SIMULAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA ÁGUA EM SOLO IRRIGADO COM GOTEJADOR

TARLEI ARRIEL BOTREL

Orientador: Prof. Dr. ANTONIO FERNANDO L. OLITTA

Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Agronomia. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Junho - 1988

B749s Botrel, Tarlei Arriel
 Simulação da distribuição espacial da
 água em solo irrigado com gotejador. Pi-
 racicaba, 1988.
 61p.

 Tese - ESALQ
 Bibliografia.

 1. Água do solo - Distribuição - Simu-
 lação 2. Irrigação por gotejamento 3. Mo-
 delo matemático 4. Solo irrigado - Água -
 Distribuição I. Escola Superior de Agricul-
 tura Luiz de Queiroz , Piracicaba

CDD 631.7

SIMULAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA ÁGUA EM SOLO IRRIGADO COM GOTEJADOR

TARLEI ARRIEL BOTREL

Aprovada em: 08.07.1988

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Antonio Fernando Lordelo Olitta	ESALQ/USP
Prof. Dr. Antonio Sanchez de Oliveira	ESALQ/USP
Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi	ESALQ/USP
Prof. Dr. Dirceu Brasil Vieira	FEL/UNICAMP
Prof. Dr. José Renato Zanini	FEIS/UNESP

Prof. Dr. ANTONIO FERNANDO LORDELO OLITTA
Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela fé e perseverança concedida em todos os momentos.

Ao Prof. Antonio Fernando Lordelo Olitta, pela orientação, amizade e apoio recebidos no decorrer do curso e na realização deste trabalho.

A Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", por intermédio do Departamento de Engenharia Rural, pela acolhida e apoio concedido.

Aos demais professores, funcionários e estagiários do Departamento de Engenharia Rural pelas sugestões, ajuda e convívio amigo.

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o êxito deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
3. MATERIAL E MÉTODOS	10
3.1. Localização	10
3.2. Solo	10
3.2.1. Classificação e análise mecânica	10
3.2.2. Determinação das curvas características..	11
3.2.3. Determinação da densidade aparente e da condutividade hidráulica saturada	12
3.2.4. Análise mecânica	13
3.3. Instalação do experimento no campo	14
3.3.1. Suprimento de água	14
3.3.2. Obtenção da umidade do solo	14
3.4. Simulação dos dados	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
4.1. Curva de retenção, condutividade hidráulica e ajuste das equações	24
4.2. Observações de campo	32
4.3. Dados simulados	40

5. CONCLUSÕES.....	55
6. LITERATURA CITADA	56

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
1 - Esquema do mecanismo de suprimento d'água.	15
2 - Esquema dos anéis concêntricos, utilizados no desenvolvimento do modelo para simulação da distribuição espacial da água no solo.....	17
3 - Fluxograma utilizado no desenvolvimento do programa para simulação dos dados.....	23
4 - Representação gráfica da curva de retenção e dados experimentais, para a profundidade de 0 a 20 cm.....	26
5 - Representação gráfica da curva de retenção e dados experimentais, para a profundidade de 20 a 40 cm.....	27

FIGURA	PÁGINA
6 - Representação gráfica da curva de retenção e dados experimentais, para a profundidade de 40 a 60 cm.....	28
7 - Representação gráfica da curva de retenção e dados experimentais, para a profundidade de 60 a 80 cm.....	29
8 - Representação gráfica da curva de retenção e dados experimentais, para a profundidade de 80 a 100 cm.....	30
9 - Perfil de distribuição de umidade observado no solo, 24 horas após o início da aplicação de água.....	41
10 - Perfil de distribuição de umidade observado no solo, 48 horas após o início da aplicação de água.....	42
11 - Perfil de distribuição de umidade observado no solo, 72 horas após o início da aplicação de água.....	43

FIGURA	PÁGINA
12 - Perfil de distribuição de umidade, simulado para 24 horas, após o início da aplicação de água.....	51
13 - Perfil de distribuição de umidade, simulado para 48 horas, após o início da aplicação de água.....	52
14 - Perfil de distribuição de umidade, simulado para 72 horas, após o início da aplicação de água.....	53

LISTA DE TABELAS

TABELA	PÁGINA
1 - Análise mecânica e classe textural do perfil do solo latossol vermelho amarelo fase arenosa.....	13
2 - Tensão versus umidade volumétrica (%) para as diferentes profundidades.....	25
3 - Parâmetros de ajustes das curvas de retenção da água no solo à equação (8)...	31
4 - Condutividade hidráulica saturada, densidade global e umidade inicial das diferentes camadas.....	32
5 - Umidade volumétrica (%) observada para o perfil de distribuição de água no solo sob fonte puntiforme, com vazão de 10 l/h, 24 horas após o início da aplicação d'água.....	33

TABELA

PÁGINA

6 - Umidade volumétrica (%) observada para o perfil de distribuição de água no solo sob fonte puntiforme, com vazão de 10 l/h, 48 horas após o início da aplicação d'água.....	34
7 - Umidade volumétrica (%) observada para o perfil de distribuição de água no solo sob fonte puntiforme, com vazão de 10 l/h, 72 horas após o início da aplicação d'água.....	35
8 - Umidade volumétrica média (%) observada para o perfil de distribuição de água no solo sob fonte puntiforme, com vazão de 10 l/h, 24 horas após o início da aplicação d'água.....	37
9 - Umidade volumétrica média (%) observada para o perfil de distribuição de água no solo sob fonte puntiforme, com vazão de 10 l/h, 48 horas após o início da aplicação d'água.....	38

TABELA

PÁGINA

10 - Umidade volumétrica média (%) observada para o perfil de distribuição de água no solo sob fonte puntiforme, com vazão de 10 l/h, 72 horas após o início da aplicação d'água.....	39
11 - Umidade volumétrica (%) estimada para o perfil molhado pela fonte puntiforme, sob vazão de 10 l/h, 24 horas após o início da aplicação d'água.....	45
12 - Umidade volumétrica (%) estimada para o perfil molhado pela fonte puntiforme, sob vazão de 10 l/h, 48 horas após o início da aplicação d'água.....	46
13 - Umidade volumétrica (%) estimada para o perfil molhado pela fonte puntiforme, sob vazão de 10 l/h, 72 horas após o início da aplicação d'água.....	47
14 - Umidade volumétrica média (%) estimada para o perfil molhado pela fonte puntiforme, 24 horas após o início da aplicação d'água.....	48

TABELA

PÁGINA

15 - Umidade volumétrica média (%) estimada para o perfil molhado pela fonte puntiforme, 48 horas após o início da aplicação d'água.....	49
16 - Umidade volumétrica média (%) estimada para o perfil molhado pela fonte puntiforme, 72 horas após o início da aplicação d'água.....	50

SIMULAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA ÁGUA EM SOLO IRRIGADO COM GOTEJADOR

Autor: TARLEI ARRIEL BOTREL

Orientador: PROF. DR. ANTONIO FERNANDO LORDELO OLITTA

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo apresentar e testar sob condições de campo, um modelo matemático para computador, onde se permite estimar a distribuição espacial da água em solos sob fontes puntiformes. O modelo utilizou a equação de Darcy para fluxo d'água em solos não saturados, e o princípio de conservação das massas. A condutividade hidráulica em função da umidade para utilização na equação de Darcy, foi determinada a partir da curva de retenção de umidade e da condutividade hidráulica saturada, seguindo metodologia descrita por VAN GENUCHTEN (1980). Os parâmetros necessários à simulação foram: umidade inicial, curva característica de retenção de água do solo, condutividade

hidráulica saturada, densidade global, vazão da fonte puntiforme e volume d'água aplicado. O modelo foi testado em condições de campo num latossol vermelho amarelo fase arenosa submetido a uma fonte puntiforme com vazão de 10 l/h e um volume total de 30 litros. O perfil de distribuição de umidade, foi avaliado por método gravimétrico, sendo as amostras obtidas utilizando-se de um trado amostrador. As amostras foram colhidas nos tempos de 24, 48 e 72 horas, após o início da aplicação d'água. Os perfis de distribuição de água no solo observados, apresentaram-se semelhante aos simulados pelo modelo.

