

"ESTUDO DA EFICIÊNCIA E DA UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE
ÁGUA NA IRRIGAÇÃO POR SULCOS EM DECLIVE"

SEBASTIÃO GERALDO AUGUSTO

DISERTAÇÃO SUBMETIDA À COORDENAÇÃO DO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA, COMO
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

FORTALEZA - 1984

Esta Dissertação foi submetida como parte dos requisitos necessários a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Agrícola, outorgado pela Universidade Federal do Ceará, e encontra-se a disposição dos interessados na Biblioteca Central da referida Universidade.

A citação de qualquer trecho desta Dissertação é permitida, desde que seja feita de conformidade com as normas da ética científica.

Sebastião / Geraldo / Augusto

DISSERTAÇÃO APROVADA EM _____

Francisco de Souza, Ph.D.
Orientador da Dissertação

José Matias Filho, Ph.D.
Conselheiro

Luiz Carlos Uchôa Saunders, Doutor
Conselheiro

A meus pais PEDRO e OLINDA
e aos meus irmãos PEDRO,
JOÃO, CARLOS, MADALENA, MÁRIO,
RITA, LUZIA e ISABEL

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À COMISSÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR (CAPES), Programa Demanda Social, pela bolsa de estudo recebida.

Ao DNOCS, na pessoa do gerente do Perímetro Irrigado de Morada Nova, Ce., Eng^o Agrônomo NEY BARROS DA COSTA, pela gentileza com que nos cedeu as instalações da área experimental desse perímetro.

Ao Convênio "Metodologia para avaliação de sistemas de irrigação aplicáveis a pequenas propriedades", na pessoa do seu Coordenador Professor FRANCISCO DE SOUZA, pela colaboração técnico-científica prestada.

Ao Convênio FCPC/EMBRAPA (Estudos para racionalização do uso da água de irrigação na pequena propriedade agrícola), na pessoa do seu Coordenador Professor JOSÉ OSÓRIO COSTA, pelo auxílio técnico-financeiro.

Ao Professor FRANCISCO DE SOUZA, pela amizade, dedicação e orientação prestada na evolução deste trabalho.

Aos Professores JOSÉ MATIAS FILHO e LUIZ CARLOS UCHÔA SAUNDERS pela colaboração e sugestões apresentadas.

A todos os Professores do Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, pelos conhecimentos transmitidos no decorrer do curso.

A JOÃO MAURÍCIO ABREU LOPES FILHO, pela amizade e apoio recebido.

A PAULO CALIXTO DA SILVA, AYMBIRÉ FRANCISCO ALMEIDA DA FONSECA, JOSÉ DE ARIMATEIA DUARTE DE FREITAS, REGINA HELENA PEREIRA NOBRE, PAULO FURTADO MENDES FILHO e GERARDO ALVES DE CARVALHO, pela amizade e colaboração prestada.

A RITA DE CARVALHO FEITOSA, pelo desempenho dos serviços de datilografia.

Enfim, a todos os amigos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para o êxito deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
<u>LISTA DE TABELAS</u>	ix
<u>LISTA DE TABELAS EM APÊNDICES</u>	xiii
<u>LISTA DE FIGURAS</u>	xv
<u>LISTA DE FIGURAS EM APÊNDICES</u>	xviii
<u>RESUMO</u>	xix
<u>ABSTRACT</u>	xxii
1 - <u>INTRODUÇÃO</u>	1
2 - <u>REVISÃO DE LITERATURA</u>	3
2.1 - <u>Parâmetros de Uniformidade e Eficiência na Irrigação por Sulcos</u>	4
2.2 - <u>Fatores que Afetam a Qualidade da Irrigação por Sulcos</u>	12
2.2.1 - <u>Técnicas para Determinação das Características de Infiltração</u>	13
2.2.1.1 - <u>Técnica do Cilindro Infiltrômetro</u>	13
2.2.1.2 - <u>Técnica do Sulco Infiltrômetro</u>	14
2.2.1.3 - <u>Técnica de Entrada e Saída do Fluxo D'água num Segmento de Sulco</u>	15
2.2.1.4 - <u>Técnica do Balanço de Volume para Calcular a Taxa de Infiltração</u>	16
2.2.2 - <u>A Teoria da Infiltração</u>	17

2.2.3 - Fase de Avanço da Água na Irrigação por Sulcos.....	18
2.2.4 - Fase de Recessão na Irrigação por Sulcos..	20
3 - <u>MATERIAIS E MÉTODOS</u>	23
3.1 - <u>Procedimento de Campo</u>	23
3.2 - <u>Parâmetros de Uniformidade e Eficiência na Irrigação por Sulcos</u>	28
3.3 - <u>Metodologia de Projeto para a Irrigação por Sulcos</u>	29
3.3.1 - Sumário das Equações para Projeto de Irrigação por Sulcos ou Corrugações em Declive e Abertos ao Final, com Vazão Constante:..	31
3.3.2 - Sumário das Equações para Projeto de Irrigação por Sulcos em Declive e Abertos ao Final, com Redução de Vazão:.....	34
4 - <u>RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	37
4.1 - <u>Características Físico-Hídricas do Solo</u>	37
4.2 - <u>Infiltração da Água nos Sulcos</u>	38
4.3 - <u>Avanço e Recessão da Água nos Sulcos</u>	59
4.4 - <u>Parâmetros de Uniformidade e Eficiência Obtidos no Campo</u>	65
4.5 - <u>Avaliação do Sistema de Irrigação Estudado, Usando a Metodologia de MERRIAM & KELLER (1978)</u>	67
4.6 - <u>Cálculos de Projeto e Manejo do Sistema de Irrigação por Sulcos, Utilizando a Metodologia do SCS-USDA</u>	74
5 - <u>CONCLUSÕES</u>	86
6 - <u>RECOMENDAÇÕES</u>	89
7 - <u>LITERATURA CITADA</u>	91

	Página
APÊNDICE "A".....	95
APÊNDICE "B".....	97
APÊNDICE "C".....	111
APÊNDICE "D".....	118
APÊNDICE "E".....	120
APÊNDICE "F".....	123

LISTA DE TABELAS

TABELA		Página
1	Características dos Sulcos.....	23
2	Análise Granulométrica e Classificação Textural do Solo da Estação Experimental do DNOCS, Morada Nova-Ceará.....	37
3	Características Físico-Hídricas de Amostras do Solo de Várzea da Estação Experimental do DNOCS, Morada Nova-Ceará.....	38
4	Equações de Infiltração Acumulada (z) e Velocidade de Infiltração (I) Obtidas por Análise de Regressão dos Dados de Campo..	39
5	Lâminas Infiltradas (cm) ao Longo do Sulco Irrigado com a Vazão de 0,753 l/seg, Usando-se as Equações de Infiltração Determinadas pelos Métodos do Cilindro Infiltrômetro (CI), Sulco Infiltrômetro (SI) e Entrada e Saída do Fluxo D'água (ES)...	46
6	Lâminas Infiltradas (cm) ao Longo do Sulco Irrigado com a Vazão de 0,764 l/seg, Usando-se as Equações de Infiltração Determinadas pelos Métodos do Cilindro Infiltrômetro (CI), Sulco Infiltrômetro (SI) e Entrada e Saída do Fluxo D'água (ES)...	47

7	Lâminas Infiltradas (cm) ao Longo do Sulco Irrigado com a Vazão de 1,30/0,77 l/seg, Usando-se as Equações de Infiltração Determinadas pelos Métodos do Cilindro Infiltrômetro (CI), Sulco Infiltrômetro(SI) e Entrada e Saída do Fluxo D'água (ES)...	48
8	Lâminas Infiltradas (cm) ao Longo do Sulco Irrigado com a Vazão de 1,37/0,75 l/seg, Usando-se as Equações de Infiltração Determinadas pelos Métodos do Cilindro Infiltrômetro (CI), Sulco Infiltrômetro(SI) e Entrada e Saída do Fluxo D'água (ES)...	49
9	Lâminas Infiltradas (cm) ao Longo do Sulco Irrigado com a Vazão de 1,337 l/seg, Usando-se as Equações de Infiltração Determinadas pelos Métodos do Cilindro Infiltrômetro (CI), Sulco Infiltrômetro(SI) e Entrada e Saída do Fluxo D'água (ES)...	50
10	Lâminas Infiltradas (cm) ao Longo do Sulco Irrigado com a Vazão de 1,330 l/seg, Usando-se as Equações de Infiltração Determinadas pelos Métodos do Cilindro Infiltrômetro (CI), Sulco Infiltrômetro(SI) e Entrada e Saída do Fluxo D'água (ES)...	51
11	Famílias de Infiltração do Solo e Coeficientes de Infiltração ("a" e "b") e de Avanço ("c" e "d") para as Equações de Infiltração Estudadas.....	59

TABELA

Página

12	Vazão (Q) e Valores de "a" , "K" e "n" para os Seis Tratamentos.....	60
13	Parâmetros de Qualidade e Performance do Sistema de Irrigação Estudado.....	64
14	Condições de Manejo para o Sistema Estudado para a Aplicação da Lâmina Real Necessária ($Y_{rn} = 23,5$ mm) no Final dos Sulcos..	68
15	Parâmetros de Qualidade (potenciais) para a Aplicação da Lâmina Real Necessária ($Y_{rn} = 23,5$ mm) no Final dos Sulcos.....	69
16	Condições de Manejo para o Sistema, quando se Deseja Aplicar uma Lâmina de 58,75 mm no Final dos Sulcos.....	71
17	Parâmetros de Qualidade (potenciais) para a Aplicação da Lâmina de 58,75 mm no Final dos Sulcos.....	72
18	Condições de Manejo para o Sistema Estudado, Considerando a Razão de Avanço (R) de 1/4 como Ótima para Aplicar $Y_{rn} = 23,5$ mm no Final dos Sulcos.....	73
19	Parâmetros de Qualidade (potenciais) para o Sistema Estudado, Considerando a Razão de Avanço (R) de 1/4 como Ótima para Aplicar $Y_{rn} = 23,5$ mm no Final dos Sulcos....	74

TABELA

Página

20	Condições de Manejo para o Sistema Estudado Considerando a Razão de Avanço (R) de 1/4 como Ótima para Aplicar $Y_{rn} = 58,75\text{mm}$ no Final dos Sulcos.....	75
21	Parâmetros de Qualidade (potenciais) para o Sistema Estudado Considerando a Razão de Avanço (R) de 1/4 como Ótima para Aplicar $Y_{rn} = 58,75\text{ mm}$ no Final dos Sulcos...	76
22	Cálculos de Projeto a Partir dos Dados Obtidos na Área Estudada, Através da Metodologia Proposta pelo SCS-USDA.....	78
23	Parâmetros de um Sistema de Irrigação por Sulcos em Declive Calculados pela Técnica do SCS-USDA para o Comprimento de Sulco de 80,0 m.....	80
24	Parâmetros de um Sistema de Irrigação por Sulcos em Declive Calculados pela Técnica do SCS-USDA para o Comprimento de Sulco de 160 m e $n = 0,066$	81
25	Parâmetros de um Sistema de Irrigação por Sulcos em Declive, com Redução de Vazão, Calculados pela Técnica do SCS-USDA para o Comprimento de Sulco de 80,0 m.....	83
26	Parâmetros de um Sistema de Irrigação por Sulcos em Declive, com Redução de Vazão, Calculados pela Técnica do SCS-USDA, para $Q = 0,67/0,35\text{ l/seg}$ e $n = 0,066$	84

LISTA DE TABELAS EM APÊNDICE

APÊNDICE		Página
A-27	Coordenadas Geográficas e Características Climáticas da Fazenda Experimental do DNOCS, no Vale do Banabuiú; Morada Nova, Ceará.....	96
B-28	Exemplo de um dos Testes de Infiltração Realizado pelo Sulco Infiltrômetro.....	101
B-29	Exemplo de um Teste de Infiltração Realizado com o Cilindro Infiltrômetro....	103
B-30	Dados de Campo do Teste de Infiltração da Água no Solo, pelo Método de Entrada e Saída do Fluxo D'água (Teste Nº 1)...	105
B-31	Dados de Campo do Teste de Infiltração da Água no Solo, pelo Método de Entrada e Saída do Fluxo D'água (Teste Nº 2)...	106
B-32	Dados de Campo do Teste de Infiltração da Água no Solo, pelo Método de Entrada e Saída do Fluxo D'água (Teste Nº 3)..	107
B-33	Dados de Campo do Teste de Infiltração da água no Solo, pelo Método de Entrada e Saída do Fluxo D'água (Teste Nº 7)...	108

TABELAS EM APÊNDICE

Página

B-34	Dados de Campo do Teste de Infiltração da Água no Solo, pelo Método de Entrada e Saída do Fluxo D'água (Teste N° 8)...	109
B-35	Dados de Campo do Teste de Infiltração da Água no Solo, pelo Método de Entrada e Saída do Fluxo D'água (Teste N° 9)...	110
C-36	Determinação do Tempo de Avanço e Recesão na Irrigação por Sulcos (Bateria de Sulco N° 01).....	112
C-37	Determinação do Tempo de Avanço e Recesão na Irrigação por Sulcos (Bateria de Sulco N° 02).....	113
C-38	Determinação do Tempo de Avanço e Recesão na Irrigação por Sulcos (Bateria de Sulco N° 03).....	114
C-39	Determinação do Tempo de Avanço e Recesão na Irrigação por Sulcos (Bateria de Sulco N° 07).....	115
C-40	Determinação do Tempo de Avanço e Recesão na Irrigação por Sulcos (Bateria de Sulco N° 08).....	116
C-41	Determinação do Tempo de Avanço e Recesão na Irrigação por Sulcos (Bateria de Sulco N° 9).....	117
D-42	Famílias de Infiltração em Sulcos e Coeficientes de Avanço.....	119

LISTA DE FIGURAS

FIGURA		Página
1	Distribuição das Lâminas Infiltradas ao Longo de um Sulco Irrigado.....	5
2	Curva de Distribuição Adimensional para a Irrigação de Superfície.....	9
3	Croquis do Campo Experimental.....	25
4	Velocidade de Infiltração (I) e Infiltração Acumulada (z) do Solo Estudado, Obtidas pelo Método de Entrada e Saída do Fluxo D'água, para as Vazões de 0,753, 1,30/0,77 e 1,337 l/seg.....	40
5	Velocidade de Infiltração (I) e Infiltração Acumulada (z) do Solo Estudado, Obtidas pelo Método de Entrada e Saída do Fluxo D'água, para as Vazões de 0,764, 1,37/0,75 e 1,330 l/seg.....	41
6	Velocidade de Infiltração (I) e Infiltração Acumulada (z) do Solo Estudado, Obtidas pelos Métodos do Sulco e Cilindro Infiltrômetro.....	42
7	Velocidade de Infiltração (I) e Infiltração Acumulada (z) do Solo Estudado, Obtidas pelos Métodos de Entrada e Saída do Fluxo D'água para a Vazão de 0,753 l/seg, e Sulco Infiltrômetro.....	43

- 8 Distribuição Espacial das Lâminas Aplicadas para $Q = 0,753$ l/seg, Usando as Equações de Infiltração Determinadas pelos Métodos do Cilindro Infiltrômetro (a), Entrada e Saída (b), Sulco Infiltrômetro (c) e pelo Balanço de Volume (d) dos Dados Medidos no Campo..... 52
- 9 Distribuição Espacial das Lâminas Aplicadas para $Q = 1,30/0,77$ l/seg, Usando as Equações de Infiltração Determinadas pelos Métodos do Cilindro Infiltrômetro (c), Entrada e Saída (b), Sulco Infiltrômetro (c) e pelo Balanço de Volume (d) dos Dados Medidos no Campo..... 53
- 10 Distribuição Espacial das Lâminas Aplicadas para $Q = 1,337$ l/seg, Usando as Equações de Infiltração Determinadas pelos Métodos do Cilindro Infiltrômetro (a), Entrada e Saída (b), Sulco Infiltrômetro (c) e pelo Balanço de Volume (d) dos Dados Medidos no Campo..... 54
- 11 Distribuição Espacial das Lâminas Aplicadas para $Q = 0,764$ l/seg, Usando as Equações de Infiltração Determinadas pelos Métodos do Cilindro Infiltrômetro (a), Entrada e Saída (b), Sulco Infiltrômetro (c) e pelo Balanço de Volume (d) dos Dados Medidos no Campo..... 55

FIGURA

Página

12	Distribuição Espacial das Lâminas Aplicadas para $Q = 1,37/0,75$ l/seg, Usando as Equações de Infiltração Determinadas pelos Métodos do Cilindro Infiltrômetro (a), Entrada e Saída (b), Sulco Infiltrômetro (c) e pelo Balanço de Volume (d) dos Dados Medidos no Campo.....	56
13	Distribuição Espacial das Lâminas Aplicadas para $Q = 1,330$ l/seg, Usando as Equações de Infiltração Determinadas pelos Métodos do Cilindro Infiltrômetro (a), Entrada e Saída (b), Sulco Infiltrômetro (c) e pelo Balanço de Volume (d) dos Dados Medidos no Campo.....	57
14	Infiltração Acumulada vs. Tempo Obtida pelo Método de Entrada e Saída com a Vazão de $0,753$ l/seg.....	58
15	Curvas de Avanço e Recessão para o Primeiro, Segundo e Terceiro Tratamentos.....	61
16	Curvas de Avanço e Recessão para o Sétimo, Oitavo e Nono Tratamentos.....	62

LISTA DE FIGURAS EM APÊNDICE

APÊNDICE		Página
B-17	Sistema de Carga Constante para Medida da Infiltração da Água em Sulcos.....	99
F-18	Infiltração Acumulada vs. Tempo Obtida pelo Método de Entrada e Saída com a Vazão de 1,30/0,77 l/seg.....	124
F-19	Infiltração Acumulada vs. Tempo Obtida pelo Método de Entrada e Saída com a Vazão de 1,337 l/seg.....	125
F-20	Infiltração Acumulada vs. Tempo Obtida pelo Método de Entrada e Saída com a Vazão de 0,764 l/seg.....	126
F-21	Infiltração Acumulada vs. Tempo Obtida pelo Método de Entrada e Saída com a Vazão de 1,37/0,75 l/seg.....	127
F-22	Infiltração Acumulada vs. Tempo Obtida pelo Método de Entrada e Saída com a Vazão de 1,330 l/seg.....	128
F-23	Infiltração Acumulada vs. Tempo Obtida pelo Método do Cilindro Infiltrômetro..	129
F-24	Infiltração Acumulada vs. Tempo Obtida pelo Método do Sulco Infiltrômetro.....	130

RESUMO

Os testes de campo foram realizados em um período de três meses (setembro a novembro de 1982), na estação experimental do DNOCS, no Perímetro Irrigado de Morada Nova, Ceará.

O experimento foi conduzido em nove baterias de sulcos. Cada bateria foi composta de três sulcos, sendo dois laterais chamados bordaduras e um central chamado sulco-teste. Realizaram-se duas repetições por bateria, totalizando dezoito testes.

A primeira bateria de sulcos recebeu como tratamento uma vazão média de 0,753 l/seg; a segunda recebeu inicialmente 1,30 l/seg, sendo que 15 min após a frente de avanço da água ter atingido a última estação, reduziu-se para 0,77 l/seg; a terceira 1,337 l/seg como tratamento. A quarta, quinta e sexta foram descartadas por não ter havido correlação significativa entre os dados de altura e largura das lâminas d'água, necessários para a determinação dos coeficientes de rugosidade de MANNING. A sétima 0,764 l/seg; a oitava recebeu inicialmente 1,37 l/seg, sendo que 15 min após a frente de avanço da água ter atingido a última estação, reduziu-se esta vazão para 0,75 l/seg e a nona 1,330 l/seg como tratamento. O tempo total de irrigação foi de duas horas para todos os testes.

Tentou-se não alterar as práticas de irrigação (exceto variar a vazão no lote) devido ser desejado a aplicabilidade dos resultados nas práticas de irrigação nessa área. A vazão utilizada na área experimental, nesse caso, correspondia à vazão proporcionada por um sifão de uma polegada de diâmetro, sem controle da carga hidráulica.

Foram realizados testes de infiltração com cilindro infiltrômetro, sulco infiltrômetro e pela técnica de entrada e saída do fluxo d'água.

As vazões de entrada e saída nos sulcos-testes foram determinadas utilizando-se calhas Parshall de duas e uma polegada de garganta.

Com os dados obtidos no campo, através de uma metodologia simples, foi possível fazer uma avaliação dos fatores que influenciaram a performance do sistema de irrigação, bem como, apresentar os seguintes parâmetros de qualidade, os quais mostraram a atual situação do manejo da irrigação no local estudado e as possíveis modificações necessárias para a melhoria da qualidade do sistema de irrigação por sulcos: eficiência de aplicação d'água (E_a), eficiência potencial de aplicação d'água (E_{pa}), eficiência de distribuição (E_d), eficiência potencial de distribuição (E_{pd}), eficiência de armazenamento (E_s), índices de perdas por escoamento superficial (I_{ro}) e percolação profunda (I_p).

Com os resultados dos testes de campo, chegou-se às seguintes conclusões:

- O valor de "K" da equação de KOSTIAKOV varia diretamente com a altura da lâmina d'água no infiltrômetro;

- A diminuição da velocidade de fluxo durante a fase de avanço reduz a eficiência de distribuição da água ao longo dos sulcos;

- O aumento da velocidade de fluxo proporciona um acréscimo nas perdas d'água por escoamento superficial e uma conseqüente diminuição da eficiência de aplicação d'água;

- Os resultados de eficiência de aplicação no campo são considerados muito baixos, mesmo havendo boa eficiência de distribuição e de armazenamento. Isto se deveu às perdas por escoamento superficial e percolação profunda, as quais foram altas, em função do tempo de aplicação, que foi maior que o real necessário. Para aumentar a eficiência de aplicação, recomenda-se entre outras práticas de manejo: aplicar

água no tempo real necessário para infiltrar a lâmina no final dos sulcos, calculado pela equação de infiltração; diminuir ainda mais a vazão aplicada (usar $Q = 0,45$ l/seg), já que os sulcos são de pequeno comprimento; ou ainda, aumentar o comprimento dos sulcos (em torno de 160 m ou mais). No caso de aumentar o comprimento dos sulcos, torna-se viável aplicar a técnica de redução da vazão.

ABSTRACT

Field tests were carried out at the DNOCS experimental station - Morada Nova irrigation district - Ce., from september to november, 1982.

The experiment was conducted in nine furrow sets, each one composed of three furrows - a central furrow-test and two adjacent ones, with two replications.

Each furrow set received a different stream flow as a treatment. Therefore, nine treatments were applied. However, results from the fourth, fifth and sixth furrows sets were discarded, since they showed no correlation between top width and furrow depth. The following six treatments were applied: $T_1 = 0,753$ l/s; $T_7 = 0,764$ l/s; $T_2 = 1,30/0,77$ l/s; $T_8 = 1,37/0,75$ l/s; $T_3 = 1,337$ l/s; and, $T_9 = 1,33$ l/s. An equal irrigation time of two hours was used for all treatments.

In order to have applicability of the results, irrigation practices were kept the same as used by local farmers. The only irrigation parameter changed was the stream-flow, which was applied by 1" syphons with no head control.

Cylinder infitrometer, furrow infiltrometer and inflow-outflow infiltration tests were conducted. Inflow and outflow were determined by 1" and 2" Parshall flumes.

The results allowed to make an evaluation of the factors which determine the performance of an irrigation system, as well as, the following quality parameters: application efficiency (E_a), potential application efficiency

(E_{pa}), distribution efficiency (E_d), storage efficiency (E_s), percentage of runoff (I_{ro}), and percentage of deep percolation (I_p).

The results showed that:

- the value of K in KOSTIAKOV equation depends directly on the water depth in the infiltrometer;

- distribution efficiency is lowered as advance is reduced;

- as advance increases, runoff is also increased, and consequently application efficiency is reduced;

- the values of application efficiency obtained were considered very low, in spite of the high values of distribution and storage efficiency. This fact is explained by the long irrigation time, which was greater than the needed. In order to increase the application efficiency, it is recommended: (a) to adjust irrigation time to apply the irrigation net depth at the end of the furrow; (b) to reduce the stream flow ($Q = 0,45$ l/s), since the furrows, are short; (c) to increase furrow length ($L = 160$ m); (d) in this case, the cutback technique can be used.

1 - INTRODUÇÃO

A irrigação por sulcos refere-se à aplicação artificial de água ao solo através de pequenos canais (sulcos ou corrugações) com pequena declividade, ou mesmo em nível. A água pode ser aplicada em cada sulco, por intermédio de sifões, diques abertos, tubos curtos (SPILES) ou tubos janelados, de acordo com o espaçamento dos sulcos.

Apesar da técnica de irrigação por sulcos ser conhecida há bastante tempo, a eficiência com que a mesma é realizada varia substancialmente. Além da eficiência de aplicação, têm-se que levar em consideração a eficiência de distribuição da água no solo, pois em certas ocasiões, mesmo com elevada eficiência de aplicação obtêm-se baixa eficiência de distribuição, o que pode afetar a produtividade das culturas irrigadas.

As eficiências de aplicação e de distribuição da água, bem como outros parâmetros básicos para a elaboração de projetos e manejo d'água, podem ser determinados através de técnicas de avaliação consagradas na literatura. De acordo com MERRIAM & KELLER (1978), uma técnica simples de avaliação da irrigação por sulcos fornece informações úteis para a identificação e a correção de problemas de operação, sendo que os dados necessários poderão ser obtidos questionando o irrigante ou fazendo simples observações no campo. Já uma completa avaliação, ou seja, uma avaliação mais detalhada, fornece informações necessárias para se identificar os problemas existentes, tornando possível fazer mudanças para corrigi-los, como também, fazer comparações econômicas de procedimentos e métodos e, ainda, fornecer dados para projetos de sistemas sob condições similares. Esses dados dizem

respeito às perdas por percolação profunda (Z_p), perdas por escoamento superficial (Y_{ro}), eficiências de aplicação (E_a), de armazenamento (E_s) e de distribuição (E_d), comprimento dos sulcos (L), vazão ótima a ser aplicada, forma e espaçamento dos sulcos e à necessidade ou não de reutilização das perdas por escoamento superficial.

No Nordeste do Brasil, em que pese a importância da irrigação por sulcos, pouco se têm estudado sobre a eficiência e uniformidade de distribuição de água por este método. Com isto, na falta de informações científicas, os técnicos são obrigados a lançar mão de certos coeficientes e parâmetros empíricos necessários ao dimensionamento dos sistemas de irrigação, que na maioria das vezes são totalmente adversos à localidade em estudo. Portanto, é plenamente justificável a realização de pesquisas que visem estudar estes importantes aspectos da irrigação por sulcos.

Especificamente os objetivos deste estudo são avaliar os fatores que influenciam a performance de um sistema de irrigação por sulcos, adotando uma metodologia de simples aplicação, bem como, testar e apresentar uma metodologia para elaboração de projetos desse sistema de irrigação proposta pelo Serviço de Conservação de Solos do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (SCS-USDA), e gerar subsídios para a elaboração de projetos e manejo eficiente de sistemas de irrigação por sulcos abertos e em declive.

2 - REVISÃO DE LITERATURA

Os sistemas de irrigação podem ou não ser bem projetados e devidamente operados. MERRIAM & KELLER (1978), apresentaram uma técnica para avaliar a operação e o manejo atual, bem como determinar o maior potencial econômico e eficiência de operação para o sistema de irrigação por sulcos. Um sistema de avaliação deverá medir e mostrar a eficiência existente na prática de irrigação. Avaliar significa analisar qualquer sistema de irrigação, baseado em medições feitas no campo sob as condições e práticas de manejo normalmente usadas. Tais medições incluem o déficit de umidade do solo antes da irrigação, vazão, uniformidade de distribuição d'água infiltrada, tempo de irrigação, tempo de avanço e recessão, taxa de infiltração e adequabilidade da irrigação.

Segundo BOUWER (1957), a avaliação do sistema de irrigação por sulcos, em parte, serve para estimar a vazão mais adequada e a máxima eficiência de irrigação para a aplicação da lâmina de irrigação desejada. O fator crítico nesta avaliação é a determinação da lâmina d'água absorvida em diferentes períodos de irrigação, em base às variações da taxa de infiltração com o tempo.

Há um consenso na literatura de que não existe um parâmetro único que seja suficiente para avaliar a performance de um sistema de irrigação. Desse modo, além do aspecto da eficiência, qualquer sistema de irrigação deve objetivar a aplicação de quantidades d'água pré-estabelecidas, da maneira mais uniforme possível na área irrigada. Assim, os parâmetros uniformidade e eficiência expressam a qualidade de uma irrigação, isto é, juntos, esses parâmetros podem servir para avaliar a performance de um sistema de irrigação.

2.1 - Parâmetros de Uniformidade e Eficiência na Irrigação por Sulcos

Uma representação esquemática da distribuição espacial típica de água na irrigação de superfície, apresentada por KARMELI *et alii* (1978), está ilustrada na FIGURA 1, da qual os seguintes termos são definidos:

- Volume de água retida na zona de raízes da planta após uma irrigação, VRZ (área ABDGKA). Esta é a porção de água aplicada que permanece disponível para o uso pelas plantas, após uma irrigação;

- Volume deficiente de umidade do solo remanescente após uma irrigação, VDF (área GDEG). Este é o volume de água requerido na zona de raízes, para suprir o déficit de umidade, após uma irrigação;

- Volume de perdas por escoamento superficial no final dos sulcos, VFW (área BCDB);

- Volume de perdas por percolação profunda abaixo da zona de raízes, VDP (área KGHK);

- Volume de água aplicada, VAP (área ACDIA);

- Volume de água requerida na zona de raízes para suprir o déficit total de umidade do solo, VNW (área ABEKA);

- Volume total de água infiltrada, VIN (área ABDGIA);

- Distribuição espacial real de água infiltrada, ASD (linha IHGD);

- Lâmina média de água infiltrada, DAP (linha JHF).

Baseado na FIGURA 1, o conceito de eficiência de aplicação d'água (E_a) definido por ISRAELSEN (1950), fica sendo:

$$E_a = \frac{VRZ}{VAP} \times 100 \quad (01)$$

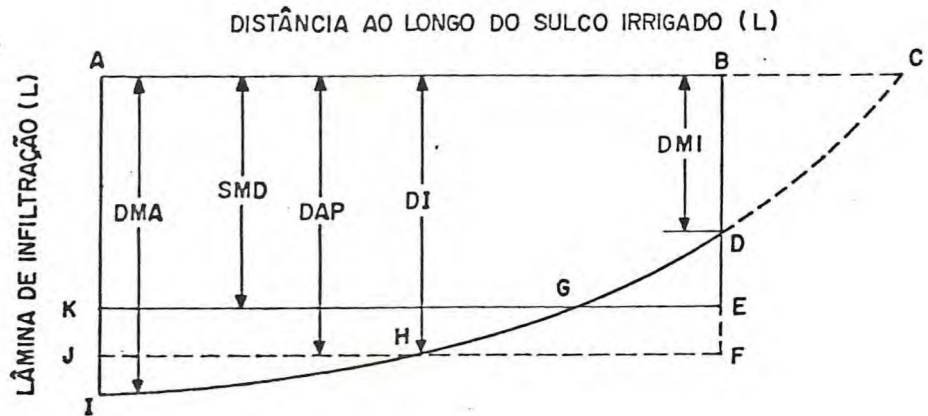


FIGURA 1 - Distribuição das lâminas infiltradas ao longo de um sulco irrigado.

