

APLICAÇÃO DO MÉTODO DA MODERAÇÃO DE NEUTRONS  
NO ESTUDO DO BALANÇO HÍDRICO EM SOLO  
CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR

DECIO EUGENIO CRUCIANI

ENGENHEIRO AGRÔNOMO

Instrutor do Departamento de Engenharia Rural da Escola  
Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - USP

Tese apresentada à Escola Superior de  
Agricultura "Luiz de Queiroz" da Univer-  
sidade de São Paulo, para obtenção do  
título de Doutor em Agronomia.

PIRACICABA  
Estado de São Paulo  
1971

A MEUS PAIS

g r a t i d ã o

À MINHA ESPÔSA E FILHO

d e d i c o

- A G R A D E C I M E N T O S -

Ao Prof. Dr. Justo Moretti Filho, orientador dêste trabalho, pela confiança em nós depositada.

Aos Professôres Dr. Enéas Salati, Dr. Epaminondas S. B. Ferraz, Dr. Nilson A. Villa Nova e Dr. Zilmar Z. Marcos, pelas sugestões apresentadas.

Ao centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), pelo empréstimo do equipamento nuclear necessário.

Ao Prof. Dr. Antonio Petta, Chefe do Departamento de Engenharia Rural, bem como aos colegas de trabalho pela colaboração e incentivo prestados.

À Direção da Usina Monte Alegre pela oportunidade da realização do experimento em local de sua propriedade.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural pela ajuda na coleta de dados e trabalho datilográfico.

A todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização dêste trabalho.

C O N T E Ú D O

	<u>Páginas</u>
1 - INTRODUÇÃO .....	1
2 - REVISÃO DA LITERATURA .....	3
2.1 - Princípios do método .....	4
2.2 - Fontes e detectores de neutrons .....	8
2.3 - Aplicação do método nuclear na determinação da umidade do solo .....	12
2.4 - Umidade do solo e evapotranspiração .....	17
3 - MATERIAIS E MÉTODOS .....	22
3.1 - Materiais .....	22
3.1.1 - Descrição geral da área de estudo...	22
3.1.2 - Solo .....	23
3.1.3 - Cultura .....	25
3.1.4 - Dados climáticos .....	26
3.1.5 - Determinação da umidade do solo ....	26
3.1.6 - Acessórios .....	26
3.2 - Métodos .....	31
3.2.1 - Normas de operação do equipamento de neutrons e sua calibração .....	31
3.2.2 - Dados climáticos .....	40
3.2.3 - Balanço hídrico .....	40
4 - RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO .....	45
4.1 - Calibração da sonda de neutrons em profundidade e na superfície do solo .....	45
4.2 - Variações da umidade do solo .....	58
4.3 - Balanço hídrico, evaporação do tanque Classe A e evapotranspiração potencial .....	65
4.4 - Variação mensal da relação $ER/E_0$ durante o ciclo vegetativo .....	69
4.5 - Determinação do coeficiente K de proporcionalidade entre a evapotranspiração real e a evaporação do tanque Classe A .....	71
5 - CONCLUSÕES .....	74
6 - RESUMO .....	76
7 - SUMMARY .....	78
8 - BIBLIOGRAFIA CITADA .....	80

LISTA DE QUADROS

Páginas

QUADRO	I	- Características físico-mecânicas do solo Luiz de Queiroz .....	24
QUADRO	II	- Teores de alguns elementos e de matéria orgânica através do perfil do solo. ....	25
<u>Dados para a calibração em profundidade</u>			
QUADRO	III	- Valores de $Uv\%$ e $cpm^{\text{K}}$ para $\gamma_s = 1,1$ ..	46
QUADRO	IV	- Valores de $Uv\%$ e $cpm^{\text{K}}$ para $\gamma_s = 1,2$ ..	47
QUADRO	V	- Valores de $Uv\%$ e $cpm^{\text{K}}$ para $\gamma_s = 1,3$ ..	48
QUADRO	VI	- Valores de $Uv\%$ e $cpm^{\text{K}}$ para $\gamma_s = 1,4$ ..	49
QUADRO	VII	- Resultados das regressões lineares ....	49
<u>Análises de variância para as regressões lineares</u>			
QUADRO	VIII	- $\gamma_s = 1,1$ .....	50
QUADRO	IX	- $\gamma_s = 1,2$ .....	50
QUADRO	X	- $\gamma_s = 1,3$ .....	50
QUADRO	XI	- $\gamma_s = 1,4$ .....	51
QUADRO	XII	- Dados para a calibração superficial..	55
QUADRO	XIII	- Resultados da regressão linear .....	56
QUADRO	XIV	- Análise de variância .....	56
QUADRO	XV	- Balanço hídrico .....	66
QUADRO	XVI	- Valores acumulados de ER, $E_0$ e EP durante o ciclo vegetativo da cultura..	67
QUADRO	XVII	- Variação mensal da relação $ER/E_0$ durante o ciclo vegetativo .....	69
QUADRO	XVIII	- Valores acumulados de ER e $E_0$ em 3 estágios do ciclo vegetativo .....	71

QUADRO XIX	-	Dados para as correlações parciais entre valores acumulados de ER e E <sub>0</sub> em 3 estágios do ciclo vegetativo .....	73
QUADRO XX	-	Coefficientes de correlação e de proporcionalidade entre ER e E <sub>0</sub> .....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela I	-	Secção de choque de absorção ( $\sigma_a$ ) de neutrons lentos por alguns elementos...	7
Tabela II	-	Número de colisões necessárias à moderação de neutrons desde 2 MeV até 0,025 eV .....	7
Tabela III	-	Análise de maturação da cana-de-açúcar.	25
Tabela IV	-	Variáveis (Uv%) e (cpm <sup>*</sup> ) agrupadas em função de $\gamma$ s .....	45

LISTA DE FIGURAS

	<u>Páginas</u>
Fig. 1 - Planta da área de estudo .....	27
Fig. 2 - Tanque de evaporação Classe A .....	28
Fig. 3 - Abrigo termométrico .....	28
Fig. 4 - Vista panorâmica do campo experimental e disposição do instrumental meteorológico..	29
Fig. 5 - Equipamento nuclear .....	29
Fig. 6 - "Croquis" mostrando a disposição dos mate- riais no campo .....	30
Fig. 7 - Curva integral da distribuição dos pulsos elétricos .....	32
Fig. 8 - Determinação da umidade do solo com a son- da de neutrons em instantâneo do ciclo da cultura .....	36
Fig. 9 - Determinação da umidade do solo com a son- da de neutrons em instantâneo do ciclo da cultura .....	37
Fig. 10 - Equipamento nuclear durante a calibração superficial .....	39
Fig. 11 - Retas de calibração obtidas em profundi- dade no solo Luiz de Queiroz .....	51
Fig. 12 - Intervalos de confiança (ao nível de 1% de probabilidade) das retas de calibração	53
Fig. 13 - Retas da calibração superficial .....	57
Fig. 14 - Variações da umidade do solo nos períodos 1 a 3 .....	59
Fig. 15 - Variações da umidade do solo nos pe- ríodos 4 a 8 .....	60
Fig. 16 - Variações da umidade do solo nos pe- ríodos 9 a 12 .....	61

Fig. 17	-	Variações da umidade do solo nos períodos 13 a 18 .....	62
Fig. 18	-	Variações da umidade do solo nos períodos 19 a 23 .....	63
Fig. 19	-	Variações da umidade do solo nos períodos 24 a 28 .....	64
Fig. 20	-	Valores acumulados de ER, $E_0$ e EP durante o ciclo vegetativo da cultura .....	68
Fig. 21	-	Variação mensal da relação ER/ $E_0$ durante o ciclo vegetativo (junho/70 a julho/71).	70



## 1 - INTRODUÇÃO

O conhecimento da quantidade e distribuição da umidade através do perfil do solo, é indispensável para estudos hidrológicos em áreas cultivadas.

O uso racional da água, a qual é essencial e limitante na agricultura, está intimamente ligado às propriedades do sistema solo-água-planta.

Em pesquisas relacionadas com o estudo das propriedades daquele sistema, muitas vezes surge o problema da escolha de um método viável e seguro para a determinação da umidade do solo. Tal aspecto se acentua quando se pretende obter informações por tempo prolongado.

Dos métodos atualmente disponíveis, é mais comum o da pesagem de amostras de solo secas em estufa a 105-110°C. Contudo, o referido método, que implica na perfuração do solo tem inconvenientes, porque o estudo da relação solo-água fica seriamente prejudicado pela contínua perturbação da estrutura natural do solo.

Torna-se, portanto, necessária a mudança dos locais de amostragens e com isso é introduzida no estudo uma variável adicional que não pode ser desprezada: a heterogeneidade do solo. Na literatura vários são os métodos indicados para a determinação da umidade do solo, apresentando evidentemente cada um, uma série de vantagens e desvantagens de ordem prática, cuja relação é decisiva na sua escolha.

O método da "moderação de neutrons" aqui utilizado, é bastante recente na literatura, sendo ainda pouco conhecido entre nós, e apresenta uma série de vantagens em relação aos demais.

Os propósitos dêste trabalho se resumem em:

- a) apresentar as características do método acima citado, bem como as providências necessárias à calibração do equipamento e recomendações quanto à sua utilização;
- b) aplicar o método no estudo do balanço hídrico, com a finalidade de estimar o consumo de água por uma cultura de interesse econômico;
- c) correlacionar êsses valôres com os dados de evaporação medidos em um tanque Classe A, instalado na cultura, visando a obtenção de um coeficiente de proporcionalidade entre êles.

## 2 - REVISÃO DA LITERATURA

Embora seja grande a importância dos estudos sobre a eficiência do uso da água para os agrônomos, trabalhos de pesquisa nesse campo são relativamente escassos em nosso meio.

Isso provavelmente se deve a dificuldades materiais e econômicas para obter um número satisfatório de dados reais sobre a evapotranspiração de áreas cultivadas.

De fato, dados válidos do consumo de água por uma cultura são difíceis de se obterem diretamente no campo, pois, requerem um grande número de medidas das variações da umidade do solo, em profundidade e no decorrer do tempo. O método da moderação de neutrons veio de contornar essas dificuldades de maneira eficiente.

Os primeiros estudos sobre a utilização da técnica de dispersão de neutrons, para a determinação da umidade do solo, surgiram por volta de 1950.

Desde àquela época vários foram os pesquisadores que se dedicaram ao problema, procurando sempre aprimorar

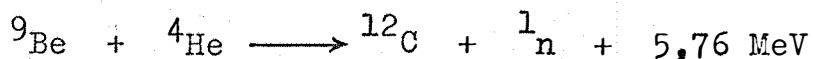
rar a técnica, seja de maneira teórica como prática, o que contribuiu para o aperfeiçoamento de equipamentos de medição eletrônicos bastante sofisticados e de ótimo desempenho prático, qualidades indispensáveis para sua utilização.

A bibliografia a respeito do método em causa é vasta. Numa tentativa de conseguir-se o entendimento que se faz mister ao leitor, achou-se de bom alvitre subdividir a revisão nos vários aspectos que a literatura comporta e que a seguir se sucedem em breves considerações.

## 2.1 - Princípios teóricos do método

As reações nucleares são as únicas fontes de produção de neutrons, sendo que, as do tipo ( $\alpha$ , n) em elementos leves, que levaram à descoberta dos neutrons, são ainda hoje usadas para a produção dessas partículas.

A reação nuclear que dá origem a um neutron se esquematiza por



isto é, o bombardeamento de um núcleo de berílio por uma partícula alfa provoca a transmutação do elemento em carbono, acompanhada da emissão de um neutron com elevada energia cinética, KAPLAN (1958).

De acordo com a energia cinética que possuem, os neutrons podem ser classificados em:

rápidos - com energia superior a 100 KeV (milhares de eletrons-volt)

intermediários - com energia entre 100 KeV e 100 eV

lentos - com energia entre 100 e 0,025 eV

térmicos ou moderados - cuja energia está ao redor de 0,025 eV.

Sendo partículas desprovidas de carga elétrica, podem se mover livremente através da matéria sem sofrer

a ação repulsiva dos campos elétricos e magnéticos dos átomos, como ocorre com aquelas portadoras de carga elétrica.

São partículas instáveis quando livres e no vácuo se desintegram após um tempo relativamente curto. Na matéria, porém, com a qual interagem após sua emissão, são capturados muito antes de se desintegrarem, LAPP e ANDREWS (1954).

A sua interação com os átomos do meio pode ocorrer por diversos processos, sendo principalmente por dispersão e por captura. A dispersão se processa por colisões com os núcleos, nas quais há transferência de energia cinética dos neutrons aos núcleos.

Nas colisões com núcleos médios e pesados, estes adquirem um excesso de energia, o qual, em seguida, é liberado na forma de radiações eletromagnéticas. A energia cinética dos neutrons deve ser superior a 1 MeV para essa ocorrência. Nas colisões com núcleos leves, os neutrons podem transferir grande parte de sua energia cinética aos núcleos.

Durante as colisões ocorre, portanto, um freamento ou moderação dos neutrons, em que sua energia é reduzida a níveis muito baixos, da ordem de 0,025 eV. Passam então a sofrer dispersão no meio, segundo as leis de difusão dos gases. Essa energia é da mesma ordem de grandeza da energia de agitação térmica dos átomos do meio, com os quais os neutrons entram em equilíbrio térmico. Os neutrons são assim chamados de térmicos e o processo de "termalização ou moderação".

Quando ocorre a captura de neutrons, geralmente se formam núcleos instáveis que emitem o excesso de energia adquirida na forma de raios-gama ou se desintegram emitindo uma ou mais partículas nucleares, GARDNER e KIRKHAM (1952).

A probabilidade de ocorrência de uma colisão entre um neutron e o núcleo de um átomo é medida pela seção transversal nuclear ou seção de choque, medida em

barns, equivalendo esta unidade a uma secção de  $10^{-24}$  cm<sup>2</sup>.

Sendo a interação com o meio, por colisões que alteram as trajetórias do neutron e por colisões onde há a sua captura pelo núcleo, o acontecimento desses fenômenos é expresso pela secção de choque de dispersão  $\sigma_s$  e pela secção de choque de absorção  $\sigma_a$ . A probabilidade total de colisão é a soma das probabilidades dos dois processos separados

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_a$$

A secção de choque de dispersão dos núcleos para neutrons térmicos não varia muito de elemento para elemento. Entretanto, a secção de choque de absorção para neutrons térmicos varia extremamente, LAPP e ANDREWS (1954).

Quando uma fonte de neutrons rápidos é colocada em um meio qualquer, os neutrons emitidos interagem com os átomos desse meio, de acordo com os processos descritos.

Quanto maior a abundância de elementos leves, tal como ocorre no solo, mais eficiente será a moderação dos neutrons, significando que a trajetória percorrida através da matéria será mais curta e o número de colisões menor, para que eles atinjam o nível de energia de 0,025 eV.

Dos elementos leves o isótopo  $^1\text{H}$  do Hidrogênio é o melhor e o mais eficiente moderador, porque seu núcleo é constituído de um proton cuja massa é praticamente igual à de um neutron, bastando algumas colisões com núcleos de  $^1\text{H}$  para a moderação dos neutrons (Tabela II).

Como a moderação dos neutrons por outros elementos é bem menor em comparação com o Hidrogênio e como no solo esse elemento na maior parte está contido nas moléculas de água (salvo exceções, discutidas em 3.2.1) a detecção e contagem dos neutrons térmicos pode ser linearmente correlacionada com o teor de umidade do solo, GARDNER e KIRKHAM (1952), GOLDBERG et al (1955), Van BAVEL et al (1963), McHENRY (1963).

As tabelas I e II fornecem alguns valores relacionados com as propriedades já descritas.

TABELA I - Secção de choque de absorção ( $\sigma_a$ ) de neutrons lentos por alguns elementos, BARRADA (1965)

Elemento	$\sigma_a$ (barns)	Elemento	$\sigma_a$ (barns)
Terras raras	46.000	Ferro	2,5
Cádmio	2.450	Potássio	2,1
Boro	755	Nitrogênio	1,8
Índio	196	Sódio	0,5
Ouro	99	Cálcio	0,4
Lítio	71	Hidrogênio	0,3
Prata	63	Alumínio	0,2
Cloro	33	Carbono	0,003

TABELA II - Número de colisões necessárias à moderação de neutrons desde 2 MeV até 0,025 eV, KAPLAN (1958)

I s ó t o p o s	Número de colisões
$^1_1\text{H}$	18
$^2_1\text{H}$	25
$^4_2\text{He}$	43
$^7_3\text{Li}$	68
$^9_4\text{Be}$	87
$^{11}_5\text{B}$	106
$^{12}_6\text{C}$	115
$^{16}_8\text{O}$	150
$^{238}_{92}\text{U}$	2150

## 2.2 - Fontes e detectores de neutrons

Os radioisótopos, naturais ou artificiais, se encontram em estado de excitação, do qual se libertam através de desintegrações espontâneas. Durante êsse processo, há emissão de uma ou mais radiações eletromagnéticas ou de partículas nucleares, até que seja atingido um nível de energia estável. Êsses isótopos radioativos podem ser usados como fontes de uma ou mais radiações desejadas.

Se um isótopo emissor de partículas alfa é intimamente misturado com um elemento leve, finamente dividido, como o Berílio, do bombardeamento dos átomos dêsse elemento pelas partículas alfa resultará a emissão de um fluxo de neutrons (a reação nuclear dêsse processo é aquela já esquematizada no início dêste capítulo).

Embora muitas outras reações nucleares tenham sido descobertas para a produção de neutrons, a reação citada é ainda a base das fontes de neutrons mais amplamente utilizadas, GOLDBERG et al (1955).

O Rádío e seus produtos de desintegração emitem partículas alfa com energias desde 4,79 MeV até 7,68 MeV e os neutrons emitidos possuem energias desde 1 MeV até 12-13 MeV. A meia vida do Rádío é longa, da ordem de 1600 anos, e sua mistura com Berílio produz um fluxo de neutrons suficientemente estável.

Assim as fontes de Ra - Be são das mais utilizadas, principalmente por serem consideradas como fontes padrão de emissão de neutrons. O fluxo dessas partículas é acompanhado por uma radiação de fundo constituída de raios gama de alta energia, FELD (1953), KAPLAN (1958).

Fontes de Polonio-Berílio (Po-Be) são bastante utilizadas quando é desejado um fluxo de neutrons acompanhado de radiação gama de baixa energia. A desvantagem destas outras fontes em relação às de Ra-Be é a produção de um fluxo de neutrons menos intenso e possuir u'a meia vida bastante curta, da ordem de 140 dias.



Elementos leves, além do Berílio, podem ser usados para produzir neutrons, assim como outros elementos emissores de partículas alfa, contudo, sem a grande aplicação das fontes citadas.

As fontes radioativas comuns mencionadas, emitem neutrons com largo espectro de energia, isto é, essas partículas não possuem uma energia determinada e comum, mas sim, todos os valores possíveis dentro de uma dada amplitude que depende da fonte, FELD (1953), KAPLAN (1958).

Fontes de fotoneutrons são usadas frequentemente quando se deseja um fluxo de neutrons monoenergético, não sendo necessário depender da desintegração de elementos radioativos naturais como o Rádio.

A maioria dessas fontes se baseia em reações do tipo ( $\gamma, n$ ) sendo a radiação gama o agente de desintegração do elemento leve, de cuja transmutação há emissão de um neutron.

Os neutrons podem ainda ser produzidos em aceleradores de partículas, e fontes dessa natureza têm sido muito utilizadas em pesquisas relacionadas com as propriedades dos neutrons e em estudos de reações nucleares diversas, FELD (1953), KAPLAN (1958).

Mais recentemente, em aplicações do método da moderação de neutrons para a determinação da umidade do solo, vêm sendo utilizadas fontes de Amerício-Berílio ( $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ ) em substituição às tradicionais fontes de Ra-Be, VAN BAVEL et al (1967), LONG e FRENCH (1967), JENSEN e SOMER (1967), BARROS FERRAZ (1968), HOLLAND (1969), BELL e McCULLOCH (1969).

