

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

AVALIAÇÃO DA IRRIGAÇÃO POR SULCOS EM SOLOS COM CAMADA DE
IMPEDIMENTO

ALVARO MOREIRA ROTA

Orientador: Joel Goldenfum

Banca examinadora:

Adroaldo Dias Robaina (DER-UFSM)

André Luiz Lopes da Silveira (IPH-UFRGS)

Rita de Cássia Fraga Damé (DEA-UFPel)

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento
Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a
obtenção do título de Doutor em Engenharia

Porto Alegre, agosto de 2003

I. APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação do Prof. Joel Goldenfum, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

O apoio financeiro foi concedido pela Universidade Federal de Pelotas (UFPel), instituição de origem do autor, e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

II. AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Joel Goldenfum. Ao Prof. Raul Dorfman (*in memorim*), primeiro orientador neste trabalho.

Aos funcionários da Granja Pitanga, sem ajuda dos quais não teria sido possível realizar os ensaios de campo.

Aos colegas professores e alunos do Curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Pelotas, pela compreensão durante o período de realização deste curso.

Aos meus pais (*in memoriam*), pelo grande incentivo que sempre me deram para que estivesse sempre aperfeiçoando meus conhecimentos.

Finalmente à minha esposa Gladis, pelo incentivo para a realização do curso e elaboração deste trabalho de tese.

III. RESUMO

O objetivo deste trabalho foi o de analisar o movimento da água no perfil de solos hidromórficos, do tipo glei, com camada de impedimento, quando irrigados por sulcos. Esses solos têm vocação para o cultivo do arroz irrigado por inundação, sendo considerados marginais para outros cultivos. A monocultura, decorrente dessas características, traz consigo o surgimento de limitações ao cultivo, destacando-se entre elas o surgimento de invasoras como arroz vermelho e preto, (*Oryza sativa L.*) que, por serem da mesma espécie da planta cultivada, não podem ser erradicadas por meio de controle químico com aplicação de herbicidas.

A introdução de cultivos alternativos ao de arroz é limitada, entre outros fatores, pela pequena capacidade de armazenamento de água desses solos, o que torna a irrigação prática imprescindível nesses casos. A pequena profundidade da camada impermeável, entretanto, constitui um impedimento à penetração tanto do sistema radicular como da água. Considerando que, neste método a profundidade de umedecimento não é a mesma, em consequência de o tempo de permanência da lâmina sobre a superfície também não ser o mesmo, para que a profundidade mínima de irrigação seja igual à profundidade do sistema radicular, haverá sempre um excesso que irá percolar além dessa profundidade. Como a profundidade destes solos está em torno de 0,40m, o excesso de água ao ter sua percolação impedida, tende a saturar o perfil de maneira ascendente, a partir da camada de impedimento.

Buscando uma contribuição para a solução da problemática, procurou-se acompanhar o movimento da água de irrigação no perfil desse tipo de solo, quando irrigado pelo método de sulcos. Para tal, foi implantado um cultivo de sorgo granífero (*Sorghum bicolor L.*), irrigado por sulcos retilíneos com 200m de comprimento e espaçamento de 0,95m. O movimento da água no interior do solo foi monitorado por meio das variações de umidade, com a utilização da prática da reflectometria no domínio do tempo (TDR).

As variações do conteúdo de água do solo, durante e após 24 horas cessada a irrigação, indicaram que a distribuição da água no perfil do solo foi bastante boa, não restando pontos com deficiência de umidade e não alcançando, a saturação, uma altura muito significativa, que pudesse comprometer o desenvolvimento de cultivos mesofíticos.

A eficiência de aplicação calculada foi de 84%, considerada muito alta para esse método de irrigação.

Foi aplicado, utilizando-se os dados do experimento, um modelo de simulação de irrigação superficial, desenvolvido pelo U. S. Water Conservation Laboratory, do U. S. Department of Agriculture, Simulation Irrigation Model SRFR. A simulação realizada pelo modelo não representou o movimento da água no solo, da mesma forma como este foi observado no campo.

IV. ABSTRACT

The objective of the present work was to analyze the water movement in the profile of hydromorphic soils, clay type, with an impediment layer, when irrigated by furrows. These soils are destined for the cultivation of rice irrigated by inundation, being considered marginal for others cultures. The monoculture, due to those characteristics, leads to the appearance of limitations to the rice cultivation, mainly the appearance of weeds, such as the red and the black rice (*Oryza sativa* L.) that can not be eliminated by chemical control with herbicides because they belong to the same species of the cultivated rice.

The introduction of a culture alternative to the rice is limited, among others factors, by the low capacity of water storage of these soils, fact that makes of the irrigation an obligatory practice. The small depth of the impermeable layer, however, is an impediment to the radicular system and water penetration. Considering that in the furrow irrigation the wetting depth is not the same, because the time in which the water layer remains on the surface is not the same too, in order the minimal irrigation depth be equal to the system radicular depth, there will be always an excess of water that will percolate beyond that depth. As the depth of these soils is around 0,40m, the excess of water, having its percolation impeded, tends to saturate the profile in an ascensive way, from the layer of impediment. Attempting to contribute for the solution of this problem, the present work had the objective of following the irrigation water movement in the profile of this type of soil, when irrigated by furrows.

In order to accomplish that it was carried out a crop of grain sorghum (*Sorghum bicolor* L.), irrigated by straight furrows measuring 200m of extension and 0,95m spaced. The movement of the water inside the soil was monitored by the moisture variations using the Time Domain Reflectometry (TDR) technique.

The variations of the water content in the soil, during and after 24 hours stopped the irrigation, indicated that the water distribution in the soil profile was good enough, not remaining moisture deficiency spots and not reaching the saturation, a very significant high, that could hinder the development of mesophytic cultures.

The calculated efficiency of application was 84%, value that is considered very high for furrow.

It was applied, using the experimental data, the Surface Irrigation Simulation Model SRFR, developed by the U. S. Water Conservation Laboratory of U. S. Department of

Agriculture. The simulation performed by the model didn't represent the real water movement in the soil.

V. ÍNDICE	
I. APRESENTAÇÃO	II
II. AGRADECIMENTOS	III
III. RESUMO	IV
IV. ABSTRACT	VI
V. ÍNDICE	VIII
VI. LISTA DE SÍMBOLOS	XI
VII. LISTA DE FIGURAS	XIV
VIII. LISTA DE TABELAS	XVI
1. Introdução	1
2. Objetivos	5
3. Revisão de literatura	6
3.1. Noções sobre solos hidromórficos	6
3.2. Principais métodos de irrigação – Visão geral	8
3.3. Fundamentos hidráulicos da irrigação de superfície	13
3.3.1. Equação da continuidade	13
3.3.2. Equação da quantidade de movimento	14
3.4. Infiltração da água no solo	18
3.4.1. Fatores que afetam a infiltração	22
3.4.2. Métodos de simulação da infiltração	23
3.5. Métodos de determinação da umidade do solo	35
3.5.1. Reflectometria no domínio do tempo	35
3.5.2. Tensiômetro	38
3.5.3. Sonda de nêutrons	39
4. Metodologia	40

4.1. Instalação experimental.....	40
4.1.1. Preparação da área experimental	41
4.2. Instrumentação.....	42
4.3. Procedimentos experimentais.....	44
4.3.1. Determinação da vazão máxima.....	46
4.3.2. Infiltração.....	47
4.3.3. Avanço da corrente de água no sulco	50
4.3.4. Determinação da seção de escoamento do sulco.....	50
4.3.5. Determinação da umidade do solo.....	51
4.3.6. Determinação da água disponível no solo	52
4.3.7. Determinação da lâmina e do volume de água a aplicar	52
4.3.8. Tempo de aplicação da lâmina de água	53
4.3.9. Monitoramento da variação do conteúdo de água do solo durante a irrigação.....	54
4.4. Modelo SRFr	54
5. Resultados e discussão	58
5.1. Avaliação das curvas do TDR	58
5.2. Determinações preliminares	59
5.2.1. Vazão máxima.....	60
5.2.2. Infiltração.....	60
5.2.3. Determinação da umidade do solo.....	64
5.2.4. Água disponível no solo	67
5.2.5. Lâmina de água a aplicar.....	68
5.2.6. Volume necessário a aplicar aos sulcos.....	68
5.2.7. Tempo para incorporar a lâmina de água.....	68
5.2.8. Avanço da corrente de água no sulco	69

5.2.8.1. Duração das fases de avanço e armazenamento.....	71
5.5.1. Fase de avanço	71
5.5.2. Fase de armazenamento.....	72
5.6. Tempo verificado de aplicação de água ao sulco (<i>ta</i>)	74
5.7. Volume de água aplicado em cada sulco	74
5.8. Estimativa inicial da eficiência de aplicação	75
5.9. Monitoramento da variação do conteúdo de água do solo durante a irrigação.....	76
5.10. Frentes de avanço superficial, de infiltração e de saturação calculadas	88
5.11. Lâmina de água aplicada	91
5.12. Umidade inicial	92
5.13. Verificação da eficiência de aplicação.....	93
5.14. Saturação do perfil do solo	94
5.15. Aplicação do modelo SRFr	94
6. Conclusão e recomendações	102
Recomendações	107
7. Referências bibliográficas	108
1 ANEXOS	A
A.1. Classificação do solo.....	A
A.1.1. Ficha de resultados.....	A
A.1.2. Análise granulométrica.....	B
A.1.3. Porosidade.....	C

VI. LISTA DE SÍMBOLOS

<i>AFD</i>	água facilmente disponível
<i>y</i>	altura de lâmina de água
<i>ym</i>	altura máxima da lâmina de água
<i>A</i>	área de seção transversal
<i>CC</i>	capacidade de campo
<i>n</i>	coeficiente de rugosidade de Mannig
<i>L</i>	comprimento qualquer
<i>K</i>	condutividade hidráulica
<i>Ka</i>	constante dielétrica
θ	conteúdo volumétrico de água no solo
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
<i>S₀</i>	declividade do fundo do sulco
<i>D</i>	difusibilidade
<i>d</i>	distância qualquer
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias
<i>Ea</i>	eficiência de aplicação
τ	esforço cortante
<i>E</i>	espaçamento entre sulcos
<i>S_f</i>	fator de sucção e armazenamento
<i>q</i>	fluxo de água no solo
<i>F</i>	força
<i>g</i>	gravidade
<i>I</i>	infiltração

t	instante de tempo qualquer
IPH/UFRGS	Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
La	lâmina aplicada
Ll	lâmina líquida
Lma	lâmina média aplicada
Lmp	lâmina média percolada
Lr	lâmina perdida para fora do sulco
T	largura de lâmina de água
b	largura do fundo do sulco
ρ	massa específica
γ	peso específico
z	potencial gravitacional
ϕ	potencial matricial
P	profundidade
p	pressão
QM	quantidade de movimento
s	salinidade
S	sortividade
i	taxa de infiltração
ta	tempo de avanço
t	tempo de infiltração
TDR	time domain reflectometry
hm	tirante máximo de água
UA	umidade atual

UFPel	Universidade Federal de Pelotas
Q	vazão
v	velocidade
VBI	velocidade básica de infiltração
V	volume
V_{aa}	volume a aplicar
V_a	volume aplicado
V_n	volume necessário

VII. LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Elemento de massa líquida dentro do fluxo não-permanente no sulco	14
Figura 3.2 – Visão ampliada do elemento de fluido no sulco	16
Figura 3.3 – Perfil de umidade típico do solo durante o processo de infiltração.....	22
Figura 4.1 – Croqui de localização da área de instalação do ensaio	42
Figura 4.2 – TDR , placa multiplexadora e guias de onda.....	43
Figura 4.3 - TDR e placa multiplexadora no campo.....	44
Figura 4.4 – Croqui de instalação das guias de onda.....	45
Figura 4.5 - Vista parcial do cultivo de sorgo.....	46
Figura 4.7 - Vertedores no início dos sulcos	47
Figura 4.8 - Calha WSC ou Chamberlain.....	49
Figura 5.2 - Trecho de sulco com assoreamento de material	60
Figura 5.3 – Taxa de infiltração	63
Figura 5.4 - Curva de retenção	65
Figura 5.5 – Avanço da corrente de água no sulco	70
Figura 5.6 – Tempos em que as frentes de infiltração e de avanço superficial atingiram cada sensor e estaca de localização destes na superfície. Primeira repetição.	80
Figura 5.7 – Frentes de avanço superficial, de infiltração e de saturação em cada estação, primeira repetição.....	80
Figura 5.8 – Tempos em que as frentes de infiltração e de avanço superficial atingiram cada sensor e estaca de localização destes na superfície. Segunda repetição.	82
Figura 5.9 – Frentes de avanço superficial, de infiltração e de saturação em cada estação. Segunda repetição.....	82
Figura 5.10 – Tempos em que as frentes de infiltração e de avanço superficial atingiram cada sensor e estaca de localização destes na superfície. Terceira repetição.....	84

Figura 5.11 - Frentes de avanço superficial, de infiltração e de saturação em cada estação. Terceira repetição.....	84
Figura 5.12 – Tempos em que as frentes de infiltração e de avanço superficial atingiram cada sensor e estaca de localização destes na superfície. Média entre a primeira repetição e a terceira repetição	87
Figura 5.13 - Frentes de avanço superficial, de infiltração e de saturação em cada estação. Média da primeira e terceira repetição.....	88
Figura 5.14 - Frentes calculadas de avanço superficial, de infiltração e de saturação em cada estação. Primeira repetição.....	89
Figura 5.15 - Frentes calculadas de avanço superficial, de infiltração e de saturação em cada estação. Segunda repetição.....	90
Figura 5.16 - Frentes calculadas de avanço superficial, de infiltração e de saturação em cada estação. Terceira repetição.	90
Figura 5.17 - Frentes calculadas de avanço superficial, de infiltração e de saturação em cada estação. Média entre a primeira e terceira repetição.	91
Figura 5.18 – Lâminas de água sobre o fundo do sulco, linha de umedecimento da lâmina de infiltração e linha de saturação.....	99

VIII. LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Teores de umidade do solo, pelo método volumétrico de amostragem e com o TDR.....	59
Tabela 5.2 – Teste de infiltração	62
Tabela 5.10 – Curva de retenção – Tensão (MPa)/ Umidade θ (%)	64
Tabela 5.11 - Conteúdo de umidade determinado através da curva de retenção.....	66
Tabela 5.3 – Curva de avanço de água no sulco.....	70
Tabela 5.4 – Tempo registrado em cada estaca e em cada sulco, da frente de avanço.....	71
Tabela 5.5 – Duração da fase de avanço.....	72
Tabela 5.6 - Valores médios de duração da fase de avanço.....	72
Tabela 5.7 – Duração da fase de armazenamento.....	73
Tabela 5.8 - Valores médios de duração da fase de armazenamento	73
Tabela 5.9 – Tempo de aplicação de água ao sulco.....	74
Tabela 5.12 – Conteúdos de água do solo (θ %) durante a realização do teste de irrigação do sulco, da primeira repetição.....	77
Tabela 5.13 - Tempo em que a frente de umedecimento atingiu cada ponto de profundidade nas respectivas estações - primeira repetição.....	79
Tabela 5.14 – Conteúdos de água do solo durante a realização do teste de irrigação do sulco, segunda repetição.....	81
Tabela 5.15 - Tempo em que a frente de umedecimento atingiu cada ponto de profundidade nas respectivas estações - segunda repetição	81
Tabela 5.16 – Conteúdos de água do solo durante a realização do teste de irrigação do sulco, terceira repetição.....	83

Tabela 5.17 - Tempo em que a frente de umedecimento atingiu cada ponto de profundidade nas respectivas estações - terceira repetição	83
Tabela 5.18 – Conteúdos de água do solo durante a realização do teste de irrigação do sulco. Média da primeira e terceira repetição.	86
Tabela 5.19 - Tempo em que a frente de umedecimento atingiu cada ponto de profundidade nas respectivas estações – Média entre a primeira e terceira repetição.	87

1. Introdução

A irrigação por escoamento superficial é um dos processos mais antigos de irrigação do solo. Mesmo assim, é ainda hoje um dos meios mais utilizados no mundo inteiro para aplicar ao solo a quantidade de água necessária para repor os déficits hídricos que, em maior ou menor escala, ocorrem nas áreas agrícolas. Dentre os métodos de irrigação por escoamento superficial, o de sulcos é aquele que apresenta maior eficiência de irrigação e, em consequência, o de maior economia de água, recurso cada vez mais escasso.

Os volumes de água perdidos durante o processo de irrigação, neste caso, consistem na água que sai para fora do sulco no seu final, por escoamento superficial, e aquele resultante das diferenças de profundidade irrigada no início e no final do sulco, devido basicamente à diferença de tempo da permanência da água nesses dois pontos, ao longo da irrigação.

Dentre as características que deve apresentar a área a ser irrigada, para que este método tenha sucesso, está a profundidade de irrigação, a qual, quanto maior for, menor será o percentual de água perdida por percolação abaixo do sistema radicular (WALKER & SKOGERBOE, 1987). Este valor consiste na diferença de profundidade irrigada no início e no final da parcela, sendo que a menor profundidade, no final, deve ser correspondente à profundidade mínima a ser irrigada. Outra característica necessária está relacionada com a velocidade da frente de avanço da água no sulco, que quanto maior for, menor será a diferença de tempo de permanência de aplicação no início e no final do sulco. Se for verificada baixa velocidade de infiltração, associada a essa velocidade de aplicação com a utilização de altas vazões, o benefício em termos de eficiência é maior ainda, tendo em vista

que menores diferenças de volume aplicado no início e no final do sulco serão registradas (WALKER & SKOGERBOE, 1987).

Os solos hidromórficos do tipo glei, ou gleissolos, apresentam, a pequena profundidade, uma camada impermeável que limita o desenvolvimento do sistema radicular, caracterizando-se como uma camada de impedimento. Esta condição faz com que, ao examinar-se a primeira condição anteriormente mencionada, considere-se esse solo potencialmente não-adequado à irrigação por sulcos. Entretanto, tendo em vista que esses solos ocorrem associados à topografia plana, o que permite a utilização de altas vazões (BERNARDO, 1995), e que apresentam uma baixa velocidade de infiltração, estes atendem à segunda das características exigidas, mencionadas anteriormente, ou seja, a utilização de altas vazões em solos com baixa velocidade de infiltração.

As áreas agrícolas onde predomina esse tipo de solo são normalmente exploradas com arroz irrigado. Sua utilização com outros tipos de exploração agrícola, apesar da necessária rotação de cultivos sempre presente, é limitada pela necessidade de irrigação, tendo em vista que a pequena espessura da camada superficial, resultante da presença da camada impermeável, confere a estes um limitado reservatório de água.

A exploração dessas áreas com outras culturas, tais como sorgo, soja, milho ou girassol, em rotação com o arroz, exige, desse modo, a adoção da prática da irrigação. O método de irrigação por sulcos apresenta custos bastante inferiores àqueles de aspersão e de irrigação localizada, e apresenta maior economia de água que os métodos de irrigação por faixa e inundação. Entretanto, a diferença de profundidade irrigada no início e no final do sulco, quando muito pronunciada, pode vir a inviabilizar a utilização desse método devido ao fato de que, na presença da camada de impedimento, a água, ao não ter condições de percolar a maiores profundidades, iniciaria um processo de saturação do solo no sentido ascendente a

partir da camada impermeável, que, dependendo de seu alcance, poderia impedir, no trecho inicial do sulco, o desenvolvimento da cultura em nível economicamente aceitável.

Como consequência do fato de que, quanto maior a profundidade de irrigação, melhores as condições para a adoção do método de irrigação por sulcos, e de que os solos ora enfocados apresentam uma camada de impedimento a pequena profundidade, poucos são os trabalhos de irrigação por sulcos nesse tipo de solo.

O primeiro questionamento que se faz, quando cogitada a utilização da irrigação por sulcos nesse tipo de solo, está relacionado com o comportamento da altura de saturação do solo. Sendo o tempo de permanência da água durante a irrigação maior no início do que no final do sulco, ao ser atingida a capacidade de campo no final do sulco, a lâmina de água aplicada no início será maior do que a necessária. Devido à presença da camada de impedimento, a água em excesso não irá percolar, mas dará início a um processo de saturação no sentido ascendente a partir dessa camada. Tanto maior será a lâmina de saturação quanto maior for a diferença no tempo de permanência da água no início e no final do sulco. Duas são as maneiras de diminuir-se essa diferença no tempo de permanência: diminuindo o comprimento do sulco ou aumentando a velocidade de escoamento da frente de avanço da água no sulco. A primeira solução é limitada por um comprimento mínimo que viabilize economicamente a adoção do método, pois, caso contrário, a área perdida com canais e área de manobra de máquinas, que são fixas, assumiriam percentuais muito altos. A segunda é limitada por uma velocidade de fluxo que não provoque erosão, ou que atinja a capacidade máxima de transporte sem trasbordamento.

Outra fonte de perda de água no processo de irrigação por sulcos está relacionada ao escoamento para fora no final do sulco. Esta perda, entretanto, não se encontra relacionada à

presença da camada de impedimento a pequena profundidade. Em razão disso, este trabalho não se propõe a determinar a mesma.

O movimento da água no sulco de irrigação, de acordo com STRAUCH (1985), pode ser subdividido em quatro fases: avanço, armazenamento, depleção e recessão. A fase de avanço inicia com a adução da água ao sulco e termina quando a frente alcança o final deste. A fase de armazenamento ou de inundação inicia com o término da fase de avanço e continua até a interrupção da adução de água ao sulco, quando então começa a fase de depleção, a qual se prolonga até que a lâmina de água na extremidade superior do sulco seja extinta. Finalmente, a fase de recessão inicia com o final da depleção e estende-se até que não ocorra nenhum depósito de água na superfície.

Assim sendo, sente-se a necessidade de determinar o valor de saturação, para um comprimento de sulco que possa permitir suficiente rentabilidade ao cultivo para torná-lo atrativo economicamente, em comparação com outras alternativas de exploração agrícola para essa situação, quando adotada a maior velocidade de fluxo permissível.

2. Objetivos

O objetivo deste trabalho consiste em analisar o movimento da água no perfil de solos hidromórficos do tipo glei, quando irrigados por sulcos.

Para atingir este objetivo, as seguintes etapas são propostas:

- i. Estabelecer o perfil da frente de infiltração até a camada impermeável, durante e após as fases de avanço e armazenamento.

- ii. Estabelecer o perfil da frente de saturação a partir da camada de impedimento em direção à superfície, durante e após as fases de avanço e armazenamento.

3. Revisão de literatura

3.1. Noções sobre solos hidromórficos

De acordo com a classificação americana de solos de 1938, denominada sistema de BALDWIN, KELLOG e THORP, revisada em 1949 por THORP e SMITH, os solos hidromórficos pertencem à ordem intrazonal (OLIVEIRA, 1972). De acordo com BALDWIN et al (1938), apud OLIVEIRA (1972), solos intrazonais são solos com perfil mais ou menos bem desenvolvido, refletindo mais a influência de fatores pedogenéticos locais, como topografia ou material de origem, que os efeitos normais do clima e da vegetação. Segundo esse autor, esses solos não apresentam características tão bem desenvolvidas como os zonais, em grande parte devido à influência da água no perfil. Essa influência está condicionada principalmente ao relevo.

As características advindas do encharcamento desses solos podem ocasionar um acúmulo de matéria orgânica ou fenômeno gleização, provocado pela redução e solubilização dos compostos de ferro, que é evidenciado pela cor cinza e por mosqueamento.

No tipo intrazonal encontra-se parte dos solos cuja drenagem natural é insuficiente ou quase nula, sendo característica quase geral a abundância de sais, alguns dos quais são tóxicos para as plantas cultivadas (MELA MELA, 1963).

Segundo RESENDE (1988), esses solos apresentam espessa camada escura de matéria orgânica mal decomposta, sobre camada acinzentada (gleizada). Devido ao ambiente de oxirredução, muitos elementos tornam-se solúveis, podendo atingir, inclusive, níveis tóxicos.

Associados aos aspectos de má drenagem, os solos hidromórficos apresentam, em sua maioria, densidade naturalmente elevada, relação micro/macroporos muito alta, e baixa capacidade de armazenamento de água na camada superficial, principalmente os que apresentam horizonte *A* raso, de textura predominantemente franco arenosa (PINTO et al, 1999).

Segundo esses autores, as principais classes em que estão incluídas esses solos são: planossolos, gleissolos, chernossolos ebânicos e chernossolos argilúvicos, plintossolos, vertissolos flúvicos e neossolos quartzanênicos hidromórficos. Os gleissolos caracterizam-se por apresentar um horizonte com cores cinzentas, horizonte glei, que começa dentro de 50cm da superfície, indicativo de formação em ambiente de redução devido à saturação por água por pelo menos um longo período do ano. Declaram os autores que, dentre os gleissolos, os gleissolos melânicos eutróficos, apresentam um horizonte *A* húmico, com menos de 40cm de espessura, escuro, sendo por isso, denominados melânicos.

De acordo com STRECK et al (2002), o SBCS (Sistema Brasileiro de Classificação do Solo, Embrapa, 1999) estabelece seis níveis, chamados de níveis categóricos para a classificação dos solos. No primeiro desses níveis, os solos são diferenciados em 14 ordens, conforme as características que representam. Entre essas ordens, incluem-se os gleissolos. De acordo com esses autores, esses solos apresentam uma seqüência de horizontes *A-Cg* ou *A-Bg-Cg* ou *H-Cg*, onde os horizontes *Bg* e *Cg* são do tipo glei. Os gleissolos com horizonte superficial *A* ou *H*, com maior espessura e teor de material orgânico, foram classificados como melânicos no SBCS.

PINTO et al (1999) salientam que os principais fatores limitantes dos gleissolos estão relacionados às más características físicas e à drenagem deficiente, com lençol freático muito próximo da superfície. Em razão disso, o arroz irrigado é a cultura recomendada para esse

solo. Entretanto, em áreas onde for possível manter um bom sistema de drenagem, podem ser cultivados com culturas anuais.

KLAMT & KÄMPF (1985) mencionam que esses solos têm uma fertilidade natural maior que os planossolos. Segundo os mesmos autores, em alguns casos podem apresentar concreções de carbonato de cálcio, horizonte C_{ca} .

De acordo com PARFITT & SILVA (1995) e BELTRAME & LOUZADA (1996), a área de solos hidromórficos no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, ultrapassa 3 milhões de ha. Esses solos têm sido tradicionalmente cultivados com arroz irrigado, sendo seguido, esse cultivo, de um período de pousio de 3 a 4 anos, conforme PARFITT et al (1996). O monocultivo de arroz irrigado em solos hidromórficos, de forma intensiva, vem ocasionando-lhe problemas de degradação e, principalmente, uma alta infestação de arroz daninho (vermelho e preto), (PORTO et al 1996). Segundo esses autores, as várzeas do Rio Grande do Sul, Brasil, eram a fronteira agrícola de expansão de cultura do milho em rotação com arroz irrigado. Esses pesquisadores obtiveram, em ensaios de cultivo de milho irrigado nesse tipo de solo, produtividade de até 8.387 kg/ha, considerada muito alta para esse tipo de solo.

A irrigação de outras culturas que não o arroz inundado, nesse tipo de solo, como já mencionado anteriormente, encontram dificuldades tanto no que diz respeito à irrigação, quanto em relação à drenagem.

3.2. Principais métodos de irrigação – Visão geral

A prática da irrigação de cultivos agrícolas tem o objetivo de aplicar água ao solo de modo a estabelecer um teor de umidade que permita se obterem produções com a maior relação custo/benefício possível. Os métodos de irrigação traduzem o modo como é realizada

a irrigação. Os métodos de irrigação são os de aspersão, gotejamento, sulcos e inundação. Já BERNARDO (1982), afirma que os métodos de sulcos e de inundação, juntamente com os de faixa e subirrigação, compõem os métodos classificados como de superfície. LOPEZ et al (1997) classificam o gotejamento como uma das variantes da irrigação localizada, assim como a microaspersão. Os métodos de irrigação podem ser classificados em irrigação localizada, incluindo o gotejamento e a microaspersão, irrigação por aspersão, irrigação por escoamento superficial, na qual estão incluídos os métodos de sulcos e faixas, irrigação por inundação e subirrigação.

O método de irrigação por sulcos, de acordo com OLITTA (1977), consiste na condução da água em pequenos canais ou sulcos situados paralelamente às linhas de cultivo, durante o tempo necessário para que a água infiltrada ao longo do sulco seja suficiente para umedecer o solo na zona radicular da cultura. Depois do método de faixas, o método de sulcos é o mais utilizado na Austrália para irrigar cultivos em linha, como algodão, milho, cana-de-açúcar e leguminosas em geral (ESFANDIARI & MAHESHWARI, 2001).