SIMULATION OF WATER SPACIAL DISTRIBUTION IN IRRIGATED
SOILS UNDER TRICKLE SOURCES

Author: TARLEI ARRIEL BOTREL

Adviser: PROF. DR. ANTONIO FERNANDO LORDELO OLITTA

SUMMARY

The objective of this work was to test, under field conditions, a mathematical model for computer to estimate the spatial distribution of water in soils under point sources. The model uses Darcy's equation and the principle of mass conservation. The hydraulic conductivity as a function of soil-water content to be utilized in Darcy's equation was determined from soil water retention curve and saturated hydraulic conductivity according to VAN GENUCHTEN (1980) method. The parameters used for the simulation were: initial soil-water content, soil-water retention curve, saturated hydraulic conductivity, soil bulk density, flow of the point source and volume of applied water. The model was tested under field conditions in a Red Yellow Latosol (textural class: sand clay) under

a point source with a flow of 10 l/h and a total volume of 30 l. The soil water distribution profile was evaluated by gravimetric method being the samples taken from the field with a sampling auger. Samples were taken 24, 48 and 72 hours after beginning of water application. Observed data and those determined by simulation profiles were similar, showing the potenciality of the model for future works.

1 - INTRODUÇÃO

Nas culturas irrigadas, o conhecimento da capacidade do solo em armazenar água é de fundamental importância no estabelecimento da frequência da irrigação.

Nos métodos em que a irrigação é feita de modo a molhar toda a superfície do terreno, esta capacidade de armazenamento de água pelo solo é facilmente estimada por testes de laboratório ou de campo, onde se determina a capacidade de campo e o ponto de murchamento permanente. Porém, existem técnicas de irrigação em que apenas parte do solo funciona como armazém de água para as plantas, e nesse caso para se estimar a capacidade do solo em armazenar água, torna-se necessário conhecer a distribuição espacial desta água no solo, quando irrigado.

Um dos métodos que molha apenas parte do solo e que vem sendo bastante utilizado é a irrigação por gotejamento. Nesse método de irrigação, a água é lançada por fontes puntiformes sob a copa da planta diretamente sobre a região do sistema radicular. Para projetar com critério um sistema de irrigação por gotejamento, necessita-se conhecer a distribuição espacial da água no

solo, o que possibilita verificar a região com umidade adequada para desenvolvimento das raízes.

A fim de dar subsídios à elaboração de projetos de irrigação por gotejamento, este trabalho tem por objetivo apresentar e testar em condições de campo, um modelo matemático para computador, onde se permite estimar a distribuição espacial da água no solo, proveniente de fontes puntiformes, como é o caso dos gotejadores.

2) - REVISÃO DE LITERATURA

A já consagrada equação desenvolvida por Darcy em 1856 para movimento de água em solos saturados, juntamente com os conceitos de potencial de água no solo definidos por Buckingham em 1907 foram utilizados para equacionar o movimento da água em solos não saturados. A equação de Buckingham-Darcy para movimento da água em solos não saturados é a seguinte:

$$q = -K(h) \nabla h \quad (1)$$

sendo:

q = densidade de fluxo, $L T^{-1}$;

$K(h)$ = condutividade hidráulica em meio não saturado, $L T^{-1}$;

∇h = gradiente do potencial hidráulico, adimensional;

RICHARDS (1931) combinou a equação de Buckingham-Darcy com a equação da continuidade e obteve a equação diferencial geral que descreve o movimento não saturado da água em solos, a qual é conhecida na literatura de ciência do solo como Equação de Richards.

Este autor, neste mesmo trabalho, foi o primeiro a apresentar um método de determinação da condutividade hidráulica. Seu método consistiu em se utilizar uma pequena coluna de solo, entre duas placas porosas de cerâmica, mantendo um gradiente de potencial constante entre as extremidades da coluna, por meio de colunas de água. Uma vez atingida a condição de equilíbrio dinâmico, a condutividade hidráulica era facilmente estimada por meio da equação de Buckingham - Darcy.

O valor da condutividade hidráulica $K(\theta)$ decresce muito rapidamente quando a umidade volumétrica (θ) afasta de seu valor de saturação, o que segundo PHILIP (1969) se deve as seguintes razões: a) a seção transversal total disponível ao fluxo decresce muito rapidamente com a diminuição da umidade volumétrica ; b) os poros maiores do solo são esvaziados primeiramente com o decréscimo de θ e c) para casos de baixos valores de umidade, aumenta-se a probabilidade de a água ocorrer em poros separados rompendo o contato hidráulico no solo.

GARDNER (1958) propôs uma relação exponencial entre a condutividade hidráulica e o potencial matricial, na forma:

$$K(h) = K(0) e^{\alpha h} \quad (2)$$

em que:

$K(h)$ = condutividade hidráulica em meio não

saturado, $L T^{-1}$;

$K(0)$ = condutividade hidráulica em meio saturado, $L T^{-1}$;

h = potencial matricial da água no solo, L ;

α = constante empírica do solo, L^{-1} ;

e = base do logaritmo neperiano.

MUALEN (1976), VAN GENUCHEN (1980), e PAULETTO (1986) apresentaram o desenvolvimento de equações que permitem estimar a condutividade hidráulica não saturada a partir da curva de retenção da água no solo e da condutividade hidráulica saturada. Os dados obtidos por estas equações foram comparados com os obtidos a campo, e todas chegaram a resultados satisfatórios, para as condições as quais foram desenvolvidos os experimentos.

GARDNER e MAYHOUGH (1958) estudaram o movimento da água em solo não saturado bi e tri dimensionalmente. No caso bi dimensional horizontal, verificaram que o volume de água absorvido em função do tempo, é uma função linear que não passa pela origem dos eixos. No caso tri dimensional, o volume de água infiltrado é uma função linear do tempo elevado à potência de 3/2.

HILLEL (1970) estudando infiltração em sulcos de irrigação, verificou que a infiltração se corre-

laciona com o tempo, de acordo com a seguinte equação:

$$I = S t^{(1/2)} + a t \quad (3)$$

onde (I) é a infiltração acumulada durante o tempo (t), (S) é um coeficiente do solo, que expressa o efeito do gradiente de sucção, e (a) um coeficiente que expressa o efeito da gravidade.

