

**ANÁLISE DA IRRIGAÇÃO POR SULCOS UTILIZANDO A  
METODOLOGIA DO BALANÇO DE VOLUME**

LUIZ CARLOS ALMEIDA DE CASTRO

Engenheiro Agrônomo

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA A COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS-  
GRADUAÇÃO EM IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, COMO REQUISITO  
PARCIAL PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

FORTALEZA-CE

- 1997 -

Esta dissertação foi submetida como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de mestre em Agronomia com área de *concentração em Irrigação e Drenagem*, outorgada pela Universidade Federal do Ceará, e se encontra à *disposição dos interessados na Biblioteca Central* e no Departamento de Engenharia Agrícola da referida Universidade.

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

---

LUIZ CARLOS ALMEIDA DE CASTRO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM : 17 / 12 / 97

---

Francisco de Souza, Ph. D., Orientador

---

Luis Carlos Uchôa Saunders, Dr., Conselheiro

---

Raimundo Nonato Távora Costa, Dr., Conselheiro

À memória de meu pai João,  
À minha mãe, Socorro,  
À meu irmão, Alexandre,  
À minha esposa, Júlia,  
Aos meus filhos, Saulo e Matheus.

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal do Ceará, em especial ao Centro de Ciências Agrárias, pela oportunidade concedida e pela satisfação em ter retornado a esta tão gloriosa instituição.

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

Ao Professor Francisco de Souza pelo seu incentivo e dedicação na orientação deste trabalho e pela sua vida voltada à pesquisa científica.

Aos Professores Luiz Carlos Uchôa Saunders e Raimundo Nonato Távora Costa, pelas sugestões e conselhos na elaboração desta dissertação.

Ao amigo Luciano Fallé Saboya, pela sua colaboração e ensinamentos em informática.

Ao amigo René Rivera pelo auxílio na coleta de dados de campo.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola.

Aos colegas e amigos de curso: Bitonho, Eunildo, Josualdo, Luciano, René, Rosa Meire e Sales, pela sincera amizade e convívio.

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



## SUMÁRIO

|   | <b>PÁGINA</b> |
|---|---------------|
| <b>LISTA DAS FIGURAS.....</b>                               | vii           |
| <b>LISTA DAS TABELAS.....</b>                               | ix            |
| <b>RESUMO.....</b>  | xi            |
| <b>ABSTRACT.....</b>  | xiii          |
| <br>  |               |
| <b>1- INTRODUÇÃO.....</b>                                   | <b>01</b>     |
| <br>  |               |
| <b>2- REVISÃO DE LITERATURA.....</b>                        | <b>03</b>     |
| 2.1 Considerações iniciais.....                             | 03            |
| 2.2 O Método de irrigação por sulcos.....                   | 05            |
| 2.3 Princípios hidráulicos da irrigação por superfície..... | 06            |
| 2.4 Análise da vazão de entrada e saída.....                | 08            |
| 2.5 Geometria do sulco ou área de fluxo.....                | 10            |
| 2.6 Fase de avanço.....                                     | 13            |
| 2.7 Fase de recessão.....                                   | 14            |
| 2.8 Infiltração.....  | 15            |
| 2.9 Modelos matemáticos.....                                | 18            |
| 2.10 Avaliação em irrigação superficial.....                | 21            |
| <b>3- MATERIAL E MÉTODOS.....</b>                           | <b>25</b>     |
| 3.1 Características da área de estudo.....                  | 25            |
| 3.2 Metodologia.....  | 26            |

|  | <b>PÁGINA</b> |
|--|---------------|
| 3.2.1 Condução do experimento.....   | 26            |
| 3.2.2 Medição dos parâmetros de avaliação.....   | 29            |
| 3.2.2.1 Hidrógrafas.....   | 29            |
| 3.2.2.2 Avanço e recessão.....   | 31            |
| 3.2.2.3 Geometria de fluxo.....  | 32            |
| 3.2.2.4 Infiltração.....   | 35            |
| 3.2.2.5 Cálculo dos volumes infiltrados.....   | 37            |
| 3.2.2.6 Medidas de performance do sistema.....   | 39            |
| <b>4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>   | <b>43</b>     |
| 4.1 Análise da infiltração.....  | 43            |
| 4.1.1 Variação dos parâmetros de infiltração ao longo da estação de cultivo.....                               | 43            |
| 4.1.2 Efeito das variações das constantes <b>a</b> , <b>k</b> e <b>fo</b> na infiltração acumulada.....        | 50            |
| 4.1.3 Comportamento da infiltração ao longo do ciclo.....  | 56            |
| 4.2 Resultados de avanço e recessão.....   | 63            |
| 4.3 Análise do perfil infiltrado e dos parâmetros de avaliação da irrigação.....                               | 67            |
| 4.4 Simulação da performance utilizando a redução da vazão.....  | 76            |
| 4.5 Comparação entre a metodologia racional de WALKER(1987) e a empírica de CRIDDLE <i>et al.</i> (1956) ..... | 79            |
| <b>5 - CONCLUSÕES.....</b>   | <b>83</b>     |
| <b>6 - RECOMENDAÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>   | <b>86</b>     |
| <b>7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>   | <b>88</b>     |
| <b>8 - ANEXOS</b>  |               |

## LISTA DE FIGURAS

|  | <b>PÁGINA</b> |
|--|---------------|
| 01 Configuração do experimento após o dimensionamento.....   | 28            |
| 02 Três casos típicos de aplicações na irrigação superficial.....  | 38            |
| 03 Variação dos parâmetros de infiltração da equação de Kostiakov-Lewis ao longo do ciclo de cultivo .....     | 46            |
| 04 Efeito da variação do expoente <b>a</b> da equação de Kostiakov-Lewis sobre a infiltração acumulada .....   | 52            |
| 05 Efeito da variação da constante <b>K</b> da equação de Kostiakov-Lewis sobre a infiltração acumulada.....   | 54            |
| 06 Efeito da variação da constante <b>fo</b> da equação de Kostiakov-Lewis sobre a infiltração acumulada ..... | 55            |
| 07 Velocidade de infiltração em mm/min ao longo das quatro irrigações.....                                     | 58            |
| 08 Infiltração acumulada em milímetros ao longo das quatro irrigações.....                                     | 60            |
| 09 Curvas de avanço.....   | 65            |

|   | <b>PÁGINA</b> |
|---|---------------|
| 10 Curva de avanço, recessão e perfil de infiltração para a 1 <sup>a</sup> irrigação. ( $Q_0=0,0738$ m <sup>3</sup> /min; $t_{co}= 128$ min; $L= 110$ m; $S_o= 0,3\%$ ; $E_{sp}= 1,0$ m; $t_L= 92$ min; $n=0,04$ ; $E_a=40,76\%$ ; $I_{ro}= 3,36\%$ ; $I_p= 55,88\%$ ; $E_s= 100\%$ e $CUC= 87,57\%$ ).....     | 68            |
| 11 Curva de avanço, recessão e perfil de infiltração para a 2 <sup>a</sup> irrigação. ( $Q_0=0,0449$ m <sup>3</sup> /min; $t_{co}= 124$ min; $L= 110$ m; $S_o= 0,30\%$ ; $E_{sp}= 1,0$ m; $t_L= 68$ min; $n=0,04$ ; $E_a= 68,95\%$ ; $I_{ro}= 22,48\%$ ; $I_p= 8,57\%$ ; $E_s= 99,71\%$ e $CUC= 91,91\%$ )..... | 69            |
| 12 Curva de avanço, recessão e perfil de infiltração para a 3 <sup>a</sup> irrigação. ( $Q_0=0,0565$ m <sup>3</sup> /min; $t_{co}= 93$ min; $L= 110$ m; $S_o= 0,3\%$ ; $E_{sp}= 1,0$ m; $t_L= 56$ min; $n=0,04$ ; $E_a= 73,01\%$ ; $I_{ro}= 25,74\%$ ; $I_p= 1,25\%$ ; $E_s= 99,64\%$ e $CUC= 94,09\%$ ).....   | 70            |
| 13 Curva de avanço, recessão e perfil de infiltração para a 4 <sup>a</sup> irrigação. ( $Q_0=0,0503$ m <sup>3</sup> /min; $t_{co}= 102$ min; $L= 110$ m; $S_o= 0,3\%$ ; $E_{sp}= 1,0$ m; $t_L= 44$ min; $n=0,04$ ; $E_a= 74,46\%$ ; $I_{ro}= 25,15\%$ ; $I_p= 0,38\%$ ; $E_s= 99,23\%$ e $CUC= 92,39\%$ ).....  | 71            |
| 14 Análise da performance da irrigação para as quatro irrigações.....   | 75            |



## LISTA DE TABELAS

|   | <b>PÁGINA</b> |
|---|---------------|
| 01 Parâmetros de infiltração da equação de infiltração de Kostiakov-Lewis ao longo das 4 irrigações ..... | 44            |
| 02 Análise da influência da vazão aplicada sobre o parâmetro <b>a</b> da equação de Kostiakov-Lewis.....  | 48            |
| 03 Análise da influência da vazão aplicada sobre o parâmetro <b>K</b> da equação de Kostiakov-Lewis ..... | 49            |
| 04 Análise da influência da vazão aplicada e do volume sobre a velocidade de infiltração básica.....      | 51            |
| 05 Velocidade de infiltração básica (I) em mm/min ao longo das quatro irrigações.....                     | 57            |
| 06 Infiltração acumulada em mm ao longo das quatro irrigações.....  | 59            |
| 07 Análise de regressão linear da lâmina infiltrada em função do volume aplicado.....                     | 62            |
| 08 Tempo de avanço e recessão para as quatro irrigações .....   | 64            |
| 09 Relação entre vazão média aplicada e tempo de avanço para a 1 <sup>a</sup> irrigação.....              | 66            |
| 10 Comportamento dos parâmetros de avaliação ao longo das quatro irrigações .....                         | 73            |



|    | <b>PÁGINA</b>   |
|----|---|
| 11 | Resultados da simulação utilizando redução de vazão..... 78   |
| 12 | Relação entre tempo de avanço (tav) e tempo de corte (tco)<br>obtido para a irrigação 4..... 81                             |
| 13 | Tempos de avanço e de corte abservados e os calculados para<br>atender a metodologia de Criddle <i>et al</i> (1956)..... 82 |
| 14 | Eficiências calculadas usando a metodologia de Criddle <i>et al</i><br>(1956)..... 82                                       |

## **ANÁLISE DA IRRIGAÇÃO POR SULCOS UTILIZANDO A METODOLOGIA DO BALANÇO DE VOLUME**

Autor: Luiz Carlos Almeida de Castro

Orientador: Prof. PhD. Francisco de Souza

### **RESUMO**

Este trabalho consistiu em uma análise das irrigações realizadas numa área da Fazenda Experimental do Perímetro Irrigado de Morada Nova. A parcela experimental possuía comprimento de 110 metros e largura de 75 metros (0,83 ha). Foram utilizados três sulcos-teste e realizadas quatro irrigações, com excessão do sulco 3, onde só foi possível a realização de três.

Coletou-se os dados a campo e procedeu-se a análise dos resultados, dando-se ênfase ao comportamento dos parâmetros de infiltração da equação de Kostiakov-Lewis ao longo da estação de cultivo e sua influência na infiltração acumulada. Também se avaliou o comportamento das curvas de avanço ao longo do ciclo de cultivo e as causas que geravam as possíveis mudanças.

Após isto fez-se uma avaliação do perfil de infiltração para as quatro irrigações e as variações dos parâmetros de performance das irrigações. Ao final fez-se uma comparação entre a metodologia racional e o método empírico.

Os resultados demonstram que a infiltração é um fenômeno complexo, influenciado por uma série de fatores como a vazão aplicada, tempo de corte, práticas culturais, número de irrigações, dentre outros.

Da análise dos parâmetros de infiltração de Kostiakov-Lewis, os valores de **a** cresceram ao longo da estação de cultivo, com exceção da 2ª irrigação, onde na 1ª, 2ª, 3ª e 4ª irrigações foram 0,1196; 0,0410; 0,2855 e 0,4529. **K** variou para estas mesmas irrigações de 0,0156 m<sup>3</sup>/min<sup>a</sup>; 0,0112 m<sup>3</sup>/min<sup>a</sup>; 0,0066 m<sup>3</sup>/min<sup>a</sup> e 0,0024 m<sup>3</sup>/min<sup>a</sup>, demonstrando decrescer com as irrigações. Com relação a **f<sub>0</sub>**, este decresceu até a 3ª irrigação e alcançou uma estabilidade na 4ª irrigação apresentando os seguintes valores: 0,000516; 0,000247; 0,000179 e 0,000170 m<sup>3</sup>/min/m.

Verificou-se que as variações nos parâmetros **a** e **K** não provocaram mudanças significativas na infiltração acumulada. No entanto para **f<sub>0</sub>**, qualquer alteração no seu valor, resultava em modificações da mesma magnitude na infiltração.

Com relação aos parâmetros de avaliação, notou-se que a eficiência de aplicação (**E<sub>a</sub>**) cresceu ao longo das irrigações, pois a **E<sub>a</sub>** da primeira irrigação, foi de 40,76% e da quarta de 74,46%. O índice de escoamento superficial passou de 3,36% na primeira irrigação para 25,15% na última. Já o índice de percolação teve seu valor reduzido, apresentando na primeira irrigação 55,88% e na última 0,38%. A eficiência de armazenamento apresentou-se com pequena variação, indo de 100% no primeiro e 99,23% no último evento. O coeficiente de uniformidade de Christiansen (**CUC**) sofreu pequena ascensão passando de 87,57% na primeira irrigação para 92,39% na última.

# **FURROW IRRIGATION ANALYSIS USING THE VOLUME BALANCE APPROACH.**

Autor:Luiz Carlos Almeida de Castro

Adviser:Prof. Phd. Francisco de Souza

## **ABSTRACT**

An analysis furrow of irrigation was done in a area of the experimental farm of the Morada nova irrigation distric. The experimental area was 110 m long and 75m wide (0,83 ha). Three furrow-tests were used and four irrigations were applied, exception of furrow 3, where was just possible to apply three irrigations.

Field data were analysed in relation to the behavior of the infiltration parameters of Kostiakov's equation along the crop season and its influence in the accumulated infiltration. Also it was evaluated the behavior of the advance curves along the season and the causes of possible changes.

After this an a evaluation of the infiltration profile and of the performace irrigation parameters was carried out comparing the rational methology and the empirical method.



The results showed that the infiltration is a complex phenomenon, influenced by a series of factors as the applied flow rate, cutoff, cultural practices, and number of irrigations.

In relation to the Kostiakov-Lewis parameters, the **a** values have increased along the season, with exception of the 2<sup>nd</sup> irrigation, assuming the following values from 1<sup>st</sup> to 4<sup>th</sup> irrigations: 0.1196; 0.0410; 0.2855 and 0.4529. Values of **K** ranged from, 0.0156 m<sup>3</sup>/min<sup>a</sup>; 0.0112 m<sup>3</sup>/min<sup>a</sup>; 0.0066 m<sup>3</sup>/min<sup>a</sup>; to 0.0024 m<sup>3</sup>/min<sup>a</sup>, respectively, showing that they reduced along the season. In relation to **f<sub>o</sub>**, it decreased until 3<sup>rd</sup> irrigation and reached stability at the 4<sup>th</sup> irrigation, assuming the following values: 0.000516; 0.000247; 0.000179; and 0.000170 m<sup>3</sup>/min/m.

Variation in the parameters **a** e **k** did not show meaningful changes in the accumulated infiltration. However for **f<sub>o</sub>** any change its value, resulted in changes of same extent in the infiltration.

In relation to the evaluating parameters, it can be noticed that the application efficiency (Ea) increased along with the irrigations varying from 40.76% in the first irrigation to 74.47%, in the 4<sup>th</sup> irrigation the runoff losses were 3.36% in the 1<sup>st</sup> irrigation and 25.15% in the last. Percolation index had its values reduced, showing in the 1<sup>st</sup> irrigation 55.88% and in the last 0.38%. Storage efficiency showed little variation, between 100% to 99.23% and Christiansen Coefficiente (CUC) suffered small increase from 87.57% in the first irrigation to 92.39% in the last.



## 1- INTRODUÇÃO

A irrigação por superfície é o método mais antigo e o mais utilizado em todo o mundo. Cerca de 95%, dos 242 milhões de hectares irrigados na face da terra, faz uso de algum método de irrigação por superfície. No Brasil cerca 65% de um total de 2,6 milhões de hectares são irrigados por superfície. No Ceará temos um total de 17.656 hectares irrigados, dos quais 60% são irrigados pelo método de irrigação em referência.

No entanto, este método de irrigação costuma apresentar baixos índices de eficiência de aplicação e armazenamento. Também está associado a grandes perdas por percolação e por escoamento superficial no final da parcela.

Entretanto, diversos avanços têm sido alcançados para diminuir estas perdas e aumentar, conseqüentemente, ganhos na eficiência. Dentre as diversas descobertas significativas obtidas está o desenvolvimento dos modelos matemáticos para a simulação dos sistemas, conceito de fluxo em onda, a adaptação do sistema a laser para o nivelamento de terras e a adoção dos sistemas de avaliação em tempo real.

Entre os modelos pesquisados até hoje, os modelos algébricos se apresentam como os mais simples e baseiam-se no princípio de conservação da massa e por isso são também conhecidos como modelo de balanço de volume e, simulam com precisão razoável, todas as fases da irrigação por superfície e são capazes de estimar os parâmetros de eficiência, bem como as perdas por

percolação e runoff. Segundo PEREIRA (1995), estes modelos têm sido incorporados a programas de computador para a utilização da metodologia de avaliação em tempo real.

Estas metodologias citadas, melhoram a performance da irrigação por sulcos, ajudando a compreender melhor a dinâmica do movimento da água no solo, tanto no sentido vertical, como no horizontal. Assim, as eficiências alcançadas igualam-se em muitos casos aos dos sistemas pressurizados.

Deste modo, o trabalho consistiu de uma análise das irrigações realizadas pela metodologia do balanço de volume sugerida por WALKER e SKOGERBOE (1987), avaliando-se os parâmetros de infiltração de Kostiakov-Lewis, o comportamento do avanço, as lâminas infiltradas, os parâmetros de eficiência de aplicação e armazenamento e as perdas por percolação e escoamento superficial. Também se faz uma comparação desta metodologia com a metodologia proposta por CRIDDLE *et al* (1956).

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Considerações iniciais -**

Segundo WALKER e SKOGERBOE (1987), a civilização da antiga Mesopotâmia prosperou entre os Vales dos rios Tigre e Eufrates, há mais de 6000 anos. Há 2000 anos a Mesopotâmia suportava uma população de 25 milhões de pessoas e hoje o Iraque ocupa grande parte desta mesma área e tem uma população de 14 milhões. Na Mesopotâmia antiga os rendimentos de cevada eram em torno de quatro vezes os rendimentos alcançados no presente. Este declínio deve-se sobretudo à falta de conhecimento sobre as relações solo-água-planta, que levou a problemas de salinização do solo devido à práticas de irrigação inadequadas e à carência de drenagem.

Os métodos de irrigação por superfície são os mais antigos e, segundo CUENCA (1989), a história da irrigação começa com a aplicação de água à terra utilizando-se de algum tipo de esquema por superfície.

Segundo PEREIRA (1995), a prática da irrigação por superfície é milenar e cobre cerca de 95% das áreas irrigadas no mundo. A sustentabilidade da agricultura irrigada depende entretanto de melhorias e inovações nos métodos de irrigação por superfície. WALKER (1989) cita que um dos principais problemas da irrigação por superfície é uma baixa eficiência, onde 40% ou mais, da água derivada à parcela é perdida por escoamento superficial (runoff) e por percolação.



Como agora, no futuro a agricultura enfrentará uma série de dificuldades, sobretudo decorrente do crescimento das necessidades urbanas e industriais. Desta forma, a água tende a ser um recurso precioso e, conseqüentemente, foco de atenção especial, sobretudo nas práticas de irrigação.

No entanto, diversas metodologias têm sido desenvolvidas para solucionar esse problema e atingir uma melhor performance da irrigação. Dentre os avanços obtidos, as maiores descobertas têm ocorrido na ciência da hidráulica da irrigação superficial, começando com trabalhos publicados em 1977 por STRELKOFF e seus estudantes, na Universidade da Califórnia, em Davis. Em 1984, as equações de Saint-Venant puderam ser resolvidas para faixas, bacias e sulcos. Agora, esta ciência tem sido usada na descrição de movimento de fluxo em onda e na incorporação de manejo em tempo real da irrigação por superfície. Certamente, durante as próximas décadas, esta ciência poderá ser usada em melhorias importantes no design, avaliação e manejo de sistemas de irrigação por superfície (SKOGERBOE, 1990).

As pesquisas realizadas em irrigação por superfície, compreendidas no período de 1973 a 1993, ofuscaram a soma de todas as descobertas antes de 1973. WALKER (1993) afirma que as descobertas nas próximas duas décadas talvez não sejam tão significativas. Este autor cita como principais descobertas, o desenvolvimento de modelos matemáticos para a simulação da irrigação por superfície, a descoberta do conceito de fluxo em onda; a adaptação do sistema de raio laser para o nivelamento de terras e o desenvolvimento de metodologias novas que incorporam a avaliação em tempo real.

Neste sentido, LATIMER e REDDELL (1990) apresentaram um modelo de balanço de volume para automação em tempo real de sistemas de irrigação por sulco e o chamaram de AFIS - "Advance Rate Feedback Irrigation System".

## **2.2. O método de irrigação por sulcos -**

O sistema de irrigação por superfície caracteriza-se por distribuir água à área a ser irrigada através da superfície do solo, utilizando para isso a energia associada à gravidade terrestre, por isso também denominados de sistemas por gravidade (SCALOPPI, 1986). Nestes sistemas, a irrigação é realizada fazendo a água correr em pequenos canais ou sulcos situados lateralmente às linhas de plantio (OLITTA, 1987). A água é aplicada na cabeceira da parcela e avança na forma de lâmina no sentido do declive do terreno, ao mesmo tempo em que se infiltra no solo na direção vertical (SOUZA, 1984). Variações espacial e temporal na infiltração têm efeitos dramáticos sobre a distribuição da água através do perfil do solo e sobre a eficiência com que a água é aplicada (LATIMER e REDDELL, 1990).

A quantidade de água infiltrada em cada local depende das características de infiltração do solo, do tempo de permanência da água na superfície do solo e da grandeza da área infiltrada (SCALOPPI, 1986).

Segundo esse último autor, a inundação parcial e temporária da superfície caracteriza o sistema por sulcos, onde a área de infiltração é definida em função do perímetro molhado, dependente, portanto, da grandeza da lâmina líquida superficial gradativamente reduzida ao longo do comprimento.



### 2.3. Princípios hidráulicos da irrigação por superfície -

Como cita OLITTA (1987) na definição da irrigação por superfície, a água corre em pequenos canais (sulcos). Para CHOW (1959) o fluxo da água pode ser feito em canais abertos ou fechados. Os dois tipos de fluxo são semelhantes, mas diferem em um aspecto. Os canais abertos possuem uma superfície livre, enquanto os canais fechados não, sendo que neste a água não preenche o conduto totalmente. A superfície livre dos canais abertos está sujeita a pressão atmosférica e nos canais fechados não, mas somente à pressão hidráulica.

Para CHOW (1959), a despeito da similaridade entre os dois tipos de fluxo, é muito mais difícil resolver problemas de fluxo em canais abertos do que em tubulação pressurizada. A posição da superfície livre é variável em relação ao tempo e ao espaço e também pelo fato da profundidade de fluxo, a vazão e as declividades do canal e da superfície livre serem interdependentes.

Segundo SOUZA (1994), o fenômeno da irrigação por superfície é um caso especial de fluxo espacialmente variado e não permanente, sobre um meio poroso. As equações que descrevem a continuidade da massa e da energia (quantidade de movimento) para regime não-permanente e variado, foram deduzidas e amplamente discutidas. As equações são comumente conhecidas como Equações de Saint-Venant.

Assim, o processo de irrigação por superfície combina a hidráulica do fluxo superficial no sulco com a infiltração da água no perfil do solo (PEREIRA, 1995). A vazão a uma dada seção na irrigação varia com o tempo e depende das

características de infiltração, desta forma a performance do sistema necessariamente depende da combinação destes fatores.

Segundo YITAIYEW e FANGMEIER (1984), o processo hidráulico na irrigação por superfície é descrito por duas equações: A equação da continuidade e a equação da conservação da quantidade de movimento. Em geral a equação da continuidade é expressa em termos de conservação da massa e pode ser escrita como:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} + Ix = 0 \quad (2.1)$$

A equação que expressa a conservação da quantidade de movimento (momento) pode ser escrita como:

$$\frac{V}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f + \frac{V}{gA} I v \quad (2.2)$$

em que:

t : tempo

q : vazão

x : distância ao longo do sulco

A : seção transversal da área de fluxo

V : velocidade média ( $V = q/A$ )

g : aceleração da gravidade

$S_0$  : declividade do sulco

$S_f$  : declividade de fricção

v : velocidade individual da partícula

$y$  : Profundidade do fluxo

$I_x$  : Taxa de infiltração ( $I_x = I_v/B$ ) em que B é a largura superior do sulco.

$I_v$  : Taxa de infiltração volumétrica

Segundo WALKER e SKOGERBOE (1987) durante um processo de análise de uma irrigação, são necessárias avaliações intermediárias para se definir a performance da irrigação. Estas análises são: Vazão de entrada e saída, as trajetórias de avanço e recessão; uma estimativa da água armazenada na superfície durante o avanço e uma investigação das características de infiltração do solo.

#### **2.4. Análise da vazão de entrada e saída -**

De acordo com os autores acima, a vazão de entrada no campo pode ser medida com vários instrumentos de medição de vazão. Os dados fornecem uma hidrografa da vazão de entrada, a qual se pode integrar para determinar o volume total de água aplicado no campo. As vazões de entrada geralmente podem-se manter constante, em cujo caso o volume aplicado resulta simplesmente multiplicar a descarga pelo tempo transcorrido. A hidrógrafa de saída, também pode ser obtida de maneira similar, exceto para sulcos fechados ao final.

Para se medir as vazões de entrada e saída, segundo FRIZZONE (1993) geralmente utilizam-se de medidores de regime crítico, em particular as calhas parshall. Uma desvantagem deste método é que aqueles instalados na saída do sulco podem interferir no fluxo superficial e, conseqüentemente, no



perímetro molhado. Isto resulta num aumento da área de infiltração em relação ao fluxo livre da água em sulcos. Outro inconveniente é a não consideração do aumento do volume de água superficial no decorrer do teste. Este aumento de volume é incorporado ao volume infiltrado, o que a rigor não é verdadeiro.

Para WALKER e SKOGERBOE (1987) e FRIZZONE (1993) três importantes informações podem ser obtidas da análise das hidrógrafas de entrada e saída. Primeiro, a diferença entre o volume aplicado e o volume escoado no final da parcela fornece uma medida precisa do volume infiltrado, assim:

$$V_z = V_{en} - V_{sai} \quad (2.3)$$

onde:

$V_z$  : Volume infiltrado em  $m^3$

$V_{en}$  : Volume aplicado à parcela em  $m^3$

$V_{sai}$  : Volume escoado no final da parcela em  $m^3$

Desta forma se estabelece um balanço de volume agregado.