- SMD - déficit de umidade do solo antes da irrigação (lâmina);
- DAP - lâmina média de água infiltrada;
- DI - lâmina infiltrada em qualquer ponto ao longo do sulco;
- DMI - lâmina mínima infiltrada ao longo do sulco;
- DMA - lâmina máxima infiltrada ao longo do sulco;
- GDEG - déficit de umidade do solo após a irrigação; (VDF);
- KGHIK - volume de perdas por percolação profunda (VDP);
- BCDB - volume de perdas por escoamento superficial (VTW) e
- ACDA - volume total de água aplicada (VAP).

Embora este termo (E_a) geralmente descreva a porcentagem de água aplicada que pode ser benéficamente usada por uma cultura, ele é inadequado na descrição da qualidade global de uma irrigação, visto que ele não indica a uniformidade real de irrigação, o total de perdas por percolação ou o grau de sub-irrigação (KARMELI et alii (1978)).

CHRISTIANSEN (1942), citado por KARMELI et alii (1978) descreveu um coeficiente de uniformidade (CU), de acordo com a FIGURA 1, como sendo:

$$CU = 1,00 - \frac{\Sigma DI}{nDAP} \times 100 \quad (02)$$

onde, ΣDI = somatório das lâminas infiltradas; e
 n = número de observações.

HANSEN (1960) usou três conceitos para melhor descrever a qualidade de uma irrigação. A eficiência de armazenamento (E_s) da água, a qual indica a porcentagem da água requerida na zona das raízes e que é realmente fornecida às plantas após uma irrigação; a eficiência de distribuição da água (E_d), que é idêntico ao coeficiente de uniformidade de CHRISTIANSEN, e a eficiência de uso consuntivo (E_u), que mostra a capacidade da planta usar a água armazenada:

$$E_s = \frac{VRZ}{VNW} \times 100 \quad (03)$$

$$E_u = \frac{Wu}{Wd} \times 100 \quad (04)$$

onde, Wu = uso consuntivo de água pela cultura (transpiração e água retida nos tecidos da planta); e
 Wd = quantidade de água extraída da zona de raízes.

Admitindo que as perdas por percolação e por escoamento superficial podem trazer de uma maneira significativa, diferenças ao meio ambiente e impactos econômicos, KARMELI *et alii* (1978) propôs que dois índices, os quais relacionam perdas por percolação e escoamento superficial, fossem usados para ajudar a descrever um sistema de irrigação. Esses índices, com referência à FIGURA 1, são:

- Índice de escoamento superficial (ETW):

$$ETW = 1 - \frac{VTW}{VAP} \quad (05)$$

- Índice de perdas por percolação profunda (EDP):

$$EDP = 1 - \frac{VDP}{VAP} \quad (06)$$

Com isto, constata-se que as percentagens com relação ao total de água aplicada, perdidas por escoamento superficial (PTW) e por percolação profunda (PDP), são, de uma maneira simples:

$$PTW = (1 - ETW) \times 100 = \frac{VTW}{VAP} \times 100 \quad (07)$$

$$PDP = (1 - EDP) \times 100 = \frac{VDP}{VAP} \times 100 \quad (08)$$

e a eficiência de aplicação poderá ser expressa por:

$$E_a = 100 - (PTW + PDP) \quad (09)$$

A distribuição da água infiltrada em um campo irrigado, foi descrita por KARMELI et alii (1978) através de uma curva adimensional, como mostra a FIGURA 2, para um sistema de irrigação por sulcos, com a lâmina infiltrada de crescendo uniformemente ao longo do sulco de irrigação. A lâmina de água é adimensionalizada dividindo-a pelo déficit de umidade médio do solo (DUS). A distância ao longo dos sulcos é adimensionalizada dividindo-a pelo comprimento total do sulco (L). A coordenada C é medida a partir do final do sulco de irrigação.

De acordo com os parâmetros de qualidade selecionados, segundo KARMELI et alii (1978), uma irrigação na qual toda a água que é aplicada permanece nas zonas de raízes e não há déficit de umidade após a irrigação, pode tratar-se de uma irrigação na qual E_a e E_s são 100%; a PDP e PTW são 0% e as constantes da distribuição adimensional, são: $c = 1$; $a = 0$ e $b = 0$. Este mesmo autor afirma que uma combinação ótima dos parâmetros de qualidade deve levar em consideração fatores econômicos, a cultura, o clima, o meio ambiente e fatores sociais. Para um dado sistema, uma diminuição na E_s pode resultar em perdas de produtividade devido ao estresse hídrico e acumulação de sais, mas poderá proporcionar economia de energia e trabalho. Mudanças no projeto ou operação do sistema para se obter uma E_s mais alta, poderá conduzir a valores mais elevados de PDP e PTW e, pode resultar ainda, em um acréscimo no custo total de água, custo de drenagem, empobrecimento do solo devido às perdas de fertilidade e aumento no custo devido ao uso de um sistema de reutilização do escoamento superficial.

A eficiência total de um sistema de irrigação pode ser aumentada pela melhoria da eficiência de aplicação de água. Na irrigação de superfície, a eficiência de aplicação de água é influenciada principalmente pelo total de água aplicada, pelas características de infiltração do solo e pela taxa de avanço da água sobre a superfície do solo (WILLARDSON & BISHOP, 1967).

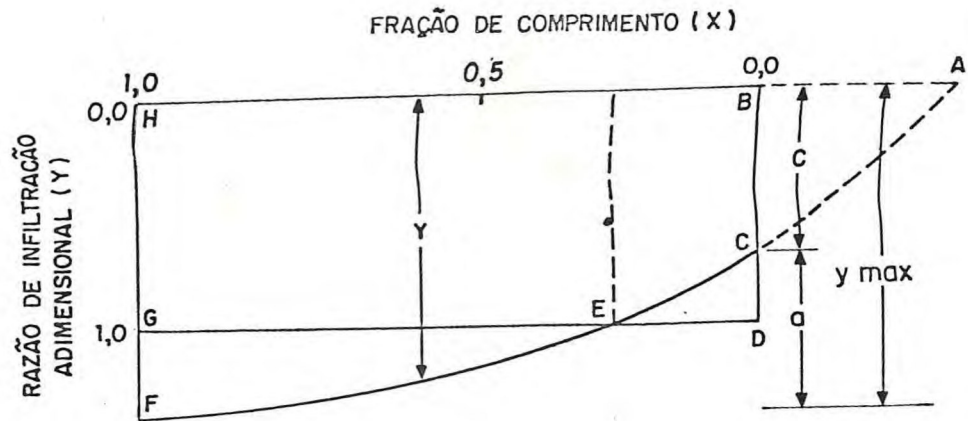


FIGURA 2 - Curva de distribuição adimensional para a irrigação superficial.

$$Y = c + a X^b$$

Y - razão de infiltração adimensional (lâmina infiltrada/déficit de umidade médio do solo);

$$a = Y_{\max} - Y_{\min};$$

b = expoente de distribuição;

HAFH - volume total aplicado, adimensional;

GEFG - volume de perdas por percolação profunda, adimensional;

DCED - volume de déficit de umidade do solo remanescente após uma irrigação, adimensional; e

BACB - volume de perdas por escoamento superficial, adimensional.

Em termos de qualidade da irrigação por sulcos, MERRIAM & KELLER (1978) apresentaram os seguintes parâmetros:

a) Eficiência de distribuição (E_d): A relação entre a lâmina mínima absoluta infiltrada e a lâmina média infiltrada, descreve a uniformidade de infiltração da água, sem considerar a adequabilidade da irrigação.

$$E_d = \frac{\text{Lâmina mínima absoluta infiltrada}}{\text{Lâmina média infiltrada}} \times 100 \quad (10)$$

b) Eficiência potencial de aplicação (E_{pa}): A E_{pa} é observada quando a lâmina mínima absoluta de água infiltrada satisfaz o déficit de umidade admissível para manejo (DUAM). Se um irrigante está aplicando uma lâmina d'água no final do sulco menor que o DUAM, a eficiência deverá ser calculada para a condição do DUAM, conforme:

$$E_{pa} = \frac{\text{DUAM}}{D(\bar{x})} \times 100 \quad (11)$$

onde a lâmina média d'água a ser aplicada no campo para atingir o DUAM, será:

$$D(\bar{x}) = 96,3 \times \frac{\text{Q aplicada (gpm)} \times \text{tempo aplicação para o DUAM (hr)}}{\text{espaçamento (ft)} \times \text{comprimento dos sulcos (ft)}} \quad (12)$$

c) Eficiência de aplicação (E_a): A E_a descreve a porção da água retida no solo e que está disponível para o uso consuntivo no ponto de aplicação da lâmina mínima absoluta. Neste caso a lâmina média aplicada será:

$$D(\bar{x}) = 96,3 \times \frac{Q \text{ aplicada (gpm)} \times \text{tempo aplicação da irrigação (hr)}}{\text{espaçamento (ft)} \times \text{comprimento dos sulcos (ft)}} \quad (13)$$

Então, a E_a será:

$$E_a = \frac{D(f)}{D(\bar{x})} \times 100 \quad (14)$$

$D(f)$ = Lâmina infiltrada no final dos sulcos.

As equações 10, 11, 12, 13 e 14 são apresentadas nas unidades internacionais (ABNT) por BERNARDO (1982).

Realizando testes de irrigação por sulcos, MERRIAM & KELLER (1978) puderam chegar às seguintes conclusões:

- Um alto valor de E_d indica que pouca água se in filtra a mais no início dos sulcos, em relação ao final;

- Os valores de E_{pa} e E_a sendo baixos, com alta E_d e pouca ou nenhuma água se perdendo por percolação pro funda, indica que está havendo grandes perdas por escoamen to superficial.

Segundo WILLARDSON & BISHOP (1967) as eficiências de aplicação conseguidas no campo são, geralmente, inferio res a 60%. A baixa eficiência de aplicação pode ser atribui da principalmente à irrigação em excesso. Algumas perdas por percolação profunda são inevitáveis próximo à cabeceira dos sulcos para permitir que o solo, no final dos sulcos, fique completamente irrigado.

Existem na literatura, muitas formas de expressar a qualidade de uma irrigação, mas neste trabalho serão usadas a eficiência de aplicação (ISRAELSEN, 1950), eficiência de armazenamento (HANSEN, 1960), eficiência de distribuição (MERRIAM & KELLER, 1978) e eficiência potencial de aplica

ção (MERRIAM & KELLER, 1978), além das perdas por escoamento superficial e percolação profunda.

2.2 - Fatores que Afetam a Qualidade da Irrigação por Sulcos

Diversos fatores, tais como, infiltração, tempo de avanço e recessão, geometria do sulco, rugosidade, comprimento dos sulcos e vazão, influenciam a qualidade da irrigação por sulcos. Portanto, esses fatores e suas técnicas de medição no campo, serão aqui revisados.

As características de infiltração do solo, declividade, configuração geométrica, rugosidade e comprimento dos sulcos, vazão e o tempo total de irrigação são os fatores básicos que afetam a fase de avanço da água sobre a superfície do solo (KARMELI et alii, 1978).

Segundo CHRISTIANSEN et alii (1966), uma análise matemática da aplicação de água pelo método de irrigação por sulcos envolve como principal variável a taxa de infiltração do solo, já que a infiltração é um dos principais fatores que afetam o avanço da água e, conseqüentemente, sua distribuição.

De acordo com KARMELI et alii (1978), a taxa de infiltração na irrigação por sulcos, tem as dimensões de velocidade (L/T) e é a lâmina d'água que infiltra no perfil do solo na unidade de tempo. Ela também pode ser expressa através do volume de água absorvido por unidade de comprimento de sulco e de tempo $L^3/(LT)$. Quando a taxa de infiltração for expressa como L/T a infiltração acumulada será expressa como uma lâmina (L). Quando a taxa de infiltração for expressa como $L^3/(LT)$, a infiltração acumulada será expressa como L^3/L .

Muitos solos exibem inicialmente alta taxa de infiltração, que decresce com o tempo e, eventualmente, atinge

um valor aproximadamente constante chamado "taxa ou velocidade de infiltração básica" (HILLEL, 1970 e BAVER et alii 1973). A dificuldade em estabelecer as características de infiltração de um solo sob condições de campo deve-se à variabilidade, no campo e espaço, dos fatores que afetam a infiltração (KARMELI et alii 1978).

* Segundo ISRAELSEN (1963); HILLEL (1970); BAVER et alii (1973) e REICHARDT (1975), os fatores que mais influenciam a taxa de infiltração do solo, são: a permeabilidade, as condições da superfície e o conteúdo inicial de umidade do solo, que por sua vez, estão diretamente relacionados com a porosidade, da qual a condutividade hidráulica depende substancialmente, especialmente quando o solo se aproxima da saturação. A taxa na qual a água se move no solo durante uma irrigação por sulcos, também depende do espaçamento, forma e dimensão dos sulcos, da compactação dos lados e fundo dos mesmos e do efeito da velocidade de fluxo sobre a superfície (DAVIS & FRY, 1963). O tipo de argila, bem como o total de argila, podem causar rachaduras no solo pelo seu dessecação, o que causará inicialmente uma alta taxa de infiltração; essa argila pode dilatar rapidamente com o umedecimento, o que reduzirá enormemente a taxa de infiltração (BAVER et alii, 1973 e KARMELI et alii, 1978).

2.2.1 - Técnicas para a Determinação das Características de Infiltração

Existem diversas técnicas para se determinar as características de infiltração do solo. Dentre elas, destacam-se os métodos do cilindro infiltrômetro, do sulco infiltrômetro, de entrada e saída do fluxo d'água num dado segmento de sulco e a técnica do balanço de volume.

2.2.1.1 - Técnica do Cilindro Infiltrômetro

Um cilindro infiltrômetro mede primordialmente a taxa de movimentação vertical de água no solo a partir de um reservatório de superfície, se ele estiver protegido por um outro cilindro cheio d'água (KARMELI et alii 1978). No cilindro infiltrômetro sem proteção do anel externo, o movimento d'água é inicialmente vertical, até que a água passe abaixo da parede interna do cilindro. Após este tempo, o movimento passa a ser tanto vertical como radial (BONDURANT, 1957).

Segundo BONDURANT (1957) e KARMELI et alii (1978), suas vantagens são: uso de pequena quantidade de água para teste e facilidade para transporte e instalação. As suas desvantagens são: os efeitos do fluxo d'água sobre a superfície do solo não são considerados; distúrbios no solo durante a instalação podem significativamente afetar a infiltração; entrada de ar sob a superfície do reservatório e entre os cilindros reduzem a infiltração; e, em sulcos, a infiltração lateral através das paredes dos mesmos não é considerada (Ver descrição do método no APÊNDICE B).

2.2.1.2 - Técnica do Sulco Infiltrômetro

O sulco infiltrômetro (BONDURANT, 1957) mede a infiltração de água no perfil do solo sobre um curto segmento de sulco a partir de um pequeno reservatório sobre a superfície de armazenamento. Este método foi projetado para aproximar às condições existentes num sulco durante uma irrigação, e medir diretamente a taxa de infiltração (Ver descrição no APÊNDICE B).

O sulco infiltrômetro difere do cilindro infiltrômetro porque no primeiro a área teste é um sulco real e portanto, considera a infiltração lateral da água através das paredes (BONDURANT, 1957).

Segundo BONDURANT, (1957) e KARMELI et alii (1978),

suas vantagens são: necessita de pouco suprimento d'água e o nível da água no sulco pode ser constante para representar a lâmina aplicada durante a irrigação, e, além do mais, o infiltrômetro é um sulco real. As desvantagens são: o infiltrômetro não considera a variabilidade das características do solo ao longo dos sulcos, a não ser que um grande número de testes sejam efetuados; e, ainda, o infiltrômetro não toma em conta os efeitos de mudanças na secção transversal do sulco durante a irrigação nem a orientação das partículas do solo e depósitos causados pelo escoamento da água.

2.2.1.3 - Técnica de Entrada e Saída do Fluxo D'água num Segmento de Sulco

Este método (Ver descrição no APÊNDICE B) permite determinar a taxa de infiltração no sulco, nas condições normais de irrigação, pela determinação da vazão de entrada e de saída do fluxo d'água que passa pelo mesmo (CRIDDLE et alii, 1956 e MERRIAM & KELLER, 1978).

De acordo com CRIDDLE et alii (1956) e KARMELI et alii (1978) suas vantagens são: A influência do movimento d'água nas características de infiltração é considerada e uma substancial porção do sulco (usualmente 30 a 75 m) fornece uma grande amostra da área de infiltração. As suas desvantagens são: muitos instrumentos de medição de vazão em sulcos, geralmente, obstruem o fluxo causando uma elevação da lâmina d'água no sulco teste, aumentando assim a área da secção transversal de infiltração (isto ocorre especialmente em terrenos com pequena declividade); o aumento da superfície de armazenamento entre os instrumentos de medição dos fluxos é geralmente abandonado, e assume-se que a diferença entre o fluxo de entrada e o de saída é a taxa de infiltração para a porção de sulco entre os dois instrumentos de medição.

2.2.1.4 - Técnica do Balanço de Volume para Calcular a Taxa de Infiltração

CHRISTIANSEN et alii (1966) apresentaram uma técnica para calcular a taxa de infiltração a partir do método do balanço de volume de irrigação por sulcos. Este método usa o comprimento total do sulco como infiltrômetro; o sulco não é danificado; as condições normais da prática de irrigação serão satisfatoriamente consideradas se uma razoável aproximação do armazenamento superficial puder ser obtida; somente os dados de avanço e área da secção transversal ao fluxo são necessários para a determinação das características de infiltração. No entanto, a equação de infiltração é confiável somente durante o estágio inicial da irrigação, isto é, os dados são obtidos somente durante o tempo requerido para a frente de avanço atingir o final do sulco de irrigação; acuradas estimativas da lâmina média superficial são difíceis de se obter.

Resultados de estudos realizados por DAVIS & FRY (1963) em solos argilo-arenosos, mostrou que a relação entre a determinação da infiltração pelo método do balanço de volume e do sulco infiltrômetro variou com a lâmina d'água no infiltrômetro e com o período de tempo. Os mesmos autores encontraram resultados em que a taxa de infiltração de terminada com cilindro-infiltrômetro, em todos os casos foi de 1/2 a 1/4 do valor das determinações feitas pelos outros métodos.

Apesar dos procedimentos para medir a infiltração serem bastante conhecidos, a determinação deste parâmetro ainda é falha devido à variabilidade espacial no mesmo campo, de uma irrigação a outra, bem como, de ano a ano (SOUZA 1981).

Segundo DAVIS & FRY (1963), muitos estudos adicionais poderão ser requeridos antes que um infiltrômetro possa ser usado com confiança para medir a taxa de infiltração

em sulcos. Esses estudos deverão incluir os fatores de velocidade de fluxo, textura e estrutura do solo, rachaduras no solo, forma e espaçamento dos sulcos, lâmina d'água no sulco e no infiltrômetro e o efeito de práticas agrícolas.

De acordo com NANCE Jr. & LAMBERT (1968), um infiltrômetro deve ser pequeno o suficiente para ser transportado facilmente, ser simples, ter movimento de água na área de teste para simular as condições naturais do processo de irrigação, ter a lâmina d'água constante e controlada e não necessitar de toda área para teste. DAVIS & FRY (1963) concluíram que sempre que possível, a taxa de infiltração, no caso de irrigação por sulcos, deverá ser determinada num sulco com fluxo d'água.

2.2.2 - A Teoria da Infiltração

Em geral, a predição da taxa de infiltração do solo envolve dois passos distintos: a adoção de uma função (equação de infiltração) para ser usada e a determinação dos valores das constantes numéricas da equação (SOUZA, 1981). O número de constantes numéricas depende da equação de infiltração escolhida. Se "z" é definido como o volume de água infiltrado por unidade de área de infiltração do sulco e "t" como o tempo de oportunidade de infiltração, então z poderá ser expresso, por exemplo, por uma das seguintes equações:

- Infiltração Acumulada

$$z = K t^a \quad (\text{KOSTIAKOV}) \quad (15)$$

$$z = K t^a + c_1 \quad (\text{SCS}) \quad (16)$$

$$z = K t^{0,5} + At \quad (\text{PHILIP}) \quad (17)$$

- Taxa de Infiltração

$$I = \frac{dz}{dt} = aK t^{a-1} \quad (18)$$

$$I = aK t^{a-1} \quad (19)$$

$$I = 0,5 K t^{-0,5} + A \quad (20)$$

nas quais K, a, c₁ e A são constantes.

Os métodos de determinação das constantes de infiltração compreendem os testes de infiltração e a técnica do balanço de volume (SOUZA, 1981).

Em projetos, experimentos ou em avaliações de áreas irrigadas, duas equações de infiltração têm sido usadas (KARMELI et alii 1978): a equação de KOSTIAKOV (1932) e a equação de KOSTIAKOV modificada, as quais são empíricas. A equação de KOSTIAKOV é a equação (15). A equação de KOSTIAKOV modificada é:

$$i = K't^{n'} + C \quad (21)$$

onde, i = taxa de infiltração no tempo t , e
 C = taxa de infiltração num tempo $t = \infty$

Integrando a equação (21) obtêm-se a infiltração acumulada:

$$D = A' t^{B'} + Ct \quad (22)$$

$$\text{Onde, } A' = \frac{K}{n' + 1} \quad (23)$$

$$B' = n' + 1 \quad (24)$$

2.2.3 - Fase de Avanço da Água na Irrigação por Sulcos

A fase de avanço é o período de tempo que vai do início da irrigação até o momento em que o fluxo d'água atinge o final do sulco (I - pai WU & BISHOP, 1970; SAKKAS & STRELKOFF, 1974 e KARMELI et alii 1978).

* A taxa de avanço na irrigação superficial é inicialmente dependente da vazão, secção transversal ao fluxo, características de rugosidade, declividade e características de infiltração (CRIDDLE et alii 1956; SAKKAS & STRELKOFF, 1974 e KARMEI et alii 1978). A vazão de entrada durante a fase de avanço é assumida constante em muitos estudos para cálculos do avanço. Entretanto, sob condições de campo, a vazão varia de um sulco para outro e também com o tempo durante a irrigação. A secção transversal do sulco varia de irrigação para irrigação devido ao escoamento e a sedimentos depositados pela passagem da água. As características de rugosidade dos sulcos variam com o tempo e espaço, e são dependentes também do crescimento vegetativo. A rugosidade, a despeito de sua variabilidade, é caracterizada por um simples parâmetro, tal como o "n" de MANNING. A declividade dos sulcos determina a taxa na qual a energia é transmitida ao escoamento da água.

Segundo SAKKAS & STRELKOFF (1974), KARMEI et alii (1978) e SOUZA (1981) os métodos para se obter uma solução para a taxa de avanço na irrigação situam-se em três categorias principais: hidrodinâmico, zero-inércia e balanço de volume.

O método hidrodinâmico é baseado na solução das equações de conservação de massa e energia (ou momento linear), as quais descrevem as relações entre lâmina de fluxo e a velocidade num canal. O método do balanço de volume é baseado somente no princípio de conservação da massa. O modelo zero-inércia, foi desenvolvido por STRELKOFF (1973) e é aplicado para fluxo em irrigação por tabuleiros em declive. SOUZA (1981) adaptou este modelo para a irrigação por sulcos.

WILKE & SMERDON (1965) desenvolveram uma curva adimensional para solucionar direta e corretamente o problema de avanço em irrigação por sulcos e tabuleiros em declive, nos casos em que a infiltração satisfaz a equação (15). O método provê um procedimento para rapidamente determinar a relação entre a vazão e a posição da frente de avanço.

KARMELI et alii (1978) estimaram a curva de avanço usando a técnica de WILKE & SMERDON (1965), que é uma adaptação do método do balanço de volume. Eles escolheram esta técnica entre as demais discutidas na literatura por ser de simples aplicação e por ter sido comprovada por várias pesquisas de campo.

Segundo WILLARDSON & BISHOP (1967) a vazão, declividade, infiltração e comprimento do sulco determinam a verdadeira forma da curva de avanço. A forma da curva de avanço influencia a proporção entre escoamento superficial e perdas por percolação profunda.

O avanço da água e a infiltração não são independentes um do outro. Pela combinação de uma equação para o avanço da água com uma expressão para a lâmina infiltrada acumulada e integrando o resultado da equação, o total de água absorvida pelo solo e perdas por percolação profunda podem ser determinadas (WILLARDSON & BISHOP, 1967).

2.2.4 - Fase de Recessão na Irrigação por Sulcos

Segundo I-pai WU & BISHOP (1970), a fase de recessão é o período de tempo que vai do corte do fluxo até o desaparecimento da água da superfície do solo.

A condição de fluxo durante a fase de recessão é a mesma do fluxo de avanço durante uma irrigação, a qual é instável, não uniforme e espacialmente variado. Ela pode ser expressa por uma série de equações diferenciais, dentre elas, a equação de continuidade e equação de movimento (I-pai WU, 1972).

De acordo com KARMELI et alii (1978), poucos modelos, altamente empíricos, têm sido sugeridos para estimar a recessão. FOK (1964) citado por KARMELI et alii (1978) propôs uma função de recessão na seguinte forma:

$$X_r = g(t - t_r)^h \quad (25)$$

onde, X_r = distância da recessão da água, medida a partir da cabeceira dos tabuleiros em declive;

g e h = constantes empíricas;

t = tempo no qual a recessão atinge X_r ; e

t_r = tempo no qual a recessão começa.

Segundo KARMELI et alii (1978), as constantes empíricas "g" e "h" são específicas para uma série de condições e podem ser obtidas através de estudos de campo.

A curva de recessão, que relaciona o tempo e a localização da estação onde a água desaparece da superfície do solo, pode ser plotada, mas segundo MERRIAM e KELLER (1978), na irrigação por sulcos ela é usualmente uma linha reta horizontal, a não ser que os dados de campo indiquem um significativo afastamento.

De acordo com estudos realizados por I - pai WU & BISHOP (1970), a relação entre o tempo de oportunidade, tempo de avanço, tempo de recessão e tempo de irrigação pode ser expressa como:

$$t_o = T_i + t_r - t_{av} \quad (26)$$

$$T_i = t_o + t_{av} - t_r \quad (27)$$

onde, t_o = tempo de oportunidade para a água infiltrar-se em um ponto qualquer no sulco;

T_i = tempo de irrigação;

t_r = tempo de recessão; e,

t_{av} = tempo de avanço.

Segundo HAMAD & STRINGHAM (1978), a erosão do solo é o fator que mais limita a irrigação por superfície para áreas moderadamente planas e para pequenas vazões. A vazão não erosiva depende de muitos fatores, sendo que os dois mais importantes são a declividade do campo e o tipo de solo.

Em estudos realizados em solos de cerrado (varzeas), classificado de acordo com a SBCS como Aluvião Eutrofico, fase terraço, GOMIDE (1982) obteve experimentalmente 1,8 l/seg como vazão máxima não erosiva, para a declividade média dos sulcos de 0,5%. Determinando-se a vazão máxima não erosiva pelas equações empíricas propostas por GARDNER, citado por BERNARDO (1980) e SCS-U.S.D.A. (1974), ele encontrou respectivamente 1,4 e 1,2 l/seg, de acordo com a declividade e tipo de solo estudado. Verificou-se que as fórmulas subestimaram o valor da vazão máxima não erosiva obtida experimentalmente.

Dois métodos para determinação da vazão de redução em relação à vazão inicialmente aplicada (vazão de "cutback") foram desenvolvidas por WILKE & SMERDON (1969). O primeiro procedimento envolve uma análise do balanço de volume, já o segundo envolve uma resolução numérica da equação de movimento.

Na realização de testes na irrigação por sulcos, MERRIAM & KELLER (1978) recomendam fazer o corte parcial da vazão inicial usando-se inicialmente sifões de menor diâmetro; no momento em que o fluxo atingir o final do sulco ou algum tempo depois, um ou mais sifões deverão ser removidos para reduzir a vazão.

Com a redução da vazão de 1,8 l/seg (não erosiva) para 0,6 l/seg, em sulcos de 190 m e em solos de cerrado (varzeas), GOMIDE (1982) conseguiu aumentar a eficiência de aplicação de água de 22,4% para 42,7%, sendo que esta redução de vazão ocorreu 13 min após a frente de avanço da água ter atingido o final dos sulcos.

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no período de setembro a novembro de 1982, em solo aluvial da área experimental do DNOCS, no setor "K" do perímetro irrigado de Morada Nova, no vale do rio Banabuiú, Ceará, cujas coordenadas geográficas e características climáticas são apresentadas na TABELA 27 do APÊNDICE A. As características dos sulcos estão apresentadas na TABELA 1.

TABELA 1 - Características dos sulcos.

Forma	Declividade (m/m)	Comprimento (m)	Espaçamento (m)
Parabólica	0,00644	80,0	0,80

3.1 - Procedimento de Campo

Utilizou-se a cultura do milho (*Pennisetum americanum*) que segundo LIRA (1981), possui 80% do seu sistema radicular situado até a profundidade de 10,0 cm. Neste estudo, as análises foram efetuadas para a camada de solo de 0 a 20,0 cm de profundidade.

O experimento foi conduzido em nove batérias de sulcos. Cada batéria foi composta de três sulcos, sendo dois laterais chamados bordadura e um central, chamado sulco-teste. As bordaduras receberam o mesmo tratamento do sulco teste correspondente. As batérias de sulcos foram separadas entre sí por dois sulcos de proteção, os quais receberam o mesmo tratamento da bateria anterior, conforme FIGURA 3. Realizou-se duas repetições por batéria, totalizando dezoito testes.

Antes dos testes propriamente ditos, foram realizadas quatro irrigações de assentamento, para que os sulcos atingissem as condições normais de forma e rugosidade.

A primeira batéria de sulcos recebeu como tratamento uma vazão média de 0,753 l/seg; a segunda recebeu inicialmente 1,30 l/seg, sendo que 15 min após a frente de avanço da água ter atingido a última estação, reduziu-se esta vazão para 0,77 l/seg; a terceira, 1,337 l/seg como tratamento. A quarta, quinta e sexta batérias foram descartadas deste estudo por não ter havido correlação significativa entre os dados de altura e largura superficial das lâminas d'água, necessários para a determinação dos coeficientes de rugosidade de MANNING. A sétima batéria recebeu 0,764 l/seg; a oitava 1,37 l/seg, sendo que 15 min após a frente de avanço da água ter atingido a última estação, reduziu-se esta vazão para 0,75 l/seg, e a nona, 1,330 l/seg como tratamento. O tempo total de irrigação foi de 02h para todos os testes.

Tentou-se não alterar as práticas de irrigação (exceto variar a vazão) ocorrentes na área, visando a aplicabilidade dos resultados nas práticas de irrigação local. A vazão utilizada na área experimental correspondia à vazão proporcionada por um sifão de uma polegada de diâmetro, flexível, sem controle da carga hidráulica.