KELLER e KARMELI (1974) salientam a importância da área molhada em relação a área total, de uma cultura irrigada por gotejamento. Os autores apresentam um gráfico onde é mostrado a produção relativa, em função da percentagem da área molhada pelos gotejadores, e uma tabela onde se pode estimar a percentagem da área molhada, em função do tipo de solo e da vazão do gotejador.

NIELSEN et alii (1962) estudaram o avanço horizontal da água em colunas de solo sob diferentes tensões, e observaram que existe uma relação linear entre o caminhamento da água e a raiz quadrada do tempo.

ROTH (1974) conduziu um experimento onde foi aplicado água em três diferentes taxas por uma fonte puntiforme, em solo arenoso, notando que o volume de solo molhado, teve maior influência da quantidade de água aplicada que da taxa de aplicação. Observou ainda, que o perfil molhado tinha forma aproximadamente circular para volumes de água inferiores a 95 litros, e forma elíptica para volumes maiores.

Procurando verificar o efeito da vazão de um gotejador no escoamento da água em amostras do horizonte Ap de um latossolo roxo, DELLA LIBERA (1976) ajustou equações que representam o avanço da frente de molhamento em função do tempo. O trabalho foi desenvolvido em condições de laboratório onde se utilizou vazões entre 1 e 8 l/h sob declividades de 0 a 26,8%.

PALL et alii (1981) desenvolveram um modelo matemático, para estudo do movimento da água em macieiras irrigada por gotejamento, onde os testes de campo mostraram resultados próximos aos estimados pelo modelo.

MOSTAGHIMI et alii (1981) conduziram um experimento em laboratório com um gotejador isolado submetido a diferentes taxas de aplicação de água; este estudo mostrou que o incremento na taxa de aplicação aumentou o alcance vertical e reduziu o alcance horizontal do perfil molhado pelo gotejador. O resultado foi contrário ao encontrado por BRANDT et alii (1971).

KHATRI et alii (1985) desenvolveram um programa de computador baseado no princípio de conservação das massas e na lei de Darcy, para estudar o movimento da água aplicada por um gotejador no solo, considerando também a extração da água pelas raízes. Foi observado que distribuição de água no solo é dependente do montante de água aplicado, das características de retenção de água do solo, da umidade inicial e da quantidade de água extraída

pelas raízes.

SHANI et alii (1985) afirmaram que a distribuição da água no perfil de solo é afetada pela taxa de descarga dos gotejadores, pelo intervalo de aplicação de água, pelas propriedades hidráulicas do solo e pela distribuição das raízes, sendo que estas em sistemas de irrigação por gotejamento se apresentam adensadas e limitadas a uma profundidade de até 30 cm da camada superior do solo.

CHANIM et alii (1985) partiram da equação da infiltração acumulada de Kostiaikov e desenvolveram um modelo matemático simples, para estimar a infiltração horizontal e vertical, bem como o volume de solo molhado por um gotejador, onde os dados necessários ao modelo foram as constantes a , b , e c da equação de infiltração de Kostiaikov e a umidade inicial. Este modelo foi comparado com dados de campo e obtiveram-se resultados satisfatórios.

Vários autores como BRADT et alii (1971), PHILIP (1971), WARRICK (1974), RAATS (1974), e WARRICK (1985) apresentaram modelos matemáticos que permitiram estimar o potencial da água ou umidade nas coordenadas x , y , e z em função do tempo, para fontes puntiformes. As limitações destes modelos são a aplicabilidade apenas em solos homogêneos, e a linearização da função $K(\theta)$, sendo observado por WARRICK (1974) que a umidade em irrigações

frequentes varia sobre uma escala limitada, o que torna a linearização da função $K(\theta)$ mais aceitável.

MARTINEZ (1981) fez uma comparação entre os potenciais da água no solo medidos no campo e simulados pelo modelo de WARRICK e LOMEN (1976). O trabalho foi desenvolvido em solo podzólico vermelho amarelo câmbico submetido a vazão de $62,5 \text{ cm}^3/\text{h}$, sendo o potencial matricial medido através de tensiômetros instalados em 20 pontos no perfil do solo. Foi observado que as diferenças entre potenciais medidos e estimados tenderam a aumentar com o tempo de aplicação de água.

NAKAYAMA e BUCKS (1986) apresentaram um modelo simplificado para estimar o bulbo molhado por uma fonte puntiforme. Tal modelo baseou-se no princípio da conservação das massas, e assumiu o formato semiesférico para o bulbo. Foi observado que para tempos longos, a frente de molhamento tende a aprofundar e desviar mais da semi-esfera proposta pelo modelo.

3 - MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - Localização

O experimento foi conduzido em uma área experimental, localizada dentro do campus da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, em Piracicaba, cujas coordenadas geográficas são: 20° 42' 30'' de latitude sul, e 47° 38' 00'' de longitude oeste, a 580 metros de altitude.

3.2 - Solo

3.2.1 - Classificação e análise mecânica

O solo utilizado neste experimento foi um latossol vermelho amarelo fase arenosa, sendo classificado por RANZANI et alii (1966) como série sertãozinho, com a seguinte descrição de horizontes:

Ap ● - 25 cm: pardo avermelhado claro (5 YR 6/4; 4/6 úmido); salpicado de areia lavada; barro arenoso maciço; macio, muito friável, não

plástico, não pegajoso; galerias, poucas; raízes finas, comum; carvões, comum; ph 4,3; limite suave, difuso.

C1 25 - 75 cm: pardo avermelhado (5YR 6/4; 4/6 umido); barro arenoso grosso; maciço; macio, muito friável, não plástico, não pegajoso; galerias, pouco; raízes finas; comum; carvões, comum; ph 4,3; limite suave, difuso.

3.2.2 - Determinação das curvas características

Uma trincheira foi aberta ao lado da área de testes, a fim de coletar amostras com estrutura indeformada, utilizando-se de anéis amostradores de 3 cm de diâmetro por 3 cm de altura. As camadas amostradas para obtenção em laboratório das curvas características, foram de, 0-20, 20-40, 40-60, 60-80, e 80-100 cm, sendo 4 amostras para cada profundidade. Para tensões até 200 cm de coluna d'água, foi utilizado mesa de tensão (1 kpa = 10,204 cm de coluna d'água), e acima deste valor foi utilizada câmara de Richards com placas porosas de cerâmica.

3.2.3 - Determinação da densidade global e da condutividade hidráulica saturada.

Utilizando a mesma trincheira aberta para coletar as amostras para determinação das curvas características, foram coletadas também amostras utilizando cilindros amostradores de 7,5 cm de diâmetro por 7,5 cm de altura, para obtenção da densidade global e da condutividade hidráulica saturada, sendo colhidas amostras às mesmas profundidades daquelas utilizadas para elaboração das curvas características.