Outro dado relevante obtido com as hidrógrafas de entrada e saída é a infiltração básica, obtida pela diferença entre as porções constantes destas hidrógrafas. WALKER (1989) sugere que durante uma avaliação a água deverá escorrer no final do campo por um tempo suficientemente longo para que se alcance uma estabilidade de fluxo na calha de saída, eventualmente se houver uma sobre-irrigação. Desta forma a velocidade de infiltração básica ( $f_o$ ) poderá ser determinada por:

$$f_o = \frac{Q_{en} - Q_{sai}}{L} \quad (2.4)$$

sendo que:

$f_o$  : velocidade de infiltração básica em  $m^3/\text{min}/m$  de sulco

$Q_{en}$ : vazão constante na calha de entrada em  $m^3/min$

$Q_{sai}$ : vazão constante na calha de saída em  $m^3/min$

$L$  : comprimento do sulco em m.

Finalmente, as hidrógrafas de entrada e de saída podem ser utilizadas em conjunto com  $f_o$  para uma estimativa do armazenamento superficial de água no momento em que se realizou o corte ( $t_{co}$ ).

## 2.5. Geometria do sulco ou área de fluxo -

WALKER e SKOGERBOE (1987) citam que a geometria da seção transversal do sulco é importante quando se avalia as características de fluxo e armazenamento superficial.

Segundo WALKER (1989) é necessário separar o volume da água na superfície do solo, daquele volume que infiltrou no perfil durante a fase de avanço como forma de avaliar os parâmetros de infiltração. Desta forma é necessário descrever matematicamente a forma da seção transversal do fluxo e a área de fluxo. Assim a equação mais usada para isso é a fórmula de Manning.

A geometria de fluxo em irrigação por sulcos é difícil de descrever. A forma do sulco está continuamente se modificando devido a erosão e a deposição de partículas que a água move ao longo do sulco. No entanto, a sua forma varia de triangular a aproximadamente trapezoidal. Em muitos casos, uma simples função potencial pode ser usada para relacionar a área da seção transversal, o perímetro molhado e a lâmina superficial.

ANDRADE (1994), citando PEREIRA (1991), diz que o escoamento da água ao longo dos sulcos altera as suas características geométricas,



principalmente a profundidade máxima, devido ao assoreamento de partes dos taludes, fazendo com que os sulcos fiquem com uma forma aproximadamente parabólica.

Para SCALOPPI (1986), a área de infiltração é definida em função do perímetro molhado, dependente, portanto, da grandeza da lâmina líquida superficial, gradativamente reduzida ao longo do comprimento.

Para se medir a forma do sulco utiliza-se um perfilômetro. WALKER (1989) sugere que a geometria do sulco seja medida em duas ou três estações diferentes do sulco, antes e depois da irrigação. Estes dados são plotados, onde se relaciona a profundidade em função da distância lateral. A profundidade é então dividida em 10 a 15 intervalos iguais e graficamente ou numericamente integrada para se definir a área de fluxo e o perímetro molhado.

O cálculo do perímetro molhado é mais rigoroso e executado por integração numérica da seguinte forma:

$$Pm = \sum_{i=0}^n 2 \left\{ [y_i - y_{(i-1)}]^2 + [0,5 \cdot [B_i - B_{(i-1)}]^2] \right\}^{0,5} \quad (2.5)$$

onde:

$Pm$  : perímetro molhado em metros

$Y_i$  : lâmina do sulco em metros

$B_i$  : largura do sulco em metros.

e a área de fluxo pode ser calculada utilizando a equação de Manning para movimento de fluxo uniforme, como segue:

$$Ao = c_1 \left\{ \frac{Qo \cdot n}{60 \cdot \sqrt{So}} \right\}^{c_2} \quad (2.6)$$

onde:

$A_0$  : área da seção transversal no início do sulco em  $m^2$

$Q_0$  : vazão média de entrada em  $m^3/\text{min}$

$n$  : coeficiente de rugosidade de Manning

$S_0$  : declividade do sulco em  $m/m$

$c_1$  e  $c_2$  : constantes geométricas do sulco, onde

$$c_2 = \frac{3b_2}{5b_2 - 2\gamma} \quad \text{e} \quad (2.7)$$

$$c_1 = b_1 \left( \frac{\rho^{0,67}}{b_1^{1,67}} \right)^{c_2} \quad (2.8)$$

sendo que  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $\rho$  e  $\gamma$  são parâmetros de ajuste.

Como a área da seção transversal no início do sulco é diretamente dependente do valor de “ $h$ ”, RIVERA (1995) fez uma análise da influência de “ $h$ ” no tempo de avanço e concluiu que o maior incremento no valor de “ $h$ ” aumenta o tempo de avanço, porque em virtude da maior rugosidade o movimento da água é retardado. Por outro lado, observou que à medida que o coeficiente de rugosidade é incrementado a área de fluxo também aumenta, já que para uma mesma vazão, a área de fluxo varia diretamente com “ $h$ ”. Assim, para valores elevados de “ $h$ ”, a velocidade de escoamento será menor, portanto a área e o tempo de avanço serão maiores.

Também STRELKOFF e SOUZA (1984) observaram que o coeficiente de rugosidade de Manning “ $n$ ”, desempenha uma função importante na determinação da lâmina superficial da água sobre o sulco, sendo que quanto maior

for o valor de "h" maior será a altura da lâmina de fluxo. STRELKOFF e SOUZA (1984) e BAUTISTA e WALLANDER (1993), mostraram que a taxa de infiltração é função do perímetro molhado, a qual varia ao longo do ciclo do cultivo.

## **2.6. Fase de avanço -**

Das quatro fases que compõem o processo de uma irrigação por superfície a fase de avanço é a primeira delas e tem início no momento em que a água é aduzida à parcela e termina quando a frente de molhamento atinge o final do campo (ANDRADE, 1994, BERNARDO, 1989, LEVIEN, 1985, LEVIEN e SOUZA, 1987, PORDEUS, 1990, SOUZA, 1984).

Segundo FRIZZONE (1993), a previsão da fase de avanço da água na superfície do solo não é simples, devido a natureza do escoamento, classificado como não permanente e espacialmente variado. Ao se aplicar uma vazão constante à montante de uma parcela, a razão de avanço diminui progressivamente à medida que aumenta a área de infiltração. O tempo que leva a água para alcançar o final da parcela define as perdas por percolação profunda. O tempo de avanço é uma função da vazão que escoar e do comprimento da parcela.

Para este autor o comportamento do processo de avanço deve-se à redução da vazão com a distância, as práticas culturais e a própria irrigação, que modificam a rugosidade da superfície de escoamento, a razão de infiltração, a forma da seção de escoamento e conseqüentemente as características do avanço.



A velocidade de avanço d'água nos sulcos, segundo BERNARDO (1989), é função da vazão aplicada no sulco, da capacidade de infiltração do solo, da declividade, da rugosidade do sulco e do seu comprimento.

Para determinar o comprimento do sulco, BISHOP *et al.* (1967) apud RODRIGUES (1989), recomendam utilizar o método de CRIDDLE *et al.* (1956), onde o comprimento do sulco deve ser tal que o tempo para a frente de avanço chegar ao final do sulco seja 1/4 do tempo necessário para aplicar a lâmina de irrigação.

Segundo WALKER (1989), a fase de avanço é muito importante em termos de informações. Durante uma avaliação a profundidade da lâmina e a extensão da água na superfície do solo, poderão ser medidas em pontos selecionados. Estes dados poderão ser combinados com a área de fluxo para o cálculo da água armazenada na superfície.

Ainda segundo este mesmo autor, duas importantes medidas são necessárias durante o avanço: Primeiro, a hidrógrafa de entrada da água no campo e segundo, o tempo transcorrido para que a água alcance cada estação ao longo do sulco. Desta forma é importante que se mantenha constante o fluxo de entrada durante o teste, pois variações significativas afetam o movimento da frente de avanço da água.

## **2.7. Fase de recessão -**

A fase de recessão caracteriza-se pelo desaparecimento da água do sulco. Esta tem início quando a lâmina d'água começa a decrescer até o seu desaparecimento total, e termina quando toda a água desaparece ao longo do sulco (LEVIEN, 1985, LEVIEN e SOUZA, 1987, LIMA FILHO, 1996, PORDEUS,

1990, SOUZA, 1984, WALKER, 1989).

Para WALKER (1989), a recessão é difícil de ser observada porque não há um discernimento aguçado para isso. Contudo o tempo de recessão em cada estação é uma informação útil. Este sugere que para declividades superiores a 0,25% a curva de recessão seja uma reta, coincidente com o tempo de corte. No entanto, BERNARDO (1989), cita que apenas para declividades superiores a 0,5%, é que deve-se levar em consideração a curva de recessão.

SOUZA (1984) e SOUZA e AUGUSTO (1984) citam que na maioria das vezes a fase de recessão é de curta duração e com pouca influência na infiltração.

No entanto, AUGUSTO (1984) e RIVERA (1995), trabalhando em sulcos com declividades de 0,3%, observaram que a água levava um certo tempo para desaparecer do solo.

OLITTA (1987) afirma que, no momento do corte da água, o volume sobre a superfície do solo é muito pequeno para influenciar na infiltração, devendo-se então considerar a curva de recessão como uma linha horizontal.

Segundo WALKER e SKOGERBOE (1987), FRIZZONE (1993) e SOUZA (1994) as trajetórias das curvas de avanço e recessão definem o tempo de oportunidade de infiltração e fornecem a informação necessária na avaliação das eficiências de aplicação e de uniformidade.

## **2.8. Infiltração -**



Segundo WALKER e SKOGERBOE (1987) e FRIZZONE (1993), a infiltração é o fator mais importante na irrigação por superfície, pois controla essencialmente a quantidade de água que entra no solo, como também o avanço da água e a sua recessão. PEREIRA (1995) informa que diversos modelos podem ser utilizados para descrever a penetração da água e sua distribuição no perfil do solo.

Para FRIZZONE (1993), a infiltração é um processo complexo, dependente das propriedades físicas do solo, do seu conteúdo inicial de água, da forma de umedecimento, das variações de permeabilidade devido ao movimento da água na superfície e ao ar retido nos poros. WALKER (1989) afirma que em irrigação por superfície a infiltração varia drasticamente para cada irrigação, e segundo FRIZZONE (1993), isto é devido as variações na rugosidade e na geometria da superfície de escoamento.

BOOHER (1974), WALKER e SKOGERBOE (1987), BAUTISTA e WALLANDER (1993), indicam que um ótimo dimensionamento e manejo dos sistemas irrigados por superfície requer o conhecimento detalhado das características de infiltração do campo. Porém, a complexidade do fenômeno dificulta a obtenção de uma função de infiltração representativa durante o período de cultivo (FRIZZONE, 1993, BAUTISTA e WALLANDER, 1993).

A importância de caracterizar a infiltração, reside especialmente no fato desta influenciar no valor da vazão de entrada e tempo de irrigação (WALKER, 1989 e CHILDS *et al.*, 1993).

CHILDS *et al.* (1993), ao trabalharem com solos de diferentes texturas, submetidos a diferentes tempos de irrigação, comparando os parâmetros de



infiltração das irrigações executadas antes e após o plantio, verificaram que o efeito do solo é preponderante na variação destes parâmetros, refletindo-se na performance dos sistemas irrigados.

Segundo WALKER (1989), para a interpretação dos dados de campo, requer que a infiltração seja descrita matematicamente. Diversas equações têm sido descritas mas a mais comum e mais usada é a equação de Kostiakov.

Uma simples aproximação da infiltração acumulada pode ser escrita:

$$Z = Kt^a \quad (2.9)$$

onde:

$Z$  : infiltração acumulada em  $m^3/m/m$

$t$  : tempo de oportunidade em minutos

$K$  e  $a$  : constantes empíricas.

Esta equação tem uma grande desvantagem em não descrever bem a infiltração para longos períodos de tempo. A taxa de infiltração baseada na equação 2.9 é:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = I = aKt^{a-1} \quad (2.10)$$

Nesta equação,  $I$  aproxima-se de zero para um período de tempo infinito. Esta condição não é tipicamente encontrada no campo, pois alguns solos possuem uma pequena taxa de infiltração após um longo período de tempo.

Para solucionar este tipo de problema, definiu-se uma equação que se chamou de Kostiakov-Lewis modificada, onde se acrescentou uma variável, a velocidade de infiltração básica. Assim, a equação 2.9 pode ser escrita como:

em que  $f_0$  é a velocidade de infiltração básica em  $m^3$  por unidade de tempo por unidade de comprimento. A equação 2.11 reduz-se à equação 2.9 se a taxa de infiltração para longos períodos aproxima-se de zero ou se a irrigação é curta, comparada ao tempo requerido para que a infiltração alcance a velocidade de infiltração básica. No entanto, a equação 2.11 aproxima-se melhor da infiltração em muitos tipos de solo.

A taxa de infiltração usando-se a equação 2.11 é:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = I = aKt^{a-1} + f_0 \quad (2.12)$$

## 2.9. Modelos matemáticos -

Em irrigação por superfície, para se dimensionar um novo projeto ou avaliar um sistema de operação, dever-se-ia ir a campo para o levantamento dos dados necessários. Isto, segundo SOUZA (1981), demandaria bastante tempo e trabalho. Na tentativa de diminuir essas laboriosas tarefas e custos, diversos autores desenvolveram modelos matemáticos para simular uma irrigação. Atualmente existem diversos procedimentos analíticos disponíveis para dimensionamento, operação dos sistemas e manejo adequado das irrigações, visando níveis satisfatórios de eficiência e uniformidade (SCALOPPI, 1986).

A maioria dos modelos matemáticos, para a simulação da irrigação requer que as características de infiltração sejam quantificadas. Na utilização desses modelos, quando se assume que a equação característica da taxa de

infiltração não é variável, o tempo de avanço é normalmente superestimado (TURBAK e MOREL-SEYTOUX, 1988).

Estes modelos variam em níveis de sofisticação, indo dos modelos algébricos, considerados os mais simples e que se baseiam na conservação da massa, até modelos hidrodinâmicos, que são os mais complexos, os quais consistem na solução completa das equações de Saint-Venant, que governam o fluxo de água em canais em regime não-permanente e variado (SOUZA, 1984).

De acordo com RIVERA (1995), os modelos matemáticos podem ser classificados em ordem decrescente de complexidade, em quatro categorias:

- 1º) modelos hidrodinâmicos
- 2º) modelos Zero-Inércia
- 3º) modelos de onda cinemática
- 4º) modelos de balanço de volume.

Para SOUZA (1984), a análise baseada na solução das equações de conservação da massa e da quantidade de movimento, as quais governam o fluxo de água em canais em regime não-permanente e variado, caracterizam os modelos hidrodinâmicos (equações 2.1 e 2.2).

Os modelos de Zero-Inércia, fazem a hipótese que a inércia e a aceleração na equação do momento podem ser negligenciadas. STRELKOFFF e KATAPODES (1977) propuseram que, na maioria das vezes, esta condição ocorre na irrigação por superfície.

Para os modelos de onda cinemática, a análise ignora a equação do momento. Segundo RIVERA (1995), além dos termos de inércia, o terceiro termo da equação dinâmica, o gradiente de pressão da água, tornou-se “cinemática”.



Dentre os diversos modelos pesquisados até hoje, muitos requerem extensos programas de computadores para a sua solução. Entretanto, os modelos baseados no princípio de balanço volumétrico são mais simples e substituem a equação do momento linear por hipótese relativa à lâmina normal ou à área da seção transversal do sulco. Em geral eles são fáceis de aplicar durante a fase de avanço e a extensão dos mesmos às outras fases do processo de irrigação requerem um número maior de hipóteses (LEVIEN e SOUZA, 1987).

STRELKOFFF (1977) desenvolveu um modelo algébrico para faixas irrigadas. STRELKOFFF e SOUZA (1984) afirmam que a análise matemática da irrigação por faixa é mais fácil do que em sulcos, pois a lâmina de água influencia na infiltração. Em faixas, este efeito é mínimo. PEREIRA (1995) cita que o modelo de balanço de volume é apropriado para controle da irrigação em tempo real. LATIMER e REDDELL (1990), apresentaram um modelo de balanço de volume para a automação da irrigação para sistemas de irrigação por sulcos em tempo real.

ANDRADE (1994) desenvolveu um modelo matemático para simulação da fase de avanço utilizando células de espaço pré-fixadas e rugosidade variável.

Uma análise teórica mais detalhada do modelo de balanço de volume poderá ser obtida em LEVIEN (1985), LEVIEN e SOUZA (1987), RIVERA (1995) e WALKER e SKOGERBOE (1987). (No entanto a análise do balanço de volume baseia-se no princípio de que o volume de água armazenado na superfícies somado ao volume de água que se infiltrou, deve ser igual ao volume aplicado, durante a fase de avanço, ou seja, )

$$Q_o.t = S_y A_o X_a + S_z A_z o X_a \quad (2.13)$$

onde,

$Q_o$  : vazão aplicada em  $m^3/s$

$t$  : tempo de avanço em s

$A_o$  : área da seção transversal na entrada do sulco em  $m^2$

$A_z o$  : área infiltrada acumulada na entrada do sulco em  $m^2$

$S_y$  e  $S_z$  : fatores de forma dos perfis superficial e infiltrado

$X_a$  : distância de avanço no tempo  $t$  em minutos

## 2.10 Avaliação em irrigação por superfície

Segundo WALKER e SKOGERBOE (1987), o principal objetivo de se avaliar um campo irrigado por superfície é identificar as alternativas que podem resultar efetivas e viáveis para melhorar a performance do sistema.

As avaliações dos campos irrigados por superfície não só resultam dados que se podem usar para detectar problemas, mas que também provêm informações essenciais par alcançar altos níveis de manejo e controle. As avaliações repetidas indicam o comportamento dinâmico do campo através de toda a estação de cultivo. Em investigações mais intensas se coletam dados importantes que descrevem as características básicas de infiltração do campo.

As avaliações também podem ser capazes de fornecer informações sobre o avanço, para daí se derivar os parâmetros de infiltração (WALKER e SKOGERBOE, 1987), ou os dados de avanço e recessão fornecendo uma solução do problema da irrigação ou os resultados de uma avaliação podem ser utilizados para a simulação de modelos (PEREIRA, 1995).



Segundo SOUZA (1994) 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 de água pré-estabelecidas, de maneira mais uniforme possível sobre a área irrigada. Assim, esses dois parâmetros - uniformidade e eficiência - expressam a qualidade de uma irrigação. Juntos esses parâmetros podem servir para avaliar a performance de um sistema.

Para OLITTA (1987) há três formas de perdas de água na irrigação por superfície. Evaporação, percolação profunda e por escoamento no final da parcela, sendo o primeiro insignificante em relação aos outros dois.

BERNARDO (1989) cita que o excesso de irrigação resulta em perdas por percolação e ou por escoamento no final do sulco (runoff), perdas de nutrientes por lixiviação, bem como problemas de afloração do lençol freático nas áreas abaixo da que esta sendo irrigada ou na própria área irrigada, criando problemas potenciais de salinização, e causando conseqüentemente baixo rendimento das culturas e baixa eficiência de irrigação.

De acordo com FRIZZONE (1993), utilizam-se cinco índices para descrever a performance do sistema: uniformidade de distribuição, eficiência de aplicação, eficiência de armazenamento, perdas por percolação e perdas por escoamento superficial no final da parcela.

SOUZA (1994) cita que o parâmetro comumente usado para expressar a uniformidade de distribuição da água na irrigação por superfície é o coeficiente de uniformidade de Christiansen, CUC, que foi desenvolvido para a irrigação por aspersão. Nos sistemas por superfície é dado pela expressão:



$$CUC = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Z_i - \bar{Z}|}{n \cdot \bar{Z}} \right] \cdot 100 \quad (2.14)$$

onde,

$Z_i$  : lâmina infiltrada no ponto  $i$

$\bar{Z}$  : lâmina média infiltrada

$n$  : nº de observações utilizadas

Segundo ZERIHUN (1997), o CUC é definido pela relação entre o valor da soma dos desvios entre a lâmina infiltrada no ponto  $i$  e a média infiltrada e a lâmina média infiltrada.

Segundo WALKER (1989) a eficiência de aplicação é definido pela relação entre o volume de água armazenado na zona de raízes e o volume de água aplicado à parcela. Assim  $E_a$  pode ser calculado por:

$$E_a = \frac{\text{Vol. de água armazenado na zona radicular}}{\text{Volume de água aplicado ao campo}} \quad (2.15)$$

A eficiência de armazenamento de água é definida pela relação entre o volume de água aplicado e retido na zona radicular e o volume de água que pode ser armazenado neste solo (WALKER, 1989; ZERIHUN, 1997). Assim  $E_s$  é expresso como:

$$E_s = \frac{\text{Volume de água armazenado na zona radicular}}{\text{Volume potencial de umidade deste solo}} \quad (2.16)$$

Os indicadores de perdas de água na irrigação são classificados como: perdas por percolação e perdas por runoff por diversos autores como WALKER (1989), FRIZZONE (1993), SOUZA (1994) e ZERIHUN (1997), como sendo o primeiro - perdas por percolação - a relação entre a fração do volume de água percolada abaixo da zona de raízes e o volume total de água aplicado. As perdas por escoamento no final da parcela é definida como a fração do volume de água aplicado que é perdida por runoff. Assim segundo SOUZA (1994), estes índices podem ser expressos por:

$$I_p = \frac{V_{pp}}{V_a} .100 \quad (2.17)$$

$$I_{ro} = \frac{V_{ro}}{V_a} .100 \quad (2.18)$$

onde:

$I_p$  : Índice de percolação

$V_{pp}$  : Volume percolado abaixo da zona de raízes

$I_{ro}$  : Índice de "runoff"

$V_{ro}$  : Volume perdido por escoamento no final da parcela

$V_a$  : Volume de água aplicado

### **3.0 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Características da área de estudo**

O estudo foi realizado na Fazenda Experimental do Perímetro Irrigado de Morada Nova, localizada no município de mesmo nome, distante 160 km de Fortaleza, capital do estado do Ceará.

A área situa-se entre as coordenadas 5°06' de latitude sul e 38°23' de longitude oeste.

O clima é do tipo BSW<sub>h</sub>, muito quente e semi-árido, de acordo com a classificação de Koeppen e tropical quente, seca acentuada, de acordo com a classificação de Gaussen. A temperatura média varia de 26,0 °C a 28,3°C.

A estação chuvosa geralmente tem início no mês de janeiro indo até o mês de junho, intensificando-se durante os meses de março e abril. A precipitação média anual é da ordem de 872 mm, tendo os meses de julho a dezembro praticamente sem chuvas.

A evapotranspiração de referência média anual é 1970 mm, tendo seu valor máximo no mês outubro quando atinge o valor de 205 mm, segundo PENMAN-MONTEITH.

A Tabela relativa aos dados climáticos encontra-se no Anexo 01.

O solo da área em referência é do tipo aluvial eutrófico de textura franco siltosa, de acordo com os resultados da análise da amostra colhida no



local e realizada pelo Laboratório de Solos da Universidade Federal do Ceará. A área apresenta textura média na superfície e à média profundidade e leve em profundidade, sendo moderadamente drenado. O resultado desta análise se encontra no Anexo 02.

O relevo da região é plano com declive inferior a 0,5% nas áreas aluvionais o que facilitou no seu aproveitamento hidroagrícola através do processo de sistematização para irrigação por superfície. Na área de estudo a declividade dos sulcos é de 0,003 m/m .

### **3.2 Metodologia**

#### **3.2.1 Condução do experimento**

O trabalho consistiu em duas fases de campo e duas fases de cálculos teóricos. Na primeira fase de campo coletaram-se dados referentes às características de infiltração do solo da equação de KOSTIAKOV-LEWIS, para posterior dimensionamento do sistema.

Utilizou-se para tanto a metodologia dos dois pontos proposta por ELLIOT e WALKER (1982) para avaliar estes parâmetros por demonstrar ser mais adequada que os métodos tradicionais.

Durante esta fase utilizaram-se três sulcos, sendo um sulco-teste e os outros dois que serviram como bordadura. As vazões eram medidas em calhas Parshall de uma polegada, previamente calibradas. A primeira instalada no início do sulco para medir a vazão de entrada e a segunda no final do sulco para medir a vazão de saída, com o objetivo de se construir as hidrógrafas de

entrada e saída, respectivamente. A água era conduzida ao local através de canais de terra situados a montante. A jusante havia um dreno parcelar para coletar a água perdida por escoamento superficial (runoff).

Realizaram-se quatro irrigações com intervalo de oito dias entre uma e outra, de forma a atingir a velocidade de infiltração básica do solo. Para tanto fazia-se o corte da água somente após um período considerado em que a vazão permanecia constante na calha de saída.

A área foi semeada com caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) variedade EPACE-10 que apresenta ciclo de 65 a 75 dias. Após a quarta irrigação as medições foram prejudicadas em virtude da grande massa vegetal que se formou sobre o sulco, dificultando as medições de avanço e recessão.

Após esta fase, iniciou-se o trabalho de dimensionamento do sistema de irrigação, com base nos dados colhidos a campo. Para este dimensionamento utilizou-se do “software” SIDIS desenvolvido por RIVERA (1995).

Este “software” utiliza a metodologia sugerida por WALKER & SKOGERBOE (1987), baseada no princípio da conservação da massa ou do balanço de volume. Esta estabelece que a qualquer momento, o volume total de água aduzida a parcela é igual a soma dos volumes infiltrado e superficial.

De posse destes resultados, voltou-se novamente a campo para instalação do sistema de irrigação, conforme cálculos do dimensionamento. Nesta etapa utilizaram-se de 3 sulcos, sendo cada um destes ladeados por dois de bordadura. A utilização destes três sulcos teve o objetivo de se ter uma maior representatividade da área em estudo (Figura 01).