Como vantagens principais desses tipos de fontes podem ser citadas a emissão de um fluxo de neutrons acompanhados de radiação gama, de baixa energia; a presença de radiação gama é indesejável em equipamentos de medida da umidade do solo.

Desta forma, a discriminação dos pulsos provenientes dos neutrons e dos raios gama é mais eficiente no sistema de contagens. Além disso, o operador estará res-

guardado dos efeitos nocivos dos raios gama, bastando uma pequena blindagem de chumbo envolvendo a fonte.

O equipamento é mais leve sendo de fácil manuseio e transporte, uma vez que a sonda é guardada num invólucro de material hidrogenado leve.

Segundo KAPLAN (1958) os neutrons, sendo partículas desprovidas de carga, produzem uma ionização desprezível nos átomos da matéria e, como resultado, não podem ser detectados diretamente em qualquer instrumento cujo funcionamento depende da ionização de um gás (contadores Geiger, câmara de nuvens, etc.)

A detecção de neutrons depende de efeitos secundários resultantes de sua interação com núcleos.

Desses efeitos os mais utilizados pelo detectores usuais são:

- 1) a absorção de um neutron por um núcleo seguida da emissão de uma partícula eletricamente carregada;
- 2) a absorção de um neutron com a formação de um núcleo radioativo, cuja atividade pode ser medida.

No primeiro efeito baseia-se um detector amplamente conhecido e utilizado em pesquisas relacionadas com neutrons. É, essencialmente, uma câmara de ionização, constituída de um tubo fechado de comprimento variado, no qual está contido um gás denominado trifluoreto de Boro ( $\text{BF}_3$ ), enriquecido com o isótopo  $^{10}\text{B}$ .

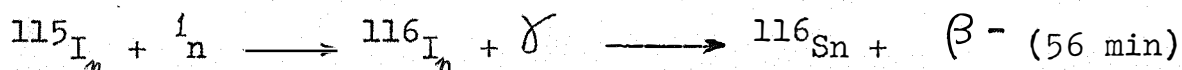
Esse detector é sensível exclusivamente aos neutrons térmicos que são capturados pelo isótopo  $^{10}\text{B}$ . Em consequência há emissão de partículas alfa, que ionizando gás, produzem pulsos elétricos que são registrados.

A reação nuclear do processo é esquematizada a seguir:



A detecção de neutrons baseada no segundo efeito, também chamada de método por ativação, foi uma das primeiras a serem utilizadas.

Entre nós, SALATI (1960) apresentou o primeiro trabalho sobre a utilização de neutrons para a medida da umidade do solo, com base no segundo efeito de detecção, usando a técnica de ativação de placas de Índio. A reação nuclear do processo pode ser resumida e esquematizada por



O processo é muito mais complexo devido à existência de vários isótopos estáveis do Índio que pela captura de neutrons térmicos se desintegram de maneiras diversas.

Entretanto, o isótopo  ${}^{115}_{\text{I}}$  é o mais abundante, transformando-se no isótopo radioativo  ${}^{116}_{\text{I}}$  emissor de partículas beta, com meia vida de aproximadamente 56 minutos.

Desta forma, a desintegração do Índio é correlacionada com a densidade de neutrons térmicos no meio moderador.

Na sua maioria, os pesquisadores que estão sendo aqui citados se utilizaram de equipamentos de neutrons, nos quais os detectores eram tubos de  $\text{BF}_3$ . Fazem exceção os trabalhos de JENSEN e SOMER (1967), BARROS FERRAZ (1968), BELL e McCULLOCH (1969), dentre os mais recentes, em que os detectores são cristais de cintilação.

GOLDBERG et al (1955), STONE et al (1955), PERRIER e JOHNSTON (1962), investigaram sobre o uso de um cristal sensível aos neutrons térmicos.

O detector usado por GOLDBERG et al era constituído de um cristal delgado de Iodeto de Lítio associado a uma válvula fotomultiplicadora. O Lítio natural do cristal continha 7,4% do isótopo  ${}^6\text{Li}$  com grande seção de choque de absorção para neutrons térmicos (900 barns).

Os detectores de cintilação estão sendo usados nos instrumentos mais modernos pela sua maior sensibilidade e melhor desempenho.

### 2.3 - Aplicação do método nuclear na determinação da umidade do solo

É interessante realçarem-se aqui os trabalhos de vários autores.

BELCHER, CUYKENDALL e SACK, in PERRIER E JOHNSTON (1962), se incluem entre os pioneiros em 1950, que usaram a propriedade de moderação de neutrons por núcleos de hidrogênio, com o propósito de determinar a umidade do solo.

GARDNER e KIRKHAM (1952) verificaram a viabilidade do método e se apoiaram nas considerações de que no solo o hidrogênio seria, praticamente, o único elemento moderador dos neutrons e que estaria presente quase que totalmente na forma de constituinte da água.

Van BAVEL et al (1954) determinaram experimentalmente em laboratório a esfera de influência de uma fonte de neutrons, isto é, o volume de solo explorado pelos neutrons na determinação da umidade. Van BAVEL et al (1956) investigaram as características de operação de um equipamento portátil, efetuando medidas em profundidade e na superfície de recipientes com solo.

Van BAVEL, NIXON e HAUSER (1963) realizaram um trabalho no qual analisaram com detalhes todos os aspectos teóricos do método e sua aplicação prática em laboratório, utilizando recipientes com solo e também no campo, onde realmente verificaram a viabilidade do método.

PHILLIPS, JENSEN e KIRKHAM (1960) analisaram, estatisticamente, a precisão do método da moderação de neutrons em comparação com o método clássico de amostragens gravimétricas, concluindo que o método nuclear é mais exato, sendo ainda vantajoso pela rapidez de leituras, precisão e por não destruir a estrutura natural do solo.

STONE, SHAW e KIRKHAM (1960) estudaram no laboratório e no campo a reprodutibilidade de resultados com baixo coeficiente de variação. Os resultados foram praticamente iguais em repetidas operações de uma determinação de umidade do solo. Quando se fizeram leituras a intervalos de 15 cm de

profundidade, verificaram que o sistema indicava satisfatoriamente as variações de umidade no perfil do solo.

Ao estabelecerem, ainda, a comparação com o método gravimétrico verificaram que pelo método nuclear as variações nas leituras, a intervalos de tempo, efetuadas no mesmo ponto do terreno, eram devidas exclusivamente à variação da umidade, o que não ocorria com o método convencional, que sofre grande influência das variações do próprio solo, em consequência das mudanças dos locais de amostragem.

MERRIAM e COPELAND (1963) definiram a eficiência de uma sonda de neutrons em termos de sua habilidade em fornecer medidas de umidade com precisão e reprodutibilidade, sendo essas qualidades as de maior interesse. Afirmaram, ainda, que na maioria dos casos, uma determinação da umidade pelo método nuclear equivale, em precisão, a sete amostragens gravimétricas, em consonância com a observação de STONE (1960).

O problema do comprimento sensível de detectores de  $\text{BF}_3$  com relação à espessura das camadas de solo exploradas foi estudado por McHENRY (1963). Utilizando-se de dois equipamentos bastante difundidos na época, Nuclear Chicago P-19 e Troxler-102, verificou que o comprimento sensível das duas sondas era, respectivamente, de 10 e 12 polegadas (25 e 30 cm). A conclusão foi que a espessura mínima de uma camada de solo em estudo para aqueles instrumentos deveria ser de 25 a 30 cm a fim de que as leituras fossem influenciadas exclusivamente pelo teor de umidade de tal camada.

LAWLESS et al (1963), do mesmo modo que Van BAVEL et al (1963), estudaram a importância das condições em que são efetuadas as leituras com uma sonda de neutrons num perfil de solo. As conclusões mais importantes a que chegaram foram as seguintes:

a) os principais erros cometidos na determinação da umidade com neutrons se devem às leituras feitas na camada superficial do solo sem os devidos cuidados e àquelas efetuadas num perfil de umidade estratificado. Quando existem camadas alternadas de solo seco e úmido, o efeito dessa alternância é o principal responsável pelo erro de leitura, assim como também

o é a falta de técnica do operador no conhecimento exato da profundidade do centro sensível da sonda. A determinação da posição dêsse ponto é muito importante para o uso de uma sonda de neutrons;

b) para determinar a unidade próxima à superfície do solo com uma sonda de profundidade, as leituras devem ser corrigidas ou então deve-se adotar uma técnica particular de medida;

c) a precisão das leituras em perfís úmidos estratificados é boa e, aproximadamente, a mesma, quando elas são feitas a intervalos de profundidade da ordem de 15 cm ou menos. Se os acréscimos são de 30 cm ou mais, o êrro cometido pode ser até 6 vêzes maior que no caso anterior;

d) finalmente, as leituras feitas perto de interfaces úmido-sêcas no perfil do solo, estão sujeitas a êrros. Entretanto, como os êrros individuais em cada camada se compensam, podem ser desprezados em aplicações práticas onde há interêsse em acompanhar as variações da umidade com o tempo.

BARRADA (1965) apresentou uma série de vantagens do método de neutrons em relação aos demais:

- a) operação simples do instrumento;
- b) tempo necessário para as leituras muito pequeno;
- c) precisão satisfatória nos resultados;
- d) não é necessário nenhum equipamento adicional ou procedimento de laboratório demorado;
- e) o volume de solo explorado é grande em cada leitura;
- f) as determinações não são destrutivas, permitindo assim estudos por tempo indefinido no mesmo local.

Quando às desvantagens do método, o autor citou:

- a) o alto prêço para a aquisição do equipamento;

b) o peso devido à blindagem de proteção contra a radiação gama, prejudicando o fácil manuseio e transporte;

c) a necessidade de outro instrumento especial para efetuar leituras na camada superficial do solo.

Essas desvantagens, entretanto, são facilmente atenuadas, face o desempenho do equipamento. Com relação ao peso do equipamento já foi mencionado o uso atual de fontes de Am-Be, praticamente isentas de radiação gama, em substituição às de Ra-Be. Com isso a blindagem da sonda é apenas de material hidrogenado leve, como proteção contra os neutrons.

Quanto às medidas na superfície do solo, podem ser efetuadas com a mesma sonda de profundidade, por meio de uma técnica adequada. Tal prática aliás foi adotada por PIERPOINT (1966) e também realizada no presente trabalho, cujos detalhes são discutidos em "Materiais e Métodos".

Resta, finalmente, uma das mais sérias desvantagens do método, ou seja, o alto preço do equipamento, conforme se encontra muito bem discutida em COHEN e TADMOR (1966). Efetuaram êstes uma série de medidas da umidade do solo pelo método em questão e por amostragens gravimétricas durante um período de 2 anos, as quais lhes permitiram as seguintes conclusões:

a) foram necessários 244 dias de trabalho por ano para cumprirem extenso programa de medidas da umidade pelo processo gravimétrico, explorando perfís de solo com 1,80 m de profundidade. Pelo método nuclear foram necessários 36 dias anuais;

b) as amostragens gravimétricas necessitaram de um grupo de quatro homens para a execução dos trabalhos, ao passo que para o método de neutrons bastou um homem apenas;

c) o gasto total de mão-de-obra para o processo gravimétrico foi, na época, de 2.390 dólares e para o método de neutrons, 384 dólares anuais, resultando portanto uma diferença anual, entre os dois processos, da ordem de 2000 dólares;

d) apesar de o capital necessário à aquisição de um equipamento de neutrons ser muito maior do que o necessário para o material usual de laboratório, a utilização intensiva do equipamento nuclear em outros programas de pesquisa trouxe uma economia cada vez maior, de modo que o capital inicial foi recuperado no prazo máximo de um ano.

Finalmente, os mesmos autores consideraram além do fator custo, as vantagens relativas à precisão do método de neutrons que apresentou um coeficiente de variação nas leituras bem menor que o processo gravimétrico.

BELL e McCULLOCH (1969) realizaram um trabalho de grande interesse, descrevendo os resultados das comparações e testes efetuados com seis tipos diferentes de sondas de neutrons, na determinação da umidade do solo. Os instrumentos eram de fabricação inglesa (Nuclear Enterprises e E.A.L.), americana (Troxler), francesa (Lepaute) e dinamarquesa (Danbridge e N.E.A.).

Como um parêntesis a esta citação é de se salientar que o equipamento da Danbridge empregado pelos autores possui as mesmas características e procedência do que foi utilizado no presente trabalho.

Todos os instrumentos possuíam fontes de Am-Be e detectores de  $\text{BF}_3$ , com exceção dos dinamarqueses, cujos detectores eram cristais de cintilação. Nos testes efetuados, o equipamento da Danbridge apresentou o melhor desempenho nas leituras em profundidade, seguido de perto pelo N.E.A., e pelos dois instrumentos ingleses.

Segundo os autores, a geometria entre a fonte e o detector teve influência direta nos resultados.

O instrumento da Troxler que apresentou o pior desempenho, tinha uma assimetria marcante, com um tubo  $\text{BF}_3$  longo e a fonte colocada na sua extremidade inferior.

Os instrumentos da Danbridge e N.E.A., de melhor desempenho, tinham um detector de cintilação bem próximo da fonte. Os demais usavam um tubo  $\text{BF}_3$  com a fonte localizada na parte central.



Finalizando, comentaram que os modelos atuais de sondas, quando operadas com os devidos cuidados e com o conhecimento de suas limitações, fornecem excelentes resultados que não são igualmente obtidos por outros métodos.

#### 2.4 - Umidade do solo e evapotranspiração

A influência da umidade do solo na evapotranspiração foi estudada, entre outros, por SLATYER (1956), o qual procedeu ao balanço hídrico para uma cultura de algodão e verificou o declínio progressivo da evapotranspiração real que ocorreu com o decréscimo da umidade no solo.

Tratando-se de uma região caracterizada por períodos distintos, úmidos e secos, o autor admitiu que apareceriam sintomas de deficiência de água na cultura com redução na taxa de evapotranspiração. Por isso foi despertado maior interesse na evapotranspiração real do que na potencial, e os resultados confirmaram o fato.

Do mesmo modo, trabalhando com pastagens, MAKKINK e Van HEEMST (1956) verificaram fenômeno idêntico, isto é, redução da taxa de evapotranspiração real em relação a potencial, causada pela perda de umidade do solo, abaixo da capacidade de campo.

BENNETT e DOSS (1960) verificaram um decréscimo da profundidade efetiva das raízes com o aumento da umidade do solo.

ENGLEMAN e DECKER (1965) afirmaram que a taxa de evapotranspiração real é influenciada pela abundância de água no solo em adição aos fatores climáticos. Com a redução do teor de umidade, abaixo da capacidade de campo, observaram um decréscimo na taxa de evapotranspiração.

Os resultados obtidos do seu experimento correlacionando as variações da umidade do solo com a taxa de evapotranspiração de uma cultura de soja, mostraram uma concordância com a teoria proposta por DENMEAD e SHAW (1962), para os quais, a relação entre a evapotranspiração e a umidade do solo varia com diferentes demandas da evaporação.

STAPLE (1956), estudando a evapotranspiração em lisímetros de 1,50 m de profundidade afirmou que a umidade raramente penetra abaixo de 1,30 m de profundidade no solo e, portanto, que a economia de água pode ser estudada desprezando as perdas por percolação profunda.

Desta forma, o referido autor mediu as variações de umidade no perfil e as precipitações ocorridas, deduzindo daí as perdas por evapotranspiração durante quase todos os períodos do ano, nos quais não houve ocorrência de enxurradas.

Os seus experimentos mostraram que a evapotranspiração foi correlacionada, positiva e significativamente, com a evaporação da água de uma superfície livre, durante a época de crescimento vegetativo. Porém, durante o período em que a cultura sofreu déficit de água, as correlações parciais com a evaporação foram pequenas. Altas correlações parciais foram obtidas entre a evapotranspiração e o teor de umidade do solo para períodos de 15 dias.

HOLMES (1956) utilizou uma sonda de neutrons para acompanhar as variações da umidade no perfil para o estudo da evaporação do solo.

McGUINNESS, DREIBELBIS e HARROLD (1961) acompanharam as variações da umidade do solo com o método de neutrons e se utilizaram nos cálculos da equação:

$$ET = P - G - Q \pm \Delta M$$

sendo

- ET - evapotranspiração
- P - precipitação
- G - percolação
- Q - enxurrada ("run-off")
- $\Delta M$  - variações do teor de umidade

Preocuparam-se em avaliar as perdas de água por enxurrada e percolação em lisímetros, e verificaram também que as perdas por percolação são bem pequenas durante a

estação de crescimento. Concluíram que é possível correlacionar a percolação com o teor de umidade de uma das camadas mais profundas do perfil do solo.

Estudos do regime da umidade do solo foram efetuados em lisímetros e bacias hidrográficas adjacentes por DREIBELBIS (1962) que se utilizou do método da moderação de neutrons.

As leituras foram efetuadas a intervalos de uma semana durante o período de crescimento e de duas semanas na estação de dormência. Através da equação citada anteriormente, calculou o balanço hídrico.

Como a percolação não pôde ser medida diretamente no campo, usou valores estimados a partir de dados de lisímetro.

Num trabalho posterior, DREIBELBIS e AMERMAN (1964) fizeram estudos do balanço hídrico empregando o mesmo método de DREIBELBIS (1962).

Em nenhum caso, a estimativa da percolação abaixo da profundidade de 1,80 m superou o valor de 17,5 mm durante a estação de crescimento e como os valores de evapotranspiração real nêsse período foram da ordem de 250 a 500mm, os efeitos devidos a êrros na estimativa da percolação foram pequenos.

O método da moderação de neutrons foi aplicado por ROBINSON e BAVER (1964) no estudo do movimento e extração de água pela cana de açúcar no Havai. O estudo foi conduzido em duas áreas distintas, onde o solo foi irrigado, respectivamente, até ao nível da capacidade de campo e abaixo dêsse nível.

As taxas de evapotranspiração real para alfafa foram determinados por PECK et al (1968), medindo as variações da umidade disponível no solo, ressaltando o fato de que apesar de haver considerável interêsse no conhecimento do consumo de água pelas plantas, a literatura é pobre em dados reais de evapotranspiração. Corrigiram os valores de evapotranspiração obtidos pelas variações de umidade do solo em

relação à evaporação livre de um tanque Classe A.

As perdas por enxurrada e percolação foram deduzidas, nos períodos de chuvas intensas, da diferença entre a evapotranspiração e a evaporação do tanque, o qual, segundo os mesmos autores é tido como padrão de comparação.

BARROS FERRAZ (1968) mostrou ser possível acompanhar o processo de perda de água do solo por evapotranspiração, mediante o emprêgo de uma sonda de neutrons para as medidas da umidade.

KALMA e STANHILL (1969) efetuaram medidas intensivas da umidade do solo durante um ano para estimar a evapotranspiração real e a percolação profunda em uma cultura de laranjas em Israel.

Segundo êles, a perda total de água é constituída de dois componentes: a evapotranspiração e a percolação profunda. Entretanto, o movimento descendente da água por percolação não pode ser desprezado e nem medido diretamente. Suas tentativas de cálculo, a partir de determinações de laboratório, falharam de modo que os autores usaram outro método para medir a percolação, baseado nas variações do teor de umidade do solo abaixo da zona das raízes.

A utilização da evaporação de tanques como índice do uso consuntivo de plantas tem sido bastante discutida.

Segundo CHANG (1961), em condições áridas e semi-áridas a evaporação tem baixa correlação com a evapotranspiração, sendo que em clima árido a evaporação de tanque é acentuada pelo efeito de oasis.

Em clima úmido o uso consuntivo das culturas bem supridas de água tem sido bem relacionado com a evaporação de uma superfície livre. Ocorre que é mínimo o efeito de oasis para a superfície livre e, a evaporação, que também é função direta do clima, relaciona-se com a evapotranspiração. É o caso do Havai.

Entre outros fatores como tamanho, côr do tanque de evaporação, a exposição dêste tem grande efeito na evaporação.

