

AVALIAÇÃO DE REGIME PERMANENTE EM IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO E POSICIONAMENTO DE SENSORES DE UMIDADE E DE POTENCIAL MATRICIAL NO BULBO MOLHADO¹

EUGENIO FERREIRA COELHO², DANI OR³ e CAMILO DE LELIS T. DE ANDRADE⁴

RESUMO - O uso de regime permanente permite a aplicação de soluções analíticas da equação de Richards para estimativa da distribuição de água no bulbo molhado, o que facilita o estudo de posicionamento de sensores para monitoramento da umidade e do potencial matricial. O objetivo deste trabalho foi avaliar a aplicabilidade do regime permanente em irrigação por gotejamento, em condições de campo e de definir zonas potenciais para instalação de sensores de umidade e de potencial matricial. Resultados de experimento de campo mostraram que, para turno de rega de dois e três dias, o regime permanente só foi observado durante parte do período de irrigação. As zonas potenciais do bulbo molhado para monitoramento do estado da água no solo nas condições experimentais, para o gotejador instalado na superfície do solo, corresponderam à profundidades de 0,1 m a 0,4 m, e distâncias radiais do gotejador maiores que 0,1 m. No caso do gotejador enterrado, as zonas potenciais do bulbo molhado para monitoramento do estado da água no solo corresponderam às profundidades de 0,1 m a 0,4 m, e distâncias radiais do gotejador menores que 0,3 m.

Termos para indexação: distribuição de água no solo, turno de rega, distâncias radiais.

EVALUATION OF STEADY-STATE AND SENSORS PLACEMENT FOR DETERMINING WATER CONTENT AND MATRIC POTENTIAL IN DRIP IRRIGATION

ABSTRACT - The use of steady-state allows to obtain analytical solutions of Richards equation for estimating water distribution in the wetted volume, which facilitates sensor placement studies for soil water content and matric potential monitoring. The objective of this study was to evaluate the applicability of steady-state in drip irrigation, under field conditions, and to define potential zones for soil water sensor placement. Results showed steady-state only during part of the irrigation event for irrigation frequencies of 2 and 3 days. The potential zones for soil water monitoring, considering the dripper at soil surface corresponded to depths of 0.1 to 0.4 m and radial distances about the dripper greater than 0.1 m. Potential zones for soil water monitoring corresponded to depths of 0.1 to 0.4 m and radial distances about the dripper less than 0.3 m, in case of buried dripper.

Index terms: soil water distribution, soil water sensor placement, steady-state.

INTRODUÇÃO

O adequado manejo de irrigação requer monitoramento da água no solo, que pode ser feito

com o emprego de sensores de umidade (sonda de nêutrons, "Time domain reflectometry" - TDR) ou de potencial matricial (tensiômetros).

A localização de estações de sensores no campo aparece como um primeiro problema no monitoramento do estado da água no solo, uma vez que o número de sensores disponíveis é normalmente pequeno em relação à área a ser irrigada. Uma vez determinada as posições das estações de sensores no campo, torna-se necessário determinar o arranjo dos mesmos dentro de cada estação. Em se tratando de irrigação por gotejamento o problema se agrava, uma

¹ Aceito para publicação em 25 de setembro de 1995.

² Eng. Agríc., EMBRAPA - Centro de Pesquisa Agropecuária do Meio Norte (CPAMN), Caixa Postal 01, CEP 64006-220 Teresina, PI

³ Eng. Agr., Prof. Assistente, Utah State University, UMC 4820, Logan, UT 84322

⁴ Eng. Agríc., EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS), Caixa Postal 151, CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG.