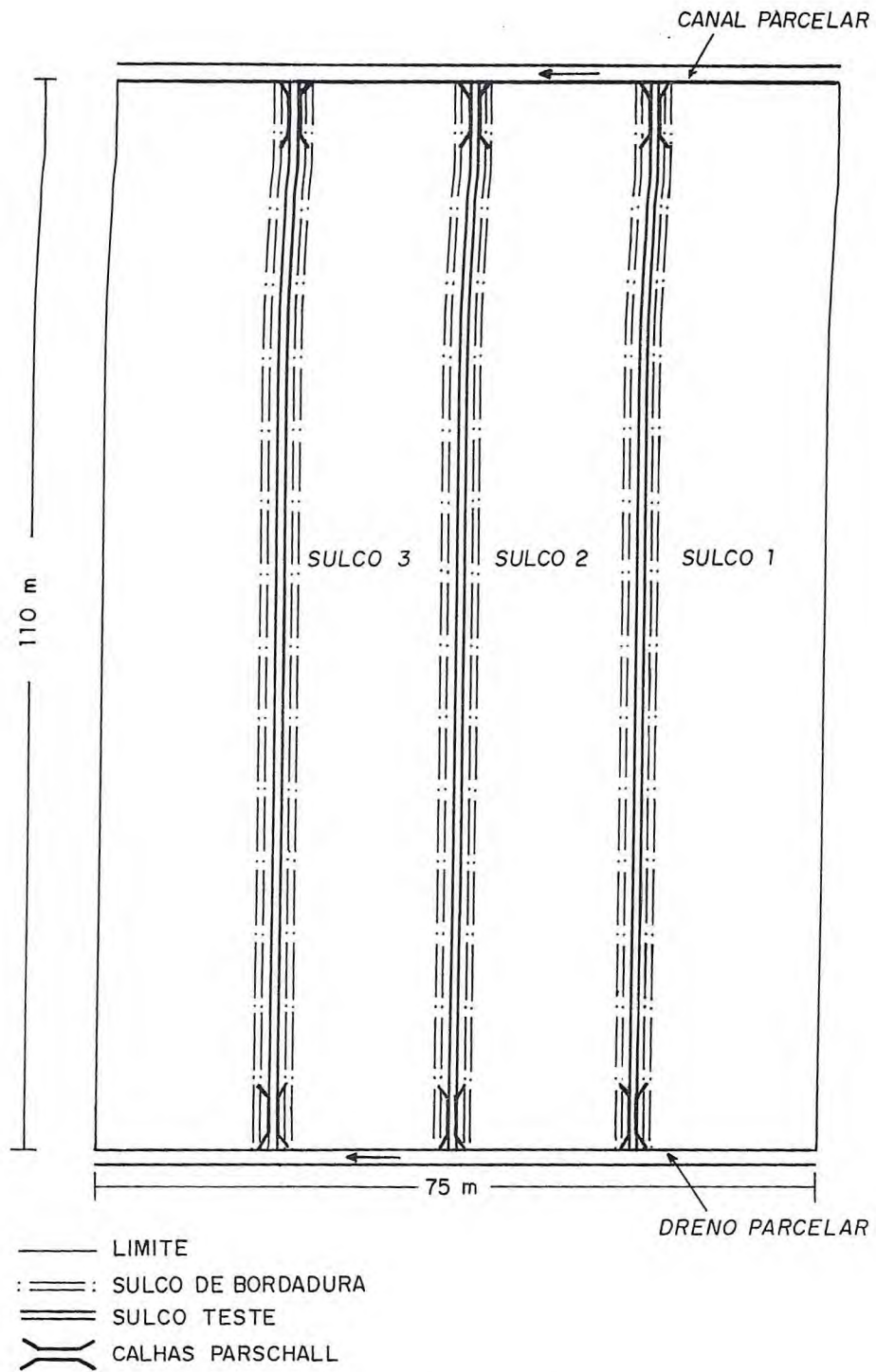


Figura 01 - Configuração do experimento após o dimensionamento



Entre a segunda e a terceira irrigações houve a necessidade de se eliminar as ervas daninhas que se desenvolveram na área. Realizou-se, então, uma culturação à tração animal nas linhas do sulco, seguida de acabamento manual.

Os resultados foram analisados conforme preconiza a metodologia desenvolvida por WALKER e SKOGERBOE (1987) para avaliação de sistema de irrigação por sulcos.

### 3.2.2 - Medição dos parâmetros de avaliação

O principal objetivo da avaliação em sistemas de irrigação por superfície, segundo WALKER (1989) é identificar práticas de manejo que possam melhorar a eficiência de irrigação. Para isso alguns dados de campo devem ser coletados, tais como:

- a) hidrógrafa de entrada;
- b) hidrógrafa de saída;
- c) curva de avanço e recessão;
- d) umidade do solo antes da irrigação;
- f) infiltração e capacidade de retenção de água no solo;
- g) geometria da seção transversal da área de fluxo.

#### 3.2.2.1 Hidrógrafas

As vazões de entrada e de saída nos sulcos foram medidas através de calhas Parshall de uma polegada, de forma a produzir uma hidrógrafa de

entrada e uma de saída. Teve-se o cuidado em manter, sempre que possível, o fluxo na calha de entrada constante.

De posse dos resultados, confeccionou-se as duas hidrógrafas, e após isso, integrou-se para se obter os volumes aplicados e os volumes de runoff.

Dois parâmetros foram obtidos da comparação das hidrógrafas. Primeiro, o volume infiltrado no solo, pode ser obtido pela diferença entre o valor integrado das duas hidrógrafas.

Deste modo:

$$V_z = V_{en} - V_{saida} \quad (3.1)$$

em que  $V_z$ ,  $V_{en}$  e  $V_{saída}$  são o volume total infiltrado, volume introduzido na parcela e o volume de escoamento superficial, respectivamente. O segundo parâmetro definido pelas hidrógrafas de entrada e saída é a taxa de infiltração básica,  $f_0$  (em  $m^3/\text{min}/m$ ), determinada pela seguinte equação:

$$f_0 = \frac{(Q_{en} - Q_{saida})}{L} \quad (3.2)$$

onde  $Q_{en}$  e  $Q_{saída}$  são as vazões em  $m^3/\text{min}$  quando o fluxo atinge uma estabilidade nas calhas de entrada e saída, respectivamente e  $L$  é o comprimento do campo em metros.

As medidas de fluxo na calha de saída nem sempre atingia uma estabilidade por um período longo, devido ao fato de que após o corte da irrigação, a altura do fluxo na calha já começava a decrescer.

### 3.2.2.2 Avanço e recessão

Para a confecção das curvas de avanço e de recessão, instalou-se doze estacas, distanciadas de dez metros uma da outra, sendo que a estaca 0 (zero) ficava no início do sulco e a de número onze no final. Durante a fase de avanço, registrava-se o tempo em que a água atingia cada estação e para o registro da fase de recessão usava-se como critério sempre que a lâmina de água decrescia a mais ou menos a metade da lâmina original. Este procedimento foi usado para não superestimar o tempo de recessão. Também se instalou uma estaca intermediária aos cinquenta e cinco metros (metade do campo), sendo que nesta só registrava-se o tempo de avanço.

A trajetória do avanço não tem uma descrição matemática concisa, mais pode ser aproximada por uma função potencial do tipo:

$$x = pt_x^r \quad (3.3)$$

onde  $x$  é a distância do avanço em metros, atingida em  $t_x$  minutos e  $p$  e  $r$  são parâmetros de ajuste. Após a coleta dos dados à campo, utilizou-se a metodologia dos dois pontos proposta por ELLIOT e WALKER (1982), a qual baseia-se no princípio da conservação da massa. Neste método, mede-se o



tempo de avanço à metade do campo ( $t_{0,5L}$ ) e ao final ( $t_L$ ) e resolve-se simultaneamente para definir os parâmetros da equação 3.3:

$$r = \frac{\log(L / 0,5L)}{\log(t_L / t_{0,5L})} \quad (3.4)$$

e

$$p = \frac{L}{t_L^r} \quad (3.5)$$

### 3.2.2.3. Geometria de fluxo

Para se descrever a geometria do sulco, utilizou-se de um perfilômetro, durante a fase de avanço, onde se fazia uma medida junto a estaca 3 e outra junto a estaca 4.

Segundo a metodologia convencional, deve-se usar o perfilômetro antes e depois da irrigação, e durante esta, toma-se a largura da superfície livre da água e ou sua profundidade com uma régua graduada. No entanto, preferiu-se fazer as medições durante as irrigações com o perfilômetro, porque observou-se que a forma do sulco se modificava já durante a fase de avanço.

Assim sendo, colocava-se o perfilômetro sobre o sulco e com um nível de pedreiro, certificava-se de que este estava nivelado. Deixava-se descer uma haste para medir o nível da água, para somente após se medir a forma do sulco.

Plotou-se em papel milimetrado a seção do sulco obtida à campo, a qual dividiu-se em 10 a 15 intervalos iguais. Desta seção obtida retirou-se a largura da água na superfície e à metade da lâmina de água.

Assim fez-se uma relação entre a largura e a profundidade da seguinte forma:

$$L_2 = \frac{\log(X_{total} / X_{media})}{\log(Y_{total} / Y_{media})} \quad (3.6)$$

e

$$L_1 = \frac{X_{total}}{(Y_{total})^{1/2}} \quad (3.7)$$

Depois fez-se uma relação entre a área e a lâmina de água no sulco da qual:

$$A = a_1 \cdot Y^{a_2} \quad (3.8)$$

sendo que:

$$a_1 = \frac{L_1}{L_2 + 1} \quad (3.9)$$

$$a_2 = L_2 + 1 \quad (3.10)$$

Como relatado na seção 2.5, o cálculo do perímetro molhado é mais rigoroso e foi executado por integração numérica utilizando a equação 2.5, que aqui é rerepresentada:

$$Pm = \sum_{i=0}^n 2 \left\{ [y_i - y_{(i-1)}]^2 + [0,5 \cdot [B_i - B_{(i-1)}]^2] \right\}^{0,5} \quad (2.5)$$

onde:

$P_m$  : perímetro molhado em metros

$Y_i$  : lâmina do sulco em metros

$B_i$  : largura do sulco em metros.

Com esta equação pode-se obter os perímetros molhados total e médio e relaciona-los com a lâmina de água da seguinte maneira:

$$PM = b_1 \cdot Y^{b_2} \quad (3.11)$$

sendo que

$$b_2 = \frac{\log(PM_{total} / PM_{medio})}{\log(Y_{total} / Y_{medio})} \quad (3.12)$$

e

$$b_1 = \frac{PM_{total}}{(Y_{total})^{b_2}} \quad (3.13)$$

Para o cálculo da área de fluxo na entrada do sulco, utilizou-se a equação de Manning, para fluxo uniforme, onde:

$$A_0 = C_1 \left( \frac{Q_0 \cdot n}{60 \cdot S_0^{1/2}} \right)^{C_2} \quad (3.14)$$

sendo

$$C_2 = \frac{3a_2}{5a_2 - 2b_2} \quad (3.15)$$

e

$$C_1 = a_1 \left( \frac{b_1^{0,67}}{a_1^{1,67}} \right)^{C_2} \quad (3.16)$$

onde  $C_1$  e  $C_2$  são as constantes geométricas do sulco.



### 3.2.2.4 Infiltração:

Para o cálculo das constantes de infiltração de Kostiakov-Lewis (**a** e **K**), tomou-se a equação 2.11 e a equação 3.3 em conjunto para se escrever a equação do balanço de volume para qualquer tempo da seguinte forma:

$$Q_{ot} = S_y \cdot A_o \cdot X + S_z \cdot K \cdot t^a \cdot X + \frac{f_o \cdot t \cdot X}{1+r} \quad (3.17)$$

onde  $Q_o$  é a vazão de entrada em  $m^3/\text{min}$ ,  $t$  é o tempo transcorrido desde o início da irrigação em min,  $A_o$  é a área da seção transversal de fluxo na entrada em  $m^2$ ,  $S_z$  é o fator de forma definido como:

$$S_z = \frac{a+r(1-a)+1}{(1+r) \cdot (1+a)} \quad (3.18)$$

A área da seção transversal de fluxo na entrada  $A_o$ , foi calculada como descrito na equação 3.14.

A equação 3.17 foi escrita para dois pontos do avanço de forma a definir os parâmetros de infiltração, **a** e **K**. Os dois pontos do avanço medidos são, à metade do sulco ( $L/2$ ) e ao final do sulco ( $L$ ). Assim, para a metade do campo, o avanço é:

$$Q_{o,t_{0,5L}} = \frac{S_y \cdot A_o \cdot L}{2} + \frac{S_z \cdot K \cdot t_{0,5L}^a \cdot L}{2} + \frac{f_o \cdot t_{0,5L} \cdot L}{2(1+r)} \quad (3.19)$$

e para o final do sulco:

$$Q_{o,t_L} = S_y \cdot A_o \cdot L + S_z \cdot K \cdot t_L^a \cdot L + \frac{f_o \cdot t_L \cdot L}{(1+r)} \quad (3.20)$$

onde  $t_{0,5L}$  é o tempo de avanço à metade do campo em minutos,  $t_L$  é o tempo de avanço medido ao final do sulco em minutos e  $L$  é o comprimento total do sulco.

Observando-se as equações 3.19 e 3.20, somente os parâmetros  $K$  e  $a$  são desconhecidos. Resolvendo-se simultaneamente usando uma transformação logarítmica se obtém:

$$a = \frac{\log(V_L / V_{0,5L})}{\log(t_L / t_{0,5L})} \quad (3.21)$$

onde;

$$V_L = \frac{Q_0 \cdot t_L}{L} - S_y \cdot A_0 - \frac{f_0 \cdot t_L}{(1+r)} \quad (3.22)$$

e

$$V_{0,5L} = \frac{2 \cdot Q_0 \cdot t_{0,5L}}{L} - S_y \cdot A_0 - \frac{f_0 \cdot t_{0,5L}}{(1+r)} \quad (3.23)$$

então  $S_z$  é obtido diretamente da equação 3.18 e o parâmetro  $K$  pode ser obtido por:

$$K = \frac{V_L}{S_z \cdot t_L^a} \quad (3.24)$$

Como todos os parâmetros da equação 2.11 estavam definidos, os cálculos das lâminas infiltradas em cada estação, puderam ser realizados mediante a seguinte equação:

$$Z_i = K[(tr)_i - (ta)_i]^a + f_0[(tr)_i - (ta)_i] \quad (3.25)$$

onde  $(tr)_i$  e  $(ta)_i$  eram os tempos de recessão e tempo de avanço na estação  $i$  respectivamente.  $K$ ,  $a$  e  $f_0$  foram determinados de acordo com as equações 3.24, 3.21 e 3.2. A diferença entre  $(tr)_i$  e  $(ta)_i$  definia o tempo de oportunidade de infiltração.  $Z_i$  era a lâmina infiltrada no ponto  $i$  em  $m^3/m$ .

### 3.2.2.5 Cálculo dos volumes infiltrados:

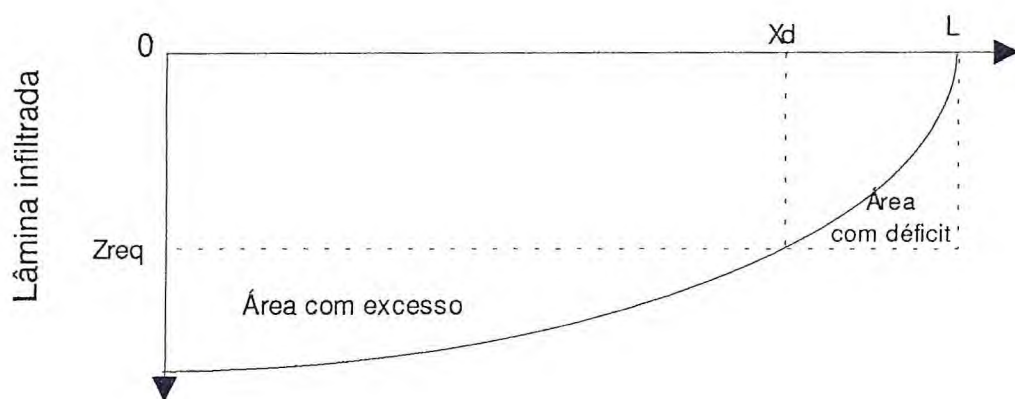
Segundo WALKER e SKOGERBOE (1987) e WALKER (1989) uma irrigação por superfície pode resultar em três situações típicas de lâminas infiltradas no perfil do solo. a) irrigação com deficit, b) irrigação completa, e c) irrigação em excesso. A Figura 02 mostra estes três perfis de lâminas infiltradas em irrigação por superfície.

Quando a vazão de entrada é cortada pouco tempo após se completar a fase de avanço, em alguns pontos ao longo do sulco a lâmina infiltrada será insuficiente para atender o déficit de umidade do solo (02.a). Outras vezes, se fornece exatamente a lâmina requerida na parte que se recebe a menor quantidade de água (02.b) e, finalmente, e mais frequentemente as lâminas aplicadas excedem, em todos os pontos, a lâmina requerida (02 .c).

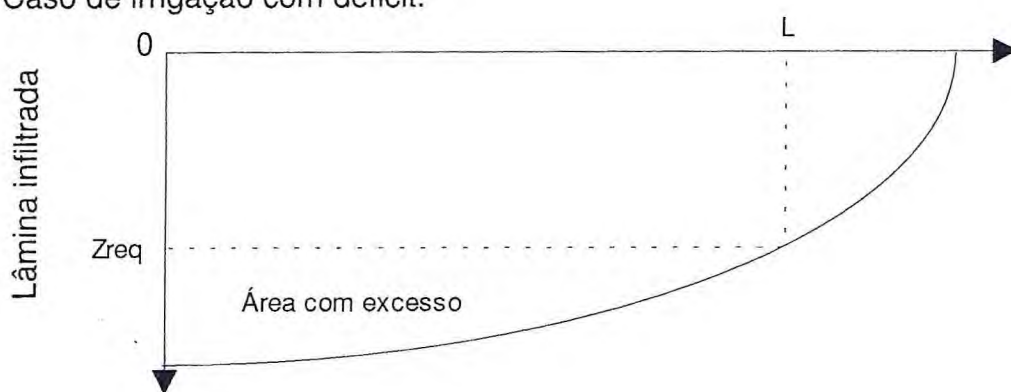
Para os casos b e c o volume total infiltrado ao longo do sulco pode ser calculado integrando-se a distribuição subsuperficial da umidade mediante a regra do trapézio:

$$V_z = \frac{L}{2n} (Z_0 + 2Z_1 + 2Z_2 + \dots + 2Z_{n-1} + Z_n) \quad (3.26)$$

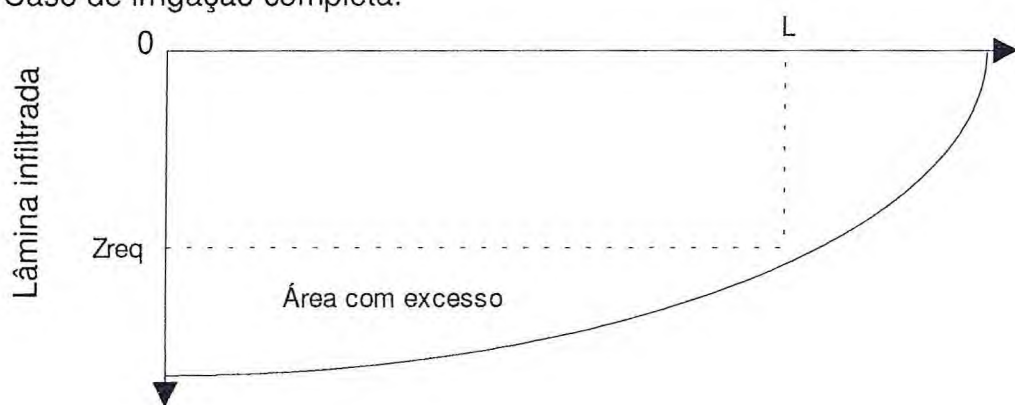




a) Caso de irrigação com déficit.



b) Caso de irrigação completa.



c) Caso de irrigação em excesso.

Figura 02- Casos típicos de perfis de infiltração na irrigação por superfície.

onde  $L$  é o comprimento do sulco em metros,  $Z_i$  são as lâminas acumuladas no ponto  $i$  em  $m^3/m$  e  $n$  é o número de incrementos usados para subdividir o sulco.

Quando se tinha uma situação como a apresentada na Figura 02.a onde ocorria déficit de irrigação na parte final do sulco, calculava-se o volume infiltrado em dois segmentos do sulco. Primeiro se determinava graficamente a posição de  $X_d$ . Em seguida definia-se as áreas irrigadas adequadamente e inadequadamente. Então, utilizando-se a equação 3.26, integra-se o volume infiltrado sobre a área adequadamente irrigada,  $V_{za}$  e depois o volume infiltrado sobre a área com déficit,  $V_{zi}$ , de tal modo que o volume infiltrado total é:

$$V_z = V_{za} + V_{zi} \quad (3.28)$$

Após os cálculos dos volumes infiltrados obtidos através da metodologia descrita até aqui, comparava-os com os volumes infiltrados médios conseguidos pela diferença entre os volumes aplicados e os volumes escoados, de acordo com a equação 3.1. Este procedimento é recomendado por WALKER (1989) para se ter uma maior precisão dos resultados.

### 3.2.2.6 Medidas de performance do sistema

As medidas de performance utilizadas neste estudo para avaliar a irrigação foram: eficiência de aplicação ( $E_a$ ); índice de runoff ( $I_{ro}$ ); índice de percolação ( $I_p$ ); eficiência de armazenamento ( $E_s$ ) e coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC).

Para o cálculo das eficiências de aplicação ( $E_a$ ) e de armazenamento ( $E_s$ ) utilizou-se dois critérios: Primeiro para o caso de irrigação completa ou em excesso, a  $E_a$  foi calculada por:

$$E_a = \frac{Z_{req} \cdot L}{Q_0 \cdot t_{co}} \quad (3.28)$$

onde  $Z_{req}$  é a lâmina de aplicação requerida nos sulcos em  $m^3/m$  e equivalente ao déficit de umidade do solo antes da irrigação.  $L$  é o comprimento do sulco,  $Q_0$  a vazão média aplicada em  $m^3/min$  e  $t_{co}$  é o tempo de corte em minutos. Neste caso, a eficiência de armazenamento é de 100%.

Para o caso de irrigação com déficit a eficiência de aplicação foi calculada do seguinte modo:

$$E_a = \frac{Z_{req} \cdot X_d + V_{zi}}{Q_0 \cdot t_{co}} \cdot 100 \quad (3.29)$$

onde  $X_d$  é a distância em metros que divide a área com irrigação satisfatória, da área com déficit e  $V_{zi}$  é o volume infiltrado sobre a área inadequadamente irrigada.

Com relação a eficiência de armazenamento ( $E_s$ ), neste caso é calculada por:

$$E_s = \frac{Z_{req} \cdot X_d + V_{zi}}{Z_{req} \cdot L} \cdot 100 \quad (3.30)$$



O coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) foi calculado, não importando se a irrigação era um caso de irrigação completa ou em excesso, ou um caso de irrigação com deficit, pela equação 2.14 apresentada na seção 2.10, onde aqui é rerepresentada:

$$CUC = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Z_i - \bar{Z}|}{n \cdot \bar{Z}} \right] \cdot 100 \quad (2.14)$$

onde,

$Z_i$  : lâmina infiltrada no ponto  $i$

$\bar{Z}$  : lâmina média infiltrada

$n$  : nº de observações utilizadas

Para se definir os índices de perdas por percolação profunda e por escoamento superficial utilizou-se das equações 2.17 e 2.18 respectivamente, apresentadas também na seção 2.10 sendo aqui reproduzida:

$$I_p = \frac{V_{pp}}{V_a} \cdot 100 \quad (2.17)$$

$$I_{ro} = \frac{V_{ro}}{V_a} \cdot 100 \quad (2.18)$$

onde:

$I_p$  : Índice de percolação

$V_{pp}$  : Volume percolado abaixo da zona de raízes

$I_{ro}$  : Índice de "runoff"

$V_{ro}$  : Volume perdido por escoamento no final da parcela

$V_a$  : Volume de água aplicado

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com o capítulo 3, item 3.2.1, utilizou-se de três sulcos, durante os testes de campo, para se obter uma maior representatividade da área. Mas durante a fase de análise dos resultados, constatou-se que o comportamento dos três sulcos foram semelhantes.

Deste modo, resolveu-se discutir somente o sulco 2, porque os volumes infiltrados calculados pela metodologia do balanço de volume, mais se aproximaram dos volumes infiltrados observados pela diferença entre as hidrógrafas de entrada e saída.

No sulco 2, a maior diferença entre os citados volumes foi de 10,29% na terceira irrigação, enquanto nos demais sulcos essa diferença chegou a 33% na terceira irrigação do sulco 1 e a 12% na primeira irrigação do sulco 3.

As informações referentes aos sulcos 1 e 3 encontram-se disponíveis no disquete em anexo. Também em anexo estão a memória de cálculo utilizada no presente trabalho, referente ao sulco 2.

### 4.1. Análise da infiltração

#### 4.1.1. Variação dos parâmetros de infiltração ao longo da estação de cultivo.

Na Tabela 01. pode-se observar a variação temporal dos parâmetros da equação de Kostiakov-Lewis ( $a$ ,  $K$  e  $f_0$ ) ao longo da estação de cultivo. Nesta



Tabela 01 - Parâmetros de infiltração da equação de Kostiakov-Lewis ao longo das  
*4 irrigações.*

| Sulco | Irrigações | Parâmetros |                         |                            |
|-------|------------|------------|-------------------------|----------------------------|
|       |            | a          | k (m/min <sup>a</sup> ) | fo (m <sup>3</sup> /min/m) |
| 2     | 1          | 0,1196     | 0,0156                  | 0,000516                   |
|       | 2          | 0,0410     | 0,0112                  | 0,000247                   |
|       | 3          | 0,2855     | 0,0066                  | 0,000179                   |
|       | 4          | 0,4529     | 0,0024                  | 0,000170                   |

tabela verifica-se que o valor de **a** apresenta uma ascensão durante a estação de cultivo. Uma exceção das demais irrigações observa-se na segunda, onde o valor deste parâmetro apresenta seu valor mais baixo.

Na primeira irrigação o valor de **a** foi de 0,1196 reduzindo-se a 0,0410 na segunda irrigação. Para a terceira irrigação este valor alcança 0,2855 e na quarta, 0,4529.

Comparando-se a primeira com a terceira irrigação, o expoente **a** teve uma aumento de 138% e a primeira com a quarta um incremento de 278%.

Com relação ao parâmetro **k**, pode-se observar na Tabela 01 que este parâmetro sofreu um decréscimo, tendo na 1ª irrigação um valor de 0,0156 m<sup>3</sup>/min<sup>a</sup>, na 2ª irrigação este valor caiu para 0,0112 m<sup>3</sup>/min<sup>a</sup>, representando uma redução de 28%. Da 2ª para a 3ª irrigação este valor decresceu em 41% e da 3ª para a 4ª a redução foi de 64%.

Na Figura 03 observa-se que o valor de **k** tem uma tendência de reduzir-se ao longo da estação de cultivo, enquanto que, o valor de **a** eleva-se.

Em virtude das dificuldades porque passa o perímetro irrigado de Morada Nova, com relação a sua manutenção, a vazão derivada às parcelas agrícolas nem sempre é a mesma durante uma estação de cultivo. Diante disto, não foi feito controle sobre a vazão derivada ao sulco, já que é uma realidade enfrentada pelo irrigante.

