossem revelados. Depois das irradiações as emulsões foram reveladas para fissão e as micas submetidas a um ataque químico padrão de 210 minutos a 15°C em HF 48% Hadler NETO (1982).

As medidas de ρ_1 e ρ'_1 foram efetuadas utilizando-se um microscópio óptico Wild 8 x 40.

A medida de h' foi obtida multiplicando-se a razão entre a espessura do pedaço revelado e a espessura média da emulsão revelada, pela espessura média da emulsão antes da revelação. As espessuras de emulsões reveladas foram obtidas com o auxílio de um "micrômetro de profundidade" acoplado ao

microscópio.

Os resultados das medidas de ρ_1 , ρ'_1 e h' obtidas juntamente com os valores de $N_v \epsilon$ através da equação (24) estão mostrados na Tabela 11.

Tabela 11- Valores obtidos para ρ_1 , ρ'_1 , h' e $N_v \epsilon$

Conjunto	h' ($\times 10^{-4}$ cm)	ρ_1 ($\times 10^{-4}$ cm $^{-2}$)	ρ'_1 ($\times 10^{-4}$ cm $^{-2}$)	$N_v \epsilon$ ($\times 10^{18}$ cm $^{-2}$)
1	54,2 ($\pm 1,5\%$)	9,49 ($\pm 1,7\%$)	2,42 ($\pm 1,7\%$)	5,54 (-3,5%)
2	58,0 ($\pm 1,6\%$)	11,87 ($\pm 1,5\%$)	3,24 ($\pm 1,8\%$)	5,52 ($\pm 3,5\%$)
3	55,6 ($\pm 1,4\%$)	10,50 ($\pm 1,6\%$)	2,65 ($\pm 2,0\%$)	5,74 ($\pm 3,5\%$)
4	49,1 ($\pm 2,0\%$)	2,90 ($\pm 3,1\%$)	6,23 ($\pm 3,7\%$)	5,96 ($\pm 5,6\%$)

Considerando os valores da Tabela 11 determinamos o valor médio de $N_v \epsilon$:

$$N_v \epsilon = (5,64 \pm 0,11) \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}.$$

Para se obter o valor do coeficiente de depressão do fluxo utilizamos dados do U. S. Atomic Energy Commission (1958).

O valor de $k(2\sigma/\lambda_t)$ foi extraído de RITCHIE & ELDRIDGE (1961) e o valor de H foi obtido utilizando-se a teoria de propagação de erros.

O valor de σ foi obtido utilizando-se o formalismo de WESTCOTT (1960):

$$\sigma = g(t) \sigma_0 \quad (27)$$

onde,

$g(t)$ é o parâmetro g de Westcott para a fissão do ^{235}U em função da temperatura dos nêutrons e
 σ_0 é a seção de choque convencional do ^{235}U para nêutrons térmicos.

A temperatura dos nêutrons para o nosso caso é dado por IAEA (1970):

$$T = T_0 [1 + (0,9 \pm 0,3) m \sigma_a(\text{H}_2\text{O})/\sigma_s(\text{H}_2\text{O})] \quad (28)$$

onde,

T_0 é a temperatura da água durante a irradiação e
 m é a razão entre a massa da água e a massa do nêutron.

No nosso caso $T_0 = (293 \pm 5) \text{ } ^\circ\text{K}$. Desta forma utilizando dados de WESTCOTT (1960) e HOLDEN & HOLDEN (1985) obtivemos:

$$\sigma = (569 \pm 4) \text{ barns.}$$

O monitor foi vedado e colocado a 10cm da fonte durante 12 dias e obtivemos $\rho_I = (3,853 \pm 0,085) \times 10^3 \text{ n cm}^{-2}$. Em seguida na mesma geometria e distância em relação à fonte, o monitor foi colocado dentro de um filtro de cádmio (de espessura 0,2mm), pelo tempo de 7dias e 17horas e obtivemos $\rho_I^{cd} = (1,87 \pm 0,17) \times 10^2 \text{ n.cm}^{-2}$.

Utilizando os valores obtidos acima e o valor de $C_{235} = 7,2 \times 10^{-3}$ (COWAN & ADLER, 1976), obtivemos que o fluxo convencional nêutrons térmicos foi:

$$\varphi_0 = (158,5 \pm 6,5) \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}.$$