vez que predomina uma geometria de distribuição de água bi ou tridimensional em torno do gotejador. Algumas informações sobre localização de tensiômetros em sistemas de gotejamento são disponíveis (Pogue & Pooley, 1985), embora tenham sido obtidas empiricamente sob condições experimentais específicas. Um estudo mais aprofundado do posicionamento de sensores de umidade ou potencial matricial no solo, sob irrigação por gotejamento, requer o conhecimento da distribuição de umidade ou de potencial matricial no bulbo molhado. A distribuição de umidade ou de potencial no bulbo molhado pode ser obtida por meio de soluções analíticas da equação de Richards, considerando regime permanente de fluxo (Philip, 1968; Raats, 1971; Bresler, 1978). Processos numéricos (Brandt et al., 1971; Lafolie et al., 1989) podem ser usados sob regime não-permanente, porém o trabalho torna-se tedioso devido a manipulações necessárias para linearização de equações diferenciais parabólicas e emprego intensivo de computadores. A maioria das soluções analíticas ou numéricas não consideram extração de água pelas raízes. Entretanto, muitos modelos de extração para distribuição de água unidimensional estão disponíveis na literatura (Molz, 1971; Nimah & Hanks, 1973; Feddes et al., 1974; Warrick et al., 1980; Prasad, 1988; Jarvis, 1989; Allen & Ahmad, 1992).

Este trabalho tem como objetivos avaliar a aplicabilidade de soluções analíticas da equação de Richards sob regime permanente para irrigação por gotejamento em condições de campo, e determinar regiões potenciais para instalação de sensores de umidade ou de potencial matricial no bulbo molhado.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no campo experimental Greenville North Farm da Universidade do Estado de Utah - Logan, Utah. Numa área plantada com milho para silagem (espaçamento de 0,91 m x 0,15 m) foram dispostas linhas de gotejamento sobre a superfície do solo e enterradas a 0,30 m. No caso das linhas sobre a superfície do solo, as mesmas foram instaladas entre fileiras da cultura espaçadas 1,82 m entre si, ou seja, uma linha de gotejamento para duas fileiras de plantas. No caso das fileiras enterradas, as mesmas foram instaladas sob as filei-

ras da cultura, espaçadas 0,91 m entre si. Foram instaladas três linhas na superfície do solo e três linhas enterradas com 20 m de comprimento contendo gotejadores "in line" autocompensantes, vazão 1,6 l/hora, espaçados 1,0 m entre si, ao longo da linha. O solo da área experimental é classificado como Franco-Siltoso, sem estrutura, densidade aparente 1,35 Mg/m³, com valores de $\alpha = 3 \text{ m}^{-1}$ e da condutividade hidráulica saturada (K_s) de 0,0149 m/hora determinados conforme Shani et al. (1987).

Dois estações para monitoramento do estado da água no solo foram construídas, uma no centro da parcela contendo linhas de gotejamento na superfície do solo e outra no centro da parcela contendo linhas de gotejamento enterradas. Em cada estação, iniciando-se junto a um gotejador, foi aberta uma trincheira de 0,70 m de profundidade e 0,4 m de largura transversal à linha de gotejamento, onde uma malha de 0,1 m x 0,1 m determinou as posições de instalação dos sensores de umidade e de potencial matricial. Os sensores usados foram sondas de TDR para umidade do solo e tensiômetros para potencial matricial.

O manejo da irrigação foi feito com base na evapotranspiração potencial diária, obtida pela equação de Kimberly Penman - 1982 e corrigida para Etc usando coeficiente da cultura K_c , onde $K_c = K_{cb} + K_s$ (Wright, 1982). O turno de rega foi de dois dias durante a semana, e três nos fins de semana.

O monitoramento foi feito na fase da floração e início da formação dos grãos. As leituras de umidade foram obtidas em intervalo de quinze minutos, com o emprego de um computador ligado a uma TDR Tektronix, modelo 1502B. Os potenciais matriciais foram coletados em intervalo de trinta minutos por meio de transdutores de pressão conectados a um "datalogger".