Todas as determinações (vazão de entrada e saída, tempos de avanço e recessão, testes de infiltração) foram realizadas nos chamados sulcos-testes, exceto as alturas e

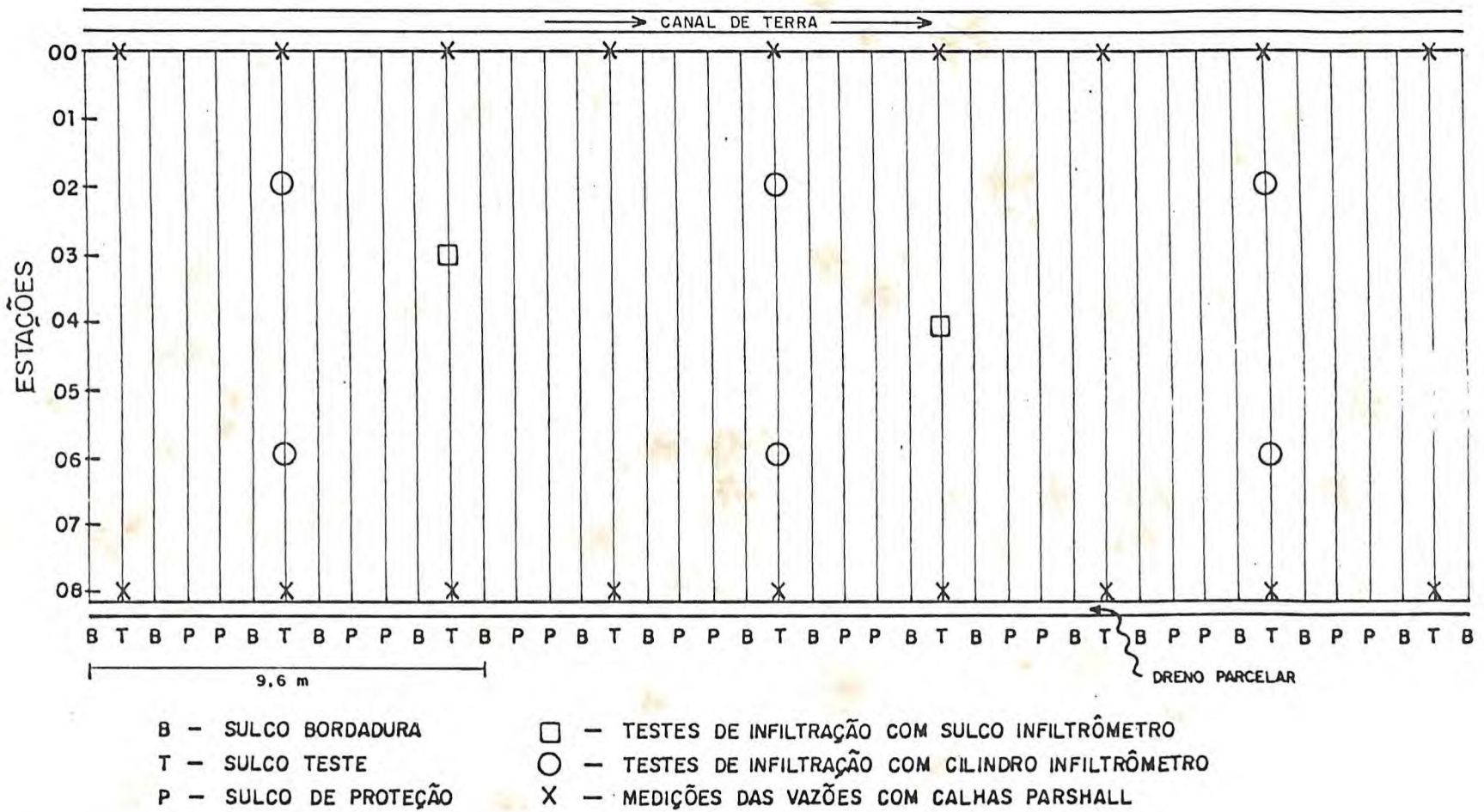


FIGURA 3 - Croquis do campo experimental.

larguras das lâminas d'água na cabeceira dos sulcos, que foram determinadas também nos sulcos bordadura. Em todos os casos foram tomados os cuidados necessários para assegurar um mínimo de distúrbio nos sulcos-teste.

Uma vez selecionada a área, baseado no comprimento e declividade dos sulcos e uniformidade do solo, seguiu-se o procedimento descrito a seguir para a obtenção dos dados requeridos.

No campo, os sulcos-teste foram demarcados em intervalos de 10 m para locação das estações. A primeira estação foi assentada a 05 m do início dos sulcos para promover a estabilidade do fluxo antes da chegada na primeira calha Parshall. A declividade dos sulcos foi considerada constante durante o período de estudo.

Determinaram-se as vazões de entrada e saída, assentando uma calha Parshall de duas polegadas de garganta imediatamente antes das estações "00" e outra de uma polegada imediatamente após as estações "08", como pode ser visto na FIGURA 3. A primeira medição da vazão de entrada e de saída foi realizada 01 min após a frente de avanço da água atingir as calhas.

Para os testes de infiltração pelo método de entrada e saída do fluxo d'água, usou-se as medições das vazões observadas durante todo período de irrigação.

Nos testes com sulco-infiltrômetro a água foi mantida aproximadamente no mesmo nível da água aplicada normalmente nos sulcos de irrigação, para a vazão de 1,337 l/seg (Veja descrição dos três métodos no APÊNDICE B). Usou-se as equações de KOSTIAKOV (equações 15 e 18) para representar a infiltração acumulada e a velocidade de infiltração.

As medições de altura e largura superficial das lâminas d'água na cabeceira dos sulcos-teste e sulcos-bordadura, foram determinadas a cada 1/3 do tempo de irrigação, com auxílio de uma escala milimétrica. Essas medições foram usadas na determinação do coeficiente de rugosidade dos sulcos.

Considerou-se que os sulcos são de forma parabólica, definidos pela equação,

$$B = C Y^M \quad (28)$$

na qual B é a largura da superfície livre da água, Y é a altura da lâmina d'água e, C e M são duas constantes. M é um fator de forma que pode representar a secção retangular, parabólica convexa ou triangular ($M = 0$, $0 < M < 1$, e $M = 1$, respectivamente).

A área molhada é dada pela integral da equação(28):

$$A_o = \frac{BY}{M + 1} \quad (29)$$

Segundo SOUZA (1981), em sulcos de forma parabólica, quando Y for muito pequeno em relação a B , o perímetro molhado é aproximadamente igual à largura da superfície livre da água, portanto,

$$P_m \approx B = C Y^M \quad (30)$$

O raio hidráulico é obtido através da seguinte equação:

$$R_h = \frac{A_o}{P_m} \quad (31)$$

Finalmente, " n " (coeficiente de rugosidade) é obtido pela equação de MANNING:

$$n = \frac{A_o R_h^{2/3} S_o^{1/2}}{Q} \quad (32)$$

onde B é dado em metros, A_o é dado em m^2 , R_h em metros, S_o em m/m e Q em m^3/seg .

O tempo no qual a frente de avanço da água atingiu cada estação (tempo de avanço) foi anotado em todos os sulcos testes para as estações espaçadas de 10 m. A recessão em todas as estações foi anotada como o tempo no qual a água desaparecia completamente da superfície do solo.

Para controle de uma vazão relativamente constante nos sulcos-teste e bordadura, regulava-se o nível da água no canal de irrigação através de piquetes na direção destes sulcos, com a cota 1950cm. As pontas inferiores dos sifões também foram mantidas na mesma altura, através de piquetes com a cota 1895cm de maneira que os sifões funcionassem com uma carga hidráulica média de 55 cm.

3.2 - Parâmetros de Uniformidade e Eficiência na Irrigação por Sulcos

A partir dos dados de densidade aparente, capacidade de campo (umidade a 1/3 de atm), ponto de murcha permanente (umidade a 15 atm) e considerando que a planta consumiria apenas 50% da água disponível (f), determinou-se a lâmina real necessária a ser aplicada em cada irrigação, através da expressão:

$$Y_{rn} = \frac{(CC - PM)}{100} \times D_a \times Z_r \times f, \quad \text{sendo} \quad (33)$$

- Y_{rn} = lâmina real necessária, em mm;
 CC = capacidade de campo, % em peso de solo seco;
 PM = ponto de murcha permanente, % em peso de solo seco;
 D_a = densidade aparente do solo, g/cm³;
 Z_r = profundidade do sistema radicular, em mm; e
 f = fator cultural, variando entre zero e um ($0 < f < 1$).

Utilizando-se as lâminas infiltradas em cada estação, calculadas pelas equações de infiltração, obteve-se a eficiência de distribuição através da expressão (10), proposta por MERRIAM & KELLER (1978).

Calculou-se a eficiência de aplicação d'água através da equação (1), proposta por ISRAELSEN (1950) e a eficiência de armazenamento d'água através da equação (3), proposta por HANSEN (1960).

Obteve-se a eficiência potencial de aplicação do sistema de irrigação estudado, usando-se as equações (11) e (12), propostas por MERRIAM & KELLER (1978) e adaptada para o sistema de unidades internacionais (ABNT) por BERNARDO (1982).

3.3 - Metodologia de Projeto para a Irrigação por Sulcos

As equações de projeto para a irrigação por sulcos estudadas foram desenvolvidas pelo SCS-USDA (1980, Unedited draft) para descrever a relação entre o comprimento do sulco (L), tempo de aplicação d'água (T_{co}), vazão (Q), perdas por percolação profunda (Z_p), perdas por escoamento superficial (Y_{ro}) e eficiência de aplicação d'água (E_a) para valores de projeto selecionados de lâmina de aplicação (Y_{rn}), família de infiltração do solo (I_f) e espaçamento dos sulcos (W). Essas equações foram compiladas na sua forma original e, portanto, os dados

deverão entrar em unidades Inglesas. Essas equações não foram convertidas para as unidades internacionais de medidas devido ao desconhecimento da metodologia para a obtenção das constantes numéricas, as quais são empíricas.

O SCS-USDA (1980, Unedited draft) apresenta diferentes equações de projeto e procedimentos para cada um dos três tipos de irrigação por sulcos ou corrugação:

- 1 - sulcos ou corrugações em declive e abertos ao final, com vazão constante;
- 2 - sulcos em declive e abertos ao final com redução da vazão inicial; e,
- 3 - sulcos em nível e fechados ao final.

Neste estudo serão analisados somente os dois primeiros tipos.

- Equações para Sulcos em Declive e Abertos ao Final, com Vazão Constante:

As equações para projeto foram desenvolvidas para os seguintes itens, que devem ser determinados na elaboração de projetos de irrigação por sulcos: (a) perímetro molhado (P_m); (b) tempo de avanço (T_{av}); (c) tempo de oportunidade de infiltração (T_o); (d) lâmina bruta de aplicação (Y_b); (e) lâmina infiltrada (Z); (f) comprimento selecionado (L); (g) infiltração média para o comprimento total do sulco (Z_{oL}); (h) perdas por escoamento superficial (Y_{ro}); (i) perdas por percolação profunda (Z_p) e (j) eficiência de aplicação (E_a). Todas as lâminas são expressas como lâminas equivalentes ao espaçamento dos sulcos.

- Equações para Sulcos em Declive e Abertos ao Final, com Redução da Vazão Inicial:

O volume de perdas por escoamento superficial, que resulta de irrigações com vazão constante, pode ser reduzido, e a eficiência de aplicação significativamente melhorada se a técnica de redução da vazão for aplicada. A redução da vazão inicial poderá aumentar a mão de obra do projeto, entretanto, o fornecimento d'água restante poderá ser utilizado para aplicação em outras áreas, ou armazenado em reservatórios e fornecidos para outros usos.

Para o uso da técnica da redução parcial da vazão inicial, assume-se que esta vazão (inicial) pode ser reduzida (à metade, segundo o SCS-USDA) assim que a frente de avanço atingir o final dos sulcos.

Os detalhes para a dedução das equações utilizadas em projetos de irrigação por sulcos em declive e abertos ao final, com vazão constante e, sulcos em declive e abertos ao final com redução da vazão inicial, são apresentados pelo SCS-USDA (unedited draft) e, portanto, neste trabalho serão apresentados somente o sumário das equações utilizadas.

3.3.1 - Sumário das Equações para Projeto de Irrigação por Sulcos ou Corrugações em Declive e Abertos ao Final, com Vazão Constante:

- Perímetro molhado, P_m (pés):

$$P_m = 0,2686 \left(\frac{Q \cdot n}{\sqrt{S}} \right)^{0,4247} + 0,7462 \quad (34)$$

- Tempo de avanço, T_{av} (min):

$$T_{av} = \frac{L}{c} e \left(\frac{dL}{Q \sqrt{S}} \right) \quad (35)$$

- Tempo de oportunidade de infiltração, T_o (min):

$$T_o = T_{co} - \frac{X}{c} e^{\left(\frac{dX}{Q \sqrt{S}}\right)} \quad (36)$$

- Tempo de oportunidade médio, $T_{(o-1)}$ (min):

$$T_{(o-1)} = T_{co} - \left\{ \frac{1}{cL \left(\frac{d}{Q \sqrt{S}}\right)^2} \left[\left(\frac{dL}{Q \sqrt{S}} - 1\right) e^{\left(\frac{dL}{Q \sqrt{S}}\right)} + 1 \right] \right\} \quad (37)$$

- Lâmina bruta de aplicação, Y_b (pol):

$$Y_b = \frac{1,6041 \cdot Q \cdot T_{co}}{W \cdot L} \quad (38)$$

- Infiltração acumulada até um ponto "X", Z_x (pol).

$$Z_x = (a \cdot T_{ox}^b + 0,275) \frac{P_m}{W} \quad (39)$$

- Infiltração acumulada até o ponto de projeto, Z_n (pol):

$$Z_n = (a \cdot T_n^b + 0,275) \frac{P_m}{W} \quad (40)$$

- Infiltração média acumulada para o comprimento total do sulco, $Z_{(o-1)}$ (pol):

$$Z_{(o-1)} = \left\{ a \left[T_{(o-1)} \right]^b + 0,275 \right\} \frac{P_m}{W} \quad (41)$$

- Tempo de aplicação d'água, T_{co} (min):

$$T_{co} = T_{av} + T_n \quad (42)$$

- Perdas por escoamento superficial, Y_{ro} (pol):

$$Y_{ro} = Y_b - Z_{(o-1)} \quad (43)$$

- Perdas por percolação profunda, Z_p (pol):

$$Z_p = Y_b - Y_{ro} - Z_n \quad (44)$$

- Eficiência de aplicação, E_a (%):

$$E_a = 100 \times \frac{Z_n}{Y_b} \quad (45)$$

3.3.2 - Sumário das Equações para Projeto de Irrigação por Sulcos em Declive e Abertos ao Final, com Redução de Vazão:

- Tempo de avanço - Equação (35).

- Perímetro molhado, P_m (Equação 34) e P_{m1} (pés):

$$P_{m1} = 0,2686 \left(\frac{Q_1 \cdot n}{\sqrt{S'}} \right)^{0,4247} + 0,7462 \quad (46)$$

- Tempo de Aplicação Necessário para Infiltrar a Lâmina Desejada, T_{nc} (min):

$$T_{nc} = \left[\left(\frac{Y_{rn} \cdot W}{P_{m1}} - 0,275 \right) \frac{1}{a} \right]^{1/b} \quad (47)$$

- Tempo de aplicação d'água, T_{coc} (min):

$$T_{coc} = T_{nc} + T_{av} \quad (48)$$

- Tempo de oportunidade médio durante a fase de avanço,
 T_{oav} (min):

$$T_{oav} = \left\{ \frac{1}{cL \left(\frac{d}{Q \sqrt{S}} \right)^2} \left[\left(\frac{dL}{Q \sqrt{S}} - 1 \right) e^{\left(\frac{dL}{Q \sqrt{S}} \right)} + 1 \right] \right\} \quad (49)$$

- Infiltração média para o comprimento total do sulco,
 $Z_{(o-1)c}$ (pol):

$$Z_{(o-1)c} = \left[a(T_{coc} - T_{oav})^b + 0,275 \right] \frac{P_{m1}}{W} + \left[\frac{a(T_{oav})^b + 0,275}{W} \right] (P_m - P_{m1}) \quad (50)$$

- Lâmina bruta de aplicação, Y_{bc} (pol):

$$Y_{bc} = \frac{1,6041}{W.L} (Q \cdot T_{av} + Q_1 \cdot T_{nc}) \quad (51)$$

- Perdas por escoamento superficial, Y_{ro} (pol):

$$Y_{ro} = Y_{bc} - Z_{(o-1)c} \quad (52)$$

- Perdas por percolação profunda, Z_{pc} (pol):

$$Z_{pc} = Z_{(o-1)c} - Y_{rn} \quad (53)$$

- Eficiência de aplicação d'água, E_{ac} (%):

$$E_{ac} = 100 \times \frac{Y_{rn}}{Y_{bc}} \quad (54)$$

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - Características Físico-Hídricas do Solo

A distribuição do tamanho das partículas e classificação do solo para a profundidade de 0 a 20 cm, são apresentadas na TABELA 2.

TABELA 2 - Análise Granulométrica e Classificação Textural do Solo da Estação Experimental do DNOCS, Morada Nova - Ceará*.

Profundidade (cm)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classificação textural
0 - 20	33,35	37,77	28,88	Franco

* - Análise realizada pelo laboratório de solos do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará.

Na TABELA 3 encontram-se as percentagens de umidade em relação ao peso do solo seco, para a profundidade de 0 - 20 cm nas tensões de 0,2 ; 0,33 ; 1,0 ; 2,0 ; 4,0 ; 7,0 e 15,0 atm.

TABELA 3 - Características Físico-Hídricas de Amostras do Solo de Varzea da Estação Experimental do DNOCS, Morada Nova - Ceará.

Profundidade (cm)	% de umidade em base ao peso do solo seco*						
	Tensões (atm)						
	0,2	0,33	1,0	2,0	4,0	7,0	15,0
0 - 20	26,91	25,39	19,06	14,39	11,82	10,63	09,63

O processo de medição direta da capacidade de campo de acordo com REICHARDT (1975) é o que apresenta maior precisão. No entanto, devido a área se encontrar cultivada e a cultura em pleno estágio vegetativo, foi considerado como umidade disponível para as plantas, a faixa definida pelo limite superior de 25,39% com relação ao peso do solo seco, correspondente a uma tensão de 1/3 de atm e, pelo limite inferior, 9,63% com relação ao peso do solo seco, correspondente a uma tensão de 15,0 atm, conforme mostra a TABELA 3.

4.2 - Infiltração da Água nos Sulcos

O resultado dos testes de infiltração (entrada e saída do fluxo d'água, sulco-infiltrômetro e cilindro-infiltrômetro), foram usados no desenvolvimento das equações de infiltração da TABELA 4. Os coeficientes "K" e "a" dessas equações foram determinados através da análise de regressão dos dados médios obtidos no campo, com os coeficien

tes de correlação variando entre 0,93 e 0,98.

TABELA 4 - Equações de Infiltração Acumulada (z) e Velocidade de Infiltração (I) Obtidos por Análise de Regressão dos Dados de Campo.

Métodos	Equações		
	(Q = l/seg)	$z=Kt^a$ (cm)	$I=aKt^{a-1}$ (cm/hr)
Entrada-saída	(0,753)	$3,210 t^{0,587}$	$1,884 t^{-0,413}$
Entrada-saída	(0,764)	$3,490 t^{0,607}$	$2,118 t^{-0,393}$
Entrada-saída	(1,30/0,77)	$3,510 t^{0,623}$	$2,187 t^{-0,377}$
Entrada-saída	(1,37/0,75)	$3,648 t^{0,567}$	$2,068 t^{-0,433}$
Entrada-saída	(1,337)	$3,560 t^{0,593}$	$2,111 t^{-0,407}$
Entrada-saída	(1,330)	$3,639 t^{0,608}$	$2,213 t^{-0,392}$
Sulco infiltrômetro		$3,857 t^{0,638}$	$2,460 t^{-0,362}$
Cilindro infiltrômetro		$3,807 t^{0,590}$	$2,246 t^{-0,410}$

Nas FIGURAS 4 a 7 encontram-se as representações gráficas das equações da TABELA 4 plotadas em papel log-log. As FIGURAS 4 e 5 mostram a variação dos coeficientes "K" e "a" das equações obtidas pelo método de entrada e saída do fluxo d'água; a FIGURA 6 destaca a aproximação entre os coeficientes obtidos pelos métodos do sulco e cilindro-infiltrômetro; já a FIGURA 7 apresenta as equações onde os coeficientes foram mais discrepantes (entrada e saída para Q = 0,753 l/seg e sulco-infiltrômetro).

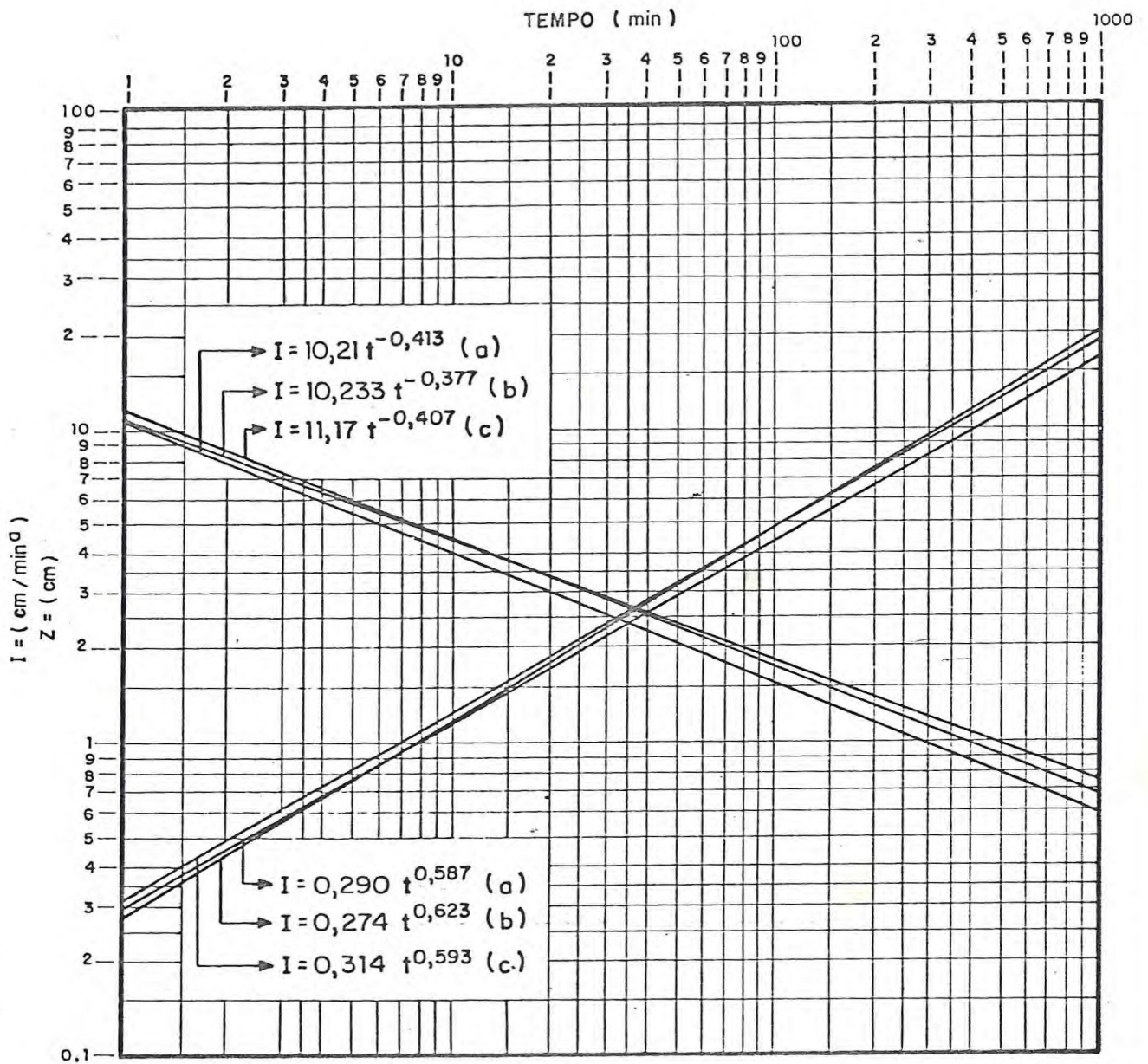


FIGURA 4 - Velocidade de infiltração (I) e infiltração acumulada (z) do solo estudado, obtidas pelo método de entrada e saída do fluxo d'água, para as vazões de 0,753, 1,30/0,77 e 1,337 l/seg.

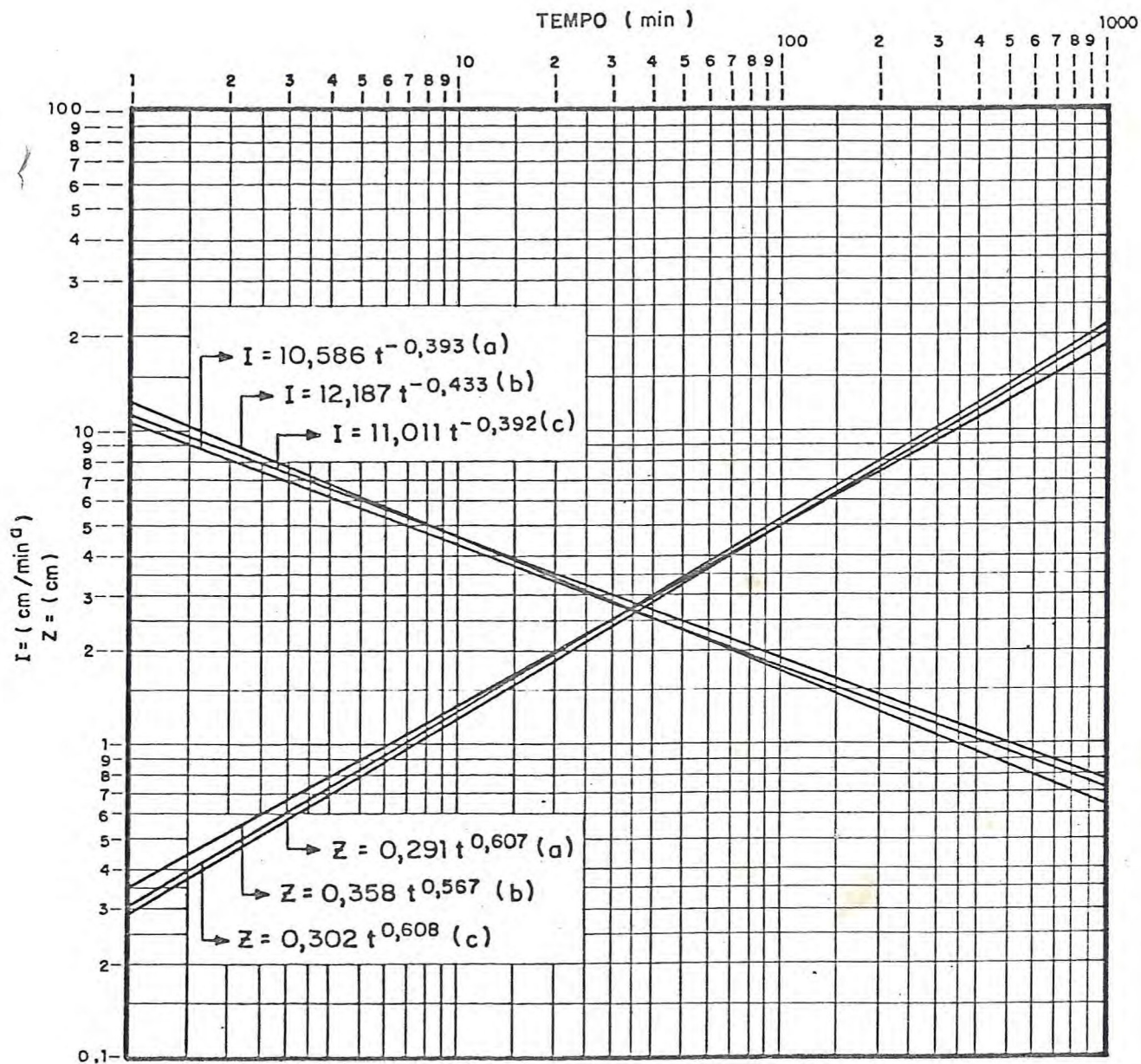


FIGURA 5 - Velocidade de infiltração (I) e infiltração acumulada (z) do solo estudado, obtidas pelo método de entrada e saída do fluxo d'água, para as vazões de 0,764, 1,37/0,75 e 1,330 l/seg.

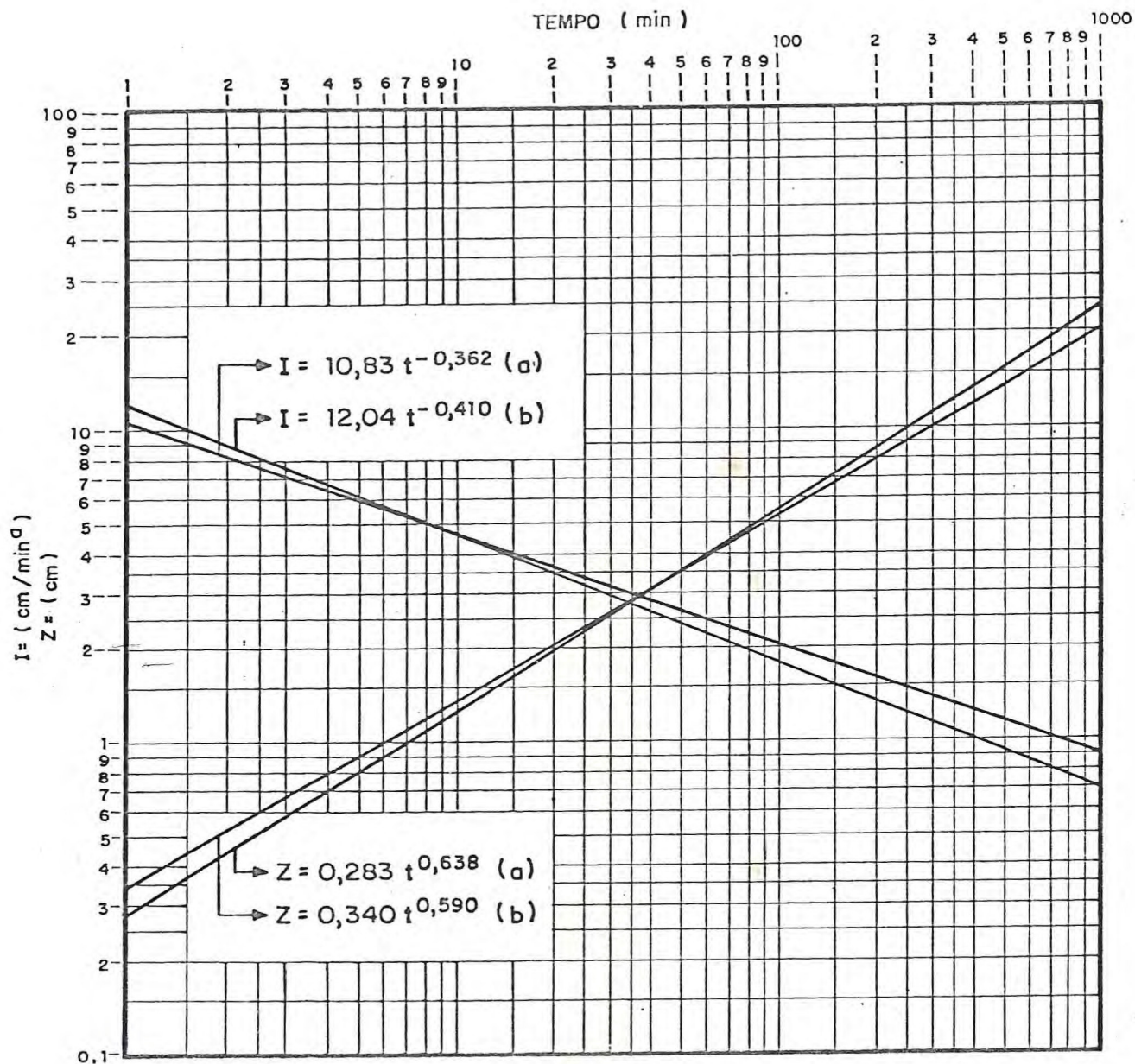


FIGURA 6 - Velocidade de infiltração (I) e infiltração acumulada (z) do solo estudado, obtidas pelos métodos do sulco e cilindro infiltrômetro.

