

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

CARACTERÍSTICAS DA INFILTRAÇÃO EM SULCOS  
ABERTOS E FECHADOS

por

Hamilton Medeiros de Azevedo

CAMPINA GRANDE, PARAÍBA

1975

---



A994c Azevedo, Hamilton Medeiros de.  
Características da infiltração em sulcos abertos e fechados / Hamilton Medeiros de Azevedo. - Campina Grande, 1975.  
56 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1975.  
"Orientação : Prof. Dr. Hugo Orlando Carvalho Guerra, Prof. Dr. Agustín A. Millar".  
Referências.

1. Método de Irrigação. 2. Irrigação por Sulcos Fechados e Abertos. 3. Infiltração em Sulcos. 4. Dissertação - Ciências. I. Guerra, Hugo Orlando Carvalho. II. Millar, Agustín A. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 626.84(043)

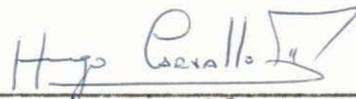
CARACTERÍSTICAS DA INFILTRAÇÃO EM SULCOS  
ABERTOS E FECHADOS

HAMILTON MEDEIROS DE AZEVEDO

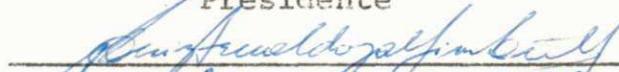
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA (M.Sc.).

Aprovado por:

COMISSÃO



Presidente


CAMPINA GRANDE

ESTADO DA PARAÍBA - BRASIL

ABRIL - 1975





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

O autor agradece:

De modo especial ao Dr. HUGO O. CARVALLO da Universidade Federal da Paraíba e ao Dr. AGUSTIN A. MILLAR do Instituto Interamericano de Ciências Agrícolas (IICA), por suas valiosas ajudas na planificação, orientação, desenvolvimento, redação e correção da tese.

À Superintendência do Vale do São Francisco através do Engº Agrº JOÃO NELLY DE MENEZES REGIS e à Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste na pessoa do Engº Agrº EDSON LUSTOSA DE POSSÍDIO por terem colocado à sua disposição, áreas da Estação Experimental, maquinarias, transporte e laboratório. Esta colaboração faz parte das atividades do Convênio MINTEP/IICA para as Universidades do Nordeste.

A Engenheira Agrônoma NORMA CÉSAR DE AZEVEDO, sua esposa, pela valiosa colaboração na realização deste trabalho.

A MARILDA GOMES DA COSTA, Secretária da SUDENE/DRN/EI em Petrolina, pelo eficiente trabalho de datilografia.

Ao Dr. HERNAN TEJEDA do INIA-CHILF, a seus professores, amigos e a todas as pessoas que colaboraram com este trabalho.

## R E S U M O

O presente trabalho teve como objetivo estudar o efeito do conteúdo de água inicial do solo sobre os parâmetros da equação de velocidade de infiltração, e, comparar estatisticamente dois métodos de irrigação: sulcos fechados e sulcos abertos.

Os trabalhos foram desenvolvidos em um latossol da Estação Experimental do Projeto de Irrigação de Bebedouro, da Superintendencia do Vale do São Francisco (SUVALE), em Petrolina Estado de Pernambuco.

O efeito do conteúdo inicial de água sobre a equação de velocidade de infiltração foi avaliado através de testes de infiltração realizados a diferentes níveis de umidade do solo e analisando-se os resultados através de correlação logarítmica. Na comparação entre os dois métodos de irrigação usou-se um Split Plot inteiramente ao acaso e os tratamentos foram três declividades (0,15, 0,24 e 0,37%) e os subtratamentos três lâminas de irrigação (3,0, 5,5 e 8,0 cm).

A análise dos resultados demonstrou que o coeficiente K da equação de velocidade de infiltração diminuiu a medida que aumentou o conteúdo inicial de água no solo. Por outro lado o expoente "n" da equação de velocidade de infiltração não foi afetado com o conteúdo inicial de água do solo. Na comparação dos dois métodos de irrigação os efeitos da lâmina e interação (lâmina x declividade) foram significativos ao nível de 1%. Sob as condições em que os testes foram conduzidos, encontrou-se que quando se irrigou usando sulcos sem saída de água, a infiltração de água foi superior a infiltração em sulcos abertos. Assim, dos métodos estudados o mais satisfatório foi o de sulcos fechados.

## A B S T R A C T

The objective of the present work was to study the effect of the initial soil water content on the infiltration velocity equation parameters and to compare statistically two irrigation methods: open and closed furrows.

The experimental part was done on a latossol, located on the São Francisco Valley, Petrolina, PE.

Infiltration tests at different soil water contents and logarithmic correlation analyses were conducted to evaluate the effect of the initial soil water content on the parameters of the infiltration velocity equation. The statistical design used to compare the irrigation methods was a complete randomized Split Plot with three field slopes as treatments (0,15, 0,24 and 0,37%) and three irrigation water applications (3,0, 5,5 and 8,0 cm).

The analyses of the results showed that the coefficient K from the Infiltration velocity equation decreased with the initial soil water content. On the other hand, the coefficient "n" from the same equation was not affected by the initial soil water content. The statistical analyses also showed that the interaction between the amount of applied water and field slope was significant at the 1% significant level.

Under the conditions on which the experiment was conducted, it was found that the amount of water infiltrated into the soil when closed furrows were used was greater than when open furrows were employed.

Based in the results obtained under the conditions on which the experiments were conducted, it is concluded that the method of irrigation using closed furrows was more satisfactory than the method of open furrows.

## Í N D I C E

	Página
DEDICATÓRIA	ii
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
ÍNDICE	vi
CAPÍTULO I	
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II	
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
Irrigação por sulcos	4
A. Classificação	4
B. Hidráulica de irrigação	7
C. Eficiência de aplicação de água	15
CAPÍTULO III	
MATERIAL E MÉTODOS	19
A. Localização dos testes	19
B. Características físico-hídricas do solo estudado	19
C. Parâmetros de irrigação	20
D. Comparação entre métodos de irrigação	25
CAPÍTULO IV	
RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
A. Propriedades físico-hídricas do solo	27

	B. Parâmetros de irrigação	30
	C. Testes de infiltração	34
	D. Comparação entre sulcos abertos e fechados	43
CAPÍTULO V	CONCLUSÕES	49
	BIBLIOGRAFIA	51
	APÊNDICE	56

## CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

A irrigação é uma alternativa muito importante para a economia do Nordeste do Brasil, principalmente quando se trata de regiões áridas e semi-áridas. O Polígono das Secas, compreendido pelos Estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Sergipe, Alagoas, parte da Bahia e de Minas Gerais (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas, DNOCS, 1970) somando 950 mil quilômetros quadrados, constitui a área mais vulnerável ao fenômeno das anomalias climáticas com ocorrência de secas de caráter cíclico e intermitente (Souza Lima, 1973).

Estima-se segundo Guerra (1970), que o potencial de solos irrigáveis do Nordeste é de 50 mil quilômetros quadrados, localizando-se 30 mil no vale do São Francisco, 1 mil no vale do Parnaíba e mais 10 mil constituído pelo somatório de outras áreas existentes e distribuídas no Nordeste.

A eficiência de aplicação de água nos projetos de irrigação por sulco no Nordeste, segundo Poers<sup>1</sup> (1975) baseado em medições realizadas nos lotes de colonos do Projeto de Irrigação de Bebedouro-Patrolina-PE., varia entre 20 e 40%. Nas condições atuais da irrigação no Nordeste, com problemas de drenagem e salinidade devidos ao manejo deficiente e apli-

---

1 Comunicação Pessoal

cação descontrolada da água de irrigação, um aumento da eficiência de aplicação de água tornaria possível a erradicação destes problemas e ampliação da área irrigada, contribuindo assim para desenvolvimento regional e melhoramento do quadro sócio-econômico.

A eficiência de irrigação na aplicação de água através de sulcos clássicos, sulcos com saída de água, é afetada pelas perdas de água por evaporação, por percolação abaixo da zona radicular e por escoamento superficial no final do sulco. As perdas por evaporação em sulcos podem ser consideradas insignificantes, ao passo que as perdas por percolação e escoamento superficial no final do sulco podem assumir grandes proporções, dependendo da textura do solo, declividade da parcela, lâmina líquida de irrigação, comprimento do sulco; vazão de entrada e principalmente da habilidade do irrigante no manejo da água.

O método de irrigação em sulcos sem saída de água, sulcos fechados, tão antigo como os sulcos tradicionais com saída de água, elimina as perdas de água por escoamento superficial no final do sulco. Entretanto, se carece de informação que mostre as características de seu comportamento e eficiência comparadas às dos sulcos abertos.

O objetivo deste trabalho foi estudar o efeito do conteúdo de água no solo no momento da irrigação sobre os parâmetros da equação de infiltração e comparar estatisticamente dois métodos de irrigação: sulcos abertos ou com saída de água e sulcos fechados ou sem saída de água.

## CAPÍTULO II

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Israelsen e Hansen (1965), definem a irrigação como a aplicação artificial de água ao terreno para suprir as espécies vegetais da necessidade de água para seu desenvolvimento.

Segundo Barrato (1974), a irrigação pode ser feita através de diversos sistemas tais como: irrigação sub-superficial, inundação, transbordamento, sulcos, aspersão e gotejamento.

Cada sistema de irrigação tem suas características peculiares (Criddle et al., 1956; Thorne e Peterson, 1969; Poiree, 1970; Zimmerman, 1970 e Grassi, 1972) que sendo satisfeitas garantem o manejo adequado da água num projeto de irrigação.

Segundo Daker (1970), o sistema de irrigação em sulcos é atualmente o mais conhecido e usado em todo o mundo, fazendo exceção dos países mais desenvolvidos como por exemplo os Estados Unidos onde aproximadamente 60 por cento da irrigação é feita por aspersão (Irrigation handbook and directory, 1972). A irrigação por sulco pode ser utilizada para quase todas as culturas e adapta-se inclusive a terrenos íngremes através do uso de corrugações, sulcos rasos, ou sulcos em contorno (Israelsen e Hansen, 1965).

## Irrigação por sulcos

### A. Classificação

López (1973), subdivide o sistema de irrigação em sulcos com saída de água e sulcos sem saída de água.

#### 1. Sulcos com saída de água:

Os sulcos com saída de água ou sulcos abertos compreendem o processo em que a água aplicada ao sulco terá seu excesso, não infiltrado, escoado no final deste, constituindo-se geralmente em perdas. Estas perdas superficiais de água podem ser minimizadas coletando-se para um reservatório e bombeando para os canais de distribuição, ou, ainda por gravidade em área mais baixa do projeto (Zimmerman, 1970). López (1973), subdivide os sulcos abertos em:

a. Método original: é o método de irrigação por sulco mais antigo e consiste em se colocar água no início do sulco e cortar este suprimento logo após a água atingir o final deste.

b. Sulcos com retenção de água: a semeadura é feita no fundo do sulco e a cultura ao se desenvolver funcionará como uma retenção parcial do avanço da água no sulco. Aqui também, quando a água atingir o final do sulco a vazão de entrada é cortada.

c. Sulcos clássicos: nos sulcos clássicos a irrigação se processa como nos casos anteriores, sendo que quando a água atingir o final do sulco a irrigação prossegue por um tempo necessário para infiltrar a lâmina de água desejada.

d. Corruções: são sulcos comuns, diferindo apenas na magnitude da seção transversal. Nas corruções as seções transversais são menores que nos sulcos, por serem adaptadas para irrigar em declividades grandes e com pequenas vazões.

## 2. Sulcos sem saída de água:

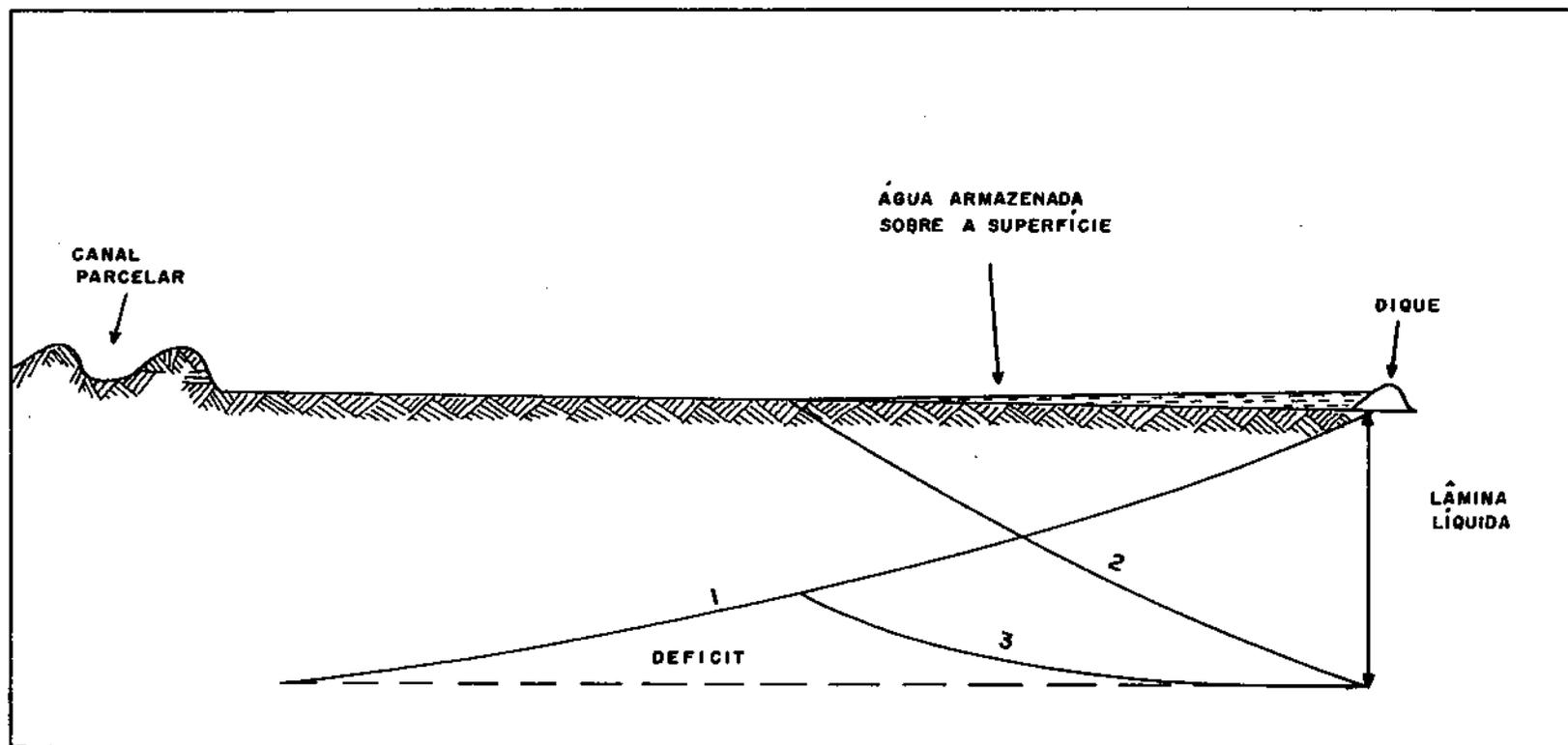
Os sulcos sem saída de água ou sulcos fechados, têm como principal objetivo a eliminação do escoamento superficial de água no sulco, fechando-o em seu final. Os sulcos fechados são subdivididos por López (1973) em:

a. Fechados no final do sulco: a água aplicada ao sulco quando atinge o final deste é armazenada, visando compensar a diferença de água infiltrada entre o início e final do sulco provocado pelo tempo gasto no avanço da água. Figura 1 (López, 1973) ilustra uma comparação entre a infiltração em sulcos abertos e fechados.