No caso do gotejador enterrado, valores estimados de umidade em diferentes posições do bulbo molhado foram obtidos utilizando-se a seguinte solução analítica da equação de Richards para ponto-fonte enterrado, sob condições de regime permanente, (Philip, 1968):

$$\Phi_B(r, z) = \frac{q}{4\pi(r^2 + z^2)^{1/2}} e^{\left(\frac{\alpha}{2}(z - (r^2 + z^2)^{1/2})\right)}$$

onde

Φ_B - transformação de Kirchoff, definida como:

$$\Phi = \Phi_B = \int^h k(h) dh$$

q - vazão do gotejador (L^3T^{-1})

α - parâmetro do solo (L^{-1})

r - distância radial do gotejador (L)

z - distância vertical do gotejador (L)

K(h) - condutividade hidráulica não saturada (LT⁻¹)

Considerando o gotejador na superfície do solo, valores estimados de umidade foram obtidos por meio da solução analítica para ponto-fonte (Raats, 1971):

$$\Phi_S(r, z) = 2\Phi_B + \frac{\alpha q e^{\alpha z}}{4\pi} E_i \left[-\frac{\alpha}{2} (z + (r^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}) \right]$$

onde $\Phi_S = \Phi$, E_i é uma integral exponencial,

$$E_i(-x) = -\int_x^\infty (e^{-x}/x) dx.$$

Os potenciais matriciais h(r,z) em condições de regime permanente foram determinados pela equação:

$$h(r, z) = \frac{1}{\alpha} \ln \left[\frac{\alpha \Phi(r, z)}{K_s} \right]$$

e as correspondentes umidades foram determinadas usando-se o modelo de Russo (1988):

$$S(r, z) = \left[e^{\frac{\alpha h(r, z)}{2}} \left(1 - \frac{\alpha h(r, z)}{2} \right) \right]^{0,8}$$

em que S(r,z) é a saturação relativa definida como $S[h(r,z)] = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$, sendo θ a umidade atual, θ_r a umidade residual, e θ_s a umidade à saturação.

A avaliação dos desvios temporais dos valores observados da umidade, em relação aos valores estimados sob condições de regime permanente, foi feita pelo coeficiente de variação temporal (CVT), onde:

$$CVT = \frac{\sqrt{\sum_j (\theta_j - \theta_{SS})^2 / n}}{\theta_{SS}}$$

em que θ_{SS} é o valor estimado da umidade sob condições de regime permanente (m³/m³).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação do uso de regime permanente em gotejamento

Linhas de gotejamento na superfície do solo

Para frequência de irrigação de dois dias, os desvios entre os valores de umidade, observados e estimados sob regime permanente, foram inferiores a 5% nas posições em que $r < 0,2$ m e $z < 0,4$ m, nas demais posições os desvios foram em geral superiores a 12% (Fig. 1). Os desvios foram ainda maiores para a frequência de irrigação de três dias. Durante as irrigações, observou-se que a região saturada junto ao gotejador era excessivamente grande para ser con-

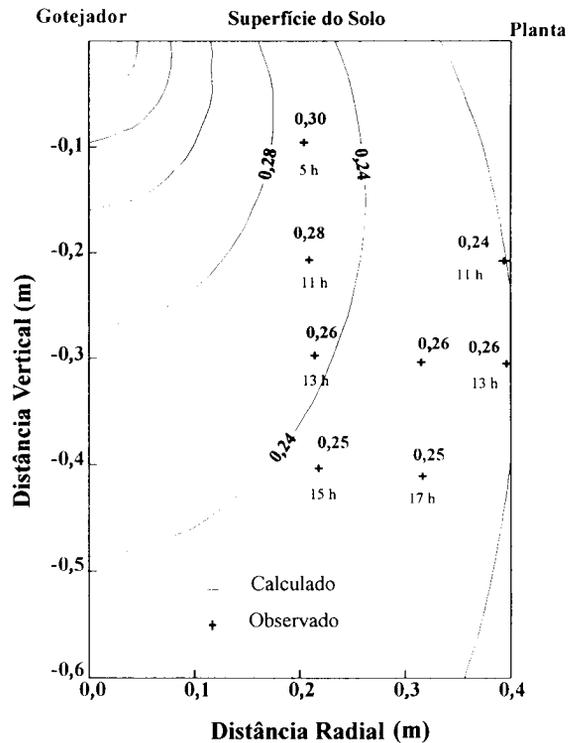


FIG. 1. Valores calculados e observados de umidade sob regime permanente em várias posições do bulbo molhado, obtidos por solução analítica (Raats, 1971) com o gotejador na superfície do solo, vazão 1,6 l/h.

siderada ponto-fonte, conforme assumido pela solução analítica de Raats (1971).