A condutividade hidráulica saturada, foi determinada utilizando-se de um permeâmetro de carga constante, onde foi mantida uma carga hidráulica fixa de 2,3 cm por meio de um recipiente, cujo nível foi mantido constante por um fluxo contínuo de água e o excesso drenado por transbordamento do recipiente. Após a saturação da amostra, foi determinado o volume de água que atravessou a amostra no intervalo de tempo de uma hora e trinta minutos. Com a relação entre o volume por unidade de tempo e a área da secção transversal da amostra, obteve-se o fluxo, que juntamente com a diferença de potencial hidráulico entre as extremidades da amostra, pode-se obter a condutividade hidráulica saturada, utilizando-se da equação de Darcy.

3.2.4 - Análise mecânica

A análise mecânica deste solo, foi feita por LIBARDI (1978) mostrando os resultados apresentados na Tabela 1.

Podemos observar que o solo apresenta-se bastante homogêneo, sendo classificado como areno-argiloso em todo perfil.

Tabela 1 - Análise mecânica e classe textural do perfil do solo latossol vermelho amarelo fase arenosa.

Profundidade (cm)	% Argila	% Silte	% Areia	Classe textural
15	18,17	4,72	77,11	areno-argiloso
30	27,88	14,22	67,90	areno-argiloso
45	26,82	5,29	67,89	areno-argiloso
60	27,10	3,93	68,97	areno-argiloso
75	28,11	3,08	68,81	areno-argiloso
90	27,87	3,16	68,97	areno-argiloso
105	26,41	5,51	68,87	areno-argiloso
120	28,31	3,61	68,08	areno-argiloso
135	26,78	5,20	68,02	areno-argiloso

3.3 - Instalação do Experimento no campo

3.3.1 - Suprimento de água

Para simular o efeito de um gotejador, utilizou-se de um tubo capilar com dispositivo para dosar a quantidade de água (dosador de soro para utilização em hospitais). Este tubo capilar foi acoplado a um reservatório de nível constante com capacidade de 8 litros de água, o qual era abastecido por outro reservatório metálico com capacidade de 70 litros. O nível no reservatório de 8 litros era mantido constante pela utilização de uma bóia. A Figura 1 mostra esquematicamente o mecanismo de suprimento de água.

O dispositivo dosador foi ajustado para uma vazão de 10 litros por hora e o tempo de funcionamento de 3 horas, o que levou a um consumo de 30 litros de água.

3.3.2 - Obtenção da umidade do solo

A fim de comparar os dados simulados com aqueles obtidos a campo, foi escolhida uma área de solo em nível onde se removeu a vegetação e foi aplicado a água. A umidade do solo no bulbo molhado foi determinada 24, 48, e 72 horas, após o início da aplicação d'água. O método utilizado foi o gravimétrico, onde as amostras

Figura 1 - Esquema do mecanismo de suprimento d'água.

foram obtidas com o auxílio de um trado tubular (trado de VIMHEYER) e acondicionadas em cápsulas metálicas com tampa, e logo após a coleta estas cápsulas, devidamente com o solo, foram pesadas e levadas a estufa a temperatura de 105 a 110 graus até peso constante, onde por diferença entre o peso úmido e o peso seco obteve-se as umidades. A Figura 2, mostra esquematicamente o solo dividido em anéis concêntricos, tendo como centro a fonte puntiforme. As amostras foram obtidas, a cada 10 cm ao longo de dois raios do círculo formado pelos anéis, e a cada 10 cm de profundidade, de modo que todo anel esquematizado foi amostrado por duas vezes. O total de raios amostrados foram 6 (2 para cada tempo), dispostos de modo a formar na superfície do solo ângulos de 60 graus, pois assim o bulbo molhado foi dividido em 6 fatias de igual tamanho.

3.4 SIMULAÇÃO DOS DADOS

Um modelo para simulação foi codificado em linguagem basic, para estimar a distribuição de água no bulbo molhado pela fonte puntiforme. Este modelo baseou no exposto por VAN DER PLOEG e BENECKE (1974), associado a metodologia exposta por VAN GENUCHTEN (1980), para obter a condutividade hidráulica relativa a partir da curva de retenção de água.

Figura 2 - Esquema dos anéis concêntricos, utilizados no desenvolvimento do modelo para simulação da distribuição espacial da água no solo.

O solo foi imaginariamente dividido em anéis, cada um com largura Δr e profundidade Δz . Os anéis tinham como centro uma linha vertical que partia da fonte puntiforme na superfície do solo como é ilustrado na Figura 2. Considerando o índice "i" como endereço do anel ao longo da profundidade, e o índice "j" como endereço do anel em relação ao raio, podemos calcular a densidade de fluxo horizontal de um anel a outro aplicando a equação de Darcy, sendo:

$$q(i, j-1 \text{ a } i, j) = -K(i, j-1 \text{ a } i, j) \frac{H(i, j) - H(i, j-1)}{\Delta r} \quad (4)$$

onde:

$q(i, j-1 \text{ a } i, j)$ = densidade de fluxo através da interface $i, j-1$ a i, j , em cm/h;

$K(i, j-1 \text{ a } i, j)$ = condutividade hidráulica média entre o anel da posição $i, j-1$ e o da posição i, j , em cm/h;

$H(i, j)$ = potencial hidráulico total da água do anel da posição i, j , em cm de coluna d'água;

$H(i, j-1)$ = potencial hidráulico total da água do anel da posição $i, j-1$, em cm de coluna d'água;

Δr = diferença entre o raio dos dois anéis em cm.

A densidade de fluxo no sentido vertical, foi calculada de maneira análoga a equação 4, onde os

Índices $i, j-1$ foram substituídos por $i-1, j$ e Δr por Δz .

O volume de água que passou horizontalmente de um anel a outro, pode ser calculado pela expressão a seguir:

$$V(i, j-1 \text{ a } i, j) = q(i, j-1 \text{ a } i, j) \cdot \Delta z \cdot 2 \pi r(i, j) \Delta t \quad (5)$$

sendo:

$V(i, j-1 \text{ a } i, j)$ = volume de água que foi do anel $i, j-1$ ao anel i, j , em cm^3 ;

Δz = altura do anel, em cm;

$r(i, j)$ = raio interno do anel da posição i, j , em cm;

Δt = intervalo de tempo, em segundos.

O volume de água que passou verticalmente de um anel a outro foi calculado pela seguinte expressão:

$$V(i-1, j \text{ a } i, j) = q(i-1, j \text{ a } i, j) \cdot 2 \pi [r(i+1, j) - r(i, j)] \cdot \Delta t \quad (6)$$

sendo:

$V(i-1, j \text{ a } i, j)$ = volume de água que foi do anel $i-1, j$ ao anel i, j , em cm^3 ;

$r(i+1, j)$ = raio externo do anel da posição $i+1, j$, em cm;

$r(i, j)$ = raio interno do anel da posição i, j , em cm.

Δt = intervalo de tempo, em segundos.