A curva 1, representa a água infiltrada ao longo do sulco como se este não tivesse fechado no final; a curva 2, representa a quantidade de água armazenada no final do sulco fechado que infiltrou; e a curva 3, é a somatória das curvas 1 e 2, que representa o perfil da água infiltrada no sulco quando se usam sulcos fechados.

Segundo López (1973), nos sulcos fechados no final, o déficit de água verifica-se no terço médio do sulco ao invés do terço final como acontece nos sulcos originais (Figura 1). Entretanto, segundo o referido autor, pode-se conseguir e eliminar o déficit de água com uso de comprimento de sulco adequado, em função da lâmina a aplicar e a velocidade de infiltração do solo.

b. Sulcos com várias tampas: este método é semelhante ao de sulco fechado no final, sendo que em sulcos com vá-



9

Figura 1. Perfil de um corte longitudinal de sulco fechado após irrigação.

rias tampas, quando a água atinge o final do sulco e o tirante de água se eleva devido ao sulco fechado, um novo fechamento é feito de modo que o desnível da água entre as duas tampas seja aproximadamente entre 6 a 10 cm. Prossegue-se desta maneira até chegar próximo ao canal parcelar.

c. Canteiros e serpentinas: os canteiros se caracterizam devido a presença de pequenos sulcos ligados em um dos extremos ou nos dois simultaneamente. As serpentinas são sulcos pequenos mas ligados nos extremos alternadamente em zigzag.

A irrigação feita em sulcos originais têm como desvantagem o déficit de água no terço final do sulco, resultante do corte da vazão (Figura 1). Quando as culturas são plantadas no fundo do sulco além do problema apresentado no sistema de sulcos originais, favorece a maiores perdas por percolação. Nos sulcos clássicos e nas corrugações o tempo de irrigação adicional para suprir o déficit de água no final do sulco, incide em perdas por percolação e escoamento superficial. Estas perdas podem ser diminuídas adotando-se comprimentos de sulcos e vazões reduzidas segundo recomendações de Criddle et al. (1956).

As irrigações feitas através de sulcos sem saída de água apresentam eficiência de irrigação maior que os sulcos abertos, devido a eliminação das perdas de água por escoamento superficial. Por outro lado, absorve mais mão de obra durante as aplicações de água, principalmente na irrigação de canteiros e serpentinas, e produzem relativamente maiores perdas de água por percolação que nos sulcos abertos, (López, 1973).

## B. Hidráulica de irrigação

Da água aplicada no sulco, parte penetra no solo, parte volta à atmosfera por evapotranspiração e o restante avança sobre a superfície deste (Fok e Bishop, 1965). A água que pas-

sa da superfície para o interior do solo, constitui o fenômeno de infiltração e a maior ou menor velocidade em que penetra é o que se denomina de capacidade de infiltração do solo (Fernandez et al., 1971).

Shockley, Woodward e Phelan, citado por Linderman, (1968), indicam que é possível atingir um racional e completo projeto de irrigação por sulco, quando se pode determinar exatamente: 1) curva de avanço, 2) curva de recesso e 3) características da infiltração do solo.

#### a. Curva de avanço

A quantidade de água aplicada no sulco que não infiltrou, avança superficialmente ao longo do sulco, constituindo a frente úmida, denominado avanço da água no sulco (Fok e Bishop, 1965). Muitos estudos se tem realizado para determinar o avanço da água no sulco, devido a sua importância na eficiência de aplicação de água pelo método (Bishop, 1961).

Segundo Hoces (1971) os fatores que exercem influência sobre o avanço da água são: 1) rugosidade do sulco, 2) declividade, 3) raio hidráulico, 4) vazão e 5) profundidade do fluxo.

Criddle et al., (1956) indicam que as características de infiltração do solo e da água de infiltração também exercem influência sobre o avanço da frente de água.

Vários investigadores tem desenvolvido métodos relativamente fáceis para medir a velocidade de avanço da água no sulco, (Fok e Bishop (1965). Todos os métodos empregam a lei da conservação das massas ou o princípio do balanço de volume (Linderman, 1968). O volume total de água fluído a um sulco durante um período dado de tempo deve ser igual ao volume de infiltração mais a variação de volume no armazenamento superficial.

Devido às múltiplas variáveis que interferem na equação de avanço as investigações realizadas para resolver o problema, estão sendo desenvolvidas com base em equações empíricas.

Criddle et al. (1956) desenvolveu um método numérico para prever o avanço em sulcos, representado pela seguinte equação:

$$X = p \cdot t_x^s \quad (1)$$

onde X é o comprimento do sulco atingido pelo avanço da água no tempo t, "p" e "s" são constantes determinadas experimentalmente e  $t_x$  é o tempo de avanço.

Mugteren (1969), citado por Grassi (1972), analisando o significado físico de "p" e "s", encontrou que "p" é uma constante empírica que depende da declividade do terreno, vazão e aspereza da superfície e "s" está relacionado com as características físicas do solo expressadas em função da velocidade de infiltração.

Christiansen citado por Fok e Bishop (1965) desenvolveram outra equação relacionando o comprimento de avanço com as características de infiltração do solo. Foi expressada da seguinte forma:

$$L = \frac{Q \cdot t}{W(D_s + \frac{K}{(n+1)(n+2)} t^{n+1})} \quad (2)$$

onde L é o comprimento do sulco, Q a vazão de entrada de água no sulco ( $m^3/min$ ), t o tempo de aplicação de água (minutos), W é a largura do sulco (metros),  $D_s$  a profundidade média da água (metros), K uma constante empírica adimensional e t é o tempo de aplicação de água (minutos).

Este é um método baseado no balanço de volume mas ad

mite uma velocidade de avanço constante e um padrão de distribuição superficial triangular. Entretanto, não considera o efeito da declividade e rugosidade do solo sobre a profundidade do armazenamento superficial, mas considera a profundidade de fluxo constante.

Para resolver o problema do armazenamento superficial (Fok e Bishop, 1965) desenvolveram uma equação empírica. A expressão para obter o comprimento do avanço é:

$$L = \frac{Q \cdot t}{\frac{u \cdot D_0^m}{1+b} + \frac{w \cdot F \cdot K \cdot t^{n+1}}{(n+1)(n+2)}} \quad (3)$$

onde L é o comprimento do sulco, F um fator de correção para aproximar a profundidade média de água absorvida pelo solo durante a irrigação, "m" e "u" os coeficientes de área, D<sub>0</sub> a profundidade normal de fluxo que entra (metros), b o expoente empírico da equação de avanço, K, t, W, Q e n, tem os mesmos significados indicados na equação {2}.

Hall e Davis citados por Hoces (1971), apresentam a seguinte equação:

$$x_i = \frac{Q \cdot \Delta t - 1/2 F \cdot a (\Delta t)^n \left[ g_1 \Delta x_1 + g_{i-1} \Delta x_2 + \dots + g_2 \Delta x_i - 1 \right]}{F \cdot a (\Delta t)^n K + c \cdot d_0^2 + e} \quad (4)$$

onde Q é a vazão (m<sup>3</sup>/min), t é o tempo (min), F é o fator de correlação, a é uma constante obtida desde a equação de infiltração, d<sub>0</sub> é a profundidade da água no sulco (m), "K" e "c" são constantes empíricas, g<sub>i</sub> = i<sup>n</sup> - (i-2)<sup>n</sup>, para i = 2 e "e" é a água retida na superfície.

Hoces (1971), em um experimento realizado com quatro conteúdos distintos de umidade do solo, encontrou boa concor-

dância entre valores de avanço determinados pela equação de Hall e Davis e dados obtidos experimentalmente.

A segurança deste método aumenta com a diminuição dos intervalos de tempo usados, aumentando o volume de cálculos, sendo necessário o uso de computadores digitais.

Grassi et al. (1965), deduziram uma equação racional através de análise dimensional.

$$D = \frac{K}{I_p} \cdot Q^{1,722} \cdot R^{2/3} \cdot S_o^{1/2} \cdot t_e^{0,722} \quad \{5\}$$

onde D é o comprimento do sulco atingido pela água no tempo  $t_e$ , K um coeficiente, Q a vazão, R o raio hidráulico,  $S_o$  a declividade do sulco,  $t_e$  o tempo de escoamento e  $I_p$  é a infiltração.

Wilk e Smerdon citados por Liderman (1968), também relacionaram o comprimento de avanço com a infiltração e desenvolveram uma equação diferencial muito complexa que representa o princípio do balanço de volume. Eles desenvolveram um conjunto de curvas dimensionais, usando a função de infiltração como parâmetro. Seu método se ajusta muito bem aos resultados obtidos in situ e com o método de Hall.

#### b. Curva de recessão

Ainda não foi desenvolvido um método satisfatório para prever a recessão da água no sulco. A maioria dos pesquisadores, quando analisam a irrigação superficial por sulco, fazem algumas considerações com respeito a recessão e consideram que a água atinge o final do sulco quando a vazão é cortada. Gray citado por Liderman (1968), trabalhando em condições de campo, encontrou que a curva de recessão tende a forma de "S". A forma aplainada da curva no final do sulco quando a vazão é cortada, é devido à maior velocidade de infiltração no

final do sulco que ao início deste. Chen também citado por Linderman (1968), expressa a velocidade de recessão mediante um método de integração numérica similar ao método desenvolvido por Hall para velocidade de avanço. Entretanto, o método de Chen não se ajusta aos resultados de campo.

### c. Curva de infiltração

Hillel (1971), define infiltração como a água que passa através da superfície e penetra no perfil do solo, e velocidade de infiltração como a lâmina d'água que o perfil absorve através de sua superfície por unidade de tempo, quando esta é mantida em contato com a água à pressão atmosférica.

A infiltração do solo e sua variação com o tempo, depende do conteúdo inicial de umidade e sucção, assim como da textura, estrutura e perfil do solo (Hillel, 1971).

Nos solos não saturados segundo Darcy citado por Baver (1973), o movimento da água depende das características intrínsecas do solo e do gradiente de potencial total. No movimento vertical atuam os componentes gravitacionais e matriciais do potencial total, entretanto no movimento horizontal de água predomina o potencial matricial.

O efeito da vazão, rugosidade e declividade do sulco sobre a seção de escoamento tem sido descrita pela relação seguinte, a qual foi obtida da equação de Manning (Grassi, 1972)

$$A = \frac{n \cdot Q}{R^{2/3} \cdot S^{1/2}} \quad \{6\}$$

onde, A é a seção de escoamento, n o coeficiente de rugosidade, Q a vazão da água no sulco, R o raio hidráulico e S a declividade do sulco.

Na equação {6} os valores de Q, S e n, afetam a mag

nitude de  $A$ , que conseqüentemente influi nos valores do perímetro molhado, de acordo com a fórmula  $A = ER$  onde  $P$  é o perímetro molhado.

Aumentando-se a vazão  $Q$ , para  $V$ ,  $n$  e  $S$  constantes, equação {6}, tem-se um aumento em  $A$ . Logo para que  $R$  fique constante é necessário que o perímetro molhado  $P$ , aumente proporcionalmente ao aumento de  $A$ , e conseqüentemente ter-se-á aumentado a superfície do contato da água com o sulco favorecendo o aumento da infiltração.

Collins e Campbell (1967), estudando o efeito da vazão sobre a infiltração acumulada em solo franco argilo limoso, encontraram uma relação linear. Experimentos realizados por Grassi (1972), em solos argilosos e franco argiloso com o fim de analisar o efeito do aumento da vazão no sulco sobre o aumento na infiltração acumulada, encontrou uma relação curvilínea durante o período de avanço da água no sulco, e uma relação linear durante o período após a água atingir o final do sulco. Holmen (1964), apresenta dados indicando o aumento de velocidade de infiltração em 100% quando a vazão no sulco foi aumentada de 0,38 a 0,88 litros/segundo.

Analisando a equação {6}, observa-se que a área da seção de escoamento diminui com o aumento da declividade do sulco. Fazendo análise idêntica a que foi feita no caso da vazão, observa-se que a diminuição da seção de escoamento para valor constante do raio hidráulico, implica na diminuição proporcional do perímetro molhado.

No manual de Ames citado por Grassi (1972), apresentam-se resultados de diminuição substancial da capacidade de infiltração da água em sulcos quando irrigou-se com vazão constante em declividade de 1% e logo aumentou-se para 10%. Mech (1960), aumentou a declividade do solo de 2% para 7% em suas experiências e produziu uma diminuição na infiltração acumulada

da de 32%. Por outro lado não foi encontrada influência na infiltração quando a declividade do sulco foi aumentada de 0,5% para 1,5%, nos trabalhos realizados por Collins e Campbell (1967).

Pela equação (6), nota-se que o efeito do aumento da rugosidade do sulco, produz também aumento na área da seção de escoamento e conseqüentemente aumento no perímetro molhado. Grassi et al. (1965), encontraram para sulcos recém-preparados uma seção de escoamento de 63,6 cm<sup>2</sup> e de 41,7 cm<sup>2</sup> em sulcos já irrigados (assentados), quando utilizou vazão de 0,8 l/s em declividade de 1%.

A infiltração da água através do solo segundo Fernandez et al. (1971) varia com: o conteúdo inicial de umidade do perfil do solo e a variação do mesmo com a profundidade; com a profundidade do perfil permeável; com as condições físico-mecânicas do solo (textura-estrutura-compactação); com o gradiente de potencial matricial, (em solos não saturados), o qual é função da variação de umidade e da variação da textura; e com a temperatura, que influi sobre a viscosidade da água, da qual depende também o processo.

Fernandez et al. (1971), apresenta a seguinte equação racional para movimento de água no sentido vertical:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial K}{\partial z} \quad (7)$$

onde  $\theta$  = conteúdo de umidade do solo,  $t$  = tempo,  $z$  = profundidade do solo,  $D$  = difusividade, e  $K$  = condutividade hidráulica.

A equação (7), representa a equação geral de fluxo de água no solo na direção vertical, sendo uma equação diferencial parcial. (Klute, 1952; Philip, 1956 e 1957; Whisler e Watson, 1969). Os resultados dependem das condições iniciais

e limitantes do fenômeno estudado.

Philip (1957) derivou a seguinte equação de infiltração:

$$I = 1/2 S t^{-1/2} + \lambda \quad (8)$$

onde I é a velocidade de infiltração, S conhecido como sortividade, é o coeficiente que depende das forças capilares e é uma propriedade do meio poroso (solo), t é o tempo de infiltração e  $\lambda$  é um coeficiente que depende das forças de gravidade e capilaridade.

Kostiakov em 1932, citado por Fernandez et al. (1971) apresentou outra equação empírica visando resolver o problema de infiltração. Esta equação é usada pela maioria dos pesquisadores para determinar a velocidade de infiltração. Tem a seguinte forma:

$$I = K T^{-n} \quad (9)$$

onde I é a velocidade de infiltração, n é uma constante determinada experimentalmente, K é a velocidade de infiltração quando  $T = 1$  (uma constante) e T é o tempo transcorrido.