Na irrigação por sulcos, a água infiltra-se no solo no sentido vertical e horizontal, formando um bulbo úmido. A superposição adequada dos bulbos correspondentes a dois sulcos vizinhos, umedece o perfil do solo até a profundidade desejada. Para atingir a superposição ideal, que irá resultar em uma mesma profundidade umedecida, é necessário combinar o espaçamento entre os sulcos, com a profundidade pretendida de umedecimento, e com o avanço lateral da frente de infiltração. Enquanto a profundidade de irrigação está relacionada com a profundidade do sistema radicular da cultura, o avanço lateral da frente de infiltração está associado à textura do solo. De acordo com PEREIRA et al (1992), as perdas de água na irrigação por sulcos são por escoamento superficial, no final da área, e por percolação profunda.

Esse método apresenta grande vantagem em relação aos pressurizados, em razão da reduzida energia necessária para aplicar água ao solo. Quando, entretanto, a topografia apresenta-se muito irregular, a necessidade de sistematização do solo pode inviabilizar a adoção deste. Por outro lado, em presença de solos muito arenosos, com alta taxa de infiltração, esse método pode ocasionar profundidades de umedecimento muito desuniformes ao longo da parcela, tendo em vista o fato de a água não ser aplicada concomitantemente em toda a superfície irrigada. Como a água é aplicada ao sulco a partir de um único ponto, o tempo de aplicação não é igual ao longo do trecho, e conseqüentemente, a altura de água aplicada também não é a mesma em todos os pontos.

Buscando minimizar essas variações de altura de água aplicada, e em conseqüência da profundidade de umedecimento, as seguintes práticas de aplicação de água são adotadas, dependendo da situação específica de cada caso: (a) Diferentes vazões em uma mesma irrigação. (b) Sulcos fechados no final.

Na adoção de diferentes vazões, utiliza-se uma vazão máxima que não cause erosão ou que não extravase lateralmente, procurando, desse modo, diminuir o tempo que a frente de avanço leva ao percorrer o sulco. Isso irá diminuir a diferença de tempo de permanência no início e no final do sulco e, desse modo, a altura de água aplicada nesses dois pontos.

A utilização de uma vazão superior àquela correspondente ao volume a ser infiltrado ao longo do sulco, após a frente de avanço atingir o final da parcela, causa desperdício de água. Desse modo, a vazão nessa segunda fase, denominada de armazenamento, tem de ser reduzida a um valor limitado pela taxa de infiltração.

A utilização do final do sulco fechado busca uniformizar a altura de água aplicada, mediante o acúmulo desta na parte final da parcela.

Em vista do exposto, percebe-se que o comprimento do sulco interfere diretamente na uniformidade de aplicação de água. De acordo com FEYEM & ZERIHUN (1999), quanto menor o comprimento do sulco, melhor a uniformidade de distribuição de água. Entretanto, a um menor comprimento, corresponde um maior percentual de superfície perdida com canais, drenos e área de manobra de máquinas. De acordo com a maioria dos trabalhos publicados sobre esse assunto HIDALGO GRANADOS (1971), OLITTA (1977), BERNARDO (1995), WALKER & SKORGERBOE (1987), um comprimento que contempla de modo equilibrado esses dois fatores é aquele correspondente ao percorrido pela frente de avanço quando, adotada a vazão máxima permissível, segundo o critério anteriormente mencionado, tiver decorrido 1/4 do tempo necessário para incorporar a quantidade de água pretendida.

De acordo com BERNARDO (1995), em razão da velocidade a ser atingida pela água de irrigação no sulco, assim como aquela resultante da precipitação sobre os sulcos, a declividade máxima do sulco deve ficar limitada a 2%. Esse valor máximo está também na dependência da textura do solo, da presença ou não de cobertura vegetal no sulco, assim como das intensidades de precipitação mais frequentes na região. Em certos casos, esse valor não pode ser superior a 1%.

Em solos com camada de impedimento, a frente de infiltração, ao atingir esse horizonte impermeável, inicia um processo de saturação em sentido ascendente, a partir da interface entre as duas camadas. Em solos com baixa velocidade de infiltração, pouca declividade e pouca profundidade, o volume de água armazenada no início é muito significativo. Segundo CLEMMENS (1992), o volume de água armazenada na superfície aumenta com a diminuição da declividade do sulco. Esse fato faz com que, em muitas situações, o tempo total de irrigação seja muito semelhante ao da fase de avanço. Nesta situação, em razão da declividade do sulco, o maior volume de água acumula-se no final,

secando primeiramente no início e, por último, no final. Este fato tende a fazer com que o tempo de permanência da água no início e no final não seja muito diferente e, conseqüentemente, as alturas infiltradas ao longo do sulco.

Para a maioria das condições de irrigação por sulcos em declive, o tempo de recessão é insignificante em comparação ao de avanço e armazenamento, sendo considerado que a fase de recessão tem um efeito negligenciável na programação da irrigação (SCHWANK & WALLANDER, 1988).

Segundo FEYEM & ZERIHUN (1999), na realização do projeto de irrigação por sulcos, os parâmetros, vazões, comprimento, espaçamento de sulcos e tempo de irrigação são definidos com base na declividade, coeficiente de rugosidade, geometria do sulco, tipo de solo e quantidade de água a ser aplicada.

HANSON et al (1997), trabalhando em Fazendas no Vale de Salinas, Califórnia, Estados Unidos, compararam a irrigação por sulcos, gotejamento superficial e gotejamento subsuperficial em cultivos de alface, brócolis e couve-flor. Os autores encontraram rendimentos praticamente iguais para sulcos e gotejamento subsuperficial, entretanto gotejamento superficial apresentou um menor rendimento. SCHWEERS & GRIMES (1976), apud HANSON et al (1997), obtiveram maiores rendimentos em tomate irrigado por gotejamento do que por sulcos. Apesar da vantagem da economia de água, os autores consideram os custos da irrigação por gotejamento, uma grande desvantagem em relação à sulcos. CETIN & BILGEL (2001) compararam os métodos de sulcos, aspersão e gotejamento na irrigação de algodão na Turquia, tendo obtido rendimentos respectivamente de 3.630kg/ha, 3.380kg/ha e 4.380kg/ha.

3.3. Fundamentos hidráulicos da irrigação de superfície

As equações básicas de fluxo em irrigação superficial são as mesmas que descrevem o fluxo em canais e cursos de águas naturais (STRAUCH, 1985). O fluxo de água sobre a superfície do solo é não-permanente, pois considera a variação no tempo e no espaço, das variáveis que o descrevem, (TUCCI, 1993). As equações que retratam o escoamento superficial são as da continuidade e da quantidade de movimento, também conhecidas como equações de Saint-Venant ou de Navier-Stokes.

3.3.1. Equação da continuidade

Consideremos um elemento infinitesimal de massa líquida em um sulco, conforme é mostrado na figura 3.1. No tempo t , as condições de entrada são Q , y , T e I , representando vazão, altura, largura superficial e infiltração. No mesmo tempo t , as condições do lado direito do elemento infinitesimal da massa líquida são $Q + Qx dx$, $y + yx dx$, $T + Tx dx$, e $I + Ix dx$. Como a vazão é igual ao produto da área pela velocidade, os parâmetros de entrada e saída para área e velocidade podem ser escritos como A e $A + Ax dx$, e v e $v + vxdx$, respectivamente. Assumindo-se que o sulco é prismático, então

$$\partial A = T\partial y \quad (3.1)$$

A massa que entra na seção à esquerda é $\rho Q dt$, a massa que infiltra no trecho é $\rho I dx dt$ e a massa que sai na seção à direita é $\rho [(Q + \partial Q/\partial x) dz] dt$. A variação da massa armazenada no

intervalo dt é $\rho(\partial A/\partial t)dx.dt$, sendo Q a vazão; A a área da seção; I a infiltração por unidade de comprimento de trecho; e ρ a massa específica da água. A equação da continuidade baseada na conservação da massa, será:

$$\rho (\partial A/\partial t) dx.dt = Q dt + \rho I dx.dt - \rho [Q + (\partial Q/\partial x)dx]dt$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + I = 0 \quad (3.2)$$

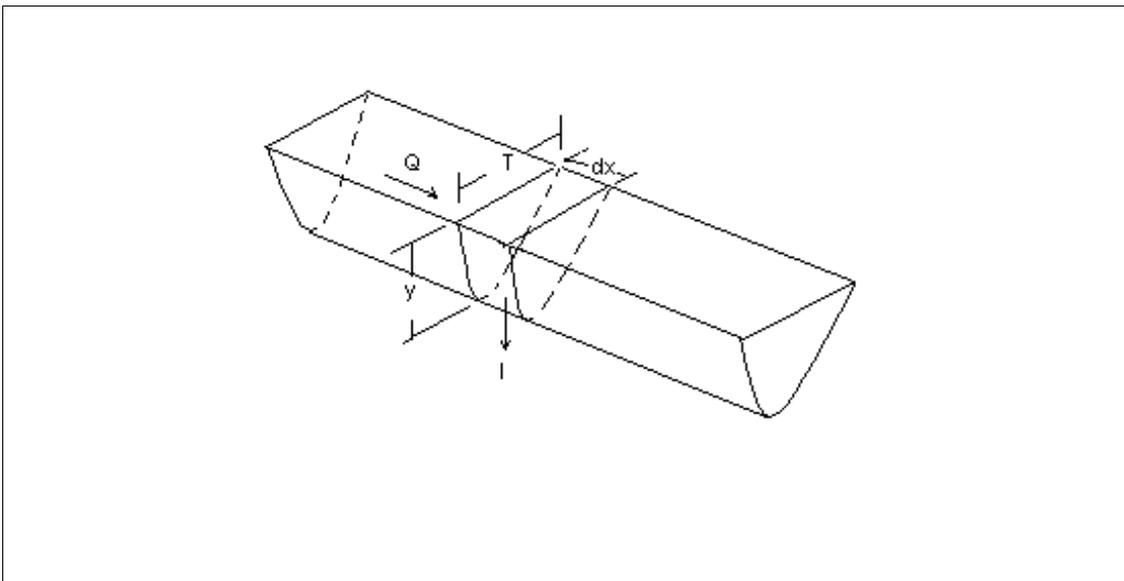


Figura 3.1 – Elemento de massa líquida dentro do fluxo não-permanente no sulco

3.3.2. Equação da quantidade de movimento

Segundo TUCCI (1993), a quantidade de movimento (QM) é obtida pelo somatório dos vetores da quantidade de movimento que entram em um trecho de canal. A quantidade de movimento é o produto da massa pela velocidade, ou seja, $\rho vA = \rho Q$, e o fluxo de QM através

de uma seção é $\rho v^2 A$. A quantidade de movimento que entra no trecho é $\rho Q^2/A$ e a QM que sai é $\rho Q^2/A + [\partial (\rho Q^2/A)/\partial x] dx$, onde ρ é a massa específica do fluido. A QM resultante fica

$$-\left[\frac{\partial(\rho Q^2 / A)}{\partial x} \right] dx \quad (3.3)$$

A variação da QM no trecho é

$$\frac{\partial(\rho Q)}{\partial t} dx \quad (3.4)$$

Em uma visão ampliada da figura 3.1, do elemento de fluido mostrado na figura 3.2, três forças atuam na superfície do elemento: (a) a força da gravidade atuando na direção do fluxo, (b) a força de pressão atuando em cada extremidade do elemento e (c) as forças de atrito ao longo do perímetro molhado.

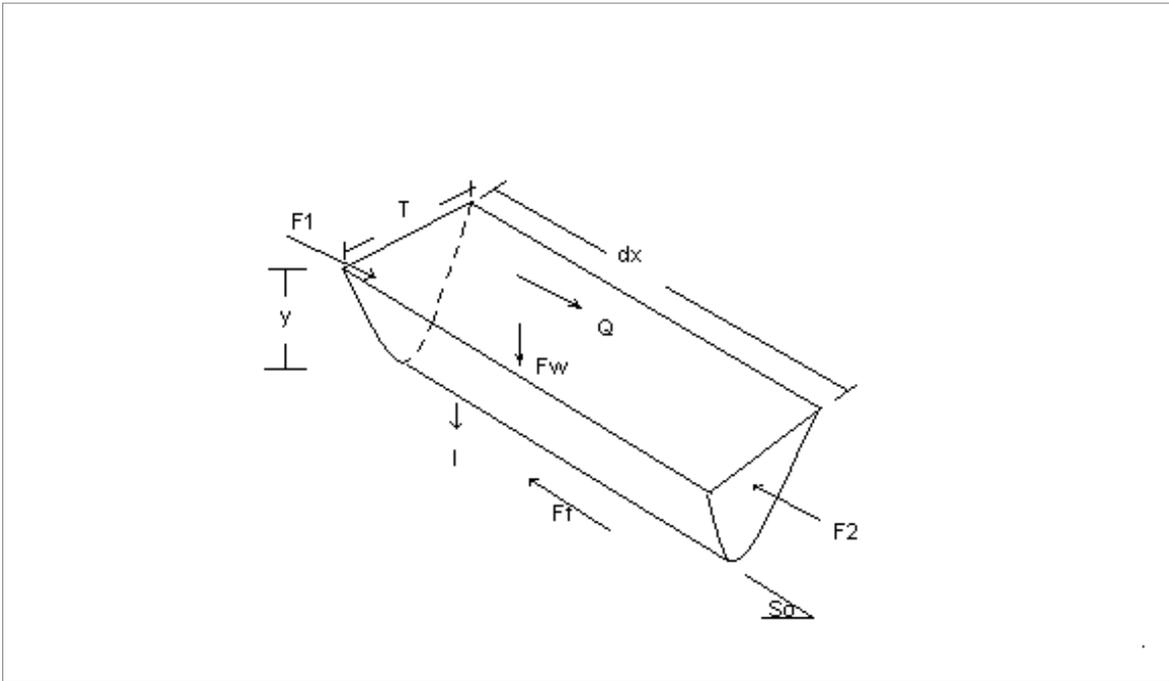


Figura 3.2 – Visão ampliada do elemento de fluido no sulco

a) Força da gravidade

Se a declividade do fundo (S_o) for pequena a ponto de poder ser considerada igual ao seno do ângulo dessa linha com o plano de declividade nula, a componente do peso na direção do fluxo será:

$$F_w = \gamma A S_o dx \quad (3.5)$$

onde γ é o peso específico do fluido, igual ao produto de ρ pela aceleração da gravidade, g .

b) Força de pressão

A força de pressão atuando nos limites do elemento de fluido F_1 e F_2 é o produto do peso específico do fluido γ , a distância da superfície da água ao centróide das áreas limites h e a área A .

Se chamarmos d a distância do fundo do sulco ao centróide da área, teremos

$$y = h + d \quad (3.6)$$

e a força de pressão resultante será

$$F_p = - \gamma A y_x dx \quad (3.7)$$

c) Força de atrito

Considera-se normalmente que o esforço cortante τ em movimento não-permanente é igual àquele de condições de fluxo permanente (CHOW, 1959). A força devida ao atrito da massa líquida com as paredes do sulco é

$$F_f = - \tau P dx \quad (3.8)$$

onde P é o perímetro molhado e τ é o esforço cortante, obtido por

$$\tau = \gamma R S_f \quad (3.9)$$

onde R é o raio hidráulico e S_f a declividade da linha de atrito. Substituindo o valor de τ obtido na equação 3.9, em 3.8, a força de atrito será

$$F_f = \gamma A S_f dx \quad (3.10)$$

Sendo a variação da QM do trecho, equação 3.4, igual à soma da quantidade de movimento que entra no trecho menos a que sai, equação 3.3, mais a soma das forças que atuam no trecho, equações 3.5, 3.7 e 3.9, a equação da quantidade de movimento pode ser escrita como segue

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2 / A)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} = g A S_0 - g A S_f \quad (3.11)$$

As equações 3.2 e 3.11 são as denominadas equações de Saint-Venant.

3.4. Infiltração da água no solo

Todo projeto de irrigação possui parâmetros que são determinados em função do regime de infiltração de água no solo. Devido às características específicas de cada método de irrigação, toda ou somente um trecho da curva de infiltração condicionam o processo de infiltração. De um modo geral, pode-se dizer que, naqueles métodos nos quais a água é aplicada ao solo diretamente no local de infiltração, isto é, sem ocorrência de escoamento superficial nem empoçamento, a intensidade de aplicação de água deverá ser limitada pela

taxa de infiltração correspondente ao tempo de irrigação, isto é, o tempo necessário para aplicar a lâmina de irrigação.

Conseqüentemente, nesses métodos, que são principalmente aspersão e gotejamento, a lâmina acumulada de infiltração será o produto da intensidade de aplicação pelo tempo de irrigação, ou seja, de aplicação.

Naqueles métodos em, que a água não é aplicada simultaneamente em toda a superfície a ser irrigada, isto é, onde sepretende a ocorrência de escoamento superficial, naturalmente haverá acúmulo de água sobre a superfície, e a velocidade com que a água penetra no solo em determinado instante será a própria taxa de infiltração característica daquele solo, naquele momento. Esse é o caso dos métodos de irrigação por escoamento superficial e também os de submersão. Nestes, a lâmina de infiltração acumulada será estabelecida pela integração da função de infiltração.

Diversas são as equações de infiltração propostas para expressar a lei de infiltração de água no solo. São equações desenvolvidas empiricamente, ou a partir de considerações físicas, e aplicam-se somente a solos homogêneos que permanecem homogêneos durante o processo (LIBARDI 1995).

A infiltração é o processo pelo qual a água de precipitação ou irrigação penetra no solo através da superfície. Taxa de infiltração é a quantidade de água que atravessa a unidade de área da superfície do solo por unidade de tempo.

A taxa de infiltração será igual à intensidade de precipitação ou à intensidade de aplicação de água de irrigação, quando esses valores forem inferiores à capacidade de infiltração. Quando a capacidade de infiltração for superada, a taxa de infiltração será limitada por esta.

A infiltração em um solo inicialmente seco ocorre sob a ação combinada dos gradientes de pressão, gravidade e de sucção. O gradiente de sucção é a relação entre a diferença de pressão matricial, negativa, entre a zona de saturação e a frente de umedecimento, e a distância entre elas. De acordo com LIBARDI (1995), a água é retida no solo, em razão das forças capilares e de adsorção, as quais, juntas, são chamadas de forças mátricas.

À medida que a água se infiltra no solo, tem-se o aprofundamento da frente de umedecimento e, conseqüentemente, a distância entre a zona saturada e a frente aumenta, diminuindo o gradiente. A partir de uma determinada profundidade, esse gradiente torna-se desprezível, permanecendo a infiltração como função apenas do gradiente de gravidade. Como este é igual à unidade, pois a altura de gravidade diminui a razão de um centímetro para cada centímetro de profundidade abaixo da superfície, o fluxo tende a permanecer constante e igualar-se à condutividade hidráulica.

Por outro lado, verifica-se que o potencial matricial está relacionado com a capacidade do solo de reter água. A água é retida no solo, nos capilares, pela tensão superficial, e por adsorção na forma de um filme de água em torno das partículas de solo. A força com que a água é retida pelo solo nessas duas formas é inversamente proporcional ao conteúdo de água no solo.

Pelo exposto, conclui-se que os solos secos apresentam uma maior capacidade de retenção e absorção de água e, em conseqüência, uma maior taxa de infiltração. À medida que o solo torna-se mais úmido, a capacidade de infiltração decresce. Isso, entretanto, não é verdade para os solos de textura mais grosseira. Nesses, a participação do potencial matricial no processo não é tão significativa e, desse modo, quando o solo torna-se mais úmido, maior número de poros passa a conduzir água, e maior será a taxa de infiltração.

Percebe-se que o conhecimento de todo o processo de infiltração é de fundamental importância, não só para o entendimento do ciclo hidrológico, mas principalmente para a atividade de irrigação.

O processo de infiltração de água no solo, pode ser dividido em cinco estágios ou zonas, para um perfil de solo homogêneo (figura 3.3). Estes são citados a seguir:

- a) zona saturada: é formada no estágio inicial da infiltração. A espessura dessa camada é de apenas alguns milímetros ou centímetros.
- b) zona de transição: situa-se imediatamente abaixo da anterior. Caracteriza-se por apresentar uma queda rápida no teor de umidade.
- c) zona de transmissão: apresenta um teor de umidade constante, abaixo da saturação e acima da capacidade de campo. A espessura dessa camada aumenta com o tempo.
- d) zona de umedecimento: o teor de umidade decresce rapidamente com a profundidade, formando-se um gradiente de potencial de água entre dois pontos, e conseqüentemente, a condutibilidade hidráulica decresce exponencialmente.
- e) frente de molhamento: é a superfície limite das partes úmida e seca do perfil, onde ocorre o maior gradiente de potencial de água.

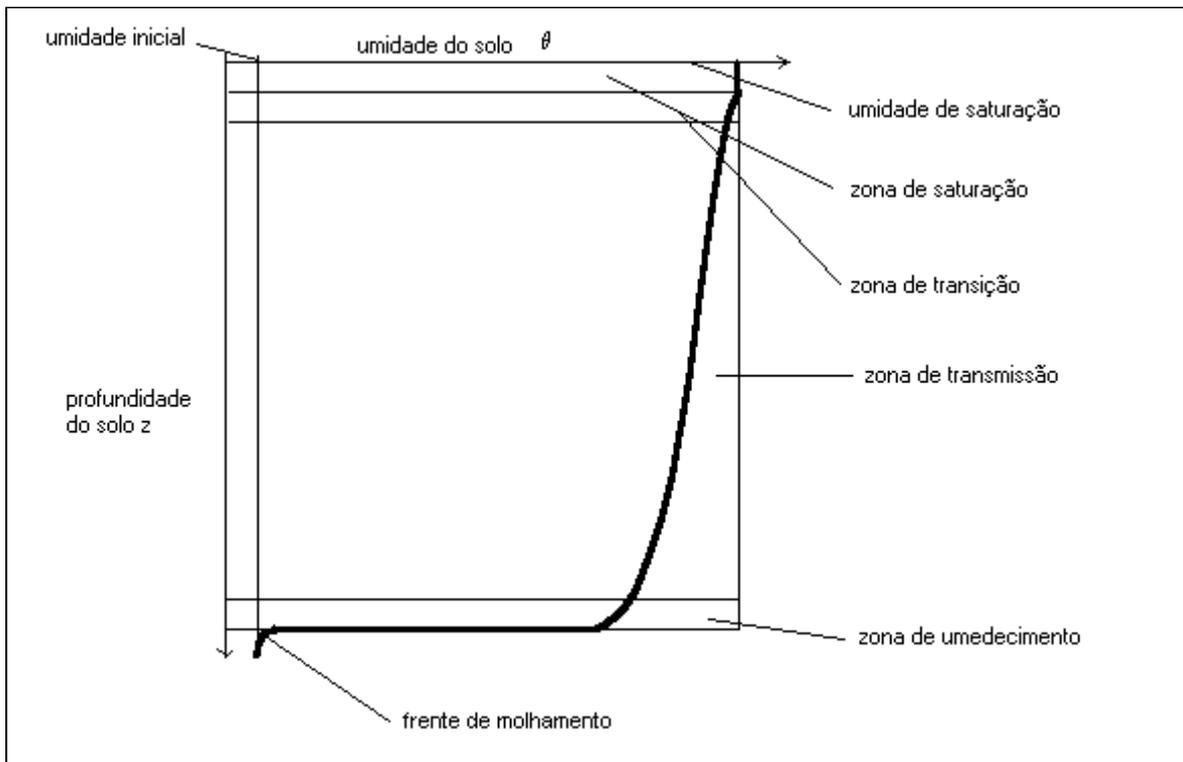


Figura 3.3 – Perfil de umidade típico do solo durante o processo de infiltração

3.4.1. Fatores que afetam a infiltração

- Tempo: a taxa de infiltração decresce com o tempo.
- Teor de umidade inicial: a taxa de infiltração decresce com o aumento do teor de umidade do solo.
- Condutibilidade hidráulica: quanto maior a condutibilidade hidráulica do solo, maior a taxa de infiltração.
- Razão de aplicação de água: quanto maior for a razão de aplicação de água, mais profunda a frente de molhamento para uma mesma quantidade de água aplicada, e menor o teor de umidade do perfil umedecido.

Textura: os solos de textura mais grossa costumam apresentar uma taxa de infiltração inicialmente menor que aqueles de textura mais fina, quando em condições de solo seco. À medida que o solo se torna mais úmido, os solos de textura mais grossa aumentam sua taxa de infiltração, conforme comentado anteriormente.

3.4.2. Métodos de simulação da infiltração

No solo, o escoamento processa-se no sentido do potencial decrescente. O regime de escoamento é proporcional ao gradiente desse potencial e é afetado pelas propriedades geométricas dos poros.

Segundo TUCCI (1993), a extensão da lei de Darcy para solo não-saturado requer que se considere a condutividade hidráulica variável com o teor de umidade e a carga piezométrica, que apresenta dois componentes principais em um solo não-saturado, o potencial matricial ϕ e o gravitacional z . Assim, a equação de Darcy-Buckingham passa a ser a seguinte:

$$q = -K(\theta) \frac{\partial(\phi + z)}{\partial z} \quad (3.12)$$

ou

$$q = -K(\theta) \frac{\partial\phi}{\partial z} - K(\theta) \quad (3.13)$$

No solo saturado, todos os poros estão cheios de água, e a condutividade hidráulica é máxima. À medida que os poros secam, diminui a seção transversal de escoamento. Os poros maiores são os primeiros a secar, o escoamento permanece, então, nos poros de maior

resistência e de maior tortuosidade. Em consequência disso, tem-se que a condutividade hidráulica em solo saturado é um valor constante, enquanto que para solos não-saturados é um valor variável, dependente do conteúdo de umidade.

São as seguintes as equações apresentadas, que simulam a infiltração:

Equação de Richards

Diz-se que o escoamento é não-transitório quando se apresenta constante no tempo e no espaço, que é o caso do escoamento em solo saturado. Por outro lado, o escoamento será transitório quando o fluxo for variável no tempo e no espaço. No escoamento transitório, o teor de água também se apresenta variável durante o escoamento. O escoamento em solo não-saturado é transitório.

De acordo com LIBARDI (1995), a equação de Darcy-Buckingham para fluxo vertical, equação 3.13, não é suficiente para descrever o escoamento transitório que deve obedecer à lei da conservação da massa, expressa na equação da continuidade, que, para fluxo vertical, pode ser representada pela equação 3.14.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z} \quad (3.14)$$

onde $\partial \theta$ é a variação do conteúdo de umidade no tempo, ∂t e ∂q é a variação do fluxo na profundidade ∂z . Esta equação estabelece que quando o fluxo aumenta com a profundidade z , a água contida no solo deve decrescer com o tempo e vice-versa. Substituindo-se, na equação 3.13, o valor do fluxo obtido na equação de Darcy- Buckingham, tem-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} K(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial z} - K(\theta) \quad (3.15)$$

Esta é a equação do movimento da água no solo, conhecida como a equação de Richards.

Equação de Richards empregando o termo da difusão

O gradiente de sucção, da equação de Richards, pode ser expandido como

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (3.16)$$

sendo $\frac{\partial \theta}{\partial z}$ o gradiente do conteúdo de água, e $\frac{\partial \phi}{\partial \theta}$ a recíproca do conteúdo específico de água,

$C(\theta)$:

$$C(\theta) = \frac{\partial \theta}{\partial \phi} \quad (3.17)$$

que é a inclinação da curva característica água-solo.

A equação de Richards, pode ser reescrita como segue:

$$q = -K(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial z} - K(\theta) = -K(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} - K(\theta) = \frac{K(\theta)}{C(\theta)} \frac{\partial(\theta)}{\partial z} - K(\theta) \quad (3.18)$$

Sendo a difusibilidade $D(\theta)$,

$$D(\theta) = K(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial \theta} = \frac{K(\theta)}{C(\theta)} \quad (3.19)$$

Assim, pode-se dizer, portanto, que a difusibilidade é a razão da condutibilidade hidráulica para o conteúdo específico de água, conforme pode ser verificado na equação 3.19, ou, ainda, a razão do fluxo pelo gradiente do conteúdo de umidade, conforme a equação abaixo:

$$q = -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (3.20)$$

Empregando-se o termo difusibilidade, a equação do escoamento fica:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) \right] \quad (3.21)$$

Equações empíricas

a) Equação de Kostiakov – 1932

A equação de Kostiakov tem a forma

$$i = i_i t^{-a} \quad (3.22)$$

Onde i_i é a taxa de infiltração no início, isto é, em $t = 0$, e a uma constante. Os valores desses parâmetros são determinados empiricamente a partir de observações de dois pares de valores de i e t LIBARDI (1995).