A quantidade de água que permaneceu em um determinado anel, foi obtida pela diferença entre a

quantidade de água que entrou e a quantidade de água que deixou este anel, como podemos expressar a seguir:

$$\Delta V(i,j) = V(i,j-1 \text{ a } i,j) + V(i-1,j \text{ a } i,j) - V(i+1,j \text{ a } i,j) - V(i,j+1 \text{ a } i,j) \quad (7)$$

sendo:

$\Delta V(i,j)$ = variação no volume de água do anel i,j , em cm^3 ;

$V(i-1, j \text{ a } i,j)$ = volume de água que chegou ao anel i,j pela posição $i-1,j$, em cm^3 ;

$V(i, j-1 \text{ a } i,j)$ = volume de água que chegou ao anel i,j pela posição $i,j-1$, em cm^3 ;

$V(i+1, j \text{ a } i,j)$ = volume de água que deixou o anel i,j pela posição $i+1,j$, em cm^3 ;

$V(i,j+1 \text{ a } i,j)$ = volume de água que deixou o anel i,j pela posição $i,j+1$, em cm^3 ;

A curva característica foi representada pela equação descrita por VAN GENUCHTEN (1980). A equação é a seguinte:

$$\phi = \left(\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right)^m \quad (8)$$

sendo:

ϕ = unidade adimensional, dada por: $\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$

onde:

θ = umidade volumétrica, em $\text{cm}^3 / \text{cm}^3$;

θ_r = umidade volumétrica residual (umidade obtida sob tensão de 15 atmosferas), em $\text{cm}^3 / \text{cm}^3$;

θ_s = umidade volumétrica de saturação, em $\text{cm}^3 / \text{cm}^3$;

h = potencial matricial da água no solo, em cm de coluna d'água;

α = parâmetro do solo, em cm^{-1} ;

n e m = parâmetros do solo, adimensionais.

A equação 8, foi substituída por VAN GENUCHTEN (1980) em um modelo para obtenção da condutividade hidráulica relativa, descrito por MUALEM (1976), tendo resultado a seguinte expressão:

$$K_r(\phi) = \phi^{1/2} (1 - (1 - \phi^{1/m})^m)^2 \quad (9)$$

onde $K_r(\phi)$ é a condutividade hidráulica relativa, e os outros parâmetros tem o mesmo significado apresentados na equação 8. A condutividade hidráulica relativa é a relação entre a condutividade hidráulica na umidade considerada, e a condutividade hidráulica saturada, ou seja:

$$K_r = \frac{K(\theta)}{K(\theta_s)} \quad (10)$$

onde:

K_r = condutividade hidráulica relativa, em cm/h;

$K(\theta)$ = condutividade hidráulica na umidade considerada, em cm/h;

$K(0)$ = condutividade hidráulica saturada em cm/h.

Seguindo a teoria exposta, foi desenvolvido o fluxograma mostrado na Figura 3, e também um programa em linguagem basic para microcomputador da linha IBM-PC, onde simulou a distribuição espacial da água, em solo irrigado com gotejador.

Figura 3 - Fluxograma utilizado no desenvolvimento do programa para simulação dos dados

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - Curva de retenção, condutividade hidráulica e ajuste das equações.

Na Tabela 2, estão apresentados os pares de valores de tensão versus umidade volumétrica para os perfis amostrados, e na Tabela 3, estão apresentados os parâmetros de ajuste destes dados a eq. (8).

É usual em regressões lineares representar o grau de ajuste das equações pelos coeficientes de determinação e pelos coeficientes de correlação, porém em ajustes a equações não lineares como é o caso da eq. (8) estes coeficientes não são mais válidos. Utilizou-se outro parâmetro para medida do grau de ajuste da eq. (8) aos dados experimentais, que foi obtido pela relação entre a soma dos quadrados dos desvios da regressão e a soma de

quadrados totais subtraídos da unidade, chamado na Tabela 3 de ajuste; quanto mais próximo da unidade for este coeficiente, melhor o ajuste, isto é, menor serão os desvios da regressão.

Tabela 2 - Tensão versus umidade volumétrica (%) para as diferentes profundidades.

profun- didade	tensão em centímetros de coluna d'água							
(cm)	sat	10	40	200	500	1000	5000	15000
0 - 20	34,0	32,2	28,8	17,2	14,0	13,5	12,5	12,0
20 - 40	32,5	30,4	25,8	18,8	15,3	14,0	12,5	12,0
40 - 60	36,5	33,8	27,3	19,3	16,0	14,2	12,5	12,1
60 - 80	36,8	33,9	27,4	18,0	15,1	14,0	11,9	11,3
80 - 100	37,9	34,8	27,2	16,4	12,6	11,6	10,6	10,3

Observa-se pelos coeficientes de ajuste apresentados na Tabela 3 e também pelas Figuras de 4 a 8, a seguir, que mostram, respectivamente, para as profundidades de 0 a 20, 20 a 40, 40 a 60, 60 a 80 e 80 a 100 cm, a representação gráfica das equações juntamente

Figura 4 - Representação gráfica da equação da curva de retenção e dados experimentais, para a profundidade de 0 a 20 cm.

Figura 5 - Representação gráfica da equação da curva de retenção e dados experimentais, para a profundidade de 20 a 40 cm.

Figura 6 - Representação gráfica da equação da curva de retenção e dados experimentais, para a profundidade de 40 a 60 cm.

Figura 7 - Representação gráfica da equação da curva de retenção e dados experimentais, para a profundidade de 60 a 80 cm.

Figura 8 - Representação gráfica da equação da curva de retenção e dados experimentais, para a profundidade de 80 a 100 cm.

com os dados experimentais, que o modelo de equação escolhido eq. (8) se ajustou bem aos dados experimentais.

Utilizando-se dos parâmetros α , n e m , mostrados na Tabela 3, onde foram obtidos pelo ajuste dos dados da curva de retenção a eq. (8), foi possível obter a condutividade hidráulica relativa através da eq. (9). Utilizando-se da condutividade hidráulica relativa e da condutividade hidráulica saturada, apresentada na Tabela 4, foi possível estimar a condutividade hidráulica em função da umidade, isto é, $K(\theta)$.

Tabela 3 - Parâmetros de ajustes das curvas de retenção da água no solo à eq. (8).

profundidade (cm)	α	n	m	ajuste
0 - 20	0,022554	1,927006	0,481060	0,997
20 - 40	0,037244	1,605782	0,377250	0,996
40 - 60	0,045748	1,588359	0,370419	0,998
60 - 80	0,045195	1,602454	0,375957	0,998
80 - 100	0,040337	1,751652	0,429110	0,997

Tabela 4 - Condutividade hidráulica saturada, densidade global e umidade inicial das diferentes camadas.

Profundidade	condutividade	densidade	umidade
	hidráulica	global	inicial
(cm)	saturada (cm/h)	(g/cm ³)	(% volume)
0 - 20	3,0	1,60	12,1
20 - 40	3,3	1,61	13,2
40 - 60	3,6	1,54	12,5
60 - 80	3,4	1,40	12,2
80 - 100	3,2	1,40	12,0

Além da condutividade hidráulica saturada para as diversas camadas, a Tabela 4 apresenta também, a densidade global e a umidade inicial obtida, antes da aplicação de água na área experimental.

4.2 - Observações de campo.

As Tabelas 5, 6 e 7 mostram, respectivamente, as umidades volumétricas percentuais, obtidas a campo para o perfil molhado pela fonte puntiforme sob

Tabela 5 - Umidade volumétrica (%) observada para o perfil de distribuição de água no solo sob fonte puntiforme, com vazão de 10 l/h, 24 horas após o início da aplicação d'água.