Estudos detalhados realizados por Philip (1956), têm demonstrado que para fins de projeto, a equação de Kostiakov é razoavelmente exata para o período de tempo da maioria das irrigações. Embora, para irrigações demoradas, a velocidade de infiltração se aproxima de um valor constante, conhecido como velocidade de infiltração básica. Para esta condição, Christiansen citado por Fok e Bishop (1965) sugere o uso da seguinte equação,  $I = K' + KT^{-n}$ , onde K' é a velocidade de infiltração quando T cresce infinitamente.

### C. Eficiência de aplicação de água

Segundo Grassi (1972), a eficiência de aplicação de

água é a relação entre a lâmina líquida infiltrada e armazenada ( $d$ ) na profundidade de solo atingida pelo sistema radicular das plantas e a lâmina bruta ( $D$ ) aplicada na parcela. A necessidade de se colocar uma lâmina bruta ( $D$ ) superior a lâmina líquida ( $d$ ) que se deseja aplicar, é devido as perdas por evaporação, percolação e escoamento superficial (Daker, 1970).

A eficiência máxima de aplicação de água é uma limitação inerente aos sistemas de irrigação, de uma vez que as perdas de água são determinadas pelo sistema. Segundo Grassi (1968), as perdas por evaporação são predominantes no sistema de irrigação por aspersão e as perdas por percolação e escoamento superficial são predominantes nos sistemas de irrigação superficiais.

#### 1. Perdas por percolação

Bishop (1962), desenvolveu a seguinte equação para determinar as perdas por percolação em sulcos.

$$P_P = \frac{(R + 1)^m - R^m}{(R + 1)^m + R^m} \cdot 100 \quad (10)$$

onde  $P_P$  é a percentagem das perdas por percolação abaixo da zona radicular (profundidade efetiva),  $R$  é a relação entre  $T$  e  $t_x$ , onde  $R = \frac{T}{t_x}$ ,  $T$  é o tempo para aplicar a lâmina líquida  $d$ ,  $t_x$  é o tempo necessário para a água atingir o final do sulco (tempo de avanço), e  $m$  é o expoente de  $T$  na equação de infiltração acumulada.

Criddle et al., (1956), analisando as perdas por percolação em sulcos, encontraram que o tempo de avanço  $t_x$  é igual a  $T/4$  para um comprimento de sulco  $X$ , onde  $T$  é o tempo necessário para aplicar a lâmina de água no final do sulco. Usando  $R = 4$ , eles encontraram que as perdas de água por percolação foram iguais a 5,3% em solos de textura média.

Embora o método descrito por Criddle et al., (1956), despreze a contribuição da recessão, Grassi (1972), encontrou que esta representa 33% a 44% do volume infiltrado durante o período de avanço.

## 2. Perdas por escoamento superficial

As perdas por escoamento superficial, podem ser estimadas pela relação desenvolvida por Willardson e Bishop (1967).

$$P_{es} = \left( \frac{t_x}{T + t_x} \right) \left( \frac{Q_s}{Q_e} \right) \cdot 100 \quad \{11\}$$

onde  $P_{es}$  é a perda por escoamento superficial,  $T$  é o tempo de aplicação da lâmina líquida,  $t_x$  é o tempo de avanço,  $Q_s$  é a vazão de saída e  $Q_e$  é a vazão de entrada.

Segundo Grassi (1972) as perdas por escoamento superficial podem ser minimizadas através da redução da vazão de entrada após a água ter atingido o comprimento do sulco.

Keller (1965), analisando graficamente a eficiência de aplicação de água com diferentes métodos e diferentes lâminas de irrigação, verificou menores eficiências a medida que diminuem as lâminas. No que diz respeito ao método, a eficiência foi significativamente menor, atingindo valores inferiores a 20%, quando se aplicou lâminas menores de 40 mm em sulcos, e superiores a 30% de eficiência no caso de aspersão e melgas.

Valores de eficiência de aplicação de água tabulados por Keller e McCulloch (1962), em função dos sistemas de irrigação, textura e grau de nivelção do terreno, apresentam menores eficiências quando a irrigação é feita por sulcos em solo de textura grossa, atingindo valores entre 40% e 50% quando a nivelção é boa, e valores de 20% a 30% quando a nivelção é inadequada.

Nas outras modalidades de irrigação por sulco que constam na classificação de López (1973), não tem-se encontrado nenhum estudo sobre eficiência de aplicação.

Segundo Grassi (1972), nos sulcos sem saída de água as perdas de água por escoamento superficial no final do sulco são eliminadas e pode-se reduzir ao mínimo as perdas por percolação e conseguir a máxima uniformidade no perfil de umedecimento ao longo de todo comprimento do sulco e na espessura da lâmina de irrigação.

O método se emprega no caso de declividades nulas ou muito reduzidas, armazenando-se um volume de água ao longo ou no final do sulco, suficiente para garantir a aplicação uniforme da água (Grassi, 1972).

A uniformidade de distribuição pode ser afetada pelas diferenças micro-topográficas, entretanto esta situação pode ser contornada apenas com a regularização da superfície (López, 1973).

Daker (1970), fez uma análise gráfica do perfil de umidade em sulcos irrigados, relacionando vazão, velocidade de infiltração, comprimento do sulco, sulco fechado e sulco com saída de água e encontrou melhor uniformidade de distribuição em sulcos fechados com adequado comprimento.

## CAPÍTULO III

## MATERIAL E MÉTODOS

A. Localização dos testes

Um estudo sobre o efeito do conteúdo de água do solo sobre os parâmetros da equação de infiltração e uma comparação estatística entre dois métodos de irrigação, (sulcos abertos e sulcos fechados), foram realizados em 1975, na Estação Experimental do Projeto de Irrigação de Bebedouro localizado em Petrolina, Estado de Pernambuco.

Segundo Hargreaves (1974), o clima da região é muito árido. A temperatura média varia de 23° a 28°C, sendo os meses mais frios junho e julho e os mais quentes outubro e novembro. A precipitação média anual com base em 56 anos de dados é 400 mm (Hargreaves, 1973) e a umidade relativa média 67,8% (FAO/PNUD, 1971).

De acordo com estudos realizados pela FAO/PNUD (1971) os solos usados são da Série Lotossólica, unidade 37 AP. São solos com mais de 1,5 metros de profundidade, camada superficial de areia, com transição gradual para sub-solo arenoso e argilo-arenoso. Uma descrição detalhada dos solos da área utilizada encontra-se na publicação da FAO (1971).

B. Características físico-hídricas do solo estudado

A textura do perfil do solo em incrementos de 15 cm, até os 90 cm de profundidade, é apresentado na Tabela 1

do Apêndice I. A análise físico-mecânica do solo foi feita através do método da pipeta (Day, 1957).

A determinação da densidade aparente das mesmas camadas do solo foi feita utilizando cilindros metálicos de 7,8 cm de diâmetro por 10 cm de altura.

A capacidade de campo foi determinada in situ. O método utilizado consistiu em saturar o solo em condições naturais até uma dada profundidade e deixar este coberto com um material plástico. O teor de umidade do solo, foi determinado mediante o método gravimétrico. Quando a percentagem de umidade das amostras coletadas intermitentemente, se manteve constante durante 2 ou 3 determinações consecutivas, esta teoricamente foi a quantidade de água retida a "capacidade de campo". O ponto de murcha permanente foi determinado colocando o solo num prato poroso e submetendo-o a uma pressão positiva de 15 atmosferas numa panela de pressão.

As curvas características de umidade para cada profundidade do solo, foram obtidas a partir de amostras inicialmente saturadas, as quais foram submetidas a diferentes pressões positivas. (Ver Tabela 3, Apêndice I).

### C. Parâmetros de irrigação

#### 1. Características dos sulcos

Antes de sulcar, o solo foi arado e gradeado com um trator Massey-Ferguson, modelo MF-50X. Os sulcos recém-preparados apresentaram forma triangular com dimensões médias de 18 cm de altura e 57 cm de largura provenientes de 10 leituras ao acaso.

O espaçamento entre sulcos foi fixado em 0,8 m segundo estudos realizados pela FAO/PNUD, (1971), e o comprimento foi limitado pelo tamanho das parcelas do Projeto de Irrigação de Sebedouro.

As declividades dos sulcos foram determinadas com três repetições em cada tratamento fazendo-se leituras ao longo do sulco a intervalos de 20 m. O ponto 0 (zero) foi localizado a 5 m de distância do canal parcelar para evitar a influência do aterro do canal na declividade da parcela.

Inicialmente a declividade natural das parcelas era 0,37%. As outras duas declividades (0,15 e 0,24), foram obtidas traçando-se os sulcos em direção diagonal (Ver Figura 2).

## 2. Vazões de entrada

A aplicação de água nos sulcos foi feita desde um canal parcelar, através de sifões de plástico. Trabalhou-se com duas classes de sifões: um sifão menor de 2,5 cm de diâmetro e 1,2 m de comprimento, e um sifão maior medindo 3,0 cm de diâmetro e 1,4 m de comprimento.

As descargas dos sifões foram calibradas volumetricamente, sifonando-se a diferentes cargas hidráulicas de 5, 10, 15, 20 e 25 cm e cronometrando-se o tempo necessário para encher um reservatório com capacidade de 10,35 litros.

A vazão máxima não erosiva a aplicar foi selecionada arbitrariamente de acordo com o método experimental descrito pelo U.S.D.A. Soil Conservation Service (1947). Tomou-se valores em torno do valor calculado pela equação empírica,  $Q_{max} = 0,63/S$  sugerida por Criddle et al., (1956), onde  $Q_{max}$  é a vazão máxima não erosiva em litros/segundo e S é declividade do sulco em porcentagem.

Na aplicação das lâminas, iniciava-se a irrigação com a vazão máxima não erosiva, que logo após atingir o final do sulco era reduzida para um valor dado em função do comprimento do sulco, lâmina líquida, espaçamento do sulco e tempo necessário para aplicar a lâmina, de acordo com a seguinte e-

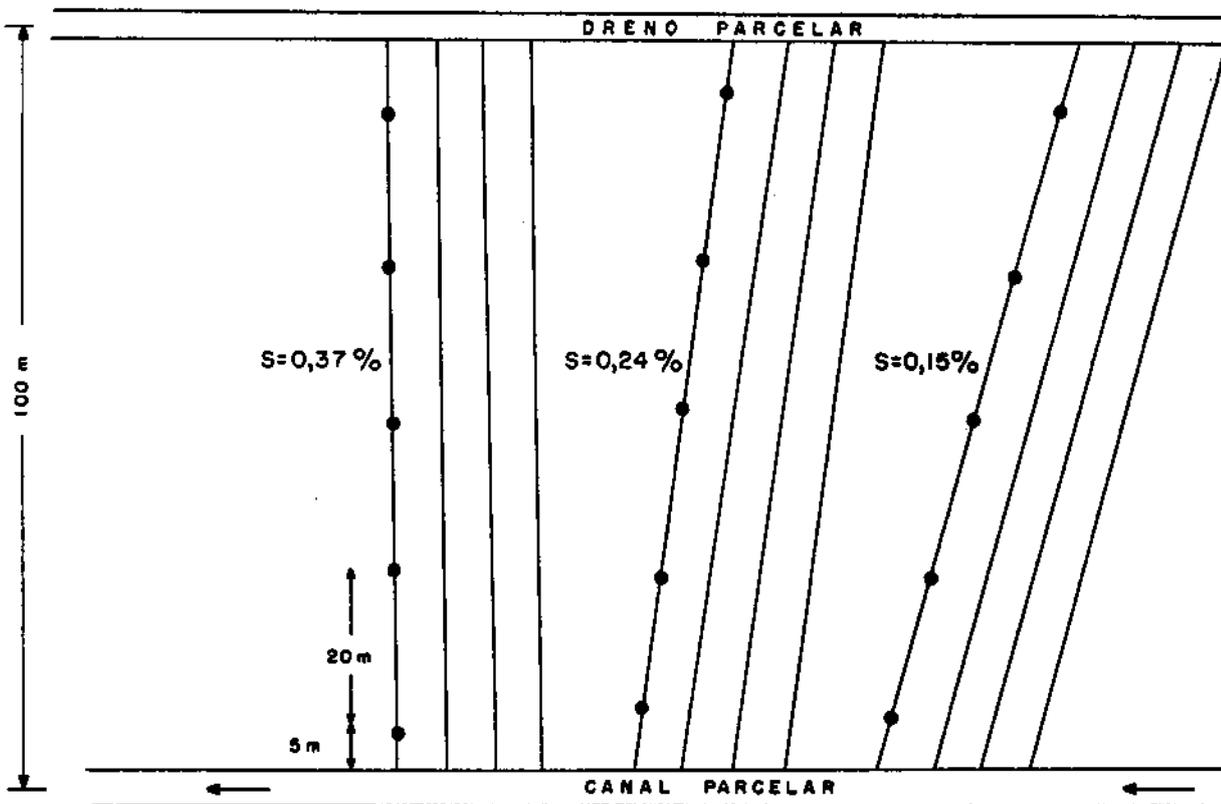


Figura 2. Esquema da distribuição dos sulcos de diferentes declividades na parcela experimental.

quação: 
$$q = \frac{D \cdot x \cdot w}{T_r} \cdot 16,67 \quad (12)$$

onde  $q$  é a vazão reduzida (litros/segundo),  $D$  a lâmina líquida (metros),  $x$  o comprimento do sulco (metro),  $w$  o espaçamento entre sulcos e  $T_r$  o tempo necessário para aplicar a lâmina (minutos).

### 3. Curva de avanço e de recessão

A curva de avanço foi determinada com o uso da vazão máxima não erosiva em sulcos previamente irrigados, de acordo com o método usado por Criddle et al. (1956). Estacas foram colocadas a intervalos de 20 metros ao longo do sulco para servir de referência e foi cronometrado o tempo necessário pela frente de água para atingir cada estaca. Os pontos obtidos experimentalmente foram plotados em papel log-log colocando-se os valores de comprimento nas abcissas e o tempo nas ordenadas. Os parâmetros da equação da reta foram determinados usando-se o método dos mínimos quadrados segundo Grassi et al. (1965). Adotou-se a equação de avanço apresentada por Criddle et al. (1956).

$$x = p \cdot T_x^s$$

onde  $x$  é o comprimento do sulco atingido (percorrido) pelo avanço da água no tempo  $T_x$  (metros), " $p$ " e " $s$ " são constantes determinadas experimentalmente e  $T_x$  é o tempo de avanço (minutos).

A recessão foi considerada insignificante segundo método adotado por Criddle et al. (1956).

### 4. Curva de infiltração

Na determinação da curva de infiltração usou-se o método do sulco infiltrômetro, desenvolvido por Boundurant (1957) e citado por Grijalva (1969) e recomendado por Queiroz, Millar e

Boers (1975). Foi empregada a equação empírica de infiltração acumulada apresentada por Kostiaikov (1932) e citada por Fernandez et al. (1971).

$$D = CT^m \quad (13)$$

onde D é a infiltração acumulada (centímetros), m é uma constante determinada experimentalmente, C é a infiltração acumulada quando T = 1, (uma constante), e T é o tempo transcorrido em minutos.

Derivando-se a equação {13} em função do tempo, obteve-se a equação velocidade de infiltração:

$$I = K T^{-n}$$

onde I é a velocidade de infiltração (centímetros/hora), K = 60 cm, n = m-1 e T = tempo (minutos).

Os dados colhidos no campo em solo recém-preparado e com 4 repetições, foram plotados em papel log-log colocando-se o tempo nas abcissas e a infiltração acumulada nas ordenadas. Os parâmetros da equação da reta foram determinados estatisticamente também através do método dos mínimos quadrados segundo Grassi et al. (1965).