Denominando por I a infiltração acumulada no tempo t , tem-se que

$$i = \frac{dI}{dt} \quad (3.23)$$

Integrando-se a equação 3.23 tem-se

$$\int_0^I dt = i_i \int_0^t t^{-a} \quad (3.24)$$

Considerando-se que a taxa de infiltração é sempre decrescente e a infiltração acumulada nunca é negativa, então a e $1-a$ têm de possuir valores positivos; conseqüentemente, a tem de ser menor que 1.

Na equação 3.22, i tende para 0 quando t tende para infinito. É um fato largamente conhecido que, quando t tende para infinito, i tende a um valor constante igual a $K(0)$; portanto a dedução acima, verificada na equação 2.1, é uma inverdade.

Substituindo-se i por $K(0)$ na 3.23, é possível inclusive calcular quando i se tornará um valor constante igual a $K(0)$:

$$K(0) = i_i t^{-a} \quad (3.25)$$

$$t = \left(\frac{i_i}{K(0)} \right)^{1/a} \quad (3.26)$$

Pode-se concluir daí que a equação de Kostiakov é válida somente para os estágios iniciais da infiltração.

b) Equação de Horton

A equação de Horton baseia-se, de modo intuitivo, no fato de que, na natureza, existem muitos processos de decaimento que obedecem à lei de que a taxa de variação de uma determinada grandeza, que se aproxima de um valor final constante, é proporcional à diferença entre seu valor num determinado tempo e o valor final constante (LIBARDI, 1995).

$$\frac{di}{dt} = C(i - i_f) \quad (3.27)$$

onde i é a taxa de infiltração, i_f é a taxa de infiltração final e C uma constante de proporcionalidade.

Integrando-se a equação 3.27 entre os limites i e i_f , tem-se

$$\int_{i_f}^i \frac{di}{i - i_f} = \int_0^t C dt \quad (3.28)$$

ou

$$\ln (i - i_f) - \ln (i_t - i_f) = - C t \quad (3.29)$$

ou, ainda,

$$i = i_f + (i_t - i_f) e^{-ct} \quad (3.30)$$

A equação 3.30 é a equação de Horton. A aplicabilidade dessa equação, tendo em vista não se basear em nenhuma teoria física, é muito variada.

Horton concluiu que a redução na taxa de infiltração com o tempo é fortemente controlada por fatores que operam na superfície do solo, tais como selamento superficial devido ao impacto das gotas de chuva, além de fenômenos de expansão e concentração do solo (PREVEDELLO, 1996). Ainda segundo Horton, a taxa de infiltração final aproxima-se de um valor constante, mas que freqüentemente é menor que K_s . Ele justificou que essas diferenças podem ser atribuídas à presença de ar ocluso e à incompleta saturação do solo em condições de campo.

Equações com base física

a) Equação de Green&Ampt

A equação proposta por Green & Ampt (1911), apesar de simples, utiliza equações que podem ser resolvidas analiticamente; baseia-se em parâmetros físicos e apresenta solução tanto para a infiltração vertical quanto para a horizontal.

O modelo baseia-se nas seguintes hipóteses:

- i. solo na zona úmida, tem umidade (θ_0) constante.
- ii. a pressão da água no solo na frente de molhamento é constante (independe da posição da frente de molhamento) e vale $pf/\rho g$.

Pela primeira hipótese tem-se que, na zona de transmissão, as propriedades hidráulicas são constantes, $K_0, D_0, p_0/\rho g$. Em conseqüência, a densidade de fluxo é a mesma em toda a zona de transmissão. Já pela segunda hipótese, tem-se que a mudança de θ_i para θ_0 , na frente de molhamento, ocorre em uma camada de espessura desprezível.

Essas hipóteses são muito próximas da realidade para solos de textura grossa com baixa umidade inicial. Porém, conforme CHILDS (1969), os demais tipos de solo dificilmente apresentam a característica de exibir um plano de separação bem definido entre o material saturado na frente de molhamento e o material não afetado adiante desta frente. Apesar disso, Green e Ampt conseguiram demonstrar a aplicabilidade de sua equação para o caso da determinação da infiltração em uma coluna de solo alterado.

Como K é somente função de θ , e sendo θ constante, K também será. De acordo com a equação da continuidade, se θ é constante com o tempo, então $\partial\theta/\partial x$ é nulo, isto é, independente de x .

Segundo PREVEDELLO (1996), $pf/\rho g$ decresce uniformemente de $p_0/\rho g$ na superfície do solo, até $pf/\rho g$ na frente de molhamento. Esse mesmo autor afirma, na mesma obra, que as propriedades hidráulicas ($K_0, D_0, p_0/\rho g$), são constantes em toda a zona úmida, zona de transmissão. SILVEIRA et al (1993) afirmam que, da superfície até a frente de molhamento, o potencial matricial passa de zero para um valor ϕ_f . Entretanto, se θ é constante e igual a θ_0 em toda a zona de transmissão, então ϕ é constante também em toda essa zona. Pelo exposto,

conclui-se que ϕ permanece constante e igual a 0 em toda a zona de transmissão e muda abruptamente para ϕ_f na frente de molhamento.

Segundo LIBARDI (1995) o perfil de umidade apresenta uma curva em forma de degrau, situação impossível na prática. No entanto, segundo o autor, essas suposições simplificam a equação de fluxo, tornando possível uma solução analítica.

A equação de Green&Ampt pode ser entendida aplicando-se a equação de Darcy a uma coluna saturada de solo de comprimento L :

$$i = K_0 \frac{\phi_f + L}{L} \quad (3.31)$$

onde i é a infiltração acumulada, a qual será o volume infiltrado no tempo considerado, ϕ_f o potencial matricial de água no solo e K_0 a condutividade hidráulica saturada.

O volume infiltrado poderá ser conhecido pela diferença de umidade no solo antes e depois da infiltração, na profundidade da frente de molhamento.

$$V_f = (\theta_s - \theta_i) \quad (3.32)$$

onde θ_s é umidade de saturação, θ_i a umidade inicial do solo antes da infiltração e $\Delta\theta$ é a diferença constante de umidade do solo antes e depois da passagem da frente de molhamento.

Considerando $S_f = (\theta_s - \theta_i)\phi_f$ um fator de sucção-armazenamento, a equação 3.31 pode ser escrita como

$$i = K' \frac{S_f + V_f}{V} \quad (3.33)$$

isolando-se V_f nessa equação tem-se

$$V_f = \frac{S_f}{\left(\frac{i}{K'}\right)^{-1}} \quad (3.34)$$

no momento da saturação superficial

$$V_p = \frac{S_f}{\frac{r}{K'} - 1} \quad (3.35)$$

e o tempo de encharcamento é definido por

$$t_p = \frac{S_f}{\frac{r^2}{K} - r} \quad (3.36)$$

sendo r a intensidade de precipitação que significa toda a infiltrada nesse período.

Como $i = dV_f/dt$, pode obter-se por integração uma equação implícita de V_f dada por

$$t = \frac{V_f - S_f \ln\left(1 + \frac{V_f}{S_t}\right)}{K'} \quad (3.37)$$

Dado V_f ser implícito, a equação terá de ser resolvida por tentativas. Atualmente dispõe-se de processos computacionais que nos facilitam a solução desse tipo de problema.

Percebe-se que, pela equação de Green&Ampt, a taxa de infiltração é função do volume já infiltrado e do teor de umidade inicial do solo. Também fica claro que essa taxa, inicialmente mais elevada, tende a um valor constante, igual à condutividade hidráulica saturada.

b) Equação de Philip

Outra equação que procura simular o processo de infiltração é a de Philip. Esta equação foi derivada com base na equação de Richards. A equação propõe, para a condição de contorno de saturação permanente, uma série do tipo

$$z(\theta, t) = a(\theta) t^{1/2} + b(\theta) t + c(\theta) t^{3/2} + \dots \quad (3.38)$$

tendo a taxa de infiltração a seguinte expressão

$$i = C t^{-1/2} + A t + D t^{1/2} F t^{3/2} + \dots \quad (3.39)$$

Essa série apresenta altas taxas de infiltração inicial, o que é perfeitamente coerente, mas apresenta resultados totalmente incoerentes para tempos maiores, prevendo resultados ainda elevados o que se sabe não ocorrer.

A solução encontrada é truncar a série após o termo $A t$. O volume infiltrado será dado por

$$V_f = \frac{S}{2} t^{1/2} + A t \quad (3.40)$$

sendo $S = 2C$ a sortividade do solo, a qual, introduzida na equação. 2.18, resulta na

$$i = \frac{1}{2} S t^{-1/2} \quad (3.41)$$

A grande vantagem da equação proposta por Philip é o fato de ela ser baseada na teoria de suas constantes possuírem um significado físico (LIBARDI, 1995).

Philip considerou a infiltração horizontal e vertical, e concluiu que, para valores pequenos de tempo, a solução para a infiltração horizontal e vertical é a mesma; e para valores maiores de tempo, a predominância da componente gravitacional sobre o matricial no potencial de água no solo, faz com que a infiltração vertical seja superior à horizontal.

SILVEIRA et al (1993), afirmam que a variável A da equação 3.40 é equivalente à K' da equação de Green&Ampt, que os autores consideram como a taxa residual de infiltração. LIBARDI (1995), entretanto, afirma que essa variável, para grandes períodos de tempo, tende a um valor constante, mas que não se trata da condutividade hidráulica saturada K_0 , na superfície. Esse autor concluiu que a referida equação, assim como a 3.40, não são aplicáveis para períodos de tempo muito grandes, sendo então consideradas válidas apenas para os estágios iniciais da infiltração.

Segundo LIBARDI (1995), a constante S é a sortividade do solo, ou seja a capacidade de um solo homogêneo absorver água, em relação a sua umidade inicial.

Mediante uma avaliação das equações analisadas, pode-se concluir que as equações de Green-Ampt e de Philip, em função de considerarem parâmetros físicos no seu desenvolvimento, apresentam boa credibilidade na simulação da infiltração. Outro aspecto positivo da equação de Philip é o fato de simular tanto a infiltração vertical quanto a

horizontal. Entretanto, quando se trata de um ajuste de dados de campo, as equações de Kostiakov e de Horton apresentam maior facilidade de ajuste de parâmetros, sendo utilizadas de modo eficiente.

Neste trabalho está sendo proposto o ajuste de dados observados em campo no estabelecimento da equação de infiltração; desse modo justifica-se a adoção de uma dessas equações. Tendo em vista que a equação de Kostiakov tem sido a mais utilizada na maioria dos trabalhos pesquisados, tendo contra si principalmente o fato de não ser válida para a fase final do processo de infiltração, a sua utilização até o momento em que os valores observados passam a ser praticamente constantes, parece simular o fenômeno de modo eficiente.

3.5. Métodos de determinação da umidade do solo

Para poder monitorar as variações do conteúdo de água do solo ao longo da irrigação, a umidade do solo tem que ser determinada em tempo real. Além dessa exigência, é necessário que a umidade seja determinada com a precisão necessária.

Existem vários métodos que permitem conhecer a variação do conteúdo de água no solo. Alguns destes são descritos a seguir:

3.5.1. Reflectometria no domínio do tempo

Um meio de avaliar o avanço da frente de infiltração da água no solo, no processo de irrigação por sulcos, é realizar o acompanhamento das variações do conteúdo de umidade no solo em tempo real. Segundo TOMMASELLI (2001), a Reflectometria no Domínio do Tempo, *Time Domain Reflectometry*, TDR, é uma técnica que possui habilidade para

monitorar de forma contínua e simultânea, o conteúdo de água do solo. De acordo com SOUZA et al. (2001), essa técnica mede o conteúdo de umidade do solo de forma indireta, por meio da determinação da velocidade de propagação de um impulso eletromagnético ao longo de hastas metálicas, guias de onda, introduzidas no material a ter sua umidade determinada, neste caso o solo. O sinal propaga-se como uma onda plana no solo, guiada por um par de hastas metálicas, e é refletido do final da linha de transmissão, retornando ao TDR. A velocidade de trânsito desse impulso depende da constante dielétrica do meio. Tendo em vista que a constante dielétrica da partícula de solo apresenta valor que varia de 3 a 5, a do ar de 1 e a da água de 80 (TOMMASELLI, 2001), em função da constante dielétrica da mistura, estabelece-se o conteúdo de água nessa mistura.

De acordo com (HERRMANN, 2001), sob o ponto de vista eletromagnético, o solo é considerado uma mistura de quatro composições dielétricas, consistindo de ar, do volume do solo, da água ligada e da água livre. Ainda segundo o mesmo autor, quando a água é adicionada ao solo, torna-se fortemente ligada às partículas deste. Nesse estado, as moléculas de água não são livres. Com o aumento da camada de água ao redor da partícula de solo, em razão do aumento de umidade, as ligações das moléculas de águas com a partícula decaem devido à ausência de contato de superfície, tornando-se livres. Uma molécula de água ligada ao solo interage com uma onda eletromagnética, diferente da molécula de água livre, exibindo desse modo, um espectro de dispersão dielétrica que é muito diferente da água livre. As funções dielétricas na forma complexa de água livre e ligada são funções da frequência eletromagnética f , da temperatura física T e da salinidade s . Conforme apresentado por HALLIKAINEN et al. (1985), apud HERRMANN, (2001), a constante dielétrica do solo misturado é, em geral, uma função de: (a) f , T e s , (b) conteúdo de água volumétrica total θ_v , (c) fração relativa de água livre e água ligada, a qual está relacionada à área de superfície do

solo por unidade de volume, (d) densidade volumétrica do solo ϕ_b , (e) formato da partícula do solo, (f) forma da absorção da água pelo solo.

Desse modo, observa-se que a utilização da técnica da reflectometria no domínio do tempo, na determinação do conteúdo de água do solo, está também na dependência da parcela de água livre e ligada no solo, ou seja, diferente para uma situação de saturação ou não saturação do solo. A separação da fase água em água livre e ligada, traz a necessidade de um modelo de quatro fases (OR & JONES, 2001). Segundo DOBSON et al. (1985), apud OR & JONES (2001), modelos que consideram quatro fases não permitem a modelagem com diferentes formas de partícula ou tornam essa muito complicada. A consideração da função temperatura na permissividade da água livre e ligada, permite o uso de um sistema de três fases o qual leva em conta o efeito da forma da partícula (OR & JONES 2001).

A constante dielétrica é definida pela equação. 3.42, conforme CRESTANA et al. (1996), apud GOMIDE (2001).

$$Ka = ((c.t)/(2.L))^2 \quad (3.42)$$

onde L é o comprimento da haste, t o tempo de trânsito e Ka a constante dielétrica do material.

Em uma mesma amostra de solo, o valor de Ka correspondente à fase sólida é constante, variando apenas o conteúdo do espaço poroso que pode ser ocupado por ar ou solução do solo. Conhecendo-se o tempo de propagação do impulso eletromagnético, ao longo da faixa de solo entre as hastes introduzidas no solo, determina-se o valor da constante dielétrica, e assim, o percentual de ar e água do espaço poroso do solo.

3.5.2. Tensiômetro

Outro modo indireto de determinar a umidade do solo é mediante a determinação do potencial matricial da água no solo. Quando todo o espaço poroso se encontra ocupado por água, o potencial matricial é máximo e igual a zero. À medida que o solo perde umidade, a força de adsorção exercida pelas partículas de solo sobre a água faz com que a água fique retida no solo. Neste caso o potencial matricial diminui. Para cada tipo de solo existe uma relação específica entre o conteúdo de água e a tensão com que esta se encontra retida no solo. De posse da curva característica de cada solo e com o conhecimento do valor da tensão, pode-se determinar o conteúdo de água do solo.

De acordo com LIBARDI (1995), esse equipamento consiste de uma cápsula porosa na extremidade de um tubo o qual é conectado com um manômetro. O tubo é preenchido com água em toda sua extensão, e a cápsula é inserida no solo na profundidade desejada. O conteúdo de umidade do solo entra em equilíbrio com o da cápsula. À medida que o solo e a cápsula vão secando, a água, ao sair do conjunto, estabelece uma pressão negativa na extremidade superior do tubo, a qual é medida pelo manômetro, indicando então, nesse momento, o valor do potencial matricial do solo.

Segundo CHILDS (1969), é comum que surjam bolhas de ar na cápsula com o tempo. Quando isso ocorre, torna-se necessário retirá-las com aplicação de água ao tubo, até o seu completo enchimento novamente.

O limite de utilização do tensiômetro, segundo LIBARDI (1995), está na ordem de 8,5m ($\approx 0,085$ Mpa).

3.5.3. Sonda de nêutrons

A sonda de nêutrons consiste basicamente de dois componentes, um tubo de acesso enterrado no solo e a sonda propriamente dita, que é uma fonte de emissão de nêutrons.

CHILD (1969) descreve o princípio da determinação do conteúdo de água do solo com esse equipamento do seguinte modo: o nêutron tem aproximadamente a mesma massa do átomo de hidrogênio, mas é mais leve que a maioria de outros elementos do solo. Quando um nêutron colide com uma partícula de hidrogênio, retorna com praticamente a mesma velocidade; entretanto, quando colidir com átomos mais pesados, terá uma perda de velocidade considerável. Determinando-se a velocidade de retorno dos nêutrons, pode-se quantificar a quantidade de átomos de hidrogênio e, conseqüentemente, o conteúdo de água do solo.

4. Metodologia

Para atender os objetivos do projeto, foi montado um experimento no qual foi realizada a irrigação de um cultivo de sorgo pelo método de sulcos. As fases de irrigação avanço, armazenamento, depleção e recessão, foram definidas por meio do registro do tempo em que cada uma dessas fases se completava. O acompanhamento das frentes de infiltração da água no solo foi realizado por meio do monitoramento com auxílio do TDR, mediante a identificação das variações do conteúdo de água do solo, ao longo de todas as fases.

4.1. Instalação experimental

A área de ensaios fica localizada no Município de Santa Vitória do Palmar, no sul do Rio Grande do Sul, na latitude 33°10'00" e longitude 53°10'00", conforme mostra a figura 4.1. Trata-se de uma região de clima úmido, com precipitação média anual de 1.186 a 1.364mm, classificado pela classificação de Knopenn como cfa1g'n, ou seja, subtropical (ou quase temperado), úmido sem estiagem.

Foi aberta uma trincheira, descrito o perfil do solo, coletadas amostras e classificado o solo. No capítulo de anexos, são apresentados a ficha de resultados da trincheira, a descrição do perfil, a granulometria e porosidade do solo.

O solo é hidromórfico, classificado como gleissolo melânico Carbonáltico incéptico, com a presença de uma camada de impedimento à infiltração à profundidade de 0,40m aproximadamente, o que, associado à topografia plana, com declividade média de até 1%, caracteriza um solo mal drenado.

A área foi escolhida por apresentar um solo hidromórfico com camada de impedimento, assim como possuir uma declividade representativa da maioria dos solos de várzea, onde ocorre a problemática relativa ao déficit hídrico para cultivos de verão alternativos ao de arroz, utilizados como forma de controle do arroz vermelho e preto.

4.1.1. Preparação da área experimental

A área foi arada e discada no mês de setembro de 2000. Posteriormente, foi estaqueada a espaçamento de 20m, e feito um levantamento altimétrico. Com base nesse levantamento, foi realizado um projeto de sistematização da área, segundo BERNARDO (1995).

Foi feita a sistematização da área, estabelecendo-se, no sentido longitudinal aos sulcos a serem construídos, uma declividade média de 0,08%.

Em novembro de 2000, foi implantada na área uma lavoura de sorgo granífero, híbrido Pioneer. A lavoura foi instalada segundo as recomendações técnicas da Embrapa (PARFIT, 2000).



Figura 4.1 – Croqui de localização da área de instalação do ensaio

Quando as plantas de sorgo atingiram uma altura média de 0,40m, foram construídos os sulcos para irrigação. O número de sulcos foi igual ao de linhas de cultura localizando-se aqueles entre estas.

Os sulcos foram construídos com 200m de comprimento, segundo um espaçamento de 0,95m e largura superficial de 0,5m, na declividade de 0,08% já mencionada. Foi construído um total de 15 sulcos.

4.2. Instrumentação

No monitoramento da variação do conteúdo de água do solo durante a irrigação, foi adotada a técnica da TDR, utilizando-se para tal o equipamento baseado na técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), conforme descrito anteriormente. O equipamento pode ser programado para realizar as medições no tempo e com a frequência desejada.

As guias de onda utilizadas apresentam três hastes de 20cm de comprimento cada uma, possuem um cabo coaxial de dois metros de comprimento, que conduz os impulsos eletromagnéticos da fonte geradora às hastes. Para medições em pontos mais afastados, foram utilizados cabos de extensão de vinte metros de comprimento. Cada conjunto de quinze guias foi conectado ao equipamento de medição por meio de uma placa multiplexadora que tem a finalidade de identificar de forma individualizada cada guia de onda. A figura 4.2 apresenta o desenho esquemático do TDR, placa multiplexadora e as guias de onda, e a figura 4.3, uma fotografia do TDR no campo. A figura 4.4 apresenta um croqui da instalação do experimento.

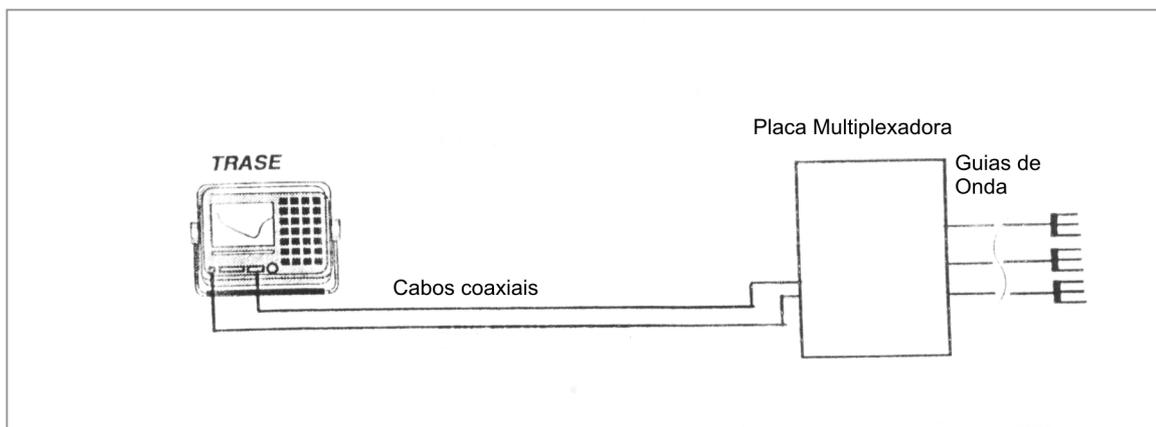


Figura 4.2 – TDR , placa multiplexadora e guias de onda



Figura 4.3 - TDR e placa multiplexadora no campo.

4.3. Procedimentos experimentais

Os ensaios foram concebidos com três repetições. O equipamento de monitoramento tinha capacidade de realizar medições em trechos de sulcos de apenas 42m de comprimento, em virtude do comprimento dos cabos que estabeleciam a conexão das guias de onda com a placa multiplexadora, conforme descrito anteriormente.

Tendo em vista que o comprimento total dos sulcos era de 200 metros, o conjunto de medição, teve que ser instalado em três trechos separadamente, inicialmente no terço inicial, depois no terço médio e finalmente no terço final dos sulcos. Para realizar os testes foi necessário irrigar de forma individualizada e em oportunidades diferentes cada um dos trechos. Esses conjuntos tinham de ser formados por cinco sulcos, dos quais três centrais eram utilizados para realizar as determinações de umidade, constituindo-se cada um de uma

repetição, e dois laterais que serviam como tampão ao avanço lateral da frente de infiltração de água no solo. O total foi de quinze sulcos nos três conjuntos.

As guias de onda foram instaladas na posição horizontal, assim distribuídas em cada um dos conjuntos de sulcos; duas em cada um dos três sulcos de cada repetição, no início destes, nas profundidades de 15cm e 35cm; uma em cada sulco, na profundidade de 15 cm e a uma distância de 21 metros do início; e duas em cada um, nas profundidades de 15 e 35 cm a 42 metros de distância do início. No conjunto seguinte, que tinha a finalidade de monitorar a variação de umidade no terço médio, as guias foram instaladas de modo semelhante, porém nas distâncias de 79, 100 e 121 metros do início. No último conjunto, as guias foram instaladas, sempre segundo o mesmo esquema de distribuição, nas distâncias de 154, 175 e 200 metros. A figura 4.4 esquematiza a instalação experimental no campo. A figura 4.5 mostra uma vista parcial do cultivo de sorgo e a figura 4.6, um detalhe dos sulcos irrigados.

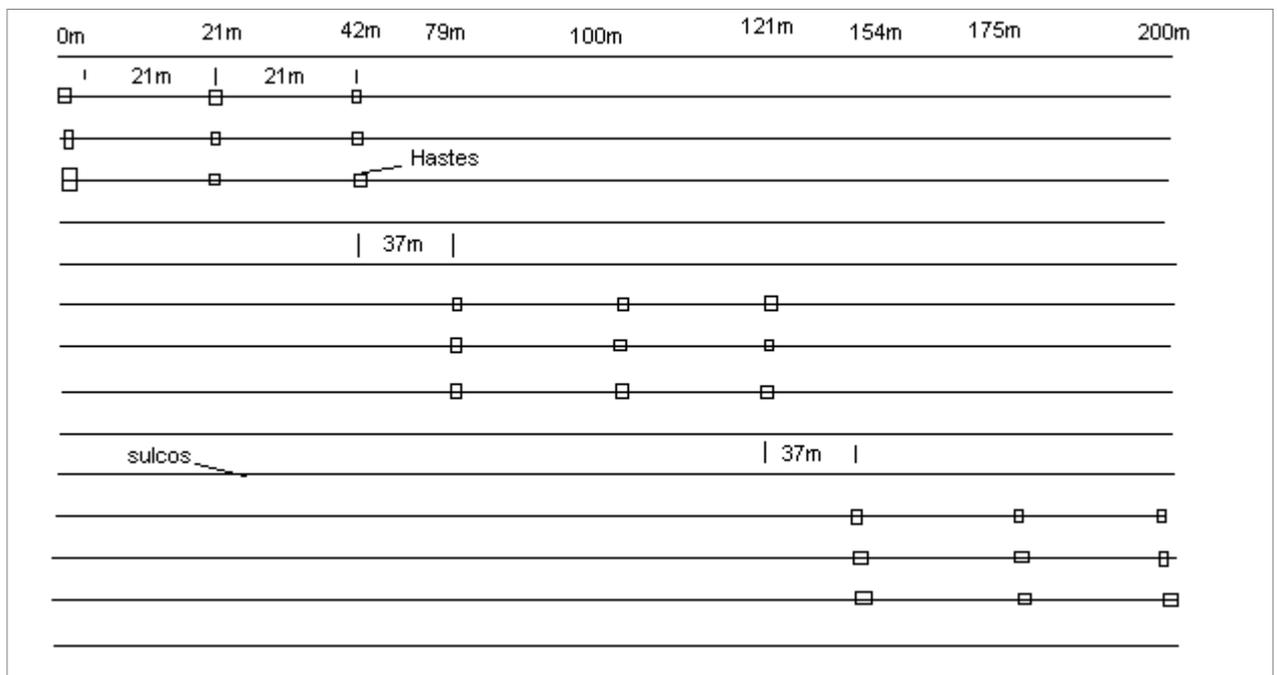


Figura 4.4 – Croqui de instalação das guias de onda

4.3.1. Determinação da vazão máxima

Para controle da adição de água ao sulco, foi utilizado um vertedor triangular de parede delgada, com ângulo de 45° . A vazão máxima aplicada foi a maior possível de ser transportada pelo sulco, sem causar transbordamento. Após a aplicação da água ao sulco até a frente alcançar o seu final, foi feita uma avaliação da ocorrência ou não de erosão. Sendo observado algum indício de erosão significativa, a vazão era reduzida a um valor correspondente a uma diminuição de 0,5cm da lâmina de água sobre a crista do vertedor. A figura 4.7 mostra os vertedores instalados no início dos sulcos.

A equação adotada para o cálculo da vazão foi a sugerida por LENCASTRE (1972), apresentada a seguir:

$$Q=0,55 y^{2,47} \quad (4.1)$$



Figura 4.5 - Vista parcial do cultivo de sorgo



Figura 4.6 - Sulcos irrigados



Figura 4.7 - Vertedores no início dos sulcos

4.3.2. Infiltração

A taxa de infiltração foi medida no próprio sulco, conforme sugerida por BERNARDO (1995). A vazão aduzida foi a maior que não causava erosão no sulco quando da realização do teste de vazão máxima, tendo sido controlada, utilizando-se o vertedor mencionado. A água foi aplicada em três sulcos contíguos, e as medições realizadas no sulco central, servindo os outros dois para tamponamento. A vazão de saída do trecho foi medida com uma calha WSC ou Chamberlain, conforme pode ser visto na figura 4.8, cuja curva de vazões é apresentada na figura 4.9, localizada no final do sulco, ou seja 200m do início.