Profundidade (cm)	distância radial (cm)							
	0	10	20	30	40	50	60	70
0- 10	16.9	16.2	17.7	16.8	16.8	15.5	8.9	7.8
10- 20	15.6	20.2	18.9	19.9	18.9	17.3	11.6	9.9
20- 30	21.5	21.9	22.3	20.9	21.0	18.5	15.3	12.2
30- 40	21.2	21.3	21.8	20.5	20.1	18.7	13.5	13.5
40- 50	18.8	18.6	17.8	17.1	15.2	14.0	13.0	12.7
50- 60	16.5	16.5	15.8	17.1	12.7	13.7	11.9	13.3
60- 70	12.7	12.8	11.6	12.2	11.9	12.0	11.5	11.8
70- 80	9.7	11.8	12.4	12.1	12.2	11.9	11.8	11.8
80- 90	11.2	12.7	12.4	11.9	13.1	11.5	12.3	11.9
90-100	11.4	12.5	12.4	12.3	12.3	12.2	12.3	11.5

Tabela 6 - Umidade volumétrica (%) observada para o perfil de distribuição de água no solo sob fonte puntiforme, com vazão de 10 l/h, 48 horas após o início da aplicação d'água.

Profundidade (cm)	distância radial (cm)						
	10	20	30	40	50	60	70
0- 10	16.1	16.1	15.6	15.0	13.9	12.4	10.0
10- 20	18.2	18.2	18.5	18.7	17.4	13.7	11.9
20- 30	20.3	20.0	20.1	19.2	17.8	13.5	13.4
30- 40	20.3	19.9	19.6	18.4	15.0	14.6	12.9
40- 50	18.3	17.5	16.4	14.9	13.7	13.9	12.7
50- 60	16.7	16.2	14.5	13.6	13.9	13.8	13.4
60- 70	13.8	12.8	12.9	11.9	12.4	12.4	12.9
70- 80	12.9	12.5	12.8	12.6	12.0	11.8	12.5
80- 90	12.2	12.0	12.4	12.3	11.2	12.9	12.7
90-100	12.3	12.5	12.5	12.6	12.2	11.9	12.8

Tabela 7 - Umidade volumétrica (%) observada para o perfil de distribuição de água no solo sob fonte puntiforme, com vazão de 10 l/h, 72 horas após o início da aplicação d'água.

Profundidade (cm)	distância radial (cm)						
	10	20	30	40	50	60	70
0- 10	15.3	15.4	15.2	15.7	13.2	9.7	9.3
10- 20	17.5	15.8	16.1	16.9	14.8	10.8	11.4
20- 30	19.5	19.2	19.1	18.4	15.9	13.2	12.5
30- 40	19.2	19.4	18.4	17.3	15.7	13.6	13.4
40- 50	17.4	17.3	17.4	15.3	14.7	13.7	13.2
50- 60	16.8	15.4	15.7	14.4	14.1	14.5	13.1
60- 70	14.9	13.8	14.4	13.3	13.0	12.8	13.0
70- 80	13.7	13.2	13.4	12.9	13.2	12.9	13.2
80- 90	13.5	13.2	13.8	13.4	13.5	13.4	13.5
90-100	12.8	13.0	13.7	13.7	12.7	13.3	13.3

vazão de 10 l/h, 24, 48 e 72 horas, após o início da aplicação d'água. Observa-se que há valores de umidade que fogem a tendência mostrada pelos demais, o que em condições de campo, isto, normalmente ocorre, sendo atribuído ao fato de que os solos apresentam variações ao longo de seu perfil, fato este que tem despertado interesse em muitos pesquisadores, e vários trabalhos sobre o estudo da variabilidade espacial de solos tem surgido nas literaturas especializadas, recentemente.

Para minimizar o efeito das variações de umidade, foram elaboradas as Tabelas 8, 9 e 10 a partir das Tabelas 5, 6 e 7, sendo que as umidades ao longo das distâncias radiais, foram obtidas das médias das duas umidades adjacentes, ou seja, a umidade a distância radial de 5 cm foi obtida a partir da média entre as umidades as distâncias de 0 e 10 cm; a umidade a distância radial de 25 cm, foi obtida a partir da média entre as umidades as distâncias de 20 e 30 cm, e assim sucessivamente. Procedimento idêntico foi feito também, para a profundidade, sendo que a umidade a profundidade de 0 a 20 cm, foi obtida da média da umidade de 0 a 10 cm e 10 a 20 cm. Deste modo, cada umidade apresentada nas Tabelas 8, 9 e 10 foram obtidos da média de 8 determinações a campo, o que dilui variações provenientes da variabilidade espacial do solo, ou mesmo de imprecisões nas determinações.

Para os tempos de 48 e 72 horas, não foi

Tabela 8. - Umidade volumétrica média (%) observada para o perfil de distribuição de água no solo sob fonte puntiforme, com vazão de 10 l/h, 24 horas após o início da aplicação d'água.

Profundidade (cm)	distância radial (cm)			
	5	25	45	65
0- 20	17.2	18.3	17.1	9.6
20- 40	21.5	21.4	19.6	13.6
40 -60	17.6	17.0	13.9	12.7
60 -80	11.8	12.1	12.0	11.7
80-100	12.0	12.3	12.3	12.0

Tabela 9 - Umidade volumétrica média (%) observada para o perfil de distribuição de água no solo sob fonte puntiforme, com vazão de 10 l/h, 48 horas após o início da aplicação d'água.

Profundidade (cm)	distância radial (cm)			
	5	25	45	65
0- 20	17.2	17.1	16.3	12.0
20- 40	20.3	19.9	17.6	13.6
40 -60	17.5	16.2	14.0	13.5
60 -80	13.4	12.8	12.2	12.4
80-100	12.3	12.4	12.1	12.6

Tabela 10 - Umidade volumétrica média (%) observada para o perfil de distribuição de água no solo sob fonte puntiforme, com vazão de 10 l/h, 72 horas após o início da aplicação d'água.

Profun- didade	distância radial (cm)			
(cm)	5	25	45	65
0 - 20	16.4	15.6	15.1	10.3
20 - 40	19.4	19.0	16.8	13.2
40 - 60	17.1	16.5	14.6	13.6
60 - 80	14.3	13.7	13.1	13.0
80 - 100	13.2	13.4	13.3	13.4

possível obter as umidades à distância de 0 cm, ou seja, no centro do "bulbo" molhado, pois na primeira amostragem (de 24 horas) o solo neste ponto foi deformado pela penetração do trado, porém como foi feita uma tradagem a cada 10 cm, isto não constituiu problema, pois a proximidade deste ponto ao subsequente não levou a grandes variações de umidade como pode ser visto na amostragem de 24 horas, o que permitiu considerar sem muito erro, a umidade deste, como sendo, também, a umidade no centro do bulbo.