Os tempos necessários para atingir regime permanente em diferentes posições do bulbo molhado variaram de cinco horas (11% do ciclo de irrigação) próximo do gotejador, a 17 horas (36% do ciclo de irrigação) nas posições a 0,4 m de profundidade e 0,3 m de raio. A duração do regime permanente variou de 15 a 21% do ciclo de irrigação a 0,1 m de profundidade, esteve próximo de 9% do ciclo de irrigação a 0,2 e 0,3 m de profundidade, e foi 13% do ciclo de irrigação a 0,4 m de profundidade (Fig. 1). Estes resultados indicam escassa presença de regime permanente no bulbo molhado em condições práticas.

Em algumas posições do bulbo molhado, valores baixos do CVT indicam proximidade das condi-

ções de regime permanente, como pode ser observado ao longo da faixa diagonal ao gotejador (Fig. 2). Nas posições situadas próximo da superfície do solo, junto à planta ou a profundidades maiores, os desvios entre os valores de umidade observados ao longo do tempo e o valor estimado sob regime permanente são mais acentuados. Estes maiores valores do CVT mais próximo da superfície do solo junto à planta são esperados, uma vez que estas posições estão mais sujeitas a variações de umidade, devido à extração de água pelas raízes e à redistribuição e evaporação que ocorre na superfície do solo. Nas profundidades maiores, o teor de umidade é, normalmente, menor, em comparação com o das posições mais próximas do gotejador, o que resulta em maiores desvios entre os valores de umi-

dade calculados sob regime permanente e os valores de umidade observados, independentemente do tempo.

Linhas de gotejamento enterradas

Os valores observados e estimados de umidade sob regime permanente são mostrados na Fig. 3. Em quase todos os pontos, os desvios entre os valores de umidade calculados e observados sob regime permanente não foram superiores a 8,5%. Os tempos gastos para atingir regime permanente variaram de cinco horas (10% do ciclo de irrigação) próximo do gotejador, a oito horas (17% do ciclo de irrigação) nas posições mais afastadas do gotejador. Os períodos em que a umidade do solo esteve sob condições de regime permanente foram, em geral, inferiores a

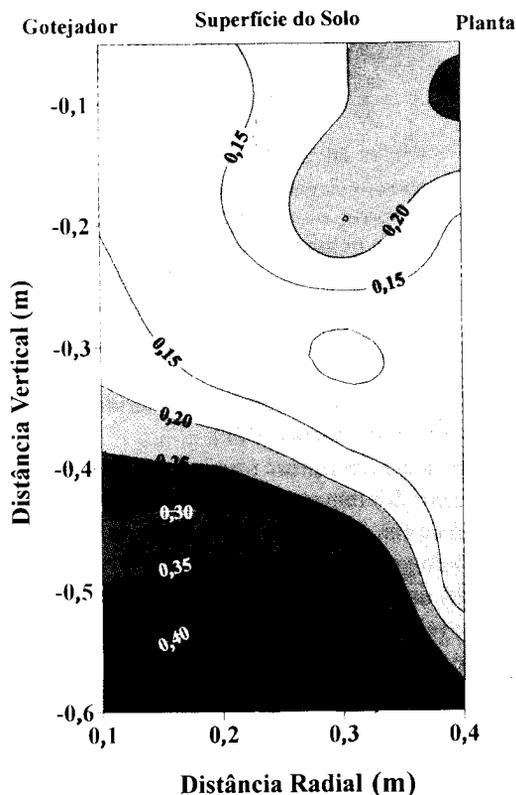


FIG. 2. Coeficiente de desvio temporal (CVT) entre os valores observados e os valores calculados de umidade durante dois ciclos de irrigação (19 a 21 de setembro de 1994).