Figura 4.8 - Calha WSC ou Chamberlain

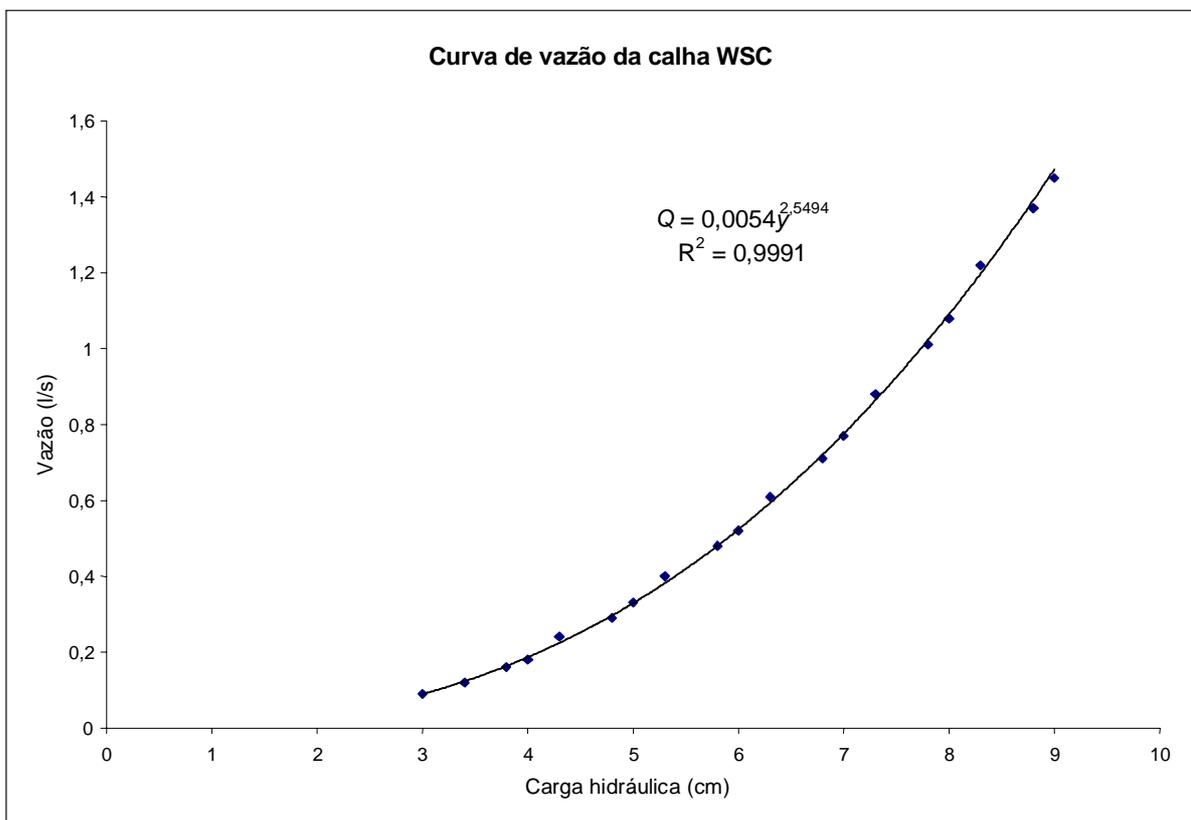


Figura 4.9 – Curva de vazões da calha WSC.

O valor da infiltração é dado pela equação 4.2:

$$i = \frac{(Q_m - Q_s)}{L \cdot E} \quad (4.2)$$

onde i é a infiltração, Q_m a vazão máxima, Q_s a vazão de saída, L o comprimento do trecho e E o espaçamento entre os sulcos.

4.3.3. Avanço da corrente de água no sulco

Na mesma oportunidade em que foi aplicada água ao sulco para determinação da infiltração, foi feito o acompanhamento da velocidade de avanço dessa frente, quando aplicada a vazão máxima não-erosiva, por meio do registro do tempo em que a frente alcançava as estacas previamente colocadas, espaçadas de 20 em 20 metros.

4.3.4. Determinação da seção de escoamento do sulco

As características geométricas e a seção média de escoamento dos sulcos foram determinadas em campo durante a realização do teste de infiltração, e são as seguintes:

Base = 13cm

Largura superior da lâmina do espelho de água = 50cm

Altura da lâmina de água = 13cm

4.3.5. Determinação da umidade do solo

O conteúdo de água do solo no momento da realização do teste foi determinado de dois modos: com a utilização da técnica da TDR e por meios de tensiômetros. O objetivo da determinação mediante as técnicas do TDR e de tensiômetros, foi o da duplicação de medições, objetivando reduzir a probabilidade de falhas e obter melhor confiabilidade dos dados. Para isso, fez-se uma comparação entre os resultados obtidos com o TDR, de cuja utilização no solo dessa unidade de mapeamento não se tem conhecimento, com a do tensiômetro, já largamente utilizada. A seguir, é feita uma exposição da metodologia utilizada em cada caso.

No centro de sulco central do segundo conjunto, isto é, na área central de ensaios, foram instalados dois tensiômetros com manômetro de mercúrio, com as cápsulas porosas posicionadas nas mesmas profundidades das guias de onda do TDR, com o objetivo de estimar o conteúdo de umidade do solo, e assim identificar a oportunidade de irrigação.

De acordo com CAUDURO & DORFMAN (1986), a determinação da variação do conteúdo de água no solo em função de diferentes valores de tensão de umidade e a conseqüente curva de retenção/umidade, é realizada do seguinte modo:

Coletam-se amostras indeformadas de solo com anéis volumétricos. Essas amostras são colocadas, para saturar, por 24 horas. Posteriormente, são submetidas às pressões correspondentes às tensões de $-0,01\text{MPa}$, $-0,03\text{MPa}$, $-0,1\text{MPa}$ e $-0,3\text{MPa}$, em um equipamento denominado "panela de pressão", onde permanecem por 48 horas. Após, as amostras são retiradas e o conteúdo de água verificado através do método gravimétrico.

As curvas de tensão /umidade do solo foram determinadas no laboratório de solos do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, IPH/UFRGS. Os valores obtidos são apresentados na tabela 4.1.

A outra forma de determinação da umidade foi mediante leitura com o TDR, nos pontos onde estavam localizadas as guias de onda. As leituras de cada ponto foram realizadas e registradas com o auxílio de uma placa multiplexadora, com um intervalo entre as leituras de 16 segundos, em média.

4.3.6. Determinação da água disponível no solo

Para fins de irrigação, a água disponível no solo para abastecimento das culturas é a denominada água facilmente disponível (AFD), que pode ser obtida pela equação 4.3.

$$AFD = \frac{CC - UA}{100} \cdot P \quad (4.3)$$

onde UA é o conteúdo de água do solo que não acarreta redução na evapotranspiração e P a profundidade de solo a ser irrigado.

4.3.7. Determinação da lâmina e do volume de água a aplicar

a) Lâmina a aplicar

A lâmina a aplicar é a lâmina líquida necessária para elevar a umidade à capacidade de campo. Esta determinação foi realizada de duas maneiras: utilizando-se as leituras de umidade

realizadas com o TDR, e mediante leitura no tensiômetro e correlação com a curva de retenção:

$$LI = \frac{CC - UA}{100} P \quad (4.4)$$

onde CC é a capacidade de campo, UA a umidade do solo na oportunidade e P a profundidade de irrigação. A capacidade de campo foi determinada a partir da curva de retenção do solo para a tensão de $-0,03$ MPa.

b) Volume total de água necessário considerando-se os valores obtidos com o TDR.

O volume total de água a aplicar ao sulco é dado pela equação (4.5).

$$V_n = LI/1.000 \cdot L \cdot E \quad (4.5)$$

onde LI é a lâmina de irrigação, L o comprimento do sulco e E o espaçamento entre sulcos.

4.3.8. Tempo de aplicação da lâmina de água

A determinação do tempo necessário para aplicar a lâmina de inundação foi feita por meio da equação de infiltração de Kostiakov-Lewis. Para esta determinação, estimou-se uma eficiência de aplicação de 75%.

$$I = k t^a + b t \quad (4.6)$$

onde I é a lâmina infiltrada em mm, k o valor da infiltração no primeiro minuto de realização do teste, b a taxa de infiltração estabilizada em mm por hora, t o tempo em minutos e a uma constante em função do solo.

A água de irrigação foi derivada de um canal localizado na parte mais alta da parcela, para cada um dos sulcos, através de vertedor triangular já mencionado. Na tabela 6 são apresentados os valores do avanço da água no sulco, os quais foram determinados em campo, registrando-se o tempo em que as frentes alcançavam as posições das estacas colocadas nos sulcos, segundo espaçamento de vinte metros.

4.3.9. Monitoramento da variação do conteúdo de água do solo durante a irrigação

Antes da aplicação de água ao sulco, foi realizada com o TDR uma leitura do conteúdo de umidade do solo. Simultaneamente à aplicação de água, foi ligado o equipamento e registradas todas as variações no conteúdo de água do solo.

O equipamento permaneceu ligado por um período de tempo posterior ao término da fase de recessão.

4.4. Modelo SRF

Com o objetivo de verificar a aplicabilidade de modelos de simulação da irrigação por sulcos, foi aplicado o modelo desenvolvido pelo U.S. Water Conservation Laboratory, do U.S. Department of Agriculture SRF (1999).

O SRF é um modelo matemático unidimensional para simular irrigação superficial por faixas, inundação e sulcos. O modelo assume que todas as características de fluxo variam somente com a distância do ponto de aplicação de água e com o tempo. Para o caso da

irrigação por sulcos, estes são tratados de forma isolada, sendo assumido que sulcos vizinhos têm idêntico fluxo e nenhuma variação de sulco para sulco, dentro de uma mesma área, é modelada separadamente. Propriedades das condições de campo, tais como infiltração, rugosidade do sulco, declividade de fundo e seção transversal do sulco, podem ser consideradas com variações espaciais.

O resultado de uma simulação de uma situação real de campo depende das características hidráulicas do solo e da cultura, de parâmetros físicos como comprimento e declividade, e do manejo de irrigação como vazões, duração de rega e lâmina de infiltração.

As simulações consistem de soluções numéricas das equações que representam matematicamente princípios físicos universais, como a equação da quantidade de movimento e da conservação de massa.

Dois modelos de simulação podem ser usados: os anteriormente mencionados, modelo da onda cinemática e modelo zero inércia.

O modelo zero inércia é mais completo que o da onda cinemática, tendo em vista que desconsidera apenas os termos de inércia e aceleração da equação da quantidade de movimento, enquanto que o da onda cinemática desconsidera toda a equação da quantidade de movimento. Bassel et al (1980), apud Walker & Skorgerboe (1987), dizem que o modelo da onda cinemática apresenta duas grandes limitações: a primeira relacionada à declividade do sulco que não pode ser pequena, situação esta verificada neste trabalho; a segunda diz que esse modelo não pode ser aplicado à situações em que as condições de jusante afetem as de montante. Tendo em vista essas considerações, o modelo adotado foi o zero inércia.

Na simulação da infiltração, o modelo utiliza, de forma alternativa, cinco procedimentos mencionados a seguir:

- Equação de Kostiakov-Lewis

- Equação simplificada de Kostiakov-Lewis
- Tempo de infiltração conhecido
- Família de valores de infiltração do Soil Conservation Service (SCS)
- Tempo de infiltração estimado

Em todos os casos, a lâmina infiltrada é o produto da taxa de infiltração na oportunidade de tempo pelo perímetro molhado. O perímetro molhado, com exceção do método do SCS, é sempre considerado igual ao espaçamento entre sulcos. No caso do SCS, o programa utiliza um valor do banco de dados, específico de cada família de valores. De acordo com STRELKOFF (2004), comparações preliminares, realizadas em 2003, entre o SRFR e a solução da Equação de Richards em solo homogêneo e isotrópico, indicaram que o perímetro molhado da base de dados do método do SCS superestima os efeitos do mesmo.

Dentre esses, o mais completo é o de Kostiakov-Lewis, tratando-se os demais de simplificações com o objetivo de facilitar a aplicação do modelo. A equação simplificada de Kostiakov-Lewis, por exemplo, considera que o valor inicial da taxa de infiltração é dado pela equação $d = c + kt^a$ e, quando esta atinge a taxa final b , a infiltração continua indefinidamente a uma taxa constante igual a b . O procedimento que necessita do conhecimento do tempo necessário para incorporar uma determinada lâmina estabelece um valor para essa lâmina de 100mm, tendo em vista que neste trabalho não se tinha valores tão altos para a lâmina de infiltração, esse procedimento não foi considerado. A família de taxas de infiltração do SCS apresenta a taxa inicial de infiltração utilizando a mesma equação apresentada anteriormente, e cada família é identificada pela taxa final de infiltração e reúne todos os solos com taxas compreendidas entre limites próximos de taxas de infiltração, em um mesmo grupo, com um mesmo valor para a velocidade básica de infiltração. De acordo com

os autores do modelo, não são muitos os solos que ajustam satisfatoriamente esses valores.

Tendo em vista dispor-se de todas as informações necessárias para a utilização da equação de Kostiakow-Lewis, essa foi a escolhida neste caso.

5. Resultados e discussão

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados das determinações realizadas no trabalho.

5.1. Avaliação das curvas do TDR

Foi feita uma avaliação da curva do equipamento, fornecida pelo fabricante, indicada para o tipo de guias de onda utilizadas no experimento, (SOILMOISTURE EQUIPAMENT CORP. 1996). Esta relaciona a constante dielétrica medida pelo aparelho com o teor de umidade do solo. Esta avaliação foi realizada do seguinte modo: foram feitas medições em campo, nas profundidades de 15cm e 35cm, respectivamente para a primeira e segunda camada, de diferentes condições de umidade do solo. De cada um dos pontos medidos, foram coletadas amostras de solo, com três repetições. O conteúdo de água dessas amostras foi determinado pelo método volumétrico em laboratório.

A tabela 5.1 e a figura 5.1 apresentam os resultados das determinações de umidade realizadas pelo método volumétrico e os valores determinados pelo TDR, através da curva correspondente.

Tabela 5.1 - Teores de umidade do solo, pelo método volumétrico de amostragem e com o TDR.

Ka	Umidade (%)	
	Gravimétrica	TDR
20,7	32,6	34,8
21,6	34,8	35
22,2	34,2	35,8
22,8	37,0	36,7
23,2	36,7	37,2
25,2	39,1	38,9

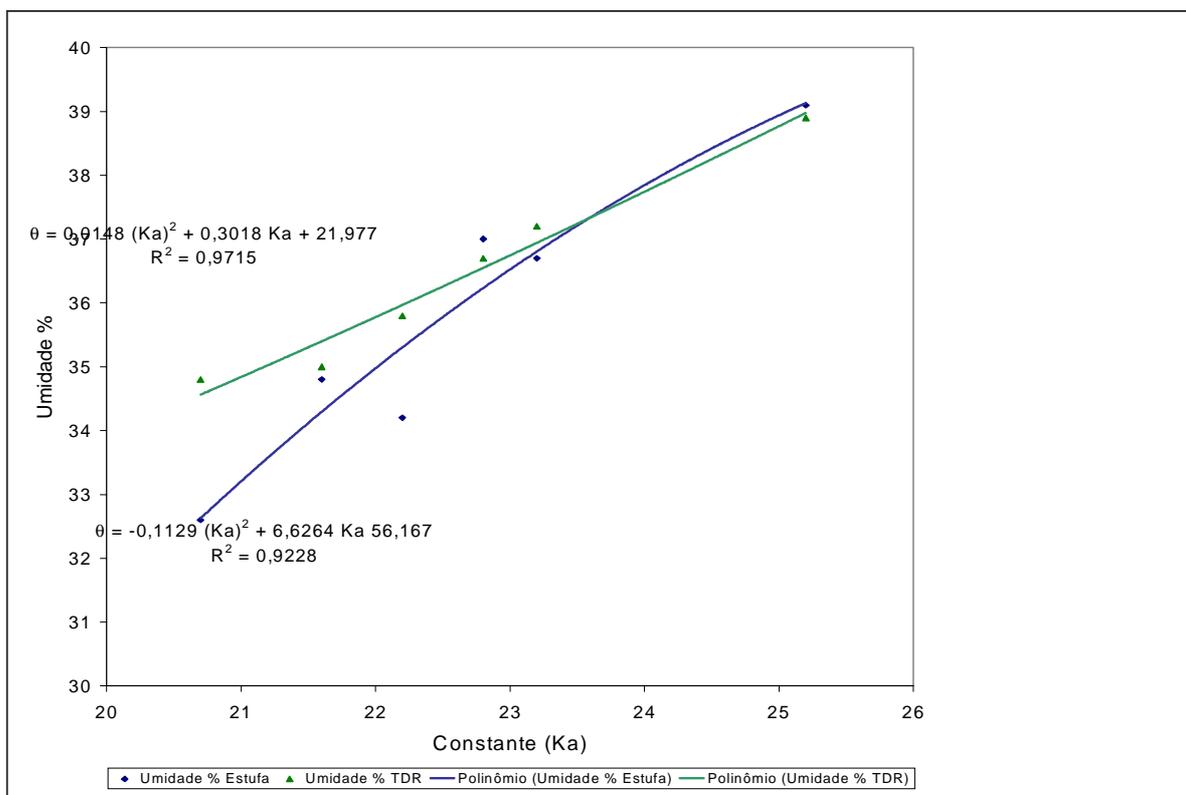


Figura 5.1 - Constantes dielétricas/Umidade volumétrica.

Pela observação da figura 5.1, verifica-se que a curva relativa aos valores medidos com o TDR aproxima-se bem das determinações gravimétricas, confirmando, desse modo, a boa representatividade da curva fornecida pelo fabricante.

5.2. Determinações preliminares

Para que fossem realizados os testes de campo necessários para atingir os objetivos do trabalho, foram determinados preliminarmente os parâmetros de irrigação a seguir.

5.2.1. Vazão máxima

O valor utilizado, o qual foi o máximo que não causou transbordamento, foi $3,2 \text{ l.s}^{-1}$, correspondente a uma altura de lâmina sobre a crista, lida a montante, fora da depleção da superfície causada pelo remanso de abaixamento, de 12,5cm. Essa vazão foi considerada não-erosiva, segundo avaliação visual da erosão observada no sulco após cessada a aplicação de água, apesar de que, em alguns pontos, logo no início do sulco, tenha causado certa erosão, não sendo entretanto considerada significativa, devido ao fato de localizar-se somente no trecho inicial. A figura 5.2 mostra um trecho do sulco com sinais de assoreamento de material erodido a montante.

A avaliação visual da erosão não é um método de precisão; entretanto, segundo BERNARDO (1995), é a prática normalmente utilizada. Considerando que o volume de material erodido durante toda uma estação de irrigação pode atingir valores bastante elevados, é recomendável a adoção de uma vazão que confirmadamente não cause erosão.

Figura 5.2 - Trecho de sulco com assoreamento de material

5.2.2. Infiltração

A equação de infiltração, determinada segundo Kostiakov-Lewis e obtida pelo método de entrada e saída no sulco, foi a seguinte:

$$I = 42,9 t^{0,6057} + 13 t \quad (5.1)$$

A tabela 5.2 apresenta os resultados do teste de infiltração a partir dos quais foi derivada a equação de Kostiakow-Lewis, e a figura 5.3, a curva relativa às taxas de infiltração.

Tabela 5.2 – Teste de infiltração

Tempo (min)	Carga hidráulica (cm)	Vazão saída (l . s ⁻¹)	Taxa de infiltração (mm . h ⁻¹)
1	6,7	0,689269	42,9335
1,5	7,4	0,888	39,5352
2	8	1,083257	36,19631
2,5	8,4	1,226737	33,7428
3	8,7	1,341542	31,77964
3,5	8,9	1,421571	30,41113
4	9	1,462647	29,70873
4,5	9,2	1,546943	28,26727
5	9,4	1,634127	26,77642
5,5	9,4	1,634127	26,77642
6	9,5	1,678813	26,0123
6,5	9,7	1,770393	24,44628
7	9,8	1,817295	23,64425
7,5	9,8	1,817295	23,64425
8	10,2	2,012422	20,30759
8,5	10,3	2,063103	19,44093
9	10,3	2,063103	19,44093
9,5	10,3	2,063103	19,44093
10	10,3	2,063103	19,44093
10,5	10,3	2,063103	19,44093
11	10,3	2,063103	19,44093
17	11	2,439609	13,00268

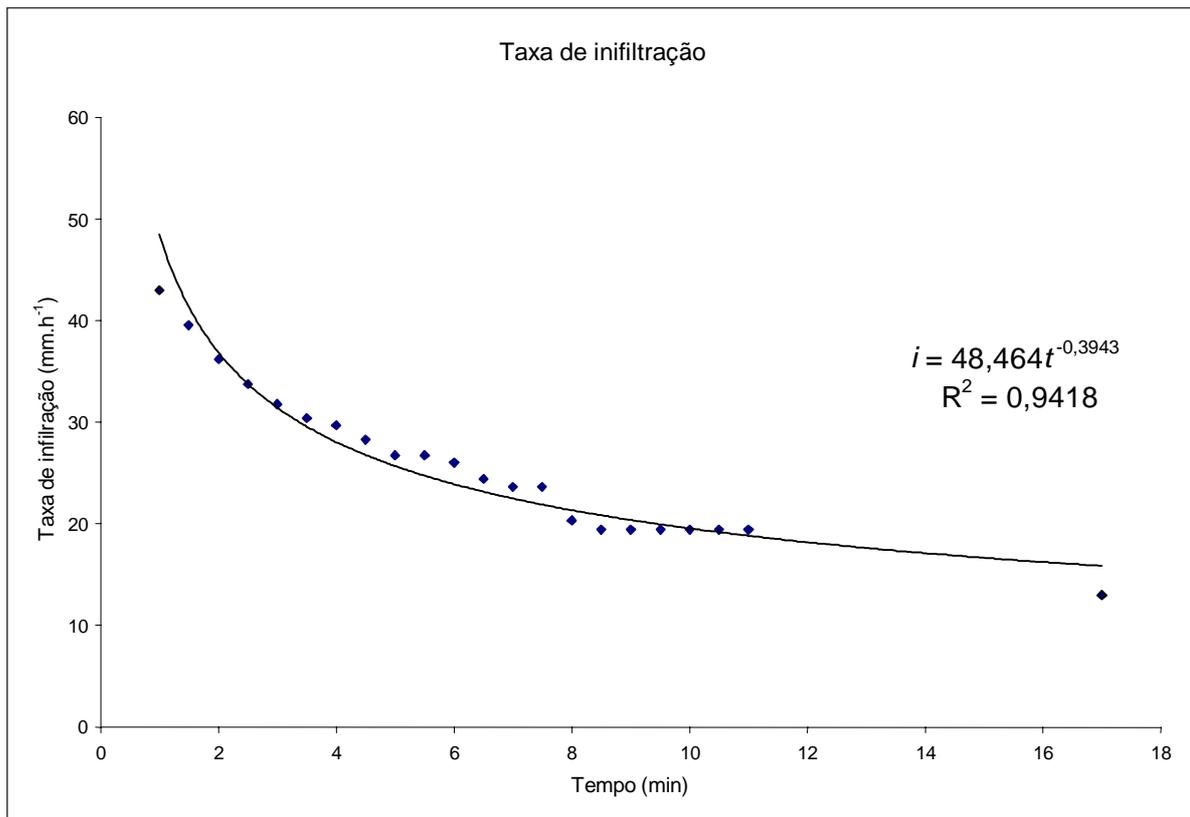


Figura 5.3 – Taxa de infiltração

O ajuste da curva da figura 5.3 foi considerado bom em razão do alto R^2 .

LIMA (2001) determinou a taxa de infiltração no planossolo da unidade de mapeamento Pelotas, também localizada nas várzeas da Lagoa Mirim e com características físicas muito semelhantes às do solo deste trabalho, tendo encontrado um valor de $14,65\text{mm.h}^{-1}$ para infiltração na tensão zero. Apesar da semelhança entre os dois solos, a unidade de mapeamento Pelotas localiza-se em um patamar mais elevado do que o Formiga. Essa posição confere a este maiores teores de areia que ao primeiro. Essa diferença textural parece ser a responsável por valores de taxa de infiltração mais elevados. BELTRAME & LOUZADA (1996) apresentam valores de condutividade hidráulica saturada de $0,199\text{m.dia}^{-1}$ e $0,079\text{m.dia}^{-1}$, respectivamente para os solos da unidade Pelotas e Formiga. Verifica-se que o

valor encontrado neste trabalho, 13mm.h^{-1} , é bastante próximo dos encontrados pelos pesquisadores acima mencionados.

5.2.3. Determinação da umidade do solo

Como foi comentado no capítulo 4, a determinação da umidade do solo foi realizada utilizando-se tensiômetros e TDR.

a) Tensiômetro

No momento da realização do teste, a leitura no tensiômetro correspondente à profundidade 15 cm, era de $-0,319$ MPa, enquanto que aquele da profundidade 35 cm era de $-0,0767$ MPa. Na tabela 5.10 e na figura 5.4, são apresentados, respectivamente, os valores da relação tensão/umidade e a correspondente curva de retenção de água no solo, determinados no laboratório de solos do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, IPH/UFRGS. Por meio da curva de retenção, foi determinado o conteúdo de umidade do solo, o qual é apresentado na tabela 5.11.

Tabela 5.10 – Curva de retenção – Tensão (MPa)/ Umidade θ (%)

Posição	Tensão					
	0,0	- 0,01	- 0,05	- 0,1	- 0,2	- 0,3
Superior	44,57	42,39	37,36	34,19	29,58	27,67
Inferior	35,71	35,06	33,55	32,28	30,86	29,84

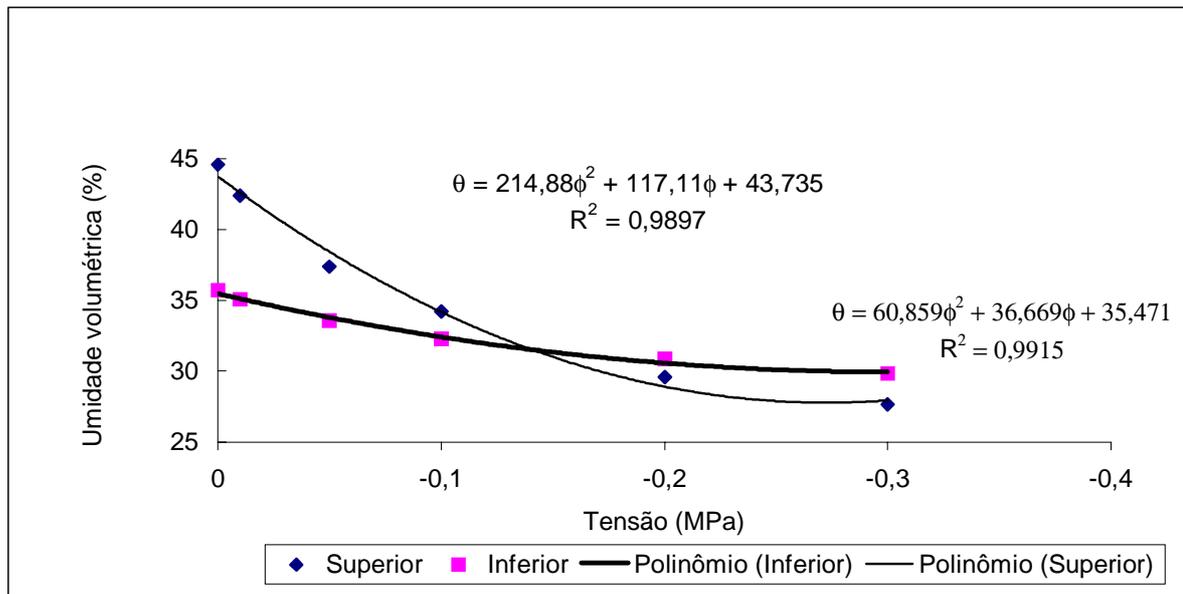


Figura 5.4 - Curva de retenção

Tabela 5.11 - Conteúdo de umidade determinado através da curva de retenção

Camada Superior		Camada Inferior	
Tensão ϕ (MPa)	Umidade θ (%)	Tensão ϕ (Mpa)	Umidade θ (%)
- 0,0767	36,0	- 0,319	24,4

b) TDR

Os valores médios encontrados para todas as guias são os seguintes:

Camada superior

$$Ka \text{ (médio)} = 11,51$$

$$\theta = 22,33\%$$

Camada inferior

$$Ka = 18,15$$

$$\theta = 30,87\%$$

Os valores de umidade determinados com o TDR foram 38% menores, respectivamente, para a camada superior. Já com relação à camada inferior, essa diferença foi de 26,5% para mais.