Utilizando-se das Tabelas 8, 9 e 10, foram elaboradas as Figuras 9, 10 e 11, que representam o perfil de distribuição de umidade apresentado pelo solo submetido à fonte puntiforme com vazão de 10 litros por hora, 24, 48 e 72 horas após o início da aplicação de água, respectivamente.

4.3 - Dados simulados

A simulação do perfil molhado foi feita até a profundidade de 1 metro, considerando 10 perfis de 10 cm de profundidade cada, e uma distância radial de um metro a partir da fonte puntiforme. Esta distância radial foi dividida em espaços de 10 cm, conforme a ilustração da Figura 2. O intervalo de tempo utilizado na simulação foi de 12 segundos, sendo acumulado até perfazer os tempos de 24, 48 e 72 horas, após o início de aplicação d'água.

Figura 9 – Perfil de distribuição de umidade observado no solo, 24 horas após o início da aplicação de água.

Figura 10 - Perfil de distribuição de umidade observado no solo,
48 horas após o início da aplicação de água.

Figura 11 - Perfil de distribuição de umidade observado no solo, 72 horas após o início da aplicação de água.

Os dados necessários a simulação foram: a umidade volumétrica inicial de cada camada do solo, apresentada na Tabela 4, a umidade volumétrica de saturação, apresentada na Tabela 2, a umidade volumétrica residual (considerada a umidade a 15000 cm de coluna d'água), apresentada na Tabela 2, os parâmetros α , n e m obtidos pelo ajuste da curva de retenção a eq. (8) e apresentados na Tabela 3, a condutividade hidráulica saturada, apresentados na Tabela 4, a vazão da fonte puntiforme (10 l/h) e o tempo de aplicação (3 horas).

Os dados obtidos pela simulação, são apresentados nas Tabelas 11, 12 e 13, respectivamente, para os tempos de 24, 48 e 72 horas após o início da aplicação d'água. Procurando comparar os perfis de umidade simulados com aqueles obtidos a campo, foi adotado o mesmo procedimento utilizado nos dados obtidos a campo, ou seja, utilizar as médias dos dados adjacentes para elaborar as Tabelas 14, 15 e 16.

Utilizando-se das Tabelas 14, 15 e 16, foram elaboradas as Figuras 12, 13 e 14, que mostram, respectivamente, o perfil de distribuição de umidade apresentado pelo solo submetido a uma fonte puntiforme com vazão de 10 litros por hora, 24, 48, e 72 horas após o início da aplicação de água, obtido a partir dos dados simulados.

Tabela 11 - Umidade volumétrica (%) estimada para o perfil molhado pela fonte pontiforme, sob vazão de 10 l/h, 24 horas após o início da aplicação d'água.

Profun- didade	distância radial (cm)											
	(cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0- 10		17.8	17.7	17.4	17.1	16.5	15.6	14.2	12.7	12.1	12.1	12.1
10- 20		17.7	17.6	17.3	16.9	16.2	15.2	13.8	12.4	12.1	12.1	12.1
20- 30		19.1	19.0	18.7	18.2	17.4	16.3	14.8	13.4	13.2	13.2	13.2
30- 40		18.9	18.7	18.3	17.7	16.7	15.4	13.8	13.2	13.1	13.1	13.2
40- 50		19.2	18.9	18.4	17.4	15.9	14.0	12.7	12.6	12.6	12.6	12.5
50- 60		18.2	17.9	17.0	15.7	13.9	12.6	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
60- 70		15.9	15.3	14.2	12.8	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2
70- 80		13.8	13.1	12.5	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.2
80- 90		11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9
90-100		12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0

Tabela 12 - Umidade volumétrica (%) estimada para o perfil molhado pela fonte pontiforme, sob vazão de 10 l/h, 48 horas após o início da aplicação d'água.

Profundidade	distância radial (cm)									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90 100
0- 10	16.7	16.6	16.4	16.2	15.2	15.2	14.3	13.1	12.2	12.1 12.3
10- 20	16.6	16.5	16.3	16.0	15.6	14.9	14.0	12.8	12.2	12.2 12.1
20- 30	18.1	18.0	17.8	17.5	16.9	16.2	15.1	13.9	13.2	13.1 13.2
30- 40	18.0	17.8	17.6	17.1	16.5	15.6	14.4	13.3	13.1	13.1 13.2
40- 50	18.3	18.1	17.8	17.2	16.2	14.8	13.3	12.6	12.6	12.6 12.5
50- 60	17.7	17.5	16.9	16.1	14.8	13.2	12.5	12.5	12.5	12.5 12.5
60- 70	15.9	15.5	14.8	13.7	12.5	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2 12.2
70- 80	14.5	14.0	13.1	12.4	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3 12.2
80- 90	12.0	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9 12.0
90-100	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0 12.0

Tabela 13 - Umidade volumetrica (%) estimada para o perfil molhado pela fonte pontiforme, sob vazão de 10 l/h, 72 horas após o início da aplicação d'água.

Profundidade	distância radial (cm)									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90 100
0- 10	15.9	15.9	15.7	15.5	15.2	14.8	14.2	13.3	12.3	12.1 12.1
10- 20	15.8	15.8	15.6	15.4	15.1	14.6	13.9	13.0	12.3	12.2 12.1
20- 30	17.4	17.4	17.2	16.9	16.5	15.9	15.2	14.2	13.3	13.1 13.2
30- 40	17.3	17.2	17.0	16.7	16.2	15.6	14.7	13.6	13.1	13.1 13.2
40- 50	17.7	17.6	17.3	16.9	16.2	15.2	13.9	12.8	12.6	12.6 12.5
50- 60	17.3	17.1	16.7	16.1	15.2	13.9	12.7	12.5	12.5	12.5 12.5
60- 70	15.7	15.5	15.0	14.2	13.0	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2 12.2
70- 80	14.8	14.5	13.7	12.8	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4 12.2
80- 90	12.1	12.0	11.9	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8 12.0
90-100	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0 12.0

Tabela 14 - Umidade volumétrica média (%) estimada para o perfil molhado pela fonte puntiforme, 24 horas após o início da aplicação d'água.

Profundidade (cm)	distância radial (cm)			
	5	25	45	65
0- 20	17.7	17.2	15.9	13.3
20- 40	18.9	18.2	16.5	13.8
40- 60	18.6	17.1	14.1	12.6
60-80	14.5	13.0	12.3	12.3
80-100	12.0	12.0	12.0	12.0

Tabela 15 - Umidade volumétrica média (%) estimada para o perfil molhado pela fonte puntiforme, 48 horas após o início da aplicação d'água.

Profundidade (cm)	distância radial (cm)			
	5	25	45	65
0- 20	16.6	16.2	15.2	13.6
20- 40	18.0	17.5	16.3	14.2
40- 60	17.9	17.0	14.8	12.7
60-80	15.0	13.5	12.3	12.3
80-100	12.0	12.0	12.0	12.0

Tabela 16 - Umidade volumétrica média (%) estimada para o perfil molhado pela fonte puntiforme, 72 horas após o início da aplicação d'água.