Numa tentativa de se investigar as razões das variações dos parâmetros **a** e **k** durante as quatro irrigações, relacionou-se estes com a vazão aplicada. Através de regressão linear, comparando-se **a** e Q<sub>0</sub> (m<sup>3</sup>/min.), verificou-se que este parâmetro não é influenciado pela vazão, já que o coeficiente de

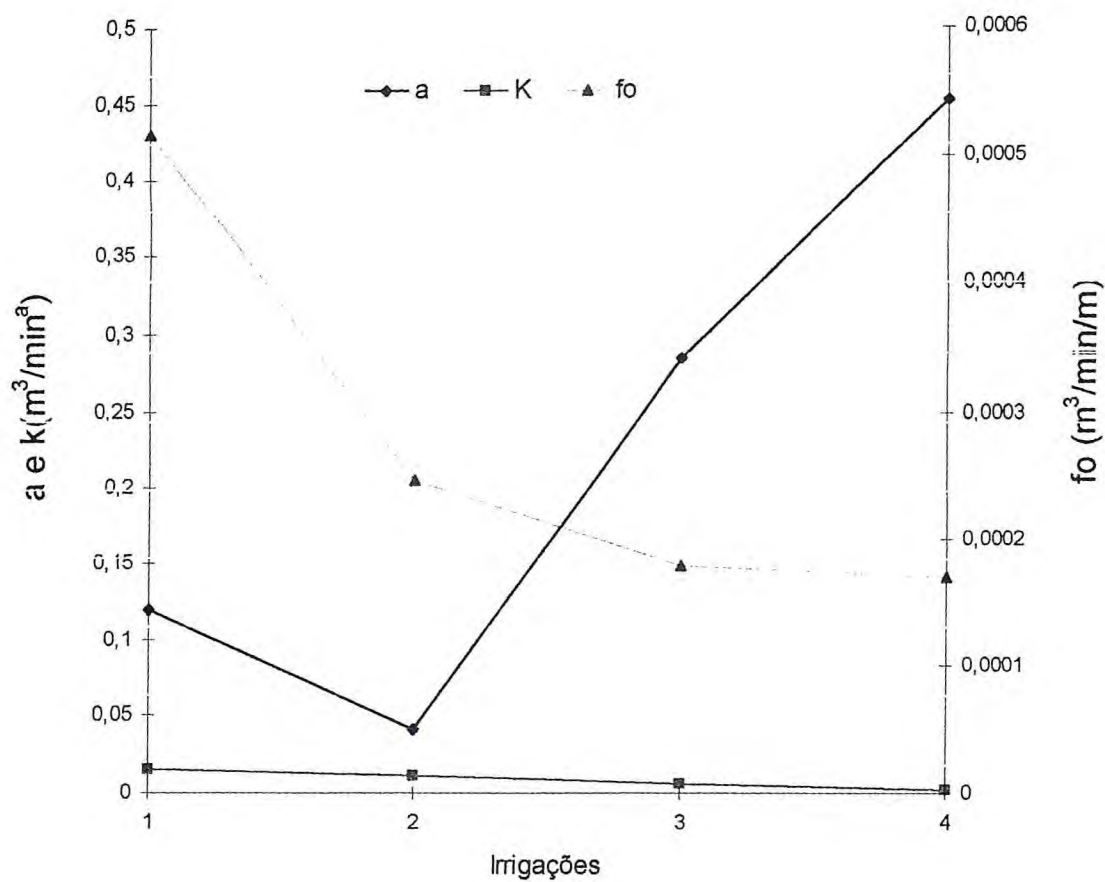


Figura 03 - Variação dos parâmetros de infiltração da equação de Kostiakov-Lewis ao longo do ciclo de cultivo.



determinação entre **a** e a vazão aplicada é de 0,0256 (Tabela 02).

Observando-se a Tabela 03 pode-se verificar também que a constante **K** não apresenta uma boa correlação linear com a vazão, indicando que este parâmetro não é influenciado diretamente pela vazão. O coeficiente de determinação encontrado neste caso foi de 0,3652.

Utilizando-se dos Dados de RAMSEY (1976), citados por SOUZA (1981) e fazendo-se a mesma comparação, obteve-se um coeficiente de determinação de 0,90 para **a** e Q e de 0,8 para **K** e Q, RAMSEY, no entanto, utilizou sulco de precisão. SOUZA (1981), verificou que o maior efeito da constante **a** é na forma da curva de infiltração acumulada e, conseqüentemente, na curva de avanço. O efeito das constantes **K** e **a** na infiltração acumulada é muito pequena. Variações nas constantes **K** e **a** não apresentaram variações significativas na lâmina infiltrada acumulada. Variações na constante **K**, mantendo-se **a** inalterado, provocaram uma variação no avanço onde este torna-se mais lento ou mais rápido se houver uma diminuição ou aumento de **K**. LIMA FILHO (1996), também sugere que o valor de **K** apresenta uma tendência de diminuir com as irrigações.

Observando-se os dados apresentados na Tabela 01, verifica-se que o valor de **f<sub>0</sub>** (velocidade de infiltração básica) apresenta uma tendência de diminuir com as irrigações. A infiltração básica para a 1ª irrigação foi de  $5,16 \times 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/min/m e na 2ª irrigação, de  $2,47 \times 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/min/m, representando desta forma uma redução de 52%. Já da 2ª irrigação para a 3ª, **f<sub>0</sub>** apresentou uma queda de 28%. Na 4ª irrigação o valor de **f<sub>0</sub>** foi de  $1,70 \times 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/min/m, reduzindo-se em relação a 3ª irrigação em apenas 5%.

Tabela 02 - Análise da influência da vazão aplicada sobre o parâmetro  $a$  da equação de Kostiakov-Lewis.

| Irrigação | Vazão aplicada<br>(m <sup>3</sup> /min) | $a$    | $R^2$  |
|-----------|---|--------|--------|
| 1         | 0,0738                                  | 0,1196 |        |
| 2         | 0,0449                                  | 0,0410 |        |
| 3         | 0,0565                                  | 0,2855 |        |
| 4         | 0,0503                                  | 0,4529 | 0,0256 |

Tabela 03 - Análise da influência da vazão aplicada sobre o parâmetro **k** da equação de Kostiakov-Lewis.

| Irrigação | Vazão aplicada<br>(m <sup>3</sup> /min) | k      | R <sup>2</sup> |
|-----------|---|--------|----------------|
| 1         | 0,0738                                  | 0,0156 |                |
| 2         | 0,0449                                  | 0,0112 |                |
| 3         | 0,0565                                  | 0,0066 |                |
| 4         | 0,0503                                  | 0,0024 | 0,3652         |



Como observa-se o valor de  $f_0$  não sofreu uma variação muito significativa entre a 3ª e a 4ª irrigação, atingindo uma estabilidade entre estas, como nota-se na Figura 03.

Fazendo-se uma análise da influência da vazão aplicada e do volume aplicado sobre  $f_0$  elaborou-se a Tabela 04. Observa-se que o coeficiente de determinação existente entre  $Q_0$  e  $f_0$  é de 0,7. Já na relação existente entre o volume aplicado e a velocidade de infiltração básica, observa-se que o coeficiente de determinação é de 0,98 sugerindo que este parâmetro pode ser influenciado pela vazão aplicada e pelo tempo de corte.

Uma das razões que justificam a redução de  $f_0$  com as irrigações, deve-se ao processo de carreamento das partículas mais finas de um local para outro, preenchendo os espaços porosos e diminuindo a infiltração do solo. Estes resultados estão de acordo com TURBAK e MOREL-SEYTOUX (1988) onde prevendo uma variação nos parâmetros de infiltração propuseram um modelo em que a taxa de infiltração era variável com o tempo.. Também CHILDS et al (1993) verificaram que o tipo de solo é preponderante na variação dos parâmetros de infiltração, refletindo-se na performance do sistema de irrigação.

#### 4.1.2. Efeito das variações das constantes $a$ , $k$ e $f_0$ na infiltração acumulada.

Para se verificar a influência da constante  $a$  sobre a curva de infiltração acumulada, elaborou-se a Figura 04 sobre a qual apresenta-se as variações de  $a$ , onde utilizaram-se os valores encontrados para os eventos 1, 2 e 3. Desta forma, o  $a_1$  foi de 0,1196 (1ª irrigação);  $a_2$  foi de 0,0410 (2ª irrigação) e o  $a_3$  foi de 0,2855 (3ª irrigação). O decréscimo de 66% de  $a_1$  para  $a_2$  representou uma diminuição de

Tabela 04 - Análise da influência da vazão aplicada e do volume sobre a velocidade de infiltração básica.

| Irrigação | Vazão<br>aplicada<br>(m <sup>3</sup> /min) | Volume<br>aplicado<br>(m <sup>3</sup> ) | fo<br>(m/min)         | R <sup>2</sup><br>(Qo.fo) | R <sup>2</sup><br>(Va.fo) |
|-----------|--|---|-----------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1         | 0,0738                                     | 9,4                                     | 5,16x10 <sup>-4</sup> |                           |                           |
| 2         | 0,0449                                     | 5,6                                     | 2,47x10 <sup>-4</sup> |                           |                           |
| 3         | 0,0565                                     | 5,3                                     | 1,79x10 <sup>-4</sup> |                           |                           |
| 4         | 0,0503                                     | 5,1                                     | 1,70x10 <sup>-4</sup> | 0,7094                    | 0,98                      |

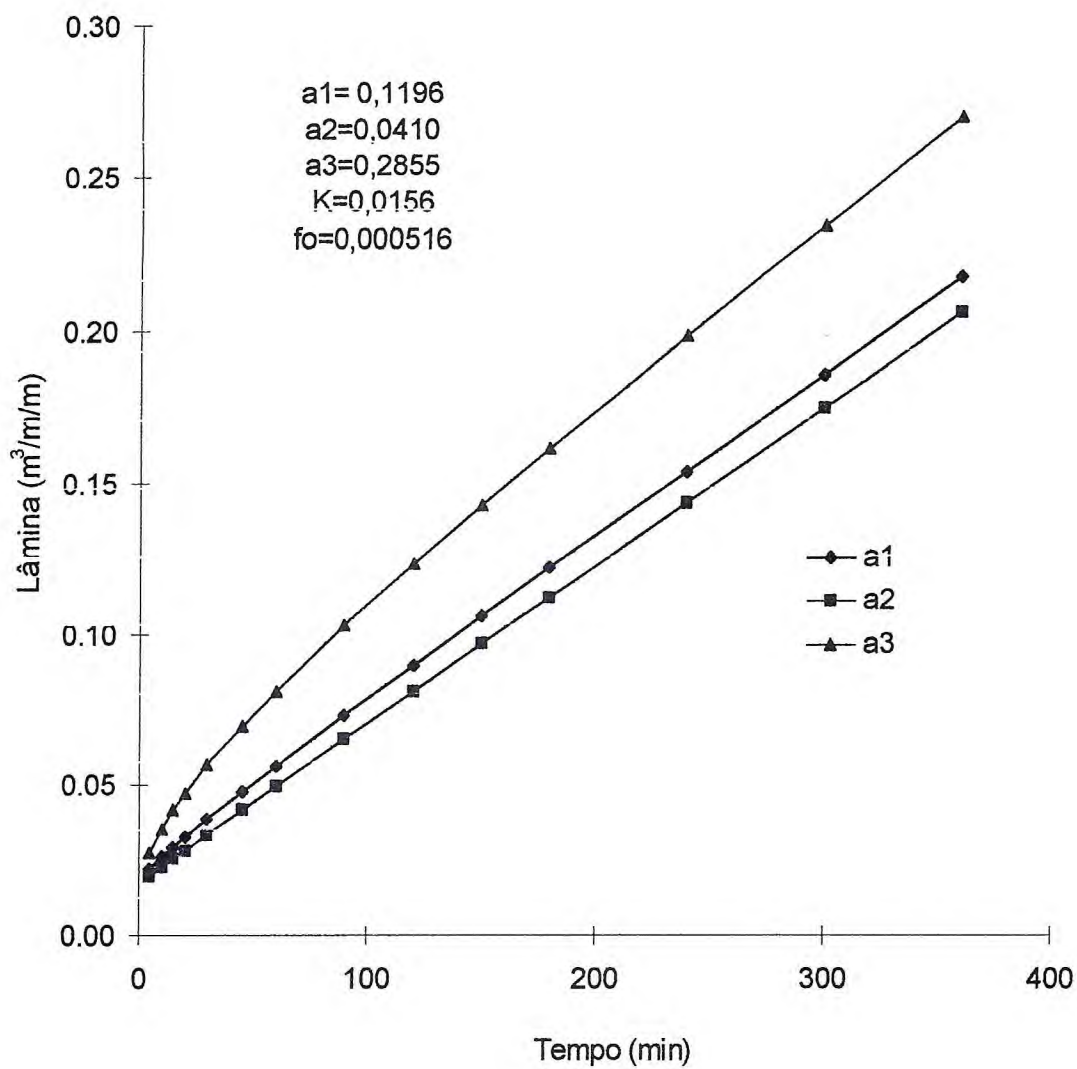


Figura 04 - Efeito da variação do expoente  $a$  da equação de Kostiakov-Lewis sobre a infiltração acumulada.



5% na infiltração acumulada e o incremento de 138% de  $a_1$  para  $a_3$  causou uma elevação de 24%.

Em relação a constante  $k$ , utilizaram-se também os valores obtidos na 1ª, 2ª e 3ª irrigação, mantendo-se constantes os valores de  $a$  e  $f_0$ . Observou-se que, variando  $k_1$  para  $k_2$  de 28%, este representa uma redução de apenas 4% na infiltração acumulada e, diminuindo-se o valor de  $k_2$  para  $k_3$  em 41%, o decréscimo gerado na infiltração acumulada foi de 4,5% (Figura 05).

Verificou-se também a influência direta de  $f_0$  (velocidade de infiltração básica) na infiltração acumulada. Mantendo-se desta vez  $a$  e  $K$ , constantes, utilizaram-se de três valores de  $f_0$ , sendo 0,000516 m<sup>3</sup>/min/m; 0,000179 m<sup>3</sup>/min/m e 0,000151 m<sup>3</sup>/min/m; os valores deste parâmetro para a 1ª, 2ª e 3ª irrigação respectivamente. Os valores de  $a$  e  $K$  utilizados foram os obtidos para a 1ª irrigação.

Assim, do 1º evento para o 2º, o decréscimo de  $f_0$  foi de 52% e do 2º para o 3º foi de 28%. O primeiro decréscimo gerou uma diminuição de 45% na infiltração e o segundo, uma redução de 20% (Figura 06).

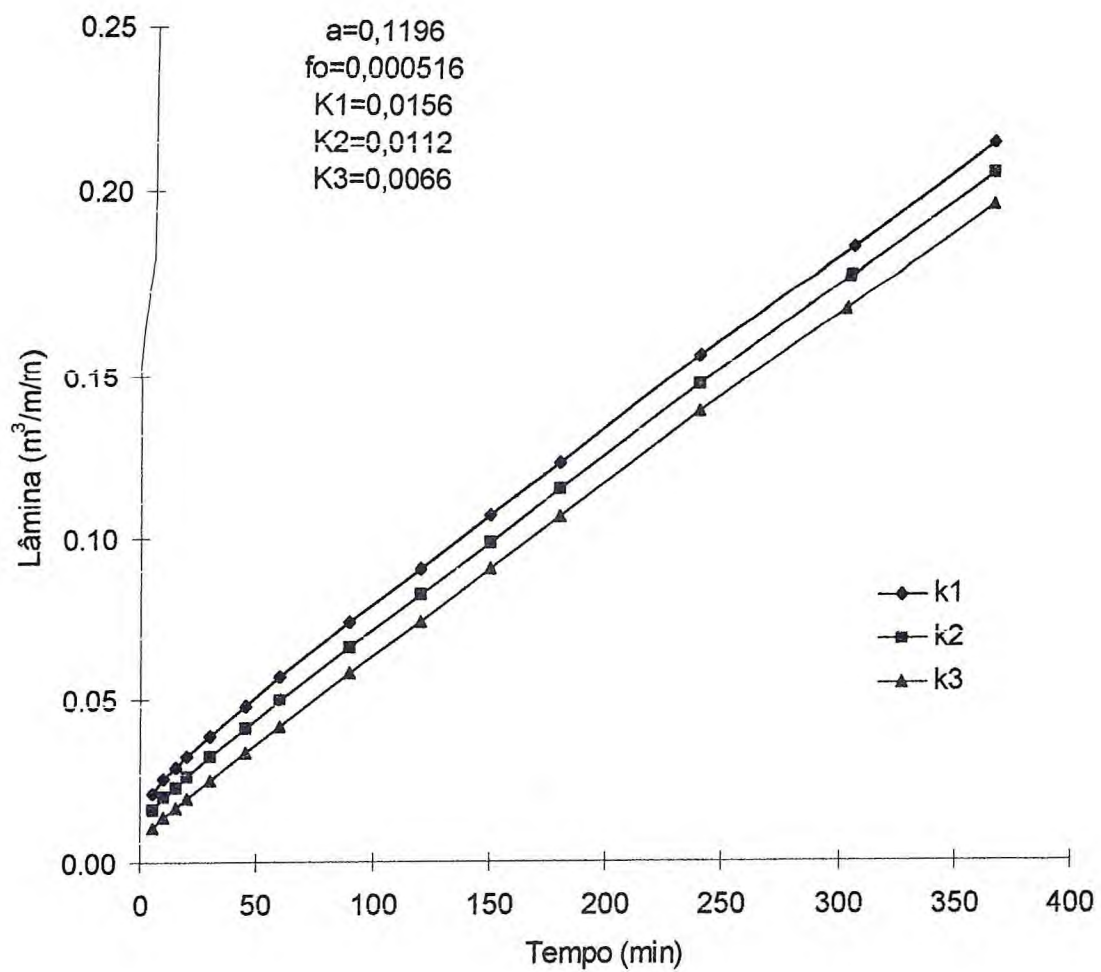


Figura 05 - Efeito da variação da constante  $K$  da equação de Kostiakov-Lewis sobre a infiltração acumulada.

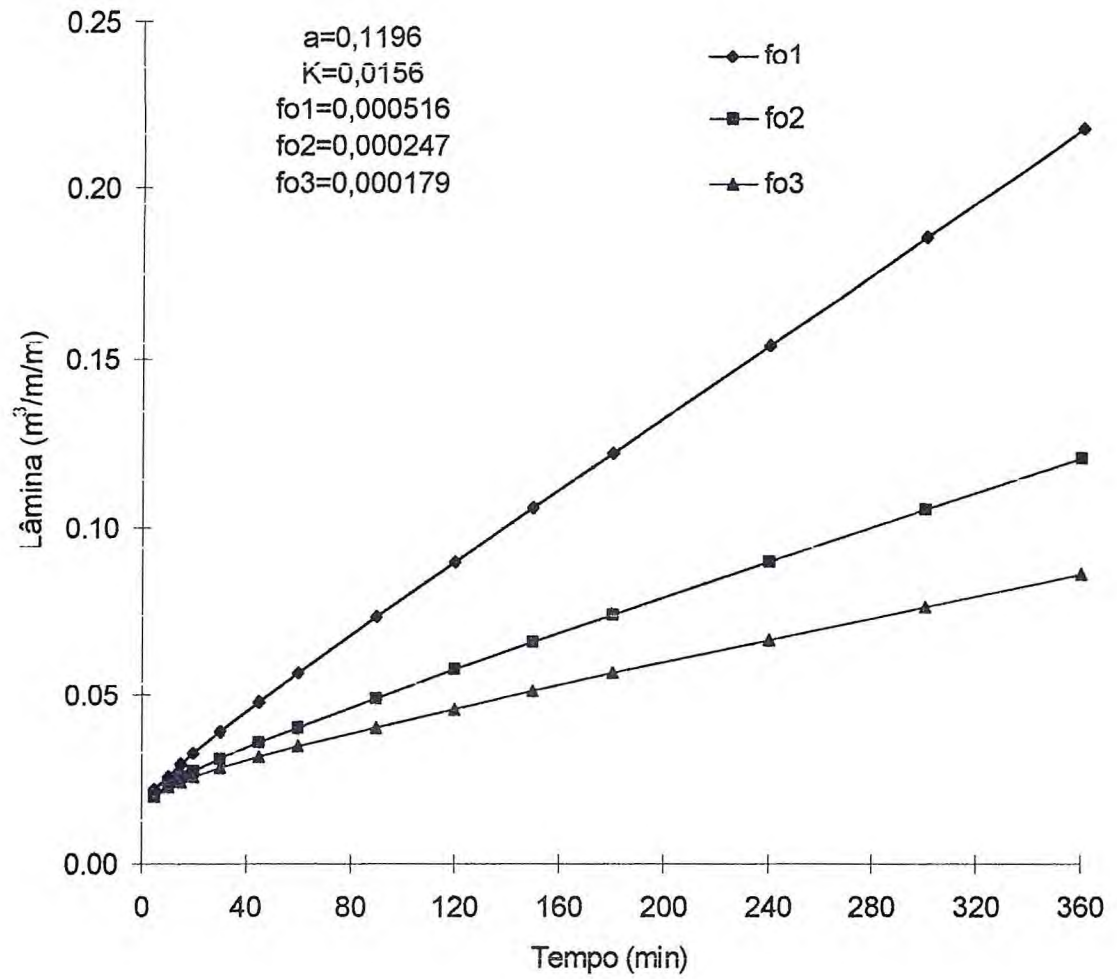


Figura 06 - Efeito da variação da constante  $f_0$  da equação de Kostiakov-Lewis sobre a infiltração acumulada.



Diferentemente do comportamento dos parâmetros **a** e **K** que, variações elevadas em seus valores originais geravam poucas variações na infiltração acumulada, alterações na velocidade de infiltração básica provocaram variações da mesma magnitude na infiltração acumulada.

#### 4.1.3. Comportamento da infiltração ao longo do ciclo.

A Tabela 05 e a Figura 07 apresentam a variação da Taxa de Infiltração (I) do solo, para as quatro irrigações, aplicadas ao longo do ciclo da cultura. Observa-se que a velocidade de infiltração foi reduzida da 1ª para a 2ª irrigação em torno de 53%, a partir de um tempo simulado de 60 minutos. Entre a 2ª, 3ª e 4ª irrigação nota-se que, para esse mesmo tempo simulado, uma pequena variação entre os valores de I, onde as diferenças são de 7% entre a 2ª e 3ª irrigação e de 3% entre a 3ª e 4ª, indicando uma estabilização a partir da 2ª irrigação. No entanto observa-se desde o tempo de 5 minutos até 90 minutos que os valores na 3ª e 4ª irrigação são superiores ao da 2ª irrigação. Isto deve ter ocorrido em virtude da cultivação realizada, que revolveu as camadas superiores do solo, deixando as mais inferiores intactas.

O mesmo comportamento pode ser observado em relação à infiltração acumulada (Z) - Tabela 06 e Figura 08. Por exemplo, após 3 horas de irrigação (Tempo Simulado) a lâmina infiltrada na 1ª irrigação foi de 121,9 mm, e nas 2ª e 4ª, as lâminas infiltradas foram 58,3 mm e 55,8 mm, respectivamente. Considere-se que, em virtude de variações na distribuição de água no Perímetro Irrigado, houve variações na vazão em todas as irrigações, o que pode ter influenciado nos

Tabela 05 - Velocidade de infiltração básica(l) em mm/min ao longo das quatro irrigações

| Tempo (min) | 1ª Irrigação | 2ª Irrigação | 3ª Irrigação | 4ª Irrigação |
|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 5           | 0,97         | 0,35         | 0,78         | 0,62         |
| 10          | 0,76         | 0,30         | 0,54         | 0,48         |
| 15          | 0,69         | 0,28         | 0,45         | 0,42         |
| 20          | 0,65         | 0,27         | 0,40         | 0,38         |
| 30          | 0,61         | 0,26         | 0,34         | 0,34         |
| 45          | 0,58         | 0,26         | 0,30         | 0,31         |
| 60          | 0,57         | 0,26         | 0,28         | 0,29         |
| 90          | 0,55         | 0,25         | 0,25         | 0,26         |
| 120         | 0,54         | 0,25         | 0,24         | 0,25         |
| 150         | 0,54         | 0,25         | 0,23         | 0,24         |
| 180         | 0,53         | 0,25         | 0,23         | 0,24         |
| 240         | 0,53         | 0,25         | 0,22         | 0,22         |
| 300         | 0,53         | 0,25         | 0,21         | 0,22         |
| 360         | 0,53         | 0,25         | 0,21         | 0,21         |

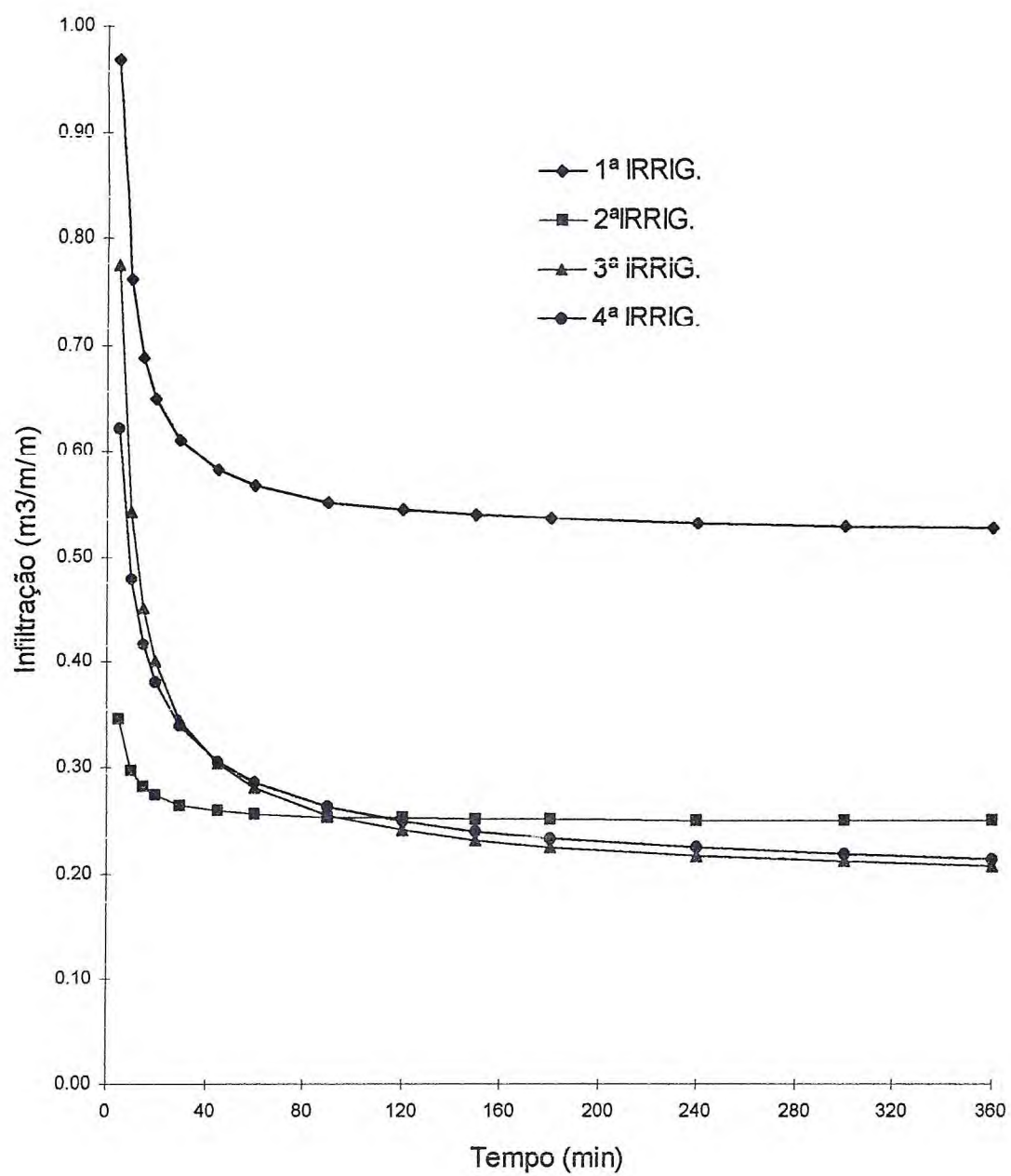


Figura 07 - Velocidade de infiltração em  $mm/min$  ao longo das quatro irrigações