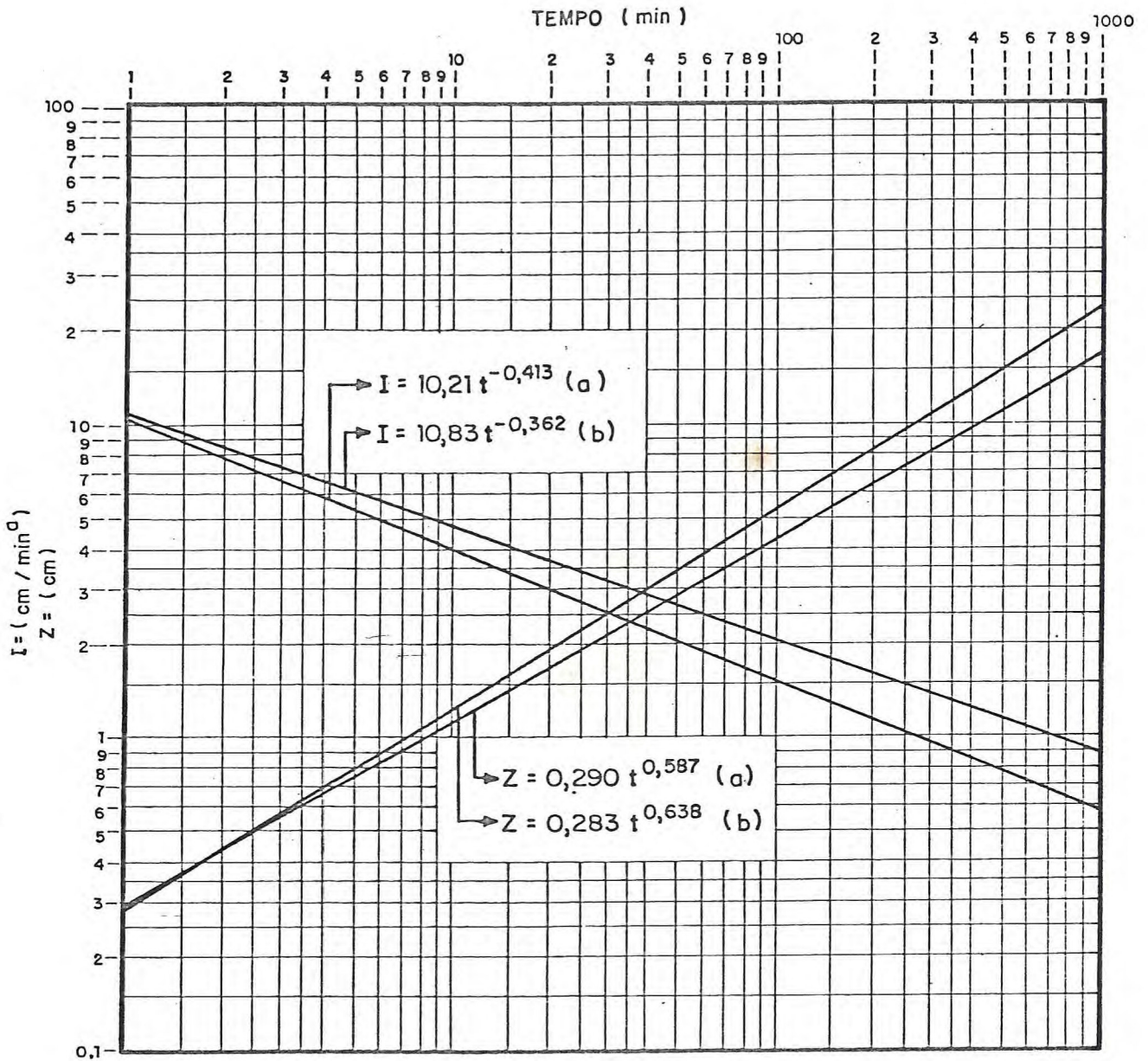


FIGURA 7 - Velocidade de infiltração (I) e infiltração acumulada (z) do solo estudado, obtidas pelos métodos de entrada e saída do fluxo d'água, para a vazão de 0,753 l/seg e sulco infiltrômetro.

Pelos resultados da TABELA 4 e FIGURAS 4 a 7 verifica-se que as diferenças entre as equações encontram-se principalmente nos coeficientes "K", pois eles expressam a infiltração na primeira unidade de tempo dos testes. Observa-se na TABELA 4 um relativo aumento no valor de "K" das equações obtidas pelo método de entrada e saída do fluxo d'água, com o aumento da vazão; isto se deve ao aumento da altura da lâmina d'água no sulco. O valor do coeficiente "K" (TABELA 4) obtido pelo método do cilindro infiltrômetro foi equivalente ao do sulco infiltrômetro e relativamente superior aos demais (entrada e saída do fluxo d'água). Esse valor maior deve-se, talvez, à técnica de instalação do equipamento, pois a penetração irregular do cilindro medidor no solo cria alguma deformação do mesmo. Esta suposição está de acordo com as limitações do uso do cilindro infiltrômetro na irrigação por sulcos, apontadas por BONDURANT (1957). Isto pode ser atribuído, ainda, em parte, ao cálculo da lâmina infiltrada. No sulco, a inundação é parcial e o cálculo da lâmina é feito em função da largura da zona de fluxo, enquanto que no cilindro infiltrômetro a inundação é total e o cálculo da lâmina é feito em função da secção transversal do cilindro onde as medições são feitas. Este fato também foi constatado e discutido por ESPÍNOLA (1977). Entretanto, os coeficientes obtidos pelo método do cilindro infiltrômetro podem ser sensivelmente inferiores aos obtidos por outros métodos, como observaram DAVIS & FRY (1963), desde que a instalação do equipamento seja feita com bastante cuidado.

Os coeficientes da equação de infiltração obtidos pelo método do sulco-infiltrômetro (testes realizados com uma lâmina d'água equivalente à altura da lâmina d'água de irrigação com a vazão de 1,337 l/seg) foram ligeiramente superiores aos demais, acentuando-se um pouco mais quando comparado com os obtidos com a menor vazão (0,753 l/seg), a qual representa uma menor altura da lâmina d'água no sulco. Isto se deve em parte, ao fato de que a infiltração em sulcos é grandemente afetada pelo perímetro molhado, e no sulco-infiltrômetro a água permanece confinada, enquanto que o

método de entrada e saída considera o movimento da água no sulco e há deposição de sedimentos ao longo dos mesmos em decorrência desse movimento.

Nas TABELAS 5 a 10 encontram-se as lâminas infiltradas em todas as estações, calculadas através das equações de infiltração obtidas pelas três metodologias estudadas, considerando o tempo de oportunidade obtido através das curvas de avanço e recessão, para cada um dos seis tratamentos. Com esses resultados construiu-se as FIGURAS 8 a 13 as quais ilustram melhor a variação das lâminas infiltradas, calculadas a partir de cada uma das equações. Estas FIGURAS também mostram o balanço de volume existente entre os volumes úteis, de escoamento superficial e percolação profunda. A maior variação está entre as FIGURAS 8_b (entrada e saída do fluxo d'água para a menor vazão) e 8_c (sulco-infiltrômetro).

Diversos autores, entre os quais PHILIP (1957) e BERNARDO (1980), têm encontrado que a infiltração depende da umidade inicial da camada superficial do solo. Portanto, dever-se-ia utilizar as equações obtidas pelo método de entrada e saída do fluxo d'água (TABELA 12) para o efeito de cálculo da lâmina infiltrada na avaliação de sistemas de irrigação por sulcos, uma vez que elas podem ser obtidas no momento da irrigação, ou seja, esse método considera as condições normais da prática de irrigação. Além do mais, este método utiliza como infiltrômetro um comprimento de sulco bem mais representativo (neste caso usou-se o comprimento total dos sulcos, isto é, 80,0 m) e os instrumentos de medição de vazão são fáceis de instalar e operar, além de apresentarem boa precisão.

Os resultados dos testes de infiltração (APÊNDICE B) após terem sido ajustados através da análise de regressão, foram convertidos para o sistema inglês de unidades e plotados em papel log-log, como mostra a FIGURA 14 (os gráficos dos demais testes encontram-se no APÊNDICE F). Com os coeficientes linear e angular dessas FIGURAS obtêm-se através

TATELA 5 - Lâminas Infiltradas (cm) ao Longo do Sulco Irrigado com a Vazão de 0,753 l/seg, Usando-se as Equações de Infiltração Determinadas pelos Métodos do Cilindro Infiltrômetro (CI), Sulco Infiltrômetro (SI) e Entrada e Saída do Fluxo D'água (ES).

	Distância (metros)								
	00	10	20	30	40	50	60	70	80
Tempo de oportu nidade (hr)	2,100	2,117	2,133	2,150	2,133	2,100	2,050	2,000	1,933
z (CI)	5,90	5,92	5,95	5,98	5,95	5,90	5,81	5,73	5,62
z (SI)	6,19	6,22	6,25	6,29	6,25	6,19	6,10	6,00	5,87
z (ES)	4,96	4,98	5,01	5,03	5,01	4,96	4,90	4,82	4,73

TABELA 6 - Lâminas Infiltradas (cm) ao Longo do Sulco Irrigado com a Vazão de 0,764 l/seg, Usando-se as Equações de Infiltração Determinadas pelos Métodos do Cilindro Infiltrômetro (CI), Sulco Infiltrômetro (SI) e Entrada e Saída do Fluxo D'água (ES).

	Distância (metros)								
	00	10	20	30	40	50	60	70	80
Tempo de oportunidade (hr)	2,167	2,167	2,167	2,167	2,183	2,183	2,167	2,133	2,033
z (CI)	6,01	6,01	6,01	6,01	6,03	6,03	6,01	5,95	5,79
z (SI)	6,32	6,32	6,32	6,32	6,35	6,35	6,32	6,25	6,07
z (ES)	5,58	5,58	5,58	5,58	5,61	5,61	5,58	5,53	5,37

TABELA 7 - Lâminas Infiltradas (cm) ao Longo do Sulco Irrigado com a Vazão de 1,30/0,77 l/seg, Usando-se as Equações de Infiltração Determinadas pelos Métodos do Cilindro Infiltrômetro (CI), Sulco Infiltrômetro (SI) e Entrada e Saída do Fluxo D'água (ES).

	Distância (metros)								
	00	10	20	30	40	50	60	70	80
Tempo de oportunidade (hr)	2,133	2,167	2,167	2,183	2,183	2,167	2,150	2,133	2,083
z (CI)	5,95	6,01	6,01	6,03	6,03	6,01	5,98	5,95	5,87
z (SI)	6,25	6,32	6,32	6,35	6,35	6,32	6,29	6,25	6,16
z (ES)	5,63	5,68	5,68	5,71	5,71	5,68	5,65	5,63	5,54

TABELA 8 - Lâminas Infiltradas (cm) ao Longo do Sulco Irrigado com a Vazão de 1,37/0,75 l/seg, Usando-se as Equações de Infiltração Determinadas pelos Métodos do Cilindro Infiltrômetro (CI), Sulco Infiltrômetro (SI) e Entrada e Saída do Fluxo D'água (ES).

	Distância (metros)								
	00	10	20	30	40	50	60	70	80
Tempo de oportunidade (hr)	2,167	2,217	2,250	2,230	2,230	2,230	2,283	2,217	2,150
z (CI)	6,01	6,09	6,14	6,22	6,22	6,22	6,20	6,09	5,98
z (SI)	6,32	6,41	6,47	6,56	6,56	6,56	6,53	6,41	6,29
z (ES)	5,66	5,73	5,78	5,85	5,85	5,85	5,83	5,73	5,66

TABELA 9 - Lâminas Infiltradas (cm) ao Longo do Sulco Irrigado com a Vazão de 1,337 l/seg, Usando-se as Equações de Infiltração Determinadas pelos Métodos do Cilindro Infiltrômetro (CI), Sulco Infiltrômetro (SI) e Entrada e Saída do Fluxo D'água (ES).

	Distância (metros)								
	00	10	20	30	40	50	60	70	80
Tempo de oportunidade (hr)	2,183	2,183	2,200	2,233	2,250	2,250	2,283	2,283	2,267
z (CI)	6,03	6,03	6,06	6,12	6,14	6,14	6,20	6,20	6,17
z (SI)	6,35	6,35	6,38	6,44	6,47	6,47	6,53	6,53	6,50
z (ES)	5,66	5,66	5,68	5,73	5,76	5,76	5,81	5,81	5,78

TABELA 10 - Lâminas Infiltradas (cm) ao Longo do Sulco Irrigado com a Vazão de 1,33 l/seg, Usando-se as Equações de Infiltração Determinadas pelos Métodos do Cilindro Infiltrômetro (CI), Sulco Infiltrômetro (SI) e Entrada e Saída do Fluxo D'água (ES).

	Distância (metros)								
	00	10	20	30	40	50	60	70	80
Tempo de oportunidade (hr)	2,200	2,217	2,250	2,283	2,300	2,300	2,283	2,267	2,233
z (CI)	6,06	6,09	6,14	6,20	6,22	6,22	6,20	6,17	6,12
z (SI)	6,38	6,41	6,47	6,53	6,56	6,56	6,53	6,50	6,44
z (ES)	5,88	5,90	5,96	6,01	6,04	6,04	6,01	5,99	5,93

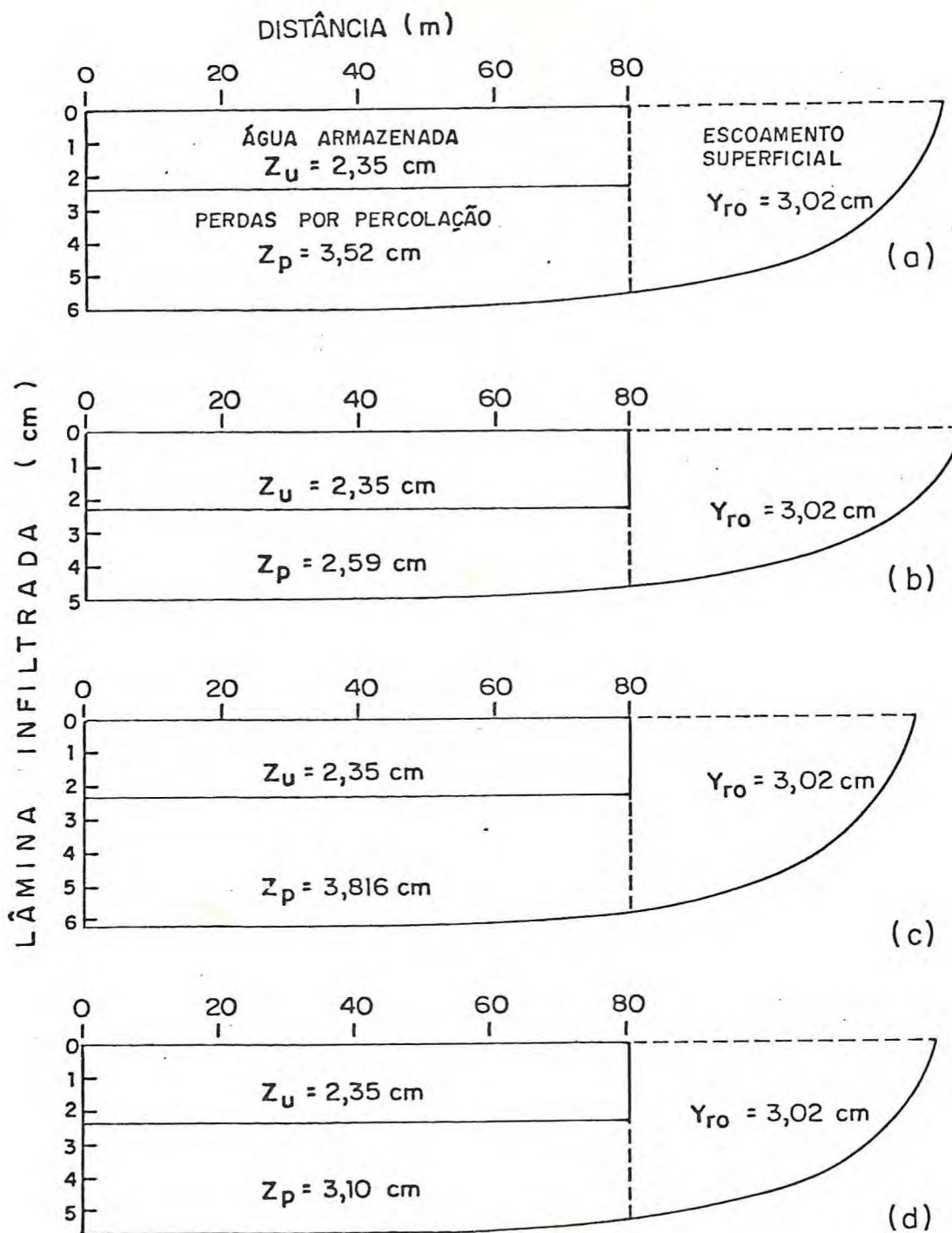


FIGURA 8 - Distribuição espacial das lâminas aplicadas para $Q = 0,753$ l/seg, usando as equações de infiltração determinadas pelos métodos do cilindro infiltrômetro (a), entrada e saída (b), sulco infiltrômetro (c), e pelo balanço de volume (d) dos dados medidos no campo.

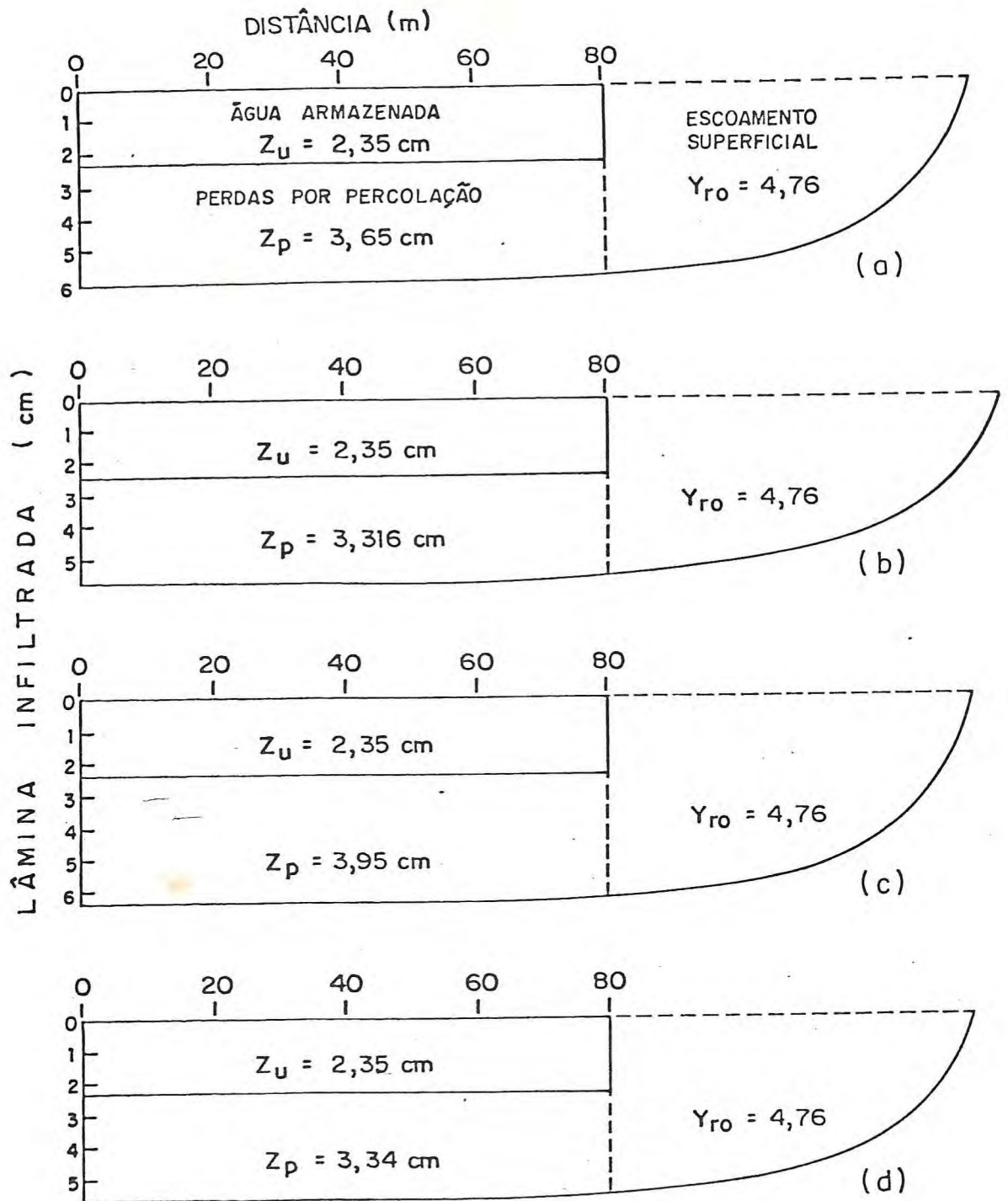


FIGURA 9 - Distribuição espacial das lâminas aplicadas para $Q = 1,30/0,75$ l/seg, usando as equações de infiltração determinadas pelos métodos do cilindro infiltrômetro (a), entrada e saída (b), sulco infiltrômetro (c) e através do balanço do volume (d) dos dados medidos no campo.

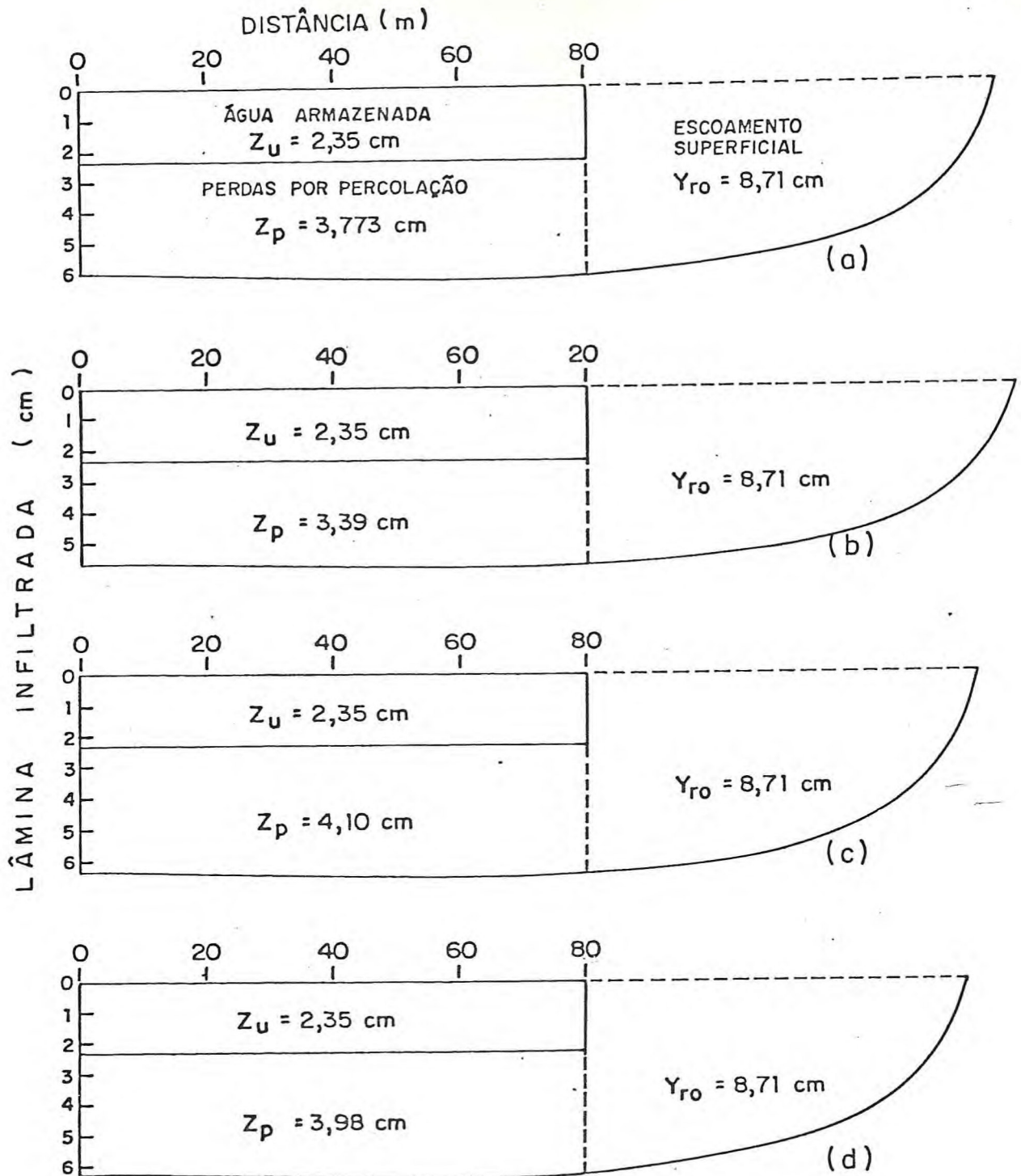


FIGURA 10 - Distribuição espacial das lâminas aplicadas para $Q = 1,337 \text{ l/seg}$, usando as equações de infiltração determinadas pelos métodos do cilindro infiltrometro (a), entrada e saída (b), sulco infiltrometro (c) e pelo balanço de volume (d) dos dados medidos no campo.

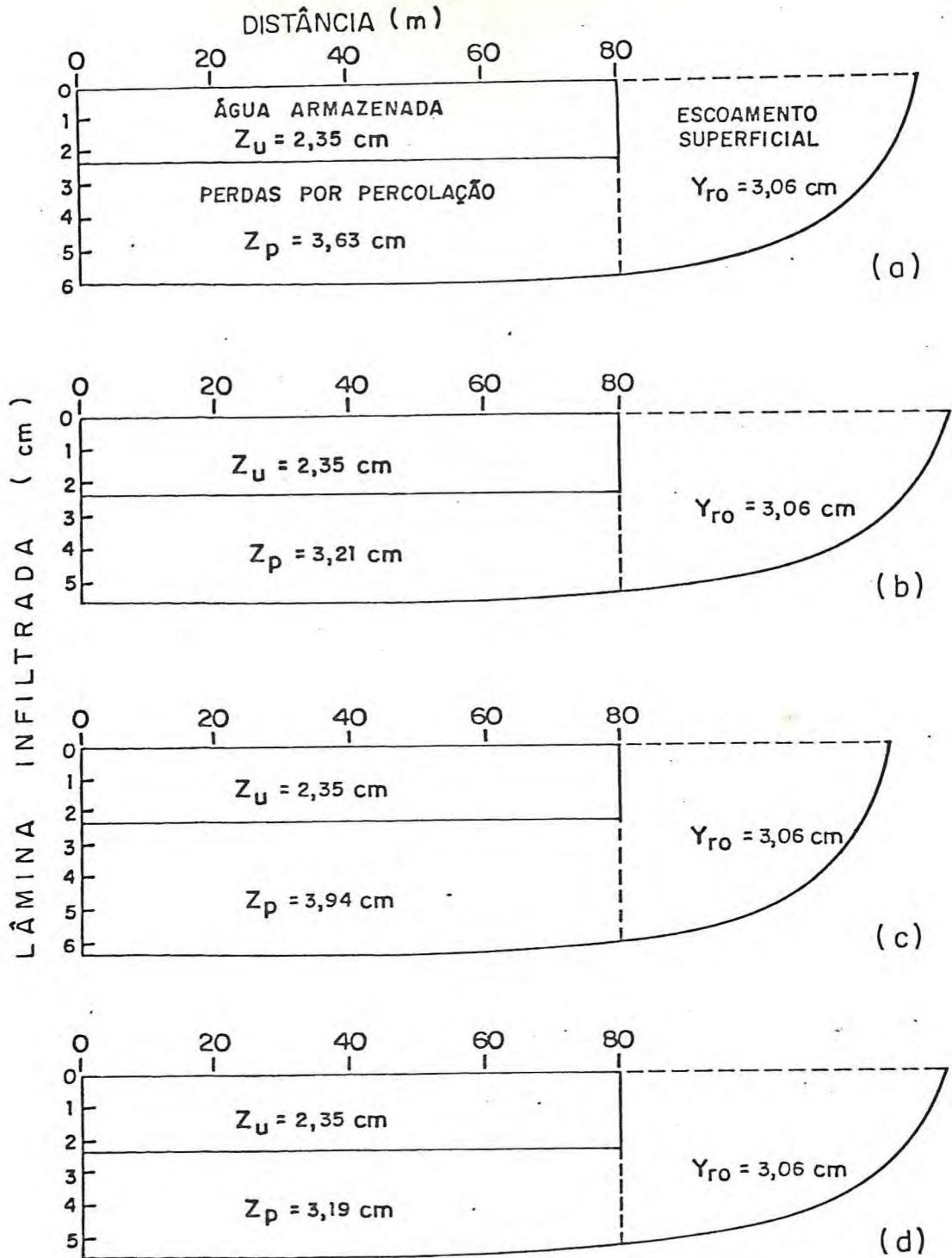


FIGURA 11 - Distribuição espacial das lâminas aplicadas para $Q = 0,764$ l/seg, usando as equações de infiltração determinadas pelos métodos do cilindro infiltrômetro (a), entrada e saída (b), sulco infiltrômetro (c) e pelo balanço de volume (d) dos dados medidos no campo.