Com o objetivo de estudar o efeito do conteúdo de água da camada superficial do solo (0-15 cm), sobre os parâmetros da equação de velocidade de infiltração, testes de infiltração foram feitos a diferentes níveis de umidade.

Os testes de velocidade de avanço e infiltração, como também o efeito da umidade da camada superficial do solo, (0-15 cm), sobre os parâmetros "K" e "n" da equação {9} de velocidade de infiltração, foram analisados estatisticamente. Usou-se o método dos mínimos quadrados, segundo critério adotado por Grassi et al. (1965). O grau de relação entre as variáveis independente e dependente foi medido através do coefici

ente de determinação, ( $R^2$ ), segundo Tejeda e Pernier (1974) e calculado pela equação [14].

$$R^2 = \frac{(\sum x.y - \frac{\sum x \cdot \sum y}{N})^2}{\left[ \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{N} \right] \left[ \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{N} \right]} \quad [14]$$

onde  $R^2$  é o coeficiente de determinação, x a variável independente, y a variável dependente e N o número de observações.

#### D. Comparação entre métodos de irrigação

Com a finalidade de comparar o método de irrigação por sulcos fechados com o método de irrigação com sulcos abertos, em diferentes declividades e diferentes lâminas de água, foi instalado um experimento em Split Plot inteiramente ao acaso. Analisou-se o déficit de água após irrigação em sulcos abertos comparado a irrigação em sulcos fechados ao invés de tomar sulcos fechados e sulcos abertos como tratamentos. Com este mecanismo evitou-se um Split Plot com parcelas sub-subdivididas e foram atingidos os mesmos objetivos almejados pelo trabalho.

Os tratamentos foram as declividades dos sulcos 0,15; 0,24 e 0,37% com uma repetição e os subtratamentos as lâminas 3,0; 5,5 e 8,0 cm com duas repetições.

O déficit de água (d), no perfil do solo observado após aplicação das diferentes lâminas de água, mediante o uso de sulcos fechados e sulcos abertos, foi determinado usando ao longo de todo o sulco a seguinte fórmula:

$$d = \theta_f - \theta_a \quad [15]$$

onde  $\theta_f$  é o conteúdo de água no perfil do solo obtido quando se usam sulcos fechados e  $\theta_a$  é o conteúdo de água no perfil do so

lo quando se usam sulcos abertos.

Os perfis de umidade ao longo dos sulcos foram determinados pelo método gravimétrico, colhendo-se amostras de 20 em 20 cm de distância e de 15 em 15 cm de profundidade até os 90 cm. O conteúdo de água em cm no perfil do solo foi plotado em papel milimetrado e as lâminas médias infiltradas calculadas pela fórmula  $D = A/x$ . Onde:  $A$  é a área compreendida pelo perfil de umidade, calculada através do planímetro e  $x$  o comprimento do sulco.

O modelo matemático do Split Plot usado para comparar os métodos de irrigação é dado pela seguinte expressão:

$$Y_{ij} = \bar{x} + T_i + e_i + t_j + (Tt)_{ij} + e'_{ij} \quad \{16\}$$

onde  $Y_{ij}$  representa a observação do  $j$ -ésimo subtratamento dentro do  $i$ -ésimo tratamento,  $\bar{x}$  é média geral do experimento (subtratamento),  $T_i$  é o efeito do  $i$ -ésimo tratamento,  $e_i$  é o efeito do acaso sobre o  $i$ -ésimo tratamento,  $t_j$  é o efeito do  $j$ -ésimo subtratamento,  $(Tt)_{ij}$  é o efeito da interação do  $i$ -ésimo tratamento com o  $j$ -ésimo subtratamento e  $e'_{ij}$  é o efeito do acaso sobre o  $j$ -ésimo subtratamento dentro do  $i$ -ésimo tratamento, (Steel e Torrie, 1960).

## CAPÍTULO IV

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A. Propriedades físico-hídricas do solo

Distribuição do tamanho das partículas e a classificação textural de propriedades estudadas apresentam-se na Tabela 1, do Apêndice I.

Os valores de densidade aparente do solo apresentados na Tabela 2, para camadas classificadas como areia e arenosa, estão de acordo com os padrões apresentados por Israelson e Hansen (1965), para as mesmas classes texturais. Enquanto para camada de sub-solo, argilo-arenoso os valores de densidade aparente foram superiores àqueles apresentados pelos referidos autores. Os altos valores de densidade aparente da camada do sub-solo é provavelmente resultante do grau de compactação desta camada, devido ao peso das camadas subjacentes, aradura e gradagem com máquinas pesadas, pobreza de matéria orgânica e pouca penetração das raízes.

As curvas de retenção de umidade das diferentes camadas de solo apresentam-se nas Figuras 3 e 4. Utilizou-se papel mono-log na representação das curvas, resultando numa maior facilidade na conversão de informação devido à linearização das curvas. Os dados básicos de potencial matricial e conteúdo de água são apresentados na Tabela 3 do Apêndice I.

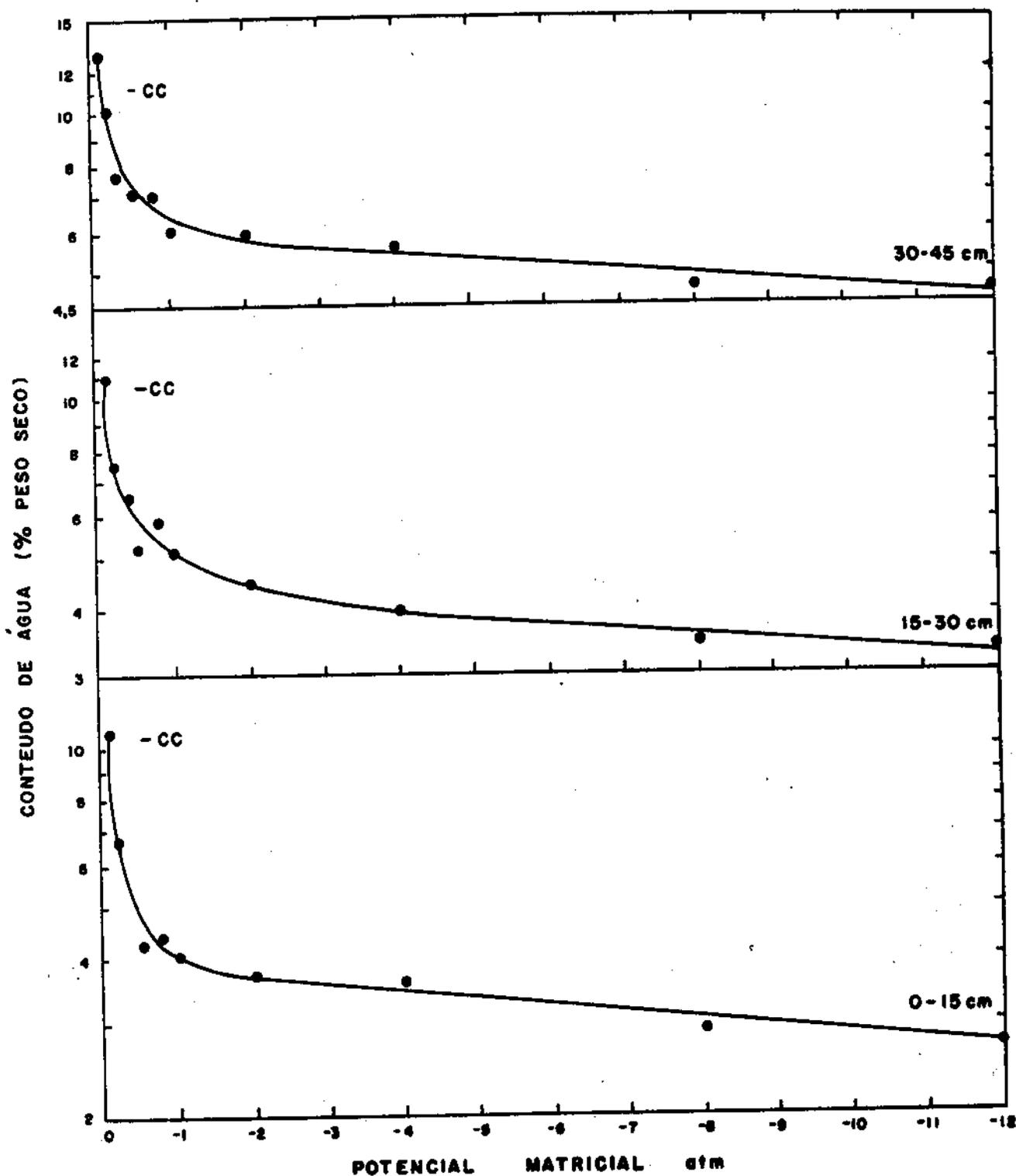


Figura 3. Curvas de retenção de umidade para diferentes profundidades.

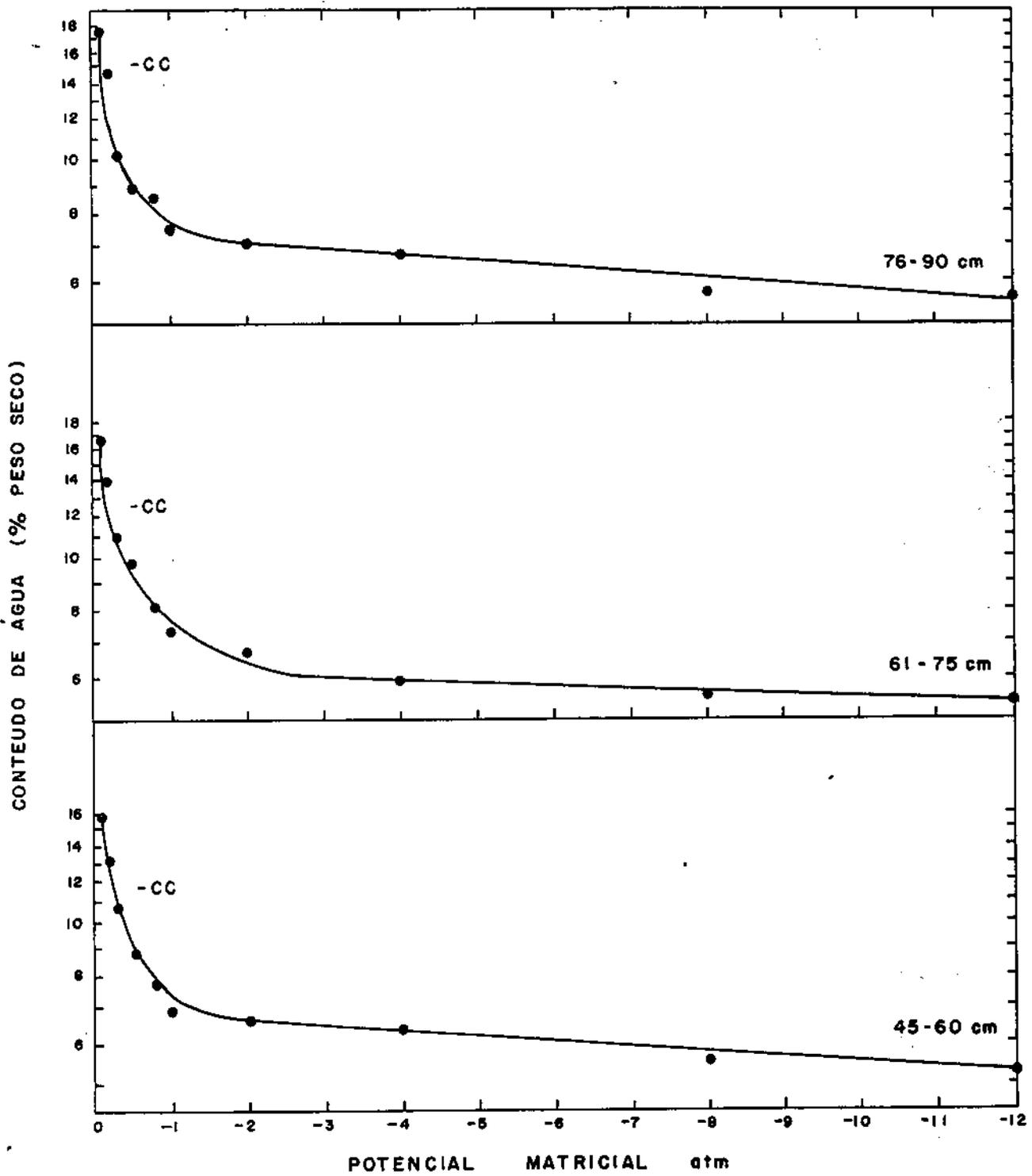


Figura 4. Curvas de retenção de umidade para diferentes profundidades.

Analisando os dados da Tabela 3 do Apêndice I observa-se que o teor de umidade retido a 15 atmosferas aumenta com o teor de argila das camadas de solo. Plotando-se os valores de capacidade de campo, Tabela 2 do Apêndice I, nas curvas características de umidade, verifica-se que para os primeiros 30 cm este valor corresponde a um potencial matricial de 0,1 atm. de sucção e para as camadas de 30 a 90 cm, 0,2 atm. de sucção. Os valores de capacidade de campo com os respectivos potenciais matriciais aumentaram também com o teor de argila.

## B. Parâmetros de irrigação

### 1. Características dos sulcos

Os sulcos abertos em forma triangular apresentaram dimensões médias de 18,2 cm de altura e 56,7 cm de largura. Os valores dos coeficientes de variação para altura (11,9%) e largura (15,6%) consideram-se adequados para as condições de campo.

A declividade das parcelas (Tabela 4 do Apêndice I) apresentaram coeficientes de variação muito altos, indicando alto grau de desuniformidade das declividades ao longo dos sulcos, causadas principalmente pelo abatimento das partes que foram aterradas nos trabalhos de nivelação.

### 2. Vazão máxima não erosiva

Os resultados das aferições dos sifões, com 3 repetições estão plotados na Figura 5.