Tabela 06 - Infiltração acumulada em mm ao longo das quatro irrigações.

| Tempo (min) | 1ª Irrigação | 2ª Irrigação | 3ª Irrigação | 4ª Irrigação |
|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 5           | 21,50        | 13,19        | 11,30        | 5,80         |
| 10          | 25,70        | 14,77        | 14,50        | 8,50         |
| 15          | 29,30        | 16,21        | 17,00        | 10,70        |
| 20          | 32,60        | 17,59        | 19,10        | 12,70        |
| 30          | 38,90        | 20,28        | 22,80        | 16,30        |
| 45          | 47,80        | 24,20        | 27,60        | 21,10        |
| 60          | 56,40        | 28,06        | 32,00        | 25,50        |
| 90          | 73,20        | 35,69        | 40,00        | 33,70        |
| 120         | 89,60        | 43,26        | 47,40        | 41,40        |
| 150         | 105,80       | 50,79        | 54,40        | 48,70        |
| 180         | 121,90       | 58,31        | 61,30        | 55,80        |
| 240         | 153,90       | 73,29        | 74,50        | 69,50        |
| 300         | 185,70       | 88,24        | 87,30        | 82,80        |
| 360         | 217,30       | 103,17       | 99,90        | 95,70        |

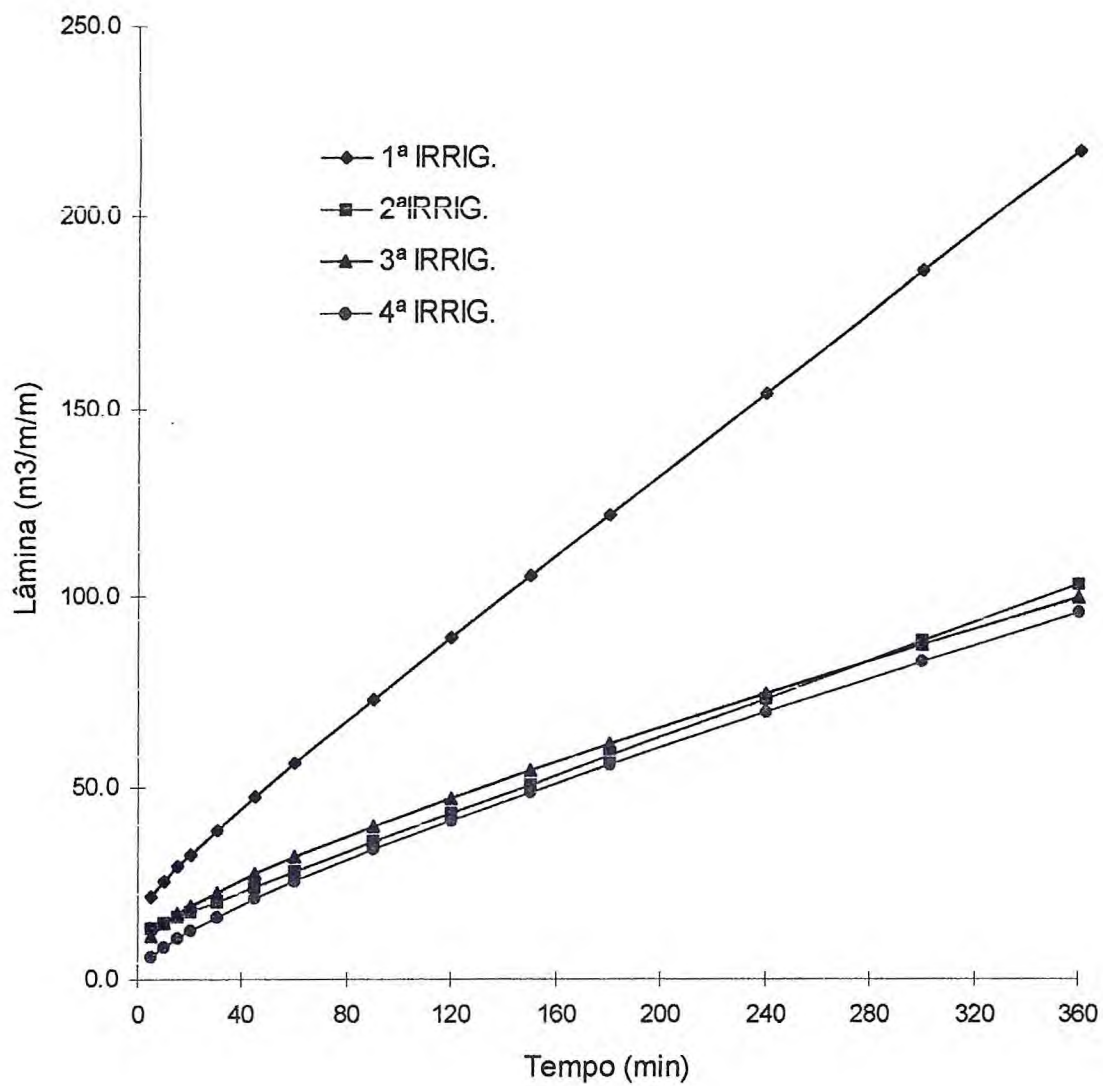


Figura 08 - Infiltração acumulada em milímetros ao longo das quatro irrigações

resultados. No entanto os valores de I para a 2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup> irrigações podem ser considerados próximo, se comparados a 1<sup>a</sup> irrigação.

Trabalhando com sulcos de precisão, FANGMEIR e RAMSEY (1978) **apud** ANDRADE (1994), concluíram que a largura da base e o perímetro molhado podem ser usados para caracterizar a vazão de entrada em sulcos. Mostraram que a taxa de infiltração foi correlacionada linearmente com o perímetro molhado.

Este mesmo autor diz que a infiltração é um processo complexo, dependente de inúmeras variáveis, relacionadas às características físicas e morfológicas do solo. Apresenta uma dependência da umidade inicial no perfil e da condição da superfície, que por sua vez é afetada pela geometria da seção de escoamento e pelo fluxo superficial, que determinam a condição física e a grandeza da área de infiltração. STRELKOFF e SOUZA (1984) sugerem que a lâmina da água em sulcos possui primordial influência na infiltração.

Neste sentido, elaborou-se a Tabela 07, onde relacionou-se linearmente o volume aplicado [ $Q_0$  (m<sup>3</sup>/min) x  $t_{co}$  (min)] com as lâminas infiltradas em metros. Como pode-se observar o coeficiente de determinação foi 0,99, demonstrando que além da vazão aplicada, o tempo de irrigação tem função importante na infiltração da água no solo.

A infiltração, segundo WALKER (1989), é um processo complexo que depende das propriedades físicas e hidráulicas do solo, do seu conteúdo de umidade inicial e da estrutura de variação das camadas e ar retido nestas.



Tabela 07 - Análise de regressão linear da lâmina infiltrada em função do volume aplicado.

| Irrigação | Volume<br>aplicado<br>(m <sup>3</sup> ) | Lâmina<br>infiltrada<br>(m) | R <sup>2</sup> |
|-----------|---|-----------------------------|----------------|
| 1         | 9,4                                     | 0,2173                      |                |
| 2         | 5,6                                     | 0,1032                      |                |
| 3         | 5,3                                     | 0,0999                      |                |
| 4         | 5,1                                     | 0,0957                      | 0,99           |

## 4.2. Resultados de avanço e recessão

Na Tabela 08 pode-se observar que, na 1ª irrigação, o tempo de avanço ocorreu aos 92 minutos. Já para a 2ª irrigação este tempo foi de 68 minutos, sofrendo uma redução de 26% entre as duas irrigações. Na 3ª irrigação, o avanço completou-se aos 56 minutos e na 4ª, aos 44 minutos. Da 2ª para a 3ª irrigação houve uma redução de 18% e, da 3ª para a 4ª, um decréscimo de 21%.

Na Figura 09, apresenta-se de forma mais objetiva o comportamento das curvas de avanço ao longo das irrigações. Nestas, plotaram-se os valores de distância em função do tempo. Nota-se que o tempo de avanço reduz-se com o número de irrigações

Na Tabela 09 fez-se uma análise de regressão linear entre o tempo de avanço em função da vazão. Neste caso, utilizou-se dos dados obtidos nos três sulcos, para a 1ª irrigação, já que uma análise, levando-se em conta as quatro irrigações realizadas no mesmo sulco não resultaria satisfatória porque o tempo de avanço é variável em função do número de irrigações. Deste modo, o coeficiente de determinação de 0,98 sugere que o tempo de avanço pode ser influenciado pela vazão aplicada.

O tempo de avanço, segundo FRIZZONE (1993), é uma função da vazão que escoar e do comprimento da parcela e que, o comportamento do processo de avanço deve-se à redução da vazão com a distância. As práticas culturais e a própria irrigação, modificam a rugosidade da superfície de escoamento, a razão de infiltração, na forma da seção de escoamento e conseqüentemente, as características do avanço da água. Outros fatores que afetam a taxa de avanço são a declividade da parcela e a umidade do solo.

Tabela 08 - Tempo de avanço e recessão para as quatro irrigações.

| Distância<br>(m) | 1ª Irrigação    |                   | 2ª Irrigação    |                   | 3ª Irrigação    |                   | 4ª Irrigação    |                   |
|------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|
|                  | Avanço<br>(min) | Recessão<br>(min) | Avanço<br>(min) | Recessão<br>(min) | Avanço<br>(min) | Recessão<br>(min) | Avanço<br>(min) | Recessão<br>(min) |
| 0                | 0               | 128               | 0               | 123               | 0               | 93                | 0               | 101               |
| 10               | 3               | 131               | 3               | 126               | 3               | 95                | 2               | 107               |
| 20               | 6               | 132               | 7               | 127               | 5               | 96                | 4               | 111               |
| 30               | 11              | 133               | 12              | 128               | 8               | 97                | 6               | 112               |
| 40               | 17              | 134               | 17              | 129               | 13              | 100               | 9               | 113               |
| 50               | 25              | 136               | 23              | 132               | 17              | 100               | 13              | 115               |
| 60               | 32              | 139               | 29              | 133               | 22              | 104               | 15              | 119               |
| 70               | 41              | 145               | 35              | 136               | 28              | 110               | 20              | 123               |
| 80               | 51              | 151               | 40              | 146               | 32              | 111               | 23              | 124               |
| 90               | 64              | 152               | 48              | 146               | 41              | 113               | 30              | 125               |
| 100              | 77              | 157               | 58              | 146               | 49              | 117               | 37              | 126               |
| 110              | 92              | 162               | 68              | 146               | 56              | 121               | 44              | 127               |

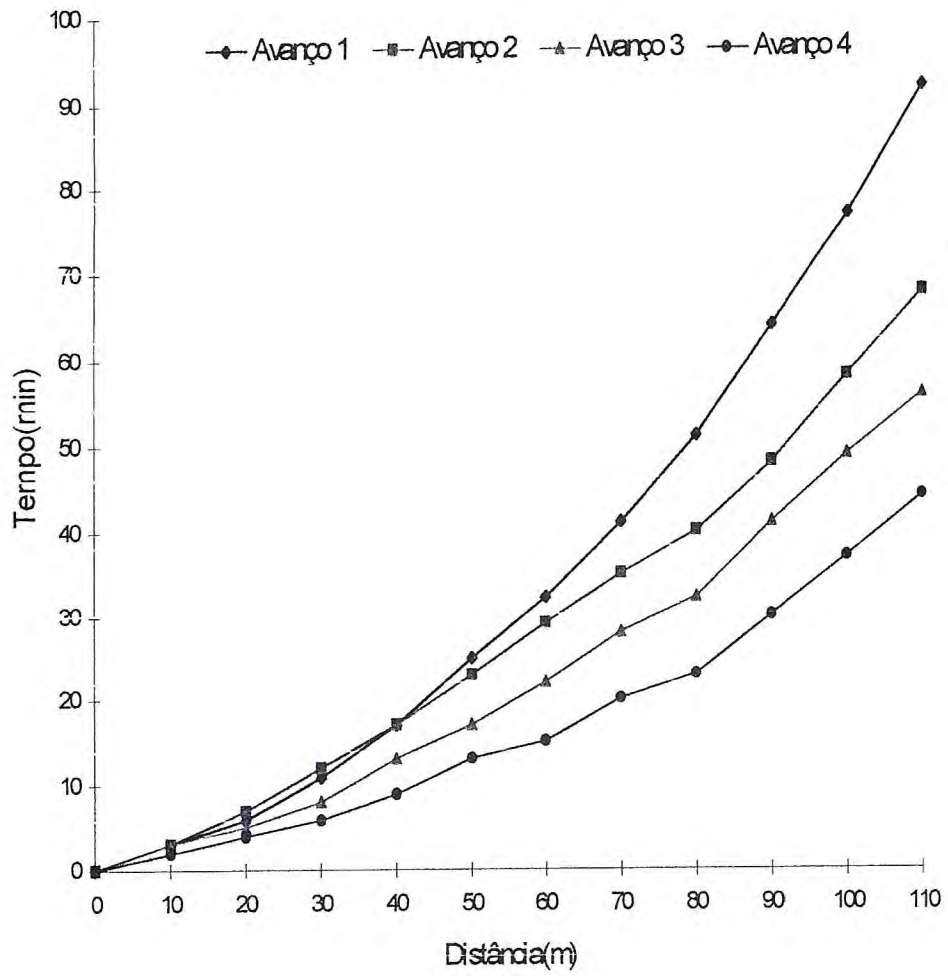


Figura 09 - Curvas de avanço.



Tabela 09 - Relação entre vazão média aplicada e tempo de avanço para a 1ª irrigação.

| Sulco | Vazão<br>(m <sup>3</sup> /min) | Tempo de avanço<br>(min) |
|-------|--------------------------------|--------------------------|
| 1     | 0,0378                         | 134                      |
| 2     | 0,0738                         | 92                       |
| 3     | 0,0505                         | 124                      |

Ajuste matemático:

$$f(x) = M + Bx$$

$$R = 0,992162$$

$$R^2 = 0,984385$$

onde:

$$M = 181,0848$$

$$B = -1192,1927$$

Em sulcos abertos a turbulência da água causa o colapso dos agregados do solo e mantém em suspensão as partículas que podem sedimentar, formando uma camada na superfície do sulco de baixa condutividade hidráulica, comumente denominada de selamento superficial (SEREGEM e TROUT, 1991).

Também WALKER (1989), cita que é importante manter o fluxo de entrada durante um teste aproximadamente constante, pois variações significativas afetam o movimento da água durante a fase de avanço.

#### **4.3. Análise do perfil de infiltração e dos parâmetros de avaliação da irrigação.**

Na discussão deste tópico, utilizam-se das Figuras 10, 11, 12 e 13, onde constam as curvas de avanço, recessão e perfil de infiltração.

Na análise, levou-se em consideração as curvas de recessão, por considerar-se que esta influencia na lâmina infiltrada, apesar de WALKER (1989) sugerir que, para declividades superiores a 0,25%, a curva de recessão seja uma reta, coincidente com o tempo de corte. Já BERNARDO (1989), sugere que somente sulcos com declividades superiores a 0,5% é que deve-se levar em consideração o seu efeito. AUGUSTO (1984) e RIVERA (1995) trabalhando com sulcos de declividades semelhantes, observaram que a fase de recessão deve ser considerada, pois a água leva um tempo considerável para desaparecer do sulco.

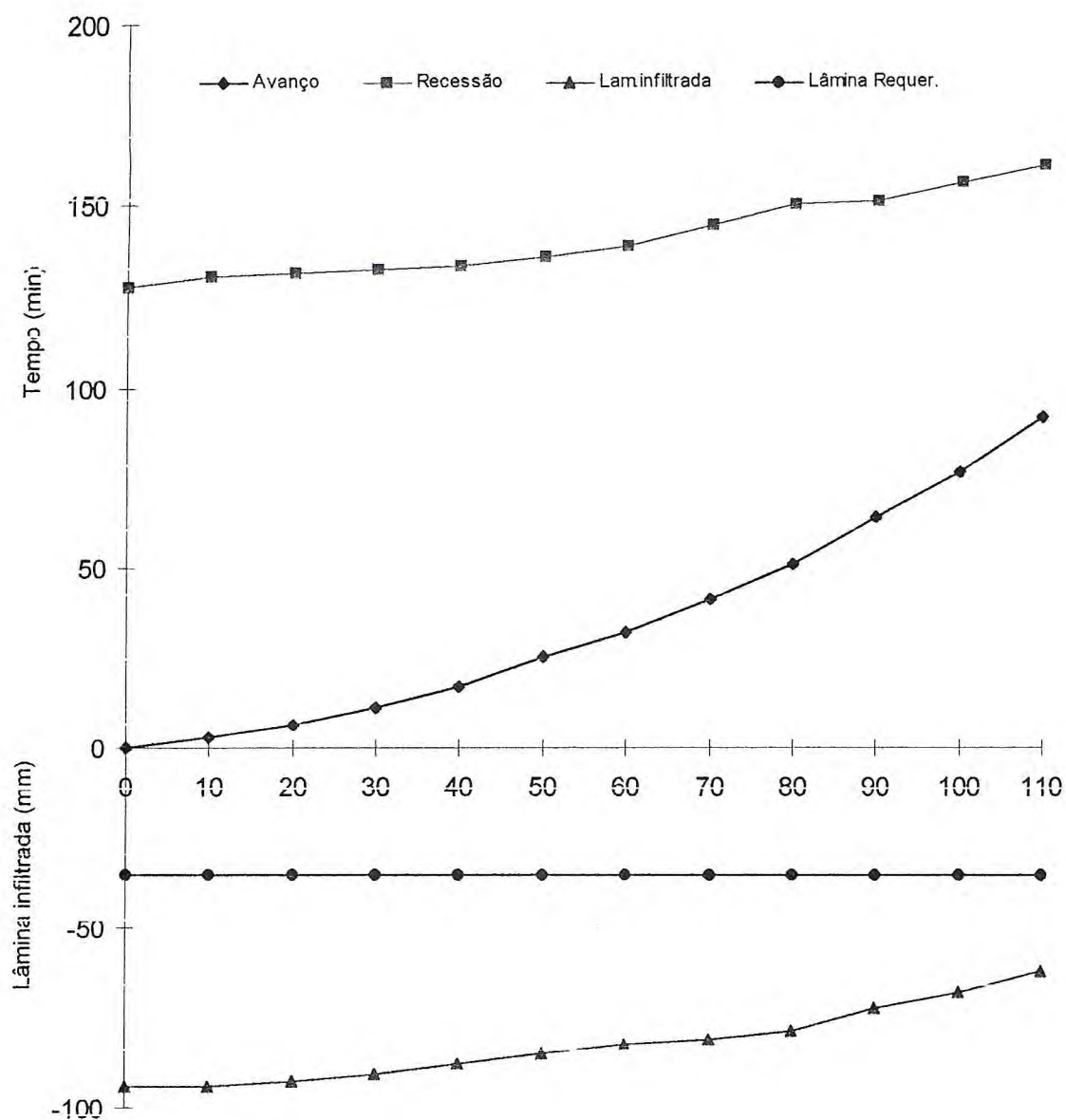


Figura 10 - Curva de avanço, recessão e perfil de infiltração para a 1ª irrigação. ( $Q_0 = 0,0738 \text{ m}^3/\text{min}$ ;  $t_{co} = 128 \text{ min}$ ;  $L = 110 \text{ m}$ ;  $S_o = 0,3\%$ ;  $E_{sp} = 1,0 \text{ m}$ ;  $t_L = 92 \text{ min}$ ;  $n = 0,04$ ;  $E_a = 40,76\%$ ;  $I_{ro} = 3,36\%$ ;  $I_p = 55,88\%$ ;  $E_s = 100\%$  e  $CUC = 87,57\%$ )

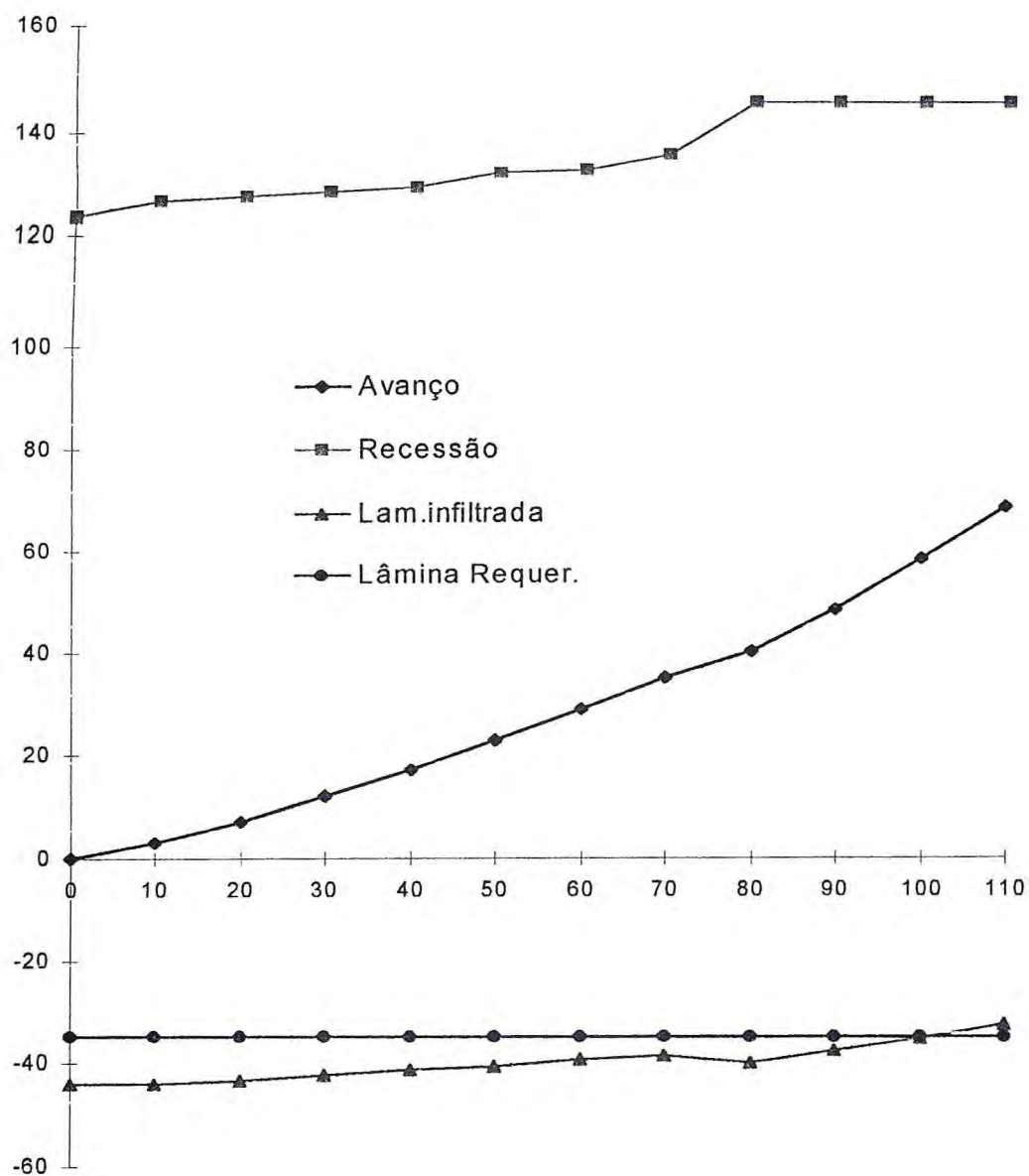


Figura 11 - Curva de avanço, recessão e perfil de infiltração para a 2ª irrigação.

( $Q_0 = 0,0449 \text{ m}^3/\text{min}$ ;  $t_{co} = 124 \text{ min}$ ;  $L = 110 \text{ m}$ ;  $S_o = 0,3\%$ ;  $E_{sp} = 1,0 \text{ m}$ ;  
 $t_L = 68 \text{ min}$ ;  $n = 0,04$ ;  $E_a = 68,95\%$ ;  $I_{ro} = 22,48\%$ ;  $I_p = 8,57\%$ ;  
 $E_s = 99,71\%$  e  $CUC = 91,91\%$ )



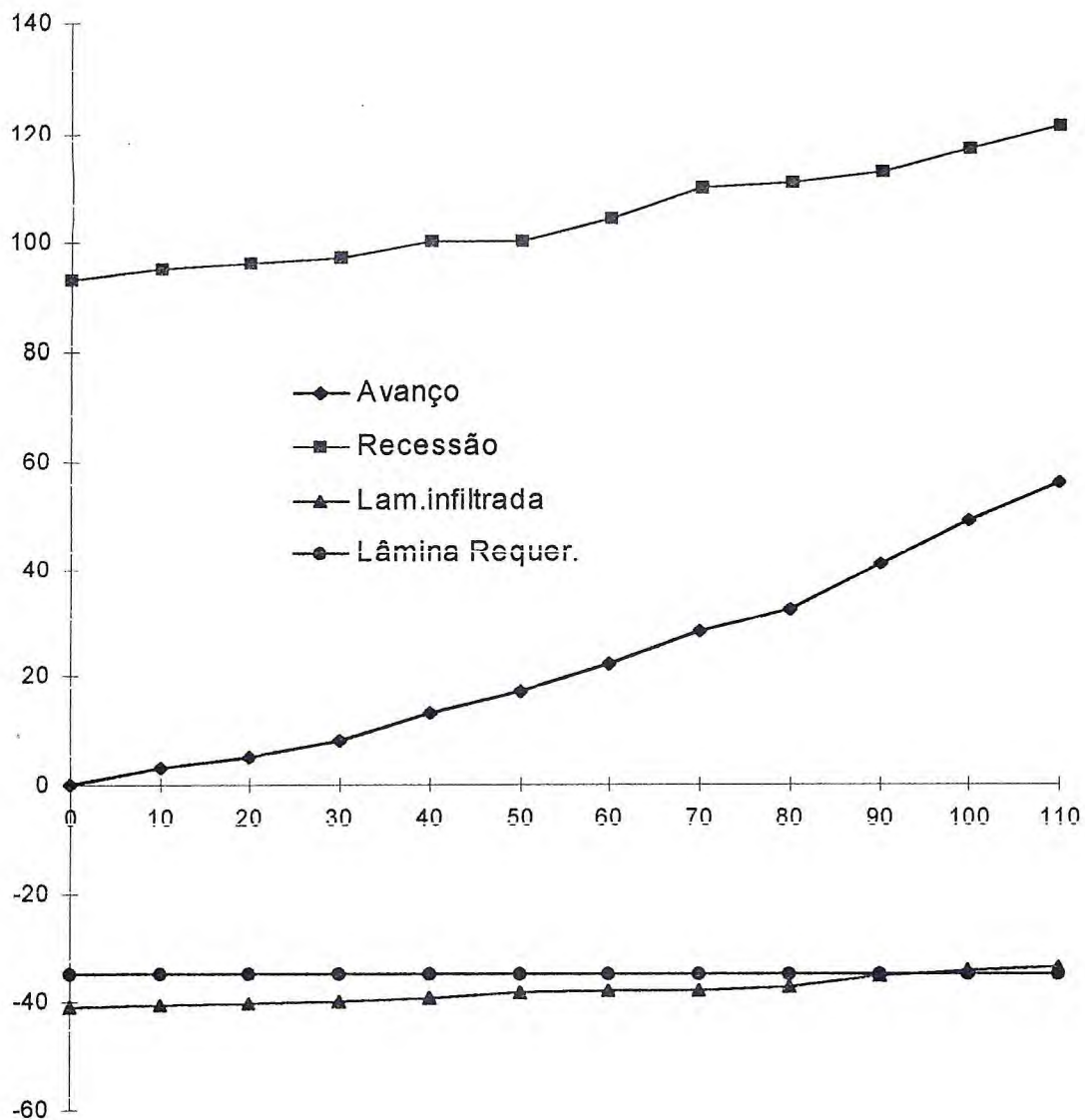


Figura 12 - Curva de avanço, recessão e perfil de infiltração para a 3ª irrigação.