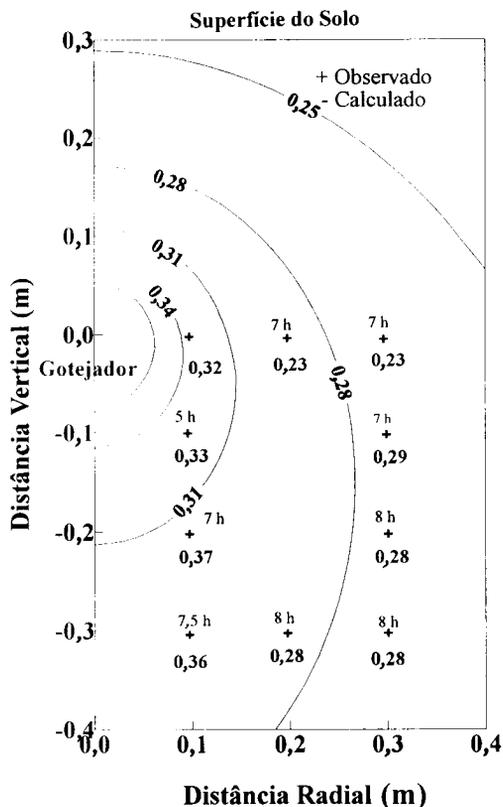


FIG. 3. Valores calculados e observados de umidade sob regime permanente em várias posições do bulbo molhado, obtidas por solução analítica (Philip, 1968) com o gotejador enterrado a 0,3 m, vazão 1,6 l/h.

7% do ciclo de irrigação, em todas as posições observadas. A situação de regime permanente não é predominante nas condições de campo em irrigação por gotejamento na frequência de irrigação usada. Os desvios temporais entre os valores observados e estimados de umidade sob regime permanente foram maiores nas profundidades do solo entre 0,1 m e 0,4 m ($0,1\text{ m} < z < 0,4\text{ m}$), e distância radial do gotejador, entre 0 e 0,3 m ($0 < r < 0,3\text{ m}$) (Fig. 4).

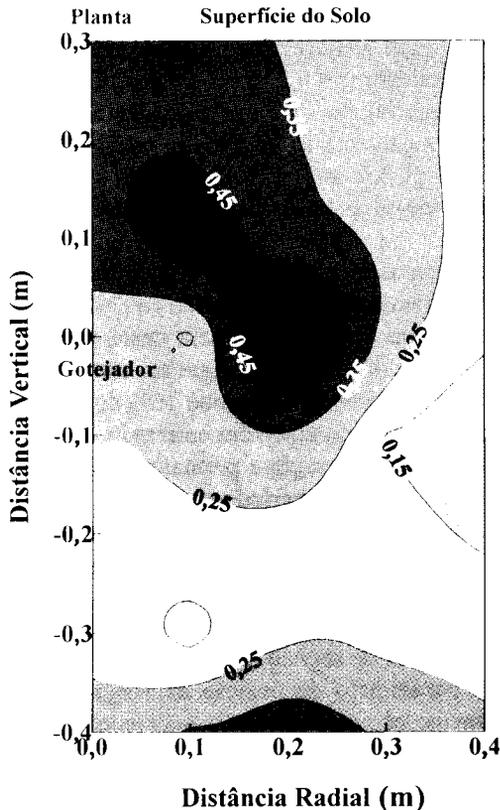


FIG. 4. Coeficiente de desvio temporal (CDT) entre os valores observados e os valores calculados de umidade durante dois ciclos de irrigação (31 de agosto a 5 de setembro de 1994).

Posicionamento de sensores no bulbo molhado

Uma definição preliminar do posicionamento dos sensores de umidade e de potencial matricial foi feita com base nos padrões de redução de umidade no bulbo molhado entre irrigações e com base nas li-

mitações dos sensores. A melhor localização dos sensores corresponde à região do solo onde há maior atividade do sistema radicular, sem entretanto haver risco de se atingir o limite de leitura dos sensores.