Os valores de umidade determinados com o TDR foram obtidos pela média de 27 determinações, em igual número de pontos. Já a determinação com o tensiômetro foi feita em um único ponto. Em razão da significativa diferença em termos de representatividade, trabalhou-se apenas com os valores determinados com o TDR.

5.2.4. Água disponível no solo

O teor de umidade na capacidade de campo, correspondente a $-0,03$ MPa, foi de 40,4%, em percentagem de água em relação ao volume de solo, para a camada superior, e de 34,4% para a inferior. De acordo com DOOREMBOS & PRUITT (1975), o valor médio da tensão de umidade do solo que não acarreta redução no valor da evapotranspiração do sorgo é de $-0,095$ MPa. Pela curva de retenção da figura 5.4, o conteúdo de água no solo nessa tensão é de 34,5% para a camada superior e de 32,5% para a inferior, em relação ao volume de solo. De acordo com a equação 4.3, a água facilmente disponível é a seguinte:

Camada superior

$$AFD = \frac{40,4 - 34,5}{100} 200 = 11,8\text{mm} \quad (5.2)$$

Camada inferior

$$AFD = \frac{34,4 - 32,5}{100} 200 = 3,8\text{mm} \quad (5.3)$$

Analisando-se esses resultados, percebe-se que se trata de um solo com uma disponibilidade de água facilmente disponível muito baixa. Considerando-se o valor da evapotranspiração potencial para o sorgo, determinado por MOTA (1976) para a região de Pelotas, RS, em solos com capacidade de armazenamento de água facilmente disponível de 15mm, que no mês de janeiro é de 3,8mm por dia, ter-se-ia um intervalo de irrigação de aproximadamente 4 dias para o período mais crítico.

5.2.5. Lâmina de água a aplicar

Para os teores de umidade do solo no momento da aplicação, as lâminas de água a serem aplicadas foram, na camada superior 36,14mm e na inferior 7,06mm, o que totalizou uma lâmina de 43,2mm.

A lâmina necessária para repor o conteúdo de água do solo foi significativamente maior na camada superior do que na inferior. Isso deu-se basicamente em razão do maior esgotamento de água da primeira camada. Nessa, a tensão de umidade superou os valores constantes da curva de retenção de água no solo, desenvolvida com o auxílio dos resultados obtidos na mesa de tensão do laboratório do IPH. Já na camada inferior, a tensão de umidade foi de aproximadamente $-0,2$ Mpa. Provavelmente, esse esgotamento resultou da maior concentração de raízes na primeira camada do solo.

5.2.6. Volume necessário a aplicar aos sulcos

O volume de água necessário a aplicar em cada sulco, para um comprimento de 200m e espaçamento de 0,95m, considerando-se a lâmina de irrigação de 43,2mm, determinada com o TDR, é de $8,21\text{m}^3$. Este volume foi determinado por meio da expressão 4.3. Esse valor foi obtido conforme o item 4.3.6. Trata-se de um valor relativamente baixo, o qual é motivado pela pequena capacidade de armazenamento do solo.

5.2.7. Tempo para incorporar a lâmina de água

O tempo para incorporar a lâmina de água ao solo está diretamente relacionado à taxa de infiltração de água no solo.

Para esta determinação, estimou-se uma eficiência de aplicação de 75%, resultando uma lâmina bruta de irrigação de 57,6mm para os resultados obtidos a partir das leituras do TDR.

Pela equação de infiltração de Kostiakov-Lewis, equação 5.1, foi determinado o tempo necessário para aplicar a lâmina acima. O valor encontrado foi de 62,6 minutos. Esse valor confere uma razoável operacionalidade à irrigação, permitindo que em uma jornada diária de 12 horas possam ser irrigados mais de dez conjuntos de sulcos. Considerando um comprimento de 200m, espaçamento de 0,95cm e vinte sulcos por conjunto, admitindo-se uma vazão derivada ao conjunto de 64 l.s^{-1} , resulta em uma área irrigada por dia em torno de quatro hectares. Para um intervalo de rega de quatro dias, conforme mencionado no item 5.2.4, o módulo de irrigação correspondente será de 20 hectares, o que é perfeitamente viável.

5.2.8. Avanço da corrente de água no sulco

Durante a aplicação de água ao sulco, quando da realização do teste de infiltração, foram registrados os tempos em que a frente de avanço superficial atingia as estacas colocadas no sulco em intervalos de vinte metros. Com esses registros, foi construída a curva de avanço da água no sulco.

A tabela 5.3 apresenta os valores encontrados para o avanço da corrente de água no sulco e a figura 5.5, a curva de avanço.

Tabela 5.3 – Curva de avanço de água no sulco

Tempo decorrido (s)	Distância (m)
0	0
185	20
390	40
646	60
900	80
1184	100
1460	120
1725	140
2008	160
2400	180
2710	200

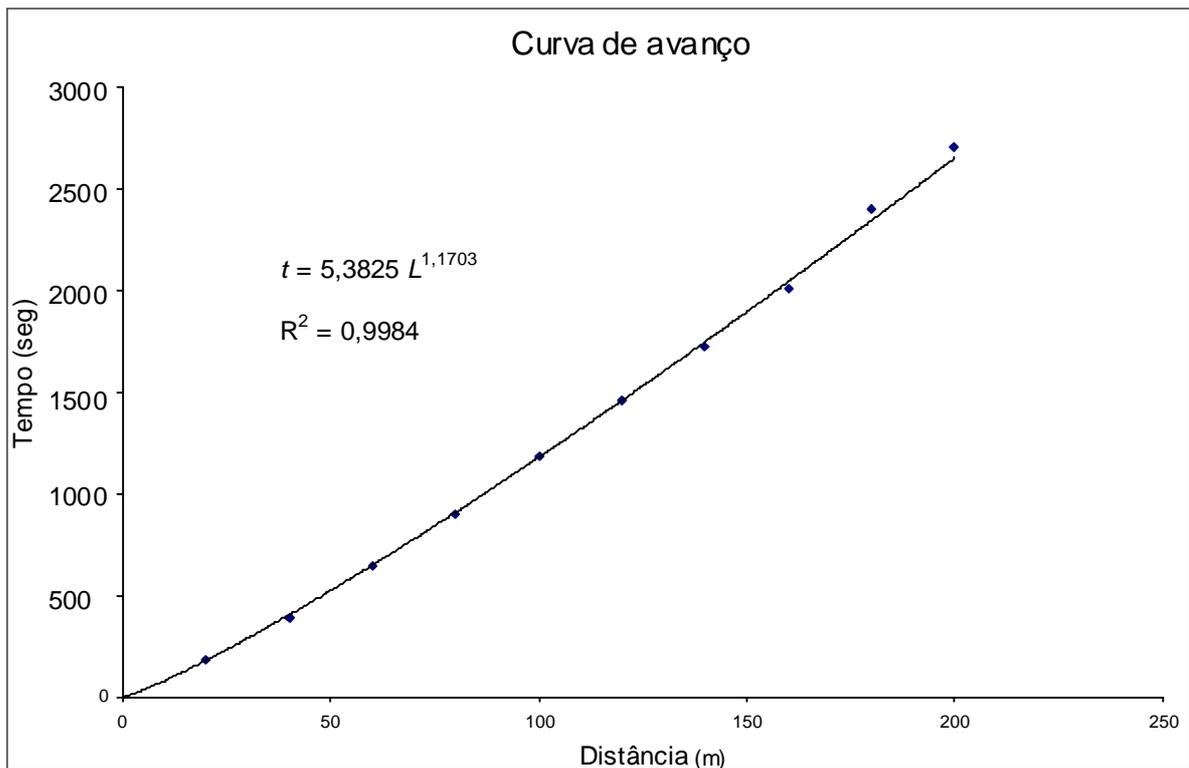


Figura 5.5 – Avanço da corrente de água no sulco

Quando da realização do ensaio para monitorar as variações do conteúdo de água no solo, conforme item 4.3.8, foram novamente registrados os tempos em que, agora com três

repetições, as frentes de avanço atingiam as respectivas estacas. A tabela 5.4 apresenta esses tempos e as figuras 5.7, 5.9 e 5.11, as respectivas curvas.

Tabela 5.4 – Tempo registrado em cada estaca e em cada sulco, da frente de avanço

Dist. Ac.(m)	Sulcos do 1º conjunto			Sulcos do 2º conjunto			Sulcos do 3º conjunto		
	Primeira repetição	Segunda repetição	Terceira repetição	Primeira repetição	Segunda repetição	Terceira repetição	Primeira repetição	Segunda repetição	Terceira repetição
0	9:44:55	9:45:02	9:44:30	15:34:05	15:34:15	15:34:30	19:14:40	19:14:30	19:14:30
20	9:46:30	9:46:25	9:47:00	15:36:05	15:36:15	15:37:05	19:16:10	19:16:20	19:16:37
40	9:48:45	9:49:30	9:48:55	15:38:30	15:38:50	15:40:05	19:18:25	19:18:50	19:18:45
60	9:51:50	9:53:20	9:51:35	15:41:25	15:42:10	15:43:30	19:21:34	19:22:00	19:21:15
80	9:55:30	9:58:05	9:55:05	15:44:58	15:46:20	15:47:15	19:24:40	19:26:05	19:24:25
100	9:59:20	10:03:30	9:58:20	15:49:00	15:51:37	15:51:37	19:28:58	19:31:00	19:28:35
120	10:03:05	10:08:50	10:02:06	15:53:50	15:56:25	15:55:50	19:33:13	19:35:57	19:32:30
140	10:06:50	10:14:00	10:05:28	15:56:10	16:01:20	15:59:40	19:37:32	19:40:45	19:36:20
160	10:10:33	10:19:39	10:09:00	16:00:35	16:07:00	16:04:25	19:41:55	19:45:40	19:41:00
180	10:15:15	10:25:10	10:13:30	16:05:35	16:12:15	16:09:30	19:47:15	19:51:30	19:46:00
200	10:19:50	10:30:10	10:18:10	16:10:25	16:17:00	16:14:56	19:52:00	19:56:45	19:49:55
cortou secou início	10:50:00 11:09	10:51:00 11:15:	10:52:00 11:10	16:34:00 17:05	16:35:00 17:03	16:36:00 17:00	20:15:00 20:45	20:16:00 20:50	20:17:00 20:40

5.2.8.1. Duração das fases de avanço e armazenamento

O fato de terem sido necessários três conjuntos de sulcos para cada repetição fez com que houvesse nove repetições para a determinação do avanço da corrente.

A seguir são apresentados e avaliados os tempos de duração das fases de avanço e armazenamento para os três conjuntos, com três repetições cada.

5.5.1. Fase de avanço

As tabelas 5.5 e 5.6 apresentam a duração das fases de avanço de cada repetição em cada conjunto, assim como os valores médios de cada repetição.

Tabela 5.5 – Duração da fase de avanço

Sulcos do 1º conjunto			Sulcos do 2º conjunto			Sulcos do 3º conjunto		
Primeira repetição	Segunda repetição	Terceira repetição	Primeira repetição	Segunda repetição	Terceira repetição	Primeira repetição	Segunda repetição	Terceira repetição
00:34:55	00:37:08	00:33:40	00:36:20	00:43:45	00:40:26	00:37:20	00:43:15	00:35:25

Tabela 5.6 - Valores médios de duração da fase de avanço

Primeira repetição	Segunda repetição	Terceira repetição
00:36:12	00:43:23	00:36:30

A média das três repetições foi de 38 minutos e 42 segundos. Observa-se que houve uma variação para menos, de seis minutos e meio aproximadamente, em relação à determinação da duração da fase de avanço efetuada anteriormente. Essa diferença, em torno de 14% do tempo total, não parece corresponder às variações dos valores de umidade do solo nas duas oportunidades. O mais provável é que essa diferença seja resultado das irregularidades das seções dos sulcos em que foram realizados os dois testes. Além de não serem os mesmos sulcos, é necessário considerar que foram construídos com um sulcador tracionado por trator, onde, buscando-se ser representativo das condições que se teria no campo, não foi efetuado nenhum acabamento manual destes. As imperfeições das seções podem ser responsáveis por essa variação na velocidade do fluxo, e, por consequência, do tempo da fase de avanço de cada sulco.

Essa suposição é também reforçada pelo fato de que a maior variação na duração da fase de avanço entre as três repetições do último teste foi de oito minutos, maior, portanto, que a diferença analisada.

5.5.2. Fase de armazenamento

A fase de armazenamento inicia quando a água atinge o final do sulco e termina quando tiver sido incorporado todo o volume necessário a aplicar ao solo, quando então é suspenso o fornecimento de água ao sulco.

De acordo com o item 5.2.7, o tempo para a aplicação da lâmina necessária foi de 62,6 minutos e conseqüentemente, da duração da fase de armazenamento, sendo a diferença entre o tempo total e a fase de avanço, de 26,4, 19,4 e 26,1 minutos para primeira, segunda e terceira repetição, respectivamente. Durante a realização dos testes, problemas de ordem operacionais não permitiram que a duração efetiva da fase de armazenamento em cada repetição, fosse seguida à risca, entretanto as suas variações foram devidamente consideradas nas determinações que se seguiram. As tabelas 5.7 e 5.8 apresentam a duração das fases de armazenamento de cada repetição em cada conjunto, assim como os valores médios de cada repetição.

A seguir são apresentados os valores verificados a campo para a fase de armazenamento em cada repetição.

Tabela 5.7 – Duração da fase de armazenamento

Sulcos do 1º conjunto			Sulcos do 2º conjunto			Sulcos do 3º conjunto		
Primeira repetição	Segunda repetição	Terceira repetição	Primeira repetição	Segunda repetição	Terceira repetição	Primeira repetição	Segunda repetição	Terceira repetição
00:30:10	00:20:50	00:33:50	00:23:35	00:18:00	00:21:04	00:23:00	00:19:15	00:27:05

Tabela 5.8 - Valores médios de duração da fase de armazenamento

Primeira repetição	Segunda repetição	Terceira repetição
00:28:16	00:20:53	00:23:06

A média das três repetições, neste caso, foi de 24 minutos e 5 segundos.

5.6. Tempo verificado de aplicação de água ao sulco (*ta*)

O tempo de aplicação da água ao sulco é definido pelo somatório dos tempos das fases de avanço e armazenamento, conforme apresentado na tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Tempo de aplicação de água ao sulco

Primeira repetição	Segunda repetição	Terceira repetição
01:04:28	01:04:16	00:59:36

O tempo médio das três repetições foi de uma hora, dois minutos e quarenta e sete segundos.

5.7. Volume de água aplicado em cada sulco

Conforme o capítulo 4, o volume de água aplicado em cada sulco é o produto da vazão máxima não-erosiva pelo tempo de aplicação desta. Esse tempo é o somatório das fases de avanço e de armazenamento.

Primeira repetição

$$Va = (3,2 \cdot 60 \cdot 64,05)/1.000 = 12,3\text{m}^3 \quad (5.8)$$

Segunda repetição

$$Va = (3,2 \cdot 60 \cdot 64,03)/1.000 = 12,29\text{m}^3 \quad (5.9)$$

Terceira repetição

$$Va = (3,2 \cdot 60 \cdot 59,60)/1.000 = 11,44\text{m}^3 \quad (5.10)$$

Média entre as três repetições

$$Va = 12,01 \text{ m}^3$$

5.8. Estimativa inicial da eficiência de aplicação

A eficiência de aplicação é a relação entre a quantidade de água necessária a aplicar ao solo para elevar o teor de umidade deste à capacidade de campo, pela quantidade de água efetivamente aplicada.

$$Ea = Vn/Va \quad (5.11)$$

onde Vn é o volume necessário e Va o volume de água aplicado ao sulco

Primeira repetição

$$Ea = 8,21 / 12,03 = 68,2\% \quad (5.12)$$

Segunda repetição

$$Ea = 8,21 / 12,29 = 66,8\% \quad (5.13)$$

Terceira repetição

$$Ea = 8,21 / 11,44 = 71,8\% \quad (5.14)$$

Média das três repetições

$$Ea = 68,9\%$$

5.9. Monitoramento da variação do conteúdo de água do solo durante a irrigação

As tabelas 5.12, 5.14 e 5.16 mostram as variações dos conteúdos de água do solo durante o processo de irrigação, respectivamente para a primeira, segunda e terceira repetição. A última linha refere-se à leitura realizada no dia seguinte à realização do teste.

As tabelas 5.13, 5.15 e 5.17 apresentam o tempo em que a frente de umedecimento atingiu as profundidades onde se encontravam as guias de onda, respectivamente para a primeira, segunda e terceira repetição. A partir dessas tabelas, são construídas as curvas referentes aos tempos em que as frentes de infiltração de água no solo e a frente de avanço superficial do escoamento da água no sulco atingiram cada guia de onda (figuras 5.6, 5.8 e 5.10). A partir destas mesmas tabelas, são traçadas as curvas das frentes de avanço superficial e de infiltração correspondentes a cada ponto de localização das guias de ondas (figuras 5.7, 5.9 e 5.11).

Tabela 5.12 – Conteúdos de água do solo (θ %) durante a realização do teste de irrigação do sulco, da primeira repetição.

Dist. (m)	0		21	42		79		100	121		154		175		200
Tempo 1	00:00:00		00:01:49	00:04:18		00:09:38		00:13:44	00:18:11		00:24:23		00:29:13	00:36:12	
	Início		Meio	Fim		Início		Meio	Fim		Início		Meio	Fim	
Tempo 2	S	I	S	S	I	S	I	S	S	I	S	I	S	S	I
00:00:00	9,5	27,3	19,5	8,7	45,8	17,5	20,1	9,8	20,6	22,8	27,8	31,9	21,7	27,0	28,2
00:01:49	17,9	27,4	20,0	8,7	45,8	17,5	20,1	9,8	20,6	22,8	27,8	31,9	21,7	27,0	28,2
00:04:18	29,4	27,4	20,1	8,7	45,8	17,5	20,1	9,8	20,6	22,8	27,8	31,9	21,7	27,0	28,2
00:06:10	38,0	27,5	20,2	61,9	46,3	17,4	20,0	9,9	20,6	22,6	27,7	32,0	21,6	27,0	28,3
00:09:38	42,8	27,7	22,1	61,1	46,4	28,7	28,6	9,9	20,6	22,6	27,7	32,0	21,6	27,0	28,3
00:13:44	48,4	28,0	24,3	60,2	46,6	42,1	38,8	14,2	37,2	22,6	27,7	32,0	21,6	27,0	28,3
00:18:11	54,6	28,3	26,8	59,2	46,8	56,6	49,9	16,8	47,0	22,6	27,7	32,0	21,6	27,0	28,3
00:19:08	55,9	28,4	27,3	59,0	46,8	59,7	52,3	17,3	49,1	22,6	27,6	32,1	21,6	27,0	28,3
00:24:23	55,7	38,4	35,7	59,0	47,0	59,1	52,0	20,4	49,1	23,1	27,6	32,1	21,6	27,0	28,3
00:29:13	55,6	47,5	43,3	58,9	47,1	58,6	51,7	23,3	51,5	23,6	31,8	36,0	21,6	27,0	28,3
00:32:08	55,5	53,1	48,0	58,9	47,2	58,3	51,5	25,0	52,2	23,9	34,3	38,4	52,5	27,0	28,3
00:36:12	55,4	54,8	48,3	58,9	47,2	58,1	51,4	26,4	52,4	24,1	35,0	38,4	52,5	27,0	28,3
00:45:08	55,1	58,5	48,6	58,8	47,3	57,8	51,1	29,6	53,0	24,4	36,5	38,4	52,6	45,4	46,2
00:58:21	55,4	58,1	48,7	58,6	47,2	57,4	51,2	58,2	53,1	25,1	45,9	38,5	52,7	45,4	46,2
01:12:31	56,1	57,7	48,3	58,0	47,3	56,9	51,0	60,4	53,4	25,4	46,0	38,5	53,1	45,6	46,2
01:25:28	55,7	53,3	48,3	57,9	47,4	56,4	50,7	60,4	53,4	25,7	46,1	38,5	53,5	45,5	46,3
01:38:28	55,4	53,1	48,2	57,7	47,4	56,0	50,7	60,4	53,3	25,7	46,1	38,5	53,5	45,6	46,3
01:51:28	51,6	53,1	48,0	57,7	47,3	56,2	50,5	60,4	53,3	25,9	46,1	38,6	53,6	45,7	46,3
02:04:27	50,7	53,2	48,0	57,3	47,4	56,1	50,5	60,3	53,3	26,0	46,1	38,5	53,7	45,6	46,3
02:18:48	50,6	53,2	47,9	57,1	47,6	56,0	50,5	60,3	53,2	26,1	46,1	38,5	53,7	45,7	46,4
02:31:48	50,5	53,3	47,8	57,1	47,4	56,0	50,5	60,4	53,2	26,2	46,2	38,6	53,7	45,6	46,3
02:44:48	50,2	53,2	47,9	57,1	47,4	55,7	50,4	60,3	53,0	26,2	46,2	38,6	53,8	45,7	46,3
02:59:13	50,3	53,4	47,9	57,0	47,5						46,3	38,6	53,6	45,7	46,4
03:12:14	50,4	53,2	47,9	57,0	47,6						46,2	38,6	53,8	45,8	46,5
03:25:12	50,1	53,2	47,9	56,7	47,6						46,3	38,6	53,8	45,8	46,5
18:53:47	48,5	47,7	34,3	30,0	41,7	54,9	49,3	33,8	26,4	27,1	46,5	38,9	53,7	46,2	46,4

O tempo 1 refere-se ao tempo de avanço da frente superficial e o tempo 2, da frente de infiltração. A letra S significa superior e a letra I, inferior.

Com auxílio da curva de retenção de umidade (figura 5.4), verifica-se que os conteúdos de umidade das camadas superior e inferior do solo no ponto de saturação são, respectivamente, 44,57% e 35,71%, em relação ao volume. Mediante a identificação desses pontos nas tabelas 5.12, 5.14 e 5.16, define-se o momento em que a frente de saturação atingiu cada haste nas profundidades de 15cm e 35cm, em cada repetição. Observa-se, nessas tabelas, que as leituras correspondentes às últimas linhas, que foram feitas no dia seguinte à

realização do teste, apresentam valores de conteúdo de água, inferior aos das linhas anteriores. Admite-se que a partir de um determinado teor de umidade, forma-se um caminho preferencial do fluxo de água na interface solo/haste, o que resulta em um valor muito alto de umidade naquela zona. Findo o movimento de água no solo, o excesso de água percola para profundidades maiores, estabelecendo-se um equilíbrio do teor de umidade dessa zona com o restante do solo nessa profundidade. Em razão disso, conclui-se que não houve uma saturação do solo de modo generalizado, como indicam os resultados relativos às últimas leituras realizadas pelo TDR no dia da realização do teste. Somente alguns pontos apresentaram, no dia seguinte, teores de umidade correspondentes à saturação. Os valores da última linha das tabelas 5.14, 5.16 e 5.18, confrontados com aqueles correspondentes à umidade de saturação mencionados anteriormente, permitem identificar a frente de saturação de cada repetição, a qual é mostrada nas figuras 5.7, 5.9 e 5.11.

Quarenta e oito horas após a realização dos testes, foram abertos poços de observação em três pontos de cada repetição, ou seja, no início, na metade e no final de cada sulco. Esses poços foram abertos até a profundidade de 40cm, ou seja, até o início da camada de impedimento. Em nenhum dos poços localizados no início e meio do sulco foi detectada a presença de lâmina de água, o que caracterizaria a saturação do solo. Somente nos poços localizados no final do sulco é que foram verificadas lâminas de água sobre a camada de impedimento. As alturas de lâmina sobre a camada de impedimento nesses poços foram de 3, 12 e 5cm respectivamente para a primeira, segunda e terceira repetição.

Essa verificação contraria o que foi registrado nas leituras do TDR. Nestas, verificou-se que a saturação ocorreu em outros pontos do perfil do solo. A ocorrência de saturação no final do sulco contraria as observações de diversos autores ZERIHUN (1997), BERNARDO (1995), HIDALGO GRANADOS (1971), que indicam sempre uma maior lâmina de

infiltração no início do que no final do sulco, em razão do maior tempo de permanência da lâmina de água no início do sulco. Entretanto, para este tipo de solo, onde a taxa de infiltração é baixa e o volume de água armazenado no sulco no momento do corte do fornecimento de água ao sulco, bastante grande em razão da pequena declividade do sulco, as fases de depleção e recessão tornam-se muito significativas. Na depleção, a água continuou escoando de montante para jusante. Entretanto, como essa massa de água não era realimentada, esse movimento foi diminuindo e, conseqüentemente, a quantidade residual de água no sulco, o que ocorreu com um decaimento maior do início para o final. Em razão disso, nessa fase e na de recessão, a lâmina infiltrada foi maior no final do sulco.

Tabela 5.13 - Tempo em que a frente de umedecimento atingiu cada ponto de profundidade nas respectivas estações - primeira repetição.

Distância (m)	Superfície	Superior	Inferior
0	00:00:00	00:01:49	00:06:10
21	00:01:49	00:04:11	00:06:10
42	00:04:18	00:06:10	00:06:10
75	00:09:38	00:14:07	00:14:07
100	00:13:44	00:18:25	00:19:39
121	00:18:11	00:19:08	00:25:11
154	00:24:23	00:30:11	00:30:11
175	00:29:13	00:32:08	00:36:28
200	00:36:12	00:37:20	00:45:08

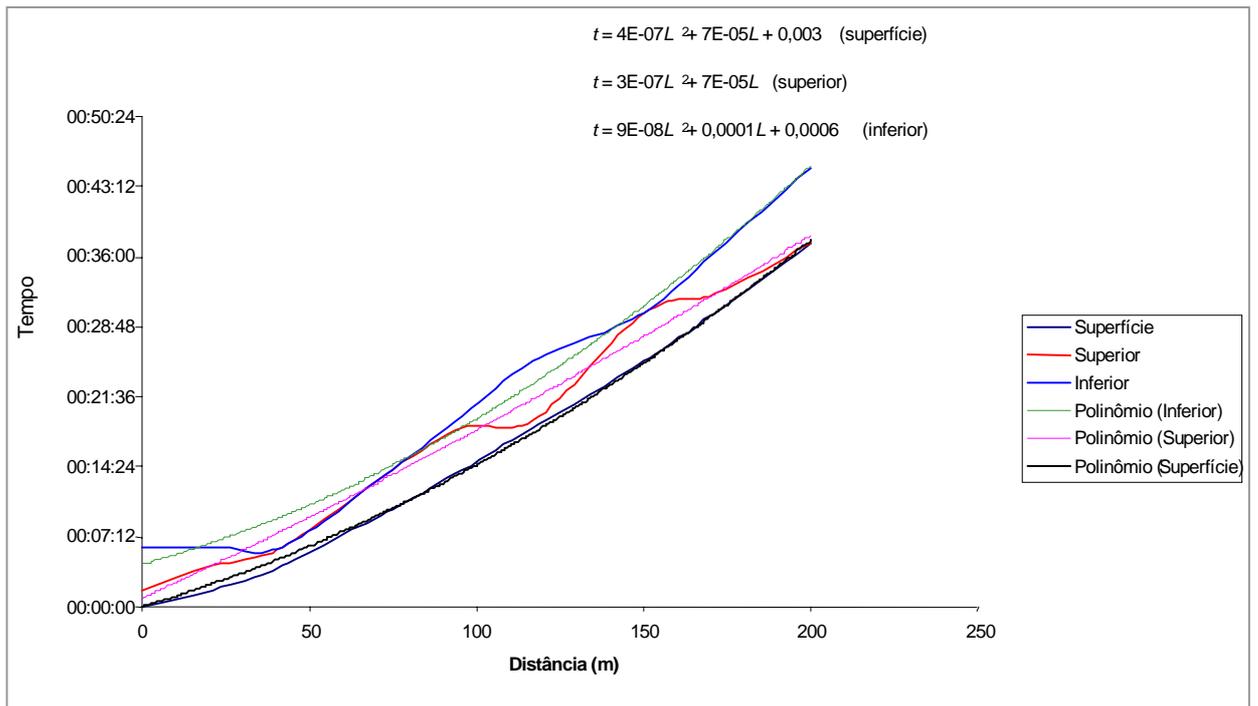


Figura 5.6 – Tempos em que as frentes de infiltração e de avanço superficial atingiram cada sensor e estaca de localização destes na superfície. Primeira repetição.