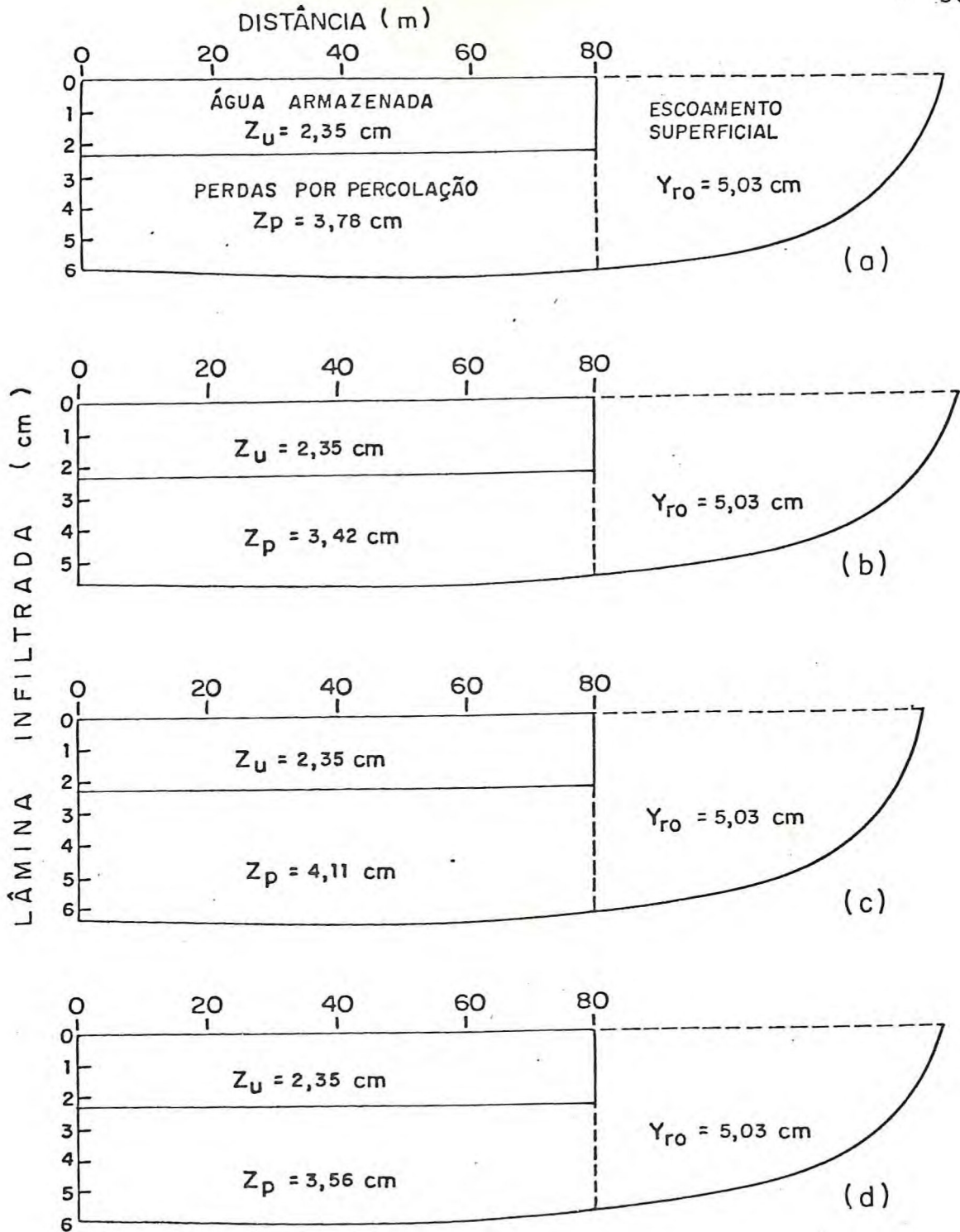


FIGURA 12 - Distribuição espacial das lâminas aplicadas para $Q = 1,37$ l/seg, usando as equações de infiltração determinadas pelos métodos do cilindro infiltrometro (a), entrada e saída (b), sulco infiltrometro (c) e pelo balanço de volume (d) dos dados medidos no campo.

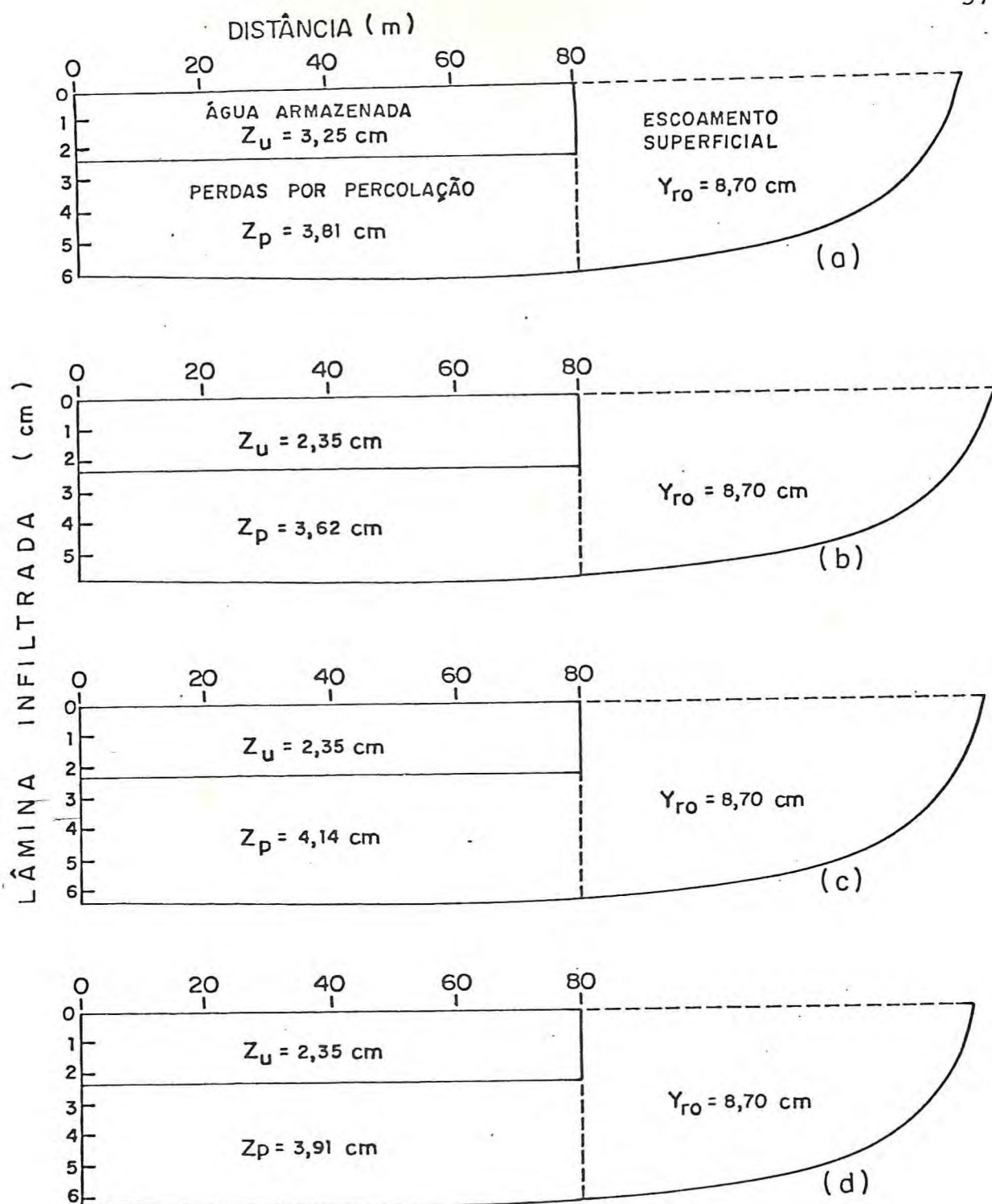


FIGURA 13 - Distribuição espacial das lâminas aplicadas para $Q = 1,330$ l/seg, usando as equações de infiltração determinadas pelos métodos do cilindro infiltrômetro (a), entrada e saída (b), sulco infiltrômetro (c) e pelo balanço de volume (d) dos dados medidos no campo.

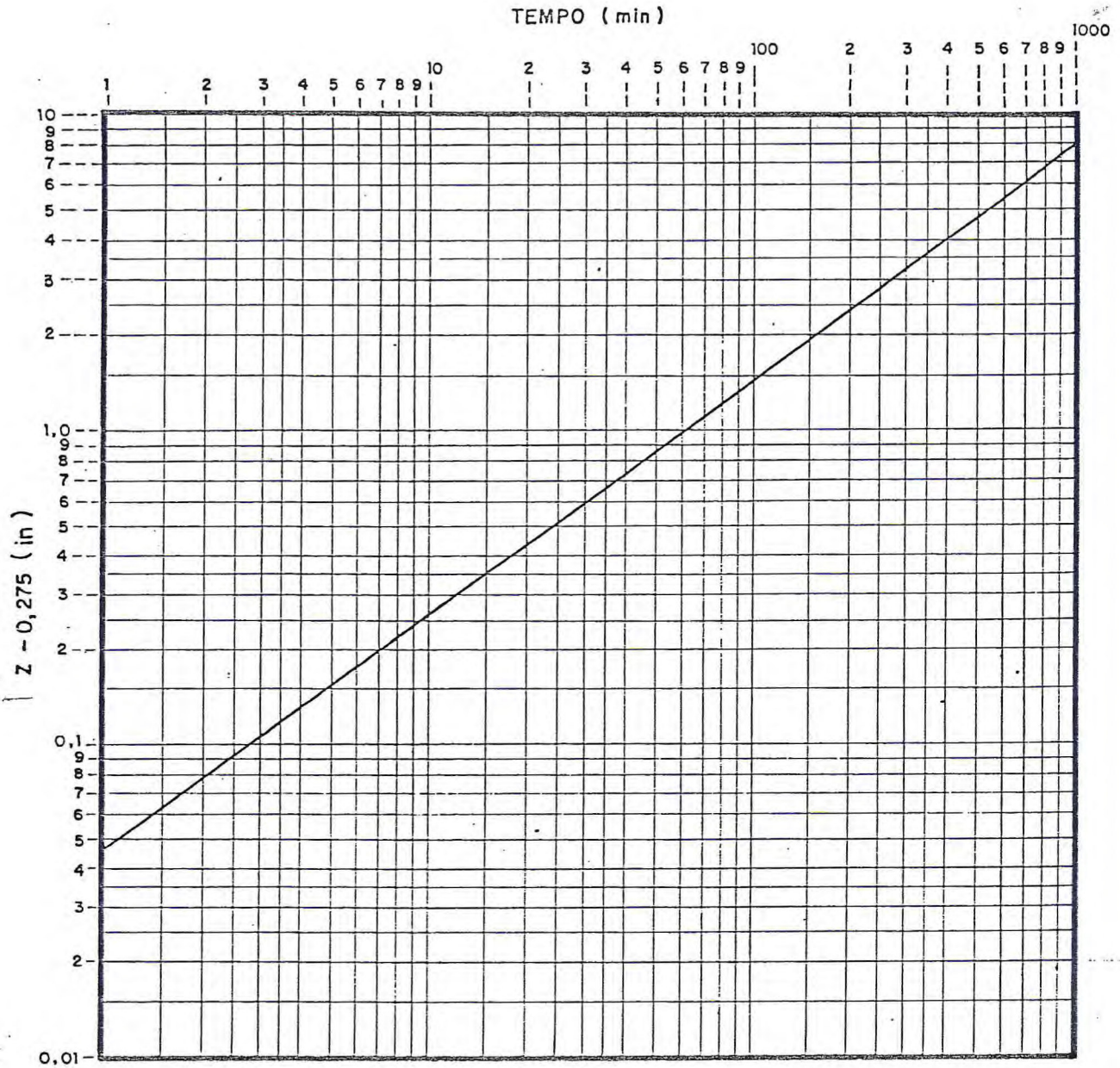


FIGURA 14 - Infiltração acumulada vs. tempo obtida pelo método de entrada e saída com a vazão de 0,753 l/seg.

da TABELA 42 do APÊNDICE D (copiado do SCS-USDA 1980, Unedited draft) de infiltração do solo e os coeficientes de infiltração ("a" e "b") e de avanço ("c" e "d"), para as equações correspondentes, como mostra a TABELA 11. As informações contidas nesta TABELA serão utilizadas no item (4.5) para os cálculos de projeto e manejo da irrigação por sulcos aplicando a técnica do SCS-USDA.

TABELA 11 - Famílias de Infiltração do Solo e Coeficientes de Infiltração ("a" e "b") e de Avanço ("c" e "d") para as Equações de Infiltração Estudadas.

Equação de Infiltração	Família de Infiltração I_f^*	a*	b*	c*	d*
$z = 3,210t^{0,587}$	0,5	0,0471	0,7475	26,1436	0,0012350
$z = 3,490t^{0,607}$	0,5	0,0471	0,7475	26,1436	0,0012350
$z = 3,510t^{0,623}$	0,5	0,0471	0,7475	26,1436	0,0012350
$z = 3,648t^{0,567}$	0,5	0,0471	0,7475	26,1436	0,0012350
$z = 3,560t^{0,593}$	0,5	0,0471	0,7475	26,1436	0,0012350
$z = 3,639t^{0,608}$	0,5	0,0471	0,7475	26,1436	0,0012350
$z = 3,857t^{0,638}$	0,6	0,0520	0,7572	26,7302	0,0013927
$z = 3,807t^{0,590}$	0,6	0,0520	0,7572	26,7302	0,0013927

* - Obtidos do SCS-USDA (Unedited draft).

4.3 - Avanço e Recessão da Água nos Sulcos

Tanto o avanço como a recessão da água nos sulcos

são afetados por diversos fatores, tais como forma, comprimento e tipo de sulco, declividade da área, rugosidade, vazão, conteúdo inicial de umidade do solo e taxa de infiltração. Os quatro primeiros fatores acima são constantes neste estudo e as características de infiltração do solo, determinadas pelo método de entrada e saída do fluxo d'água (usado como padrão), apresentaram valores similares, como pode ser visto na TABELA 12. Entretanto, a rugosidade e vazão são variáveis.

TABELA 12 - Vazão (Q) e valores de "a", "K" e "n" para os Seis Tratamentos.

Tratamento	Q (l/seg)	a	K (cm/hr)	n
T ₁	0,753	0,587	3,210	0,083
T ₇	0,764	0,607	3,490	0,090
T ₂	1,30/0,77	0,623	3,510	0,076
T ₈	1,37/0,75	0,567	3,648	0,067
T ₃	1,337	0,593	3,560	0,066
T ₉	1,330	0,608	3,639	0,064

Os resultados médios dos testes de avanço e recessão da água, para os seis tratamentos são apresentados no APÊNDICE C. Estes resultados foram usados para a construção das curvas de avanço e recessão, apresentadas nas FIGURAS 15 e 16.

A diminuição da velocidade de fluxo durante a fase de avanço reduz a eficiência de distribuição da água (E_d)

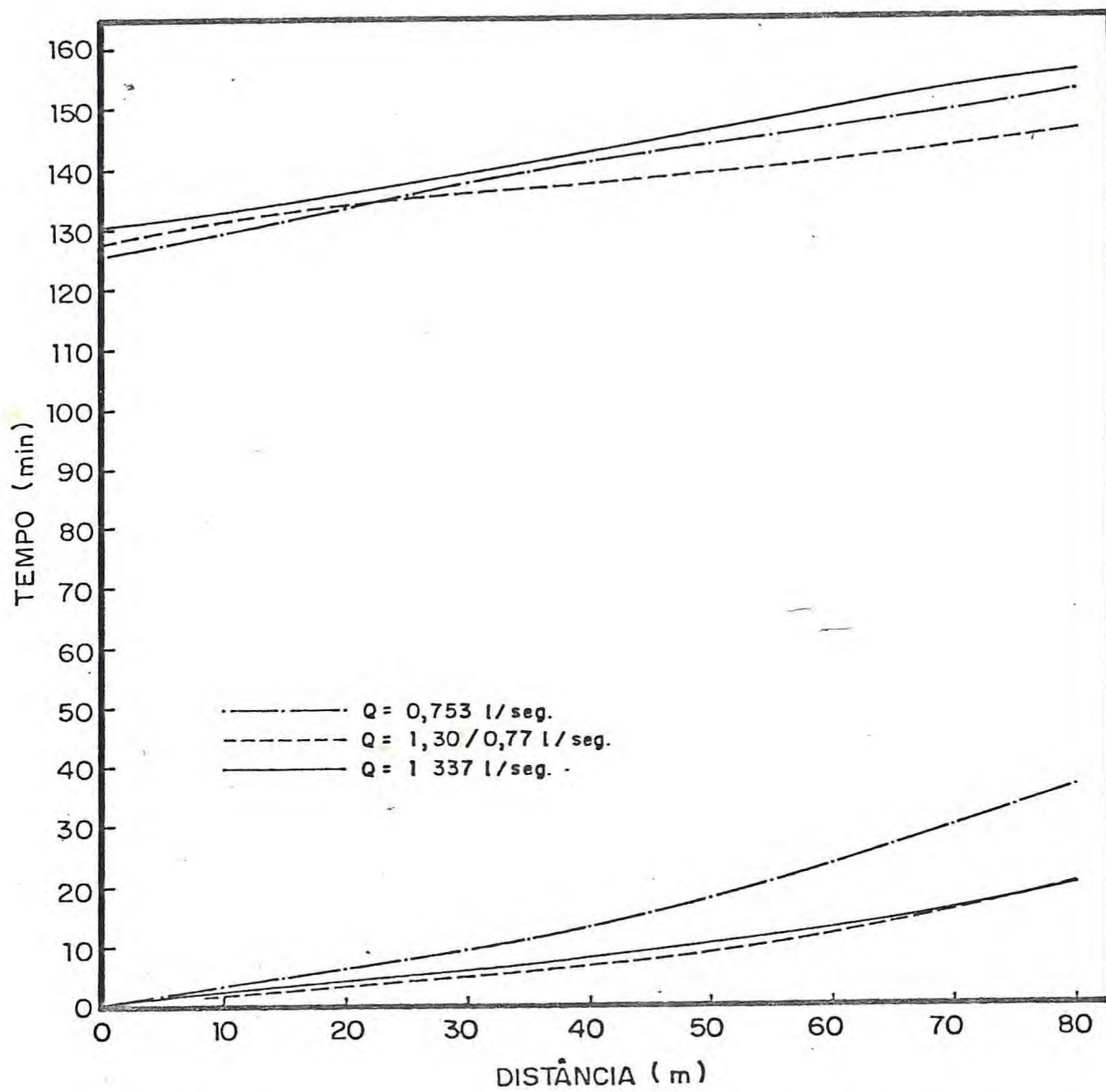


FIGURA 15 - Curvas de avanço e recessão para o primeiro, se-
gundo e terceiro tratamentos.

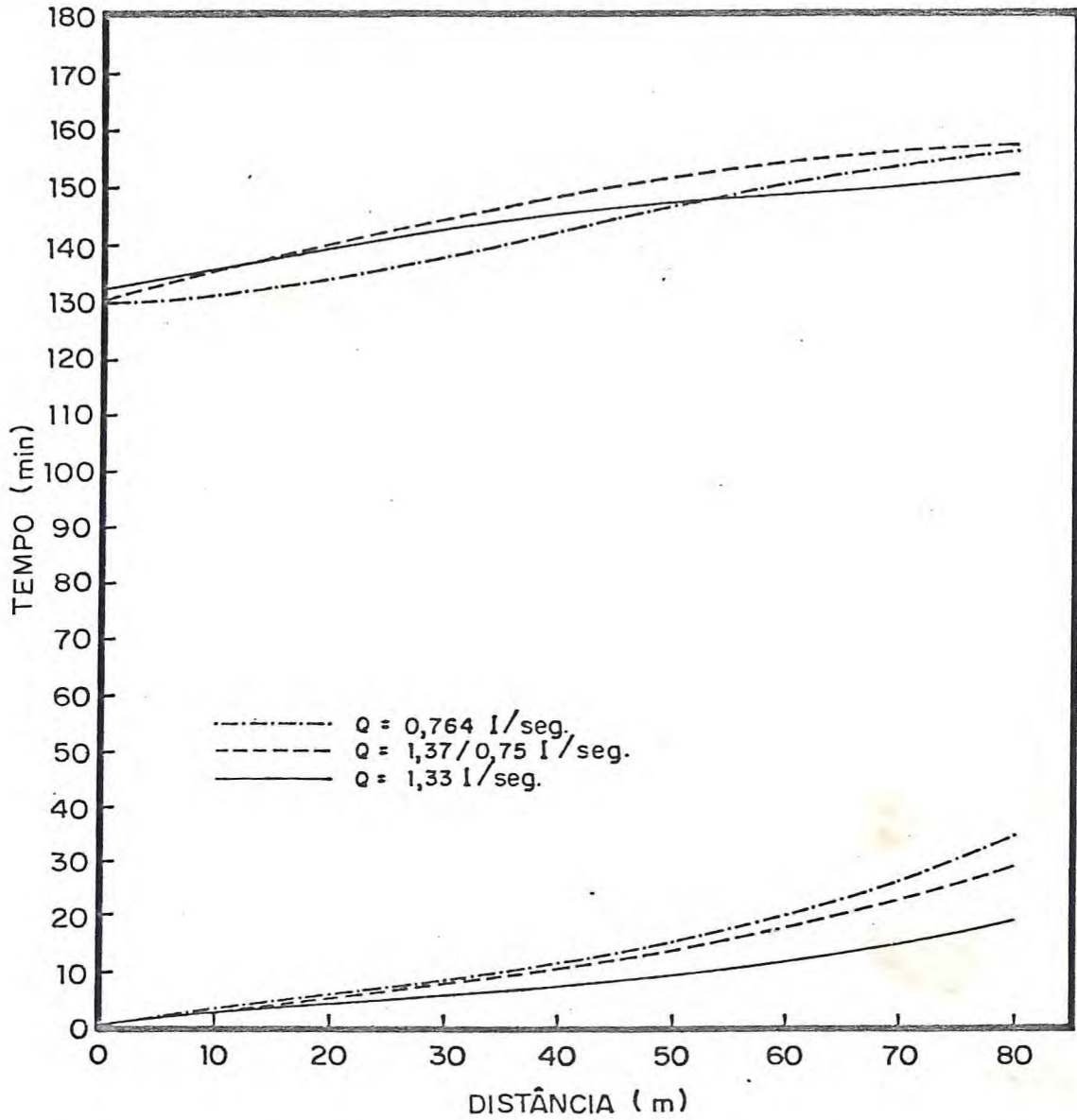


FIGURA 16 - Curvas de avanço e recessão para o sétimo, oitavo e nono tratamentos.

ao longo dos sulcos, como se observa na TABELA 13, quando se usa uma menor vazão (0,753 e 0,764 l/seg).

Através das curvas de avanço e recessão, FIGURAS 15 e 16, determinam-se os valores da razão de avanço (R) que mostra a relação entre o tempo gasto para a frente de avanço atingir o final dos sulcos e o tempo necessário para a infiltração da lâmina real necessária (Y_{rn}).

A curva de recessão, FIGURAS 15 e 16, mostra o tempo e a locação da estação onde a água desaparece da superfície do solo, ao longo do sulco. Ela pode ser plotada, mas usualmente, segundo MERRIAM & KELLER (1978) e KARMELI *et alii* (1978), ela é uma linha horizontal paralela ao eixo dos "x" a partir do momento de corte da vazão. Entretanto, como os dados de campo (APÊNDICE C) mostraram um significativo afastamento dos pontos, plotou-se as curvas de recessão para os seis tratamentos. Com isto, observa-se através das FIGURAS 15 e 16 um incremento no tempo de oportunidade de infiltração, o que seria desprezível se se considerasse uma recessão instantânea, ou seja, uma linha horizontal paralela ao eixo do "x". Ao considerar-se a recessão instantânea, pode-se subestimar o tempo de oportunidade de infiltração e, conseqüentemente, as lâminas infiltradas ao longo dos sulcos, obtidas através das equações de infiltração.

Tanto na fase de avanço como na fase de recessão, atentou-se ativamente para a influência da rugosidade, aqui representada pelo coeficiente de rugosidade de MANNING (n), o qual juntamente com a vazão podem ter sido os fatores que mais influenciaram na forma das curvas de avanço e recessão, uma vez que os demais fatores (comprimento, espaçamento, forma e declividade dos sulcos e testes de infiltração) foram considerados constantes.

Em condições de campo, observou-se ainda a resistência ao fluxo causada pela ação dos caules, do vigoroso sistema de raízes adventícias e de resíduos da cultura do milho, o que contribuiu para um incremento no valor de "n".

TABELA 13 - Parâmetros de Qualidade e Performance do Sistema de Irrigação Estudado.

Tratamento Q (l/seg)	T _{av} (min)	T _{co} (min)	E _d (%)	E _a (%)	E _s (%)	I _p (%)	I _{ro} (%)
T ₁ (0,753)	36,0	120,00	95,90	27,74	100,00	36,65	35,61
T ₇ (0,764)	34,0	120,00	96,60	27,34	100,00	37,07	35,59
T ₂ (1,30/0,77)*	21,0	120,00	97,90	22,49	100,00	32,00	45,51
T ₈ (1,37/0,75)*	29,0	120,00	98,10	21,49	100,00	32,56	45,95
T ₃ (1,337)	20,0	120,00	98,60	15,62	100,00	26,47	57,91
T ₉ (1,330)	19,0	120,00	98,50	15,70	100,00	26,15	58,15

* - Reduziu-se as vazões do segundo e oitavo tratamento 15 min após a frente de avanço ter atingido o final dos sulcos.

Na TABELA 12 são apresentados os valores de "a" e "K" da equação de KOSTIAKOV, obtidos pelo método de entrada e saída, "n" de MANNING e vazão (Q) para os seis tratamentos. Nota-se um aumento nos valores de "n" com a diminuição da vazão. Pela equação de MANNING (Equação 32) têm-se que "n" é inversamente proporcional à vazão.

4.4 - Parâmetros de Uniformidade e Eficiência Obtidos no Campo

Com base nos dados da capacidade de retenção de água do solo, densidade aparente (TABELA 3) e profundidade efetiva do sistema radicular do milheto, calculou-se a lâmina d'água necessária (46,96 mm). Considerou-se que as plantas consumiriam apenas 50% da água disponível do solo ($Y_{rn} = 23,5$ mm).

Na TABELA 13 apresentam-se os dados de manejo da irrigação em condições de campo (Q , T_{av} e T_{co}), juntamente com a eficiência de distribuição (E_d), eficiência de aplicação (E_a) e armazenamento (E_s) e percentagens de perdas por percolação (I_p) e escoamento superficial (I_{ro}). Os resultados contidos na TABELA 13 foram calculados pelas equações (01) e (03) (E_a e E_s , respectivamente) e equação (10) (E_d); os índices de percolação (I_p) e escoamento superficial (I_{ro}) foram obtidos pela relação entre as lâminas de percolação (Z_p) e de escoamento (Y_{ro}) e a lâmina bruta aplicada (Ver FIGURAS 8 a 13). Obteve-se menor uniformidade de distribuição no primeiro e sétimo tratamentos devido ao maior tempo de avanço. No entanto, por se tratar de uma menor vazão em relação aos outros tratamentos e o tempo de aplicação ter sido o mesmo (120 min), verificou-se menor perda d'água por escoamento superficial o que proporcionou maior eficiência de aplicação. No terceiro e nono tratamentos, nos quais usou-se uma vazão em torno de 77% maior que no primeiro e sétimo, conseguiu-se aumentar a eficiência de distribuição, pois houve

uma redução do tempo de avanço; contudo, a eficiência de aplicação (E_a) diminuiu em consequência do aumento das perdas por escoamento superficial. Para melhor observar este fato, aplicou-se no segundo e oitavo tratamentos uma vazão inicial muito próxima daquela aplicada no terceiro e nono tratamentos, sendo que 15 min após a frente de avanço ter atingido o final dos sulcos, reduziu-se essa vazão inicialmente aplicada, em torno de 40% (aproximadamente iguais ao primeiro e sétimo tratamentos). Através desse artifício (técnica de redução de vazão), conseguiu-se diminuir o tempo de avanço em relação ao primeiro e sétimo tratamentos e as perdas por escoamento superficial em relação ao terceiro e nono tratamentos. Como consequência, aumentou-se a eficiência de distribuição (E_d) e a eficiência de aplicação (E_a) respectivamente, o que se poderia chamar de balanço entre E_d e E_a , objetivando otimizar a performance do sistema de irrigação. A técnica de redução da vazão torna-se mais viável em sulcos de maior comprimento, como pode ser visto nos itens seguintes.

A redução da vazão inicialmente aplicada no segundo e oitavo tratamentos foi realizada 15 min após a frente de avanço ter atingido a última estação, com o intuito de se observar a redução das perdas por escoamento superficial na irrigação. Esta redução da vazão poderia ter sido realizada no exato momento em que a frente de avanço alcançou a última estação, o que diminuiria ainda mais as perdas d'água, principalmente por escoamento superficial, aumentando um pouco mais a eficiência de aplicação.

Os resultados de eficiência de aplicação obtidos nos testes de campo, TABELA 13, são considerados muito baixos, mesmo havendo boa eficiência de distribuição e eficiência de armazenamento. O que se observa através da TABELA 13, é uma grande perda d'água tanto por escoamento superficial quanto por percolação profunda, responsáveis pela baixa eficiência de aplicação. O que se poderia fazer de imediato para diminuir tais perdas, seria diminuir o tempo de aplicação d'água, o qual pode ser calculado através das equações

de infiltração ou através de equações empíricas de projeto, como aquelas discutidas nos itens seguintes deste estudo. Um outro artifício é diminuir ainda mais a vazão aplicada, já que nesse caso os sulcos são de pequeno comprimento, ou, ainda, aumentar o comprimento do sulco. Tais possibilidades opcionais de manejo serão discutidas a seguir.

4.5 - Avaliação do Sistema de Irrigação Estudado, Usando a Metodologia de MERRIAM & KELLER (1978)

As equações 10 a 12 foram aplicadas para os dados obtidos no campo, considerando o tempo real necessário para infiltrar a lâmina desejada no final dos sulcos, a fim de se obter a potencialidade do sistema estudado. Nas TABELAS 14, 16, 18 e 20, os parâmetros T_{av} (tempo de avanço), T_{rn} (tempo necessário para a aplicação da lâmina real necessária, Y_{rn}), T_{co} (tempo de aplicação da lâmina bruta, Y_b), Z_i (lâmina infiltrada no início do sulco), Z_f (lâmina infiltrada no final do sulco) e Y_b (lâmina bruta), são necessários para calcular a E_{pa} , E_{pd} , Y_{ro} , I_{ro} , Z_p e I_p .

As TABELAS 14 e 15 mostram o efeito da variação da vazão (Q) sobre as perdas (Y_{ro} e Z_p) e sobre as eficiências (E_{pa} e E_{pd}), para aplicar a lâmina de 23,5 mm no final dos sulcos.