As vazões máximas não erosivas encontradas para as declividades 0,15, 0,24 e 0,37% foram de 3,1, 2,5 e 1,9 l/s, respectivamente. Comparando-se estes valores, com os respectivos valores calculados pela equação apresentada por Criddle et al. (1956), encontrou-se que para a declividade 0,15%, a

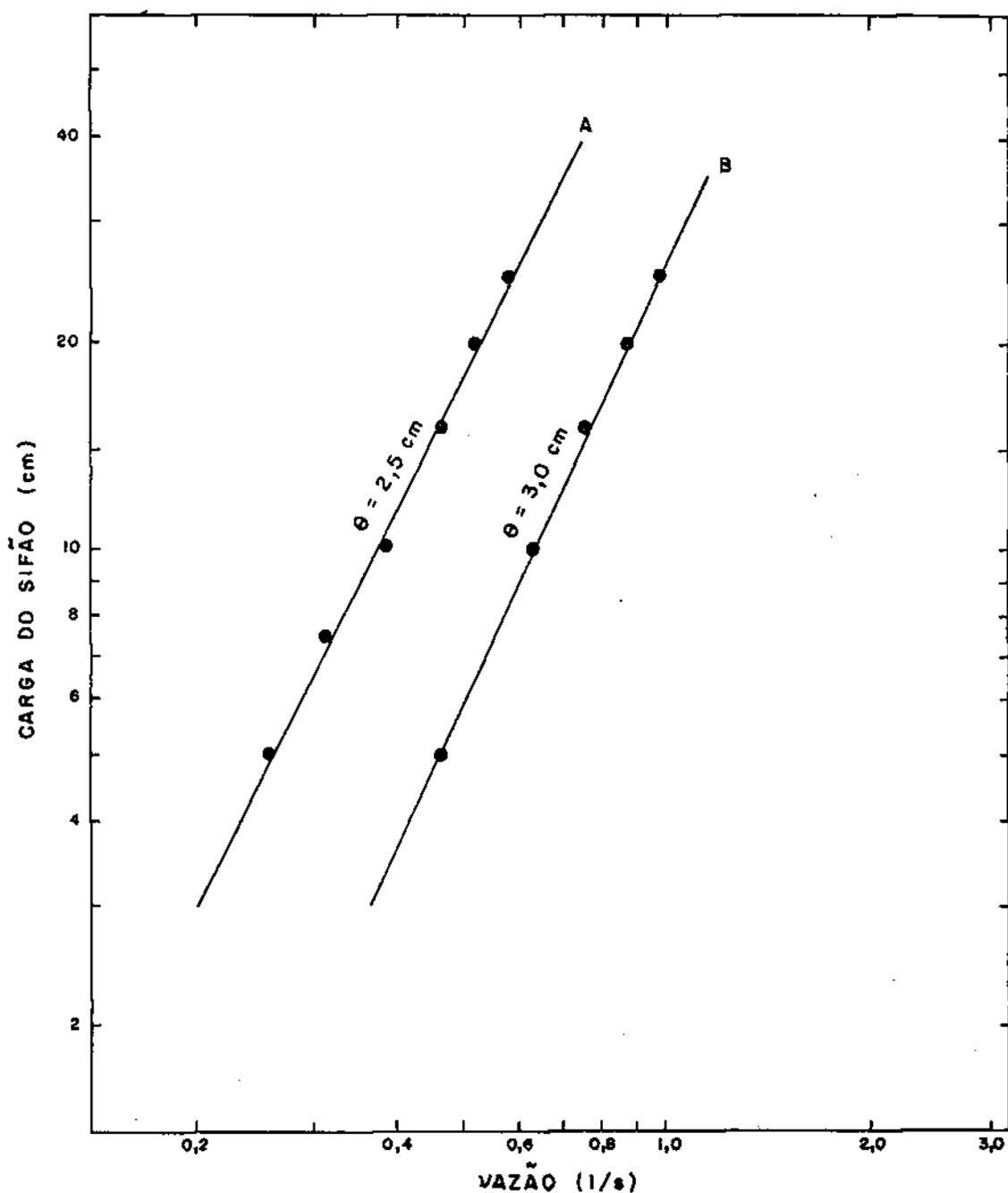


Figura 5. Vazões de sifões em l/s. Curva A representa a vazão do sifão com 2,5 cm de diâmetro e 1,2 m de comprimento. Curva B, representa a vazão do sifão com 3,0 cm de diâmetro e 1,4 m de comprimento.

fórmula superestimou o valor da vazão máxima não erosiva. Entretanto, para as declividades 0,24 e 0,37%, os valores calculados foram aproximadamente iguais aos dados experimentais. As vazões máximas não erosivas para as declividades 0,15, 0,24 e 0,37%, calculadas usando a equação de Criddle et al. (1956) foram 4,2, 2,6 e 1,7 l/s, respectivamente.

### 3. Teste de avanço

A Figura 6 mostra as curvas de avanço das vazões máximas não erosivas para cada uma das declividades. A Tabela 5 apresenta as equações de avanço para tais curvas e os coeficientes de determinação calculados estatisticamente através do método da regressão linear.

Tabela 5. Equações de avanço e coeficientes de determinação.

DECLIVIDADE (%)	VAZÃO l/s	EQUAÇÃO DE AVANÇO $x = pT^s$	COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO ( $R^2$ )
0,15	3,1	$19,6 T^{0,76}$	0,998
0,24	2,6	$19,7 T^{0,62}$	0,996
0,37	1,9	$12,9 T^{0,81}$	0,995

Analisando a Figura 6 para um mesmo tempo  $T = 1$ , vemos que a velocidade de avanço  $Q_{max} = 3,1$  l/s é 1,52 vezes a velocidade de avanço 1,9 l/s. A diferença entretanto é pequena e diminui com o tempo devido à diferença entre as declividades das curvas.

Na Figura 6 verifica-se que a vazão máxima não erosiva diminui com o aumento da declividade. Nas três declividades o tempo gasto para atingir o final dos 90 m de sulco variou entre 7,5 e 9,0 minutos.

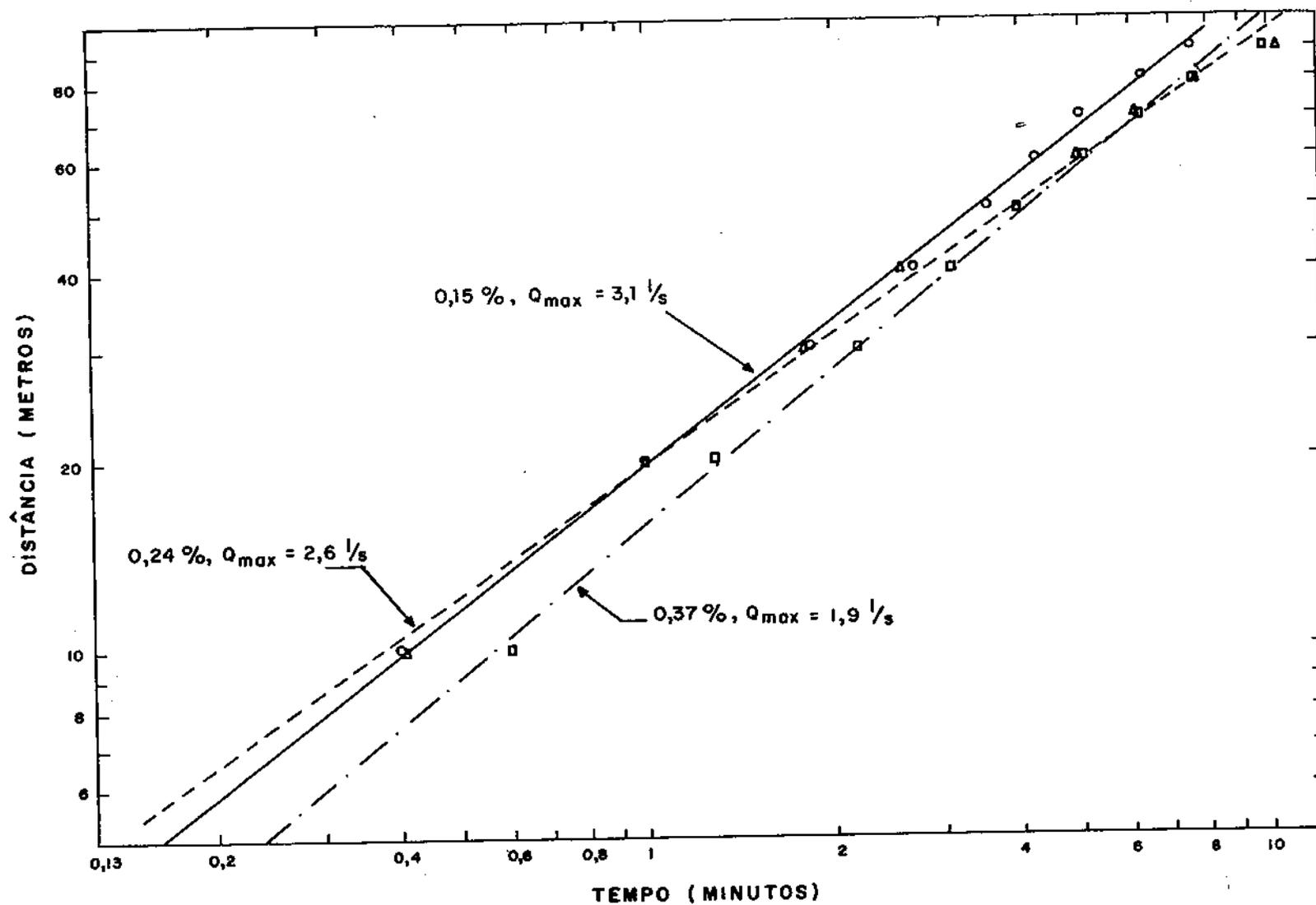


Figura 6. Curvas de avanço para declividades 0,15, 0,24 e 0,37% com uso das vazões máximas não erosivas determinadas experimentalmente.

Os altos valores de  $R^2$  (Tabela 5) indicam que mais de 99% da variação no avanço da água no sulco depende do tempo e que a equação  $x = p\sqrt{t}$  representa adequadamente o avanço, comprovando os estudos realizados por Grijalva (1969).

### C. Testes de infiltração

Quinze testes de infiltração feitos mediante o método do sulco-infiltrômetro, em solos com diferentes conteúdos de água foram conduzidos com o objetivo de estudar o efeito do conteúdo de água do solo sobre os parâmetros da equação de infiltração. Os resultados dos testes foram plotados e os parâmetros da curva de infiltração acumulada obtidos, são mostrados na Tabela 6. Com os parâmetros "c" e "m" da equação de infiltração acumulada, foram determinados os parâmetros "K" e "n" da equação da velocidade de infiltração.

Análise da Tabela 6 indica que em geral o valor de K diminui com o aumento do conteúdo de água no solo. Como K é a velocidade de infiltração quando o tempo é igual a 1, os dados estão indicando que a velocidade de infiltração de água no solo diminui a medida que as condições de umidade inicial do solo aumentam. Estes resultados estão de acordo com outros estudos de infiltração realizados, que indicam tal decréscimo da velocidade de infiltração como uma inevitável consequência da redução do gradiente de potencial matricial (Paver, 1940).

Tabela 6. Parâmetros das equações de infiltração acumulada e velocidade de infiltração para solos com diferentes conteúdos de água na camada superficial.

TESTE	CONTEÚDO DE ÁGUA NO SO- LO (%)	c	m	K	n
1	6,33	0,339	0,609	12,39	-0,39
2	6,84	0,414	0,484	12,03	-0,52
3	7,04	0,245	0,579	8,50	-0,42
4	7,79	0,418	0,488	12,24	-0,51
5	8,74	0,177	0,588	6,25	-0,41
6	9,07	0,095	0,710	4,05	-0,29
7	9,36	0,124	0,726	5,40	-0,27
8	9,91	0,087	0,673	3,50	-0,33
9	10,79	0,160	0,539	5,15	-0,46
10	10,91	0,172	0,596	6,17	-0,40
11	13,16	0,224	0,441	5,92	-0,56
12	13,16	0,194	0,496	5,77	-0,50
13	13,74	0,084	0,618	3,12	-0,38
14	15,04	0,115	0,590	4,07	-0,41
15	17,43	0,086	0,590	3,05	-0,41

$$D = cT^m$$

$$I = KT^{-m}$$

$$\bar{x} = -0,41$$

Com o objetivo de determinar o efeito do conteúdo de água do solo sobre os valores de velocidade de infiltração para  $T = 1$ , foram plotados os dados da Tabela 6 em papel log-log. Colocou-se nas abcissas os valores de conteúdo volumétrico de umidade e nas ordenadas os valores de  $K$  (ver Figura 7). Analisando os dados por correlação logarítmica, foi encontrada a seguinte equação:

$$K = 910^{-1,18} \quad (17)$$

onde  $K$  é o parâmetro da equação (9) e  $\theta$  a percentagem de umidade volumétrica.

A análise estatística da equação apresentou um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,61, significando que 61 por cento da variação de  $K$  é explicada pela variação da umidade dos primeiros 15 cm de solo.

Com o objetivo de determinar o efeito do conteúdo de água do solo sobre o valor de  $n$ , que é a declividade da curva de velocidade de infiltração, foram plotados os valores da Tabela 6, em papel log-log. Colocou-se nas abcissas os valores de conteúdo volumétrico de água no solo e nas ordenadas os valores de  $n$  (ver Figura 8). Analisando os dados por correlação logarítmica chegou-se a seguinte equação:

$$n = 3,710^{0,42} \quad (18)$$

onde  $n$  é o parâmetro da equação (9) e  $\theta$  a percentagem de umidade volumétrica do solo.

A análise estatística da equação (18) apresentou um coeficiente de determinação igual a 0,004, significando que a variação do teor de umidade do solo, explica apenas 0,4% da variação de " $n$ ", ou seja, o teor de umidade dentro dos limites nos quais se realizaram os testes, não exerce nenhuma influência sobre os valores de " $n$ ".

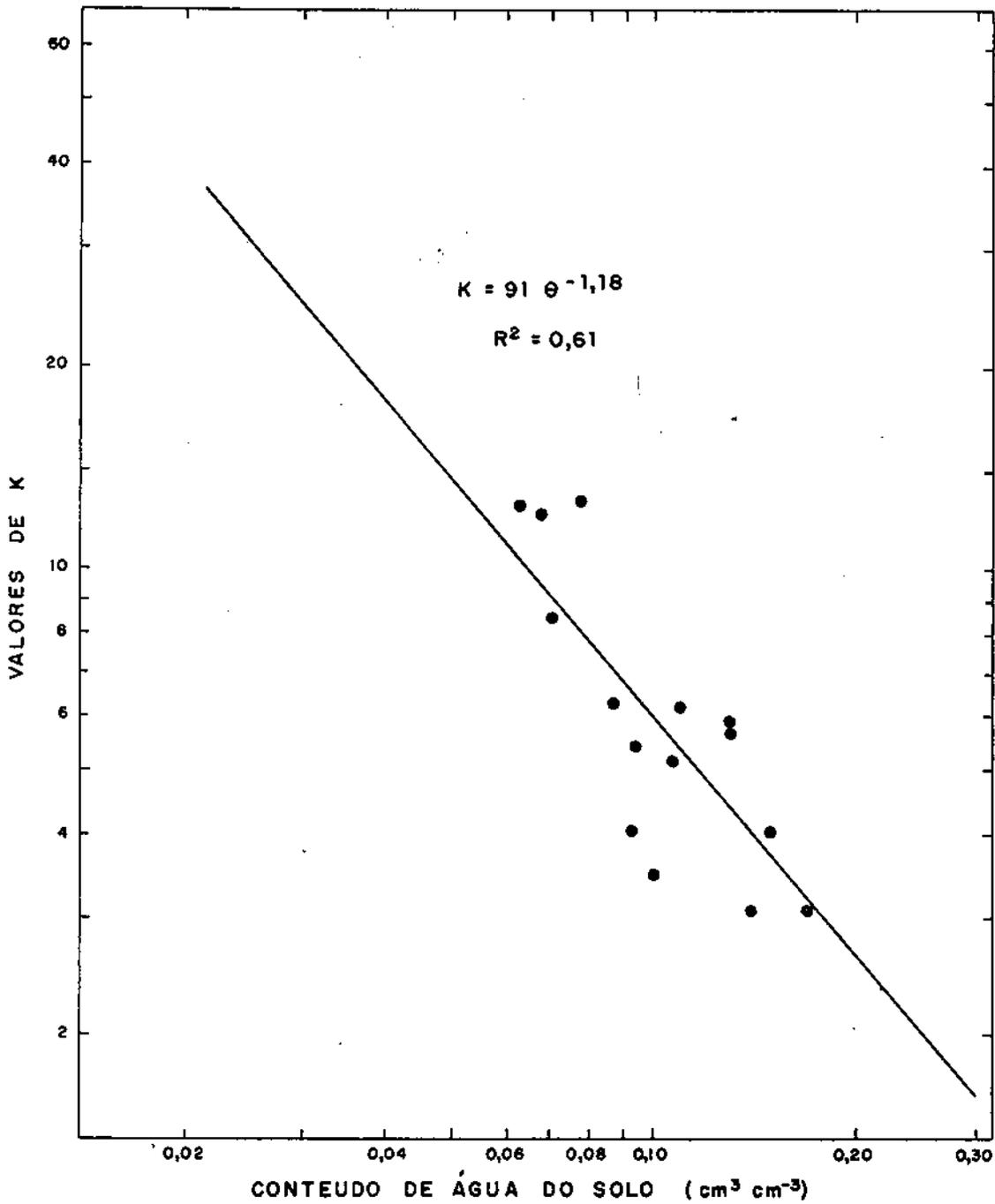


Figura 7. Efeito do teor de umidade do solo da camada superficial de 0-15 cm sobre o parâmetro K da equação de velocidade de infiltração.