( $Q_0 = 0,0565 \text{ m}^3/\text{min}$ ;  $t_{co} = 93 \text{ min}$ ;  $L = 110 \text{ m}$ ;  $S_o = 0,3\%$ ;  $E_{sp} = 1,0 \text{ m}$ ;

$t_L = 56 \text{ min}$ ;  $n = 0,04$ ;  $E_a = 73,01\%$ ;  $I_{ro} = 25,74\%$ ;  $I_p = 1,25\%$ ;

$E_s = 99,64\%$  e  $CUC = 94,09\%$ )

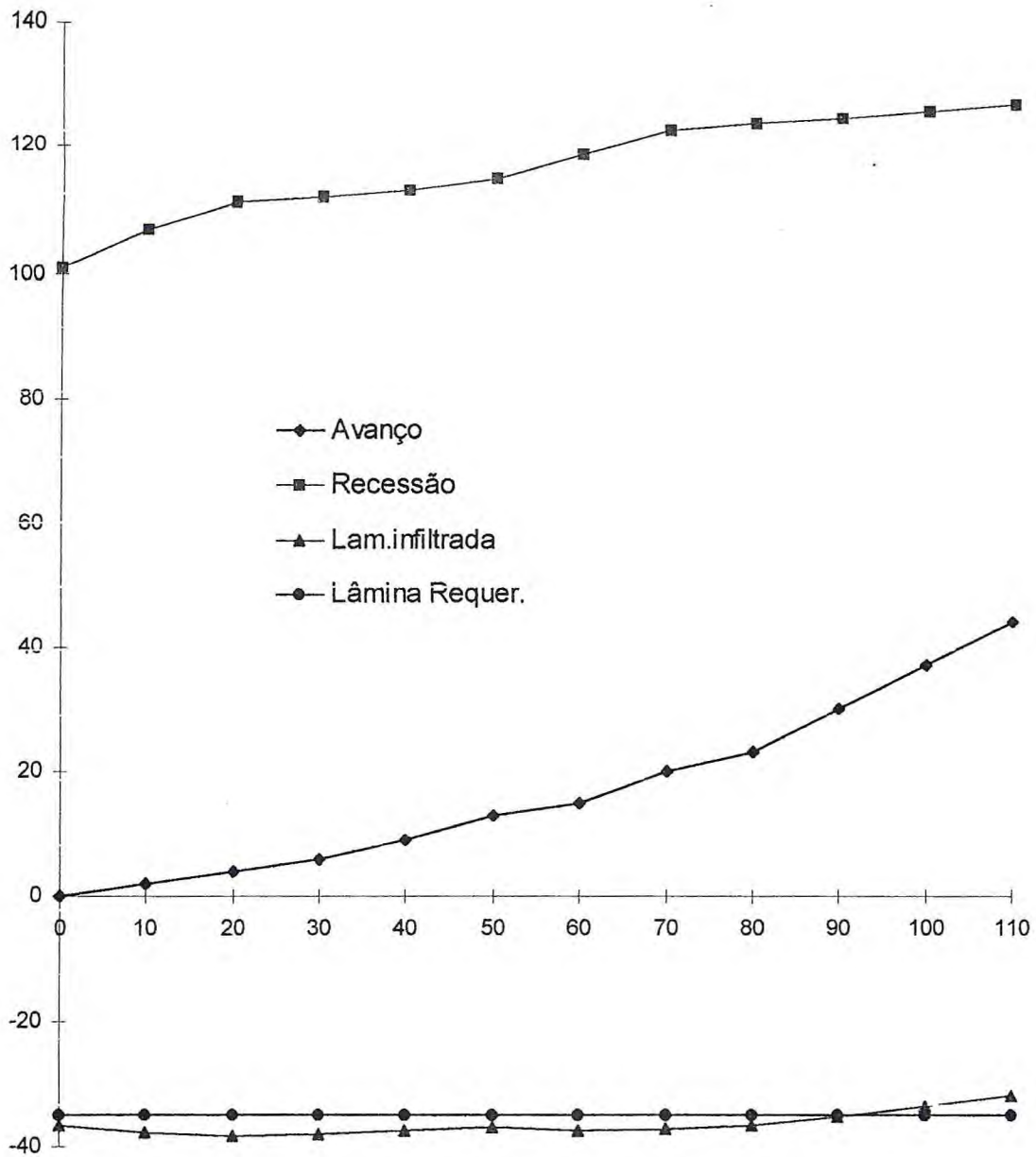


Figura 13 - Curva de avanço, recessão e perfil de infiltração para a 4ª irrigação.

( $Q_0 = 0,0503 \text{ m}^3/\text{min}$ ;  $t_{co} = 102 \text{ min}$ ;  $L = 110 \text{ m}$ ;  $S_o = 0,3\%$ ;  $E_{sp} = 1,0 \text{ m}$ ;

$t_L = 44 \text{ min}$ ;  $n = 0,04$ ;  $E_a = 74,46\%$ ;  $I_{ro} = 25,15\%$ ;  $I_p = 0,38\%$ ;

$E_s = 99,23\%$  e  $CUC = 92,39\%$ )

Nas quatro irrigações, foram utilizadas as seguintes equações para o cálculo das lâminas infiltradas:

$$1^{\text{a}} \text{ irrigação: } Z = 0,0156 t_0^{0,1196} + 0,000516 t_0$$

$$2^{\text{a}} \text{ irrigação: } Z = 0,0112 t_0^{0,0410} + 0,000247 t_0$$

$$3^{\text{a}} \text{ irrigação: } Z = 0,0066 t_0^{0,2855} + 0,000179 t_0$$

$$4^{\text{a}} \text{ irrigação: } Z = 0,0024 t_0^{0,4529} + 0,000170 t_0$$

Na Tabela 10 apresenta-se o comportamento dos parâmetros de avaliação ao longo das quatro irrigações: eficiência de aplicação ( $E_a$ ), índice de percolação profunda ( $I_p$ ), índice de runoff ( $I_{ro}$ ), eficiência de armazenamento ( $E_s$ ) e coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC).

Na 1ª irrigação houve uma condição de excesso de água onde as lâminas infiltradas superaram, ao longo de todo o sulco, a lâmina requerida, que era de 35 mm. Por exemplo, na estação "0" (início do sulco), a lâmina infiltrada atingiu 94 mm e na última estação (11), 62 mm. A eficiência de aplicação para esta irrigação foi de aproximadamente 41%, o índice de runoff foi de 3,4% e o índice de percolação em torno de 56%. Como as lâminas infiltradas, neste caso, superaram a lâmina requerida ao longo de todo o campo, a eficiência de armazenamento foi de 100% e o coeficiente de uniformidade de Christiansen foi de 87,6%.

Nesta irrigação houve uma baixa eficiência de aplicação causada principalmente pela grande percolação observada. Esta alta capacidade de

Tabela 10 - Comportamento dos parâmetros de avaliação ao longo das quatro irrigações.

| Irrigação | Parâmetros de avaliação |         |        |        |         |
|-----------|-------------------------|---------|--------|--------|---------|
|           | Ea (%)                  | Iro (%) | Ip (%) | Es (%) | CUC (%) |
| 1         | 40,76                   | 3,36    | 55,88  | 100,0  | 87,57   |
| 2         | 68,95                   | 22,48   | 8,57   | 99,71  | 91,91   |
| 3         | 73,01                   | 25,74   | 1,25   | 99,64  | 94,09   |
| 4         | 74,46                   | 25,15   | 0,38   | 99,23  | 92,39   |

Ea: Eficiência de aplicação em percentagem

Iro: Índice de escoamento superficial em percentagem

Ip: Índice de percolação profunda em percentagem

Es: Eficiência de armazenamento em percentagem

CUC: Coeficiente de uniformidade de Christiansen em percentagem



infiltração na 1ª irrigação era de se esperar, uma vez que o solo inicialmente seco apresenta alta capacidade de infiltração.

A partir da 2ª irrigação, conforme pode observar-se nas Figura 11,12 e 13, que houve uma substancial redução nas lâminas infiltradas, ocorrendo, uma condição de irrigação com deficit, a partir de 90 m do início do sulco, na 3ª e 4ª irrigação e 100 metros na 2ª irrigação.

Comparando-se a 1ª irrigação com a 2ª, houve um aumento na eficiência de aplicação de 69% e o índice de runoff subiu em 569%, enquanto o índice de percolação entre uma irrigação e outra, reduziu-se em 84%.

Como observa-se ao longo desta discussão, a eficiência de aplicação ( $E_a$ ) tem seu valor aumentado ao longo das irrigações, com a mesma tendência para o índice de runoff ( $I_{ro}$ ). Já o índice de percolação ( $I_p$ ) apresenta uma redução ao longo destes eventos, enquanto a eficiência de armazenamento apresenta-se com valores aproximadamente estáveis e o valor do CUC elevou-se durante as irrigações.

Na Figura 14 observa-se uma relação inversa entre  $I_{ro}$  e  $I_p$ , o mesmo ocorrendo entre  $E_a$  e  $I_p$ , com base nos quatro eventos estudados.

Um dos fatores que justifica o aumento de  $I_{ro}$  e a conseqüente redução do índice de percolação é a diminuição da capacidade de infiltração do solo ao longo das irrigações. Como ficou demonstrado no ítem 4.2, os tempos de avanço vão se reduzindo ao longo das irrigações (Figuras 09) em face do selamento superficial que ocorre durante o processo de irrigação, conforme definiu SEREGEM e TROUT (1991), facilitando o deslocamento da água sobre a superfície do solo e diminuindo conseqüentemente a infiltração deste.

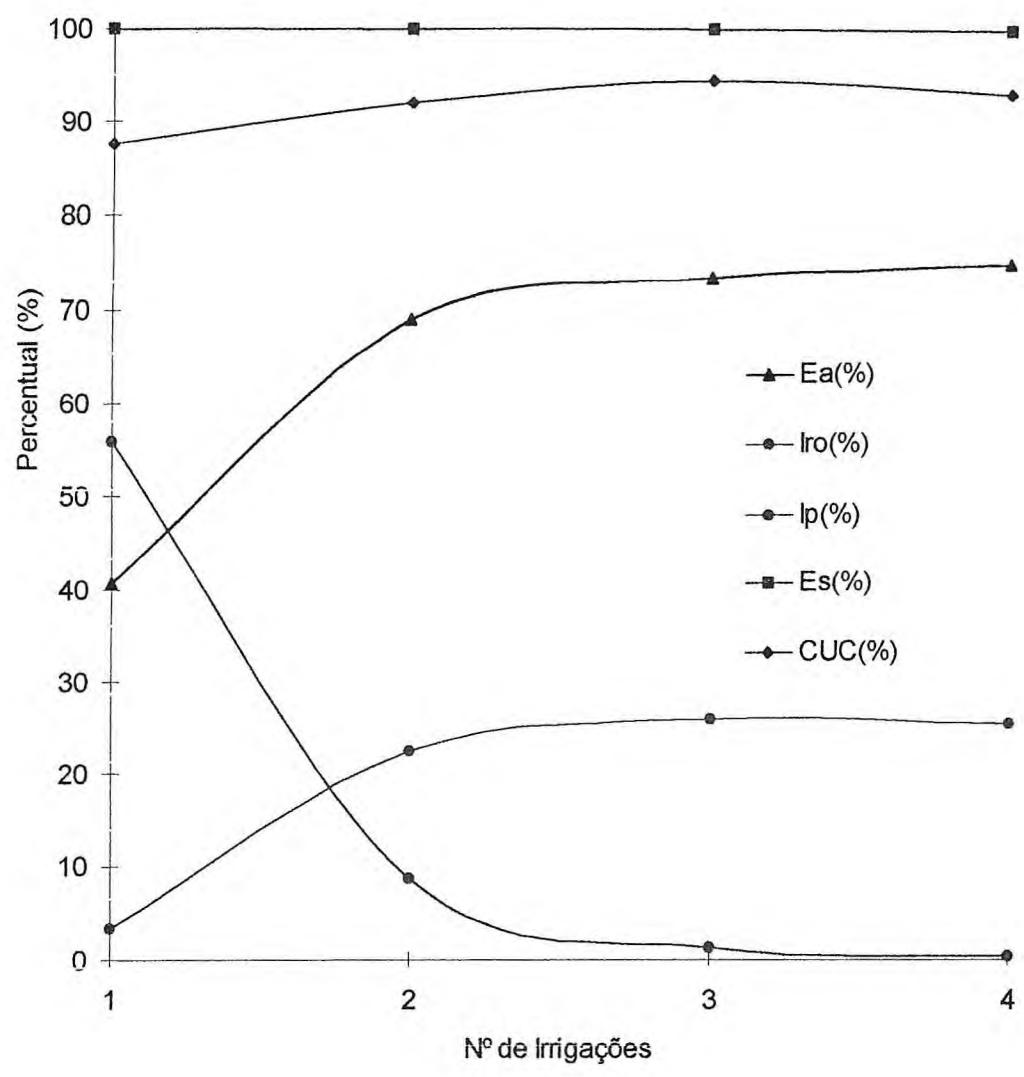


Figura 14 - Análise da performance da irrigação para as quatro irrigações.

Com isso, após a água ter atingido o final do sulco, deve-se deixar o sistema funcionando para que ocorra no final do campo o tempo de oportunidade necessário para que infiltre a lâmina requerida. Desta forma, o escoamento superficial vai aumentando já que também ocorre simultaneamente, uma redução na taxa de infiltração, conforme explicado anteriormente.

Os resultados do presente trabalho, no que tange a eficiência de aplicação, estão em contraste com os obtidos por LIMA FILHO (1996), o qual sugere que a eficiência de aplicação “apresenta uma tendência de diminuir no decorrer das irrigações”. Por outro lado, este mesmo autor cita nos seus trabalhos que o índice de escoamento superficial aumenta em função das irrigações, ao passo que a percolação da água diminui.

FRIZZONE (1993), observa que as perdas por percolação profunda e escoamento no final da parcela são complementares à eficiência de aplicação, isto é, eficiência de aplicação + perdas = 100%. CUENCA (1989) afirma que um aumento na uniformidade de aplicação causa um decréscimo nas perdas por percolação, fato observado no presente estudo.

ZERIHUN (1997) cita que a  $E_a$  varia linearmente em função de  $E_s$ , no entanto as relações entre  $E_a$  e CUC não são de grande valia para avaliar a performance da irrigação.

#### **4.4 Simulação da performance utilizando redução de vazão**

No perímetro irrigado de Morada Nova, não há assistência técnica que oriente aos irrigantes a forma de melhor conduzir a sua área. Observou-se durante a fase de campo deste estudo que os agricultores não têm conhecimento das



diversas tecnologias já existentes, que poderiam melhorar a performance da irrigação e conseqüentemente seus lucros.

Por exemplo, há irrigantes que costumam realizar o corte da água assim que a fase de avanço se completa e outros que deixam o sistema ligado, com a água se perdendo por escoamento superficial. No primeiro caso, nem sempre o deficit de umidade do solo é suprido. Já para o segundo há uma redução na eficiência de aplicação.

Com base nos resultados obtidos no presente estudo, observou-se que o índice de perda por escoamento no final da parcela aumenta durante a estação de cultivo. Neste sentido, para melhorar a performance do sistema utilizado em Morada Nova, sugere-se a utilização da metodologia da redução de vazão, como forma de diminuir as perdas por runoff.

Desta forma, utilizando o programa SIDIS, elaborou-se a Tabela 11, onde se apresentam os resultados da simulação utilizando a redução de vazão para a área do experimento. Nota-se que para a 1<sup>a</sup> irrigação houve um ganho de eficiência considerável, já que no sistema de sulco convencionais, na 1<sup>a</sup> irrigação obteve-se uma eficiência de 40,8% e para a simulação utilizada a eficiência de aplicação para esta irrigação alcança 78,64%. Para a 3<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup> irrigação, as eficiências alcançadas foram de 73,01% e 74,46% respectivamente e na simulação a eficiência para as irrigações subseqüentes foi de 78,42%.

Como neste caso as eficiências obtidas foram elevadas, não se recomenda a utilização da redução de vazão para a 3<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup> irrigação, já que o aumento da mão-de-obra possivelmente não compensaria os 4% de ganhos na eficiência.



Tabela 11- Resultados da simulação utilizando a redução de vazão.

| Dados do dimensionamento                       | Primeiras Irrigações | Irrigações Subsequentes |
|--|----------------------|-------------------------|
| Tempo de avanço (min)                          | 36,33                | 56,97                   |
| Tempo de oportunidade (min)                    | 36,33                | 56,98                   |
| Vazão máxima não erosiva (m <sup>3</sup> /min) | 0,23                 | 0,23                    |
| Vazão por sulco (m <sup>3</sup> /min)          | 0,10                 | 0,06                    |
| Vazão reduzida por sulco (m <sup>3</sup> /min) | 0,03                 | 0,02                    |
| Eficiência de aplicação (%)                    | 78,64                | 78,42                   |

Este dado está de acordo com a recomendação de WALKER e SKOGERBOE (1987) onde estes sugerem que nem sempre a prática da redução de vazão é recomendada. As eficiências de aplicação em irrigação por superfície são diretamente proporcionais a lâmina aplicada. Para maximizar a eficiência quando se requer pequena lâmina se aplica grandes vazões por curtos períodos de tempo. Para grandes aplicações a eficiência se otimiza reduzindo a vazão e aumentando o tempo de corte.

Há outro aspecto na hidráulica da irrigação por superfície que não é muito evidente. O movimento da água sobre a superfície do solo é muito sensível a magnitude da vazão de entrada e conseqüentemente acumulação da água no perfil do solo. O resultado desta relação é que as práticas de irrigação que modificam o fluxo no terreno, tal como fluxo reduzido, pode diminuir, em alguns casos, a performance do sistema.

#### **4.5. Comparação entre a metodologia racional de WALKER e a empírica de CRIDDLE *et al.* (1956).**

Observando que os sistemas de irrigação eram mal adaptados às condições de solo e topografia CRIDDLE *et al.* (1956) estabeleceram critérios e procedimentos para a avaliação de sistemas irrigados por superfície.

Segundo SOUZA (1994), o trabalho de CRIDDLE *et al.* (1956) foi de uma importância fundamental para a irrigação por superfície por haver estabelecido certas relações empíricas e utilizadas até hoje no dimensionamento e no manejo destes sistemas.

Uma das relações estabelecidas por CRIDDLE *et al.* (1956) era que para uma irrigação uniforme de um campo, a frente de avanço da água no sulco deve atingir o final do sulco em um quarto do tempo necessário para repor a lâmina líquida necessária no perfil do solo. Neste caso, se a taxa de infiltração variar inversamente com a raiz quadrada do tempo, a perda por percolação será em média de 5%, assim o expoente  $a$  da equação de infiltração de Kostiaikov deverá ser aproximadamente igual a 0,5.

Sendo assim, fez-se uma análise comparativa da irrigação de nº 4, cujo valor de  $a$  mais se aproxima do estabelecido por CRIDDEL *et al.* (1956).

Com base na Tabela 12 observa-se que o tempo de avanço para esta irrigação foi de 44 minutos, enquanto o tempo de corte foi de 102 minutos; neste caso, a relação  $tav / tco$  é de 1/2,3. Observa-se que a relação  $tav / tco$ , apresentam valores bastante distantes do sugerido por CRIDDEL *et al.* (1956); no entanto, as lâminas infiltradas satisfizeram a lâmina requerida em 82% da área (90 m), e no restante, as lâminas infiltradas distanciaram-se em apenas 3 mm da lâmina requerida (Figura 13).

No caso de adotasse a metodologia sugerida por CRIDDEL (1956), tendo por base o tempo de avanço observado na irrigação, o tempo de corte seria de 176 minutos (Tabela 13), aumentando os tempos de corte em aproximadamente 72%, acarretando por conseguinte uma redução na  $Ea$ , que de 75% passaria à 49% (Tabela 14).

Tabela 12 - Relação entre tempo de avanço (tav) e tempo de corte (tco) obtido para a irrigação 4.

| Parâmetro                       | Irrigação 4 |
|---------------------------------|-------------|
| Expoente $a$                    | 0,46        |
| Tempo de avanço (min)           | 44          |
| Tempo de corte (min)            | 102         |
| Eficiência de aplicação (%)     | 74,5        |
| Índice de percolação (%)        | 3,9         |
| Índice de runoff (%)            | 21,6        |
| Eficiência de armazenamento (%) | 99,2        |
| CUC (%)                         | 92,4        |
| Relação (tav/tco)               | 1/2,3       |



Tabela 13 - Tempos de avanço e de corte observados e calculados para atender a metodologia de CRIDDEL (1956).

| tav observado | tco calculado | tco observado | tav calculado |
|---------------|---------------|---------------|---------------|
| (min)         | (min)         | (min)         | (min)         |
| 44            | 176           | 102           | 26            |

Tabela 14 - Eficiências calculadas usando a metodologia de CRIDDEL *et alli* (1956).

| Qo                    | L   | Zreq  | tco   | Ea calculado | Ea  |
|-----------------------|-----|-------|-------|--------------|-----|
| (m <sup>3</sup> /min) | (m) | (m)   | (min) | (%)          | (%) |
| 0,0448                | 110 | 0,035 | 176   | 49           | 75  |

## 5 - CONCLUSÕES

5.1 O valor do parâmetro **a** da equação de Kostiakov-Lewis cresceu ao longo das irrigações, com exceção do encontrado na 2ª irrigação. Assim estes foram: 0,1196; 0,0410; 0,2855 e 0,4529 para a 1ª, 2ª, 3ª e 4ª irrigação respectivamente. Os valores correspondentes ao **K**, para essas mesmas irrigações foram: 0,0156; 0,0112; 0,0066 e 0,0024, demonstrando que o valor deste parâmetro decresce ao longo de uma estação de cultivo.

Variações de 66% para menos no valor de **a** causou um decréscimo de 5% na infiltração acumulada e aumento de 138% neste parâmetro, resultou em um incremento de 24% na infiltração. De modo semelhante, variações de 28% no valor de **K** resultou em alteração de 4% na infiltração acumulada e reduzindo-se em 41% o valor de **K**, causou um decréscimo de 4,5% na infiltração. Com isso, demonstrou-se que, alterações substanciais nos parâmetros **a** e **K** não causam grandes modificações nos resultados da infiltração.

O valor de **f<sub>0</sub>** (velocidade de infiltração básica) também decresceu até a 3ª irrigação. Entre a 3ª e 4ª irrigação houve uma estabilidade deste parâmetro. Assim para a 1ª, 2ª, 3ª e 4ª irrigação, os resultados encontrados de **f<sub>0</sub>** foram: 0,000516m<sup>3</sup>/min/m; 0,000247m<sup>3</sup>/min/m; 0,000179m<sup>3</sup>/min/m e 0,000170m<sup>3</sup>/min/m respectivamente. Diferentemente dos outros dois parâmetros, variações na **f<sub>0</sub>**, causaram variações da mesma magnitude na

infiltração acumulada. Assim ao reduzir-se de 52% o valor de  $f_0$ , a infiltração sofreu um decréscimo de 45%.

5.2 A infiltração variou proporcionalmente ao volume aplicado, pois em uma análise de regressão linear da lâmina infiltrada em função do volume aplicado, o coeficiente de determinação foi de 0,99. Como o volume aplicado é diretamente proporcional a vazão aplicada, pode-se afirmar que a vazão influencia na infiltração.

5.3 As lâminas infiltradas foram superiores a lâmina requerida, para a primeira irrigação. Isto se deve, sobretudo ao tempo de corte elevado, já que o solo inicialmente seco apresenta um tempo de avanço demorado, além de se deixar a água fluindo pelo sulco até se atingir a lâmina desejada.

Da segunda até a quarta irrigação as lâminas infiltradas apresentaram valores próximos uma das outras. Neste sentido WALKER (1989) tem razão em sugerir duas equações para o dimensionamento de sistemas irrigados por superfície.

5.4 Com relação aos parâmetros de avaliação, observou-se que a eficiência de aplicação ( $E_a$ ) teve seu valor aumentado durante a estação de cultivo. Durante a 1ª irrigação obteve-se uma  $E_a$  de 40,76% e na última de 74,47%. O índice de escoamento superficial passou de 3,36% na 1ª irrigação para 25,15% na 4ª irrigação. Já o índice de percolação teve seu valor reduzido ao longo da estação de cultivo, onde no 1º evento teve-se 55,88% e no último apenas 0,38% de perdas por percolação.

A eficiência de armazenamento sofreu uma pequena redução ao longo das irrigações, onde pode se considerar que este parâmetro permanece constante ao longo da estação de cultivo. Coeficiente de uniformidade de Christiansen

(CUC) apresentou ligeira ascensão passando de 87,57% na 1ª irrigação para 92,39% na última.

5.5 Comparando-se a metodologia sugerida por WALKER e SKGERBOE (1987) com a de CRIDDLE (1956), observou-se que esta última apresenta tempo de irrigação bastante elevado em relação a primeira, causando conseqüentemente uma redução na eficiência de aplicação. A eficiência alcançada pela metodologia racional de WALKER e SKOGERBOE (1987) na 4ª irrigação foi de 75%. Caso se adotasse a metodologia de CRIDDLE (1956) esta mesma eficiência passaria a 49%.



## 6. RECOMENDAÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia proposta por Walker e Skogerboe (1987) sugere duas equações para descrever o fenômeno da infiltração, sendo uma para a primeira irrigação e a segunda para as demais. No entanto, como pode-se observar neste estudo, o fenômeno da infiltração é bastante complexo, variando substancialmente ao longo da estação de cultivo.

Irrigações continuadas para uma mesma área poderão ajudar ao irrigante a estabelecer a dinâmica do movimento da água ao longo do perfil e com isso melhorar a performance do sistema e reduzir os custos de aplicação de água.

A criação de um banco de dados referentes aos parâmetros de infiltração para a região, para cada tipo de solo, também auxiliaria no dimensionamento de novos projetos e na avaliação das áreas atualmente irrigadas por estes sistemas.

Pesquisas no mesmo sentido deverão ser realizadas para faixas e bacias, sendo esta última de grande utilização na cultura do arroz irrigado na região em estudo.

No Perímetro Irrigado de Morada Nova, é prática comum entre os irrigantes cortar a água assim que esta atinge o final do campo. Há de se admitir que para culturas anuais como feijão, milho, sorgo, algodão etc., a 1ª irrigação tem efeito apenas para germinar a semente e de fato, pelo observado na área, esta prática é bastante salutar pois as sementes destas culturas germinam bem.