Como pode ser visto comparando as TABELAS 13 e 15, o sistema estudado apresenta um grande potencial com relação aos parâmetros de qualidade. Por exemplo, quando se irrigou com $Q = 0,764$ l/seg durante 120 min (TABELA 13), obteve-se uma eficiência de aplicação (E_a) de 27,34%; se esta vazão fosse aplicada durante o tempo realmente necessário (65,4 min) para infiltrar a lâmina desejada (23,5mm) no final dos sulcos (este tempo pode ser obtido através das equações de infiltração) a E_{pa} seria de 50,2% (TABELA 15), o que corresponde um acréscimo de 83,61%.

TABELA 14 - Condições de Manejo para o Sistema Estudado, para a Aplicação da Lâmina Real Necessária ($Y_{rn} = 23,5$ mm) no Final dos Sulcos.

Tratamento Q (l/seg)	T_{av} (min)	T_{rn} (min)	R	T_{co} (min)	Z_i (mm)	Z_f (mm)	Y_b (mm)
$T_1 = (0,753)$	36,0	35,3	1:1,0	71,3	35,5	23,5	50,3
$T_7 = (0,764)$	34,0	31,4	1:1,0	65,4	36,7	23,5	46,8
$T_2 = (1,30/0,77)$	21,0	31,5	1:1,5	52,5	32,3	23,5	55,8
$T_8 = (1,37/0,75)$	29,0	27,6	1:1,0	56,6	35,3	23,5	65,4
$T_3 = (1,337)$	20,0	29,8	1:1,5	49,8	31,9	23,5	62,4
$T_9 = (1,330)$	19,0	29,2	1:1,5	48,2	31,9	23,5	60,1

TABELA 15 - Parâmetros de Qualidade, (potenciais) para a Aplicação da Lâmina Real Necessária ($Y_{rn} = 23,5$ mm) no Final dos Sulcos.

Tratamento Q (l/seg)	E_{pd} (%)	E_{pa} (%)	Y_{ro} (mm)	I_{ro} (%)	Z_p (mm)	I_p (%)
T_1 (0,753)	79,7	46,7	20,8	41,4	6,0	11,9
T_7 (0,764)	78,1	50,2	16,7	35,7	6,6	14,1
T_2 (1,30/0,77)	84,2	42,1	27,9	50,0	4,4	7,9
T_8 (1,37/0,75)	79,9	35,9	36,0	55,0	5,9	9,0
T_3 (1,337)	84,9	37,7	34,7	55,6	4,2	6,7
T_9 (1,330)	84,9	39,1	32,4	53,9	4,2	7,0

O efeito do uso de uma menor vazão, para as mesmas condições de projeto, é reduzir sensivelmente as perdas por escoamento superficial e aumentar a eficiência de aplicação. Observando na TABELA 15, quando se irriga com uma vazão $Q = 0,764$ l/seg em comparação com $Q = 1,337$ l/seg, obtêm-se um aumento de eficiência de aplicação (potencial) da ordem de 33,2% ($E_{pa} = 37,7\%$ para $Q = 1,337$ l/seg e $E_{pa} = 50,2\%$ para $Q = 0,764$ l/seg). Por sua vez, as perdas por escoamento superficial foram reduzidas em torno de 51,9%, já que a lâmina de escoamento superficial (Y_{ro}) diminuiu de 34,7 mm para 16,7 mm. Observa-se ainda, uma diminuição na E_{pd} com a diminuição da vazão em torno de 8%, o que não justifica o uso da maior vazão.

Nas TABELAS 16 e 17 encontram-se as condições de manejo e os parâmetros potenciais calculados para aplicar uma lâmina d'água de 58,75 mm no final dos sulcos (supondo que

se desejasse irrigar uma profundidade de 50 cm e não os 20 cm de solo usados para a cultura do milho).

Como pode ser visto, comparando as TABELAS 15 e 17, quando se deseja aplicar uma lâmina maior no final dos sulcos, para as mesmas condições, há um acréscimo na E_{pd} em torno de 19,7% para $Q = 0,764$ l/seg e 13,10% para $Q = 1,337$ l/seg. Quanto à E_{pa} , ocorreu uma diminuição de 50,2% para 46,6% com $Q = 0,764$ l/seg e de 37,7% para 29,4% com $Q = 1,337$ l/seg, devido ao aumento das perdas por escoamento superficial de 16,7 mm para 63,3 mm com $Q = 0,764$ l/seg e de 34,7 mm para 139,1 mm com $Q = 1,337$ l/seg. As perdas por percolação para aplicar as duas lâminas (23,5 mm e 58,75 mm) são relativamente baixas (6,6 mm e 4,1 mm para $Q = 0,764$ l/seg e 4,2 mm e 2,4 mm para $Q = 1,337$ l/seg). Comparando-se ainda, as TABELAS 15 e 17, observa-se que diminuindo a razão de avanço (aumentando-se o tempo necessário para aplicar a lâmina real necessária Y_{rn}), aumenta-se E_{pd} mas, também, aumentam-se as perdas por escoamento superficial, diminuindo-se assim E_{pa} . É importante observar que apesar de haver aumento das perdas por escoamento superficial em termos absolutos (Y_{ro}) devido ao aumento de T_{rn} , não houve aumento em termos percentuais (I_{ro}), já que com o aumento de T_{rn} , houve conseqüentemente um aumento da lâmina bruta aplicada, (Y_b).

Calculando-se o tempo real necessário para infiltrar a lâmina d'água desejada no final dos sulcos, através das equações de infiltração e supondo como razão de avanço ótima $R = 1/4$, (CRIDDLE et alii, 1956), obteve-se o tempo de avanço e o tempo de aplicação d'água. Usando-se as equações exponenciais de avanço, obtidas para cada tratamento através da análise de regressão dos dados contidos no APÊNDICE C e os novos tempos de avanço, calculou-se os comprimentos de sulcos que proporcionariam uma razão de avanço (R) de $1/4$ para aplicar as lâminas desejadas ($Y_{rn_1} = 23,5$ mm e $Y_{rn_2} = 58,75$ mm), para cada tratamento estudado. Com esses dados e as equações (10 a 12) construiu-se as TABELAS

TABELA 16 - Condições de Manejo para o Sistema Estudado quando se Deseja Aplicar uma Lâmina de 58,75 mm no Final dos Sulcos.

Tratamento Q (l/seg)	T _a (min)	T _{rn} (min)	R	T _{co} (min)	Z _i (mm)	Z _f (mm)	Y _b (mm)
T ₁ = 0,753	36,0	168,2	1:4,7	204,2	65,8	58,75	144,2
T ₇ = 0,764	34,0	142,1	1:4,2	176,1	66,9	58,75	126,1
T ₂ = 1,30/0,77	21,0	137,0	1:6,5	158,0	64,2	58,75	132,0
T ₈ = 1,37/0,75	29,0	139,0	1:4,8	168,0	65,4	58,75	143,7
T ₃ = 1,337	20,0	139,7	1:7,0	159,7	63,65	58,75	200,2
T ₉ =	19,0	131,8	1:7,0	150,8	63,8	58,75	188,1

TABELA 17 - Parâmetros de Qualidade Potenciais para a Aplicação da Lâmina de 58,75 mm no Final dos Sulcos.

Tratamento Q (l/seg)	E_{pd} (%)	E_{pa} (%)	Y_{ro} (mm)	I_{ro} (%)	Z_p (mm)	I_p (%)
T ₁ (0,753)	94,3	40,7	81,9	56,8	3,5	2,5
T ₇ (0,764)	93,5	46,6	63,3	50,2	4,1	3,2
T ₂ (1,30/0,77)	95,6	44,5	70,6	53,4	2,7	2,1
T ₈ (1,37/0,75)	94,6	40,9	81,7	56,8	3,3	2,3
T ₃ (1,337)	96,0	29,4	139,1	69,5	2,4	1,2
T ₉ (1,330)	95,9	31,2	126,9	67,4	2,5	1,3

18 a 21 para apresentar as condições de manejo e os parâmetros de qualidade das irrigações, usando a razão de avanço (R) de 1/4.

Como pode ser observado nas TABELAS 18 e 19, os novos comprimentos de sulcos para aplicar a lâmina de 23,5 mm são impraticáveis pela baixa E_{pa} e altas perdas d'água por escoamento superficial, embora a E_{pd} seja elevada (em torno de 93%); além do mais os sulcos são muito curtos. Entretanto, observa-se comparando as TABELAS 20 e 21 com as TABELAS 16 e 17 que ocorre uma diminuição das perdas por escoamento superficial (Y_{ro}) e o conseqüente aumento da E_{pa} quando se usa $R = 1/4$ combinado com um maior comprimento de sulco; como por exemplo, no tratamento número nove (9) as perdas por escoamento superficial foram $Y_{ro} = 126,9$ mm e $E_{pa} = 31,2\%$ para $R = 1/7$, e $Y_{ro} = 33,7$ mm e $E_{pa} = 60,8\%$ para $R = 1/4$ (aumento em torno de 95% na E_{pa} e diminuição em torno de 73% nas perdas por escoamento superficial).

TABELA 18 - Condições de Manejo para o Sistema Estudado, Considerando a Razão de Avanço (R) de 1/4 como Ótima para Aplicar $Y_{rn} = 23,5$ mm no Final dos Sulcos.

Tratamento Q (l/seg)	T_{rn} (min)	T_{av} (min)	T_{co} (min)	L (m)	Z_i (mm)	Z_f (mm)	Y_b (mm)
T_1 (0,753)	35,3	8,8	44,1	28,0	26,8	23,5	88,9
T_7 (0,764)	31,4	7,9	39,3	25,5	26,9	23,5	87,8
T_2 (1,30/0,77)	31,5	7,9	39,4	39,4	27,0	23,5	80,9
T_8 (1,37/0,75)	27,6	6,9	34,5	27,7	26,7	23,5	106,7
T_3 (1,337)	29,8	7,5	37,3	38,3	26,9	23,5	97,7
T_9 (1,330)	29,2	7,3	36,5	38,6	26,9	23,5	94,3

TABELA 19 - Parâmetros de Qualidade Potenciais para o Sistema Estudado, Considerando a Razão de Avanço (R) de 1/4 como Ótima para Aplicar $Y_{rn} = 23,5$ mm no Final dos Sulcos.

Tratamento Q (l/seg)	E_{pd} (%)	E_{pa} (%)	Y_{ro} (mm)	I_{ro} (%)	Z_p (mm)	I_p (mm)
T ₁ (0,753)	93,4	26,4	63,7	71,7	1,7	1,87
T ₇ (0,764)	93,2	26,8	62,5	71,2	1,8	2,00
T ₂ (1,30/0,77)	92,9	29,0	55,6	68,7	1,8	2,20
T ₈ (1,37/0,75)	93,7	22,0	81,6	76,5	1,6	1,50
T ₃ (1,337)	93,4	24,0	72,5	74,2	1,7	1,70
T ₉ (1,330)	93,2	24,9	69,1	73,3	1,7	1,80

Observa-se, ainda, através das TABELAS 20 e 21 que o aumento do comprimento dos sulcos provocou um incremento de E_{pa} , sendo que no tratamento número nove (9), observou-se um maior valor. Fica caracterizado ainda, através das mesmas TABELAS (tratamento 2 e 8) que a prática da redução da vazão inicial torna-se mais viável quando se usam sulcos de maior comprimento ($E_{pa} = 67,9\%$ e $Y_{ro} = 23,5$ mm com $Q = 1,30/0,77$ l/seg para $L = 137$ m e $E_{pa} = 47,1\%$ e $Y_{ro} = 61,9$ mm com $Q = 1,37/0,75$ l/seg para $L = 97$ m).

4.6 - Cálculos de Projeto e Manejo do Sistema de Irrigação por Sulcos, Utilizando a Metodologia do SCS-USDA

Os cálculos de projeto usando-se a metodologia pro

TABELA 20 - Condições de Manejo para o Sistema Estudado Considerando a Razão de Avanço (R) de 1/4 como Ótima para Aplicar $Y_{rn} = 58,75$ mm no Final dos Sulcos.

Tratamento	T_{rn}	T_{av}	T_{co}	L	Z_i	Z_f	Y_b
Q (l/seg)	(min)	(min)	(min)	(m)	(mm)	(mm)	(mm)
T_1 (0,753)	168,2	42,1	210,3	89,6	67,0	58,75	132,5
T_7 (0,764)	142,1	35,5	117,6	96,3	67,3	58,75	105,6
T_2 (1,30/0,77)	137,0	34,3	171,3	136,9	67,5	58,75	86,6
T_8 (1,37/0,75)	139,0	34,8	173,8	97,0	66,7	58,75	124,6
T_3 (1,337)	139,7	34,9	174,6	116,1	67,1	58,75	150,8
T_9 (1,330)	131,8	33,0	164,8	170,0	67,3	58,75	96,7

TABELA 21 - Parâmetros de Qualidade Potenciais para o Sistema Estudado Considerando a Razão de Avanço (R) de 1/4 como Ótima para Aplicar $Y_{rn} = 58,75$ mm no Final dos Sulcos.

Tratamento Q (l/seg)	E_{pd} (%)	E_{pa} (%)	Y_{ro} (mm)	I_{ro} (%)	Z_p (mm)	I_p (%)
T ₁ (0,753)	93,5	44,3	69,7	52,6	4,1	3,1
T ₇ (0,764)	93,2	55,6	42,7	40,4	4,2	4,0
T ₂ (1,30/0,77)	93,1	67,9	23,5	27,1	4,4	5,1
T ₈ (1,37/0,75)	93,7	47,1	61,9	49,6	4,0	3,2
T ₃ (1,337)	93,4	39,0	87,9	58,3	4,2	2,8
T ₉ (1,330)	93,2	60,8	33,7	34,8	4,3	4,4

posta pelo SCS-USDA, a partir dos dados obtidos na área estudada (Ver TABELA 22), foram feitos fixando-se os parâmetros inerentes aos sulcos (comprimento (L), espaçamento (W) e declividade (S_o)), como também, a lâmina d'água a aplicar no final dos sulcos para levar o solo às condições de capacidade de campo (Y_{rn}) e obtendo-se os coeficientes de rugosidade (n) e a família de infiltração (I_f) de acordo com as condições normais de manejo no local de estudo.

Uma consequência da aplicação dessa metodologia é que o tempo de aplicação foi reduzido (T_{co} menor que os 120 min utilizado nos testes de campo). Como pode ser observado (TABELA 22), uma simples redução do T_{co} foi suficiente para provocar um aumento de E_a e uma redução nas perdas d'água. No entanto, continua havendo grandes perdas por escoamento superficial (entre 64% e 78% para T_1 e T_9 , respectivamente), o que está de acordo com MERRIAM & KELLER (1978), os quais puderam constatar que havendo alta eficiência de distribuição, baixa eficiência de aplicação e pouca ou nenhuma água se perdendo por percolação profunda, estará havendo grandes perdas d'água por escoamento superficial, responsável pela baixa eficiência de aplicação. Tais perdas podem ser reduzidas ainda mais manejando-se também a vazão aplicada (Q) e/ou reelaborando-se o projeto para um comprimento de sulco maior (L), caso as condições de campo o permitam.

Para estudar o efeito da vazão e do comprimento dos sulcos sobre a redução do escoamento superficial, a metodologia do SCS-USDA foi aplicada simulando-se diferentes vazões e um comprimento de sulco que é o dobro das condições de campo. A TABELA 23 mostra o efeito da vazão (Q) e do "n" de MANNING sobre as perdas (Y_{ro} e Z_p) e sobre a eficiência de aplicação (E_a), para o comprimento de sulco de 80,0 m.

O efeito do uso de uma menor vazão, para as mesmas condições de projeto, é reduzir sensivelmente as perdas por escoamento superficial e aumentar a eficiência de aplicação. Por exemplo, quando se irriga com uma vazão $Q_2 = 0,67$ l/seg em comparação a $Q_1 = 1,34$ l/seg, ou seja, $Q_1 = 2 Q_2$

TABELA 22 - Cálculos de Projeto a Partir dos Dados Obtidos na Área Estudada, Através da Metodologia Proposta pelo SCS-USDA.

Tratamento Q (l/seg)	L (m)	W (m)	S _o (%)	I _f [*]	Y _{rn} (cm)	Y _b (cm)	T _{co} (min)	T _{av} (min)	Y _{ro} (cm)	Z _p (cm)	E _a (%)	E _d (%)
T ₁ (0,753)	80,0	0,80	0,644	0,5	2,35	7,04	100,00	14,08	4,56	0,13	33,38	94,74
T ₇ (0,764)	80,0	0,80	0,644	0,5	2,35	6,93	97,00	14,00	4,45	0,13	33,86	94,63
T ₂ (1,30/0,77)	80,0	0,80	0,644	0,5	2,35	7,82	100,00	12,21	5,16	0,32	30,02	92,60
T ₈ (1,37/0,75)	80,0	0,80	0,644	0,5	2,35	8,06	104,63	12,10	5,52	0,19	29,14	92,50
T ₃ (1,337)	80,0	0,80	0,644	0,5	2,35	11,01	87,85	12,15	8,54	0,12	21,32	95,11
T ₉ (1,330)	80,0	0,80	0,644	0,5	2,35	11,07	88,85	12,20	8,59	0,12	21,20	95,18

* - Obtido através da TABELA 42, com as características de infiltração determinadas pelo método de entrada e saída do fluxo d'água.

obtêm-se um aumento de E_a da ordem de 60% ($E_a = 18,17\%$ e $21,26\%$ para $Q = 1,34$ l/seg; e $E_a = 29,41\%$ e $33,57\%$ para $Q = 0,67$ l/seg). Por sua vez, as perdas por escoamento superficial foram reduzidas em torno de 47%, uma vez que a lâmina de escoamento superficial (Y_{ro}) diminuiu de 10,49 cm para 5,54 cm ($n = 0,04$) e de 8,59 cm para 4,52 cm ($n = 0,066$). A mesma tendência é observada quando são comparados os resultados obtidos com o uso de uma vazão $Q_3 = 0,45$ l/seg ($Q_3 = 1/3 Q_1$). O aumento em E_a , nesse caso, é da ordem de 100 a 115%, enquanto Y_{ro} é reduzida em 66 a 76%.

O efeito do aumento do "n" de MANNING para uma mesma vazão, é incrementar E_a e reduzir Y_{ro} . Isto se deve, certamente, ao aumento de P_m devido à maior resistência ao fluxo d'água. Deveria ocorrer, também, um aumento do tempo de avanço em virtude desse aumento de resistência ao fluxo. Este efeito, contudo, não é refletido nos resultados (Ver TABELA 23) por um simples fato: a equação de avanço é empírica, e não é o resultado da aplicação do princípio da conservação da massa, à irrigação por sulcos.

Na TABELA 24 são encontrados os parâmetros calculados para duas diferentes vazões ($Q_2 = 0,67$ l/seg e $Q_3 = 0,45$ l/seg) e um comprimento de sulco que é o dobro do valor utilizado na TABELA 23, ou seja, $L = 160$ m.

Como pode ser observado (comparando as TABELAS 23 e 24), um aumento no comprimento do sulco, para a mesma vazão, tende a incrementar E_a e reduzir Y_{ro} . Para $Q = 0,67$ l/seg, a E_a foi incrementada em 59% ($E_a = 33,57\%$ para $L = 80$ m e $E_a = 53,54\%$ para $L = 160$ m), enquanto Y_{ro} foi reduzida em 63% ($Y_{ro} = 4,52$ cm para $L = 80$ m e $Y_{ro} = 1,65$ cm para $L = 160$ m). Quando são combinados uma menor vazão ($Q = 0,45$ l/seg) com um maior comprimento de sulco ($L = 160$ m) têm-se a maior eficiência ($E_a = 65,14\%$) e o menor escoamento superficial ($Y_{ro} = 0,74$ cm).

Em resumo, a presente metodologia permite ao técnico testar diferentes opções de projeto e manejo do sistema

TABELA 23 - Parâmetros de um Sistema de Irrigação por Sulcos em Declive Calculados pela Técnica do SCS-
USDA para o Comprimento de Sulco de 80,0 m.

Parâmetros Calculados	(Q)	1,34 l/seg		0,67 l/seg		0,45 l/seg	
	(n)	0,040	0,066	0,040	0,066	0,040	0,066
P_m (cm)		3,76	4,19	3,28	3,61	3,07	3,33
T_{av} (min)		12,41	12,41	14,67	14,67	17,74	17,74
T_{rn} (min)		90,54	75,59	112,17	96,47	124,94	109,17
T_{co} (min)		102,68	87,73	126,85	111,15	142,67	126,91
T_{oL} (min)		96,98	82,03	120,36	104,66	135,27	119,51
Z_{oL} (cm)		2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46
Y_b (cm)		12,93	11,05	7,98	7,01	5,99	5,33
Y_{ro} (cm)		10,49	8,59	5,54	4,52	3,51	2,04
Z_p (cm)		0,10	0,13	0,10	0,13	0,13	0,15
E_a (%)		18,17	21,26	29,41	33,57	29,23	44,10

TABELA 24 - Parâmetros de um Sistema de Irrigação por Sulcos em Declive Calculados pela Técnica do SCS- USDA para o Comprimento de Sulco de 160 m e $n = 0,066$.

Parâmetros Calculados	Q em l/seg e (gal/min)	
	0,67 (10,65)	0,45 (7,10)
P_m (cm)	3,61	3,33
T_{av} (min)	42,87	62,65
T_{rn} (min)	96,47	109,17
T_{co} (min)	139,35	171,82
T_{OL} (min)	122,44	149,64
Z_{OL} (cm)	2,74	2,87
Y_b (cm)	4,39	3,61
Y_{ro} (cm)	1,65	0,74
Z_p (cm)	0,38	0,53
E_a (%)	53,54	65,14

de irrigação por sulcos em declive. Este procedimento conduz a sistemas de irrigação mais eficientes. Além do mais, com o uso de vazões pequenas é possível reduzir os custos de operação do sistema. Observa-se que a lâmina bruta (Y_b) foi grandemente reduzida quando se combina menor vazão e maior comprimento ($Q = 0,45$ l/seg e $L = 160$ m), em comparação com a maior vazão e o menor comprimento ($Q = 1,34$ l/seg e $L = 80,00$ m). Uma maneira mais eficiente é a utilização da técnica de redução de vazão.

A metodologia para irrigação com redução de vazão foi aplicada ao mesmo exemplo. A TABELA 25 mostra o efeito da vazão Q e do "n" de MANNING sobre as perdas (Y_{ro} e Z_p) e sobre a eficiência de aplicação (E), para o mesmo comprimento de sulco ($L = 80$ m). A redução do escoamento superficial e o aumento de E_a quando uma vazão menor é utilizada podem ser observados na TABELA 25.

A importância da técnica de redução de vazão no aumento da eficiência na irrigação por sulcos em declive, pode ser analisada pela comparação dos resultados das TABELAS 25 e 26 com aqueles das TABELAS 23 e 24. Por exemplo, ao comparar os resultados da coluna 4 na TABELA 23 com os da coluna 4 na TABELA 25 pode ser constatado um incremento de 50% em E_a , devido ao uso da redução de vazão, para as mesmas condições de projeto ($Q = 0,67$ l/seg; $n = 0,066$ e $L = 80$ m). Enquanto isso, o escoamento superficial é reduzido em 53% ($Y_{ro} = 4,52$ cm, e $Y_{ro} = 2,11$ cm, sem e com redução de vazão, respectivamente).

Um projeto em que a água seja mais eficientemente utilizada, pode ainda ser elaborado, quando a opção de usar sulcos mais compridos é combinada com uma redução de vazão. Isto pode ser visto, comparando as colunas 1 e 2 da TABELA 26. Observa-se que a E_a é incrementada em 45% quando se utiliza sulcos de 160 m de comprimento, em comparação com o comprimento de 80m. O escoamento superficial, por sua vez, é reduzido em 80% ($Y_{ro} = 2,11$ cm para $L = 80$ m e $Y_{ro} = 0,43$ cm para $L = 160$ m). É possível, portanto, projetar um sistema

TABELA 25 - Parâmetros de um Sistema de Irrigação por Sulcos em Declive, com Redução de Vazão, Calculados pela Técnica do SCS-USDA para o Comprimento de Sulco de 80,0 m.

Parâmetros Calculados	(Q) 1,34/0,67 l/seg		(Q) 0,67/0,35 l/seg	
	(n) 0,040	0,066	0,040	0,066
P_m (cm)	3,76	4,19	3,28	3,81
P_{m1} (cm)	3,28	3,61	2,92	3,18
T_{av} (min)	12,14	12,14	14,67	14,67
T_{rn} (min)	112,09	96,39	133,78	118,14
T_{co} (min)	124,22	108,53	148,45	132,81
T_{oav} (min)	5,09	5,70	6,49	6,49
Y_b (cm)	8,59	7,59	5,13	4,65
Z_{oL} (cm)	2,51	2,54	2,51	2,54
Y_{ro} (cm)	6,07	5,05	2,64	2,11
Z_p (cm)	0,18	0,20	0,15	0,18
E_a (%)	27,34	30,90	45,73	50,56

TABELA 26 - Parâmetros de um Sistema de Irrigação por Sulcos em Declive, com Redução de Vazão, Calculados pela Técnica do SCS-USDA, para $Q = 0,67/0,35$ l/seg e $n = 0,066$.

Parâmetros Calculados	Comprimento (L)	
	80,0 m	160,0 m
P_m (cm)	3,61	3,61
P_{ml} (cm)	3,18	3,18
T_{av} (min)	14,67	42,87
T_{rn} (min)	118,14	118,14
T_{co} (min)	132,81	181,01
T_{oav} (min)	6,49	16,91
Y_b (cm)	4,65	3,20
Z_{oL} (cm)	2,54	2,79
Y_{ro} (cm)	2,11	0,43
Z_p (cm)	0,18	0,43
E_a (%)	50,56	73,15

de irrigação por sulcos em declive com 73,2% de eficiência de aplicação, 13,4% de escoamento superficial e 13,4% de percolação profunda, para o local em estudo.

É importante observar que quanto mais eficiente é o sistema, maiores devem ser os gastos. Por exemplo, o uso de redução de vazão aumenta a necessidade de mão-de-obra. Por outro lado, o tempo de irrigação, T_{CO} , será dilatado de 102,68 min (1 h e 42 min) no caso de menor E_a (TABELA 23) para 161,01 min (2 h e 41 min) quando a E_a é a maior possível.

5 - CONCLUSÕES

Os dados apresentados neste trabalho e discutidos no capítulo anterior possibilitam concluir que:

5.1 - A diminuição da velocidade de fluxo durante a fase de avanço reduz a eficiência de distribuição da água ao longo dos sulcos, isto é, quanto maior a razão de avanço (R), menor será a eficiência de distribuição da água ao longo dos sulcos.

5.2 - Aumentando a velocidade de fluxo, ou seja, reduzindo a razão de avanço (R), há um aumento das perdas d'água por escoamento superficial e uma conseqüente diminuição da eficiência de aplicação d'água.

5.3 - Ao considerar-se a recessão instantânea, pode-se subestimar o tempo de oportunidade de infiltração e, conseqüentemente, as lâminas infiltradas ao longo dos sulcos, o que neste caso levaria a super-estimar a eficiência de aplicação d'água.

5.4 - Neste estudo, onde o comprimento, espaçamento, forma e declividade dos sulcos e infiltração podem ser considerados constantes, as vazões e os coeficientes de rugosidade (n) foram os fatores que mais influenciaram na forma das curvas de avanço e recessão.

5.5 - Para as condições desse estudo, diminuindo-se a vazão, há uma maior influência da rugosidade (n) na velocidade de de fluxo.

5.6 - Os resultados de eficiência de aplicação, obtidos no campo, são considerados muito baixos, mesmo havendo boa eficiência de distribuição e de armazenamento. Isto se deve às perdas por escoamento superficial e percolação profunda, as quais foram altas. O que se pode fazer para aumentar a eficiência de aplicação é: aplicar água no tempo real necessário para infiltrar a lâmina desejada (65,4 min para $Q = 0,764$ l/seg), calculado pela equação de infiltração; ou outro artifício é diminuir ainda mais a vazão ($Q = 0,45$ l/seg), já que os sulcos são de pequeno comprimento; ou ainda, aumentar o comprimento dos sulcos (em torno de 160m). No caso de aumentar o comprimento dos sulcos, torna-se viável aplicar a técnica de redução da vazão.

5.7 - A aplicação da técnica do SCS-USDA possibilita testar diferentes opções de projeto e manejo, sem recorrer a realização de testes de avanço e recessão de campo, já que a equação de avanço é conhecida a priori.

5.8 - A metodologia para elaboração de projetos de irrigação por sulcos proposta pelo SCS-USDA, não reflete o efeito do "n" de MANNING sobre o avanço, em virtude do empirismo da equação de avanço.

5.9 - Quando se aplicou uma lâmina d'água maior no final dos sulcos (admitindo que a irrigação seja projetada para 50 cm de profundidade de solo e não os 20 cm usados para a cultura do milho) para as mesmas condições ($L = 80$ m), houve um acréscimo na E_d e uma diminuição da E_a (para $Q = 1,330$ l/seg). Entretanto, com o aumento do comprimento do sulco para proporcionar uma $R = 1/4$ ($L = 170$ m), ocorreu uma diminuição das perdas por escoamento superficial e um acréscimo na E_a ($E_a = 31,2\%$ para $L = 80$ m e $E_a = 60,8\%$ para $L = 170$ m).

6 - RECOMENDAÇÕES

Com os resultados obtidos neste estudo, o autor faz as seguintes recomendações:

6.1 - Deve-se plotar as curvas de recessão a partir dos dados obtidos no campo, para que não seja subestimado o tempo de oportunidade de infiltração, principalmente quando se trabalha em solos aluvial.

6.2 - Em estudos posteriores, recomenda-se fazer as determinações das alturas e larguras das lâminas d'água também ao longo dos sulcos, em espaços regulares, a fim de melhor se estimar os coeficientes de rugosidade (n).

6.3 - Para estudos de avaliação da irrigação por sulcos, recomenda-se o uso do método de entrada e saída do fluxo d'água para se determinar as características de infiltração do solo, embora, para elaboração de projetos seja recomendado o método do sulco infiltrômetro o qual também expressa bons resultados.

6.4 - Sempre que se trabalhar com sulcos de pequeno comprimento (em torno de 80 m) recomenda-se o uso de pequenas vazões (aproximadamente 0,45 l/seg) sem redução, para condições de solo similares aos do presente estudo.

6.5 - Para condições similares da área estudada, recomenda-se ainda, o uso de sulcos de maior comprimento (em torno de 160 m ou mais), que quando combinados com a técnica de redução de vazão ($Q = 0,67/0,35$ l/seg) proporcionam maiores eficiências (E_a em torno de 70,0%).

6.6 - É recomendado, ainda, a repetição deste trabalho considerando diferentes tipos de solo, vazões, altura de lâminas d'água a aplicar, diversos comprimentos e declividade de sulco.

6.7 - É necessário o desenvolvimento de pesquisas que tenham objetivo estudar os seguintes aspectos:

- Modelos simplificados da recessão;
- Influência da resistência ao fluxo d'água em sulcos, em vários estágios de desenvolvimento das culturas;
- Importância dos diferentes métodos de determinação da infiltração na irrigação por sulcos;
- Testar as metodologias aqui estudadas para outras opções de déficit de umidade do solo após a irrigação.