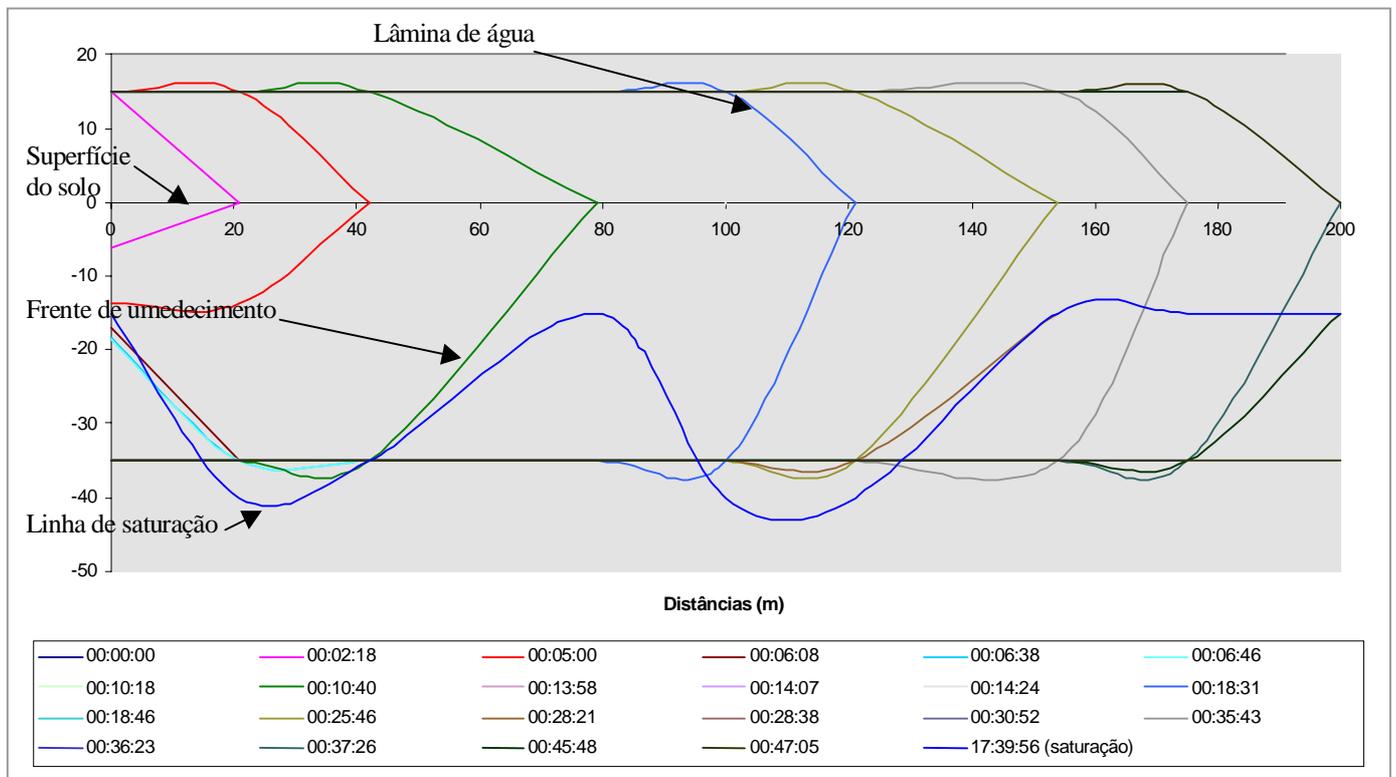


Figura 5.7 – Frentes de avanço superficial, de infiltração e de saturação em cada estação, primeira repetição.

Tabela 5.14 – Conteúdos de água do solo durante a realização do teste de irrigação do sulco, segunda repetição.

Dist. (m)	0		21		42		75		100		121		154		175		200	
Tempo 1	00:00:00		00:01:52		00:04:49		00:11:09		00:16:24		00:21:43		00:30:08		00:35:30		00:43:23	
	Início		Meio		Fim		Início		Meio		Fim		Início		Meio		Fim	
Tempo 2	S	I	S	S	I	S	I	S	S	I	S	I	S	S	I	S	S	I
00:00:00	17	28,5	15,4	18	26,7	19,5	14	17,6	19,4	29,5	29,2	28,2	26,5	18,9	25			
00:01:52	17	35,7	15,4	32	34,7	19,5	13,9	17,6	19,4	29,4	29,2	28,2	26,5	18,9	25			
00:04:46	17,1	47,0	15,5	55	47,2	19,4	13,7	17,6	19,3	29,4	29,2	28,2	26,6	19	25			
00:04:49	17,1	47,0	15,6	55	47,2	19,4	13,7	17,7	19,3	29,4	29,2	28,2	26,6	19	25			
00:11:09	17,1	47,1	25,6	54	47,2	19,4	13,8	32,2	19,3	29,4	29,2	28,2	26,6	19	25			
00:16:24	17	47,2	33,8	54	47,3	19,4	13,8	44,2	19,2	29,4	29,1	28,2	26,6	18,9	25			
00:17:46	17	47,2	36,0	54	47,3	19,4	13,8	47,3	19,2	29,4	29,1	28,2	26,6	18,9	25			
00:21:43	17	47,2	41,0	54	47,3	19,4	13,8	49,4	19,6	29,4	34,0	28,8	28,9	30,6	32,6			
00:30:08	17,1	47,3	51,5	54	47,3	19,5	13,9	53,8	19,6	29,3	44,4	49,8	31,5	55,6	48,8			
00:30:46	17,1	47,3	52,3	54	47,3	19,5	14	54,1	19,6	29,3	45,2	50,9	34,2	57,5	50			
00:35:30	17,1	47,3	52,2	54	47,3	19,5	17,4	54,1	22,4	31,2	45,3	51	40,1	57,6	50			
00:43:23	17	47,3	52,1	54	47,3	19,5	23,0	54,2	27,2	34,3	45,4	51	47,3	57,7	50,1			
00:43:46	17	47,3	52,0	54	47,3	19,7	23,3	54,2	27,4	34,5	45,6	51,1	47,7	57,8	50,1			
00:56:47	17,1	47,3	52,2	54	47,4	25,4	58	53,8	49,2	45,8	45,7	51,1	48,6	57,7	50,2			
01:09:46	17,7	47,4	51,8	53	47,4	28,5	57,9	53,7	49,5	46,1	45,6	51,1	48,7	57,8	50,3			
01:22:46	19,0	47,5	51,6	53	47,3	32,1	57,5	53,5	49,5	46,1	45,8	51,2	48,7	57,6	50,6			
01:35:47	20,5	47,3	51,5	53	47,3	42,4	57,2	53,2	49,6	46,1	45,7	51,2	48,8	57,6	50,5			
01:48:46	22,1	47,3	51,6	53	47,5	54,9	57,1	53,1	49,5	46,2	45,7	51,2	48,8	57,6	50,4			
02:01:47	23,8	47,4	51,5	53	47,5	58,8	56,8	52,9	49,7	46,2	45,7	51,2	48,8	57,6	50,5			
02:14:46	25,3	47,3	51,2	52	47,5	59,3	56,8	52,7	49,8	46,2	45,7	51,2	48,9	57,7	50,4			
02:27:46	25,9	47,3	51,3	52	47,4	59,1	56,9	52,6	49,9	46,2	45,8	51,4	49	57,7	50,6			
02:40:46	26,4	47,4	51,3	52	47,4	59,3	56,5	52,5	49,8	46,2	46	51,4	49	57,8	50,6			
02:53:46	26,8	47,3	51,2	52	47,4						46	51,5	49	57,7	50,6			
03:13:32	27,1	47,5	51,3	52	47,5						46,1	51,2	49	57,7	50,7			
03:19:45	27,5	47,4	51,2	52	47,5						46	51,3	49	57,8	50,6			
13:15:48	31,5	47,2	40,1	47	46,9	55,7	57	45	30,5	41,6	46,3	51,5	48,9	57,7	50,6			

O tempo 1 refere-se ao tempo de avanço da frente superficial e o tempo 2, da frente de infiltração. S e I referem-se às guias de onda superiores e inferiores, respectivamente.

Tabela 5.15 - Tempo em que a frente de umedecimento atingiu cada ponto de profundidade nas respectivas estações - segunda repetição

Distância (m)	Superfície	Superior	Inferior
0	00:00:00	01:22:46	00:04:46
21	00:01:32	00:11:08	00:04:46
42	00:04:51	00:04:46	00:04:46
75	00:11:08	00:28:52	00:30:46
100	00:16:19	00:17:46	00:32:34
121	00:21:17	00:28:52	00:34:23
154	00:28:52	00:30:46	00:30:46
175	00:34:23	00:42:15	00:36:08
200	00:42:15	00:43:46	00:43:46

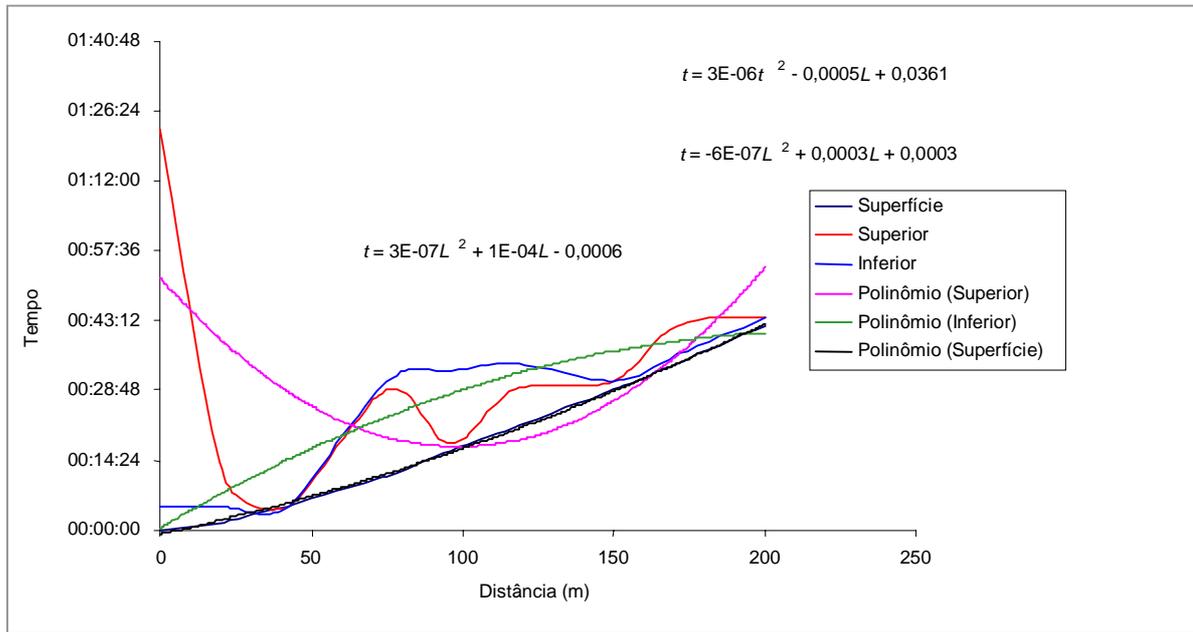


Figura 5.8 – Tempos em que as frentes de infiltração e de avanço superficial atingiram cada sensor e estaca de localização destes na superfície. Segunda repetição.

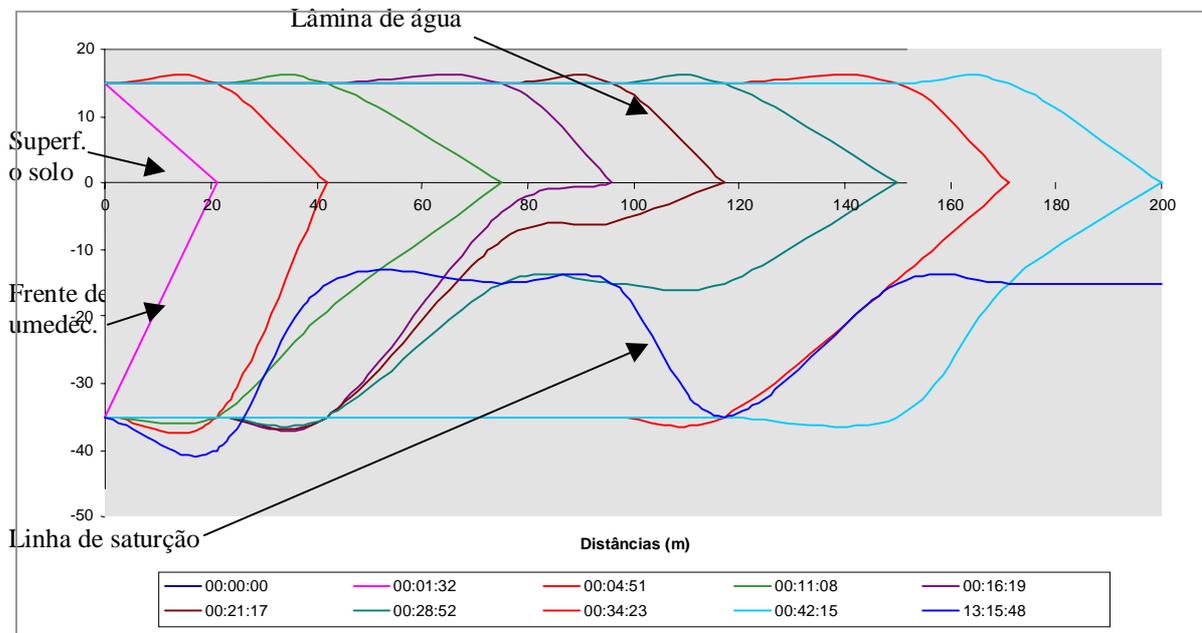


Figura 5.9 – Frentes de avanço superficial, de infiltração e de saturação em cada estação. Segunda repetição.

Tabela 5.16 – Conteúdos de água do solo durante a realização do teste de irrigação do sulco, terceira repetição.

Dist. (m)	0		21		42		75		100		121		154		175		200	
Tempo 1	00:00:00		00:02:31		00:05:02		00:10:13		00:14:02		00:18:23		00:24:49		00:29:39		00:36:30	
	Início		Meio		Fim		Início		Meio		Fim		Início		Meio		Fim	
Tempo 2	S	I	S	S	I	S	I	S	S	I	S	I	S	S	I	S	S	I
00:00:00	20,3	31,9	20,0	13	28,5	8,5	20,3	26,8	24,2	25	27,8	31,9	21,7	27	28,2			
00:02:31	28,4	34,9	20,0	13	28,5	8,5	20,2	26,8	24,3	25	27,8	31,9	21,7	27	28,2			
00:05:02	36,4	38,0	20,0	37,7	43,3	8,5	20,1	26,8	24,3	25	27,7	32	21,6	27	28,3			
00:07:46	45,2	41,3	20,0	51	51,4	8,5	20	26,8	24,3	25	27,7	32	21,6	27	28,3			
00:10:13	45,2	41,3	21,6	51	51,4	8,5	20	26,8	24,3	25	27,7	32	21,6	27	28,3			
00:14:02	45,2	41,3	24,1	51	51,4	9,9	42,3	26,8	24,3	25	27,7	32	21,6	27	28,3			
00:18:23	45,1	41,3	26,9	51	51,4	10,9	57,8	26,8	24,3	25	27,6	32,1	21,6	27	28,3			
00:20:46	45,1	41,4	28,4	51	51,4	11,4	66,2	26,8	24,3	58,9	27,6	32,1	21,6	27	28,3			
00:24:49	45,1	41,7	32,2	51	51,4	25,0	66,2	34,1	24,3	59,0	27,6	32,1	31,2	27	28,3			
00:29:39	45,1	41,8	41,2	51,1	51,5	41,2	65,9	42,7	24,4	58,9	31,2	32,1	35,9	27	28,3			
00:33:45	45,2	41,8	47,1	51	51,5	54,9	65,7	50,1	24,4	59,2	34,3	38,4	52,5	27	28,3			
00:36:30	45,2	41,8	47,1	51,1	51,5	54,7	65,7	50,1	24,6	59,2	34,8	38,4	52,5	27	28,3			
00:46:47	45,1	41,9	46,9	51	51,4	53,9	65,7	54,7	25,5	59,2	36,5	38,4	52,6	45,4	46,2			
00:59:51	45,1	41,7	46,9	51	51,4	53,7	65,6	54,8	26,5	59,1	45,9	38,5	52,7	45,4	46,2			
01:13:14	44,6	41,7	46,9	51	51,3	53,7	65,4	55	32,1	59,2	46	38,5	53,1	45,6	46,2			
01:26:13	44,3	42,4	46,2	51	51,4	53,7	65,4	55	40,9	59,3	46,1	38,5	53,5	45,5	46,3			
01:39:13	44,3	42,3	45,5	50	51,6	53,6	65,4	54,9	48,7	59,2	46,1	38,5	53,5	45,6	46,3			
01:52:13	44,1	42,5	45,3	50	51,5	53,4	65,2	54,9	49,2	59,3	46,1	38,6	53,6	45,7	46,3			
02:05:13	44,5	42,6	45,2	50	51,4	53,5	65,2	55	49,2	59,4	46,1	38,5	53,7	45,6	46,3			
02:18:40	44,3	43,0	45,2	50	51,7	53,4	65,2	54,9	49,4	59,2	46,1	38,5	53,7	45,7	46,4			
02:31:40	44,4	42,7	45,1	50	51,5	53,4	65,3	55	49,5	59,3	46,2	38,6	53,7	45,6	46,3			
02:44:40	44,4	42,7	45,1	50	51,5	53,4	65,2	54,5	49,4	59,4	46,2	38,6	53,8	45,7	46,3			
02:58:33	44,3	42,9	45,0	50	51,5						46,3	38,6	53,6	45,7	46,4			
03:11:33	44,6	42,8	45,0	50	51,6						46,2	38,6	53,8	45,8	46,5			
03:24:32	44,4	42,9	45,0	50	51,5						46,3	38,6	53,8	45,8	46,5			
16:26:06	43,1	41,7	38,0	49	50,1	51,2	63,7	33,1	29,2	38,2	46,5	38,9	53,7	46,2	46,4			

O tempo 1 refere-se ao tempo de avanço da frente superficial e o tempo 2, da frente de infiltração. S e I referem-se às guias de onda superiores e inferiores, respectivamente.

Tabela 5.17 - Tempo em que a frente de umedecimento atingiu cada ponto de profundidade nas respectivas estações - terceira repetição

Distância (m)	Superfície	Superior	Inferior
0	00:00:00	00:02:36	00:02:36
21	00:02:36	00:07:46	00:07:46
42	00:04:50	00:07:46	00:07:46
75	00:11:43	00:11:43	00:16:15
100	00:16:15	00:24:56	00:24:56
121	00:19:47	00:20:46	00:20:46
154	00:24:56	00:29:15	00:33:45
175	00:29:15	00:33:45	00:39:14
200	00:35:25	00:35:25	00:46:47

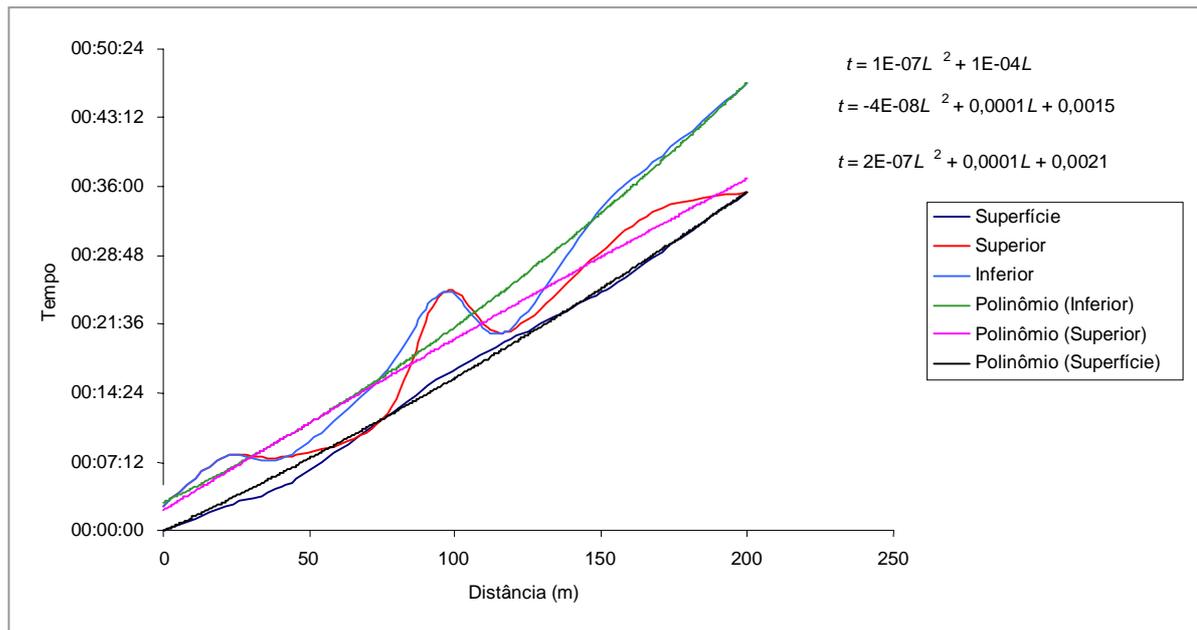


Figura 5.10 – Tempos em que as frentes de infiltração e de avanço superficial atingiram cada sensor e estaca de localização destes na superfície. Terceira repetição.

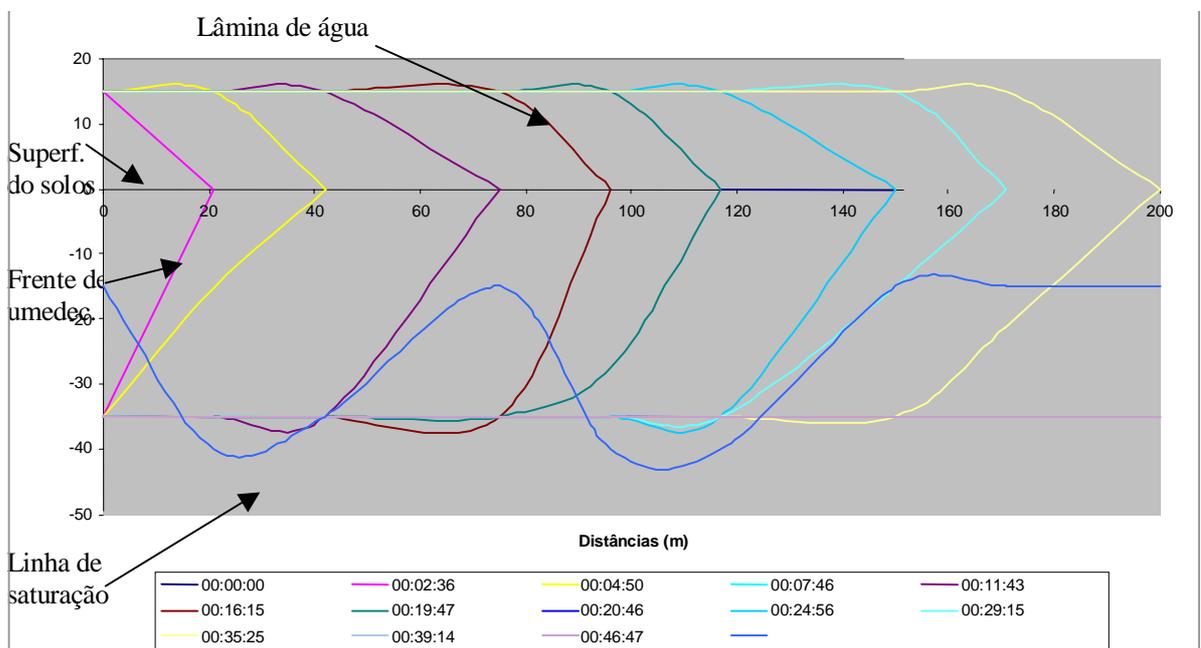


Figura 5.11 - Frentes de avanço superficial, de infiltração e de saturação em cada estação. Terceira repetição.

Pela análise dos resultados relativos à frente de infiltração, verifica-se que aqueles relativos à primeira e terceira repetição são similares entre si, entretanto os relativos à segunda repetição discrepam totalmente dos outros dois. A necessidade de colocação das guias de onda em posição horizontal, faz com que seja necessário abrir-se um poço no solo, com dimensões um pouco superiores às das guias, para que estas possam ser colocadas nessa posição. Posteriormente, o solo tem de ser recolocado em sua posição original, tendo-se o cuidado de seguir a mesma ordem das camadas e de conferir um grau de compactação que não altere muito a porosidade natural deste. Apesar desses cuidados, admite-se que, na segunda repetição, as condições do solo em torno das guias, proporcionaram um fluxo de água mais livre, diferente daqueles das condições naturais. Em virtude desse fato, os resultados da segunda repetição foram desconsiderados.

A tabela 5.18 apresenta os valores médios entre a primeira e terceira repetições, dos conteúdos de umidade do solo durante a realização dos testes. A figura 5.12 apresenta as curvas relativas às médias da primeira e terceira repetições, correspondentes aos tempos em que as frentes, superficial de avanço da água e, superior e inferior de infiltração, atingiram os pontos correspondentes à localização dos sensores. A figura 5.9 apresenta também os valores médios entre essas repetições, das frentes de avanço de água no sulco e superior e inferior de infiltração. A tabela 5.19 apresenta a média entre a primeira e terceira repetição, do tempo em que a frente de umedecimento atingiu as profundidades onde encontravam-se as guias de onda, respectivamente para a primeira e terceira repetições. A partir dessa tabela, foram construídas as curvas referentes aos tempos em que as frentes de infiltração e de avanço superficial atingiram cada sensor e estaca de localização destes na superfície (figura 5.12).

Tabela 5.18 – Conteúdos de água do solo durante a realização do teste de irrigação do sulco. Média da primeira e terceira repetição.

Dist. (m)	0		21			42			79		100		121		154		175		200	
Tempo 1	00:00:00		00:02:10			00:04:40			00:09:55		00:13:53		00:18:17		00:24:36		00:29:26		00:36:21	
	Início		Meio			Fim			Início		Meio		Fim		Início		Meio		Fim	
Tempo 2	S	I	S	S	I	S	I	S	S	I	S	I	S	S	I	S	S	S	S	I
00:00:00	14,9	29,6	19,8	10,9	37,2	13,0	20,2	18,3	22,4	23,9	27,8	31,9	21,7	27,0	28,2					
00:02:10	23,2	31,2	20,0	10,9	37,2	13,0	20,2	18,3	22,5	23,9	27,8	31,9	21,7	27,0	28,2					
00:04:40	32,9	32,7	20,0	23,2	44,6	13,0	20,1	18,3	22,5	23,9	27,8	32,0	21,7	27,0	28,3					
00:06:58	41,6	34,4	20,1	56,5	48,9	13,0	20,0	18,4	22,5	23,8	27,7	32,0	21,6	27,0	28,3					
00:09:55	44,0	34,5	21,9	56,1	48,9	18,6	24,3	18,4	22,5	23,8	27,7	32,0	21,6	27,0	28,3					
00:13:53	46,8	34,7	24,2	55,6	49,0	26,0	40,6	20,5	22,5	23,8	27,7	32,0	21,6	27,0	28,3					
00:18:17	49,9	34,8	26,9	55,1	49,1	33,8	53,9	21,8	35,7	23,8	27,7	32,1	21,6	27,0	28,3					
00:19:57	50,5	34,9	27,9	55,0	49,1	35,6	59,3	22,1	36,7	40,8	27,6	32,1	21,6	27,0	28,3					
00:24:36	50,4	40,1	34,0	55,0	49,2	42,1	59,1	27,3	36,7	41,1	27,6	32,1	21,6	27,0	28,3					
00:29:26	50,4	44,7	42,3	55,0	49,3	49,9	58,8	33,0	38,0	41,3	31,5	34,1	28,8	27,0	28,3					
00:32:08	50,4	47,5	47,6	55,0	49,4	56,6	58,6	37,55	38,3	41,6	34,3	38,4	52,5	27,0	28,3					
00:36:24	50,3	48,3	47,7	55,0	49,4	56,4	58,6	38,3	38,5	41,7	34,9	38,4	52,5	27,0	28,3					
00:45:58	50,1	50,2	47,75	54,9	49,4	55,9	58,4	42,15	39,3	41,8	36,5	38,4	52,6	45,4	46,2					
00:59:06	50,3	49,9	47,8	54,8	49,3	55,6	58,4	56,5	39,8	42,1	45,9	38,5	52,7	45,4	46,2					
01:12:53	50,4	49,7	47,6	54,5	49,3	55,3	58,2	57,7	42,8	42,3	46,0	38,5	53,1	45,6	46,2					
01:25:51	50,0	47,9	47,3	54,5	49,4	55,1	58,1	57,7	47,2	42,5	46,1	38,5	53,5	45,5	46,3					
01:38:50	49,9	47,7	46,9	53,9	49,5	54,8	58,1	57,7	51,0	42,5	46,1	38,5	53,5	45,6	46,3					
01:51:51	47,9	48,6	46,7	53,9	49,4	54,8	57,9	57,7	51,3	42,6	46,1	38,5	53,6	45,7	46,3					
02:04:50	47,6	47,9	46,6	53,7	49,4	54,8	57,9	57,7	51,3	42,7	46,1	38,5	53,7	45,6	46,3					
02:18:44	47,5	48,1	46,6	53,6	49,7	54,7	57,9	56,6	51,3	42,7	46,1	38,5	53,7	45,7	46,4					
02:31:44	47,5	48,0	46,5	53,6	49,5	54,7	57,9	57,7	51,4	42,8	46,2	38,6	53,7	45,7	46,3					
02:44:44	47,3	48,8	46,5	53,6	49,5	54,6	57,8	54,5	41,1	32,2	46,3	38,6	53,7	45,7	46,4					
02:58:53	47,3	48,2	46,5	53,5	49,5						46,3	38,6	53,6	45,7	46,4					
03:11:54	47,5	48,0	46,5	53,5	49,6						46,2	38,6	53,8	45,8	46,5					
03:24:52	47,3	48,1	46,5	53,4	49,6						46,3	38,6	53,8	45,8	46,5					
17:39:56	45,8	44,7	36,2	39,5	45,9	53,1	56,5	33,5	27,8	32,7	46,5	38,9	53,7	46,2	46,4					

O tempo 1 refere-se ao tempo de avanço da frente superficial e o tempo 2, da frente de infiltração. S e I referem-se às guias de onda superiores e inferiores, respectivamente.