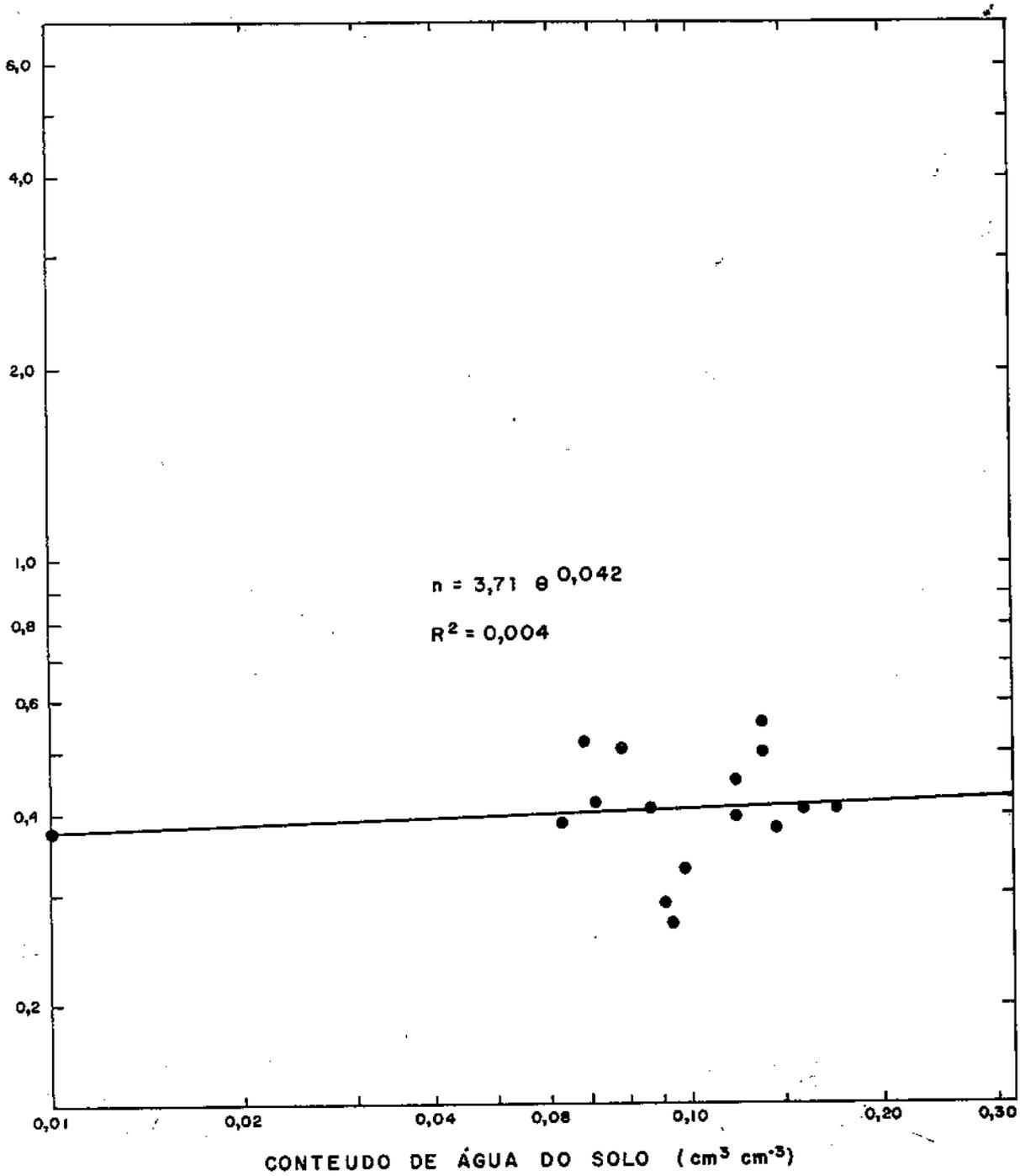


Figura 8. Efeito do teor de umidade do solo da camada superficial de 0-15 cm de profundidade sobre o parâmetro  $n$  da equação de velocidade de infiltração.

Com base na equação {17} e calculando-se o valor de "n", pode-se traçar uma família de curvas de velocidades de infiltração para diferentes conteúdos de água da camada superficial do solo (Figura 9). Analisando-se a Figura 9 encontra-se que para o tempo de infiltração igual a unidade a velocidade de infiltração diminui quando aumenta a quantidade de água no solo. Do ponto de vista de irrigação quanto maior o conteúdo de água disponível no momento de aplicação, menor será a velocidade de infiltração e conseqüentemente maior o tempo de irrigação. Análises da mesma figura permite encontrar que para solos em ponto de murcha permanente não se verificaria escoamento superficial para chuvas de intensidade inferior a 50 mm/hr, durante os vinte primeiros minutos. Haveria escoamento superficial para chuvas de 60 mm/hr 14 minutos após o início da chuva. Para solos com 50% de água disponível, precipitações de 20 e 40 mm/hr, produziriam escoamento superficial aos 14 e 2,5 minutos, respectivamente. Com um solo na capacidade de campo, uma precipitação de 20 mm/hr provocaria escoamento superficial após 3,5 minutos do início da chuva. Para uma precipitação de 60 mm/hr, 20 minutos após o início da chuva, a água não infiltrada seria de 8, 43 e 50 mm/hr, quando o solo estivesse em ponto de murcha permanente, com 50% de água disponível e em capacidade de campo, respectivamente.

A metodologia possibilita quantificar em função do teor de água de solo e da intensidade da precipitação, a água infiltrada no solo e a água que fica sobre a superfície do mesmo. A quantidade de água que infiltra é a chuva efetiva, ou seja, a água que será utilizada pela planta. Parte da água não infiltrada constituirá o escoamento superficial causando problemas de carregamento de solo e de nutrientes.

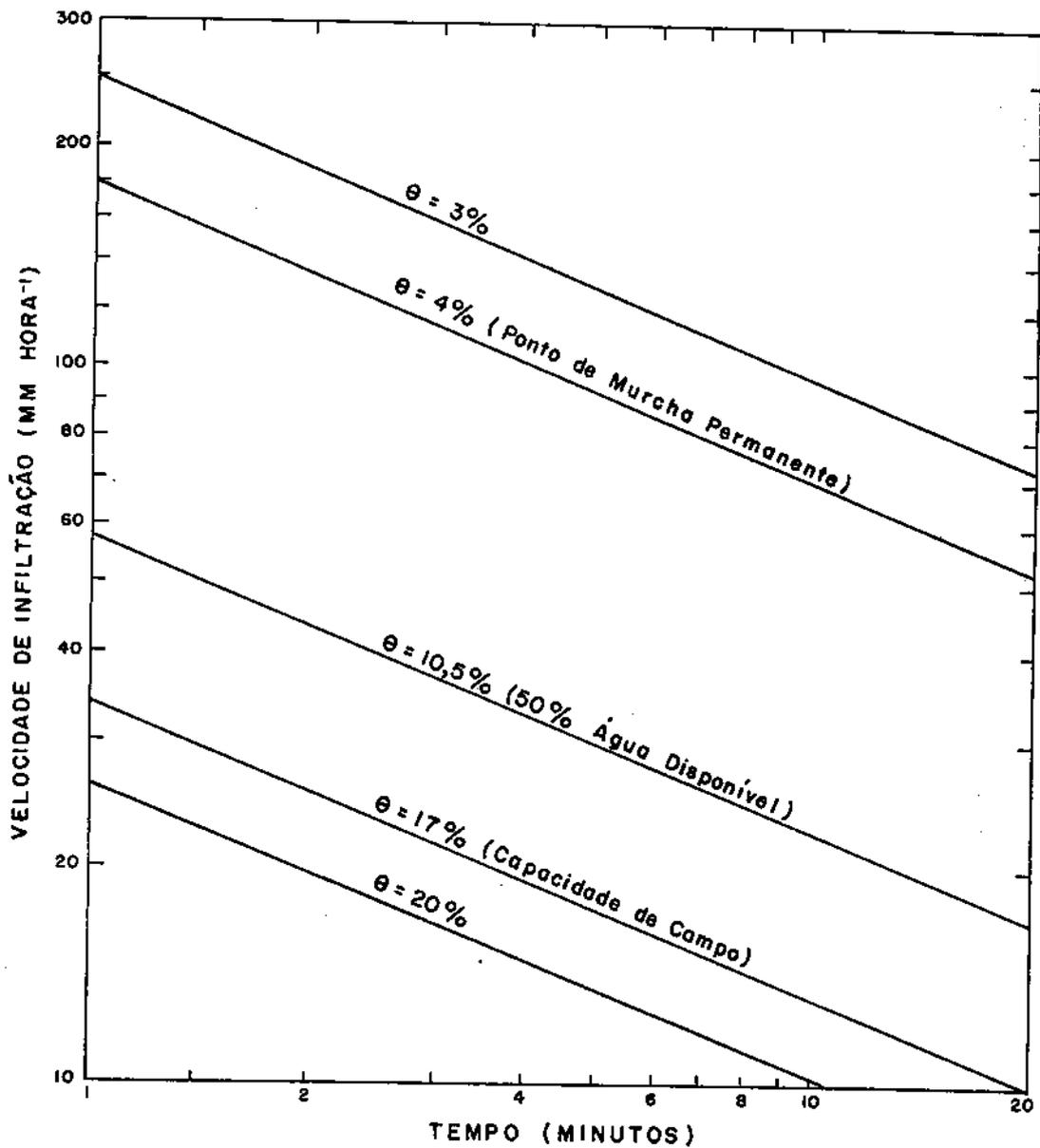


Figura 9. Curvas de velocidade de infiltração para diferentes conteúdos iniciais de água na camada superficial do solo.

Com o objetivo de comparar o efeito das condições do solo sobre o valor K da equação de velocidade de infiltração, os testes de infiltração feitos em solos já irrigados foram comparados com testes de infiltração em sulcos recém-preparados e não submetidos ainda a irrigação. Quatro testes de infiltração foram feitos em solos com conteúdos de água de 9,36% em volume. Os dados das quatro repetições foram plotados em papel log-log (Figura 10) e encontrou-se as seguintes equações de infiltração acumulada (D) e velocidade de infiltração (I).

$$D = 0,66 T^{0,55}$$

$$I = 21,78 T^{-0,45}$$

O valor de K resultante de testes de infiltração em solos recém-preparados, não irrigados, e com conteúdo de água de 9,36% em volume, foi comparado com o valor de K (Figura 7), obtidos de testes de infiltração em solos já irrigados e com o mesmo conteúdo de água. Encontrou-se um valor de K em solos recém-preparados (não irrigados) 3,3 vezes superior ao valor de K em solos já irrigados. Os valores de K em sulcos recém-preparados, (não irrigados), e em sulcos já irrigados foram de 21,78 e 6,5 cm/hr, respectivamente. A maior velocidade de infiltração para o primeiro caso pode ser devido às condições de rugosidade e as condições do horizonte superficial de solo recém-preparado. Quando o solo foi irrigado, a ação da água provocou mudanças nas condições da camada superficial em termos de acomodação das partículas e contactação.

Os valores de n determinados em sulcos recém-preparados não irrigados e em sulcos já irrigados, ambos com o mesmo conteúdo de água no solo, foram de -0,45 e -0,41, respectivamente. A pequena diferença verificada, nos permite concluir que para o teor de umidade em estudo, as condições de solo

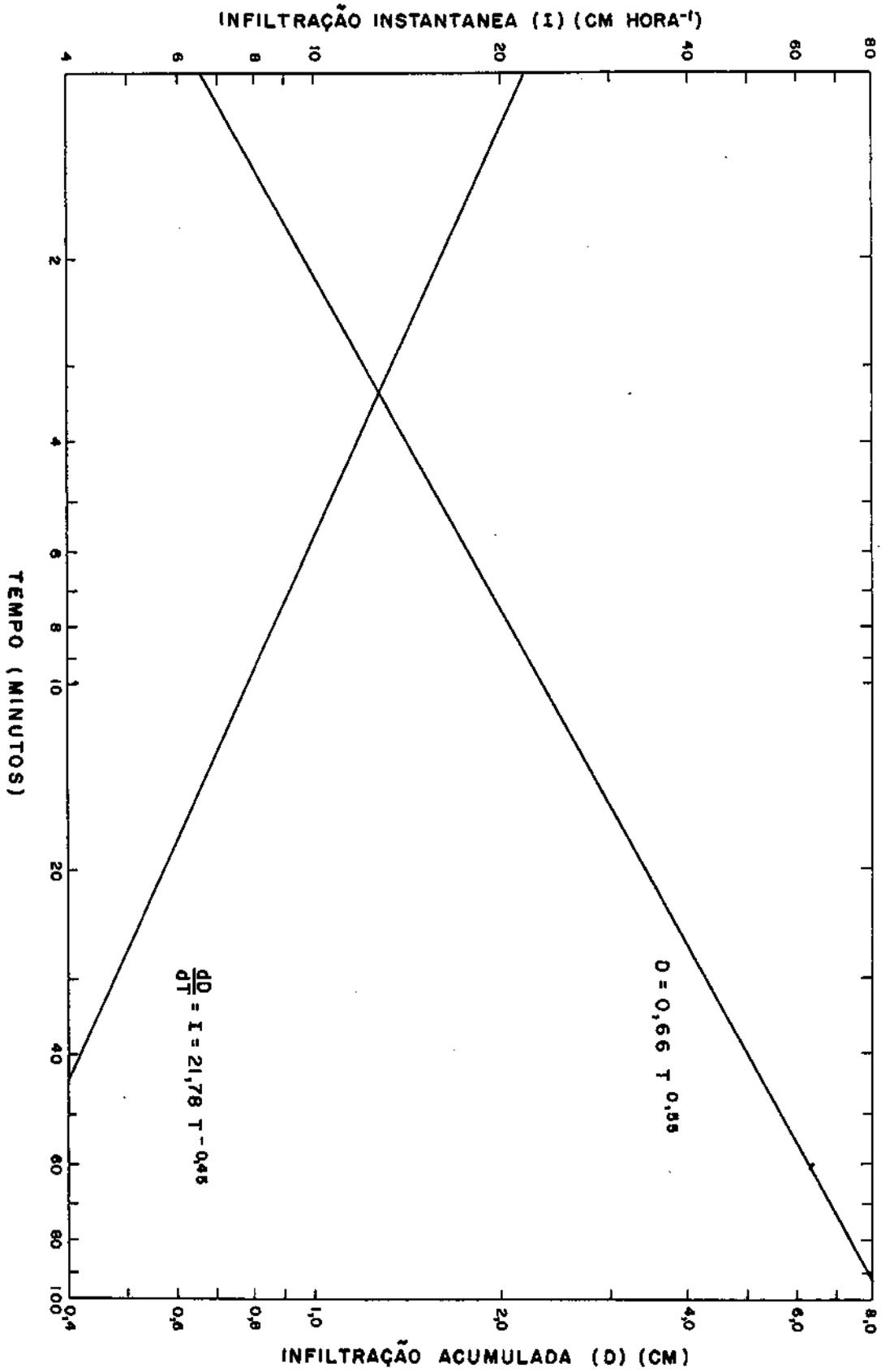


Figura 10. Curvas de infiltração acumulada e instantânea da profundidade de solo 0-15 cm (média de 4 repetições)

também não influi sobre os valores de n.