7 - LITERATURA CITADA

- BAVER, L. D.; Gardner, W. H. & Gardner, W. R. Física del Suelos (Soil Physics). México, Union Tipográfica Editorial Hispano-Americana, 1973. 529p.
- BERNARDO, S. Irrigação por superfície. Viçosa, UFV, Imprensa Universitária, 1980. 69p.
- BERNARDO, S. Manual de Irrigação. Viçosa, UFV, Imprensa Universitária, 1982. 463p.
- BISHOP, A. A. Relation of Intake Rate to Length of Run in Surface Irrigation. Transaction of the American Society of Civil Engineers, vol. 127, Part III, 1962. p.282-293.
- BONDURANT, J. A. Developing Furrow Infiltrometer. Agricultural Engineering, St. Joseph, Michigan, 38(8): 602-604p, 1957.
- BOUWER, H. Infiltration Patterns for Surface Irrigation. Agricultural Engineering, p. 662-664, 676, 1957.
- CHRISTIANSEN, J. E. ; Bishop, A. A. ; Kiefer, F. W. & Fok, Yu-Si. Evaluation of Intake Rate Constants of Related to Advance of Water in Surface Irrigation. Transaction of the American Society of Agricultural Engineers, Chicago, 671-674p. 1966.
- CRIDDLE, W. D. ; Davis, S. ; Pair, C. H. & Shockley, D. G. Methods of Evaluating Irrigation Systems. Washington, Agricultural Handbook nº 82, SCS-USDA, 1956.
- DAVIS, J. R. & Fry, A.W. Measurement of Infiltration Rates in Irrigated Furrows. Transaction of the American Society of Agricultural Engineers, California, 6 (4): 318-319p, 1963.

- ESPÍNOLA, F. C.S. Comparação de métodos de infiltração de água no solo. Santa Maria, RS, 1977. 88p. Tese de Mestrado em Engenharia Rural.
- FANGMEIER, D. D. & Strelkoff, T. Mathematical Models and Border Irrigation Desing. Transaction of the American Society of Agricultural Engineers, 22(1):93-99p, 1979.
- GOMIDE, R. L. Determinação de Parâmetros de Irrigação por Infiltração em Sulcos em Solos de Cerrado (várzeas) de Prudente de Morais. EPAMIG, Prudente de Morais, MG, 1982. 47p.
- GRASSI, C. J. Metodos del Riego. CIDIAT, Merida, Venezuela, 1972. 270p.
- HALL, W.A. Estimating Irrigation Border Flow. Agricultural Engineers, 37 (4): 263-265p, 1956.
- HAMAD, S. N. & Stringham, G. E. Maximum Nonerosive Furrow Irrigation Stream Size. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, 1978. 275-281p.
- HANSEN, V. E. New Concepts in Irrigation Efficiency. Transaction of the ASAE, 1960. 3 (1): 55-57, 61-64p.
- HILLEL, D. Solo e Água - fenômeno e princípios físicos (Soil and Water Physical Principles and Processes). Porto Alegre, RS, Departamento de Solos da UFRGS. 1970. 231p.
- I-Pai Wu. Recession Flow in Surface Irrigation. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, 77-89 p, 1972.
- I-Pai Wu & Bishop, A. A. Graphic Relation of Intake, Length-of-Run and Time. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, 233-240p, 1970.
- ISRAELSEN, O. W. Irrigation Principles and Practices, 2nd ed., New York, John Wiley & Sons, p. 1950.

- KARMELI, D. ; Salazar, J. L. & Walker, W. R. Assessing the Spatial Variability of Irrigation Water Applications. colorado, USA, Department of Agricultural and Chemical Engineering, Colorado State University, Fort Collins, 1978. 201p.
- LIRA, M. A. Cultura do Milheto (*Peninnsetum americanum*). Recife, PE. Convênio BNB/IPA, 14p. 1981.
- MERRIAM, J. L. & Keller, J. Farm Irrigation Systems Evaluation: A Guide for Management. Agr. and Irr. Eng. Dept., Utah State University, Logan, Utah, 1978. 271p.
- NANCE Jr., L.A. & Lambert, J.R. A Modified Inflow-Ourflow Method of Measuring Infiltration in Furrow Irrigation. Transaction of the American Society of Agricultural Engineers, Logan, Utah, 792-794p, 1968.
- PHILIP, J. R. The Theory of infiltration: 5. The influence of the initial moisture content. Soil Sci. 3 84) : 329-339p, 1957.
- REICHARDT, K. Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. 3. ed. rev., Piracicaba, SP, Centro de Energia Nuclear na Agricultura e Fundação Cargil, 1975. 285p.
- SAKKAS, J. G. & Strelkoff, T. Hydrodynamics of Surface Irrigation - Advance phase. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, 100 (IR 1):31-48p, 1974.
- SCS-USDA. A practical method of determining proper lengths of runs sizes furrows of irrigation lands. Soil Conservation Service, 1974.
- SCS-USDA. Furrow irrigation desing and evaluation. Section 15, Chapter 5, National Engineering Handbook, Washington, D. C.; 1980. 110p. Unedited draft.
- SOUZA, F. de. Nonlinear Hydrodynamic Model of Furrow Irrigation. Dissertation Submitted in partial Satisfaction of the requirements for the degree of DOCTOR of PHILOSOPHY, Davis, USA, University of California, 1981. 172p.

- WILKE, O. C. & Smerdon, E. T. A Solution of the Irrigation Advance Problem. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, 91:23-34p, 1965.
- WILKE, O. C. & Smerdon, E. T. A Hydrodynamic Determination of Cutback Stream Sizes for Irrigation Furrows. Transaction of the American Society of Agricultural Engineers, Chicago, 634-637p, 1969.
- WILLARDSON, L. S. & Bishop, A. A. Analysis of Surface Irrigation Application Efficiency. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, 21-35p, 1967.

APÊNDICE "A"

TABELA 27 - Coordenadas Geográficas e Características Climáticas da Fazenda Experimental do DNOCS, no Vale do Banabuiú, Morada Nova, Ceará.

Latitude (sul)	Longitude (W. Gr.)	Altitude (m)	Temp. \bar{x} Anual (°C)	Temp. \bar{x} 09 a 11/1982 (°C)	Precip. \bar{x} Anual (mm)	Precip. \bar{x} 09 a 11/1982 (mm)
05° 10'	38° 22'	80,0	25,0	28,7	700,0	0,00

APÊNDICE "B"

1 - Técnica do Sulco Infiltrômetro para Determinação da Infiltração do Solo

- Descrição do Infiltrômetro

O sulco infiltrômetro foi desenvolvido para simular as condições que existem em um sulco, durante a irrigação e medir diretamente a taxa de infiltração de água (BONDURANT, 1957). Uma secção transversal ao sulco é isolada por duas placas de metal semi-circulares. Um nível de água constante é mantido na secção transversal do sulco. O nível da água no reservatório de suprimento é medido em intervalos frequentes, e a taxa de infiltração é computada a partir desses dados, considerando como área de influência do infiltrômetro, o seu comprimento multiplicado pelo espaçamento entre sulcos.

O sulco infiltrômetro consiste das seguintes partes:

- duas chapas de aço semi-circulares com diâmetro de aproximadamente 60 cm;

- um reservatório com dispositivo externo transparente para leitura do nível da água, conectado a uma mangueira na sua parte superior para a aplicação do princípio dos vasos comunicantes, com o objetivo de se manter o nível da água constante no sulco infiltrômetro (Ver FIGURA 17).

- uma lona plástica para inicialmente estabilizar e manter o nível da água constante no sulco infiltrômetro e permitir a determinação mais acurada da infiltração no primeiro minuto de teste.

- Procedimento de Uso

Selecionar uma área no sulco de irrigação. Assentar

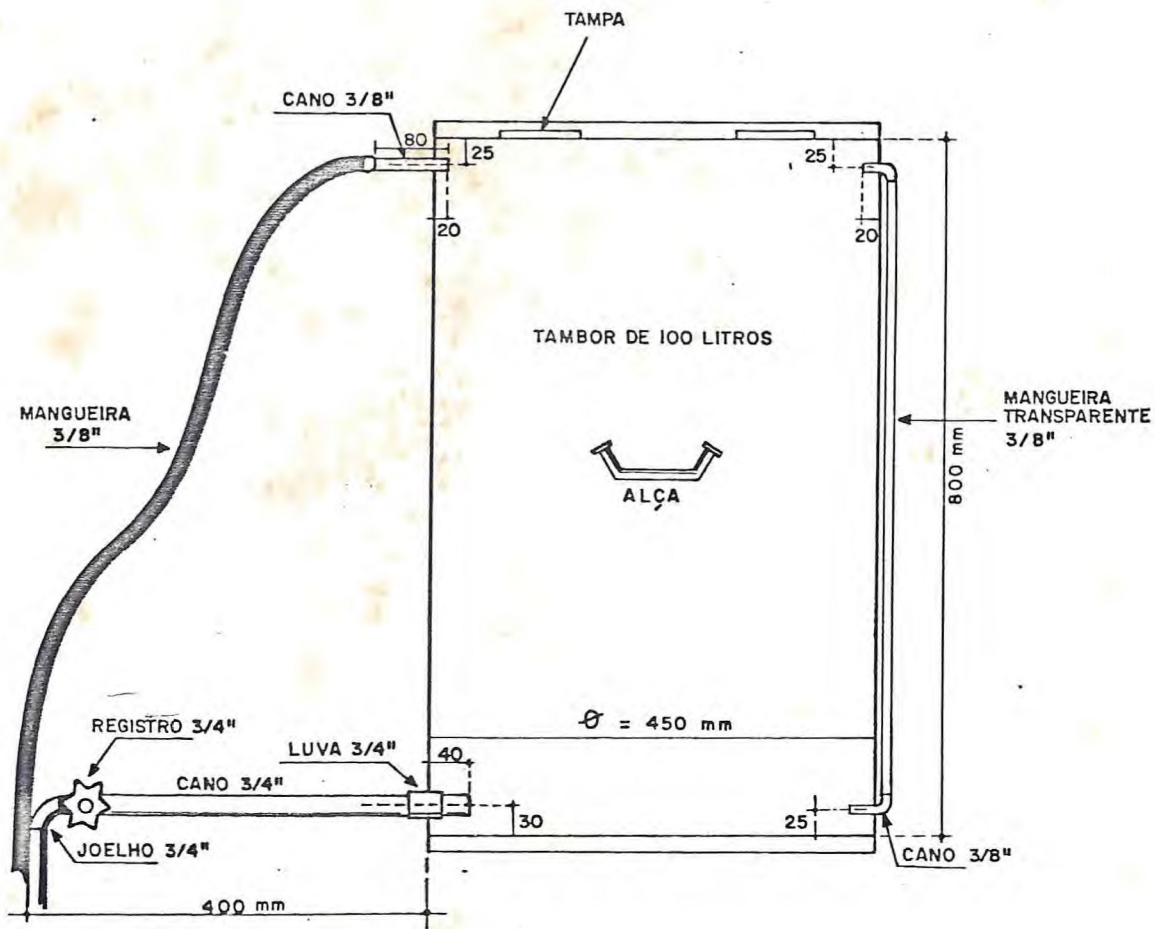


FIGURA 17 - Sistema de carga constante para medida da in filtração da água em sulcos.

as duas chapas metálicas perpendiculares à secção transversal do sulco, a uma distância conhecida. Introduzir as chapas a uns quinze centímetros de profundidade no solo, aproximadamente.

Assentar o reservatório próximo ao sulco infiltrômetro e completar seu volume, fechando-o hermeticamente em seguida. Cobrir a secção do sulco infiltrômetro com a lona plástica e adicionar água até uma altura aproximadamente igual à média dos dois sulcos laterais, os quais deverão estar sendo irrigados com a vazão de projeto. Introduzir a ponta da mangueira de entrada de ar ao nível da água no sulco infiltrômetro e abrir o registro de saída d'água do reservatório. Retirar a lona plástica rápida e cuidadosamente e fazer o primeiro registro do nível da água no tambor (reservatório) nunca antes dos três primeiros minutos de teste, devido à oscilação da água no reservatório.

À medida que o nível da água no sulco infiltrômetro diminui, entra ar pela mangueira conectada na parte superior do reservatório (FIGURA 17) permitindo assim, a saída d'água pelo registro (princípio dos vasos comunicantes) até cobrir novamente a ponta inferior da mangueira. Este processo continua até a estabilização da lâmina infiltrada com o tempo. Para solos com alta velocidade de infiltração, recomenda-se usar dois ou mais reservatórios.

A TABELA 28 ilustra as determinações feitas pelo método do sulco-infiltrômetro. Os valores de tempo acumulado e lâmina infiltrada acumulada são plotadas em papel log-log para a determinação das equações de infiltração acumulada e de velocidade de infiltração (Ver FIGURA 6 e 7).

TABELA 28 - Exemplo de um dos Testes de Infiltração Realizado pelo Sulco Infiltrômetro.

Hora	Tempo		Leitura no Tambor (cm)	Volume Infilt. (litros)	Lâmina Infiltrada (cm)
	Instant. (min)	Acumulado (min)			
14:00	00	000	0,0	00,000	0,000
14:03	03	003	2,1	03,308	0,414
14:08	05	008	5,7	08,978	1,122
14:14	06	014	9,3	14,648	1,831
14:24	10	024	12,4	19,530	2,441
14:34	10	034	15,2	23,940	2,993
14:49	15	049	19,1	30,083	3,760
15:04	15	064	22,5	35,438	4,430
15:34	30	094	26,9	42,368	5,296
16:04	30	124	31,0	48,825	6,103
16:34	30	154	34,1	53,708	6,714
17:04	30	184	37,2	58,590	7,324
17:34	30	214	40,2	63,315	7,914
18:04	30	244	43,1	67,883	8,485

* - Uma diferença de 1 cm de nível de água no tambor, neste caso corresponde ao volume de 1,575 litros.

** - A parte do sulco tem 1,0 m de comprimento. Para o espaçamento de 0,8 m entre sulcos, o volume de um litro corresponde a: $\frac{0,001 \text{ m}^3}{\text{área do sulco infiltrômetro}}$ (lâmina infiltrada).

2 - Método do Cilindro Infiltrômetro para Determinação da Infiltração do Solo

Este método consiste de dois cilindros concêntricos de ferro, com 30 e 50 cm de diâmetro, respectivamente, ambos com 30 cm de altura. Os cilindros devem apresentar as bordas inferiores finas, em forma de bisel, para facilitar sua penetração sem alterar a estrutura do solo.

Seleciona-se o local de testes evitando-se rachaduras no solo, raízes de plantas e outros impecilhos à sua penetração. Introduzem-se os cilindros no solo por intermédio de golpes sucessivos de martelo, aplicados sobre uma placa de ferro apoiada sobre os cilindros, de maneira que sua penetração seja a melhor possível, na vertical, com o propósito de evitar a deformação da estrutura e promover o perfeito contato do solo com suas paredes. Os cilindros devem ser introduzidos a uma profundidade de 10 a 15 cm, aproximadamente.

No decorrer dos testes, deve-se manter o cilindro externo sempre suprido com água e reabastecer o cilindro interno sempre que o nível baixar aproximadamente cinco centímetros.

As determinações são feitas somente no cilindro interno através de uma escala milimétrica. As leituras podem ser tomadas em intervalos de tempo, conforme TABELA 29. Os valores de tempo acumulado e lâmina infiltrada são plotados em papel log-log para a determinação das equações de infiltração acumulada e de velocidade de infiltração (Ver FIGURA 6).

TABELA 29 - Exemplo de um Teste de Infiltração Realizado com o Cilindro Infiltrômetro.

Hora	Tempo Instant. (min)	Tempo Acumulado (min)	Leitura (cm)	Lâmina Instant. (cm)	Lâmina Acumulada (cm)
07:11	00	000	17,7	0,0	00,0
07:12	01	001	17,5	0,2	00,2
07:14	02	003	17,2	0,3	00,5
07:16	02	005	17,0	0,2	00,7
07:21	05	010	16,5	0,5	01,2
07:26	05	015	16,2/18,1	0,3	01,5
07:36	10	025	17,6	0,5	02,0
07:46	10	035	17,3	0,3	02,3
08:02	16	051	16,9	0,4	02,7
08:20	18	069	16,5/18,4	0,4	03,1
08:50	30	099	17,6	0,8	03,9
09:20	30	129	16,9	0,7	04,6
09:50	30	159	16,1/19,0	0,8	05,4
10:20	30	189	18,4	0,6	06,0
10:50	30	219	17,8	0,6	06,6
11:20	30	249	17,2/19,3	0,6	07,2
12:20	60	309	18,2	1,1	08,3
13:20	60	369	17,2	1,0	09,3
14:20	60	429	16,1	1,1	10,4

3 - Técnica de Entrada e Saída do Fluxo D'água para Determinação da Infiltração do Solo

Este método requer somente as medições de entrada e saída do fluxo d'água com o tempo, sobre uma secção do sulco, para a estimação da infiltração. O seguinte procedimento é usado:

Assentar duas calhas Parshall ou outro dispositivo de medição de vazão em sulco, em uma distância selecionada à parte. Esta distância usualmente varia de 30 a 75 m, segundo KARMELI et alii (1978). Medir e registrar as vazões de entrada e saída com os correspondentes tempos, na secção de sulco selecionada. A diferença entre a vazão de entrada e a de saída é a taxa de infiltração para a secção do sulco considerada.

As TABELAS 30 a 35 são exemplos de dados de campo obtidos através do método de entrada e saída. Os valores de tempo e velocidade de infiltração são plotados em papel log-log (Ver FIGURAS 4 a 7) para a determinação da equação da velocidade de infiltração do solo. A infiltração acumulada pode ser obtida através da integração da equação da taxa de infiltração.

TABELA 30 - Dados de Campo do Teste de Infiltração da Água do Solo, pelo Método de Entrada e Saída do Fluxo D'água.

Teste Nº: 1
 Local: Morada Nova, Ceará
 Bateria de Sulcos: Nº 1

Observador: SGA/PCS
 Solo: Franco
 Forma: Parabólica

Data: 20/10/82
 Declividade: 0,644%
 Condição: Boa

Tempo* (min)	Vazão (l/seg)**		Infiltração (I)	
	Entrada	Saída	(l/seg/80m)	(mm/hr)
	Estação "00"	Estação "08"		
00	0,753	0,00	0,000	00,00
45		0,37	0,383	21,54
60		0,44	0,313	17,61
90		0,47	0,283	15,92
105		0,47	0,283	15,92

* - Considerou-se o tempo "00" quando a frente de avanço atingiu a metade do percurso entre as estações "00" e 08".

** - Medições feitas através de calhas Parshall.

TABELA 31 - Dados de Campo do Teste de Infiltração da água no Solo, pelo Método de Entrada e Saída do Fluxo D'água.

Teste nº: 2
 Local: Morada Nova, Ceará
 Bateria de Sulcos: Nº 2

Observador: SGA/PCS
 Solo: Franco
 Forma: Parabólica

Data: 20/10/82
 Declividade: 0,644%
 Condição: Boa

Tempo* (min)	Vazão (l/seg)**		Infiltração	
	Entrada	Saída	(I)	
	Estação "00"	Estação "08"	(l/seg/80m)	(mm/hr)
00	1,30/0,77	0,00	0,000	00,00
23		0,73	0,570	32,06
33		0,81	0,490	27,56
48		0,38	0,390	21,94
63		0,40	0,370	20,81
93		0,44	0,330	18,56
112		0,44	0,330	18,56

* - Considerou-se o tempo "00" quando a frente de avanço atingiu a metade do percurso entre as estações "00" e "08".

** - Medições feitas através de calhas Parshall.

TABELA 32 - Dados de Campo do Teste de Infiltração da Água no Solo, pelo Método de Entrada e Saída do Fluxo D'água.

Teste Nº: 3
 Local: Morada Nova, Ceará
 Bateria de Sulcos: Nº 3

Observador: SGA/PCS
 Solo: Franco
 Forma: Parabólica

Data: 27/10/82
 Declividade: 0,644%
 Condição Boa

Tempo* (min)	Vazão (l/seg)**		Infiltração (I)	
	Entrada	Saída	(l/seg/80m)	(mm/hr)
	Estação "00"	Estação "08"		
00	1,337	0,00	0,00	00,00
18		0,61	0,727	40,89
28		0,87	0,467	26,27
38		0,93	0,407	22,89
52		0,93	0,407	22,89
68		1,02	0,317	17,83
98		1,02	0,317	17,83
112		1,02	0,317	17,83

* - Considerou-se o tempo "00" quando a frente de avanço atingiu a metade do percurso entre as estações "00" e "08".

** - Medições feitas através de calhas Parshall.

TABELA 33 - Dados de Campo do Teste de Infiltração da Água no Solo, pelo Método de Entrada e Saída do Fluxo D'água.

Teste Nº: 7
 Local: Morada Nova, Ceará
 Bateria de Sulcos: Nº 7

Observador: SGA/PCS
 Solo: Franco
 Forma: Parabólica

Data: 03/11/82
 Declividade: 0,644%
 Condição: Boa

Tempo * (min)	Vazão (l/seg) **		Infiltração (I)	
	Entrada	Saída	(l/seg/84m)	(mm/hr)
	Estação "00"	Estação "08"		
00	0,764	0,0000	0,000	00,00
34		0,270	0,494	27,79
49		0,366	0,398	22,39
64		0,419	0,345	19,41
94		0,445	0,319	17,94
108		0,456	0,308	17,33

* - Considerou-se o tempo "00" quando a frente de avanço atingiu a metade do percurso entre as estações "00" e "08".

** - Medições feitas através de calhas Parshall.

TABELA 34 - Dados de Campo do Teste de Infiltração da Água no Solo, pelo Método de Entrada e Saída do Fluxo D'água.

Teste Nº: 8
Local: Morada Nova, Ceará
Bateria de Sulcos: Nº 8

Observador: SGA/PCS
Solo: Franco
Forma: Parabólica

Data: 03/11/82
Declividade: 0,644%
Condição: Boa

Tempo * (min)	Vazão (l/seg) **		Infiltração (I)	
	Entrada Estação "00"	Saída Estação "08"	(l/seg/80m)	(mm/hr)
00	1,37/0,75	0,000	0,000	00,00
27		0,859	0,511	28,74
42		0,919	0,451	25,37
57		0,382	0,368	20,70
87		0,446	0,304	17,10
108		0,459	0,291	16,37

* - Considerou-se o tempo "00" quando a frente de avanço atingiu a metade do percurso entre as estações "00" e "08".

** - Medições feitas através de calhas Parshall.

TABELA 35 - Dados de Campo do Teste de Infiltração da Água no Solo, pelo Método de Entrada e Saída do Fluxo D'água.

Teste Nº: 9

Local: MORada Nova, Ceará

Bateria de Sulcos: Nº 9

Observador: SGA/PCS

Solo: Franco

Forma: Parabólica

Data: 03/11/82

Declividade: 0,644%

Condição: Boa

Tempo* (min)	Vazão (l/seg)**		Infiltração (I)	
	Entrada	Saída		
	Estação "00"	Estação "08"	(l/seg/80m)	(mm/hr)
00	1,330	0,000	0,000	00,00
16		0,632	0,698	39,26
26		0,779	0,551	31,00
36		0,870	0,460	25,88
51		0,928	0,402	22,61
66		0,981	0,349	19,63
96		0,993	0,337	18,96
113		0,999	0,331	18,62

* - Considerou-se o tempo "00" quando a frente de avanço atingiu a metade do percurso entre as estações "00" e "08".

** - Medições feitas através de calhas Parshall.

APÊNDICE "C"

TABELA 36 - Determinação do Tempo de Avanço e Recessão na Irrigação por Sulcos.

1 - Local: Morada Nova, Ceará	Observador: SGA/PCS	Data: 10/11/1983
2 - Cultura: Milheto	Estádio: Floração	Prof. Sistema Radicular: 20,0 cm
3 - Solo: Franco	Déficit de Umidade Admissível: 50,0%	
4 - Comp. dos Sulcos: 80,0 m	Espaçamento entre Sulcos: 0,80 m	Declividade: 0,644%
5 - Tempo de Irrigação: 02 h	Bateria de Sulco Nº: 01	Vazão: 0,753 l/seg

- Tempo de Avanço:

Tempo (min)			Estação
Hora	Diferença	Acumulado	
06:37		00	00
	02		
06:39		02	01
	05		
06:44		07	02
	03		
06:47		10	03
	04		
06:51		14	04
	04		
06:55		18	05
	05		
07:00		23	06
	05		
07:05		28	07
	05		
07:16	11	39	08

- Tempo de Recessão:

Tempo (min)			Estação
Hora	Diferença	Acumulado	
08:45		00	00
	01		
08:46		01	01
	03		
08:49		04	02
	07		
08:56		11	03
	03		
08:59		14	04
	-06		
08:53		08	05
	10		
09:03		18	06
	10		
09:13		28	07
	-04		
09:09		24	08

TABELA 37 - Determinação do Tempo de Avanço e Recessão na Irrigação por Sulcos.

1 - Local: Morada Nova, Ceará	Observador: SGA/PCS	Data: 10 a 11/1983
2 - Cultura: Milheto	Estágio: Floração	Prof. Sistema Radicular: 20,0 cm
3 - Solo: Franco	Déficit de Umidade Admissível: 50,0%	
4 - Comp. dos Sulcos: 80,0 m	Espaçamento entre Sulcos: 0,80 m	Declividade: 0,644%
5 - Tempo de Irrigação: 02 h	Bateria de Sulco Nº: 02	Vazão: 1,30/0,77 l/seg

- Tempo de Avanço:

Hora	Tempo (min)		Estação
	Diferença	Acumulado	
09:00		00	00
09:02	02	02	01
09:03	01	03	02
09:05	02	05	03
09:08	03	08	04
09:10	02	10	05
09:13	03	13	06
09:16	03	16	07
09:20	04	20	08

- Tempo de Recessão:

Hora	Tempo (min)		Estação
	Diferença	Acumulado	
11:16		00	00
11:10	-06	-06	01
11:13	03	-03	02
11:15	02	-01	03
11:25	10	09	04
11:20	-05	04	05
11:18	-02	02	06
11:23	05	07	07
11:28	05	12	08

TABELA 38 - Determinação do Tempo de Avanço e Recessão na Irrigação por Sulcos.

1 - Local: Morada Nova, Ceará	Observador: SGA/PCS	Data: 10 a 11/1983
2 - Cultura: Milheto	Estádio: Floração	Prof. Sistema Radicular: 20,0 cm
3 - Solo: Franco	Déficit de Umidade Admissível: 50,0%	
4 - Comp. dos Sulcos: 80,0 m	Espaçamento entre Sulcos: 0,80 m	Declividade: 0,644%
5 - Tempo de Irrigação: 02 h	Bateria de Sulco Nº: 03	Vazão: 1,337 l/seg

- Tempo de Avanço:

Tempo (min)			Estação
Hora	Diferença	Acumulado	
13:53		00	00
	01		
13:54		01	01
	03		
13:57		04	02
	02		
13:59		06	03
	02		
14:01		08	04
	02		
14:03		10	05
	03		
14:06		13	06
	04		
14:10		17	07
	03		
14:13		20	08

- Tempo de Recessão:

Tempo (min)			Estação
Hora	Diferença	Acumulado	
16:12		00	00
	02		
16:14		02	01
	02		
16:16		04	02
	02		
16:18		06	03
	03		
16:21		09	04
	09		
16:30		18	05
	-05		
16:25		13	06
	11		
16:36		24	07
	-03		
16:33		21	08

TABELA 39 - Determinação do Tempo de Avanço e Recessão na Irrigação por Sulcos.

1 - Local: Morada Nova, Ceará	Observador: SGA/PCS	Data: 10 a 11/1983
2 - Cultura: Milheto	Estádio: Floração	Prof. Sistema Radicular: 20,0 cm
3 - Solo: Franco	Déficit de Umidade Admissível: 50,0%	
4 - Comp. dos Sulcos: 80,0 m	Espaçamento entre Sulcos: 0,80 m	Declividade: 0,644%
5 - Tempo de Irrigação: 02 h	Bateria de Sulco Nº: 07	Vazão: 0,764 l/seg

- Tempo de Avanço:

Hora	Tempo (min)		Estação
	Diferença	Acumulado	
08:00		00	00
08:03	03	03	01
08:06	03	06	02
08:09	03	09	03
08:12	03	12	04
08:16	04	16	05
08:19	03	19	06
08:25	06	25	07
08:34	09	34	08

- Tempo de Recessão:

Hora	Tempo (min)		Estação
	Diferença	Acumulado	
10:15		00	00
10:10	-05	-05	01
10:14	04	-01	02
10:17	03	02	03
10:22	05	07	04
10:28	06	13	05
10:31	03	16	06
10:29	-02	14	07
10:36	07	21	08

TABELA 40 - Determinação do Tempo de Avanço e Recessão na Irrigação por Sulcos.

1 - Local: Morada Nova, Ceará	Observador: SGA/PCS	Data: 10 a 11/1983
2 - Cultura: Milheto	Estádio: Floração	Prof. Sistema Radicular: 20,0 cm
3 - Solo: Franco	Déficit de Umidade Admissível: 50,0%	
4 - Comp. dos Sulcos: 80,0 m	Espaçamento entre Sulcos: 0,80 m	Declividade: 0,644%
5 - Tempo de Irrigação: 02 h	Bateria de Sulco Nº: 08	Vazão: 1,37/0,75 l/seg

- Tempo de Avanço:

Hora	Tempo (min)		Estação
	Diferença	Acumulado	
09:04		00	00
	02		
09:06		02	01
	02		
09:08		04	02
	04		
09:12		08	03
	03		
09:15		11	04
	03		
09:18		14	05
	05		
09:23		19	06
	04		
09:27		23	07
	05		
09:32		28	08

- Tempo de Recessão:

Hora	(Tempo (min))		Estação
	Diferença	Acumulado	
11:12		00	00
	10		
11:22		10	01
	01		
11:23		11	02
	13		
11:36		24	03
	-10		
11:26		14	04
	18		
11:44		32	05
	-10		
11:34		22	06
	02		
11:36		24	07
	10		
11:46		34	08

TABELA 41 - Determinação do Tempo de Avanço e Recessão na Irrigação por Sulcos.

1 - Local: Morada Nova, Ceará Observador: SGA/PCS Data: 10 a 11/1983
 2 - Cultura: Milheto Estádio: Floração Prof. Sistema Radicular: 20,0 cm
 3 - Solo: Franco Déficit de Umidade Admissível: 50,0%
 4 - Comp. dos Sulcos: 80,0 m Espaçamento entre Sulcos: 0,80 m Declividade: 0,644%
 5 - Tempo de Irrigação: 02 h Bateria de Sulco Nº: 09 Vazão: 1,33 l/seg

- Tempo de Avanço				- Tempo de Recessão:			
Tempo (min)			Estação	Tempo (min)			Estação
Hora	Diferença	Acumulado		Hora	Diferença	Acumulado	
13:56		00	00	16:10		00	00
	02				-02		
13:58		02	01	16:08		-02	01
	02				07		
14:00		04	02	16:15		05	02
	01				07		
14:01		05	03	16:22		12	03
	02				04		
14:03		07	04	16:26		16	04
	02				-07		
14:05		09	05	16:19		09	05
	02				05		
14:07		11	06	16:24		14	06
	03				01		
14:10		14	07	16:26		15	07
	03				03		
14:13		17	08	16:29		18	08

APÊNDICE "D"

TABELA 42 - Famílias de Infiltração em Sulcos e Coeficientes de Avanço*.