Como observou-se a metodologia de Walker e Skogeboe (1987) sugere uma equação para a 1ª irrigação, onde esta apresenta sempre alta infiltração. No entanto, para a germinação das sementes, onde a cultura ainda não dispõe de raízes ou quando estas vierem a germinar, o seu sistema radicular ainda é pequeno, como também seu desenvolvimento vegetativo. Com isso, a demanda para a 1ª irrigação é baixa. Desta forma a prática de cortar a água de irrigação assim que esta atinge o final do campo, utilizada pelos irrigantes de Morada Nova, representa uma considerada economia de água como também dos custos.

Assim sendo, recomendam-se pesquisas que visem também comparar a metodologia racional de Walker (1987) com uma que venha considerar o desenvolvimento do sistema radicular das culturas anuais citadas, comparando inclusive as produtividades obtidas em cada caso.

Também sugere-se que mais pesquisas sejam desenvolvidas nesta mesma linha de raciocínio, sendo que deve-se fazer a determinação da umidade inicial antes do início de cada irrigação.

## 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, D. V. **Modelo matemático para simulação da fase de avanço na irrigação por sulcos.** São Paulo, 1994, 135p. Tese (Doutorado em Agronomia, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/Universidade de São Paulo, 1994).
- AUGUSTO, S. G. **Estudo da eficiência e da uniformidade de distribuição de água na irrigação por sulcos em declive.** Fortaleza, 130p (Dissertação de Mestrado em Agronomia, Universidade Federal Do Ceará, 1994)
- BAUTISTA, E., WALLANDER, W. W. Numerical calculations of infiltration in furrow irrigation simulation models. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 119, n. 2, p. 286-311, 1993.
- BERNARDO, S. **Manual de Irrigação.** 5 ed. Viçosa, MG: UFV , 1989. 596p.
- BOOHER, L. J. **Surface irrigation.** Roma: FAO, 1974, 160p.,(FAO nº 95)
- CHILDS, J. L., WALLANDER, W. W. HOPMANS, J. W. Spatial and variation of furrow infiltration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering.** New York, v. 119, n.1, p. 74-90, 1993.
- CHOW. V. T. **Open-channel hydraulics,** New York, McGraw-Hill, 1959. 680p.
- CRIDDLE, W. D. et al., **Method for evaluating irrigation systems.** Agricultural Handbook n.82. USDA, Soil Conservation Service (SCS), 1956.
- CUENCA, H. R. **Irrigation system design: an engineering approach.** New Jersey: Prentice Hall, 1989. 552p.



- ELLIOT, R., WALKER, W. R. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. **Trans. ASAE**, v.25, n.2, p. 396-400, 1982.
- FRIZZONE, J. A. **Irrigação por superfície**. São Paulo, ESALQ/USP, 1993. 183p.
- LATIMER, E. A., REDDELL, D. L., **A Volume balance model for real time automated furrow irrigation system**. In: NATIONAL IRRIGATION SYMPOSIUM, 3rd, 1990 & ANNUAL INTERNACIONAL IRRIGATION EXPOSITION, 11Th ., 1990. **Proceedings...** St. Joseph: ASAE, p. 13-20.
- LEVIEN, S. L. A. **Desenvolvimento de um modelo matemático simplificado da irrigação por sulcos abertos em declive**. Fortaleza: 91p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Universidade Federal do Ceará. 1985).
- LEVIEN, S. L. A., SOUZA, F. de Algebraic computation of fFlow in furrow irrigation. **Journal Irrigation and Drenage Engineering**. New York, v. 113, n.3, p.367-377, 1987.
- LIMA FILHO, A. F. **Determinação analítica da “performance” da irrigação por sulcos abertos e em declive**. Fortaleza: 107p, Dissertação (Mestrado em Agronomia, Universidade Federal do Ceará. 1996).
- OLITA, A. F. L. **Os Métodos de irrigação**. São Paulo: Nobel, 1987. 267p.
- PEREIRA, L. S. Surface irrigation system. In: Pereira, et al., **Sustainability of water resouces utilization in agriculture**. 1995.
- PORDEUS, R. V. **Estudo de parâmetros para avaliação de irrigação por sulcos abertos e em declive utilizando um modelo algébrico**. Fortaleza: 151p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Universidade Federal do Ceará, 1990).



- RIVERA, R. C. **Desenvolvimento de um software para o desenvolvimento de sistema de irrigação por sulcos via balanço de volume.** Fortaleza 111p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Universidade Federal do Ceará, 1995).
- RODRIGUES, J. A. **Determinação de critérios de irrigação superficial utilizando o método do SCS-USDA para o Vale do Jaguaribe.** Fortaleza: 180p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Universidade Federal do Ceará, 1989).
- SCALOPPI, E. J. Características dos principais sistemas de irrigação. **ITEM - Irrigação e Tecnologia Moderna.** n.25, p. 22-26, 1986.
- SEGEREN, A. G., TROUT, T. J. Hydraulic resistance of soil surface seals in irrigated furrows. **Soil Science Society of America Journal**, v. 55, n.3, p.640-646, May/June, 1991.
- SKOGERBOE, G. V. A Global view of future development of irrigated agricultural. In: NATIONAL IRRIGATION SYMPOSIUM,3rd,1990 & ANNUAL INTERNACIONAL IRRIGATION EXPOSITION, 11Th, 1990 **Proceedings....** St. Joseph: ASAE,1990, p. 187-192.
- SOUZA, F. Modelos matemáticos da irrigação por sulcos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.19, n. 9, p.1135-1143, Set. 1984.
- SOUZA, F. **Nonlinear hydrodynamic model of furrow irrigation.** Davis, , 1981. 172p. Thesis (Philosophy Doctor). University of California
- SOUZA, F. de **Notas de aulas da disciplina irrigação superficial avançada.** Fortaleza, 1994, 50p.

- STRELKOF, T. e SOUZA, F. de Modeling effect of depth on furrow infiltration. **Journal of the Irrigation and Drainage Engineering**. New York, v. 110, n.4, p. 375-387, 1984.
- STRELKOFF, T. Algebraic computation of flow in border irrigation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v.103, n 3, p.357-377, 1997.
- STRELKOFF, T., KATAPODES, N. D. Border irrigation hydraulics with zero inertia. **Journal of Irrigation and Drainage Division**. v 103, n.3, p. 325-342. 1997.
- TURBAK, A. S., MOREL-SEYTOUK, H. J. Analytical solutions for surface irrigation. II Variable infiltration rate. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 114, n.1, p. 48-59, 1988.
- WALKER, W. R. Two decades of surface irrigation research: four significant results and their practical consequences. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON IRRIGATION, 6th., 1993, Tel-Aviv. **Proceedings...** Tel-Aviv: Agritech, 1993, p. 137-158.
- WALKER, W. R., SKOGERBOE, G. V. **Surface irrigation: theory and practice**. New Jersey: Prentice-Hall, 1987. 386p.
- WALKER, W. R., **Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems**, Roma:FAO, 1989, 138p (FAO.Irrigation and Drainag, 45).
- YITAYEW, M., FANGMEIER, D. D. Dimensionless runoff curves for irrigation borders. **Journal of the Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.110, n.2, p.179-191, 1984.
- ZERIHUM, D., et al., Analysis of surface irrigation performance terms and indices. **Elsevier Science**. v. 34, p. 25-46, 1997.

## ANEXO 1

# DADOS CLIMÁTICOS

## DADOS CLIMÁTICOS

ESTAÇÃO DE MORADA NOVA

ALT. =80m lat.(s) =5° 06' LONG. (W) =38°23'

| PARÂMET.  | Jan.   | Fev.  | Mar.   | Abril  | Maió   | Jun.   | Jul.   | Ago.   | Set.   | Out.   | Nov.   | Dez.   |
|-----------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| TEMP.MAX. | 35,10  | 33,80 | 32,80  | 31,90  | 31,90  | 32,60  | 34,20  | 35,30  | 36,10  | 34,50  | 35,70  | 33,80  |
| TEMP.MIN. | 22,30  | 23,50 | 23,00  | 21,80  | 22,60  | 21,40  | 20,80  | 20,60  | 21,10  | 22,10  | 20,80  | 22,90  |
| TEMP.MED. | 26,90  | 0,00  | 26,70  | 26,60  | 26,70  | 26,00  | 26,00  | 26,60  | 27,60  | 27,90  | 28,40  | 28,30  |
| UMID.REL. | 65,80  | 72,00 | 80,30  | 79,50  | 75,00  | 73,70  | 67,60  | 61,40  | 57,50  | 58,00  | 58,30  | 61,40  |
| VEL.VENTO | 2,62   | 2,07  | 1,59   | 1,12   | 1,83   | 2,22   | 2,30   | 2,78   | 3,02   | 3,18   | 3,18   | 3,10   |
| INSOLAÇÃO | 7,75   | 6,67  | 6,88   | 6,60   | 7,78   | 8,30   | 8,63   | 9,33   | 9,42   | 9,90   | 9,31   | 8,76   |
| PRECIPIT. | 78,70  | 112,8 | 214,50 | 186,70 | 115,70 | 70,60  | 33,80  | 11,60  | 9,50   | 4,40   | 5,00   | 29,00  |
| ETO/dia   | 5,3    | 4,70  | 4,50   | 4,20   | 4,60   | 4,70   | 5,20   | 6,10   | 6,70   | 6,60   | 6,30   | 5,80   |
| ETO/mes   | 164,43 | 131,6 | 139,50 | 126,00 | 142,60 | 141,00 | 161,20 | 189,10 | 201,00 | 204,60 | 189,00 | 179,80 |

OBS.: A ETO/dia e ETO/mes foram calculados de acordo com PENMAN MONTEITH



## ANEXO 2

### DADOS DO LABORATÓRIO DE SOLO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
 CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
 DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA DO SOLO  
 LABORATÓRIO DE ANÁLISES DE SOLO E ÁGUA  
 CAMPUS DO PICI - BLOCO 007  
 CAIXA POSTAL - 12160  
 FONE - 243-06-06  
 FORTALEZA - CEARÁ

GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ  
 FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA  
 E RECURSOS HÍDRICOS

INTERESSADO: LUIZ CARLOS A. DE CASTRO  
 PROCEDÊNCIA: FAZENDA EXPERIMENTAL DO DNOCS  
 PERFIL Nº MORADA NOVA - CEARÁ.  
 DATA: 25/04/95

RESULTADO DA ANÁLISE DO SOLO

| AMOSTRA<br>Nº                        | HORIZONTE OU CAMADA   |                                | COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA (%) |                                   |                  |              | ARGILA<br>NATURAL<br>% | CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL |                    |   |
|--------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|------------------|--------------|------------------------|------------------------|--------------------|---|
|                                      | SÍMBOLO               | PROFUND.<br>cm                 | AREIA<br>GRANDE               | AREIA<br>FINA                     | SILTE            | ARGILA       |                        |                        |                    |   |
| 95-296                               | -                     | 0-40                           | 1                             | 33                                | 50               | 16           | 13                     | Franco siltoso         |                    |   |
| GRAU DE<br>FLOCULAÇÃO                | POROSIDADE<br>NATURAL | DENSIDADE (g/cm <sup>3</sup> ) |                               | UMIDADE (%)                       |                  |              | PH                     |                        | C.E. a 25°C        | C.O.C. <sub>3</sub><br>EQUIVALENTE<br>(%) |
|                                      |                       | OL. 25                         | DA<br>PARTÍCULA               | 1/3 s.m.                          | 15 s.m.          | ÁGUA<br>DIF. | ÁGUA                   | KCl                    | LXT. SAT.<br>(g/g) |   |
| 19                                   | -                     | 1,42                           | 2,59                          | 26,5                              | 10,0             | 16,5         | 7,4                    | -                      | 0,31               | -   |
| COMPLEXO SÓLTIPO (me / 100g DE SOLO) |                       |                                |                               |                                   |                  |              |                        | V<br>(%)               | m<br>(%)           | PRI                                       |
| Ca <sup>2+</sup>                     | Mg <sup>2+</sup>      | K <sup>+</sup>                 | Na <sup>+</sup>               | H <sup>+</sup> , Al <sup>3+</sup> | Li <sup>3+</sup> | S            | T                      |                        |                    |   |
| 6,3                                  | 2,6                   | 0,37                           | 0,61                          | 0,5                               | 0,0              | 9,88         | 10,38                  | 95                     | -                  | 6   |
| CARBONO<br>(%)                       | NITROGÊNIO<br>(%)     | C/N                            | MATÉRIA<br>ORGÂNICA<br>(%)    | POSSORO<br>DISPONÍVEL<br>(ppm)    | OBSERVAÇÕES      |              |                        |                        |                    |   |
| 0,44                                 | 0,03                  | 15                             | 0,76                          | 128                               |                  |              |                        |                        |                    |   |

CONVERTE FUNÇÃO DE LUIZ

ANÁLISES REALIZADAS SEGUNDO OS MÉTODOS EMPREGADOS  
 OS RESULTADOS APRESENTADOS APLICAM-SE À AMOSTRA ANALISADA

## ANEXO 3

# RESULTADOS DAS AVALIAÇÕES REALIZADAS PARA AS 4 IRRIGAÇÕES DO SULCO 2

AVALIAÇÃO SISTEMA IRRIGAÇÃO Cultivo 2,0000  
 IRRIGAÇÃO Nº 1,0000 SULCO Nº 2,0000 DATA 28/09/95

**DADOS DE ENTRADA**

|                      |       |                      |       |                     |         |
|----------------------|-------|----------------------|-------|---------------------|---------|
| Alt.Calha Entr.(cm)  | 8,5   | T. total Avanço(min) | 92,0  | Dist. Até Xd (m)    |         |
| Alt.Calha Saída (cm) | 3,0   | T.Metade Avan(min)   | 28,0  | Dist. Após Xd.(m)   |         |
| Decliv. Sulco(m/m)   | 0,003 | Larg.Sulco(Metade)   | 0,212 | Nº de Estações      | 11,0000 |
| Coefic. Manning      | 0,04  | Larg.Sulco(total)    | 0,287 | Qo(médio) Entrada   | 0,0738  |
| Comprim. Sulco(m)    | 110,0 | Alt.Sulco(metade)    | 0,030 | Qro(médio) Saída    | 0,087   |
| Metdade Sulco(m)     | 55,0  | Alt.sulco(total)     | 0,055 | Nº Estações até Xd. |         |
| Tempo Corte(min)     | 128,0 | Lâm. Requer.(mm)     | 0,035 | Nº Estaç. Após Xd.  |         |
|                      |       |                      |       | T. de Runoff(min)   | 37,0000 |

|       | Forma do Sulco(metro) |         | Perímetro Molhado |            |
|-------|-----------------------|---------|-------------------|------------|
|       | ALTURA                | LARGURA | TOT. PERIM        | MED. PERIM |
| 1     | 0,0000                | 0,0000  |                   |            |
| 2     | 0,0050                | 0,0560  | 0,0569            | 0,0569     |
| 3     | 0,0100                | 0,1030  | 0,0481            | 0,0481     |
| 4     | 0,0150                | 0,1350  | 0,0335            | 0,0335     |
| 5     | 0,0200                | 0,1570  | 0,0242            | 0,0242     |
| 6     | 0,0250                | 0,1860  | 0,0307            | 0,0307     |
| 7     | 0,0300                | 0,2120  | 0,0279            |            |
| 8     | 0,0350                | 0,2170  | 0,0112            |            |
| 9     | 0,0400                | 0,2320  | 0,0180            |            |
| 10    | 0,0450                | 0,2590  | 0,0288            |            |
|       | 0,0500                | 0,2750  | 0,0189            |            |
| 11    | 0,0550                | 0,2870  | 0,0156            |            |
| SOMA= |                       |         | 0,3137            | 0,1933     |

**DADOS DE SAÍDA(RESULTADOS)**

|                  |        |                        |        |        |          |
|------------------|--------|------------------------|--------|--------|----------|
| Qo=              | 0,0713 | WP <sub>1</sub> médio= | 0,1933 | r=     | 0,5827   |
| Qro=             | 0,0145 | WP <sub>2</sub> total= | 0,3137 | fo=    | 0,000516 |
| L <sub>2</sub> = | 0,4997 | b <sub>2</sub> =       | 0,7985 | VL=    | 0,0247   |
| L <sub>1</sub> = | 1,2228 | b <sub>1</sub> =       | 3,1790 | V0,5L= | 0,0214   |
| a1=              | 0,8153 | c2=                    | 0,7624 | a=     | 0,1196   |
| a2=              | 1,4997 | c1=                    | 1,9089 | Sz=    | 0,9214   |
|                  |        | Ao=                    | 0,0091 | K=     | 0,0156   |
|                  |        | p1=                    | 0,1834 | p2=    | 2,6234   |

**Cálculo das Lâminas**

| Distância | Avanço | Recessão | T. Oportun. | Lam.infiltrada | Zi-Z(médio) |
|-----------|--------|----------|-------------|----------------|-------------|
| 0         | 0      | 128      | 128         | 0,0940         | 0,016       |
| 10        | 3      | 131      | 128         | 0,0940         | 0,016       |
| 20        | 6      | 132      | 126         | 0,0929         | 0,015       |
| 30        | 11     | 133      | 122         | 0,0907         | 0,013       |
| 40        | 17     | 134      | 117         | 0,0880         | 0,010       |
| 50        | 25     | 136      | 111         | 0,0847         | 0,007       |
| 60        | 32     | 139      | 107         | 0,0826         | 0,005       |
| 70        | 41     | 145      | 104         | 0,0809         | 0,003       |
| 80        | 51     | 151      | 100         | 0,0787         | 0,001       |
| 90        | 64     | 152      | 88          | 0,0721         | 0,006       |
| 100       | 77     | 157      | 80          | 0,0677         | 0,010       |
| 110       | 92     | 162      | 70          | 0,0621         | 0,016       |

|  |        |                    |        |
|--|--------|--------------------|--------|
| Performance da Irrigação(excesso de Irrigação) |        | Z(médio)=          | 0,0780 |
| Vz. (m3)=                                      | 9,10   | N=                 | 12     |
| Ea (%) =                                       | 40,76  | Soma[Zi-Z(médio)]= | 0,1164 |
| Volume Aplicado(m <sup>3</sup> )=              | 8,93   | CUC=               | 87,57  |
| Volume de Runoff(m <sup>3</sup> )=             | 0,30   |                    |        |
| Iro(%)=  | 3,36   |                    |        |
| Ip(%)=   | 55,88  |                    |        |
| Es=  | 100,00 |                    |        |



CULTIVO Nº2  
 IRRIGAÇÃO Nº 1  
 SULCO Nº 2  
 Cálculo da Vazão de Entrada (Inflow)  
 Equação:  $Q=0,03202H^{1,68886}$

CULTIVO Nº2  
 IRRIGAÇÃO Nº 1  
 SULCO Nº 2  
 Cálculo da Vazão de Saida(outflow)  
 Equação:  $Q=0,04238H^{1,58698}$

| Tempo Instatâneo (min) | Altura Parshall (cm) | Tempo Acumulado (min) | Vazão (l/s) | Vazão (m <sup>3</sup> /min) | Cálculo Volume (m <sup>3</sup> ) | Tempo Instatâneo (min) | Altura Parshall (cm) | Tempo Acumulado (min) | Vazão (l/s) | Vazão (m <sup>3</sup> /min) | Cálculo Volume (m <sup>3</sup> ) |
|------------------------|----------------------|-----------------------|-------------|-----------------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|-------------|-----------------------------|----------------------------------|
| 0                      | 9,1                  | 0                     | 1,3339      | 0,0800                      | 0,0800                           | 0                      | 0,7                  | 0                     | 0,0241      | 0,0014                      | 0,0014                           |
| 7                      | 9,4                  | 7                     | 1,4090      | 0,0845                      | 0,1691                           | 2                      | 1                    | 2                     | 0,0424      | 0,0025                      | 0,0051                           |
| 4                      | 8,5                  | 11                    | 1,1887      | 0,0713                      | 0,1426                           | 2                      | 1,3                  | 4                     | 0,0643      | 0,0039                      | 0,0077                           |
| 3                      | 8,4                  | 14                    | 1,1652      | 0,0699                      | 0,1398                           | 3                      | 1,7                  | 7                     | 0,0984      | 0,0059                      | 0,0118                           |
| 5                      | 8,5                  | 19                    | 1,1887      | 0,0713                      | 0,1426                           | 5                      | 2,1                  | 12                    | 0,1376      | 0,0083                      | 0,0165                           |
| 17                     | 8,5                  | 36                    | 1,1887      | 0,0713                      | 0,1426                           | 4                      | 2,5                  | 16                    | 0,1814      | 0,0109                      | 0,0218                           |
| 35                     | 8,5                  | 71                    | 1,1887      | 0,0713                      | 0,1426                           | 4                      | 2,7                  | 20                    | 0,2050      | 0,0123                      | 0,0246                           |
| 45                     | 8,5                  | 116                   | 1,1887      | 0,0713                      | 0,1426                           | 4                      | 3                    | 24                    | 0,2423      | 0,0145                      | 0,0291                           |
| 5                      | 8,5                  | 121                   | 1,1887      | 0,0713                      | 0,1426                           | 10                     | 3                    | 34                    | 0,2423      | 0,0145                      | 0,0291                           |
| 7                      | 8,8                  | 128                   | 1,2604      | 0,0756                      | 0,1513                           | 3                      | 2,8                  | 37                    | 0,2172      | 0,0130                      | 0,0130                           |
| <b>Total</b>           | <b>128</b>           |                       |             |                             | <b>1,3961</b>                    |                        |                      | <b>37</b>             |             |                             | <b>0,1601</b>                    |

Dados:

|                                  |        |
|----------------------------------|--------|
| Número de Medidas                | 10     |
| Tempo de Inflow:                 | 128    |
| Vazão Constante(m3/min)          | 0,0713 |
| Vazão Média (m3/min)             | 0,0738 |
| Volume Aplicado(m <sup>3</sup> ) | 8,93   |

Volume infiltrado(m<sup>3</sup>) **8,64**

Dados:

|                                   |        |
|-----------------------------------|--------|
| Número de Medidas                 | 10     |
| Tempo de outflow:                 | 37     |
| Vazão Constante(m3/min)           | 0,0145 |
| Vazão Média (m3/min)              | 0,0087 |
| Volume de Runoff(m <sup>3</sup> ) | 0,30   |

AVALIAÇÃO SISTEMA IRRIGAÇÃO Cultivo 2,0000  
 IRRIGAÇÃO Nº 2,0000 SULCO Nº 2,0000 DATA 05/10/95

**DADOS DE ENTRADA**

|                      |       |                      |       |                     |        |
|----------------------|-------|----------------------|-------|---------------------|--------|
| Alt.Calha Entr.(cm)  | 6,9   | T. total Avanço(min) | 68,0  | Dist. Até Xd (m)    | 100,0  |
| Alt.Calha Saída (cm) | 4,0   | T.Metade Avan(min)   | 26,0  | Dist. Após Xd.(m)   | 10,0   |
| Decliv. Sulco(m/m)   | 0,003 | Larg.Sulco(Metade)   | 0,164 | Nº de Estações      |        |
| Coefic. Manning      | 0,04  | Larg.Sulco(total)    | 0,268 | Qo(médio) Entrada   | 0,0449 |
| Comprim. Sulco(m)    | 110,0 | Alt.Sulco(metade)    | 0,025 | Qro(médio) Saída    | 0,0136 |
| Metdade Sulco(m)     | 55,0  | Alt.sulco(total)     | 0,045 | Nº Estações até Xd. | 10,0   |
| Tempo Corte(min)     | 124,0 | Lâm. Requer.(mm)     | 0,035 | Nº Estaç. Após Xd.  | 1,0    |
|                      |       |                      |       | T. de Runoff(min)   | 88,0   |

|       | Forma do Sulco(metro) |         | Perímetro Molhado |            |
|-------|-----------------------|---------|-------------------|------------|
|       | ALTURA                | LARGURA | TOT. PERIM        | MED. PERIM |
| 1     | 0,0000                | 0,0000  |                   |            |
| 2     | 0,0050                | 0,0290  | 0,0307            | 0,0307     |
| 3     | 0,0100                | 0,0790  | 0,0510            | 0,0510     |
| 4     | 0,0150                | 0,1220  | 0,0441            | 0,0441     |
| 5     | 0,0200                | 0,1460  | 0,0260            | 0,0260     |
| 6     | 0,0250                | 0,1640  | 0,0206            | 0,0206     |
| 7     | 0,0300                | 0,1960  | 0,0335            |            |
| 8     | 0,0350                | 0,2200  | 0,0260            |            |
| 9     | 0,0400                | 0,2380  | 0,0206            |            |
| 10    | 0,0450                | 0,2680  | 0,0316            |            |
| 11    | 0,0000                | 0,0000  | 0,0000            |            |
| 12    | 0,0000                | 0,0000  | 0,0000            |            |
| SOMA= |                       |         | 0,2841            | 0,1724     |

**DADOS DE SAIDA(RESULTADOS)**

|                  |        |                        |        |        |          |
|------------------|--------|------------------------|--------|--------|----------|
| Qo=              | 0,0502 | WP <sub>1</sub> médio= | 0,1724 | r=     | 0,7210   |
| Qro=             | 0,0229 | WP <sub>2</sub> total= | 0,2841 | fo=    | 0,000247 |
| L <sub>2</sub> = | 0,8355 | b <sub>2</sub> =       | 0,8500 | VL=    | 0,0128   |
| L <sub>1</sub> = | 3,5763 | b <sub>1</sub> =       | 3,9660 | V0,5L= | 0,0123   |
| a1=              | 1,9484 | c2=                    | 0,7364 | a=     | 0,0410   |
| a2=              | 1,8355 | c1=                    | 1,6930 | Sz=    | 0,9670   |
|                  |        | Ao=                    | 0,0067 | K=     | 0,0112   |
|                  |        | p1=                    | 0,2393 | p2=    | 2,7159   |

**Cálculo das Lâminas**

| Distância | Avanço | Recessão | T. Oportun. | Lam.infiltrada | Zi-Z(médio) |
|-----------|--------|----------|-------------|----------------|-------------|
| 0         | 0      | 123      | 123         | 0,0440         | 0,0057      |
| 10        | 3      | 126      | 123         | 0,0440         | 0,0057      |
| 20        | 7      | 127      | 120         | 0,0432         | 0,0049      |
| 30        | 12     | 128      | 116         | 0,0422         | 0,0039      |
| 40        | 17     | 129      | 112         | 0,0412         | 0,0029      |
| 50        | 23     | 132      | 109         | 0,0405         | 0,0022      |
| 60        | 29     | 133      | 104         | 0,0392         | 0,0009      |
| 70        | 35     | 136      | 101         | 0,0385         | 0,0001      |
| 80        | 40     | 146      | 106         | 0,0397         | 0,0014      |
| 90        | 48     | 146      | 98          | 0,0377         | 0,0006      |
| 100       | 58     | 146      | 88          | 0,0352         | 0,0032      |
| 110       | 68     | 146      | 78          | 0,0326         | 0,0057      |