Resultados experimentais obtidos pelo mesmo autor em Waipio indicaram que a evaporação de tanques situados no nível superior da cana-de-açúcar foi 5% menor do que fora da cultura, 10% maior do que na superfície do solo dentro da cultura e 28% maior do que num tanque enterrado.

Nessa época comentou acêrca da tendência em se dispor o tanque elevado, embora os estudos à respeito não fossem definitivos.

Como há uma relação entre a evaporação livre e a evapotranspiração da cana-de-açúcar, os dados de evaporação de tanque podem ser usados como índice da necessidade de água da cultura.

Investigações efetuadas em lisímetros, no Havai, por ROBINSON, CAMPBELL e CHANG (1963), indicaram que a remoção da umidade por uma cultura de cana-de-açúcar se processou, aproximadamente, na mesma taxa de evaporação de um tanque Classe A.

### 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 - Materiais

##### 3.1.1 - Descrição geral da área de estudo

A parte experimental de campo foi desenvolvida numa área de cultivo de cana-de-açúcar, pertencente à Usina Monte Alegre, localizada no município e comarca de Piracicaba, Estado de São Paulo, e identificada precisamente como talhão 21 - Zona D - 1º Setor (Fig. 1).

O clima dessa área é do tipo mesotérmico Cwa, isto é, subtropical úmido com estiagem no inverno. A temperatura média do mês mais frio é inferior a 18°C e a do mês mais quente é superior a 22°C.

Este tipo climático é denominado segundo CAMARGO e ORTOLANI (1964), de "Tropical de altitude".

As coordenadas geográficas são, Latitude 22° 42'30" S e longitude 47°38'00" W e a altitude é aproximadamente, 580 m.

### 3.1.2 - Solo

A área de estudo possui o solo descrito e classificado por RANZANI et al (1966) como pertencente à Série Luiz de Queiroz, tendo como material de origem rochas eruptivas básicas.

As características morfológicas, locais, dêsse solo são descritas a seguir:

- Ap 0 - 25 cm; pardo avermelhado escuro (2,5 YR 3/4); terrões que se partem em granular, fraca, pequena quando úmido; ligeiramente duro, friável, ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso; raízes fasciculadas, finas, muito abundantes; aproximadamente 5% de grãos de quartzo visíveis; presença de carvão; macroporosidade visível a olho nu; galerias biológicas 1 mm em média, comum; alguma inclusão de material do B<sub>21</sub> na parte inferior; suave, abrupta.
- B<sub>21</sub> 25-55 cm; vermelho escuro (2,5 YR 3/6); blocos subangulares, forte a moderada, grande, partindo-se em blocos subangulares fraco; pequena, alguns com superfície lisa; muito duro, friável, plástico, ligeiramente pegajoso; raízes fasciculadas finas e médias abundantes e grossas poucas; presença de carvão; macroporos visíveis; galerias biológicas 1 mm em média, comum; cerosidade aparente entre as unidades estruturais; transição plana gradual.
- B<sub>22</sub> 55-85 cm; vermelho escuro (2,5 YR 3/6); blocos subangulares, média, fraca, partindo-se em blocos subangulares, pequena, fraca; ligeiramente duro, muito friável, plástico, ligeiramente pegajoso; raízes fasciculadas finas poucas; presença de carvão, raro ( 1%); macroporos pouco visíveis, galerias biológicas poucas, 2 mm, deposição de cerosidade e material dos horizontes superiores ao longo de canais; transição gradual, plana.

B<sub>23</sub> 85 - 130 + cm; vermelho escuro (2,5 YR 3/6); blocos subangulares muito fraco, média a pequena; macio, muito friável, não plástico, não pegajoso; raízes fasciculadas grossas, preponderantes; presença de carvão, raro ( 1%); macroporos visíveis; galerias biológicas, comum, 2mm.

As principais características físico-mecânicas desse solo, determinadas em laboratório, são apresentadas no QUADRO I, como valores médios de três repetições para as seis camadas de estudo programadas.

QUADRO I - Características físico-mecânicas do solo Luiz de Queiroz. (Classe Textural - Argila)

Camadas (cm)	Análise Mecânica %			Retenção de umidade		Pêso espe- cífico g/cm <sup>3</sup>
	Areia	Limo	Argila	1/3 atm. % vol.	15 atm. % vol.	
0-20	27,35	15,65	57,00	28,7	21,2	1,4
20-40	26,03	14,83	59,14	31,8	25,2	1,3
40-60	22,71	12,90	64,39	31,9	24,7	1,3
60-80	22,79	12,84	64,37	29,3	22,5	1,2
80-100	24,46	11,59	63,95	28,2	22,4	1,2
100-120	22,39	13,50	64,11	28,8	22,3	1,2

Com a finalidade de verificar o nível de ocorrência de alguns elementos químicos, na caracterização do solo e de importância na calibração do método nuclear, efetuaram-se algumas análises do solo, nos Departamentos de "Química" e "Solos e Geologia" da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Os resultados estão no QUADRO II.



QUADRO II - Teores de alguns elementos e de matéria orgânica através do perfil do solo

Profundidade	Cl <sup>-</sup> (ppm)	Fe <sup>+++</sup> (%)	Al <sup>+++</sup> (%)	Matéria orgânica (%)
0-20	17,0	10,6	8,0	2,0
20-40	19,8	10,7	9,5	1,8
40-60	14,2	10,7	9,6	1,8
60-80	19,8	11,4	9,4	1,6
80-100	28,4	11,0	9,4	1,2
100-120	14,2	11,0	9,3	1,4

### 3.1.3 - Cultura

A variedade de cana cultivada no talhão 21, I.A.C. 50-134, de ciclo vegetativo de aproximadamente 18 meses, foi plantada durante o mês de março de 1970 e com ela as observações se fizeram até o mês de julho de 1971, quando atingiu a maturação (ver Tabela III) e foi cortada. Trata-se de uma variedade das mais cultivadas na citada Usina.

TABELA III - Análise de maturação da cana-de-açúcar

Grau Baumé .....	10,8%
Grau Brix .....	19,4%
Sacarose .....	17,9%
Pureza .....	92,2%
Açúcar invertido .....	0,71%

### 3.1.4 - Dados climáticos

Os materiais usados para a coleta de dados climáticos e instalados no meio da cultura foram:

a) um tanque de evaporação padrão, Classe A, com tela, de acôrdo com o preconizado pelo U.S. WEATHER BUREAU (1919) e instalado de acôrdo com as normas recomendadas (Figs. 2, 4 e 6);

b) um abrigo termométrico contendo um termohigrógrafo FUESS (Figs. 3, 4 e 6) de registro semanal;

c) um pluviômetro com área de captação de 127 cm<sup>2</sup>, disposta a 1,5 m da superfície do solo (Figs. 4 e 6).

### 3.1.5 - Determinações da umidade do solo

As variações periódicas da umidade do solo foram medidas por dois processos:

a) pelo método gravimétrico comum com auxílio de um trado e do material usual de laboratório;

b) pelo método da moderação de neutrons.

O equipamento nuclear, construído pela DANBRIDGE, Danish Isotope Centre de Copenhagen, Dinamarca, é visto na Fig. 5.

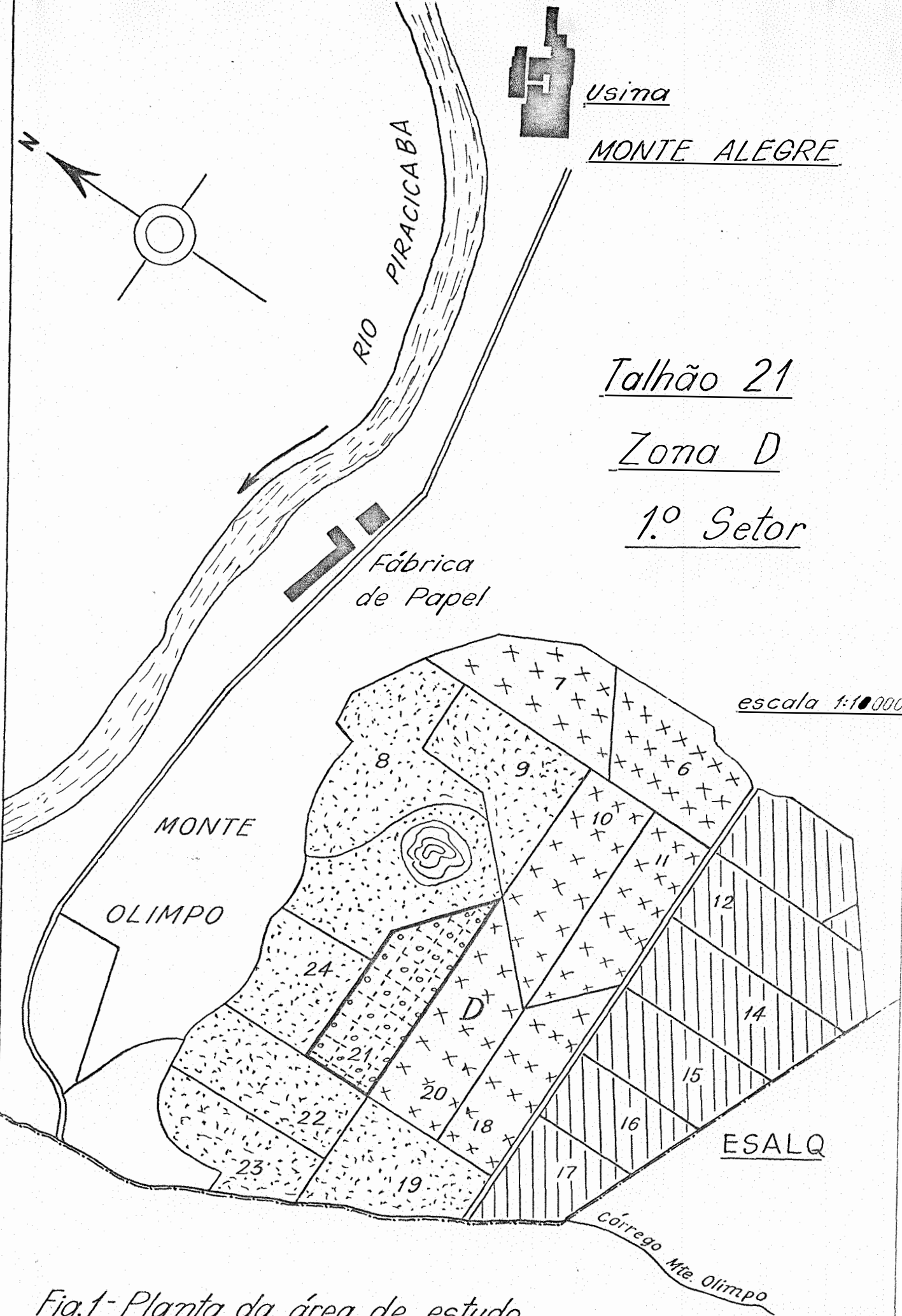
### 3.1.6 - Acessórios

Como acessórios da sonda de neutrons foram usados:

a) tubos de alumínio para o seu acesso no solo, com 1,50 m de comprimento, tendo a extremidade inferior fechada, e de diâmetros interno e externo respectivamente de 41,0 mm e 44,5 mm;

b) dois moderadores de parafina, de forma quadrangular, com 50 cm de lado e 2,5 cm e 5 cm de altura, respectivamente, para as medidas de umidade nas camadas superficiais do solo.

A Fig. 6 ilustra a disposição dos materiais instalados no campo.



Usina  
MONTE ALEGRE

Talhão 21

Zona D

1.º Setor

escala 1:10000

Fig.1- Planta da área de estudo



FIG. 2 - Tanque de evaporação Classe A



FIG. 3 - Abrigo termométrico



FIG. 4 - Vista panorâmica do campo experimental e disposição do instrumental meteorológico

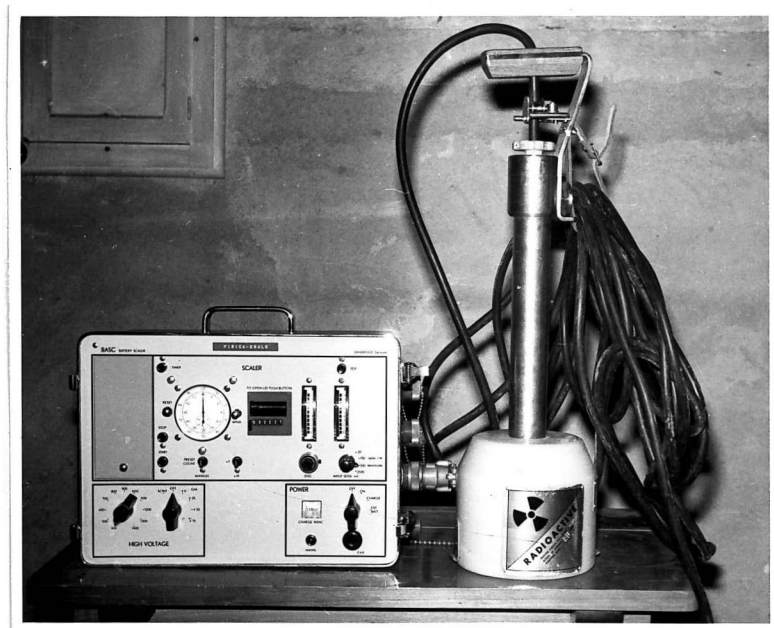


FIG. 5 - Equipamento nuclear, vendo-se à esquerda o sistema eletrônico de registro e à direita o recipiente de transporte, contendo a sonda de neutrons

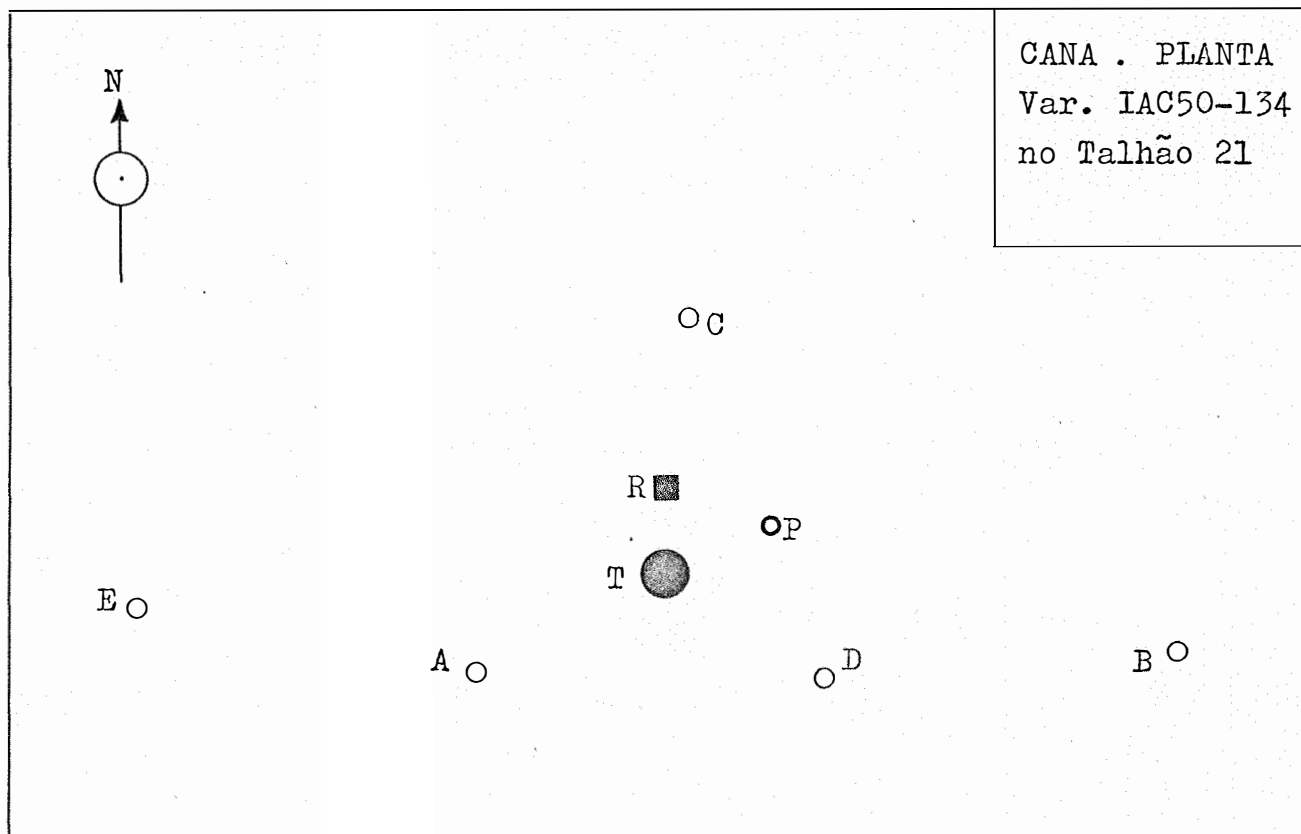


FIG. 6 - "Croquis" mostrando a disposição dos materiais no campo

A-B-C-D-E - Tubos de acesso para a sonda de neutrons

R - Abrigo termométrico

T - Tanque de evaporação

P - Pluviômetro

## 3.2 - Métodos

### 3.2.1 - Normas de operação do equipamento de neutrons e sua calibração

Os detectores proporcionais de  $\text{BF}_3$  bem como os de cintilação, fornecem pulsos elétricos de saída proporcionais em intensidade à energia das partículas detectadas.

Esses pulsos devem ser amplificados e devem passar por um circuito discriminador que os seleciona, permitindo apenas a passagem daqueles de certa intensidade. No caso, deve haver uma boa separação dos pulsos devidos aos neutrons, daqueles provenientes da radiação gama.

Isso resulta numa curva de distribuição integral dos pulsos elétricos, que apresenta um patamar longo e horizontal em cuja parte central geralmente é feita a discriminação (Fig. 7).

Desta forma, as contagens obtidas são devidas exclusivamente à interação dos neutrons térmicos com o detector e portanto, possíveis variações na intensidade dos pulsos ou no discriminador, não influem significativamente nas leituras obtidas num dado meio moderador.

Esse teste do sistema eletrônico é fundamental e deve ser repetido periodicamente, usando-se geralmente o próprio recipiente de transporte como referência.

Como recomendação adicional, para evitar erros de leituras, devidos a instabilidade do sistema eletrônico, as contagens determinadas no solo devem ser relacionadas com as contagens feitas num moderador padrão.

Essas conceituações se devem a JENSEN e SOMMER (1967).

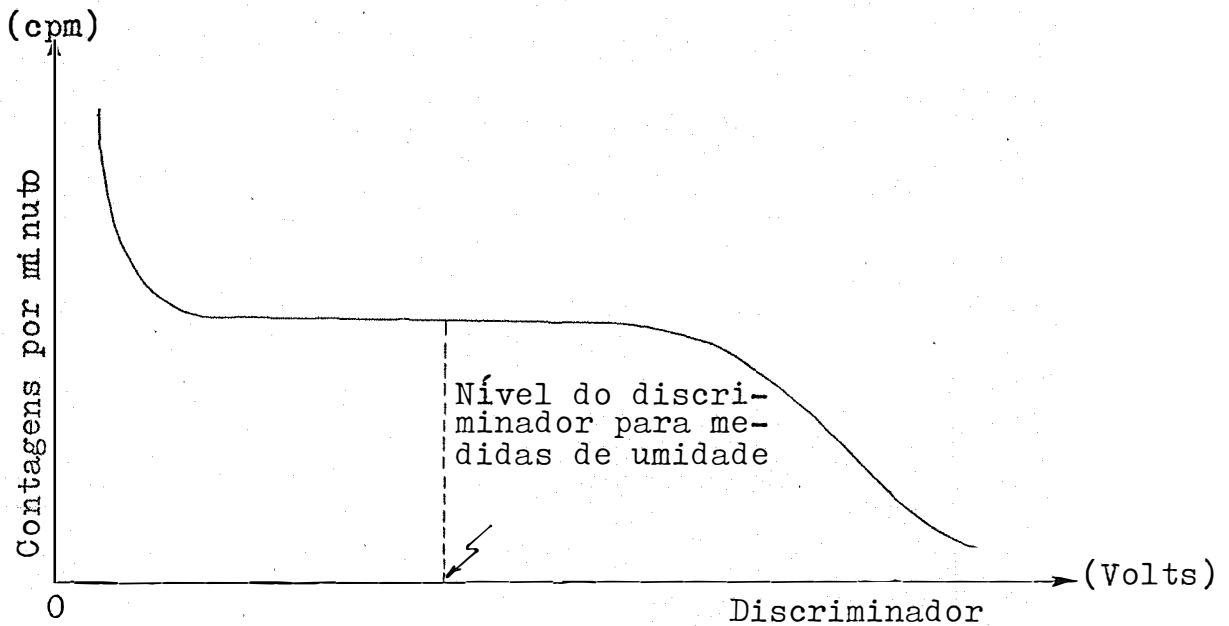


FIG. 7 - Curva integral da distribuição dos pulsos elétricos

Da literatura tem-se, ainda, a informação de que o volume de solo explorado pelos neutrons ou "esfera de influência" da sonda, é a zona mais ou menos esférica do meio, envolvendo a fonte, a qual se todo o solo fora dessa esfera for removido, garantirá a existência de um fluxo de neutrons, que é 95% do fluxo total obtido em um meio "infinito".