I_f	a	b	c	d
0,05	0,0210	0,6180	23,5040	$5,2567 \times 10^{-4}$
0,10	0,0244	0,6610	23,7975	$6,0449 \times 10^{-4}$
0,15	0,0276	0,6834	24,0908	$6,8331 \times 10^{-4}$
0,20	0,0306	0,6988	24,3841	$7,6213 \times 10^{-4}$
0,25	0,0336	0,7107	24,6773	$8,4095 \times 10^{-4}$
0,30	0,0364	0,7204	24,9706	$9,1977 \times 10^{-4}$
0,35	0,0392	0,7285	25,2639	$9,9859 \times 10^{-4}$
0,40	0,0419	0,7356	25,5571	$1,0774 \times 10^{-3}$
0,45	0,0445	0,7419	25,8504	$1,1562 \times 10^{-3}$
0,50	0,0471	0,7475	26,1436	$1,2350 \times 10^{-3}$
0,60	0,0520	0,7572	26,7302	$1,3927 \times 10^{-3}$
0,70	0,0568	0,7656	27,3167	$1,5503 \times 10^{-3}$
0,80	0,0614	0,7728	27,9032	$1,7080 \times 10^{-3}$
0,90	0,0659	0,7792	28,4898	$1,8656 \times 10^{-3}$
1,00	0,0703	0,785	29,0763	$2,0232 \times 10^{-3}$
1,50	0,0899	0,799	32,0090	$2,8114 \times 10^{-3}$
2,00	0,1084	0,808	34,9416	$3,5996 \times 10^{-3}$

* - Tabela compilada do original, apresentada pelo SCS-USDA (Unedited draft), e apresentam-se nas unidades Inglesas.

APÉNDICE "E"

- Sumário das Simbologias mais Frequentes.

E_a	-	Eficiência de aplicação d'água;
E_{pa}	-	Eficiência potencial de aplicação d'água;
E_d	-	Eficiência de distribuição;
E_{pd}	-	Eficiência potencial de distribuição;
E_s	-	Eficiência de armazenamento;
n	-	Coefficiente de rugosidade de MANNING;
R	-	Razão de avanço;
L	-	Comprimento dos sulcos;
W	-	Espaçamento entre sulcos;
S_o	-	Declividade dos sulcos;
I	-	Velocidade de infiltração;
T	-	Tempo;
T_{co}	-	Tempo de aplicação d'água;
T_{av}	-	Tempo de avanço;
T_o	-	Tempo de oportunidade;
T_{O-L}	-	Tempo de oportunidade médio;
Q	-	Vazão;
Q_1	-	Vazão reduzida (vazão de cutback);
P_m	-	Perímetro molhado;
P_{ml}	-	Perímetro molhado com vazão reduzida;
Z	-	Infiltração acumulada;
Z_u	-	Lâmina útil infiltrada;
Z_{O-L}	-	Lâmina média infiltrada;
Z_p	-	Perdas por percolação profunda;
I_p	-	Índice de perdas por percolação profunda;

- Y_b - Lâmina bruta de aplicação;
- Y_{rn} - Lâmina de projeto a ser aplicada (lâmina real ne
cessária);
- I_{ro} - Índice de perdas por escoamento superficial;
- Y_{ro} - Perdas por escoamento superficial;
- I_f - Família de infiltração.

APÉNDICE "F"

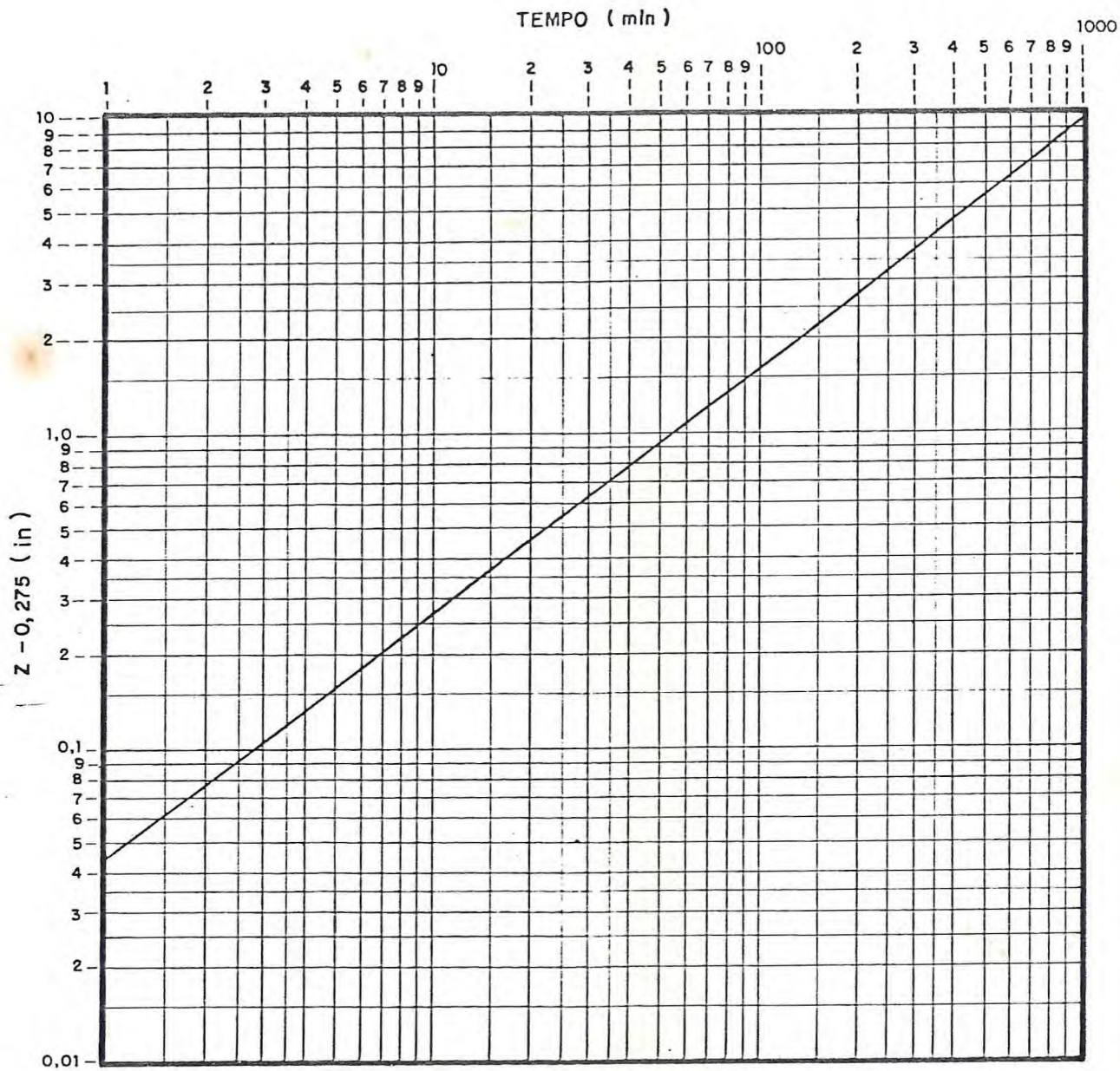


FIGURA 18 - Infiltração acumulada vs. tempo obtida pelo método de entrada e saída com a vazão de 1,30/0,77 l/seg.

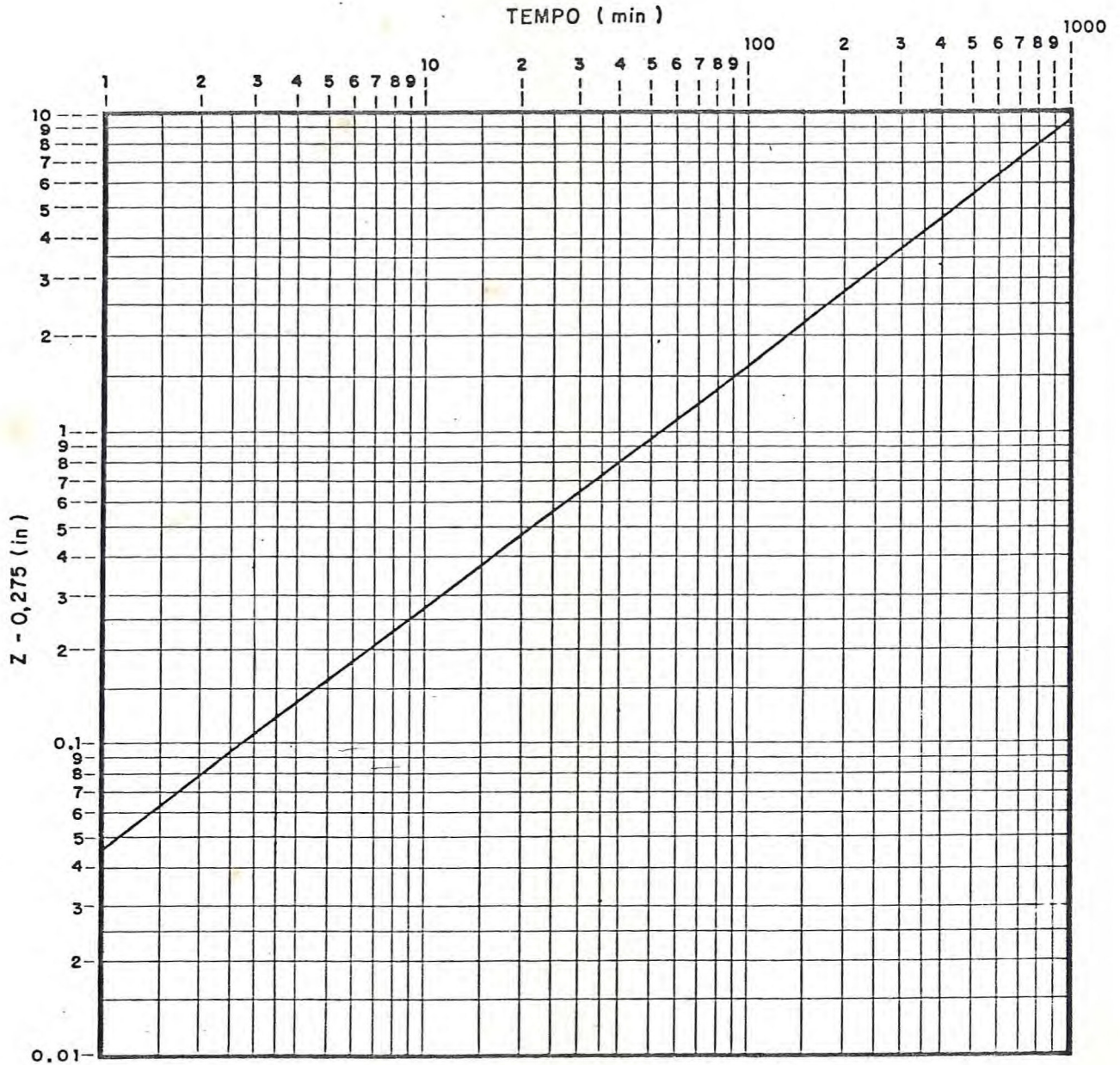


FIGURA 19 - Infiltração acumulada vs. tempo obtida pelo método de entrada e saída com a vazão de 1,337 l/seg.

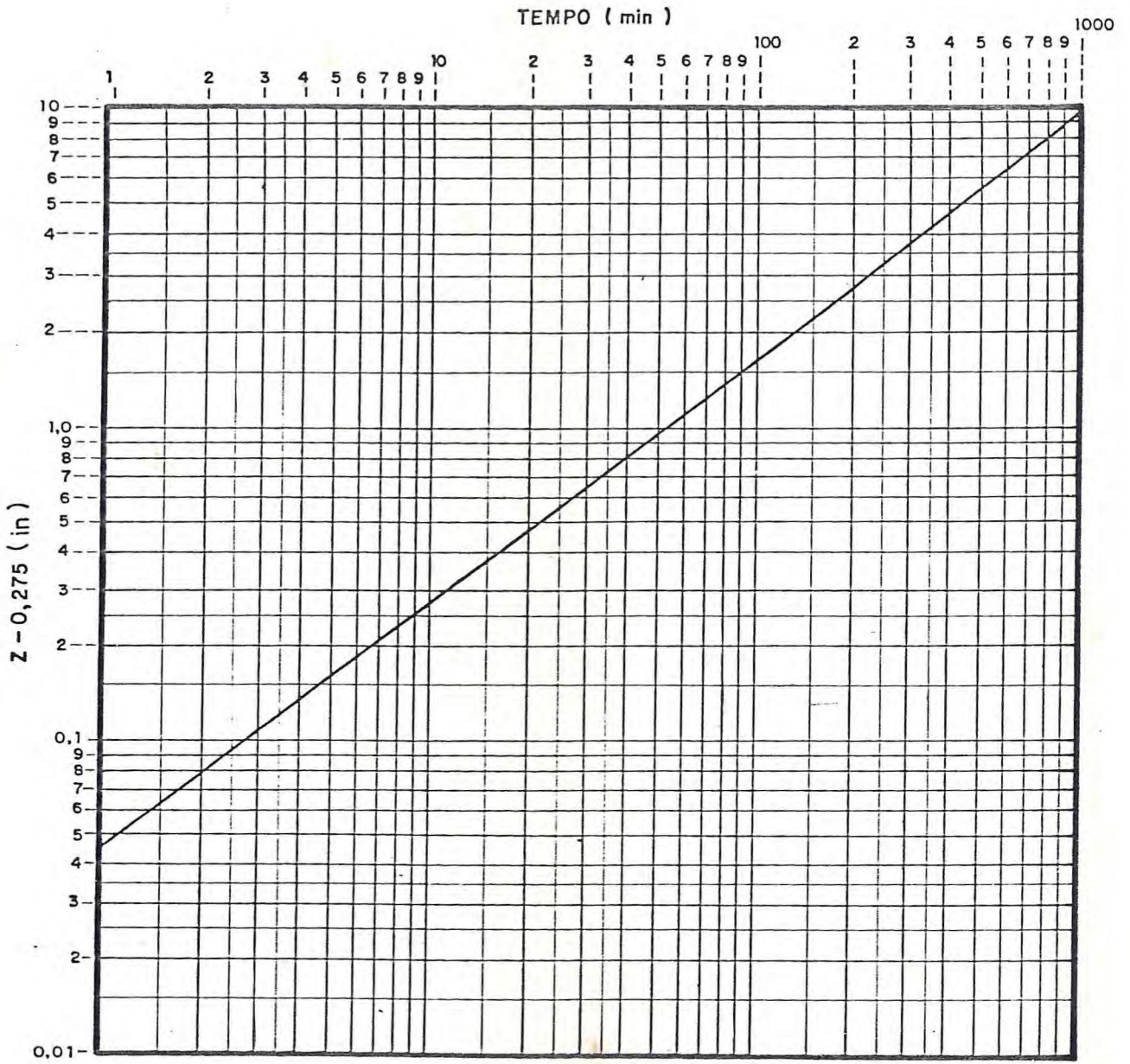


FIGURA 20 - Infiltração acumulada vs. tempo obtida pelo método de entrada e saída com a vazão de 0,764 l/seg.

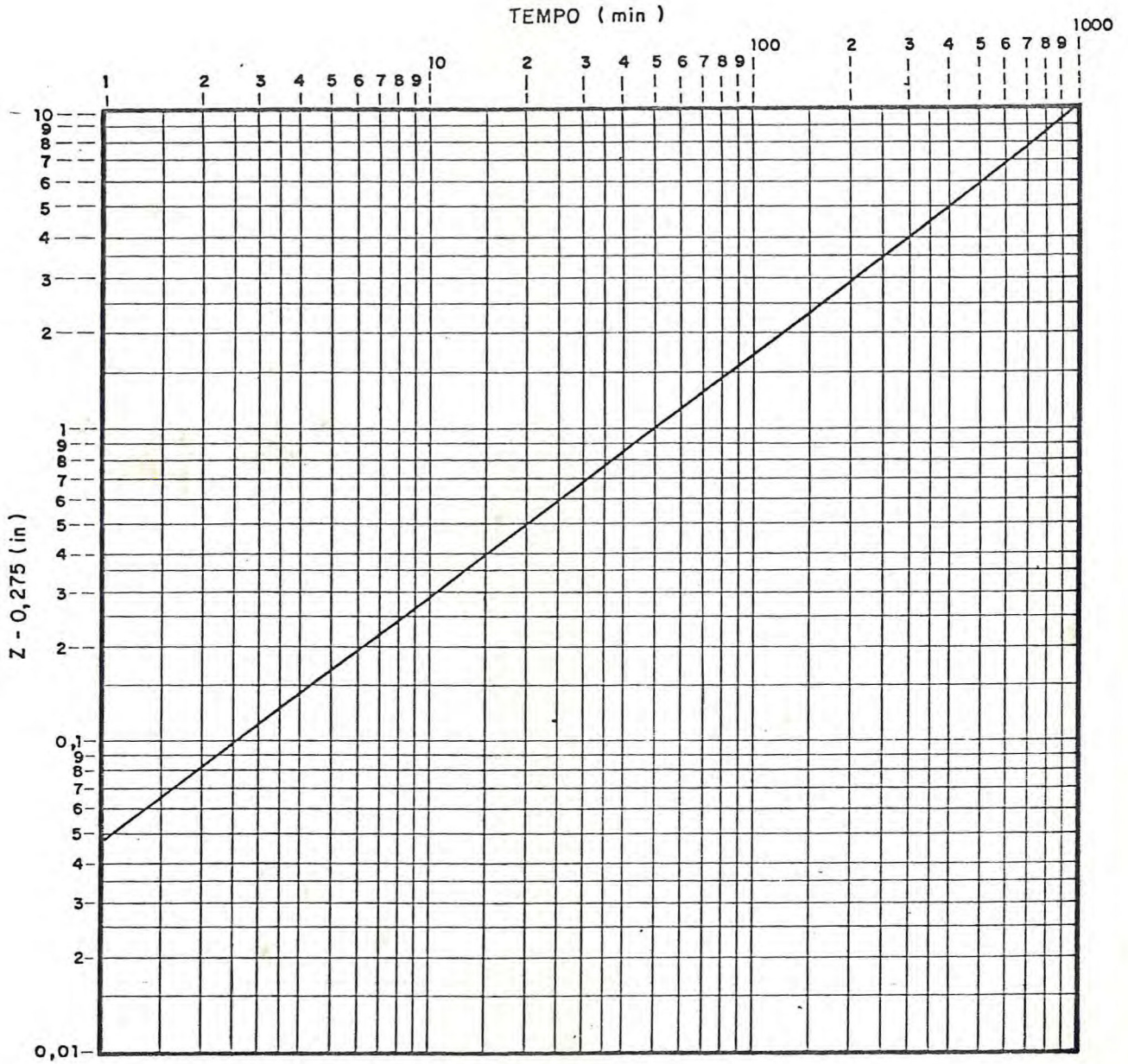


FIGURA 21 - Infiltração acumulada vs. tempo obtida pelo método de entrada e saída com a vazão de 1,37/0,75 l/seg.

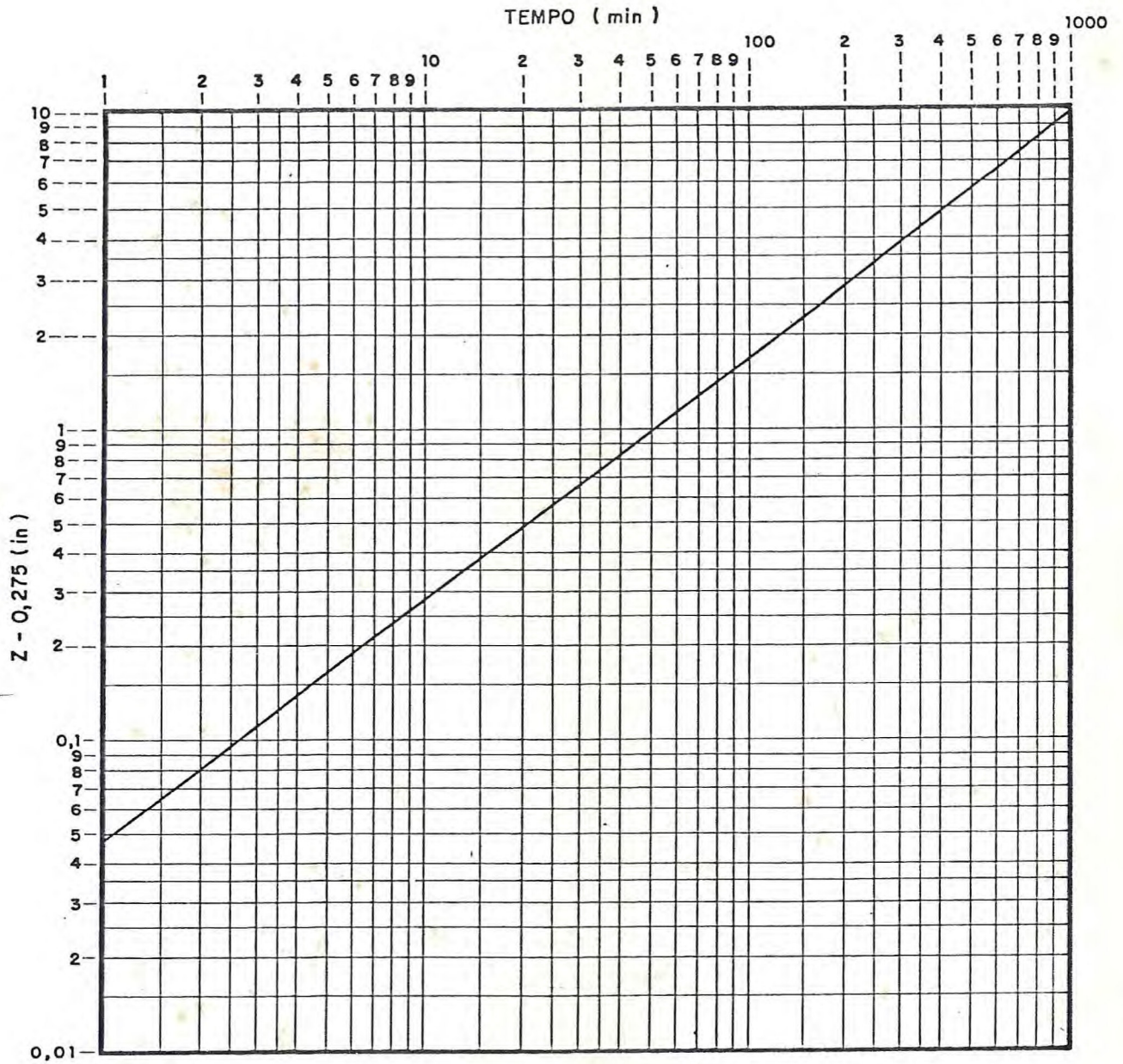


FIGURA 22 - Infiltração acumulada vs. tempo obtida pelo método de entrada e saída com a vazão de 1,330 l/seg.

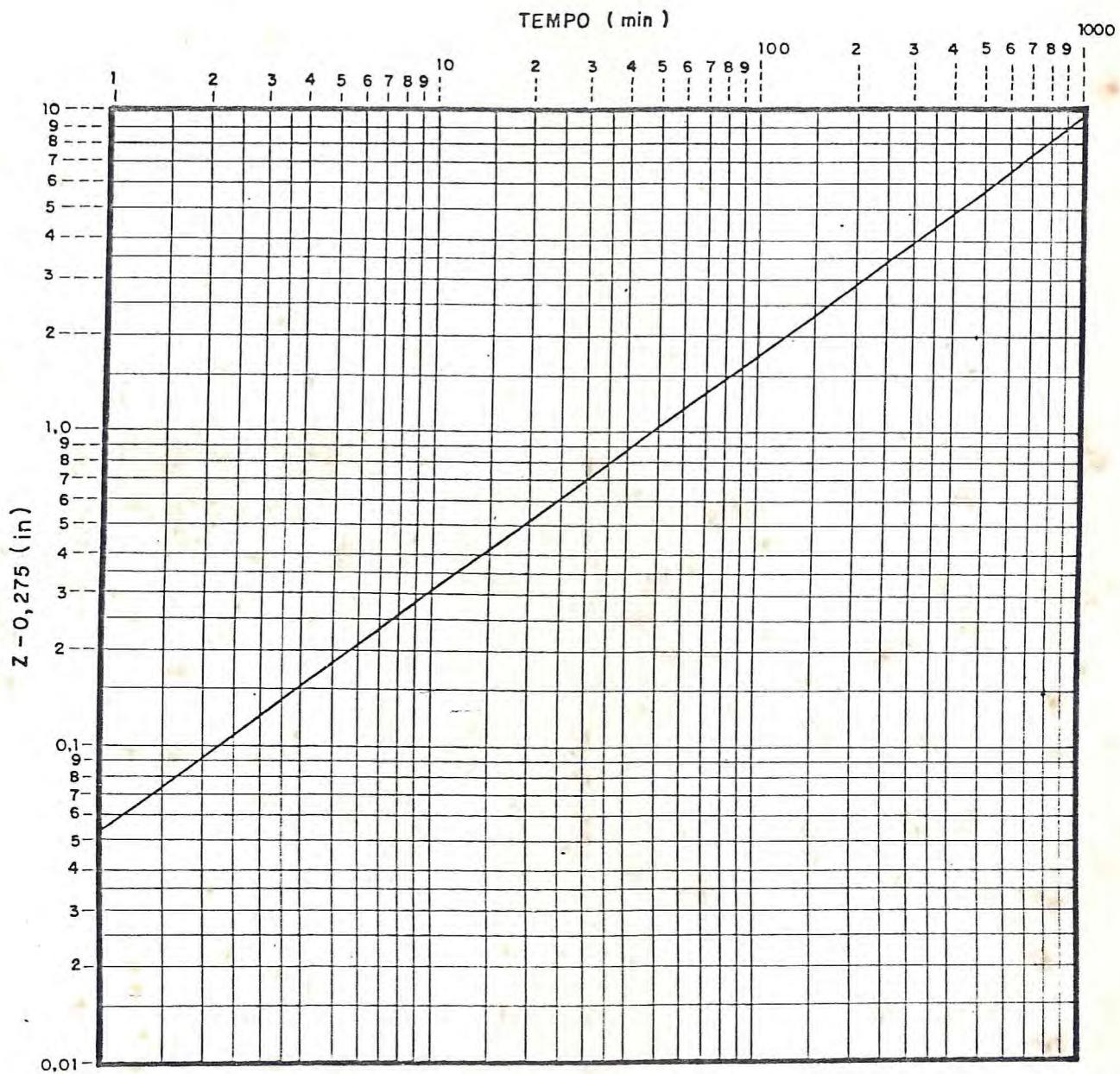


FIGURA 23 - Infiltração acumulada vs. tempo obtida pelo método do cilindro infiltrômetro.

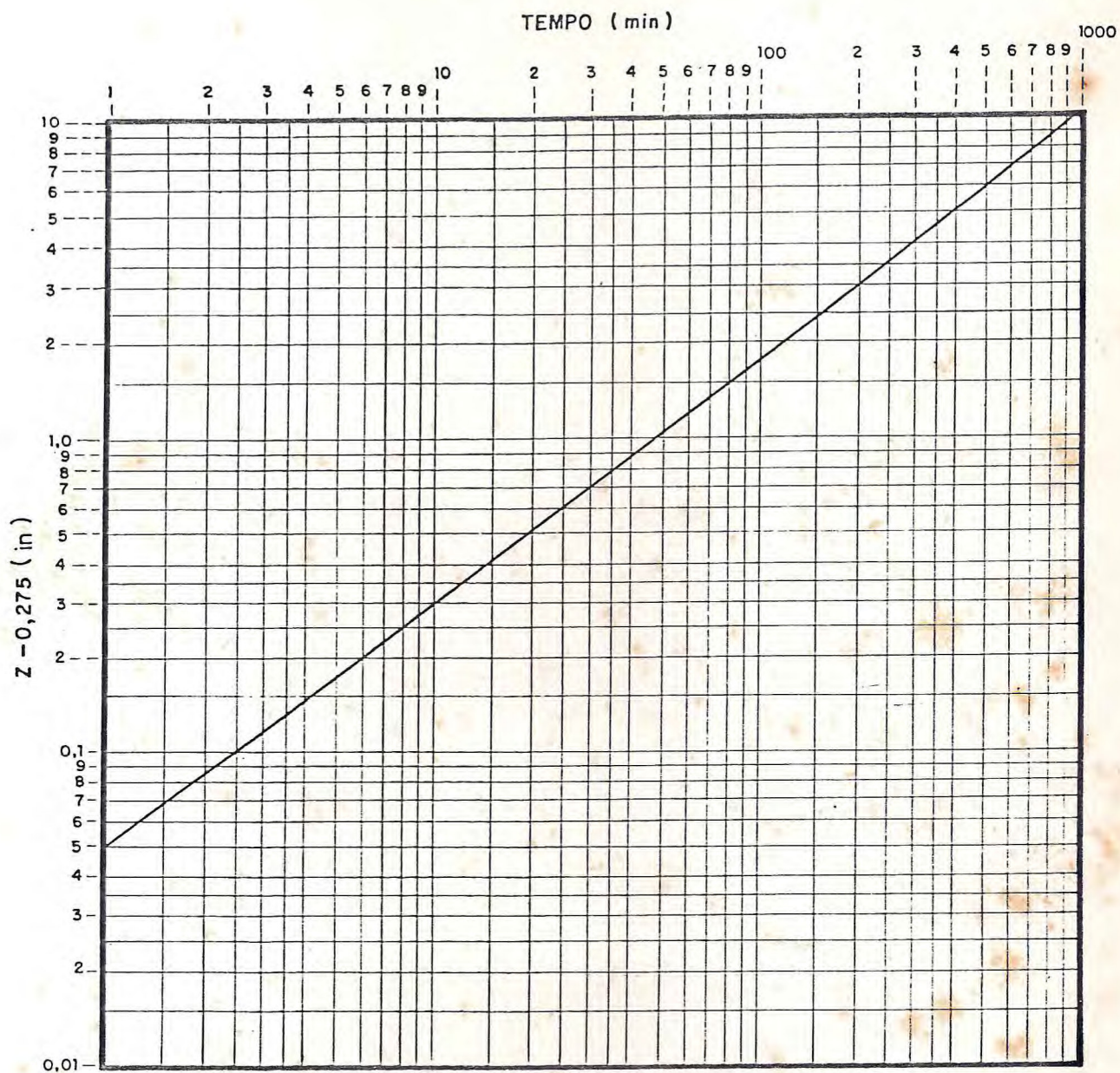


FIGURA 24 - Infiltração acumulada vs. tempo obtida pelo método do sulco infiltrômetro.