Gotejador na superfície do solo entre fileiras de plantas

A redução de umidade entre irrigações foi mais acentuada para distâncias radiais maiores que 0,1 m em relação ao gotejador e para profundidade do solo entre 0 e 0,4 m (Fig. 5). Os valores de umidade computados após a irrigação em todas as posições da seção transversal do bulbo molhado não ultrapassaram a capacidade de campo, descartando hipótese de perdas por percolação. Assim, as reduções de umidade observadas na seção transversal do bulbo molhado (Fig. 5) são, em sua maior parte, causadas pela extração de água pelas raízes. Os potenciais matriciais estiveram próximo ao limite máximo de leitura dos tensiômetros à profundidade 0,5 m, o que

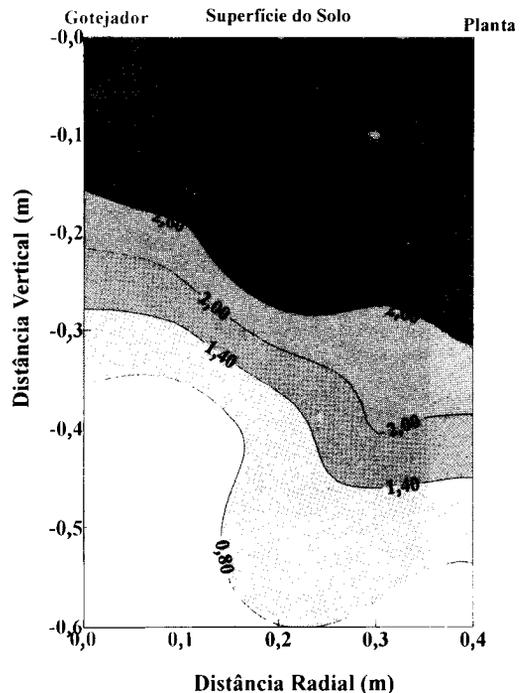


FIG. 5. Água extraída em várias posições do bulbo molhado $\times 10E-4$ ($m^3/m^2/dia$) entre duas irrigações (17 a 19 de setembro de 1994), gotejador na superfície do solo, vazão 1,6 l/h.

se intensificou à profundidade de 0,6 m. No caso de três dias de intervalo de irrigação, os potenciais matriciais começaram a aproximar-se do limite de leitura dos tensiômetros à profundidade 0,3 m e à distância radial de 0,2 m em relação ao gotejador.

Gotejador enterrado sob fileira de plantas

Semelhante à situação anterior, as reduções de umidade ocorreram entre irrigações num período que se iniciou doze horas após o final de uma irrigação até o início da próxima (Fig. 6). Apesar de não se dispor de leituras de umidade próximo da superfície do solo, esta se manteve seca durante o período monitorado, não permitindo ocorrer nenhuma perda por evaporação. Assim, pode-se afirmar que a extração de água pelas raízes foi mais acentuada para

distâncias radiais do gotejador (r) entre 0 e 0,2 m e para profundidades (z) entre 0,2 e 0,4 m. Os potenciais matriciais estiveram perto ou acima do limite de leitura dos tensiômetros às profundidades entre 0 e 0,2 m e a profundidades maiores que 0,7 m.

CONCLUSÕES

1. Os desvios entre os valores observados e estimados de umidades sob condições de regime permanente foram menores nas posições mais próximas do gotejador ($r < 0,2$ m e $z < 0,4$ m) e maiores para maiores valores de r e z , considerando as linhas de gotejamento na superfície; os desvios foram, em geral, inferiores a 8% na região monitorada, considerando-se as linhas de gotejamento enterradas.

2. Os tempos necessários para atingir regime permanente foram menores próximo ao gotejador, e aumentaram com a distância a partir deste, variando de 11 a 36% do ciclo de irrigação, no caso do gotejador na superfície e atingindo 16% do ciclo de irrigação, no caso do gotejador enterrado.