A esfera é determinada plotando-se os valores das c.p.m. com a profundidade do solo, sendo o seu raio R definido como a profundidade onde as contagens observadas representam 95% do seu máximo valor, HAAR e ØLGAARD (1965), MOERMAN et al (1966).

O ponto central da esfera de influência é denominado "centro sensível" e este para qualquer sonda de neutrons, é determinado pela configuração geométrica entre a fonte e o detector, não coincidindo com a posição da fonte.



A posição do centro sensível da sonda deve ser determinada com precisão antes da sua utilização em medidas rotineiras.

De acôrdo com as recomendações gerais dos pesquisadores citados, conduziram-se, periódicamente, testes de operação do equipamento de neutrons para assegurar sua estabilidade e a precisão das leituras. Da mesma forma, determinou-se a posição do centro sensível da sonda por meio de um moderador de parafina.

O raio da esfera de influência para o instrumento, determinado em um recipiente com água, foi de 10 cm e numa massa de solo Luiz de Queiroz, a vários teores de umidade, foi de 15 cm.

A calibração de qualquer sonda de neutrons é básica e limitante para a sua utilização na medida da umidade do solo. Em vista disso, a calibração sempre mereceu atenção especial por parte dos pesquisadores, e no presente trabalho ela foi tratada com todo o cuidado.

Entre os primeiros pesquisadores que se preocuparam com a calibração do instrumental, citam-se, por exemplo, GARDNER e KIRKHAN (1952), Van BAVEL et al (1954, 1956, 1961, 1963), GOLDBERG et al (1955), os quais em laboratório, se utilizaram de recipientes com solo a vários teores de umidade e procuraram correlacionar a umidade com as contagens observadas.

Entretanto, todos afirmaram que para uma calibração de confiança são necessários grandes volumes de solo, homogêneos, umedecidos e compactados uniformemente, o que nem sempre se consegue facilmente em laboratório. Outro aspecto desfavorável da calibração em laboratório, são as condições artificiais de trabalho que, a rigor não reproduzem as condições reais de campo, onde efetivamente é aplicado o método.

Dessa forma, a calibração neste trabalho foi efetuada no campo, segundo as recomendações de COHEN (1964), LONG e FRENCH (1967), LUEBS et al (1968), ØLGAARD E HAAR (1968), BELL e McCULLOCH (1969), HOLLAND (1969) e outros.

A calibração é, usualmente, apresentada como uma curva relacionando as contagens observadas com o teor de umidade volumétrica do solo seco em estufa a 105°C.

Se as contagens são normalizadas em relação a um padrão, a calibração independe de variações do sistema eletrônico, HOLMES (1966).

Segundo JENSEN e SOMER (1967) a correlação pode ser curvilínea ou linear, dependendo da configuração geométrica entre a fonte e o detector. Descreveram eles as características de uma sonda de neutrons construída pelo Danish Isotope Centre da Dinamarca, semelhante à utilizada no presente trabalho e mostraram que, para uma distância aproximada de 7 cm entre a fonte de Am-Be e o cristal cintilador, a regressão era linear.

Segundo HOLLAND (1969) a aplicação da teoria da regressão na calibração dos métodos que estimam a umidade a partir de contagens de radiações só é possível quando a correlação é linear, sendo a variável independente determinada praticamente sem erro.

No método dos quadrados mínimos, a regressão linear

$$Y = a + b X$$

assume que o valor de Y depende do valor de X. No caso desta pesquisa são as contagens por minuto (cpm) que dependem da característica física em investigação, isto é, a umidade do solo, de modo que a regressão em causa é do aspecto

$$Y \text{ (cpm)} = a + b X \text{ (Uv\%)}$$

Na literatura mais recente, relacionada à calibração encontra-se unânime afirmação da conveniência da calibração no próprio campo e, em particular, a necessidade de se calibrar o aparelho para cada tipo de solo a estudar.

Como parâmetros do solo que mais influem na calibração, citam-se a composição química e o peso específico.

Quanto ao primeiro, a existência em quantidades apreciáveis de elementos fortemente absorvedores de neutrons lentos, tais como, Cd, B, Cl, pode mascarar o verdadeiro teor de umidade do solo.

Segundo Van BAVEL et al (1963) um teor de cloro superior a 1.000 ppm no solo pode provocar êrros apreciáveis nas leituras, pela redução da densidade de neutrons térmicos perto do detector.

GARDNER e KIRKHAM (1952) afirmaram que a matéria orgânica do solo influe nas contagens, porque pode contribuir com quantidades apreciáveis de Hidrogênio, elevando o teor aparente da umidade do solo. Entretanto, segundo os mesmos, solos com elevados teores de matéria orgânica também retêm quantidades apreciáveis de água, o que atenuaria o problema.

Ocorre, porém, que o solo aqui estudado não apresenta o problema da composição química. O QUADRO II mostra baixos teores de Cloro e de matéria orgânica.

Quanto ao segundo parâmetro do solo que influe, significativamente, na calibração (pêso específico), é facilmente explicável, uma vez que as variações das contagens ocorrem no mesmo sentido das variações desse parâmetro.

ØLGAARD e HAAR (1968) contrariando HOLMES (1966), segundo o qual a única consequência importante da variação do pêso específico do solo é a correspondente mudança na secção nuclear de absorção dos neutrons lentos, afirmaram o seguinte: o efeito dos átomos do solo é primeiramente o de limitar o movimento dos neutrons longe da fonte e do detector. Se o pêso específico do solo aumenta, cada percurso unitário dos neutrons torna-se mais curto, uma vez que o livre percurso médio diminue. Assim, o movimento dos neutrons a partir da fonte é limitado e, consequentemente, a densidade de neutrons lentos na vizinhança da fonte e detector é aumentada.

Segundo LUEBS et al (1968) o uso indiscriminado de uma curva única de calibração obtida de um único solo com um determinado pêsso específico pode levar a êrros apreciáveis na medida da umidade do solo. A determinação exata da umidade requer um conhecimento do pêsso específico do solo, inclusive as suas variações com as profundidades de medida através do perfil.

No presente trabalho, a calibração do instrumental foi realizada no campo, seguindo as recomendações dos vários pesquisadores citados anteriormente.

Para tal, na área de estudo, foram instalados 5 tubos de acesso de alumínio, começando a coleta de dados durante o mês de dezembro de 1969.

A Fig. 6 ilustra a disposição definitiva dos tubos de acesso no meio da cultura. As Figs. 8 e 9 mostram o equipamento da umidade do solo em instantâneos do ciclo da cultura.



FIG. 8 - Em primeiro plano vê-se a sonda emergindo parcialmente do tubo de acesso e o sistema eletrônico de registro. Ao fundo o instrumental meteorológico.



FIG. 9 - Determinação da umidade do solo com a sonda de neutrons no período final do ciclo da cultura.

As leituras com a sonda foram efetuadas até a profundidade de 1,20 m, a intervalos de 20 cm, paralelamente com amostragens gravimétricas nas mesmas camadas do perfil do solo.

As amostras de solo retiradas com o trado para a determinação da umidade em estufa,  $105-110^{\circ}\text{C}$  se coletaram sempre nas vizinhanças dos respectivos tubos de acesso, num raio máximo de 2,0 m, tomando-se o cuidado de encher novamente as cavidades com solo e de assinalar os locais.

Da mesma forma, determinou-se para cada camada do solo o peso específico, através de amostras indeformáveis, retiradas com o amostrador de Uhland. Tais

amostragens se efetuaram nas proximidades de cada tubo de alumínio, a intervalos de 2 meses, aproximadamente, até o final do ciclo da cultura.

Desta forma, foi possível armazenar um grande número de valores correlacionados de umidade, peso específico do solo e de contagens com a sonda de neutrons.

Os pares de dados relativos à umidade do solo e leituras com a sonda, foram agrupados com valores comuns do peso específico do solo, para efetuar as regressões lineares.

Embora vários pesquisadores tenham citado como desvantagem do método, a dificuldade ou mesmo a impossibilidade de efetuar medidas nas camadas superficiais com uma sonda comum, estas puderam ser realizadas mediante uma técnica apropriada.

Van BAVEL et al (1963) mostraram que o método podia ser adaptado para medidas nas camadas superficiais do solo. Os autores usaram a fonte e o detector de  $\text{BF}_3$  inseridos lado a lado dentro de um moderador de parafina cuja função era absorver os neutrons que tendiam a escapar da superfície do solo.

PIERPOINT (1966), usou um moderador de polietileno disposto na superfície do solo com a mesma finalidade de absorver os neutrons rápidos que escapassem da superfície do solo.

Assim é que no presente trabalho procedeu-se a uma calibração especial para possibilitar leituras com a sonda nos primeiros 20 cm do perfil de solo.

Os testes se iniciaram em laboratório, usando-se dois moderadores de parafina já citados em 3.1.6, os quais se colocaram na superfície de um grande recipiente contendo solo.

Correlacionaram-se as leituras feitas com o moderador e sem êle, em função da profundidade da camada de solo explorada e do seu peso específico.

Após os resultados obtidos em laboratório, a calibração foi conduzida no campo, como se mostra à Fig. 10, utilizando o moderador de 2,5 cm de espessura.



FIG. 10 - Vê-se o equipamento nuclear durante a calibração superficial, destacando-se o moderador quadrangular de parafina, disposto sôbre a superfície do solo.

### 3.2.2 - Dados Climáticos

Durante o ciclo vegetativo da cultura foram coletados semanalmente os dados de evaporação do tanque Classe A, temperatura do ar à sombra e precipitação.

A evaporação semanal do tanque foi determinada medindo-se o volume de água necessário à recarga até o nível de referência.

Calculou-se a temperatura média do dia a partir dos valores registrados pelo termógrafo, às 7 - 14 e e 21 horas, empregando-se a fórmula

$$T_m = \frac{T_7 + T_{14} + 2 T_{21}}{4}$$

### 3.2.3 - Balanço Hídrico

A equação geral que descreve o balanço de água no solo pode ser escrita, segundo os trabalhos de MCGUINNESS, DREIBELBIS e HARROLD (1961), DREIBELBIS (1962), DREIBELBIS e AMERMAN (1964) e outros, na forma

$$\Delta M = P - G - D - ET$$

cujos termos estão descritos no parágrafo 2.4.

Deve ser notado que a equação em apreço tem sido aplicada no estudo do balanço hídrico em lisímetros que, na verdade, oferecem condições mais artificiais do que naturais. Com os lisímetros encontra-se facilidade na determinação dos termos da equação. Contudo, na falta deles, a equação prevalece, devendo-se recorrer a outros meios para a estimativa dos termos ali figurados. Vários autores, ainda, conforme consta na revisão bibliográfica, obtiveram informações a respeito de um ou mais membros dessa equação, trabalhando em lisímetros, extrapolando depois os valores para condições naturais de campo; veja-se, por exemplo, os trabalhos de DREIBELBIS (1962), DREIBELBIS e AMERMAN (1964).



O motivo principal dêsse fato é que nas situações reais de campo é bastante difícil e trabalhoso determinar, com precisão, todos os termos da equação do balanço hídrico, e em particular, as perdas de água por percolação.

Nas condições em que se desenvolveu o presente trabalho, os valores da precipitação (P) foram facilmente obtidos "in loco", dispensando qualquer comentário a respeito. Da mesma forma, as variações da umidade do solo ( $\Delta M$ ) foram bem conhecidas, através de um grande número de medidas com a sonda de neutrons, durante todo o ciclo da cana-de-açúcar.

As possíveis perdas de água por enxurrada (run-off) (G) foram desprezadas com base na exposição de motivos que se seguem.

1) Durante os primeiros meses de idade, a cultura atravessou um período de outono-inverno caracterizado por precipitações esparsas, e de baixa intensidade. Com o início da primavera, as precipitações se tornaram mais frequentes e intensas e, nessas condições, uma segurança para desprezar (G) foi constatada quando se efetuaram testes "in loco" da capacidade de infiltração da água no solo, com um infiltrômetro de Muntz modificado (de carga constante), de anéis concêntricos. Os resultados mostraram que o solo suportava uma infiltração de 20 mm/hora, valor êsse que nunca chegou a ser igualado por nenhuma precipitação ocorrida, fato êsse, aliás, comprovado pelos registros contínuos de um pluviógrafo.

2) Além disso, deve ser lembrado que a cultura oferecia uma grande intercepção ao impacto da chuva, tendo o solo uma topografia praticamente plana e a cultura disposta em curvas de nível.

Nessas condições, coube ao autor admitir que a perda total de água correspondia a soma dos termos (ET) e (D), isto é, de evapotranspiração e do excesso de água, abaixo do sistema radicular, considerado como não aproveitado pela planta. Recorreu-se à determinação periódica dêsse conjunto de valores através da variação dos perfís de umidade do solo.

Percebe-se, pois, a necessidade de medir ou estimar (D) para obter o valor de (ET), sendo este o termo de maior interesse prático para fins de utilização econômica da água e projetos de irrigação, quando corresponde ao real consumo de água por uma cultura durante o seu ciclo. Nessas condições a evapotranspiração é denominada real (ER).

O cálculo recomendável de (D) mediante dados da condutividade hidráulica e do gradiente do potencial de sucção da água do solo, não pode aqui ser realizado, devido às limitações impostas pela natureza e condições do presente trabalho.

Ainda, por outro lado, e pelo mesmo motivo, não caberia estimar (D) com base em informações sobre a percolação ao longo de um perfil de solo sem vegetação, previamente saturado, cujos resultados seriam extrapolados para as condições do experimento, em que o solo é intensamente explorado pela planta.

Portanto, é interessante repetir que, dentro das limitações impostas pelas condições do experimento, as perdas de água abaixo do sistema radicular da cultura puderam ser estimadas com critério, em função da análise da variação do teor de umidade ao longo do perfil do solo e da precipitação local.

Para tanto adotou-se a metodologia que a seguir se explana, inspirada no trabalho de KALMA e STANHILL (1969), chegando-se aos resultados figurados no QUADRO XV.

O sistema radicular é variável durante o desenvolvimento da cultura. Segundo INFORZATO e ALVAREZ (1957) a zona efetiva das raízes da cana-de-açúcar está por volta de 70 cm de profundidade, conforme o estado de desenvolvimento e variedade da cultura; especificaram que aos doze meses de idade o desenvolvimento do sistema radicular é máximo. De fato, mediante a excavação de trincheiras, pode-se estimar a zona efetiva das raízes da variedade aqui estudada, em 40 e 80 cm de profundidade aos 6 e 12 meses de idade, respectivamente.

A variação do teor de umidade do solo foi acompanhada durante o desenvolvimento da cultura, isto é, em 28 períodos consecutivos, (QUADROS XV e XVI) desde 13/5/70 (2 meses de idade) até 10/7/71 (corte aos 16 meses de idade).

No início e fim de cada período foi calculado o conteúdo total de água no solo (H, em milímetros de altura d'água), tomando como limite inferior o PMP (ponto de murchamento permanente), desde a superfície até a profundidade de 120 cm, levando em conta a precipitação ocorrida.

O valor de 120 cm foi inicialmente estabelecido com base nos trabalhos de ROBINSON e BAVER (1964), TOSSELLO et al (1966), relacionados com a cana-de-açúcar. Posteriormente, com dados inerentes a esta pesquisa, tal valor pode ser confirmado e utilizado nos cálculos pelas seguintes circunstâncias:

1) Conforme a observação de campo após o corte da cultura, aquela profundidade de 120 cm foi suficiente para conter todo o sistema radicular.

2) Deve ser considerado ainda que em determinadas condições, há uma redistribuição da umidade através do perfil do solo, mediante fluxos ascendentes de água, ocasionados por gradientes do potencial de sucção.

A êsse respeito ROBINS (1965) comenta que em medidas periódicas do teor de umidade do solo, é essencial que seja amostrada toda a camada de solo onde ocorre evapotranspiração. Quando as plantas são jovens e a profundidade do sistema radicular é restrita, quantidades apreciáveis de água podem se deslocar para cima desde profundidades de 1 m ou mais para repor a quantidade evaporada e transpirada. Com o amadurecimento da planta, a profundidade das raízes atinge muitas vezes 2 a 3 m, como ocorre com a alfaça e árvores frutíferas. A menos que a inteira zona do sistema radicular seja atingida pelas amostragens, as perdas de água observadas serão susceptíveis de êrro.

Esse fenômeno da ascensão de água realmente ocorreu durante a presente pesquisa, em julho e agosto de 1970, quando o solo secou, atingindo valores nitidamente inferiores à capacidade de campo.

Entretanto, como uma ressalva pretende-se tão somente que os resultados aqui obtidos, são válidos para as condições e circunstâncias que caracterizaram o presente trabalho, eliminadas portanto quaisquer tendências a generalizações. Uma semelhante ressalva se estende também à evaporação obtida do tanque Classe A, que foi instalado no meio da cultura.

Prosseguindo com a metodologia, a diferença entre o conteúdo de água ( $H_1$ ) no início do período somado com a precipitação (P) e o conteúdo de água ( $H_2$ ) no fim do período, foi atribuída ao consumo total (Q) de água, sendo

$$Q = D + ER$$

A parcela (D) foi estimada através das variações de umidade ocorridas abaixo da zona efetiva das raízes, até que fôsse atingido o limite da capacidade de campo, tomando por base a profundidade de 120 cm. Assim, nos períodos de julho a agosto de 1970, em que o solo secou, atingindo valores nitidamente abaixo da capacidade de campo, (Fig. 15, QUADRO XV) estimada a 1/3 de atmosfera, as perdas de água de todo o perfil foram atribuídas à evapotranspiração, em consequência de fluxos de água ascendentes.

#### 4 - RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

##### 4.1 - Calibrações da sonda de neutrons em profundidade e na superfície do solo

A calibração em profundidade mediante os dados coletados no campo, foi realizada correlacionando os valores do teor de umidade volumétrico do solo (Uv%) com o número de contagens por minuto (cpm), sendo essas variáveis agrupadas em função do peso específico do solo ( $\gamma_s$ ) como mostra a Tabela 5.

Deve ser lembrado que sempre as contagens foram normalizadas em relação a um padrão, sendo designadas por (cpm<sup>±</sup>).

TABELA IV - Variáveis (Uv%) e (cpm<sup>±</sup>) agrupadas em função de  $\gamma_s$ .

$\gamma_s$	Nº de pares de variáveis
1,1	20
1,2	68
1,3	55
1,4	28

As regressões lineares foram calculadas pelo método dos Quadrados Mínimos, PIMENTEL GOMES (1963).

A diferença numérica dos pontos utilizados em cada regressão deveu-se à frequência da ocorrência de um dado valor do peso específico nas camadas dos perfis do solo.