D. Comparação entre sulcos abertos e fechados

Na Tabela 7 apresentam-se os valores de déficit de água após a aplicação de lâminas de água.

Tabela 7. Déficit de água no perfil do solo.

REPETIÇÕES	TRATAMENTO DE DECLIVIDADE								
	0,15 %			0,24 %			0,37 %		
	LÂMINAS								
	3 cm	5,5 cm	8 cm	3 cm	5,5 cm	8 cm	3 cm	5,5 cm	8 cm
I	0,40	0,50	0,34	0,90	2,29	-1,65	0,22	1,44	1,31
II	0,18	0,00	0,00	0,60	1,49	0,83	-0,43	1,63	1,32
TOTAIS	0,58	0,50	0,34	1,50	3,77	-0,82	-0,21	3,07	2,63
	1,42			4,43			5,49		

A análise de variância dos dados da Tabela 7 é mostrada na Tabela 8.

Tabela 8. Análise de variância dos dados da Tabela 7.

CAUSA DE VARIACÃO	GL	SQ	QM	F
Declividade	2	1,4904	0,7452	4,18
Erro	3	0,5345	(0,1781)	
TOTAL (a)	(5)	2,0249		
Lâmina	2	3,1631	1,5816	13,15**
Interação	4	9,9422	2,4856	20,66**
Erro (b)	6	0,7215	0,1203	
TOTAL (b)	17	13,8268		

O coeficiente de variação do experimento (CV) foi igual a 19,04%, o que indica uma precisão média do experimento.

O ensaio foi conduzido sem repetição para declividade e com duas repetições para lâminas, devido a grande extensão de área necessária para aumentar as repetições e a morosidade e necessidade de mão de obra pelo método gravimétrico, usado na determinação do conteúdo de água no solo.

Na análise de variância (Tabela 8), não foi aplicado o teste F para declividade devido a falta de repetição, (Cochran e Cox, 1957). Para possibilitar a aplicação do teste F para lâminas, foi feito um teste de  $\chi^2$  (ver Apêndice II), segundo Tejeda (1973), comparando-se as variâncias 0,6900, 1,4940 e 0,0765 das três lâminas nas declividades 0,15, 0,24 e 0,37%, respectivamente. O teste  $\chi^2$  não foi significativo, permitindo o uso do teste F segundo Snedecor e Cochran (1967).

A análise de variância (Tabela 8) apresentou significâncias ao nível de 1% para lâminas (sub-tratamento) e interação (lâmina x declividade).

Então, dentro de um grau de confiabilidade de 99% de probabilidade, pode-se afirmar que a diferença entre a quantidade de água aplicada por sulcos abertos e sulcos fechados foi afetada quando a lâmina variou de 3 a 8 cm em declividade de 0,15 a 0,37%. Com a mesma probabilidade de 99%, pode-se dizer que a interação (declividade x lâmina) influi na variação entre os dois métodos de irrigação em estudo.

Apesar do efeito da declividade não ter sido possível testar através de F, tendo sido a interação significativa, podemos dizer que a declividade exerce efeito sobre a diferença entre os dois métodos.

Com base na análise de variância, Tabela 8, constatou-se também que o conteúdo de água infiltrada no solo quan-

do se aplicou lâminas de 3,0, 5,5 e 8,0 cm, em sulcos abertos e sulcos fechados foi diferente significativamente quando se adotou a redução da vazão inicial.

As Figuras 11, 12 e 13, ilustram os valores médios de perfis de infiltração de água em sulcos abertos e sulcos fechados. A análise dos gráficos revela a diferença entre os métodos já comprovada na análise estatística.

As figuras apresentam valores de conteúdo de água aplicados em sulcos abertos sempre inferior aos de sulcos fechados. A lâmina infiltrada ao longo dos sulcos apresentaram grande irregularidade, fato explicado pela desuniformidade da declividade dos sulcos (ver Tabela 4).

Em alguns casos como mostram as Figuras 11, 12 e 13, o conteúdo de água infiltrada em sulcos abertos foi ligeiramente superior aos sulcos fechados. Esta superioridade pode ser considerada insignificante e a igualdade é justificada pela pequena declividade negativa no final de alguns sulcos, observadas in loco.

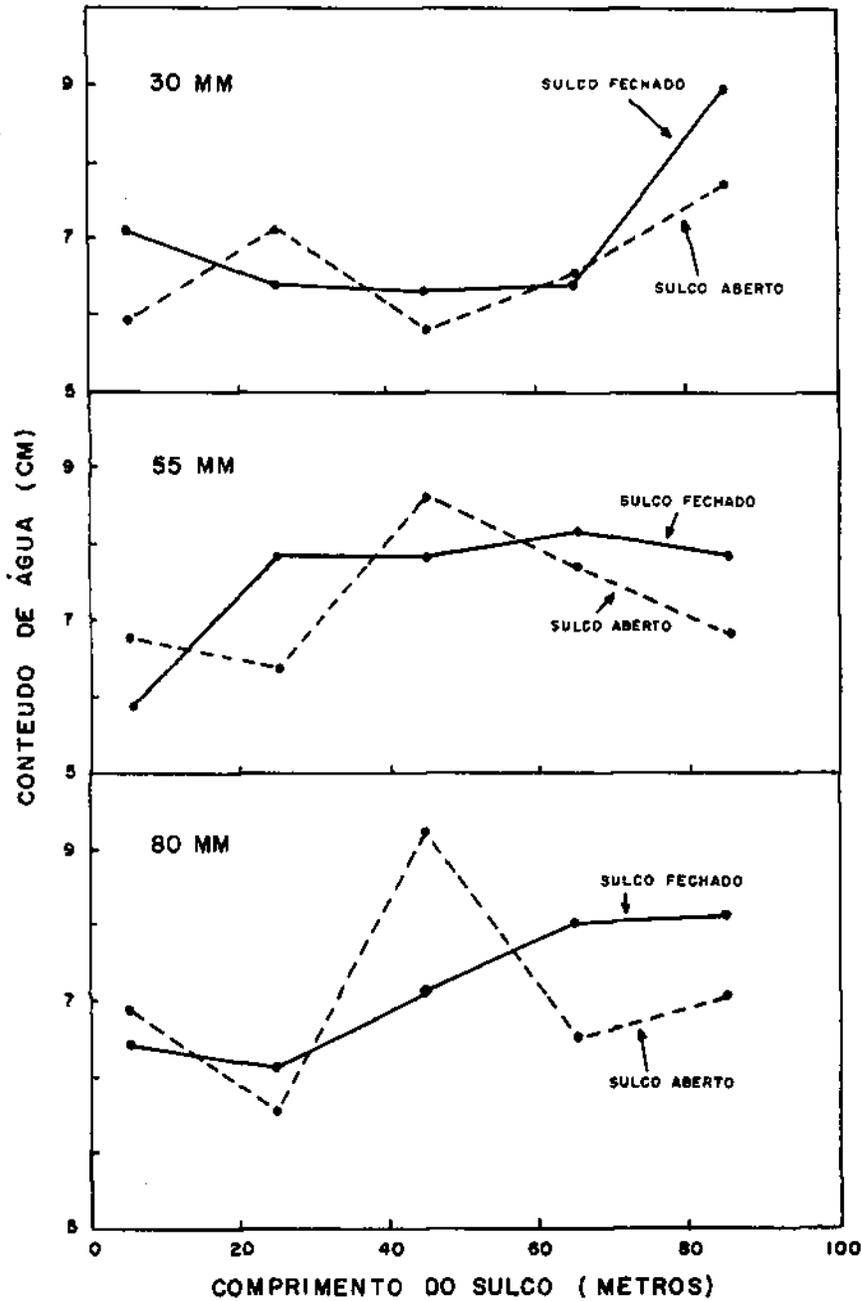


Figura 11. Distribuição do conteúdo de água ao longo dos sulcos (0,15% de declividade) após irrigação, afetada por diferentes lâminas de aplicação de água (3,0, 5,5 e 8,0 cm de água, respectivamente). Média de duas repetições.

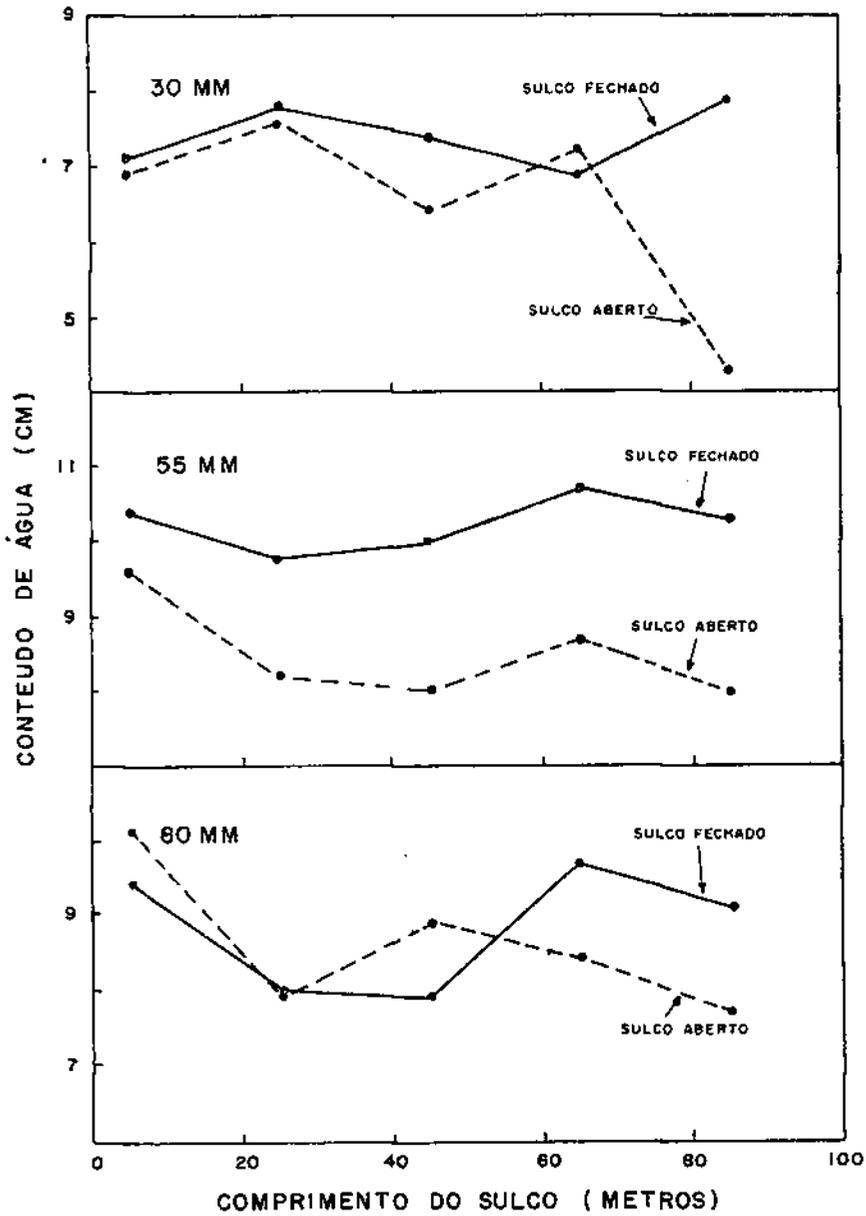


Figura 12. Distribuição do conteúdo de água ao longo dos sulcos (0,24% de declividade) após irrigação, afetada por diferentes lâminas de aplicação de água (3,0, 5,5 e 8,0 cm de água, respectivamente). Média de duas repetições.

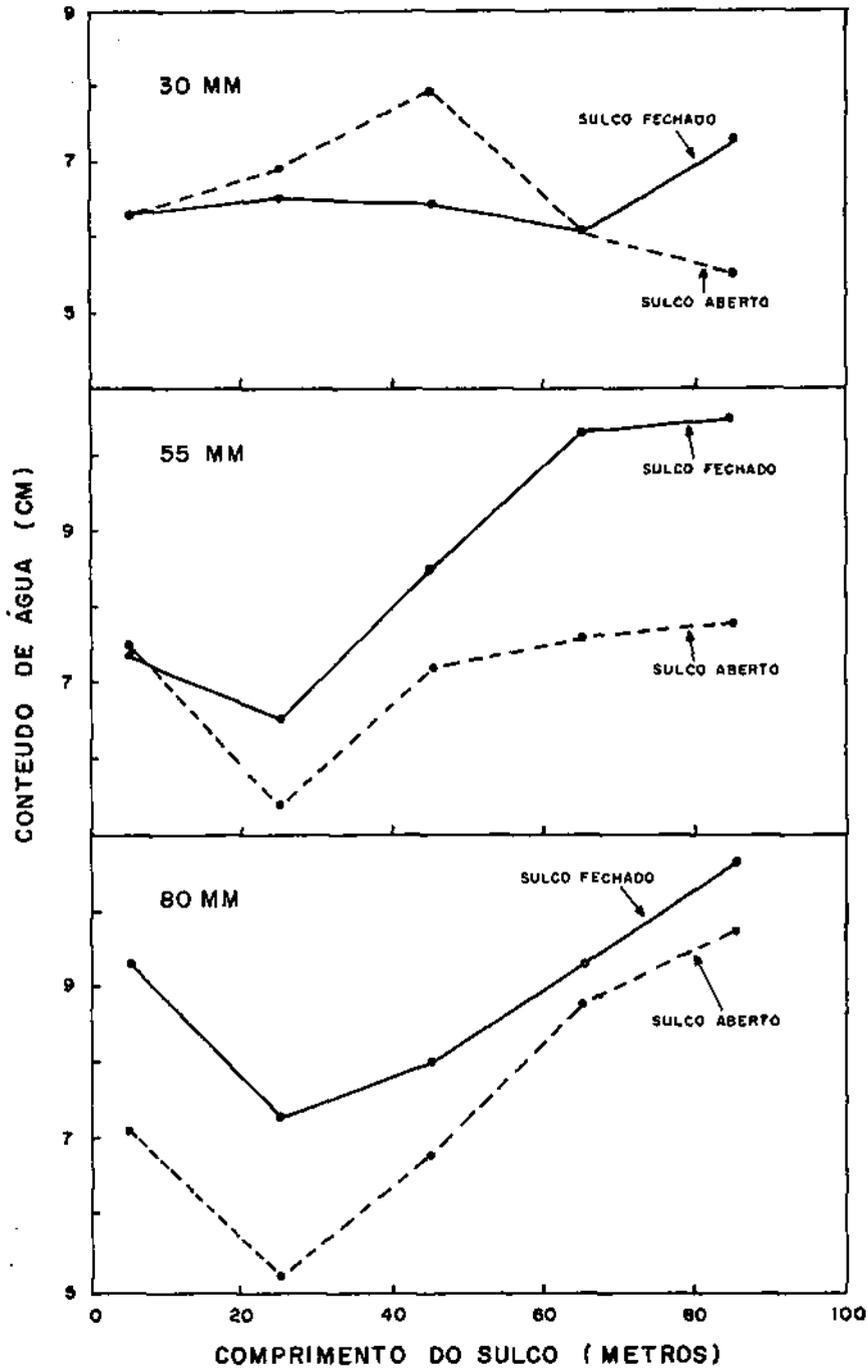


Figura 13. Distribuição do conteúdo de água ao longo dos sulcos (0,37% de declividade) após irrigação, afetada por diferentes lâminas de aplicação de água (3,0, 5,5 e 8,0 cm de água, respectivamente). Média de duas repetições.