Tabela 5.19 - Tempo em que a frente de umedecimento atingiu cada ponto de profundidade nas respectivas estações – Média entre a primeira e terceira repetição.

Distância (m)	Superfície	Superior	Inferior
0	00:00:00	00:02:04	00:02:04
21	00:02:04	00:10:20	00:02:04
42	00:04:42	00:10:20	00:02:04
79	00:06:15	00:10:20	00:10:20
100	00:10:20	00:10:20	00:13:00
121	00:14:43	00:19:25	00:20:32
154	00:18:07	00:20:32	00:26:27
175	00:20:32	00: 26:27	00: 26:27
200	00:38:42	00: 19:25	00: 19:25

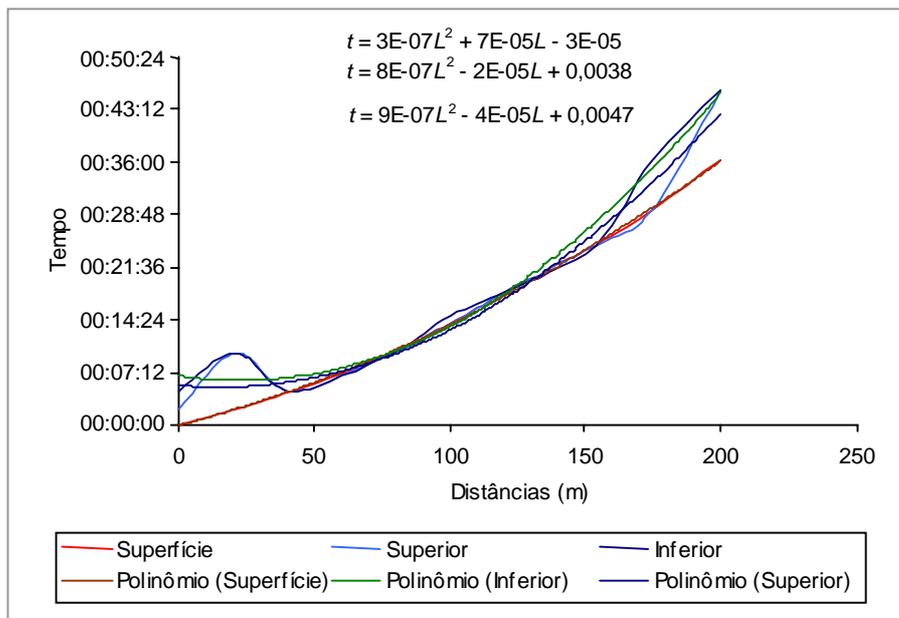


Figura 5.12 – Tempos em que as frentes de infiltração e de avanço superficial atingiram cada sensor e estaca de localização destes na superfície. Média entre a primeira repetição e a terceira repetição

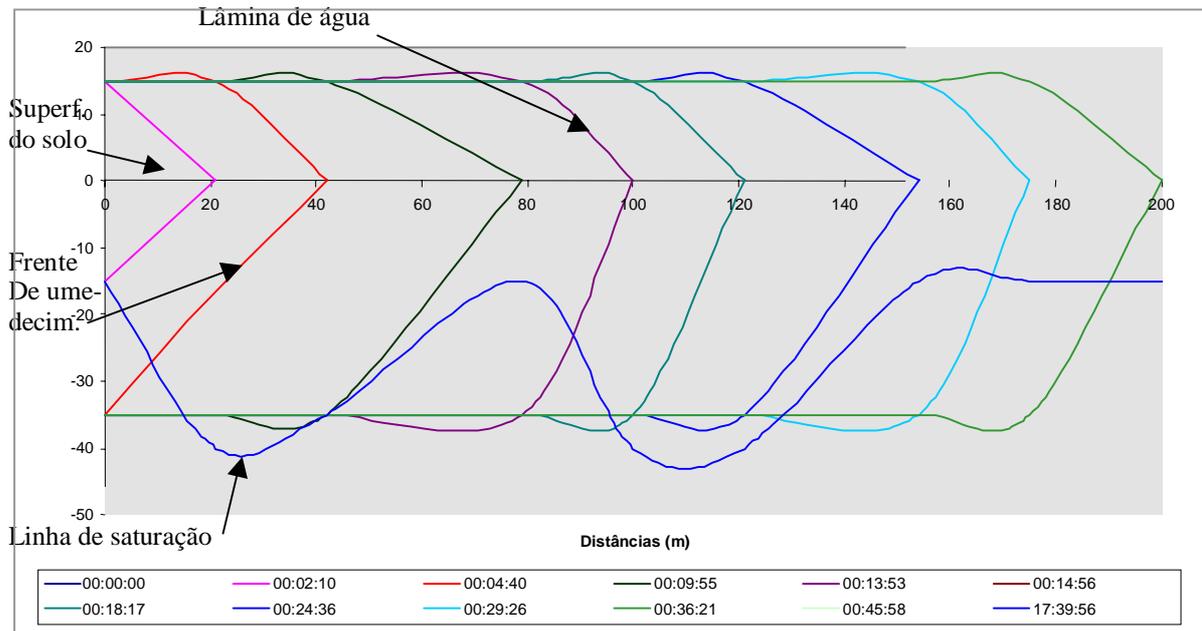


Figura 5.13 - Frentes de avanço superficial, de infiltração e de saturação em cada estação. Média da primeira e terceira repetição

Observando-se as figuras 5.12 e 5.13, verifica-se uma boa uniformidade em relação às curvas de avanço superficial e de infiltração. Entretanto, com relação à curva de saturação, observa-se, na figura 5.13, que a linha de saturação não apresenta uma distribuição que possa ser atribuída ao comprimento do sulco nem ao tempo de duração da irrigação. Pela observação dessa linha, pode-se relacioná-la a mesma, provavelmente com a desuniformidade das variações do solo.

5.10. Frentes de avanço superficial, de infiltração e de saturação calculadas

Com auxílio das funções correspondentes aos tempos em que as frentes de infiltração e de avanço superficial atingiram cada guia de onda e estaca de localização destes na superfície, constantes das figuras 5.6, 5.8, 5.10 e 5.12, respectivamente da primeira, segunda, terceira e média entre a primeira e terceira repetição, foram construídas as figuras 5.14, 5.15, 5.16 e

5.17, que representam as frentes de avanço calculadas, superficial, de infiltração e de saturação em cada estação, respectivamente da primeira, segunda, terceira e média entre a primeira e terceira repetição.

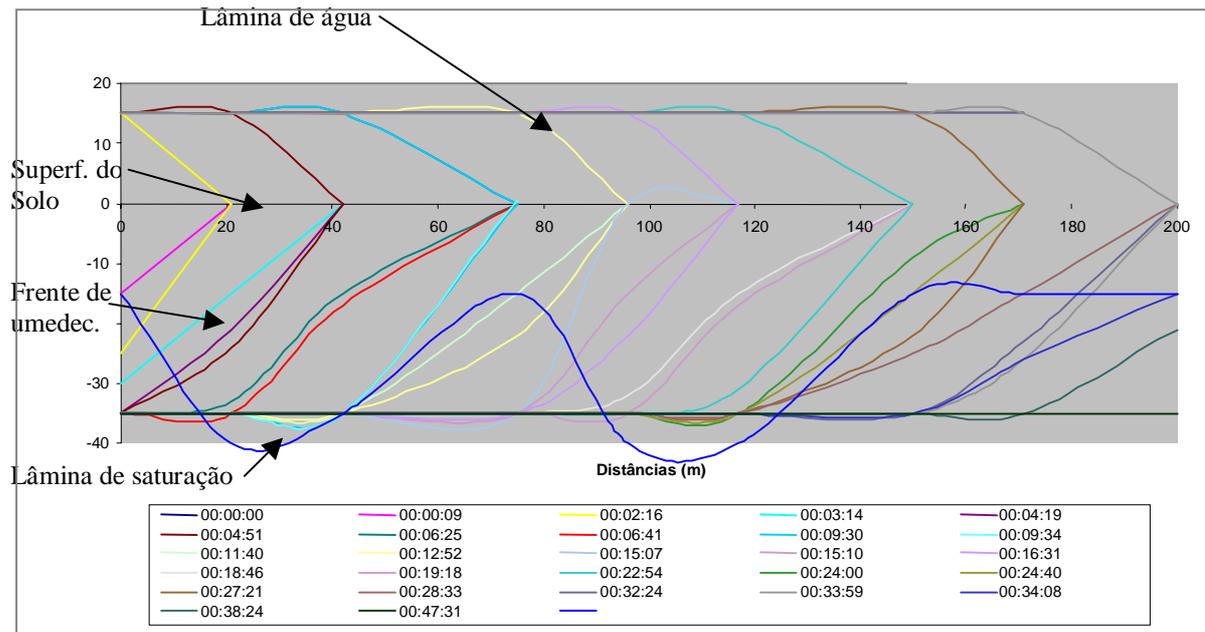


Figura 5.14 - Frentes calculadas de avanço superficial, de infiltração e de saturação em cada estação. Primeira repetição.

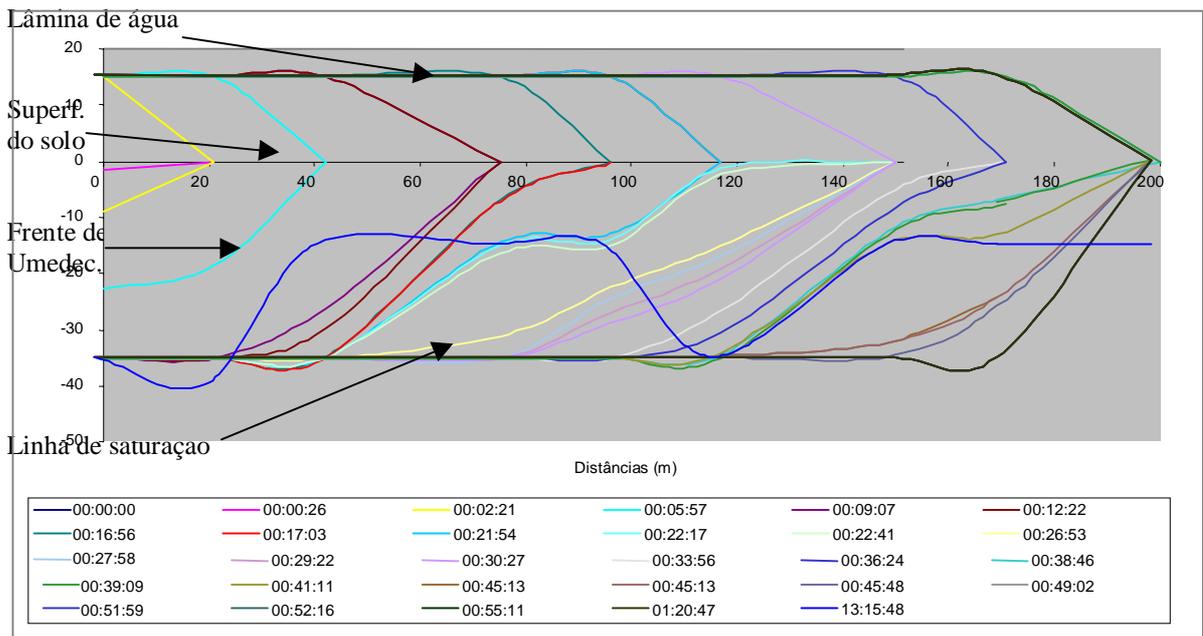


Figura 5.15 - Frentes calculadas de avanço superficial, de infiltração e de saturação em cada estação. Segunda repetição.

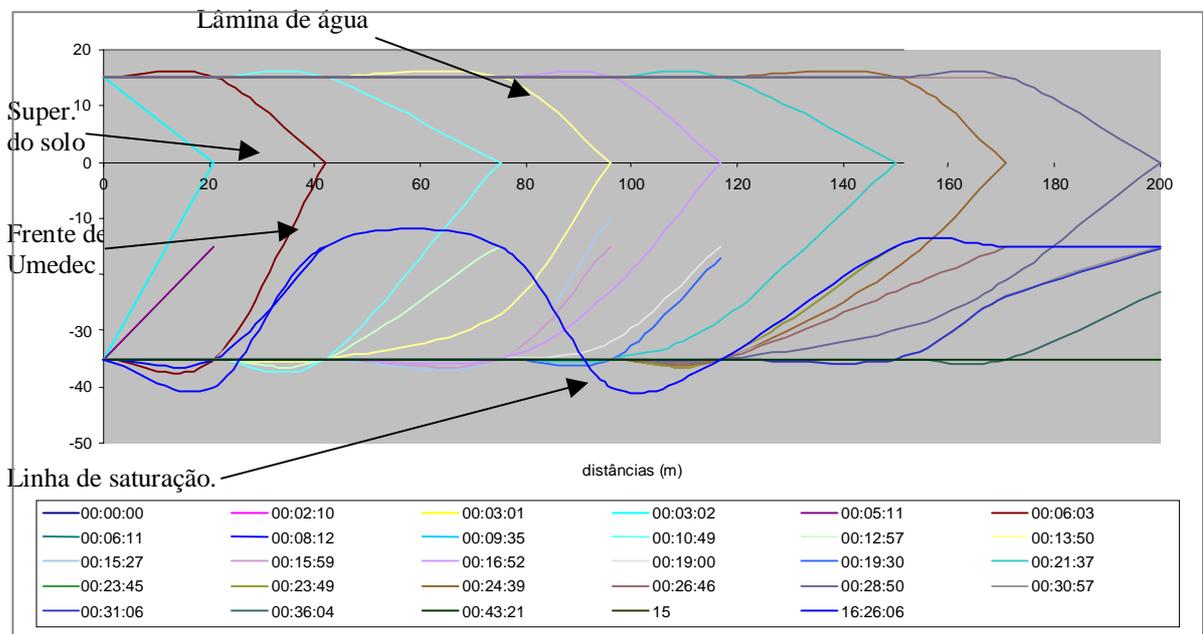


Figura 5.16 - Frentes calculadas de avanço superficial, de infiltração e de saturação em cada estação. Terceira repetição.

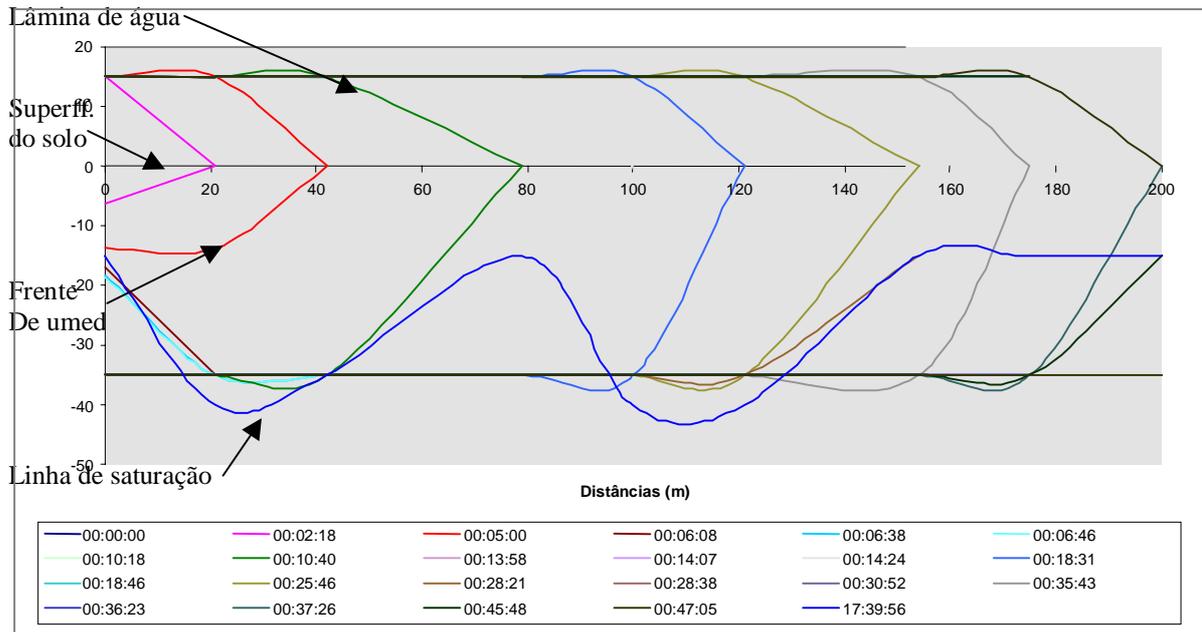


Figura 5.17 - Frentes calculadas de avanço superficial, de infiltração e de saturação em cada estação. Média entre a primeira e terceira repetição.

As curvas de avanço superficial e de infiltração calculadas retratam a mesma uniformidade dessas curvas, conforme anteriormente comentado, e evidenciam a não-uniformidade da linha de saturação.

5.11. Lâmina de água aplicada

Os conteúdos de umidade lidos no início da realização dos testes, em cada uma das estações de medição, diferiram daqueles determinados anteriormente, os quais serviram para quantificar a lâmina necessária para repor o conteúdo de umidade do solo. No item 5.17 a seguir, é apresentado o cálculo das lâminas necessárias para elevar o teor de umidade à capacidade de campo, e os correspondentes valores encontrados.

5.12. Umidade inicial

A umidade inicial do solo no momento da realização dos testes, tendo em vista que estes foram realizados no dia seguinte ao da medição da umidade do solo, teve uma redução compatível com a evapotranspiração do cultivo de sorgo. A seguir são apresentados os valores obtidos da média da tabela 5.18.

Superior = 19,53%

Inferior = 28,5%

Superior

$$Ll = \frac{40,4 - 19,53}{100} 200 = 41,74mm \quad (5.16)$$

Inferior

$$Ll = \frac{34,4 - 28,5}{100} 200 = 11,8mm \quad (5.17)$$

Total

$$Ll = 53,54mm$$

Considerando-se esses valores, o volume necessário (Vn) para repor o conteúdo máximo de água retida pelo solo seria:

$$V_n = (53,54 \cdot 200 \cdot 0,95)/1000 = 10,17\text{m}^3 \quad (5.18)$$

e o volume realmente aplicado (V_a) obtido pelo produto da vazão aplicada pelo tempo de aplicação dessa vazão que corresponde ao somatório das durações das fases de avanço e armazenamento:

$$V_a = \frac{3,2 \cdot 60 \cdot 62,75}{1000} = 12,05\text{m}^3 \quad (5.19)$$

5.13. Verificação da eficiência de aplicação

A eficiência de aplicação é calculada pela relação:

$$E_a = V_n/V_a = 100 \cdot (10,17/12,05) = 84,4\% \quad (5.20)$$

Este valor é considerado alto para irrigação por sulcos. Na estimativa inicial da eficiência de aplicação, item 5.8, o valor encontrado foi de 68,2%. Naquela situação o volume a aplicar era de $12,01\text{m}^3$, tendo em vista que o conteúdo de água considerado do solo era maior. Com a redução do teor de umidade da situação real e a manutenção do mesmo volume aplicado, a eficiência aumenta. Tendo em vista que foi observado umedecimento do solo em toda a profundidade e extensão do sulco, conclui-se que não havia necessidade de volume maior de água. Observando-se, entretanto, a curva de retenção do solo, figura 5.6, verifica-se que, para esses conteúdos de umidade da camada superior e inferior, a tensão da água no solo é inferior a $-0,3\text{Mpa}$. Esse valor, segundo DORENBOS & PRUITT (1975), é muito elevado,

e apesar de visualmente a campo não serem observados sinais de déficit hídrico na cultura, pode resultar em redução de produção.

5.14. Saturação do perfil do solo

Uma avaliação visual do solo, por um período de 24 horas após concluída a fase de recessão, não indicou saturação na superfície. Também as curvas da linha de saturação das figuras 5.7, 5.9, 5.11, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17 indicam que a saturação não atingiu, de modo uniforme, todo o horizonte superficial. Inclusive em certos pontos, a saturação não atingiu nem mesmo as guias de onda instaladas no horizonte inferior.

5.15. Aplicação do modelo SRFR

O modelo computacional utilizado para simular a irrigação com os dados deste trabalho denomina-se SRFR e tem como princípio básico a simulação do escoamento da água sobre o sulco, adotando o modelo zero inércia e a infiltração simulada pela equação de Kostiakov-Lewis.

Esse modelo simula o movimento superficial e sub-superficial da água em solo irrigado por sulcos, faixas e bacia de inundação. Dois são os modelos que podem ser utilizados, de forma alternativa, para simular esses movimentos: o de zero inércia e o da onda cinemática. O modelo zero inércia simplifica a solução do movimento da água no solo, pela desconsideração dos termos de inércia e de aceleração, da equação da quantidade de movimento. O modelo da onda cinemática desconsidera toda a equação da quantidade de movimento. Tendo em vista ser o modelo zero inércia mais completo, foi o mesmo adotado neste trabalho.

Com relação à infiltração da água no solo, o modelo possibilita a escolha entre cinco alternativas mencionados no capítulo 4. Neste trabalho foi adotada a solução mais completa entre as cinco, ou seja a equação de Kostiakov-Lewis, tendo em vista ter-se conhecimento de todas as variáveis da mesma.

A seguir é apresentada a simulação realizada pelo modelo SRFR.

Dados de entrada do modelo:

Vazão de entrada: $Q = 3,2 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$

Comprimento: $L = 200\text{m}$

Espaçamento: $E = 0,95\text{m}$

Lâmina de água a ser aplicada $La = 43,2\text{mm}$

Função de infiltração: $i = 42,9 t^{0,6057} + 13 t$

Seção transversal do sulco:

- Altura máxima da lâmina de água: $ym = 130\text{mm}$
- Largura do fundo: $b = 130\text{mm}$
- Declividade do talude; 1:1,5
- Tempo de aplicação: $t = 60,03$ minutos
- Coeficiente de rugosidade de Manning: $n = 0,03$

O valores de saída obtidos, utilizando-se o modelo da onda cinemática e a equação de Kostiakov-Lewis, são os apresentados a seguir:

Tempo de avanço: t_a (min) = 50,10

Eficiência de aplicação: E_a (%) = 70,60

Lâmina total aplicada: L_a (mm) = 60,00

Lâmina média aplicada L_{ma} (mm) = 55,90

Lâmina média percolada L_{mp} (mm) = 13,00

Altura máxima de lâmina de água no sulco y_m (cm) = 8,64

Lâmina média perdida para fora do sulco: L_r (mm) = 4,60

A tabela 5.20 fornece as lâminas de infiltração simuladas e a tabela 5.21, as lâminas de água sobre o fundo do sulco.

Tabela 5.20 - Lâmina total infiltrada ao longo do sulco

Distância do início do sulco (m)	Lâmina infiltrada (mm)
0	62,07
10	62,49
19	62,62
28	62,64
37	62,57
46	62,46
55	62,17
64	61,50
73	61,15
82	60,49
91	59,67
100	58,79
109	57,77
118	56,59
127	55,30
136	53,80
145	52,14
154	50,31
163	48,59
172	46,09
181	43,35
190	40,33
200	35,40
200	43,20

Tabela 5.21 – Alturas de lâmina de água sobre o fundo do sulco

Tempo (seg)	Distâncias (m)				
	0	50	100	150	200
28,28	0,06599	0	0	0	0
81,11	0,07163	0	0	0	0
141,4	0,07541	0	0	0	0
209,1	0,07772	0	0	0	0
284,4	0,07948	0	0	0	0
321,1	0,08004	0	0	0	0
321,1	0,08004	0	0	0	0
367,1	0,08074	0,02402	0	0	0
457,2	0,08176	0,0476	0	0	0
555	0,08253	0,05515	0	0	0
650,5	0,08317	0,0603	0	0	0
774	0,08368	0,06401	0	0	0
895,9	0,0841	0,06679	0	0	0
895,9	0,0841	0,06679	0	0	0
895,9	0,0841	0,06679	0	0	0

Tempo (seg)	Distâncias (m)				
	0	50	100	150	200
1027	0,08445	0,06894	0,03946	0	0
1167	0,08475	0,07064	0,04297	0	0
1317	0,085	0,07202	0,04884	0	0
1477	0,08522	0,07315	0,05317	0	0
1649	0,08541	0,07409	0,0565	0	0
1752	0,08551	0,07454	0,05795	0	0
1752	0,08551	0,07454	0,05795	0	0
1834	0,08558	0,0749	0,05911	0,01363	0
2031	0,08573	0,07559	0,06123	0,03332	0
2244	0,08587	0,0762	0,06298	0,0394	0
2472	0,086	0,07673	0,06445	0,04418	0
2718	0,08611	0,07721	0,0657	0,04789	0
3014	0,08623	0,07768	0,0669	0,05113	0
3014	0,08623	0,07768	0,0669	0,05113	0
3014	0,08623	0,07768	0,0669	0,05113	0
3309	0,08633	0,07808	0,06787	0,05357	0
3602	0,08642	0,07842	0,06867	0,05552	0
3631	0,06743	0,07829	0,06875	0,0557	0
3661	0,0593	0,07734	0,06882	0,05589	0
3693	0,05241	0,07504	0,06885	0,05608	0
3727	0,04666	0,07175	0,06873	0,05627	0
3762	0,04121	0,06803	0,06831	0,05646	0
3799	0,03622	0,06409	0,06743	0,05662	0
3838	0,03136	0,06002	0,06603	0,0567	0
3879	0,02675	0,05586	0,06413	0,05663	0
3922	0,0222	0,05164	0,0618	0,0563	0
3967	0,01779	0,04735	0,05908	0,05566	0
4014	0,01343	0,04299	0,05603	0,05463	0
4063	0,00916	0,03856	0,05269	0,05319	0
4115	0,00496	0,03404	0,04907	0,05133	0
4170	0,00098	0,0294	0,04519	0,04906	0
4228	0	0,02462	0,04107	0,04637	0
4288	0	0,01967	0,03669	0,04328	0
4351	0	0,01453	0,03206	0,03979	0
4418	0	0,0092	0,02714	0,03589	0
4487	0	0,00358	0,02191	0,03158	0
4561	0	0	0,01635	0,02684	0
4638	0	0	0,01039	0,02162	0
4715	0	0	0,00435	0,01615	
4791	0	0	0	0,01042	
4868	0	0	0	0,00443	
4938	0	0	0	0	
5007	0	0	0	0	

O modelo não simula a profundidade de penetração da água no solo. Para procurar estabelecer uma comparação entre as observações de campo e as do modelo, foi construída uma curva correspondente à frente de umedecimento da lâmina total de infiltração simulada, considerando-se as características hidrodinâmicas do solo. A tabela 5.22 apresenta os valores dessa simulação. Do mesmo modo, foi construída a curva correspondente à linha de saturação, apresentada na mesma tabela.

A figura 5.18 apresenta as curvas correspondentes à frente de umedecimento do solo, de saturação e as linhas de lâminas de água sobre o fundo do sulco em diversos instantes.