Nos QUADROS III a VI são apresentados os valores de  $Uv$  e  $cpm^{\times}$  em função de  $\gamma_s$ .

QUADRO III - Valores de  $Uv\%$  e  $cpm^{\times}$  para  $\gamma_s = 1,1$

$Uv\%$	$cpm^{\times}$	$Uv\%$	$cpm^{\times}$	$Uv\%$	$cpm^{\times}$	$Uv\%$	$cpm^{\times}$
31,36	20490	27,15	21430	26,00	19580	29,52	20390
31,18	22090	26,94	20530	25,73	18220	30,06	22060
30,45	22720	26,28	21220	28,47	19930	29,11	21640
29,50	21880	25,46	19670	28,58	19390	28,93	22100
29,23	20850	25,17	19170	30,14	21380	27,65	21320

QUADRO IV - Valores de  $Uv\%$  e  $cpm^{\#}$  para  $\gamma_s = 1,2$

$Uv\%$	$cpm^{\#}$	$Uv\%$	$cpm^{\#}$	$Uv\%$	$cpm^{\#}$	$Uv\%$	$cpm^{\#}$
35,20	21850	29,05	21120	27,78	18780	27,07	19530
34,69	21500	29,02	20070	27,28	18510	26,90	18090
31,63	21950	28,97	20910	26,52	19510	27,19	18210
34,38	21520	28,30	19610	26,76	20130	31,30	20800
33,58	21950	28,16	19600	26,76	20020	31,08	21180
33,44	21820	28,10	18800	27,72	19940	32,88	20950
32,17	21360	27,85	19300	28,21	20490	31,09	20510
31,92	21030	29,11	20240	26,18	19150	32,21	22020
31,84	20590	28,64	18590	27,06	19350	31,39	20910
31,82	19670	32,14	19870	25,93	17920	31,33	20300
31,73	21190	32,08	20320	26,48	19220	33,05	21800
31,55	22410	31,12	20510	28,15	18680	34,91	23530
31,37	20900	28,15	19910	27,36	19240	32,07	20820
29,65	21230	28,04	19380	27,47	18590	30,04	20370
29,60	19570	28,30	20110	26,76	19050	30,95	19380
29,35	21120	27,44	18060	27,91	18470	29,89	21170
29,21	19240	27,35	19160	27,88	19700	26,46	18780

QUADRO V - Valores de Uv% e cpm<sup>⌘</sup> para  $\gamma_s = 1,3$

Uv%	cpm <sup>⌘</sup>	Uv%	cpm <sup>⌘</sup>	Uv%	cpm <sup>⌘</sup>	Uv%	cpm <sup>⌘</sup>
37,00	25480	31,25	23730	22,16	18000	36,83	24090
35,80	25560	31,17	22330	27,31	19140	31,16	23270
35,50	24220	30,89	23090	28,22	19600	31,67	22390
35,22	23810	30,84	23300	27,12	19520	33,41	24250
33,38	23910	28,66	21950	35,27	21150	36,72	22970
33,15	23890	27,18	21180	34,80	21980	27,49	20200
33,02	24440	30,09	21800	29,91	20840	25,39	20640
32,75	24590	31,32	20940	33,76	23740	25,67	20770
32,54	23260	29,96	21960	33,11	21310	28,31	20430
31,99	22210	27,13	22250	32,81	21590	31,63	21210
31,75	23340	26,04	19850	35,38	24060	30,22	20150
31,68	22990	29,24	22210	33,46	22040	28,83	22430
31,45	23370	29,15	21930	35,77	23890	32,75	24550
31,41	22910	29,98	21630	36,02	22450	-	-



QUADRO VI - Valores de Uv% e cpm<sup>±</sup> para  $\gamma_s = 1,4$

Uv%	cpm <sup>±</sup>	Uv%	cpm <sup>±</sup>	Uv%	cpm <sup>±</sup>	Uv%	cpm <sup>±</sup>
40,89	26140	32,17	23990	24,77	22060	26,46	20860
39,87	26340	29,26	23980	24,89	21830	36,02	24940
27,54	21710	28,50	21930	28,03	22410	39,65	26780
35,42	25860	30,95	22870	24,98	19970	34,44	25730
34,52	24700	28,95	22120	25,76	21400	35,14	25180
34,12	23960	31,50	24110	31,08	23660	35,15	24650
34,00	25220	28,60	22690	31,12	22840	37,10	26110

No QUADRO VII são apresentadas, em função dos valores de  $\gamma_s$ , as respectivas equações das retas e os valores do coeficiente de correlação (r), do teste (t) e do coeficiente de variação (CV).

QUADRO VII - Resultados das regressões lineares.

$\gamma_s$	Equação da reta	(r)	(t)	(CV%)
1,1	$Y = 9570 + 396,35 X$	0,65	3,59 <sup>***</sup>	4,4
1,2	$Y = 9220 + 368,30 X$	0,78	10,08 <sup>***</sup>	3,7
1,3	$Y = 10410 + 380,30 X$	0,75	8,31 <sup>***</sup>	4,9
1,4	$Y = 11930 + 370,50 X$	0,94	13,91 <sup>***</sup>	2,7

Como termo de comparação com os resultados do QUADRO VIII é mencionado o trabalho de HOLLAND (1969), em que o autor efetuou a calibração de um equipamento de neutrons em laboratório, obtendo para a regressão linear um coeficiente de variação de 3,8%.

As análises de variância para as regressões são representadas nos QUADROS VIII a XI.

QUADRO VIII -  $\gamma_s = 1,1$

C. Variação	GL	SQ	QM	F
Regr. Linear	1	11.169.003,36	11.169.003,36	12,83 <sup>**</sup>
Resíduo	18	15.674.216,64	870.789,81	
TOTAL	19	26.843.220,00		

QUADRO IX -  $\gamma_s = 1,2$

C. Variação	GL	SQ	QM	F
Regr. Linear	1	58.900.331,09	58.900.331,09	101,86 <sup>**</sup>
Resíduo	66	38.165.245,39	578.261,29	
TOTAL	67	97.065.576,48		

QUADRO X -  $\gamma_s = 1,3$

C. Variação	GL	SQ	QM	F
Regr. Linear	1	83.844.190,77	83.844.190,77	69,22 <sup>**</sup>
Resíduo	53	64.198.162,23	1.211,286,08	
TOTAL	54	148.042.353,00		

QUADRO XI -  $\gamma_s = 1,4$

C. Variação				
Regr. Linear	1	81.543.904,47	81.543.904,47	193,59**
Resíduo	26	10.951.181,25	421.199,28	
TOTAL	27	92.495.085,72		

As retas de calibração obtidas em profundidade, no solo Luiz de Queiroz, são apresentadas na Fig. 11.

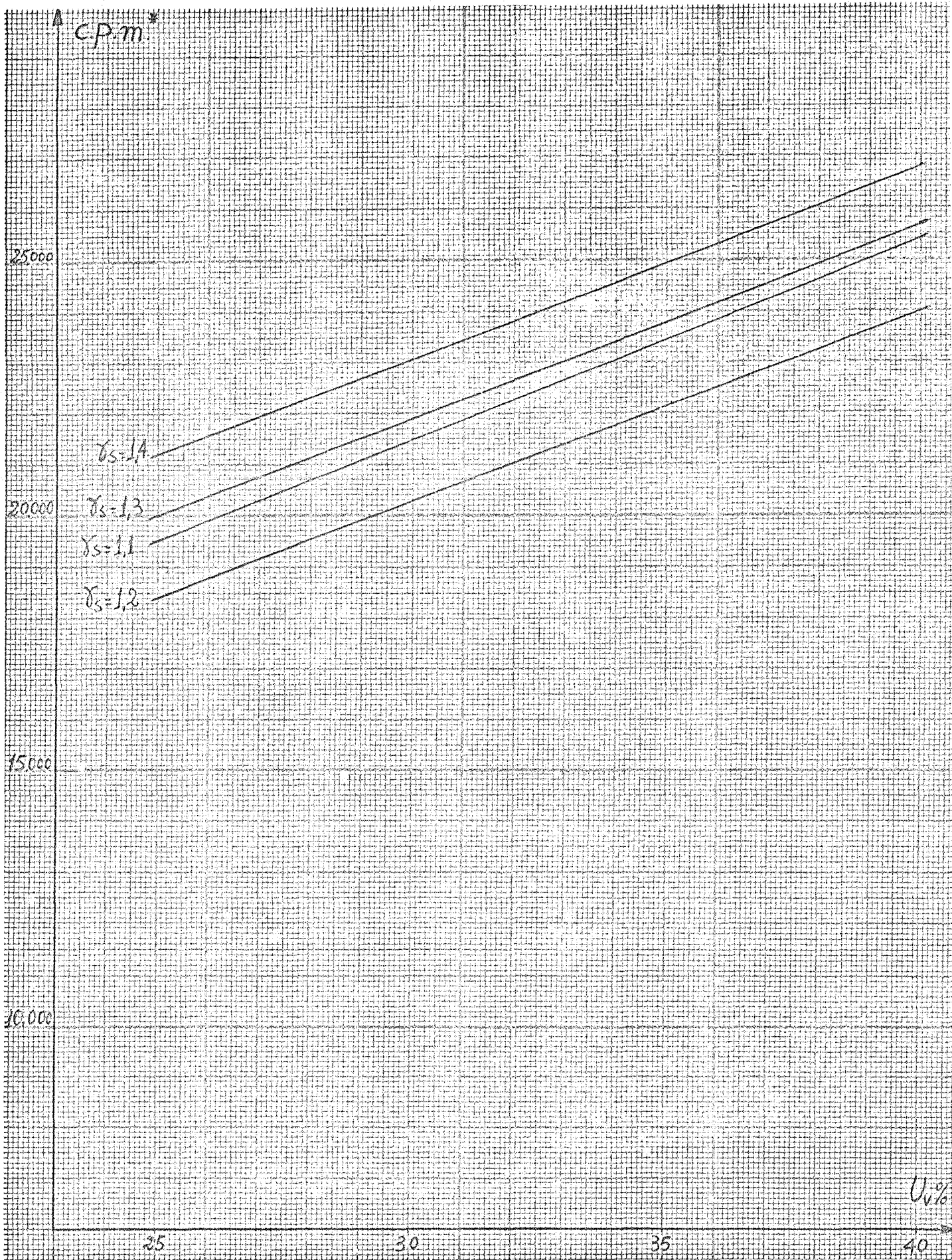


Fig. 11 - Retas de calibração em profundidade, no solo Luiz de Queiroz.

Nota-se na Fig. 11 que a reta de calibração corresponde a  $\gamma_s = 1,1$  se apresenta deslocada em relação às demais. O fato é provavelmente devido a um acúmulo de elementos químicos leves naquelas camadas do solo, embora os resultados das análises químicas não mostrem alteração significativa da composição química.

A sensibilidade do equipamento nuclear também é evidenciada nessa figura sendo aproximadamente de 400 cpm para 1% de variação de Uv.

Concluindo a análise estatística foram determinados os intervalos de confiança das retas de calibração. Como a reta correspondente a  $\gamma_s = 1,1$  está deslocada, os intervalos foram determinados somente para as demais.

Os resultados são apresentados graficamente na Fig. 12.

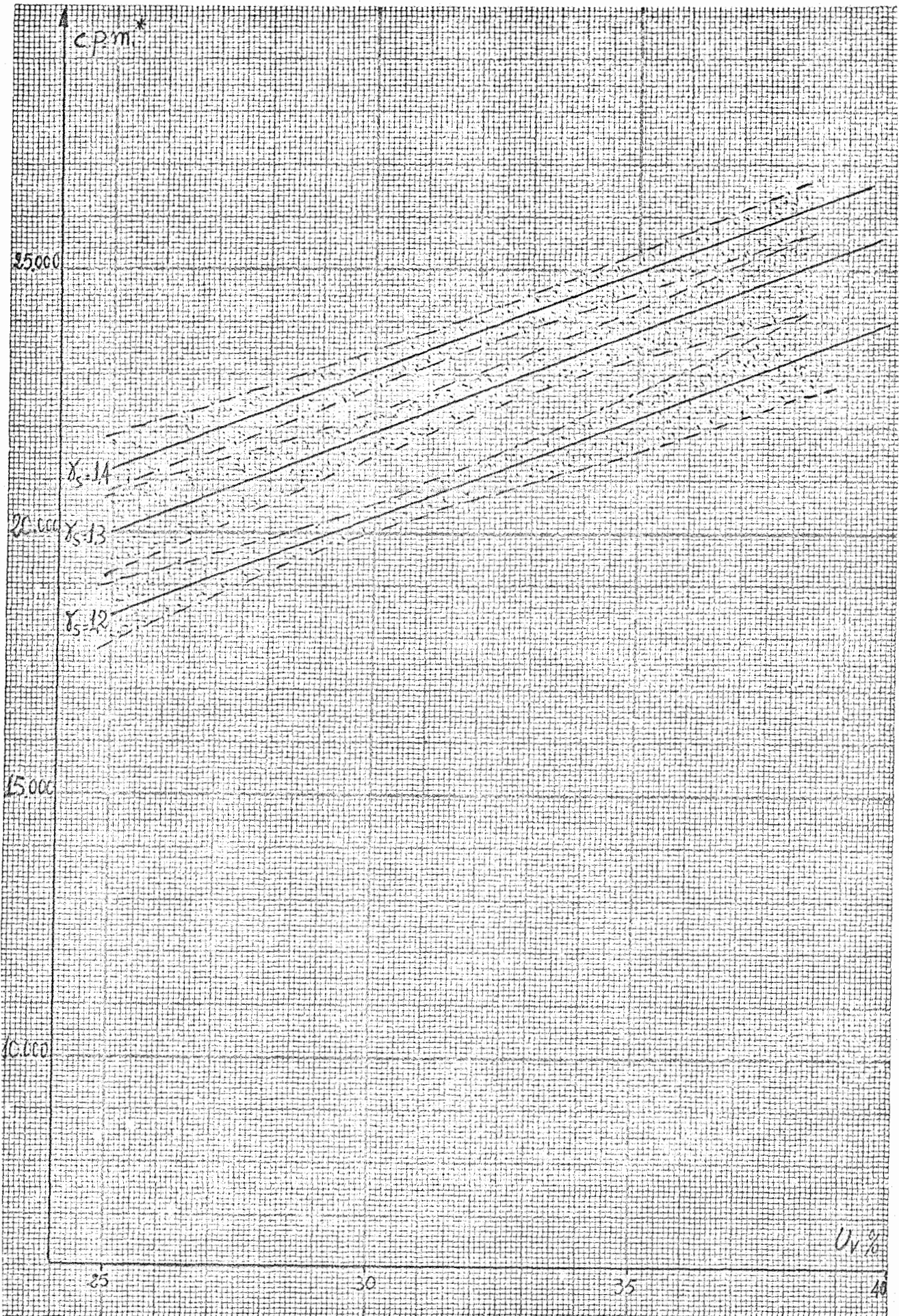


Fig. 12 - Intervalos de confiança (ao nível de 1% de probabilidade) das retas de calibração.

Pela análise da Fig. 12 verifica-se que os intervalos de confiança com erro de 1%, permitem uma distinção das retas de calibração numa amplitude de umidade que é freqüente no solo.

A calibração do instrumento para a camada superficial do solo foi determinada pela correlação entre as  $\text{cpm}^{\#}$  obtidas com o moderador de parafina na superfície do solo e as  $\text{cpm}^{\#}$  denominadas reais, que seriam realmente obtidas se o volume de solo explorado fosse "infinito"

Posteriormente foram correlacionadas as  $\text{cpm}^{\#}$  reais com a umidade do solo determinada em estufa, em função do pêsso específico da camada superficial do solo.

Deve ser notado que para um melhor estudo, as leituras se fizeram de 5 em 5 cm nessa camada, individualizando assim quatro retas de calibração. Entretanto, para fins práticos basta considerar apenas uma reta, como no presente trabalho, onde as leituras rotineiras foram obtidas a 10 cm de profundidade.

Os dados coletados estão no QUADRO XII, e os resultados da análise estatística nos QUADROS XIII e XIV.

QUADRO XII - Dados para a calibração superficial

Prof.de Leitura	$\gamma_s$ da camada	Uv% da camada	$\text{cpm}^{\#}$ com mode- rador de para- fina (2,5 cm)	$\text{cpm}^{\#}$ reais
10 cm	1,4	24,50	18200	21000
		26,45	18910	21800
		30,91	20200	23400
		32,31	23150	23900
		33,92	22380	24500
		37,49	25230	25800
		36,30	23900	25400
		29,60	21370	22900
		28,50	20900	22500
		31,80	22200	23700

QUADRO XIII - Resultados da regressão linear

Profundidade de leitura	Equação da reta	(r)	(t)	CV%
10 cm	$Y = -10588 + 1,372 X$	0,949	8,49 <sup>***</sup>	3,37

QUADRO XIV - Análise de Variância

C. Variação	GL	SQ	QM	F
Regr. Linear	1	38.845.798	38.845.798	72,75 <sup>***</sup>
Resíduo	8	4.271.642	533.955,25	
TOTAL	9	43.117,440		

Na Fig. 13 é apresentado o gráfico da calibração superficial para a conversão das contagens com moderador em teor de umidade.



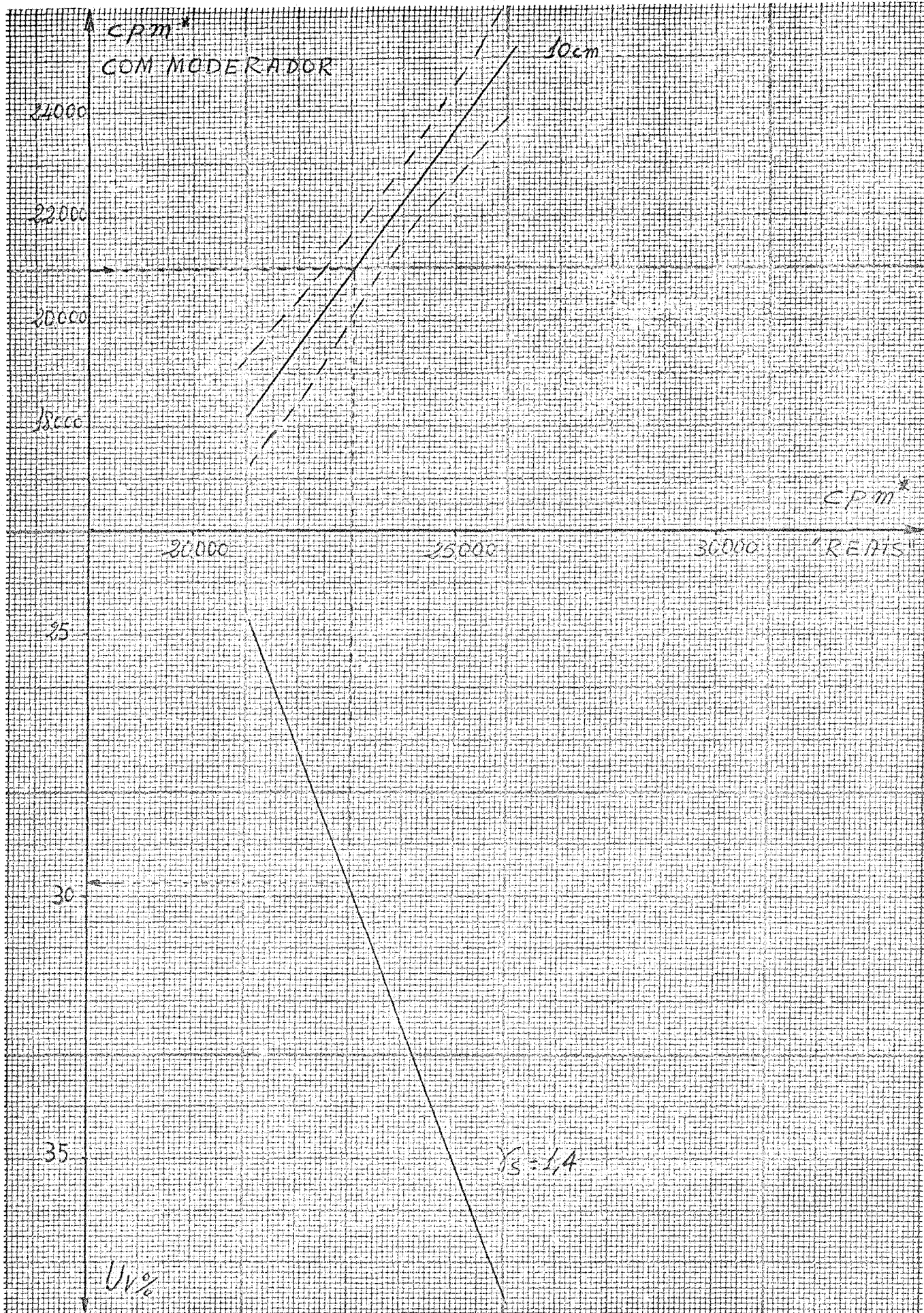


Fig. 13 - Retas da calibração superficial.