Profundidade (cm)	distância radial (cm)			
	5	25	45	65
0- 20	15.9	15.6	14.9	13.6
20- 40	17.3	17.0	16.1	14.4
40- 60	17.4	16.8	15.1	13.0
60-80	15.1	13.9	12.5	12.3
80-100	12.0	11.9	11.9	11.9

Figura 12 - Perfil de distribuição de umidade, simulado para 24 horas, após o início da aplicação de água.

Figura 13 - Perfil de distribuição de umidade, simulado para 48 horas, após o início da aplicação de água.

Figura 14 - Perfil de distribuição de umidade, simulado para 72 horas, após o início da aplicação de água.

Os dados das Tabelas 8, 9 e 10 foram comparados com os das Tabelas 14, 15 e 16, respectivamente, por meio de análise de regressão, onde observou que a nível de 1% de probabilidade, houve correlação entre os dados observados e simulados para todos três tempos estudados (24, 48 e 72 horas, após a aplicação d'água). Os coeficientes de correlação foram 0,91 , 0,92 e 0,77 , respectivamente para os tempos de 24, 48 e 72 horas, após o início da aplicação d'água.

As diferenças ocorridas entre os dados simulados e os obtidos a campo podem ser atribuídas aos seguintes fatores: variabilidade espacial do solo, erros ou imprecisões nas determinações dos parâmetros do solo utilizados no modelo, erros provenientes de critérios teóricos, como a adoção da condutividade hidráulica entre dois anéis, a partir da média aritmética da condutividade hidráulica de cada anel individual, e erros devido a histerese durante o processo de infiltração.

Um fato observado tanto nos perfis simulados quanto nos obtidos a campo, foi que o máximo teor de água se situa na região central do "bulbo" molhado a uma profundidade compreendida entre 30 a 40 cm.

5 - CONCLUSÕES

A análise dos resultados apresentados neste trabalho, mostrou a nível de 1% de probabilidade, que houve correlação entre os dados de distribuição de água simulados pelo modelo matemático e observados à campo, o que permite afirmar que a distribuição espacial da água em solo sob uma fonte puntiforme, pode ser estimada a partir dos dados da curva característica do potencial de água no solo, da condutividade hidráulica saturada, da umidade inicial, da vazão do emissor e do volume de água aplicado, utilizando do modelo matemático para computador, proposto.

A região com máximo teor de água se situou no centro do "bulbo" molhado, a uma profundidade compreendida entre 30 a 40 cm.

6 - LITERATURA CITADA

BRADT, A.; BRESLER, E.; DINER, N.; BEN-ASHER, I.; HELLER, J.; GOLDBERG, D. Infiltration from a trickle source: I. mathematical models. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Madison, 35:675 - 682, 1971.

BRADT, A.; BRESLER, E.; DINER, N.; BEN-ASHER, I.; HELLER, J.; GOLDBERG, D. Infiltration from a trickle source: II. experimental data and theoretical preictions. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Madison, 35:683 - 689, 1971.

CHANIM, B.S. ; NIMAH, M.N.; KAMAND, F. A model to predict emitter spacing from basic soil data. In: INTERNATIONAL DRIP/TRICKLE CONGRESS, 3. Fresno, 1985. Anais. p.712-717

DELLA LIBERA, C. L. Efeito da vazão de um gotejador no escoamento da água no solo. Catanduva, 1976. 82p. (Doutorado Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Catanduva).

GARDNER, W.R. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. Soil Science, Baltimore, 85:228-232, 1958.

GARDNER, W. R. e MAYHUGH, M. S. Solutions and tests of the diffusion equation for the movimento of water in soil. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Madison, 22:197 - 201, 1958.

HILLEL, D. Solo e água: Fenômenos e Princípios Físicos. Porto Alegre, UFRGS, 1970. 231p

KELLER, J. e KARMELI, D. Trickle irrigation design for optimal soil wetting. In: INTERNATIONAL DRIP IRRIGATION CONGRESS, 2. San Diego, 1974. Anais. p. 240-245.

KHATRI, K. C.; BROUGHTON, R. S.; JUTRAS, P.J. Computer model for soil moisture distribution from a drip source. In: INTERNATIONAL DRIP/TRICKLE CONGRESS, 3. Fresno, 1985. Anais. p. 760.

LIBARDI, P. L. Condutividade hidráulica do solo em condições de campo. Piracicaba, 1978. 113p. (Doutorado

- Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP)
- MARTINEZ, M. A. Comparação entre potenciais de água no solo, medidos no campo e simulados. Viçosa, 1981. 51p (M.S. - Universidade Federal de Viçosa)
- MOSTAGHIMI, S. ; MITCHELL, J. K.; LEMBKE, W. D.; Effect of discharge rate on distribution of moisture in heavy soil irrigated from a trickle source. In: ASAE. American Society of Agricultural Engineers. Paper n 81-2081. St Joseph, 1981. 15p.
- MUALEN, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, Washington, 12(3):513-522, 1976.
- NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D.A., Trickle irrigation for crop production - Design, operation and management. New York, 1986.
- NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. M.; DAVIDSON, J.M. Experimental consideration of diffusion analysis in unsaturated flow problems. Soil Science Society of America Journal, Madison, 26(2): 107-112, 1962.
- PAULETTO, E. A. Determinação da condutividade hidráulica de solos a partir da curva de retenção de água.

Piracicaba, 1986. 133p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP)

PALL, R.; MORROW, C. T.; FRITTON, D. D.; JARRETT, A. R.
Modeling moisture flow from a trickle source in the presence of an apple tree. In: ASAE. American Society of Agricultural Engineers. Paper n 81-2079. St Joseph, 1981. 35p.

PHILIP, J.P. Theory of infiltration. Ad. Hidroscience, 5:215-296. 1969

PHILIP, J. R. General theorem on steady infiltration from surface sources. With application to point and line sources. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Madison, 35:867 - 871, 1971.

RAATS, P. A. C. Movement of water and salt under high frequency irrigation In: INTERNATIONAL DRIP IRRIGATION CONGRESS, 2. San Diego, 1974. Anais. p. 222-227.

RANZANI, G.; FREIRE, O.; KINJO, T. Carta de solos do município de Piracicaba. C.E.S., E.S.A. "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1966.

- RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous medium. Physics, 1931. 1:318-333.
- ROTH, R. L. Soil moisture distribution and wetting pattern from a point source. In: INTERNATIONAL DRIP IRRIGATION CONGRESS, 2. San Diego, 1974. Anais. p. 246-252.
- SHANI, H. Selecting dripper discharge and location to control root distribution In: INTERNATIONAL DRIP/TRICKLE CONGRESS, 3. Fresno, 1985. Anais. p. 718-723
- VAN DER PLOEG, R.R.; BENECKE, P. Unsteady, unsaturated, n-dimensional moisture flow in soil: A computer simulation program. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. Madison, 38:881-885, 1974.
- VAN GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, 44:892-898, 1980
- WARRICK, A. W. Time-dependent linearized infiltration I. Point sources. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Madison, 38:18 - 21, 1974.

WARRICK, A. W. Point and line infiltration calculation of the wetted soil surface. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Madison, 49:1581 - 1583, 1985.

WARRICK, A. W. e LOMEN, D. O. Time-dependent linearized infiltration III. Strip and disc sources. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Madison, 40:639 - 643, 1976.