## CAPÍTULO V

## CONCLUSÕES

Nas condições experimentais nas quais os testes foram realizados, podem obter-se as seguintes conclusões:

1. O coeficiente  $K$ , da equação de infiltração instantânea diminuiu com o aumento do conteúdo de água inicial da camada superficial do solo, entretanto, o valor do expoente "n", na equação, não foi afetado pelas variações do conteúdo de água inicial da camada superficial do solo.
2. Para um conteúdo de água de solo de  $0,09 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , o valor de  $K$  obtido em solos recém-preparados foi 3,30 vezes superior ao valor de  $K$  obtido em um solo já irrigado. Isto não aconteceu com o valor do expoente "n", o qual não foi afetado pelas condições do solo.
3. As conclusões anteriores permitem introduzir práticas de manejo da irrigação e conservação do solo, baseadas nos níveis ótimos para a aplicação da água com a finalidade de evitar excessivo escoamento superficial com as conseqüentes perdas de solo e nutrientes.
4. Respeito à comparação entre métodos de irrigação por sulcos abertos e fechados conclui-se que para todas as declividades testadas, a diferença entre a quantidade de água infiltrada em sulcos abertos e fechados foi significativa ao nível de 1% quando se aplicaram lâminas de 3,0 a 8,0 cm de água.

5. A análise estatística determinou diferença significativa de 1% para a interação lâmina x declividade. Isto está indicando que os efeitos das variáveis lâminas de água aplicadas e declividades do solo, são completamente dependentes uma da outra.

6. Para todas as declividades e lâminas de água testadas a diferença entre os dois métodos da irrigação pelos sulcos, foi afetada pela interação lâmina x declividade.

7. A quantidade de água infiltrada em sulcos fechados foi superior a aquela infiltrada em sulcos abertos. Sob as condições experimentais em que o experimento foi conduzido é possível concluir que o método de irrigação pelos sulcos fechados foi mais satisfatório que quando se usou sulcos abertos.

## BIBLIOGRAFIA

- BARRETO, G. B. 1974. Irrigação: Princípios, Métodos e Prática. Instituto Campineiro do Ensino Agrícola, Campinas. 185 p.
- BAVER, L. D., GARDNER, WALTER H. & GARDNER WILFORD R. 1972. Soil Physics. 4<sup>th</sup> edition. John Wiley & Sons, Inc. New York. p.317-351.
- BISHOP, A. A. 1962. Relation of Intake Rate to Length of Run in Surface Irrigation. Transaction of American Society of Civil Engineers. Paper 3344, v 127, Part 3.
- COCHRAN, W. G. & COX, G. M. 1957. Experimental Designs. 2<sup>nd</sup> edition. John Wiley & Sons. Inc. New York. 611 p.
- COLLINS, H. G. & CAMPBELL. 1967. Water Infiltration in Hawaiian Sugarcane Furrow. Journ. Irrig. Drain. Div. Proc. ASCE 93:81-96.
- CRIDDLE, W. D., S. DAVIS, C. H. PAIR & D. G. SHOCKLEY. 1956. Methods for Evaluating Irrigation Systems. Agricultural Handbook 82. Soil Conservation Service. United States Departmente of Agriculture. Washington. 24 p.
- DAKER, A. 1970. Água na Agricultura. R. de Janeiro. F. Bastos. 3 volumes. 453 p.
- DAY, P. R. 1965. Particle Fractionation and Particle-size Analysis. Methods of Soil Analysis. Agronomy Monograph. Academic Press. New York. Part 1. p.545-567.

- DNOCS. 1970. O DNOCS e a Problemática Nordestina. Fortaleza, DNOCS. 43 p.
- FAO/PNUD. 1971. Estudios de Irrigación e Ingeniería. Estudios de la Cuenca del Rio S. Francisco. Roma, FAO/PNUD. 301 p.
- FERNANDEZ, F. C., J. A. LUQUE & J. D. PAOLONI. 1971. Análisis de la Infiltración para Diseños de Riego en el Valle Inferior del Rio Colorado. Revista de Investigaciones Agropecuarias; série 3. Clima y Suelo. 8(1):29
- FINKEL, E. J. & D. NIE. 1960. Determining Infiltration Rates in an Irrigation Border. Journal of Geophysical Research, 65:2125-31.
- FOK, Y. S. & BISHOP, A. A. 1965. Análisis of Water Advance in Surface Irrigation. Journal of the Irrigation and Drainage División A.S.C.E. 91:101-115.
- GRASSI, C. J. 1968. Estimación de los Usos Consuntivos de Agua y Requerimiento de Riego con Fines de Formulación y Diseños de Proyectos. Mérida, CIDIAT. 96 p.
- GRASSI, C. J. 1972. Infiltration Characteristics of Furrow Irrigation in Heavy-textured Soil. Agricultural University Wageningen, the Netherlands.
- GRASSI, C. J., FERNANDEZ, P.C., y PONCE, I. 1965. Velocidad de Avance del Frente de Agua en los Surcos de Riego. Revista de Investigaciones Agropecuarias. Clima y Suelo. 2(2):11-34.
- GRIJALVA, F. E. G. 1969. Efecto de la Pendiente y Gasto de Aplicación en el Diseño de Riego por Surcos de la Region Lagunera. Chapingo, México. Tesis para obtener el título de Ingeniero Agrónomo Especialista en Suelos.

- GUERRA, P. B. 1970. Evolução e Problemas da Irrigação no Nordeste. Fortaleza, DNOCS.
- HARGREAVES, G. H. 1973. Monthly Precipitation Probabilities for Northeast Brazil. Logan, Utah State University. Contract AID/csd 2167. 423 p.
- HARGREAVES, G. H. 1974. Climatic Zoning for Agricultural Production in Northeast Brazil. Logan, Utah State University. 6 p.
- HILLEL, D. 1971. Soil and Water. New York. Academic Press. 288 p.
- HOCES, E. A. H. 1971. Determinación de Características Hidráulicas de Surcos de Regadio. Chillán, Chile, Escuela de Agronomía, Universidad de Concepción. 69 p. (Tesis de Ingeniero Agrónomo, mimeografiada).
- ISRAELSEN, O. W. & HANSEN, V. E. 1965. Irrigation Principles and Practices. 3<sup>rd</sup> edition. New York. New York. John Wiley and Sons. 447 p.
- KELLER, J. 1962. Ames Irrigation Handbook, 2<sup>nd</sup> edition, California, Section 2-SMF-3.
- KLUTE, A. 1952. Some Theoretical Aspects of the Flow of Water Unsaturated Soils. Proceedings Soils Science Society of America. 16:144-148.
- LINDERMAN, C. L. 1968. An Analysis of Factors Affecting Surface Irrigation Application Efficiencies. Fargo, N.D. North Dakota State University.
- LOPEZ, J. E. 1973. Riego por Surcos. Petrolina, PE, MINTER/IICA/CIDIAT. 46 p.

- MECH, S.J. 1960. Soil Management as Related to Irrigation Practice and Irrigation Design. Madison. USAID. Int. Congr. Soil Sc. Trans 7<sup>th</sup>. p.645-650.
- PHILIP, J. R. 1956. The Theory of Infiltration. 4 Sorptivity and Algebraic Infiltration Equations. Australia. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization.
- PHILIP, J. R. 1957. The Theory of Infiltration. 1. The Infiltration Equation and Its Solution. Soil Science. 83(5): 345-357.
- POIRÉE, M.E. & OLLIER, C. 1970. El Regadio. 2<sup>nd</sup> edition. Barcelona. E. T. Asociados S.A.
- QUEIROZ FILHO, S.C., MILLAR, A.A. e ROERS, M. 1975. Características da Infiltração dos Vertissolos do Sub-Médio São. Francisco. Anais do XV Congresso Brasileiro da Ciencia do Solo. Campinas, SP. (em prelo).
- SOUZA LIMA, F. 1973. Irrigação no Nordeste. Fortaleza. MIN-TER/SUDENE. 17 p.
- STELL, R. G. D. & TORRIE, J. H. 1960. Principles and Procedures of Statistics. New York. Mc Graw-Hill. B. C. 481p.
- SNEDECOR, G. W. & COCHRAN, W. G. 1967. Statistical Methods. 7<sup>th</sup> edition. Iowa. The Iowa State University. 580 p.
- TEJEDA, H. R. 1973. Statistical Analysis and Model Building for a Wheat Production System in Chile. Unpuolished Ph.D. Dissertation. Ames, Iowa State University of Science an Technology.
- TEJEDA, H. R. & BERNIER, R. 1974. Métodos e Técnicas de Pesquisa na Agricultura Irrigada. Parte 1. Estatística Experimental. Petrolina. GEIDA/SUDENE/IICA. 186 p.

- THORNE, D. W. & PETERSON, E. B. 1969. Tecnica del Riego. 4<sup>a</sup> edition. México. C. E. Continental. 496 p.
- USDA. 1947. Soil Conservation Service. A Practical Method of Determining Proper Lengths of Run Sizes of Furrows on Irrigated Lands.
- WHISLER, F. D. & WATSON, K. K. 1969. Analysis of Infiltration into Draining Porous Media. Journal of Irrigation and Drainage Division. A.S.C.E. 95(IRA):481-491.
- WILLARDSON, L. S. & BISHOP, A. A. 1967. Analysis of Surface Irrigation Application Efficiency. Journal of Irrigation and Drainage Division. Proceeding of the A.S.C.E. 93(2): 21-36.
- ZIMMERMAN, J. D. 1970. El Riego. México. C. E. Continental S.A.

APÉNDICE

## APÊNDICE I

Tabela 1. Distribuição do tamanho das partículas\*

PROFUNDIDADE DO SOLO	AREIA %	SILTE %	ARGILA %	CLASSIFICAÇÃO TEXTURA
0 - 15 cm	84	8	8	Areia
16 - 30 cm	85	7	8	Areia
31 - 45 cm	78	10	12	Arenoso
46 - 60 cm	73	8	19	Arenoso
61 - 75 cm	72	6	22	Argilo-are noso
76 - 90 cm	70	8	22	Argilo-are noso

\* U. S. Department of Agriculture Handbook, Nº 18 Soil Survey Manual, 1951.

Tabela 2. Densidade Aparente, Capacidade de Campo e Ponto de Murcha Permanente do Solo estudado.

PROFUNDI DADE (cm)	DENSIDADE APARENTE (g/cc)	CAPACIDADE DE CAMPO ( % )	PONTO DE MURCHA ( % )
0 - 15	1,64	10,62	2,96
15 - 30	1,66	10,73	2,75
30 - 45	1,60	11,40	4,02
45 - 60	1,62	11,84	5,82
60 - 75	1,63	12,68	6,59
75 - 90	1,61	14,91	6,91

Tabela 3. Conteúdo de água do solo versus potencial matricial.

TENSÃO Potencial Matricial (atm.)	PROFUNDIDADE (cm)					
	0-15	15-30	31-45	45-60	61-75	76-90
	Conteúdo de água no solo (% Peso Seco)					
- 0,1	10,8	11,0	13,6	16,0	16,7	17,4
- 0,2	6,7	7,5	10,1	13,2	14,0	14,6
- 0,3	5,6	6,5	7,6	10,7	11,0	10,1
- 0,5	4,2	5,2	7,1	8,8	9,9	8,9
- 0,6	4,4	5,9	7,0	7,8	8,1	8,6
- 1,0	4,0	5,1	6,0	6,9	7,3	7,5
- 2,0	3,7	4,5	5,9	6,6	6,7	7,0
- 4,0	3,6	4,0	5,6	6,4	5,9	6,7
- 8,0	2,9	3,5	4,7	5,5	5,6	5,7
- 12	2,7	3,4	4,6	5,3	5,4	5,6
- 15	2,8	3,4	5,2	5,3	5,4	5,4

Tabela 4. Valores das declividades das parcelas medidas em três repetições.

ESTACA	DECLIVIDADE (%)								
	0,15			0,24			0,37		
	REPETIÇÕES			REPETIÇÕES			REPETIÇÕES		
	1ª	2ª	3ª	1ª	2ª	3ª	1ª	2ª	3ª
0 - 00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0 - 20	0,140	0,250	0,225	0,450	0,475	0,350	0,450	0,425	0,525
0 - 40	0,160	0,300	0,025	0,225	0,160	0,050	0,400	0,375	0,175
0 - 60	0,250	0,025	0,150	0,250	0,175	0,275	0,200	0,250	0,300
0 - 90	0,200	0,025	0,100	0,050	0,075	0,350	0,500	0,350	0,500
TOTAL	1,850			2,875			4,450		
MÉDIA	0,154			0,240			0,371		
DESVIO PADRÃO	0,095			0,144			0,113		
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO %	61,7			60,0			31,8		

## APÊNDICE II

Aplicação do teste de  $\chi^2$  na comparação de variâncias de sub-tratamento em experimentos Split Plot, segundo Snedecor e Cochran (1967).

$$\chi^2 = \frac{M}{C} \quad \{1\}$$

$$M = 2,3026 f (a \cdot \log \bar{s}^2 - \Sigma \log s^2) \quad \{1.1\}$$

f = número de graus de liberdade do erro tabela  
a = número de tratamentos  
 $s^2$  = variância do erro  
 $\bar{s}^2$  = variância média

$$C = 1 + \frac{a + 1}{3 \cdot a \cdot f} \quad \{1.2\}$$

DECLIVIDADES %	$s^2$	$\log s^2$
0,15	0,6900	- 0,1611
0,24	1,4940	0,1744
0,37	0,0765	- 1,1163
	$\Sigma s^2 = 2,2605$	$\Sigma \log s^2 = - 1,1030$
	$\bar{s}^2 = 0,7535$	$\log \bar{s}^2 = - 1,1229$

$$M = 2,3026 \times 3 [ 3 \times (-0,1229) = (-1,1030) ] = 5,0724$$

$$C = 1 + \frac{3 + 1}{3 \times 3 \times 3} = 1,1481$$

$$\chi^2 = \frac{5,0724}{1,1481} = 4,4181^{ns}$$

Valor da tabela para (a-1) graus de liberdade ao nível de 5% é 5,90.

Segundo Tejeda (1973), quando as variâncias não são homogêneas, isto é, são significativas quando submetidas ao teste de  $\chi^2$ , produz-se os seguintes efeitos sobre o testes F: a prova pode declarar significância a uma quantidade maior de diferenças entre tratamento que as realmente existentes. Entretanto, quando o valor de F calculado é muito superior ao valor da tabela, pode-se aceitar a significação como resultado da diferença entre subtratamento e não devido a não homogeneidade das variâncias.