**Performance da Irrigação(com déficit)**

|                                    |       |                    |        |
|------------------------------------|-------|--------------------|--------|
| Vza. (m <sup>3</sup> )=            | 4,06  | Z(médio)=          | 0,0383 |
| Vzi.(m <sup>3</sup> )              | 0,34  | N=                 | 12     |
| Vol. Infiltr.(m <sup>3</sup> ) =   | 4,40  | Soma[Zi-Z(médio)]= | 0,0372 |
| Ea (%) =                           | 68,95 | CUC=               | 91,91  |
| Volume Aplicado(m <sup>3</sup> )=  | 5,25  |                    |        |
| Volume de Runoff(m <sup>3</sup> )= | 1,18  |                    |        |
| Iro(%)=                            | 22,48 |                    |        |
| Ip(%)=                             | 8,57  |                    |        |
| Er.(%)=                            | 99,71 |                    |        |

CULTIVO Nº2  
 IRRIGAÇÃO Nº2  
 SULCO Nº 2  
 Cálculo da Vazão de Entrada (Inflow)  
 Equação:  $Q=0,03202H^{1,68886}$

CULTIVO Nº2  
 IRRIGAÇÃO Nº2  
 SULCO Nº 2  
 Cálculo da Vazão de Saida(outflow)  
 Equação:  $Q=0,04238H^{1,56698}$

| Tempo<br>Instatâneo<br>(min) | Altura<br>Parshall<br>(cm) | Tempo<br>Acumulado<br>(min) | Vazão<br>(l/s) | Vazão<br>(m³/min) | Cálculo<br>Volume<br>(m³) | Tempo<br>Instatâneo<br>(min) | Altura<br>Parshall<br>(cm) | Tempo<br>Acumulado<br>(min) | Vazão<br>(l/s) | Vazão<br>(m³/min) | Cálculo<br>Volume<br>(m³) |
|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------|-------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------|-------------------|---------------------------|
| 0                            | 6                          | 0                           | 0,6601         | 0,0396            | 0,0396                    | 0                            | 0,8                        | 0                           | 0,0297         | 0,0018            | 0,0018                    |
| 3                            | 6                          | 3                           | 0,6601         | 0,0396            | 0,0792                    | 1                            | 1                          | 1                           | 0,0424         | 0,0025            | 0,0051                    |
| 3                            | 5,9                        | 6                           | 0,6416         | 0,0385            | 0,0770                    | 3                            | 1,6                        | 4                           | 0,0894         | 0,0054            | 0,0107                    |
| 5                            | 5,9                        | 11                          | 0,6416         | 0,0385            | 0,0770                    | 3                            | 2,1                        | 7                           | 0,1376         | 0,0083            | 0,0165                    |
| 2                            | 5,9                        | 13                          | 0,6416         | 0,0385            | 0,0770                    | 3                            | 2,7                        | 10                          | 0,2050         | 0,0123            | 0,0246                    |
| 6                            | 6                          | 19                          | 0,6601         | 0,0396            | 0,0792                    | 4                            | 3,1                        | 14                          | 0,2552         | 0,0153            | 0,0306                    |
| 4                            | 6                          | 23                          | 0,6601         | 0,0396            | 0,0792                    | 6                            | 3,2                        | 20                          | 0,2684         | 0,0161            | 0,0322                    |
| 3                            | 6,9                        | 26                          | 0,8358         | 0,0502            | 0,1003                    | 5                            | 3,3                        | 25                          | 0,2819         | 0,0169            | 0,0338                    |
| 3                            | 7,3                        | 29                          | 0,9193         | 0,0552            | 0,1103                    | 7                            | 3,5                        | 32                          | 0,3094         | 0,0186            | 0,0371                    |
| 2                            | 7,2                        | 31                          | 0,8981         | 0,0539            | 0,1078                    | 4                            | 3,6                        | 36                          | 0,3236         | 0,0194            | 0,0388                    |
| 7                            | 6,9                        | 38                          | 0,8358         | 0,0502            | 0,1003                    | 5                            | 4                          | 41                          | 0,3825         | 0,0229            | 0,0459                    |
| 8                            | 6,9                        | 46                          | 0,8358         | 0,0502            | 0,1003                    | 3                            | 4                          | 44                          | 0,3825         | 0,0229            | 0,0459                    |
| 64                           | 6,9                        | 110                         | 0,8358         | 0,0502            | 0,1003                    | 6                            | 4                          | 50                          | 0,3825         | 0,0229            | 0,0459                    |
| 6                            | 6,5                        | 116                         | 0,7556         | 0,0453            | 0,0907                    | 4                            | 4                          | 54                          | 0,3825         | 0,0229            | 0,0459                    |
| 7                            | 6,5                        | 123                         | 0,7556         | 0,0453            | 0,0907                    | 6                            | 3,5                        | 60                          | 0,3094         | 0,0186            | 0,0371                    |
| 1                            | 6,5                        | 124                         | 0,7556         | 0,0453            | 0,0453                    | 4                            | 3,1                        | 64                          | 0,2552         | 0,0153            | 0,0306                    |
|                              |                            |                             |                |                   |                           | 5                            | 2,6                        | 69                          | 0,1931         | 0,0116            | 0,0232                    |
|                              |                            |                             |                |                   |                           | 7                            | 2                          | 76                          | 0,1273         | 0,0076            | 0,0153                    |
|                              |                            |                             |                |                   |                           | 3                            | 1,8                        | 79                          | 0,1077         | 0,0065            | 0,0129                    |
|                              |                            |                             |                |                   |                           | 9                            | 1,2                        | 88                          | 0,0566         | 0,0034            | 0,0034                    |
| <b>Total</b>                 | <b>124</b>                 |                             |                |                   | <b>1,3542</b>             | <b>88</b>                    |                            |                             |                |                   | <b>0,5375</b>             |

Dados:

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| Número de Medidas       | 16     |
| Tempo de Inflow:        | 124    |
| Vazão Constante(m3/min) | 0,0396 |
| Vazão Média (m3/min)    | 0,0449 |
| Volume Aplicado(m³)     | 5,25   |

Volume infiltrado(m³)

4,07

Dados:

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| Número de Medidas       | 20     |
| Tempo de outflow:       | 88     |
| Vazão Constante(m3/min) | 0,0229 |
| Vazão Média (m3/min)    | 0,0136 |
| Volume de Runoff(m³)    | 1,18   |



AVALIAÇÃO SISTEMA IRRIGAÇÃO Cultivo 2,0000  
 IRRIGAÇÃO Nº 3,0000 SULCO Nº 2,0000 DATA 12/10/95

**DADOS DE ENTRADA**

|                       |       |                       |       |                     |        |
|-----------------------|-------|-----------------------|-------|---------------------|--------|
| Alt. Calha Entr. (cm) | 7,5   | T. total Avanço (min) | 56,0  | Dist. Até Xd (m)    | 90,0   |
| Alt. Calha Saída (cm) | 5,5   | T. Metade Avan (min)  | 20,0  | Dist. Após Xd (m)   | 20,0   |
| Decliv. Sulco (m/m)   | 0,003 | Larg. Sulco (Metade)  | 0,191 | Nº de Estações      |        |
| Coefic. Manning       | 0,04  | Larg. Sulco (total)   | 0,276 | Qo (médio) Entrada  | 0,0565 |
| Comprim. Sulco (m)    | 110,0 | Alt. Sulco (metade)   | 0,040 | Qro (médio) Saída   | 0,0181 |
| Metdade Sulco (m)     | 55,0  | Alt. sulco (total)    | 0,072 | Nº Estações até Xd. | 9,0    |
| Tempo Corte (min)     | 93,0  | Lâm. Requer. (mm)     | 0,035 | Nº Estaç. Após Xd.  | 2,0    |
|                       |       |                       |       | T. de Runoff (min)  | 72,0   |

|       | Forma do Sulco (metro) |         | Perímetro Molhado |            |
|-------|------------------------|---------|-------------------|------------|
|       | ALTURA                 | LARGURA | TOT. PERIM        | MED. PERIM |
| 1     | 0,0000                 | 0,0000  |                   |            |
| 2     | 0,0100                 | 0,0730  | 0,0757            | 0,0757     |
| 3     | 0,0200                 | 0,1160  | 0,0474            | 0,0474     |
| 4     | 0,0300                 | 0,1490  | 0,0386            | 0,0386     |
| 5     | 0,0400                 | 0,1910  | 0,0465            | 0,0465     |
| 6     | 0,0500                 | 0,2240  | 0,0386            | 0,0000     |
| 7     | 0,0600                 | 0,2440  | 0,0283            |            |
| 8     | 0,0720                 | 0,2760  | 0,0400            |            |
| 9     | 0,0000                 | 0,0000  | 0,0000            |            |
| 10    | 0,0000                 | 0,0000  | 0,0000            |            |
| 11    | 0,0000                 | 0,0000  | 0,0000            |            |
| 12    | 0,0000                 | 0,0000  | 0,0000            |            |
| SOMA= |                        |         | 0,3151            | 0,2082     |

**DADOS DE SAÍDA (RESULTADOS)**

|                  |        |                        |        |        |          |
|------------------|--------|------------------------|--------|--------|----------|
| Qo=              | 0,0577 | WP <sub>1</sub> médio= | 0,2082 | r=     | 0,6732   |
| Qro=             | 0,0380 | WP <sub>2</sub> total= | 0,3151 | fo=    | 0,000179 |
| L <sub>2</sub> = | 0,6263 | b <sub>2</sub> =       | 0,7048 | VL=    | 0,0171   |
| L <sub>1</sub> = | 1,4340 | b <sub>1</sub> =       | 2,0127 | V0,5L= | 0,0128   |
| a1=              | 0,8818 | c2=                    | 0,7258 | a=     | 0,2855   |
| a2=              | 1,6263 | c1=                    | 1,4432 | Sz=    | 0,8213   |
|                  |        | Ao=                    | 0,0073 | K=     | 0,0066   |
|                  |        | p1=                    | 0,3639 | p2=    | 2,7555   |

**Cálculo das Lâminas**

| Distância | Avanço | Recessão | T. Oportun. | Lam. infiltrada | Zi-Z(médio) |
|-----------|--------|----------|-------------|-----------------|-------------|
| 0         | 0      | 93       | 93          | 0,0408          | 0,0037      |
| 10        | 3      | 95       | 92          | 0,0405          | 0,0034      |
| 20        | 5      | 96       | 91          | 0,0403          | 0,0032      |
| 30        | 8      | 97       | 89          | 0,0398          | 0,0027      |
| 40        | 13     | 100      | 87          | 0,0392          | 0,0021      |
| 50        | 17     | 100      | 83          | 0,0382          | 0,0011      |
| 60        | 22     | 104      | 82          | 0,0380          | 0,0009      |
| 70        | 28     | 110      | 82          | 0,0380          | 0,0009      |
| 80        | 32     | 111      | 79          | 0,0372          | 0,0001      |
| 90        | 41     | 113      | 72          | 0,0353          | 0,0018      |
| 100       | 49     | 117      | 68          | 0,0342          | 0,0029      |
| 110       | 56     | 121      | 65          | 0,0334          | 0,0037      |

**Performance da Irrigação (com déficit)**

|                                     |       |                    |        |
|-------------------------------------|-------|--------------------|--------|
| Vza. (m <sup>3</sup> )=             | 3,49  | Z(médio)=          | 0,0371 |
| Vzi. (m <sup>3</sup> )=             | 0,69  | N=                 | 12     |
| Vol. Infiltr. (m <sup>3</sup> )=    | 4,18  | Soma[Zi-Z(médio)]= | 0,0263 |
| Ea (%)=                             | 73,01 | CUC=               | 94,09  |
| Volume Aplicado (m <sup>3</sup> )=  | 5,05  |                    |        |
| Volume de Runoff (m <sup>3</sup> )= | 1,30  |                    |        |
| Iro (%)=                            | 25,74 |                    |        |
| Ip (%)=                             | 1,25  |                    |        |
| Er (%)=                             | 99,64 |                    |        |



CULTIVO Nº2  
 IRRIGAÇÃO Nº3  
 SULCO Nº 2  
 Cálculo da Vazão de Entrada (Inflow)  
 Equação:  $Q=0,03202H^{1,68886}$

CULTIVO Nº2  
 IRRIGAÇÃO Nº 3  
 SULCO Nº 2  
 Cálculo da Vazão de Saída(outflow)  
 Equação:  $Q=0,04238H^{1,58698}$

| Tempo Instatâneo (min) | Altura Parshall (cm) | Tempo Acumulado (min) | Vazão (l/s) | Vazão (m³/min) | Cálculo Volume (m³) | Tempo Instatâneo (min) | Altura Parshall (cm) | Tempo Acumulado (min) | Vazão (l/s) | Vazão (m³/min) | Cálculo Volume (m³) |
|------------------------|----------------------|-----------------------|-------------|----------------|---------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|-------------|----------------|---------------------|
| 0                      | 8                    | 0                     | 1,0730      | 0,0644         | 0,0644              | 0                      | 0,8                  | 0                     | 0,0297      | 0,0018         | 0,0018              |
| 7                      | 7,4                  | 7                     | 0,9407      | 0,0564         | 0,1129              | 3                      | 2,5                  | 3                     | 0,1814      | 0,0109         | 0,0218              |
| 3                      | 7,3                  | 10                    | 0,9193      | 0,0552         | 0,1103              | 2                      | 2,8                  | 5                     | 0,2172      | 0,0130         | 0,0261              |
| 3                      | 7                    | 13                    | 0,8564      | 0,0514         | 0,1028              | 3                      | 3,2                  | 8                     | 0,2684      | 0,0161         | 0,0322              |
| 3                      | 7                    | 16                    | 0,8564      | 0,0514         | 0,1028              | 5                      | 3,7                  | 13                    | 0,3380      | 0,0203         | 0,0406              |
| 7                      | 7,2                  | 23                    | 0,8981      | 0,0539         | 0,1078              | 5                      | 4                    | 18                    | 0,3825      | 0,0229         | 0,0459              |
| 5                      | 7,3                  | 28                    | 0,9193      | 0,0552         | 0,1103              | 5                      | 4,5                  | 23                    | 0,4611      | 0,0277         | 0,0553              |
| 3                      | 7,3                  | 31                    | 0,9193      | 0,0552         | 0,1103              | 5                      | 4,9                  | 28                    | 0,5278      | 0,0317         | 0,0633              |
| 9                      | 7,5                  | 40                    | 0,9622      | 0,0577         | 0,1155              | 5                      | 5,5                  | 33                    | 0,6340      | 0,0380         | 0,0761              |
| 5                      | 7,5                  | 45                    | 0,9622      | 0,0577         | 0,1155              | 5                      | 5,5                  | 38                    | 0,6340      | 0,0380         | 0,0761              |
| 5                      | 7,5                  | 50                    | 0,9622      | 0,0577         | 0,1155              | 6                      | 5,5                  | 44                    | 0,6340      | 0,0380         | 0,0761              |
| 15                     | 7,5                  | 65                    | 0,9622      | 0,0577         | 0,1155              | 4                      | 4,3                  | 48                    | 0,4290      | 0,0257         | 0,0515              |
| 15                     | 7,5                  | 80                    | 0,9622      | 0,0577         | 0,1155              | 5                      | 3                    | 53                    | 0,2423      | 0,0145         | 0,0291              |
| 5                      | 7,5                  | 85                    | 0,9622      | 0,0577         | 0,1155              | 5                      | 1,5                  | 58                    | 0,0807      | 0,0048         | 0,0097              |
| 8                      | 7,5                  | 93                    | 0,9622      | 0,0577         | 0,1155              | 5                      | 1                    | 63                    | 0,0424      | 0,0025         | 0,0051              |
|                        |                      |                       |             |                |                     | 5                      | 0,7                  | 68                    | 0,0241      | 0,0014         | 0,0029              |
|                        |                      |                       |             |                |                     | 4                      | 0,5                  | 72                    | 0,0141      | 0,0008         | 0,0017              |
| Total                  | 93                   |                       |             |                | 1,6298              | 72                     |                      |                       |             |                | 0,6151              |

Dados:

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| Número de Medidas       | 15     |
| Tempo de Inflow:        | 93     |
| Vazão Constante(m3/min) | 0,0577 |
| Vazão Média (m3/min)    | 0,0565 |
| Volume Aplicado(m³)     | 5,05   |

Volume infiltrado(m³)

3,75

Dados:

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| Número de Medidas       | 17     |
| Tempo de outflow:       | 72     |
| Vazão Constante(m3/min) | 0,038  |
| Vazão Média (m3/min)    | 0,0181 |
| Volume de Runoff(m³)    | 1,30   |

AVALIAÇÃO SISTEMA IRRIGAÇÃO Cultivo 2,0000  
 IRRIGAÇÃO Nº 4,0000 SULCO Nº 2,0000 DATA 20/10/95

**DADOS DE ENTRADA**

|                       |       |                      |       |                    |        |
|-----------------------|-------|----------------------|-------|--------------------|--------|
| Alt. Calha Entr.(cm)  | 7,0   | T. total Avanço(min) | 44,0  | Dist. Até Xd (m)   | 90,0   |
| Alt. Calha Saída (cm) | 5,0   | T. Metade Avan(min)  | 14,0  | Dist. Após Xd.(m)  | 20,0   |
| Decliv. Sulco(m/m)    | 0,003 | Larg. Sulco(Metade)  | 0,169 | Nº de Estações     |        |
| Coefic. Manning       | 0,04  | Larg. Sulco(total)   | 0,222 | Qo(médio) Entrada  | 0,0503 |
| Comprim. Sulco(m)     | 110,0 | Alt. Sulco(metade)   | 0,018 | Qro(médio) Saída   | 0,0138 |
| Metdade Sulco(m)      | 55,0  | Alt. sulco(total)    | 0,038 | Nº Estações até Xd | 9,0    |
| Tempo Corte(min)      | 102,0 | Lâm. Requer.(mm)     | 0,035 | Nº Estaç. Após Xd. | 2,0    |
|                       |       |                      |       | T. de Runoff(min)  | 89,0   |

|       | Forma do Sulco(metro) |         | Perímetro Molhado |            |
|-------|-----------------------|---------|-------------------|------------|
|       | ALTURA                | LARGURA | TOT. PERIM        | MED. PERIM |
| 1     | 0,0000                | 0,0000  |                   |            |
| 2     | 0,0000                | 0,0400  | 0,0400            | 0,0400     |
| 3     | 0,0030                | 0,0730  | 0,0335            | 0,0335     |
| 4     | 0,0080                | 0,1340  | 0,0618            | 0,0618     |
| 5     | 0,0130                | 0,1530  | 0,0215            | 0,0215     |
| 6     | 0,0180                | 0,1690  | 0,0189            | 0,0189     |
| 7     | 0,0230                | 0,1830  | 0,0172            |            |
| 8     | 0,0280                | 0,1920  | 0,0135            |            |
| 9     | 0,0330                | 0,2110  | 0,0215            |            |
| 10    | 0,0380                | 0,2220  | 0,0149            |            |
| 11    | 0,0000                | 0,0000  | 0,0000            |            |
| 12    | 0,0000                | 0,0000  | 0,0000            |            |
| SOMA= |                       |         | 0,2427            | 0,1757     |

**DADOS DE SAIDA(RESULTADOS)**

|                  |        |                        |        |        |          |
|------------------|--------|------------------------|--------|--------|----------|
| Qo=              | 0,0514 | WP <sub>1</sub> médio= | 0,1757 | r=     | 0,6053   |
| Qro=             | 0,0327 | WP <sub>2</sub> total= | 0,2427 | fo=    | 0,000170 |
| L <sub>2</sub> = | 0,3651 | b <sub>2</sub> =       | 0,4323 | VL=    | 0,0102   |
| L <sub>1</sub> = | 0,7325 | b <sub>1</sub> =       | 0,9978 | V0,5L= | 0,0061   |
| a1=              | 0,5366 | c2=                    | 0,6870 | a=     | 0,4529   |
| a2=              | 1,3651 | c1=                    | 1,0949 | Sz=    | 0,7649   |
|                  |        | Ao=                    | 0,0068 | K=     | 0,0024   |
|                  |        | p1=                    | 0,7679 | p2=    | 2,9111   |

**Cálculo das Lâminas**

| Distância | Avanço | Recessão | T. Oportun. | Lam. infiltrada | Zi-Z(médio) |
|-----------|--------|----------|-------------|-----------------|-------------|
| 0         | 0      | 101      | 101         | 0,0367          | 0,0024      |
| 10        | 2      | 107      | 105         | 0,0377          | 0,0034      |
| 20        | 4      | 111      | 107         | 0,0382          | 0,0039      |
| 30        | 6      | 112      | 106         | 0,0379          | 0,0036      |
| 40        | 9      | 113      | 104         | 0,0374          | 0,0031      |
| 50        | 13     | 115      | 102         | 0,0369          | 0,0026      |
| 60        | 15     | 119      | 104         | 0,0374          | 0,0031      |
| 70        | 20     | 123      | 103         | 0,0372          | 0,0029      |
| 80        | 23     | 124      | 101         | 0,0367          | 0,0024      |
| 90        | 30     | 125      | 95          | 0,0351          | 0,0008      |
| 100       | 37     | 126      | 89          | 0,0335          | 0,0008      |
| 110       | 44     | 127      | 83          | 0,0319          | 0,0024      |

**Peformance da Irrigação(com déficit)**

|                                    |       |                    |        |
|------------------------------------|-------|--------------------|--------|
| Vza. (m3)=                         | 3,35  | Z(médio)=          | 0,0343 |
| Vzi. (m3)                          | 0,67  | N=                 | 12     |
| Vol. Infiltr. (m <sup>3</sup> ) =  | 4,02  | Soma[Zi-Z(médio)]= | 0,0313 |
| Ea (%) =                           | 74,46 | CUC=               | 92,39  |
| Volume Aplicado(m <sup>3</sup> )=  | 4,85  |                    |        |
| Volume de Runoff(m <sup>3</sup> )= | 1,22  |                    |        |
| Iro(%)=                            | 25,15 |                    |        |
| Ip(%)=                             | 0,38  |                    |        |
| Er. (%)=                           | 99,23 |                    |        |



CULTIVO Nº2  
 IRRIGAÇÃO Nº4  
 SULCO Nº 2  
 Cálculo da Vazão de Entrada (Inflow)  
 Equação:  $Q=0,03202H^{1,588896}$

CULTIVO Nº2  
 IRRIGAÇÃO Nº4  
 SULCO Nº 2  
 Cálculo da Vazão de Saida(outflow)  
 Equação:  $Q=0,04238H^{1,58698}$

| Tempo Instatâneo (min) | Altura Parshall (cm) | Tempo Acumulado (min) | Vazão (l/s) | Vazão (m³/min) | Cálculo Volume (m³) | Tempo Instatâneo (min) | Altura Parshall (cm) | Tempo Acumulado (min) | Vazão (l/s) | Vazão (m³/min) | Cálculo Volume (m³) |
|------------------------|----------------------|-----------------------|-------------|----------------|---------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|-------------|----------------|---------------------|
| 0                      | 8                    | 0                     | 1,0730      | 0,0644         | 0,0644              | 0                      | 0,5                  | 0                     | 0,0141      | 0,0008         | 0,0017              |
| 3                      | 8                    | 3                     | 1,0730      | 0,0644         | 0,1288              | 2                      | 1,1                  | 2                     | 0,0493      | 0,0030         | 0,0059              |
| 6                      | 8                    | 9                     | 1,0730      | 0,0644         | 0,1288              | 2                      | 1,5                  | 4                     | 0,0807      | 0,0048         | 0,0097              |
| 6                      | 7                    | 15                    | 0,8564      | 0,0514         | 0,1028              | 2                      | 1,8                  | 6                     | 0,1077      | 0,0065         | 0,0129              |
| 5                      | 6,9                  | 20                    | 0,8358      | 0,0502         | 0,1003              | 4                      | 2,3                  | 10                    | 0,1589      | 0,0095         | 0,0191              |
| 2                      | 6,9                  | 22                    | 0,8358      | 0,0502         | 0,1003              | 3                      | 2,6                  | 13                    | 0,1931      | 0,0116         | 0,0232              |
| 7                      | 6,9                  | 29                    | 0,8358      | 0,0502         | 0,1003              | 3                      | 2,7                  | 16                    | 0,2050      | 0,0123         | 0,0246              |
| 4                      | 7                    | 33                    | 0,8564      | 0,0514         | 0,1028              | 3                      | 2,9                  | 19                    | 0,2296      | 0,0138         | 0,0276              |
| 3                      | 7                    | 36                    | 0,8564      | 0,0514         | 0,1028              | 5                      | 3                    | 24                    | 0,2423      | 0,0145         | 0,0291              |
| 21                     | 7,1                  | 57                    | 0,8772      | 0,0526         | 0,1053              | 6                      | 3,6                  | 30                    | 0,3236      | 0,0194         | 0,0388              |
| 44                     | 7,1                  | 101                   | 0,8772      | 0,0526         | 0,1053              | 3                      | 4,3                  | 33                    | 0,4290      | 0,0257         | 0,0515              |
| 1                      | 0                    | 102                   | 0,0000      | 0,0000         | 0,0000              | 4                      | 4,5                  | 37                    | 0,4611      | 0,0277         | 0,0553              |
|                        |                      |                       |             |                |                     | 2                      | 5                    | 39                    | 0,5450      | 0,0327         | 0,0654              |
|                        |                      |                       |             |                |                     | 10                     | 5                    | 49                    | 0,5450      | 0,0327         | 0,0654              |
|                        |                      |                       |             |                |                     | 13                     | 5                    | 62                    | 0,5450      | 0,0327         | 0,0654              |
|                        |                      |                       |             |                |                     | 2                      | 4,2                  | 64                    | 0,4133      | 0,0248         | 0,0496              |
|                        |                      |                       |             |                |                     | 4                      | 3,3                  | 68                    | 0,2819      | 0,0169         | 0,0338              |
|                        |                      |                       |             |                |                     | 4                      | 2,3                  | 72                    | 0,1589      | 0,0095         | 0,0191              |
|                        |                      |                       |             |                |                     | 4                      | 1,8                  | 76                    | 0,1077      | 0,0065         | 0,0129              |
|                        |                      |                       |             |                |                     | 3                      | 1,6                  | 79                    | 0,0894      | 0,0054         | 0,0107              |
|                        |                      |                       |             |                |                     | 6                      | 1,2                  | 85                    | 0,0566      | 0,0034         | 0,0068              |
|                        |                      |                       |             |                |                     | 2                      | 0,8                  | 87                    | 0,0297      | 0,0018         | 0,0036              |
|                        |                      |                       |             |                |                     | 2                      | 0,4                  | 89                    | 0,0099      | 0,0006         | 0,0006              |
| <b>Total</b>           | <b>102</b>           |                       |             |                | <b>1,1416</b>       |                        |                      | <b>89</b>             |             |                | <b>0,6326</b>       |

Dados:

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| Número de Medidas       | 12     |
| Tempo de Inflow:        | 102    |
| Vazão Constante(m3/min) | 0,0514 |
| Vazão Média (m3/min)    | 0,0503 |
| Volume Aplicado(m³)     | 4,85   |

Volume infiltrado(m³) **3,63**

Dados:

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| Número de Medidas       | 23     |
| Tempo de outflow:       | 89     |
| Vazão Constante(m3/min) | 0,0327 |
| Vazão Média (m3/min)    | 0,0138 |
| Volume de Runoff(m³)    | 1,22   |