#### 4.2 - Variações da Umidade do solo

As variações da umidade através do perfil do solo foram acompanhadas durante 28 períodos sucessivos e contínuos, abrangendo o ciclo vegetativo da cultura desde o segundo mês de idade até o décimo sexto mês, culminando com o seu corte.

Resultaram assim 29 perfís de umidade, representando cada um, a média das determinações efetuadas nos tubos de acesso distribuídos no talhão, nas datas correspondentes.

Os resultados são apresentados gráficamente nas Figs. 14 a 19.

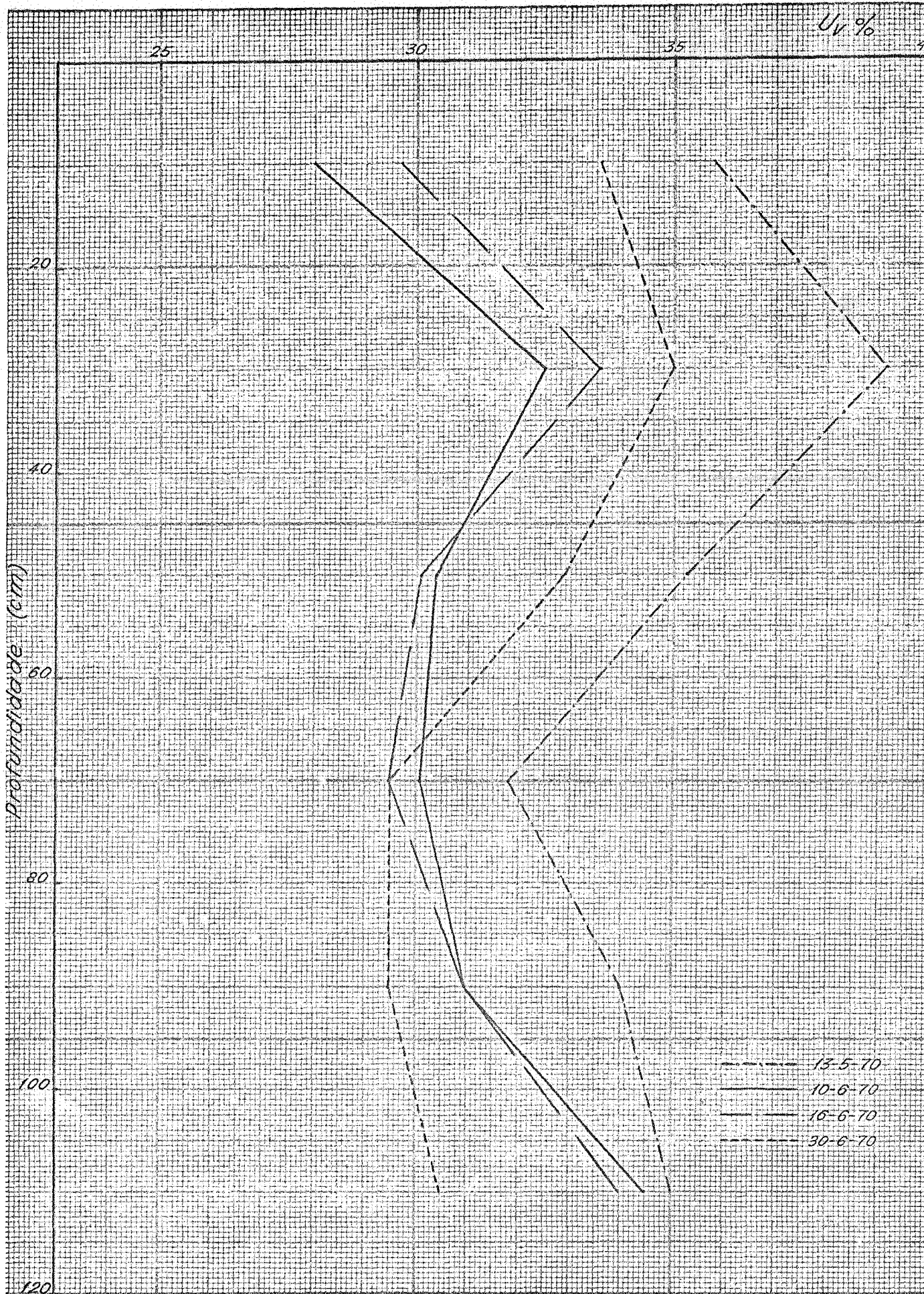


Fig. 14 - Variações da unidade do solo nos períodos 1 a 3.

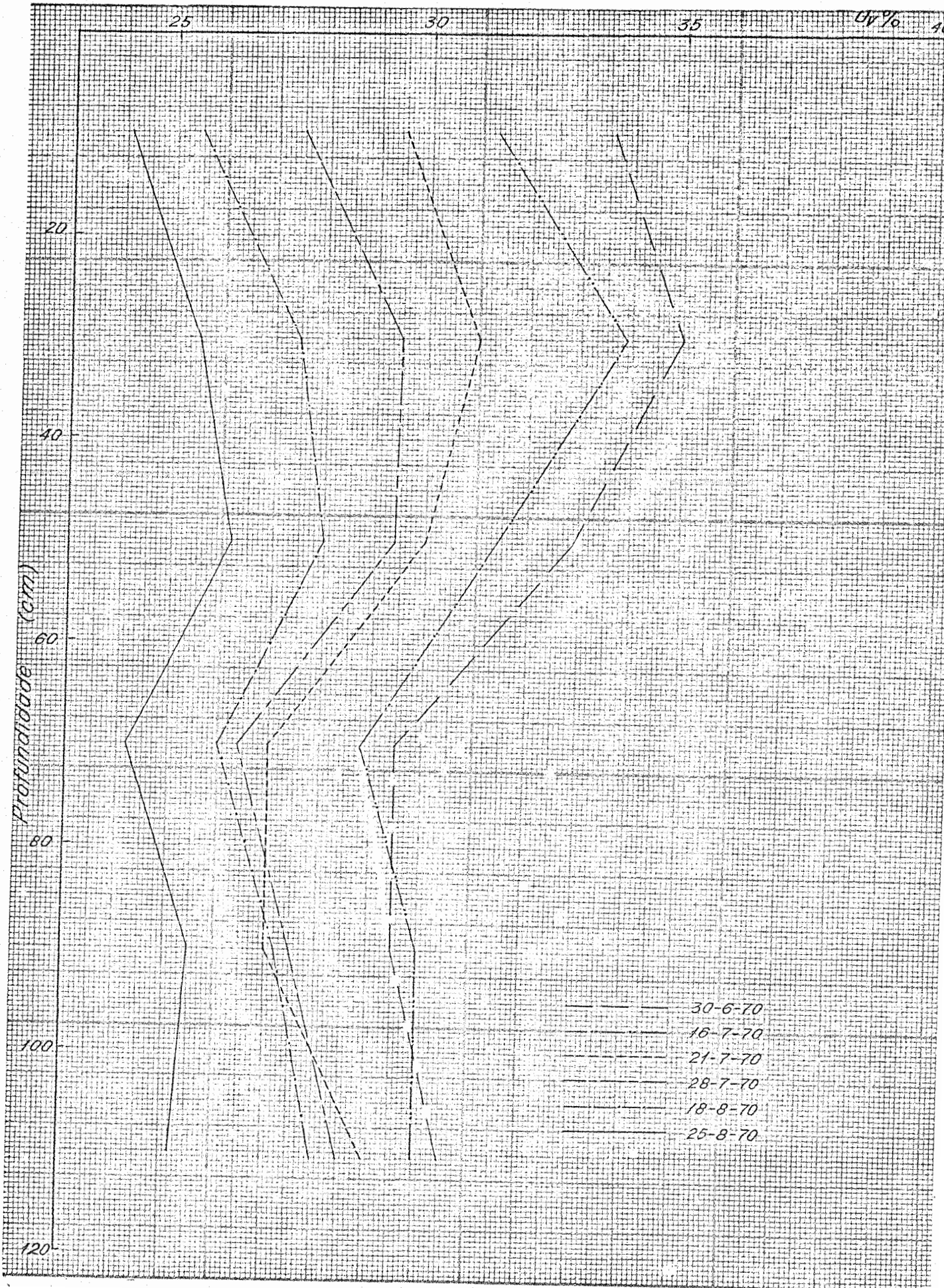


Fig. 15 - Variações da unidade do solo nos períodos 4 a 8.

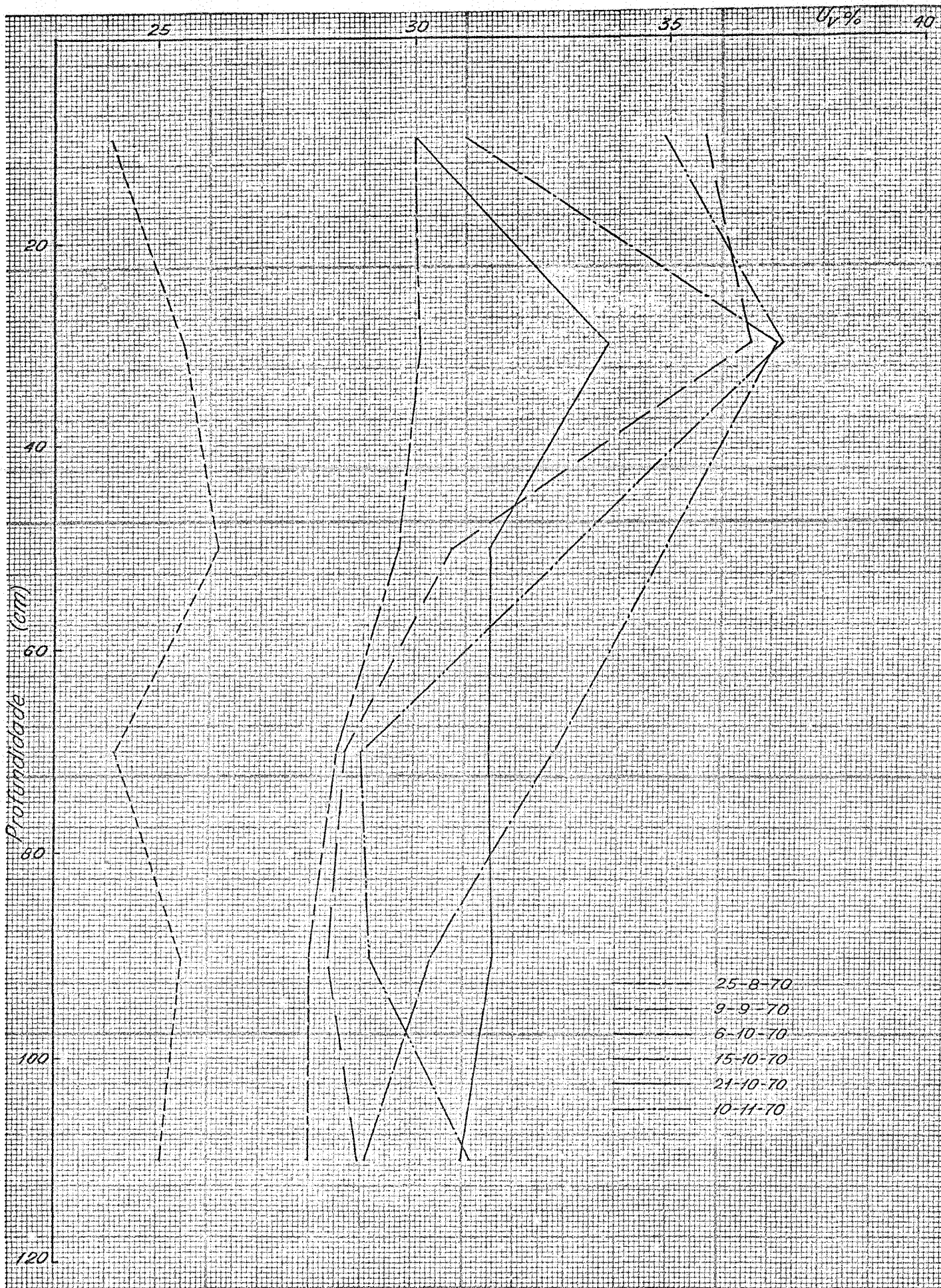


Fig. 16 - Variações da umidade do solo nos períodos 9 a 13.

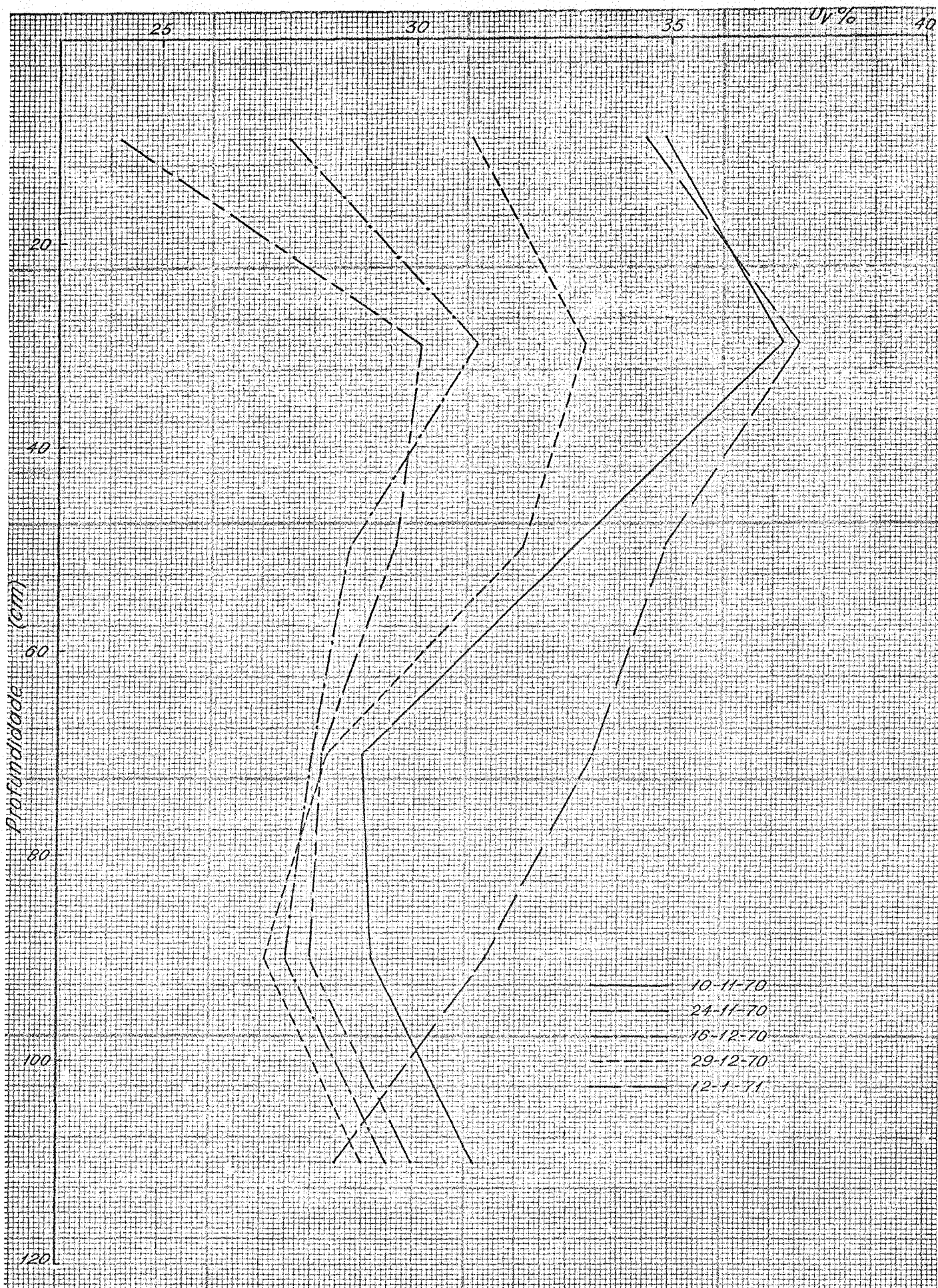


Fig. 17 - Variações da umidade do solo nos períodos 14 a 17.

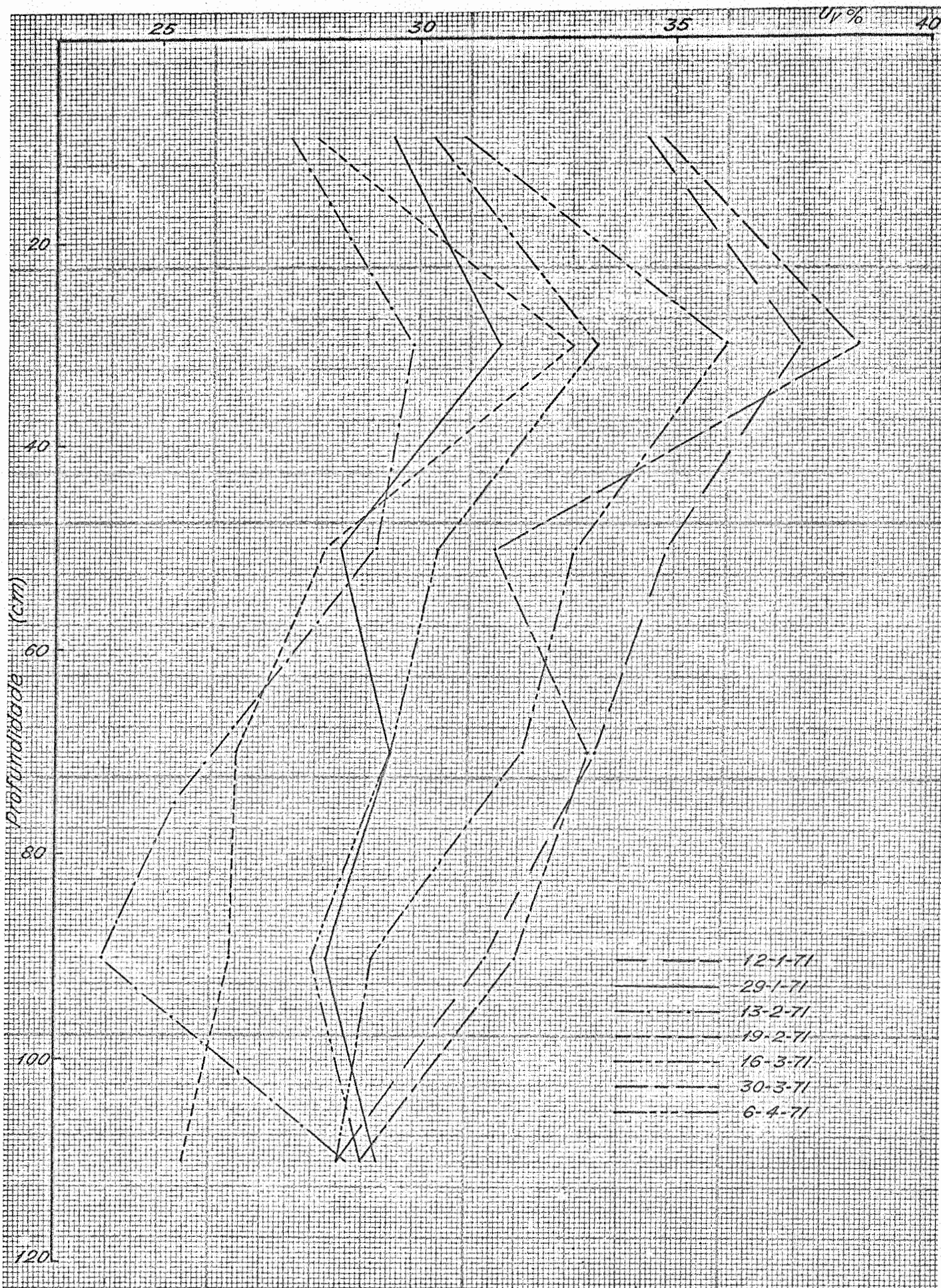


Fig. 18 - Variações da umidade do solo nos períodos 18 a 23.