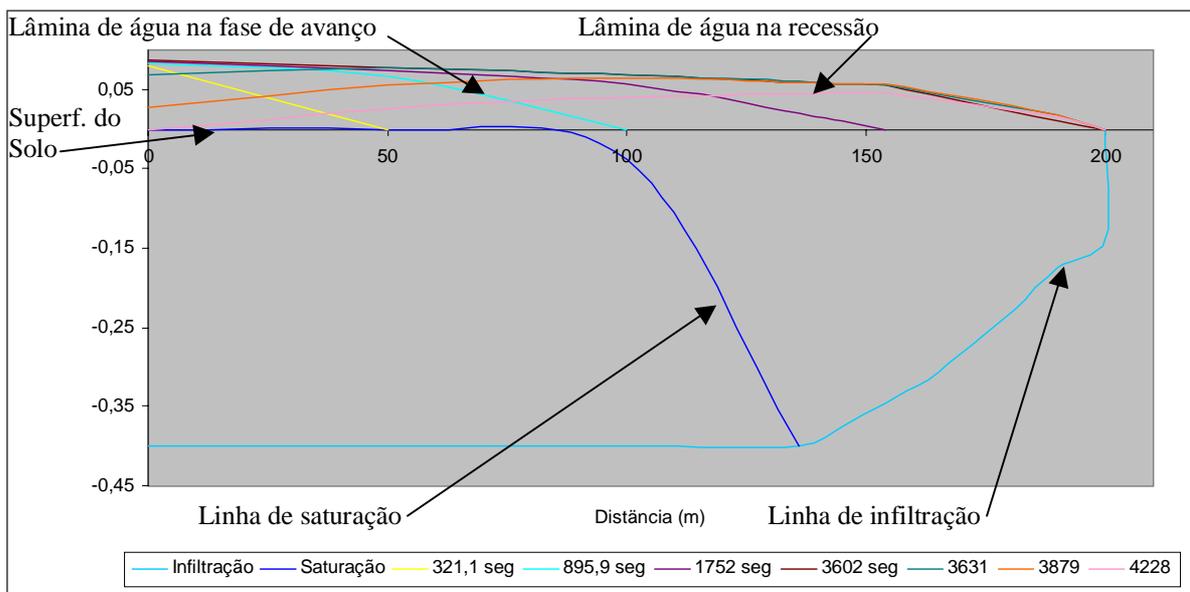


Figura 5.18 – Lâminas de água sobre o fundo do sulco, linha de umedecimento da lâmina de infiltração e linha de saturação.

O modelo simulou uma altura de saturação a partir da camada de impedimento, que decresce do início para o final do sulco. Esse resultado era esperado em razão da maior permanência da água nesse trecho de sulco. No campo, entretanto, o que se observou foi uma altura de saturação variável ao longo de todo o sulco. Sondagens realizadas nos sulcos, por

meio da abertura de poços para observação, detectaram lâminas de saturação no trecho final do sulco.

O modelo simulou uma lâmina máxima sobre o fundo do sulco de 8,64cm, e em campo o valor médio observado foi de 13cm.

Apesar de a fase de armazenamento ter uma duração superior à de avanço, o modelo não considerou nenhuma lâmina de água sobre o final do sulco, observando-se a tabela 5.21, isso pode ser verificado. Logicamente, ao não considerar uma lâmina de água sobre o sulco em sua extremidade final, a lâmina aí infiltrada, não será computada. Esse fato, que não traduz a realidade, traz como consequência uma menor altura de água aplicada nesse ponto.

As frentes de infiltração e de saturação de água no solo apresentam uma conformação regular e decrescente. Esse comportamento é coerente com um solo homogêneo ao longo do sentido longitudinal do sulco, conforme considerado no modelo.

Nas curvas de infiltração e de saturação construídas a partir dos registros de variação de umidade realizados com o TDR, não se observa essa mesma regularidade. Provavelmente a conformação dessas curvas, esteja relacionada às variações nas taxas de infiltração ao longo do sulco, decorrentes da heterogeneidade do solo nesse sentido.

Entretanto essa mesma heterogeneidade não pode ser responsável pela tendência observada em campo, de maior lâmina infiltrada no final do sulco. Essa situação provavelmente se encontra relacionada ao fato do modelo não considerar uma lâmina de água sobre o final do sulco, concluída a fase de avanço.

Pelo exposto, verifica-se que a principal falha do modelo, relaciona-se à ausência da lâmina no final do sulco. Para contornar esse problema, o programa deveria, nos modelos de simulação do escoamento, buscar uma condição que reproduzisse melhor os resultados observados em campo. Na situação de campo, a drenagem da água sobre o fundo do sulco,

ocorre em um tempo bem maior que no modelo. As variáveis que são utilizadas na simulação de forma arbitrada são a rugosidade e o perímetro molhado, já que a altura do tirante de água é estimada. Em um primeiro momento, sem procurar buscar outro modelo de simulação, essas variáveis poderiam ser consideradas com uma amplitude maior de valores. Caso essa tentativa não resulte em êxito, talvez utilizar outro modelo de simulação. O modelo do balanço de volume é de fácil adoção e poderia ser testado. Já o modelo hidrodinâmico é de aplicação bem mais complexa, mas, justamente em razão de sua maior complexidade, reproduz de forma mais precisa o escoamento.

6. Conclusão e recomendações

Em um Gleissolo Melânico com camada de impedimento, no Município de Santa Vitória do Palmar, RS, foram realizados testes para determinar a vazão máxima possível de aplicar-se aos sulcos, da taxa de infiltração, do avanço da corrente de água no sulco, e monitorado o avanço da frente de infiltração, com a utilização da técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR). Para tanto, foi efetuado um experimento constituído de um cultivo de sorgo granífero (*sorghun bicolor* L.), o qual foi irrigado por sulcos retilíneos com 200m de comprimento e espaçamento de 0,95m. Todos os testes foram realizados com três repetições.

Com o objetivo de avaliar a aplicação de modelos numéricos de simulação da irrigação nestes casos, foi aplicado o modelo desenvolvido pelo U.S. Water Conservation Laboratory do U.S. Department of Agriculture, SRFR (1999).

Eficiência de aplicação

A eficiência de aplicação foi obtida pela relação dos volumes aplicados com os volumes armazenados em toda a extensão do sulco e profundidade de solo até a camada de impedimento.

Os resultados encontrados foram por demais elevados e são merecedores de uma análise mais detalhada.

Comprimento de sulco

Neste trabalho utilizou-se um comprimento de sulco pré-estabelecido de 200m, tendo em vista que, na irrigação por sulcos, as variáveis percentual de área perdida no início e no final, e percentual de água perdida por percolação ou, para este caso especificamente, percentual de saturação do perfil do solo, são respectivamente inversa e diretamente proporcionais ao comprimento do sulco. Seria interessante verificar se, para comprimentos maiores de sulcos, essa uniformidade de umedecimento do perfil do solo também seria mantida.

Vazões

A identificação da vazão máxima permissível teve como parâmetros limites a erosão e a capacidade máxima de transporte, sem transbordamento, da seção do sulco. O primeiro limite atingido foi a capacidade de transporte, ou seja, para a condição de sulco completamente cheio, não se detectou erosão.

Observando-se as durações das fases de avanço e a de armazenamento, verifica-se que, quando a frente de avanço atinge o final do sulco, ainda não foi aplicada toda a lâmina necessária. Conclui-se daí que, durante a fase de armazenamento, a vazão deve ser reduzida a um valor compatível com a taxa de infiltração ao longo do sulco, reduzindo assim as perdas por escoamento para fora do sulco no final, sem alterar a taxa com que a água é absorvida pelo solo.

TDR

O acompanhamento da frente de avanço da infiltração foi realizado com a utilização da técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR). A necessidade de determinar a umidade nas duas camadas de solo fez com que se posicionassem as guias de onda do TDR na posição horizontal. A colocação das guias nessa posição exige que se cave o solo até a profundidade na qual será colocada a guia e, a seguir, coloque-se terra até a superfície. Esse procedimento altera o grau de compactação do solo e cria alguns vazios, o que proporciona condições para que haja caminhos preferências para o fluxo de água. Verifica-se que os teores de umidade atingem, em determinado momento o ponto de saturação e depois baixam. Isso indica que a água atingiu de forma relativamente rápida esse ponto, saturando o solo e percolando posteriormente de forma mais uniforme para maior profundidade.

A utilização de guias de onda segmentadas, posicionadas verticalmente e introduzidas no solo por compressão, não provocando deformação nem alterando o grau de compactação, permitiriam determinar a umidade de forma individualizada nas profundidades desejadas. Provavelmente esse procedimento traria resultados mais consistentes para este tipo de determinação.

Necessidade de irrigação

Analisando-se o valor de água facilmente disponível nesse solo, de apenas 14,6mm, percebe-se que a irrigação é imprescindível quando se pretende uma agricultura com margem de risco que permita viabilizar o investimento nesse setor.

Valores baixos de disponibilidade de água resultam em irrigações muito freqüentes. A freqüência encontrada, para este caso, foi de aproximadamente 4 dias, valor bastante baixo, mas não o suficiente para inviabilizar a realização da prática da irrigação.

Tendo em vista que na região em que o trabalho foi desenvolvido existe muita disponibilidade de água para irrigação, e que as culturas que podem ser utilizada para rotação com o arroz, tais como soja, sorgo, milho e girassol, não apresentam produtividades elevadas em solos mal drenados como esse, o método de sulcos, apesar de apresentar maior consumo de água que os de aspersão e gotejamento, é muito mais indicado, tendo em vista o baixo custo operacional de implantação.

Distribuição da água no perfil do solo

Uma importante conclusão que se pode retirar deste trabalho é a de que, ao contrário do normalmente esperado, a profundidade de irrigação ao longo do sulco foi muito semelhante. O normalmente esperado era de que em razão da água permanecer por mais tempo durante a aplicação, ou seja, durante as fases de avanço e armazenamento, no início do que no final do sulco, o maior valor de lâmina infiltrada fosse no trecho inicial. Entretanto, em razão da baixa taxa de infiltração e da alta velocidade de escoamento da água no sulco, conclui-se que apesar da água ter permanecido um tempo maior sobre o início do sulco na fase de avanço e armazenamento, nas fases de depleção e de recessão, em razão do mencionado, a lâmina de água sobre a superfície do sulco permaneceu por mais tempo no trecho final do que no inicial.

Essa verificação torna bastante possível a utilização com sucesso, desse método de irrigação nesse tipo de solo.

Saturação do solo

Em razão de não ter ocorrido saturação do solo na superfície, e pela observação das linhas de saturação de todas as figuras que representam o movimento da água no perfil, onde se observa que a saturação não atingiu de modo uniforme todas as guias de onda da camada superficial, e em alguns casos, nem mesmo a inferior, conclui-se que a saturação não ocorreu de forma generalizada no perfil do solo, o que não levaria a inviabilizar a irrigação nesse caso. Seria interessante, entretanto, a realização de mais ensaios, com um número maior de pontos de leitura da variação do conteúdo de água, para se poder avaliar com exatidão o alcance da saturação.

Aplicação do modelo SRF

O programa simulou o movimento da água no sulco, quando alimentado com os dados observados em campo e utilizando o modelo zero inércia para simulação do escoamento e a equação de Kostiakov-Lewis para a lâmina de infiltração.

O modelo apresentou algumas limitações, tendo sido a mais importante a desconsideração da lâmina de água sobre o sulco em sua porção terminal, na fase de depleção.

Segundo os STRELKOFF (2004), a maior limitação do modelo está relacionada à estimativa dos valores de rugosidade e de infiltração. Ainda de acordo com o mesmo, a maior vantagem reside nas bases teóricas para as simulações e a grande variedade de cenários de irrigação que podem ser simulados.

Para poder simular o movimento da água no sulco nessa situação, o modelo deve sofrer modificações no que diz respeito à simulação do escoamento superficial da água sobre o sulco, de modo a reproduzir de forma precisa, o tempo e altura do tirante de água sobre o final do sulco, na fase de depleção.

Tendo em vista que o modelo não simulou a lâmina de saturação no final do sulco, nem as lâminas de água sobre o fundo do sulco no final deste, como foi observado em campo, conclui-se que esse modelo não pode ser aplicado à irrigação por sulcos em solos com camada de impedimento.

Recomendações

O alto custo do TDR não permitiu que se fizesse um número maior de observações, tanto em cada uma das repetições como em número de repetições. Outra limitação encontrada foi a pequena frequência de períodos sem chuva, que permitissem repetir testes os quais não apresentassem bons resultados, como foi o caso da segunda repetição do teste de monitoramento da frente de infiltração com o TDR.

Essas limitações poderiam ser contornadas com um aporte maior de recursos, que permitissem o desenvolvimento desse trabalho por um maior espaço de tempo, buscando dispor-se de condições climáticas necessárias, ou seja, suficiente frequência de valores conteúdo de água no solo que signifique necessidade de irrigação.

Com relação à utilização do TDR, a confecção de guias de onda em maior quantidade e adoção de cabos coaxiais de maior comprimento, de modo a poder simular o movimento da água em cada sulco em único processo, e com maior número de repetições.

No que se refere à utilização de modelos de simulação, as recomendações são as constantes no item 5.15, que podem ser resumidas na adoção de amplitude maior de valores das variáveis arbitradas, ou na utilização de outro modelo de simulação do escoamento.

7. Referências bibliográficas

BAUTISTA, E.; WALLENDER, W. W. **Identification of furrow intake parameters from advance and rates.** Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, V 119, N2, 1993, p. 295-311.

BELTRAME, L. F. S.; LOUZADA, J. A. S. **Caracterização físico-hídrica dos solos formadores da várzea arrozeira do Rio Grande do Sul.** Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Recursos Hídricos 32. Porto Alegre, 1996. 30p.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação.** Editora da Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 1995. 463 p.

CAUDURO, F. A., DORFMAN, R. **Manual de ensaios de laboratório e de campo para irrigação e drenagem.** Porto Alegre. PRONI. IPH-UFRGS, s.d. 2216 p.

CETIN, O.; BILGEL, L. **Effects of different irrigation methods on shedding and yield of cotton.** Agriculture Water Management, 54 (2002), p. 1-15.

CHILDS, E. D. **An introduction to the physical basis of soil water phenomena.** Ed. John Wiley & Sons Ltda. Great Britain, 1969. 493 p.

CHOW, V. T. **Open-channel hydraulics.** New York, 1959; MacGraw-Hill.

CLEMMENS, A. J. **Feedback control of basin-irrigation system.** Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, Vol. 118. No. 3, Maio/junho, 1992. p. 480-497.

DAME, R. C. F. **Condutividade hidráulica em solo não saturado: Método do perfil instantâneo e modelos de previsão.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 1991.110 p.

DOORENBOS, J., PRUITT, W. O. **Crop water requirements.** FAO. Roma, 1975. 179p.

ESFANDIARI, M.; MAHESHWARI, B. L. **Field evaluation of furrow irrigation models.** J. agric Engng Res. (2001) 79 (4), 459-479.

ESFANDIARI, M.; MAHESHWARI, B. L. **Application of the optimization method for estimating infiltration characteristics in furrow irrigation and its comparison with other methods.** Agriculture Water Management, , 1997, V 34, p.170-185.

FEYEM, J., ZERIHUN, D. **Assessment of the performance of border and furrow irrigation systems and the relationship between performance indicators and system variables.** Agricultural Water Management 40 (1999). p. 353 – 362.

GOMIDE, R. L. **Importância da automação nos sistemas agrícolas irrigados, visando a irrigação inteligente e a agricultura de precisão.** In Aplicações da técnica de TDR na

agricultura / editores; MATSURA, E.E.; JAVAREZ; A. Jr., GOMES; E.P., SOUZA, C. F. Campinas, SP: UNICAMP/ FEAGRI, 2001. 178 p.

HANSON, B. R.; SCHWANKL, L.J.; SCHULBACH, G. S.; et all. **A comparison of furrow, surface drip, and subsurface drip irrigation on lettuce yield and applied water.** Agriculture Water Management, 33 (1997), p. 139-157.

HERRMANN, P.S. de P. Jr. **Aspectos básicos da reflectometria no domínio do tempo (TDR) e potencialidades de aplicações na física do solo.** In Aplicações da técnica de TDR na agricultura / editores; MATSURA, E.E.; JAVAREZ, A. Jr.; GOMES, E.P.; SOUZA, C. F. Campinas, SP: UNICAMP/ FEAGRI, 2001. 178 p.

HIDALGO GRANADOS, A. G. **Metodos modernos de riego de superficie.** Selecciones Gráficas, Madrid, 1971. 463 p.

KLAMT, E., KAMPFT. N. **Solos de várzea do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre. Dep. de Solos da UFRGS. 1985. 42p.

LENCASTRE A. **Manual de hidráulica geral.** São Paulo. Edgar Blúcher, Ed. Da Universidade de São Paulo, 1972. 411p.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo.** Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995, 497p.

LIMA, A. C. R. de. **Caracterização hidráulica de um planossolo sob diferentes sistemas de manejo.** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, UFPel. Pelotas, RS. 2001. 73p.

MELA MELA, P. **Tratado de edafologia.** Ed. Agrociencia. Zaragoza, 1963, 615 p.

MOTA, F. S. da. **Análise agroclimatológica das necessidades semanais de irrigação em Pelotas-RS.** Boletim técnico nº 1. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, RS. 1975.

MUÑOZ, J. F. P. **Estudio experimental y numerico de la infiltración en una columna de suelo no saturado.** In: Anales del XI Congreso Latinoamericano de Hidraulica. Vol. I. Buenos Aires, 1984. 394p. p 231 - 242.

OLITTA, A. F. L., **Os métodos de irrigação.** Livraria Nobel S/a. São Paulo, SP., 1986. 267p.

OLIVEIRA, J. B. de, Princípios básicos para classificação e sinopse dos principais grandes grupos de solos do mundo. In MONIZ, A. C. (Org.). **Elementos de pedologia.** São Paulo, Polígono, Ed. da Universidade de São Paulo, 1972. p. 351-362.

OR, D. JONES, S. B. **Thermal and geometrical effects on bulk permittivity of porous mixtures containing bound water.** In Aplicações da técnica de TDR na agricultura / editores; MATSURA, E.E.; JAVAREZ, A. Jr.; GOMES, E.P., SOUZA, C. F. Campinas, SP: UNICAMP/ FEAGRI, 2001. 178 p.

PARFITT, J. M. B. Cord. **Cultivo do sorgo em várzea.** Embrapa Clima Temperado, Pelotas, 2000. (Embrapa Clima Temperado. Pelotas, Documentos 74). 146p.

PARFITT, J. M. B.; SILVA, C. A. S. da. **Efeito da deficiência hídrica na cultura do milho em planossolo Pelotas - safra 94/95.** In: REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DO MILHO, 40 REUNIÃO TÉCNICA DO SORGO, 23., 1995, Pelotas. **Anais:** Pelotas: EMBRAPA-CPACT, 1995. (EMBRAPA-CPACT. Documentos, 18). p. 49-52.

PARFITT, J. M. B.; SILVA, C. A. S. da; PORTO, M. P. **Comportamento do milho irrigado por inundação em solos hidromórficos - safra 95/96.** In: REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DO MILHO, 41.; REUNIÃO TÉCNICA DO SORGO, 24., 1996, Passo Fundo. **Anais:** Passo Fundo: Embrapa-CNPT, 1996. (EMBRAPA-CNPT). p. 159-163.

PAULETTO, E. A . **Determinação da condutividade hidráulica de solos a partir da curva de retenção de água.** Piracicaba, 1986, 113 p, (Tese de doutorado).

PEREIRA, G. M.; SOARES, A .A.; COUTO, L.; et al. **Influência da irrigação intermitente sobre o avanço e infiltração de água em sulcos, num lotossolo vermelho-escuro.** Engenharia na Agricultura, Série Irrigação e Drenagem. Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais/Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 1992. Vol. 1 N° 9. 11p.

PINTO, L. F. S., PAULETTO, E. A., GOMES, A. S., et al. **Caracterização de solos de várzea**. In **Manejo do solo e da água em áreas de várzea**. GOMES, A. S. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. 201p.

PORTO, M. P.; FRANCO, J.C.B.; RODRIGUES, A. F. S. **Desempenho de cultivares de milho, em rotação com arroz irrigado, na Granja Bretanhas, Jaguarão, RS. Ano agrícola 1995/96**. In: REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DO MILHO, 41.; REUNIÃO TÉCNICA DO SORGO, 24., 1996, Passo Fundo, 1996. **Anais**: EMBRAPA-CNPT. (EMBRAPA-CNPT). p 75-82.

PREVEDELLO, C. L. **Física do Solo**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1996, 446 p.

RENAULT, D.; WALLENDER, W. W. **ALIVE (Advance Linear Velocity): surface irrigation rate balance theory**. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 1992, V 118, N1, p. 138-155.

RENAULT, D.; WALLENDER, W. W. **Initial-inflow-variation impacts on furrow irrigation evaluation**. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 1996, V 122, N 1, p. 7-14.

ROBAINA, A.D. **Relação funcional entre condutividade hidráulica e umidade volumétrica em um planossolo da unidade de mapeamento Pelotas**. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, 1981, 128p. (Dissertação de Mestrado).

RESENDE, M., CURI, N., SANTAN, D. P. **Pedologia e fertilidade do solo - interações e aplicações.** MEC, ESAL, POTAFOS, Brasília, 1988. 83p.

RODRIGO LOPEZ, J. R., HERNFANDEZ ABREU, J.M., PEREZ REGALADO, A. et al. **Riego localizado.** Madrid 1977. 405p.

SCHWANKL, L. J., WALLENDER, W. W. **Zero inertia furrow modeling with variable infiltration and hydraulic characteristics.** ASAE, 1988 T4, V 31(5), p. 1470-1475.

SILVEIRA, A. L. da; LOUZADA, J. A.; BELTRAME, L. F. **Infiltração e armazenamento no solo.** In: TUCCI, C. E. M. (Org.) **Hidrologia: ciência e aplicação.** Porto Alegre, 1993: Ed. da Universidade UFRGS: ABRH: EDUSP. 943 p., cap. 9, p 335.

SRIVASTAVA, T. A.; COSTELLO, D. R.; EDWARDS, D. R. **A direct approximate solution to the modified Green-Ampt infiltration equation.** ASAE, 1996 T4, V 34, p. 1411-1413.

SOILMOISTURE EQUIPAMENT CORP. **Operating instructions.** California, 1996.

SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E.; TESTEZLAF, R. **Experiências do laboratório de irrigação e drenagem da FEAGRI/UNICAMP no uso da técnica de TDR.** In Aplicações da técnica de TDR na agricultura / editores; MATSURA, E.E., JAVAREZ, A. Jr., GOMES, E.P., SOUZA, C. F. Campinas, SP: UNICAMP/ FEAGRI, 2001. 178 p.

SRFR. Surface irrigation simulation model. U. S. Water Conservation Laboratory – Agricultural Research Service - U. S. Department of Agriculture. Phoenix, AZ. 1999.

STRAUCH, J. C. da S. Modelo numérico da onda cinemática para a fase de avanço da irrigação superficial em uma faixa de terra inclinada. (1985), Porto Alegre, UFRGS, P.141. (Dissertação de Mestrado)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, RS, 1985.

STRECK, E. V., KÄMPF, N. DALMOLIN, R. S. D., et al. Solos do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS - EMATER/RS; UFRGS, 2002.

STRELKOLFF, T.S. Aplicação do modelo SRFR [mensagem pessoal]. Mensagem recebida de <FStrelkoff@uswcl.ars.ag.gov> em 11 abr. 2004.

TAVARES, V.E; CAICEDO, N. L. Determinação da taxa de irrigação através da solução aproximada da equação de Green e Ampt. 1993 .

TOMMASELLI, J.T.G. Critérios para calibração de sonda de TDR. In Aplicações da técnica de TDR na agricultura / editores; MATSURA, E.E.; JAVAREZ, A. Jr.; GOMES, E.P.; SOUZA, C. F. Campinas, SP: UNICAMP/ FEAGRI, 2001. 178 p.

TUCCI, C. E. M. **Fundamentos do escoamento.** In: TUCCI, C. E. M. (Org.) **Hidrologia: ciência e aplicação.** Porto Alegre, 1993: Ed. da UFRGS: ABRH: EDUSP. 943 p., cap. 9, p 335

WALKER, W. R.; SKORGERBOE, G. V. **Surface irrigation, theory and practice.** Prentice-Hall, inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1987, p.386.

WHEATER, H. S. **Hydrological process - A course on the hydrological of soils, vegetation and the atmosphere.** (1992) Imperial College of Science and Technology, London. 1992.

WOLFE, M. L.; LARSON, C. L.; ONSTAD, C. A. **Hydraulic conductivity Green-Ampt infiltration modeling for tilled soils.** ASAE, 1988, T4, V 31, p. 1135-1141.

ZERIHUN, D., WANG, Z. RIMAL, S., et al. **Analysis of surface irrigation performance terms and indices.** Agricultural Water Management. 34 (1997). p.25 – 46.

1 ANEXOS

A.1. Classificação do solo

A.1.1. Ficha de resultados

Nome: GLEISSOLO MELÂNICO Carbonáltico incéptico
 Localização: Granja Pitanga, Santa Vitória do Palmar, RS.
 Situação e declive: Área de Lavoura – Plana
 Imperfeitamente drenado
 Material originário: Sedimentos da Formação Chuí
 Data: 27/12/2000

Relevo: Plano
 Erosão: Não-aparente
 Drenagem:

Uso atual: Lavoura
 Examinadores: Álvaro Moreira Rota
 Ruy Silveira

Horiz.	Profund	Cor	Textura	Estrutura	Porosid. Cerosid.	Consist. molhada	Transiç ão	Raízes
Ag	0-26	10yR 2/1	Siltoso	Maciça		Ligeiramente pegajoso e ligeiramente plástico	Gradual e plana	Muitas
Ap	26-43	5y 3/1 1 2/1	Franco siltoso a franco argilo- siltoso	Fraca, media, blocos subangulares		Pegajoso e ligeiramente plástico	Gradual plana	Comuns
AB	43-063	5y 3/1	Argilo siltoso	Fraca, pequena. blocos subangulares		Muito pegajoso e plástico	Clara e plana	Comuns
Bg	63-78	5y 5/1 e 5/2	Argilo siltoso	Forte, médio, blocos subangulares	Moderada e	Muito pegajoso e plástico		Poucas

Descrição do perfil

- Ag 0-26; (10YR 2/1); siltoso; maciça; ligeiramente pegajoso e ligeiramente plástico; transição gradual e plana; raízes muitas.
- Ap 26-43; (5Y 3/1 e 2/1); franco siltoso a franco argilo siltoso; fraca, média, blocos sub angulares; pegajoso e ligeiramente plástico; transição gradual plana; raízes comuns.
- AB 43-63; (5Y 3/1); argilo siltoso; fraca, pequena, bloco sub angulares; muito pegajoso e plástico, transição clara e plana, raízes raras.
- Bg 63-78; (5Y 5/1 e 5/2); argilo siltoso; forte médio, bloco sub angulares; muito pegajoso e plástico, raras.

A.1.2. Análise granulométrica

Horizonte	Amostra	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
Ag	1	21,01	28,62	50,37
	2	19,16	29,23	51,61
	3	20,55	29,23	50,22
	Média	20,34	29,02	50,73
Ap	4	08,07	42,04	49,88
	5	07,83	42,56	49,61
	6	09,53	40,44	50,03
	Média	08,48	41,68	49,84
AB	7	02,98	51,79	45,22
	8	03,13	52,16	44,71
	9	03,82	52,56	43,62
	Média	03,31	52,17	44,52
Bg	10	04,42	61,02	34,56
	11	03,66	62,43	33,91
	12	03,06	63,23	33,17
	Média	03,90	62,23	33,87

A.1.3. Porosidade

Horizonte	Nº anel	Macro (%)	Micro (%)	Total (%)	θ nat. (%)	Dens. solo
Ag	812	2,21	33,15	35,36	18,11	1,56
	807	4,13	31,91	36,04	16,62	1,57
	499	1,43	32,07	33,50	18,71	1,64
	Média	2,59	32,38	34,97	17,81	1,59
Ap	449	0,51	32,35	32,86	19,54	1,67
	491	1,47	32,11	33,58	19,86	1,68
	467	0,54	30,49	31,03	17,55	1,73
	Média	0,84	31,65	32,49	18,98	1,69
AB	451	1,82	31,84	33,66	19,35	1,72
	495	1,32	30,68	31,99	18,26	1,76
	446	1,98	29,92	31,90	17,45	1,74
	Média	1,71	30,81	32,51	18,35	1,74
Bg	497	1,21	34,64	35,85	21,33	1,65
	440	1,67	35,24	36,92	21,44	1,66
	493	0,97	35,30	36,27	22,23	1,63
	Média	1,28	35,06	36,34	21,67	1,65