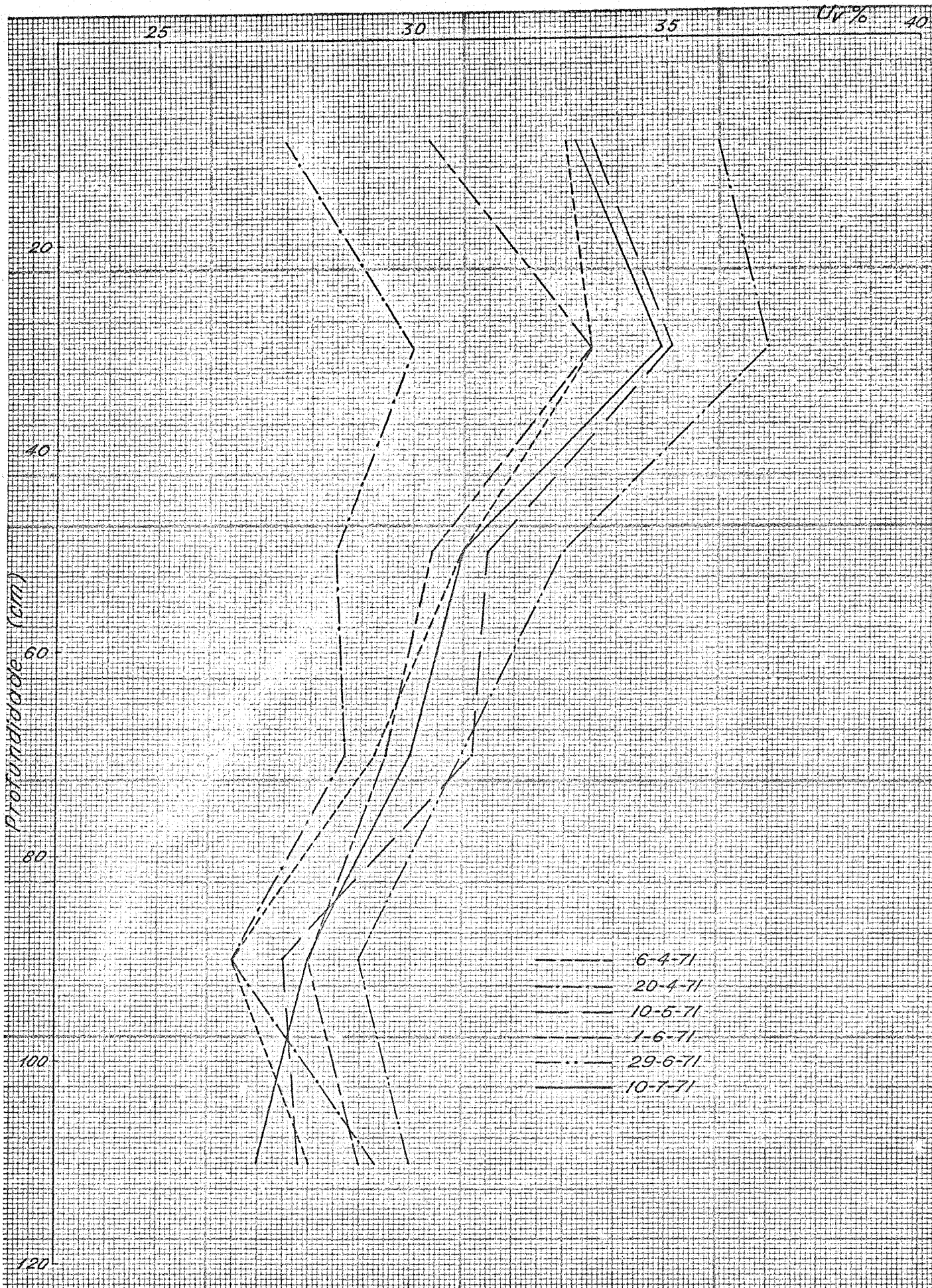


Fig. 19 - Variações da unidade do solo nos períodos 24 a 28.



4.3 - No que tange ao balanço hídrico, evaporação do tanque Classe A ( $E_0$ ), e evapotranspiração potencial (EP), os resultados se encontram nos QUADROS XV, XVI e Fig. 20, cujos símbolos têm o seguinte significado:

- H = conteúdo de água no perfil (0 - 120 cm) em milímetros de altura d'água, em relação ao P.M.P.;
- P = precipitação no período considerado, em milímetros;
- Q = consumo total de água, em milímetros, ( $Q = D + ER$ );
- D = perda de água em milímetros, abaixo da zona efetiva das raízes;
- ER = consumo de água em milímetros ou evapotranspiração real.
- $E_0$  = evaporação do tanque Classe A, em milímetros;
- EP = evapotranspiração potencial, em milímetros, estimada pelo método de PENMAN-BAVEL, VILLA NOVA et al (1968).

QUADRO XV - Balanço hídrico

Período	Data	H mm	P mm	Q mm	D mm	ER mm	ER mm/dia	Eo mm/dia	EP mm/dia
1	13/5/70	145,6	-	49,2	20,0	29,0	1,03	3,12	2,28
2	10/6	96,4	13,8	11,0	2,8	8,2	1,36	3,90	1,30
3	16/6	99,2	28,5	22,3	15,6	6,7	0,48	2,40	1,20
4	30/6	105,4	9,8	21,0	6,4	14,6	0,91	2,58	1,60
5	16/7	94,2	-	23,8	8,0	15,8	3,16	4,24	2,70
6	21/7	70,4	-	9,4	-	9,4	1,34	2,72	1,16
7	28/7	61,0	-	13,2	-	13,2	0,63	2,99	2,41
8	18/8	47,8	2,9	25,9	-	25,9	3,70	5,62	2,40
9	25/8	24,8	109,9	62,5	26,4	36,1	2,40	3,20	2,52
10	9/9	72,2	99,7	70,1	2,8	67,3	2,49	3,50	2,24
11	6/10	101,8	36,8	24,4	4,4	20,0	2,22	5,15	3,40
12	15/10	114,2	9,0	34,6	6,0	28,6	4,76	4,68	2,70
13	21/10	88,5	70,3	46,3	5,2	41,1	2,05	4,09	2,96
14	10/11	112,6	15,0	64,0	4,8	59,2	4,22	5,10	3,90
15	24/11	63,6	107,0	102,4	2,0	100,4	4,36	5,45	3,80
16	16/12	68,2	55,1	38,1	1,8	36,3	2,79	4,69	3,82
17	29/12	85,2	110,0	71,2	9,6	61,6	4,40	5,19	3,57
18	12/1/71	124,0	40,4	87,6	7,8	79,8	4,69	5,15	4,60
19	29/1	76,8	57,8	82,0	9,8	72,2	4,81	4,84	3,60
20	13/2	52,6	26,8	20,8	11,2	9,6	1,60	4,80	4,16
21	19/2	58,6	124,1	79,5	11,6	67,9	2,72	2,98	2,20
22	16/3	103,2	75,6	56,8	1,0	55,8	3,98	5,35	4,22
23	30/3	122,0	-	37,2	8,0	29,2	4,17	5,00	3,67
24	6/4	84,8	9,7	32,1	3,6	28,5	2,03	2,75	2,50
25	20/4	62,4	67,2	33,0	5,0	28,0	1,40	2,18	1,66
26	10/5	96,6	27,7	38,3	2,4	35,9	1,63	2,35	1,79
27	1/6	86,0	111,0	81,6	9,0	72,6	2,59	2,76	2,10
28	29/6	115,4	7,2	31,0	8,0	23,0	2,09	2,32	2,00
	10/7	91,6							
T O T A I S			1215,3	1269,3	193,4	1075,9			

QUADRO XVI - Valores acumulados de ER, Eo e EP durante o ciclo vegetativo da cultura.

Período	Data	ER mm	Eo mm	EP mm
1	13/5/70 a 9/6/70	29,0	87,5	63,8
2	10/6 a 15/6	37,2	110,9	71,6
3	16/6 a 29/6	43,9	144,6	88,4
4	30/6 a 15/7	58,5	186,0	114,0
5	16/7 a 20/7	74,3	207,2	127,5
6	21/7 a 27/7	83,7	226,3	135,6
7	28/7 a 17/8	96,9	289,2	186,3
8	18/8 a 24/8	122,8	328,6	203,1
9	25/8 a 8/9	158,9	376,7	240,9
10	9/9 a 5/10	226,2	471,3	301,3
11	6/10 a 14/10	246,2	517,7	331,9
12	15/10 a 20/10	274,8	545,8	348,1
13	21/10 a 9/11	315,9	627,7	407,3
14	10/11 a 23/11	375,1	699,2	461,9
15	24/11 a 15/12	475,5	819,3	545,7
16	16/12 a 28/12	511,8	880,3	595,4
17	29/12/70 a 11/1/71	573,4	953,0	645,4
18	12/1/71 a 28/1/71	653,2	1040,7	727,7
19	29/1 a 12/2	725,4	1113,3	777,7
20	13/2 a 18/2	735,0	1142,1	802,7
21	19/2 a 15/3	802,9	1216,8	857,8
22	16/3 a 29/3	858,7	1291,8	917,0
23	30/3 a 5/4	887,9	1326,8	942,7
24	6/4 a 19/4	916,4	1365,3	977,7
25	20/4 a 9/5	944,4	1409,0	1010,9
26	10/5 a 31/5	980,3	1460,7	1050,3
27	1/6 a 28/6	1052,9	1538,2	1109,1
28	29/6 a 10/7	1075,9	1563,8	1131,1

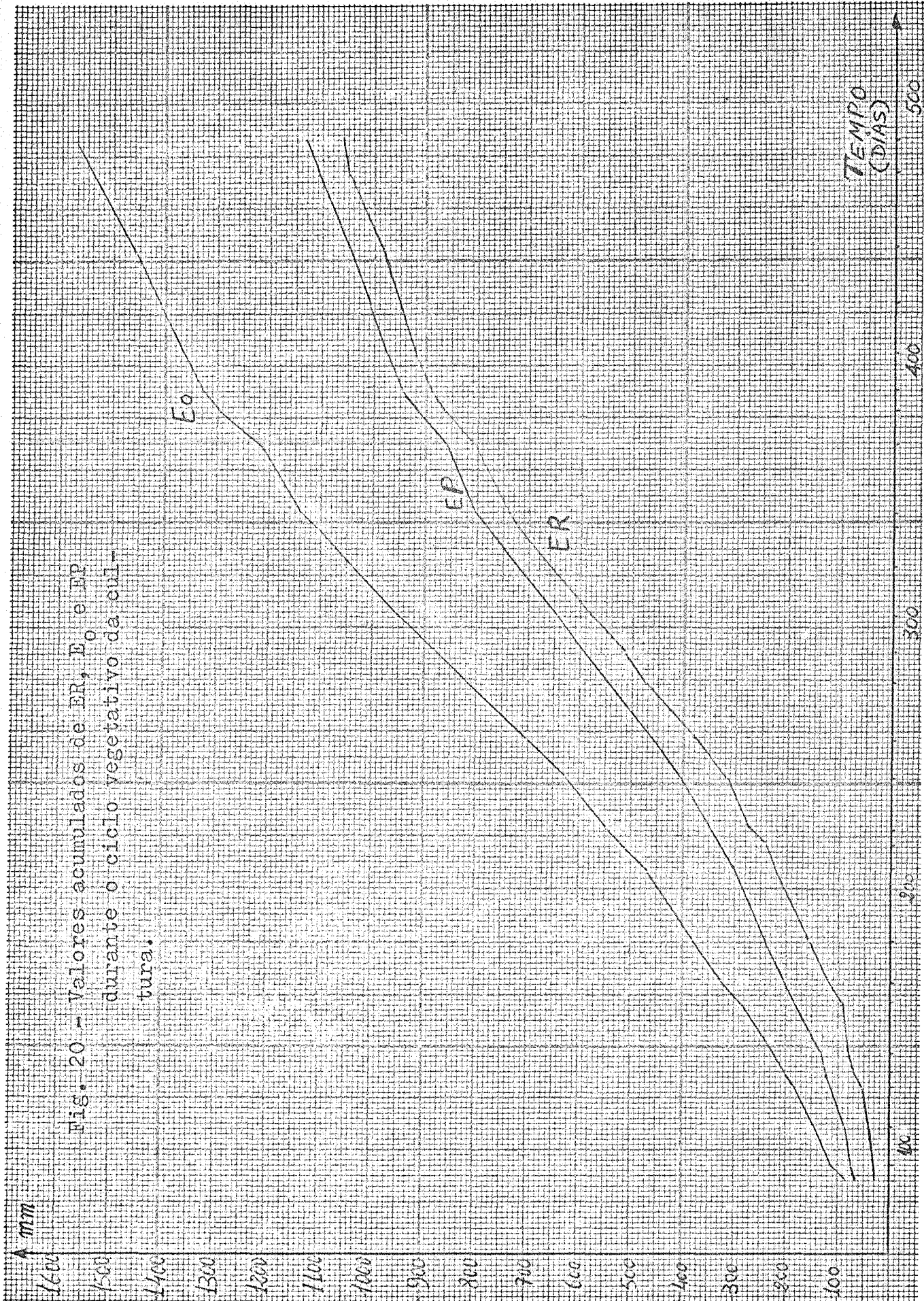


Fig. 20 - Valores acumulados de ER, E<sub>o</sub> e EP durante o ciclo vegetativo da cultura.

Pela Fig. 20 pode-se observar: 1) a proximidade da distribuição dos valores acumulados de ER e de EP, indicando que a cultura no seu ciclo vegetativo, pode encontrar uma quantidade de água relativamente abundante, no solo, à sua disposição; 2) é nítida a superioridade de  $E_0$  em relação a ER e EP; 3) a distribuição de valores acumulados de ER lembra a forma senoidal, tal como foi observado por STANHILL (1962) que explica o fato salientando que no início do ciclo, a perda de água por evapotranspiração é pequena dado o estágio de desenvolvimento da cultura, sendo a perda principalmente por evaporação do solo; no estágio final a evapotranspiração (ER) se reduz em consequência da maturação seguida do envelhecimento das fôlhas e menor atividade do sistema radicular

#### 4.4 - Variação mensal da relação ER/ $E_0$ durante o ciclo vegetativo

Com os valores inseridos no QUADRO XVII e Fig. 21, pode-se apreciar a variação mensal da relação ER/ $E_0$  com a idade da cana-de-açúcar.

QUADRO XVII - Valores mensais de ER,  $E_0$ , e ER/ $E_0$  durante o ciclo vegetativo da cultura.

Idade (mêses)	ER mm	$E_0$ mm	ER/ $E_0$
3	37,2	110,9	0,33
4	37,1	96,3	0,38
5	48,5	121,4	0,39
6	36,1	48,1	0,75
7	115,9	169,1	0,68
8	100,3	153,4	0,65
9	136,7	181,1	0,75
10	141,4	160,4	0,88
11	81,8	101,4	0,80
12	123,7	149,7	0,82
13	57,7	73,5	0,78
14	28,0	43,7	0,64
15	108,5	129,2	0,84
16	23,0	25,6	0,90

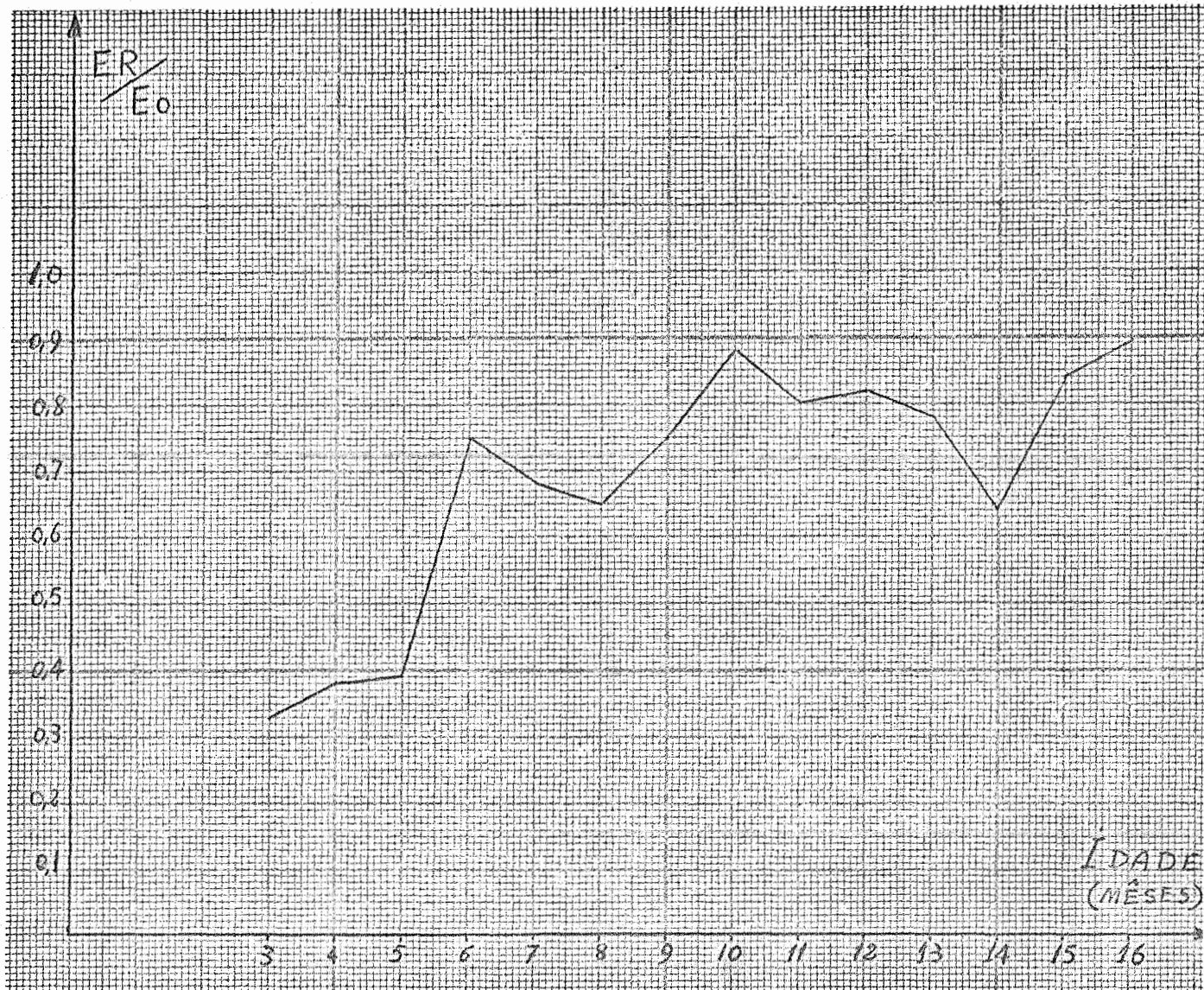


Fig. 21 - Variação mensal da relação  $ER/E_0$  durante o ciclo vegetativo (junho/70 a julho/71)

É de se notar que o aspecto da Fig. 21 é semelhante a ilustração de resultados correlatos, encontrada no trabalho de CHANG (1961), com respeito à cana-de-açúcar no Havai.

4.5 - Determinação do coeficiente K de proporcionalidade entre a Evapotranspiração Real e a Evaporação do tanque Classe A

Como resultados da fase final deste trabalho são apresentados os valores correspondentes de ER e  $E_o$  para três estágios distintos do ciclo vegetativo da cana-de-açúcar (QUADRO XVIII).

A finalidade da obtenção desses valores procede porque é comum o cultivo de variedades de cana-de-açúcar com ciclo aproximado de 18 meses, que abrange 3 estágios sucessivos, de outono-inverno, primavera-verão, e novamente outono-inverno, de condições climáticas distintas.

Os resultados para os três estágios, mostraram como era de se esperar, diferentes valores médios de consumo de água pela cultura.

QUADRO XVIII - Valores acumulados de ER e  $E_o$  em 3 estágios do ciclo vegetativo.

Estágios do ciclo vegetativo	ER		$E_o$	
	mm	mm/dia	mm	mm/dia
2 - 6 meses (119 dias)	158,9	1,33	376,7	3,16
6 - 12 meses (188 dias)	644,0	3,42	840,1	4,46
12 - 16 meses (116 dias)	273,0	2,35	347,0	2,99

O 2º estágio,  $ER = 3,42$  mm/dia, é sem dúvida, o que espêlha maiores demandas em água pela cultura. Assim sendo, o conhecimento desse valor é muito importante ao profissional dedicado aos projetos de irrigação, visto que: 1) poderá estimar, com maior margem de segurança, as reservas em água necessárias às irrigações; 2) tem à disposição um dado bastante efetivo de evapotranspiração, no caso a real, pois que, numa outra instância, teria de recorrer à estimativa da evapotranspiração potencial, que sobrestima as necessidades hídricas da cultura; 3) finalmente, conhecendo  $ER$  dos três estágios, poderá, ainda, pensar na questão de economia de água - se for o caso - ao confeccionar a tabela de irrigações por períodos de desenvolvimento da cultura.

Finalmente, no QUADRO XIX inserem-se os valores acumulados da ( $ER$ ) e ( $E_o$ ) nos três estágios do ciclo vegetativo, para a obtenção dos respectivos coeficientes de correlação no QUADRO XX.

Na apresentação se propôs a obtenção de um coeficiente de proporcionalidade entre a evapotranspiração real e a evaporação do tanque Classe A, isto é,  $K = ER \times E_o^{-1}$ . De fato, no lado direito do QUADRO XX constam os coeficientes encontrados para os três estágios de desenvolvimento da cultura, calculados com os valores do QUADRO XVIII. É de se notar que a correlação obtida é altamente significativa ao nível de 1% de probabilidade, e, ao que tudo indica, o tanque Classe A constitue um dispositivo de campo que pode fornecer um índice seguro da evapotranspiração real da cana-de-açúcar, desde que consultado um coeficiente de proporcionalidade ( $K$ ), que prevaleça para uma determinada região.

Como caracterização do ciclo vegetativo estudado para a variedade IAC 50-134, correspondente à safra 1970/71, deve-se notar que o rendimento do talhão 21, mencionado em 3.1.1, foi de 94 ton/ha, valor êste que se situa dentro da média de produção daquela variedade de cana.



QUADRO XIX - Dados para as correlações parciais entre valores acumulados de ER e  $E_o$ , em 3 estágios do ciclo vegetativo.

1º estágio (2 - 6 meses)		2º estágio (6 - 12 meses)		3º estágio (12 - 16 meses)	
ER	Eo	ER	Eo	ER	Eo
29,0	87,5	67,5	94,6	55,8	75,0
37,2	110,9	87,3	141,0	85,0	110,0
43,9	144,6	115,9	169,1	113,5	148,5
58,5	186,0	157,0	251,0	141,5	192,2
74,3	207,2	216,2	322,5	177,4	243,9
83,7	226,3	316,6	442,6	250,0	321,4
96,9	289,2	352,9	503,6	273,0	347,0
122,8	328,6	414,5	576,3	-	-
158,9	376,7	494,3	664,0	-	-
-	-	566,5	736,6	-	-
-	-	576,1	765,4	-	-
-	-	644,0	840,1	-	-

QUADRO XX - Coeficientes de correlação e de proporcionalidade entre ER e  $E_o$ .

Estágios do ciclo	(r)	(t)	Coeficiente de proporcionalidade K
1º	0,9853	15,26 <sup>***</sup>	0,42
2º	0,9978	47,59 <sup>***</sup>	0,76
3º	0,9980	35,31 <sup>***</sup>	0,79

## 5 - CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem as seguintes conclusões:

1 - Os resultados da calibração prévia da sonda de neutrons, para o solo da Série Luiz de Queiroz estudado, mostraram a influência da composição química e da variação do peso específico ao longo do perfil, comprovando o fato de que a calibração de uma sonda de neutrons é indispensável e deve ser realizada no campo.

2 - A metodologia aqui elaborada para a determinação da umidade na camada superficial do solo, mostrou-se adequada. Dessa forma a sonda de neutrons, indicada para determinações em profundidade, pode ser utilizada também em medidas de superfície.

3 - O consumo médio de água em três estágios distintos do ciclo da cana-de-açúcar foi:

1º estágio (2-6 meses)	ER = 1,33 mm/dia
2º estágio (6-12 meses)	ER = 3,42 mm/dia
3º estágio (12-16 meses)	ER = 2,35 mm/dia

evidenciando-se o valor 3,42 mm/dia como básico nos cálculos de reservas de água em projetos de irrigação, para as condições aqui envolvidas.

4 - As correlações entre a evapotranspiração real (ER) e a evaporação ( $E_0$ ) do tanque Classe A, nos três estágios do ciclo da cana-de-açúcar foram altamente significativas, ao nível de 1% de probabilidade, no estudo do balanço hídrico.

5 - O tanque Classe A é um excelente acessório no estudo do balanço hídrico, pois que permite calcular ER através de coeficientes de proporcionalidade. No caso ER é dado por:

1º estágio	$ER = 0,42 \cdot E_0$
2º estágio	$ER = 0,76 \cdot E_0$
3º estágio	$ER = 0,79 \cdot E_0$

desde que prevaleçam as condições climáticas e edafológicas do presente trabalho e sobretudo que o tanque seja instalado no meio da cultura.

## 6 - RESUMO

O presente trabalho teve como objetivos principais:

a) aplicar a técnica da moderação de neutrons como método de determinação da umidade do solo;

b) estimar as necessidades hídricas da cana-de-açúcar (variedade IAC 50-134) durante o seu desenvolvimento vegetativo;

c) determinar um coeficiente de proporcionalidade (K) entre a evapotranspiração real (ER) e a evaporação ( $E_0$ ) de um tanque Classe A.

As observações se conduziram em solo da Série Luiz de Queiroz localizado numa área de cultivo de cana-de-açúcar situada na Usina Monte Alegre, Piracicaba, Estado de São Paulo.

Procedeu-se ao estudo dos fundamentos do método, passando à calibração do instrumental "in loco", particularmente quanto à sua adaptação para determinações da umidade em camadas superficiais do solo. Correlacionaram-se as leituras obtidas com o equipamento nuclear com o teor de umidade volu-

métrico do solo, determinado em estufa a 105-110°C.

As observações se estenderam durante o ciclo da cultura (do 2º ao 16º mês) até o seu corte, cujos resultados se agruparam em 3 estágios do ciclo vegetativo.

Os valores médios de evapotranspiração real (ER) obtidos foram:

1º estágio (2-6 meses)	ER = 1,33 mm/dia
2º estágio (6-12 meses)	ER = 3,42 mm/dia
3º estágio (12-16 meses)	ER = 2,35 mm/dia

Obtiveram-se correlações altamente significativas (ao nível de 1% de probabilidade) entre os valores de ER e de evaporação  $E_0$  de um tanque Classe A instalado no meio da cultura, para cada um dos 3 estágios anteriormente citados.

Foi assim possível chegar-se aos coeficientes de proporcionalidade  $K = ER \cdot E_0^{-1}$  :

1º estágio	K = 0,42
2º estágio	K = 0,76
3º estágio	K = 0,79

Finalmente, inserem-se cinco conclusões acêrca do equipamento de neutrons, do balanço hídrico resultante e dos coeficientes de correlação e de proporcionalidade entre ER e  $E_0$ .

## 7 - SUMMARY

The main purposes of this study were:

- a) to apply the technique of neutron scattering as a method to determine the soil moisture;
- b) to estimate water requirements of sugar cane (variety IAC 50-134) during its growth cycle.
- c) to determine a proportionality coefficient (K) between the real evapotranspiration (ER) and the Class A pan evaporation ( $E_0$ ).

The study was conducted in a soil of the "Serie Luiz de Queiroz", located in a sugar cane area of the "Usina Monte Alegre", Piracicaba, State of São Paulo, Brazil.

After the study of the methodology, the neutron probe was calibrated "in loco" particularly, with respect to its application in moisture measurements in the surface layer of the soil.

The readings obtained with the nuclear equipment were correlated with the volumetric moisture content of the soil oven dried to 105-110°C.

The observations extended during the crop cycle (from the 2<sup>nd</sup> throughout the 16<sup>th</sup> month) and the results were grouped in 3 estages of growth.

The average values obtained for the real evapotranspiration (ER) were:

1 <sup>st</sup> stage (2-6 months)	ER = 1,33 mm/day
2 <sup>nd</sup> stage (6-12 months)	ER = 3,42 mm/day
3 <sup>rd</sup> stage (12-16 months)	ER = 2,35 mm/day

The correlations obtained between the values of ER and  $E_0$  from the Class A pan located within the crop, were highly significative (1% probability level).

Using the above results it was possible to calculate the proportionality coefficient  $K = ER \cdot E_0^{-1}$

1 <sup>st</sup> stage	K = 0,42
2 <sup>nd</sup> stage	K = 0,76
3 <sup>rd</sup> stage	K = 0,79

Finally, five conclusions were implied about the neutron probe, the resulting water balance and the correlation and proportionality coefficients between ER and  $E_0$ .

8 - BIBLIOGRAFIA CITADA

- 1) BARRADA, Y. Applications of the Neutron Moisture Meter. Proc. Symp. Isotopes and Radiation in Soil Plant Nutrition Studies. ANKARA. 1965.
- 2) BARROS FERRAZ, E.S. Determinação da Evapotranspiração Real pela moderação de neutrons. Tese apresentada para concurso de Doutorado à E.S.A. "Luiz de Queiroz", da U.S.P., Piracicaba. 1968.
- 3) BELL, J.P., McCULLOCH, J.S.G. Soil moisture estimation by the neutron method in Britain. J. Hydrol. 7:415-433. 1969.
- 4) BENNETT, L.O., DOSS, B.D. Effect of soil moisture level on root distribution of cool-season forage species. Agr. J. 52: 204-207. 1960.
- 5) CAMARGO, A.P., ORTOLANI, A.A. Clima das zonas canavieiras do Brasil. In Cultura e adubação da cana-de-açúcar. São Paulo, Inst. Bras. de Potassa. 1964.
- 6) CHANG, J.H. Microclimate of sugar cane. The Hawaiian Planter's Record (Third Issue) 56: 195-225. 1961.



- 7) COHEN, O.P. A procedure for calibrating neutron moisture probes in the field. Israel J. Agric. Res. 14: 169-178. 1964.
- 8) COHEN, O.P., TADMOR, N.H. A comparison of neutron moderation and gravimetric sampling for soil-moisture determination with emphasis on the cost factor. Agr. Meteorol. 3: 97-102. 1966.
- 9) DENMEAD, O.T., SHAW, R.H. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. Agr. J. 54: 385-390. 1962.
- 10) DREIBELBIS, F.R. Some aspects of watershed hydrology as determined by soil moisture data. J. Geophys. Res. 67: 3425-3435. 1962.
- 11) DREIBELBIS, F.R., AMERMAN, C.R. Land use, soil type and practice affects on the water budget. J. Geophys. Res. 69: 3387-3393. 1964.
- 12) ENGLEMAN, J.R., DECKER, W.L. The role of soil moisture in Evapotranspiration. Agr. J. 57: 626-629. 1965.
- 13) FELD, B.T. Experimental Nuclear Physics. Vol. II Ed. E. Segrè, Wiley & Son. 1953.
- 14) GARDNER, W., KIRKHAM, D. Determination of soil moisture by neutron scattering. Soil Sci. 73: 391-401. 1952.
- 15) GOLDBERG, I., TRESCONY, L.J., CAMPBELL Jr., J.S., WHYTE, G.J. Measurement of moisture content and density of soil masses, using radioactivity methods. Reprinted from: Proc. 3rd National Conference on clays and clayminerals p. 516-548. 1955.
- 16) HAAHR, V., ØLGAARD, P.L. Comparative experimental and theoretical investigations of the neutronic method for measuring the water content in the soil Proc. Symp. isotopes and radiation in soil-plant nutrition studies - - ANKARA. I.A.E.A. 1965.

- 17) HOLMES, J.W. Measuring soil water content and evaporation by the neutron scattering method. Neth. J. Agric. Sci. 4: 30-34. 1956.
- 18) HOLMES, J.W. Influence of bulk density of the soil on neutron moisture meter calibration. Soil Sci. 102: 355-359. 1966.
- 19) HOLLAND, D.A. The construction of calibration curves for determining water content from radiation counts. J. Soil Sci. 20: 132-140. 1969.
- 20) INFORZATO, R., ALVAREZ, R. Distribuição do Sistema Radicular da cana-de-açúcar em solo tipo terra-rôxa legítima. Bragantia 16: 1-13. 1957.
- 21) JENSEN, P.A., SOMER, E. Scintillation techniques in soil-moisture and density measurements. Proc. Symp. Use of isotope and radiation Techniques in soil physics and irrigation studies - Istanbul - IAEA. 1967.
- 22) KALMA, J.D., STANHILL, G. Transpiration evaporation and deep drainage losses from an orange plantation, Israel J. Agric. Res. 19: 11-24. 1969.
- 23) KAPLAN, I. Nuclear Physics - chp. 18. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Mass. - USA. 1958.
- 24) LAPP, R.E. ANDREWS, H.L. Nuclear Radiation Physics. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1954.
- 25) LAWLESS, G.P., MCGILLIVRAY, N.A., NIXON, P.R. Soil moisture interface effects upon readings of neutron moisture probes. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 27: 502-507. 1963.
- 26) LONG, I.F., FRENCH, B.K. Measurement of soil moisture in the field by neutron measurement. J. Soil Sci. 18: 149-166. 1967.
- 27) LUEBS, R.E., BROWN, J.J., LAAG, A.E. Determining water content of different soils by the neutron method. Soil Sci. 106: 207-212. 1968.

- 28) McGUINNESS, J.L., DREIBELBIS, F.R., HARROLD, L.L. Soil moisture measurements with the neutron method supplement weighing lysimeters. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 25: 339-342. 1961.
- 29) McHENRY, J.R. Theory and application of neutron scattering in the measurement of soil moisture. Soil Sci. 95: 294-307. 1963.
- 30) MAKKINK, G.F., Van HEEMST, H.D.J. The actual evapotranspiration as function of the potential evapotranspiration and the soil moisture tension. Neth. J. Agric. Sci. 4: 67-72. 1956.
- 31) MERRIAM, R.A., COPELAND, O.L. Comments on neutron soil moisture probe efficiency and sensitivity. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 27: 106-107. 1963.
- 32) MOERMAN, P., DE BOODT, M. MORTIER, P. The spatial resolution of the neutron moisture meter. Proc. of a panel - Soil moisture and irrigation studies - Vienna FAO-IAEA. 1966.
- 33) ØLGAARD, P.L., HAAHR, V. On the sensitivity of sub surface neutron moisture gauges to variations in bulk density. Soil Sci. 105: 62-63. 1968.
- 34) PECK, N.H., VITTUM, M.T., GIBBS, G.H. Evapotranspiration rates for irrigated crops at Geneva, New York. Agr. J. 60: 23-26. 1968.
- 35) PERRIER, E.R., JOHNSTON, W.R. Distribution of thermal neutrons in a soil-water system. Soil Sci. 93: 105-112. 1962.
- 36) PIERPOINT, G. Measuring surface soil moisture with the neutron depth probe and surface shield. Soil Sci. 101: 189-192. 1966.
- 37) PIMENTEL GOMES, F. Curso de Estatística Experimental, 2ª edição. Gráfica Nobel Ltda. São Paulo. 384p. 1963.
- 38) PHILLIPS, R.E., JENSEN, C.R., KIRKHAM, D. Use of radiation equipment for plow-layer density and moisture. Soil Sci. 89: 2-7. 1960.

- 39) RANZANI, G., FREIRE, O., KINJO, T. Carta de Solos do Município de Piracicaba. Centro de Estudos de Solos, ESALQ, U.S.P. Piracicaba. 1966.
- 40) ROBINS, J.S. Evapotranspiration. Agronomy. American Society of Agronomy, Madison, U.S.A. Vol. 9: 286-298. 1965.
- 41) ROBINSON, F.E., CAMPBELL, R.B., CHANG, J.H. Assessing the utility of pan evaporation for controlling irrigation of sugar cane in Hawaii. Agron. J. 55: 444-446. 1963.
- 42) ROBINSON, F.E., BAVER, L.D. The use of the neutron probe to study moisture movement and moisture extraction by sugar cane in Hawaii. 8th. Intern. Congress of soil Science, Bucharest, Romania, p. 433-443. 1964.
- 43) SALATI, E. Introdução ao estudo da água do solo pela moderação de neutrons. Tese apresentada para concurso de Livre Docência à E.S.A. "Luiz de Queiroz" - U.S.P. Piracicaba. 1960.
- 44) SLATYER, R.C. Evapotranspiration in relation to soil moisture Neth. J. Agric. Sci. 4: 73-76. 1956.
- 45) STANHILL, G. The control of field irrigation practice from measurements of evaporation. Israel J. Agric. Res. 12: 51-62. 1962.
- 46) STONE, J.F., SHAW, R.H., KIRKHAM, D. Statistical parameters and reproducibility of the neutron method of measuring soil moisture. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 24: 435-438. 1960.
- 47) STONE, J.F., KIRKHAM, D., READ, A.A. Soil moisture determination by a portable neutron scattering moisture meter. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 19: 419-423. 1955.
- 48) STAPLE, W.J. Evaporation from soil and vegetation. Neth. J. Agric. Sci. 4:39-42. 1956.
- 49) TOSELLO, R.N., REIS, A.J., BARRETO, G.B. Balanço de água no solo em cultura de cana-de-açúcar. Resultados da Estação Experimental de Ribeirão Preto. Bragantia 25: 337-348. 1966.

- 50) VAN BAVEL, C.H.M., HOOD, E.E. UNDERWOOD, N. Vertical resolution in the neutron method for measuring soil moisture. Trans. Amer. Geophys. Union 35: 595-600, 1954.
- 51) VAN BAVEL, C.H.M., UNDERWOOD, N., SWANSON, R.W. Soil moisture measurement by neutron moderation. Soil Sci. 82: 29-42. 1956.
- 52) VAN BAVEL, C.H.M., NIELSEN, D.R., DAVIDSON, J.M. Calibration and characteristics of two neutron moisture probes. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 25: 329-333. 1961.
- 53) VAN BAVEL, C.H.M., NIXON, P.R., HAUSER, V.L. Soil moisture measurement with the neutron method. USDA Tech. Bull. ARS-41-70. 1963.
- 54) VAN BAVEL, C.H.M., STIRK, G.B. Soil water measurement with an Am<sup>241</sup>Be neutron source and an application to evaporimetry. J. Hydrol. 5: 40-46. 1967.
- 55) VILLA NOVA, N.A., REICHARDT, K., ORTOLANI, A.A. Principais métodos climáticos de estimativa e de medida da perda de água de superfícies naturais. Publicado pela Cadeira de Física e Meteorologia da ESALQ, U.S.P. 57p. mimeogr. 1968.