3. Condições de regime permanente só foram observadas durante o período de irrigação, sendo que duraram menos que 13% do ciclo de irrigação, no caso do gotejador na superfície do solo, e duraram, em média, 7% do ciclo de irrigação, no caso do gotejador enterrado.

4. A adoção de regime permanente para obtenção de parâmetros de projeto de irrigação por gotejamento não corresponde à realidade do campo, uma vez que o tempo em que o sistema funciona sob regime permanente é muito curto, em comparação com o tempo total de irrigação.

5. As zonas potenciais do bulbo molhado para monitoramento do estado da água no solo nas condições experimentais, para o gotejador instalado na superfície do solo, corresponderam às profundidades (z) de 0,1 m a 0,4 m, e distâncias radiais (r) do gotejador maiores que 0,1 m.

6. No caso do gotejador enterrado, as zonas potenciais do bulbo molhado para monitoramento do estado da água no solo corresponderam às profundidades (z) de 0,1 m a 0,4 m, e distâncias radiais (r) do gotejador menores que 0,3 m.

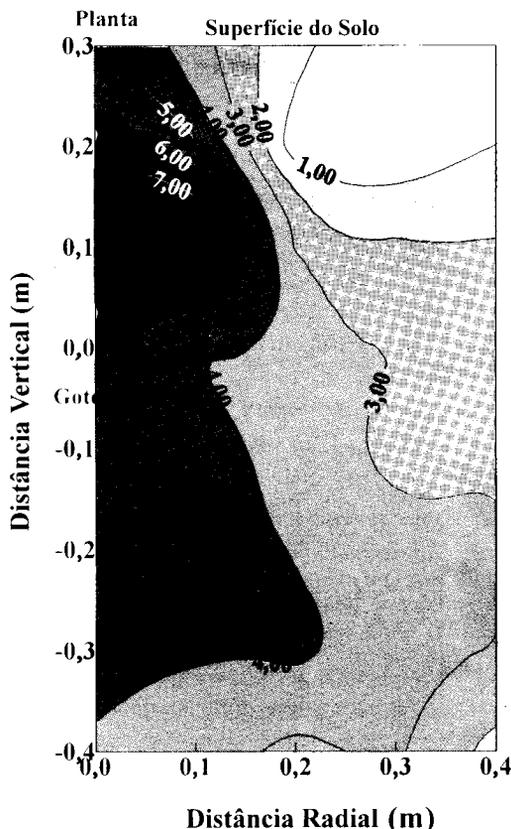


FIG. 6. Água extraída em várias posições do bulbo molhado $\times 10E-4$ ($m^3/m^2/dia$) entre duas irrigações (1ª e 2 de setembro de 1994), gotejador enterrado, vazão 1,6 l/h.

AGRADECIMENTOS

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, pelo financiamento do Curso de pós-graduação, que permitiu o desenvolvimento da presente pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; AHMAD, W. I. 2-D evaporation and root extraction in a FEM. In: WATER FORUM, 92., 1992, Baltimore, MD, USA. **Proceedings...** Baltimore: ASCE, 1992. p.189-196.
- BRANDT, A.; BRESLER, E.; DINER, N.; BEN ASHER, J.; HELLER, J.; GOLDBERG, G. Infiltration from a trickle source: I. Mathematical models. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 35, 1971.
- BRESLER, E. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. **Irrigation Science**, v.1, p.3-17, 1978.
- FEDDES, R. A.; BRESLER, E.; NEUMAN, S. P. Field test for a modified numerical model for water uptake by root systems. **Water Resource Research**, v.10, n.6, p.1199-1205, 1974.
- JARVIS, N. J. A simple empirical model for root water uptake. **Journal of Hydrology**, v.107, p.57-72, 1989.
- LAFOLIE, F.; GUENNELON, R.; VAN GENUTCHEN, M. T. Analysis of water flow under trickle irrigation. **Soil Science Society of America Journal**, v.53, p.1310-1323, 1989.
- MOLZ, F. J. Interaction of water uptake and root distribution. **Agronomy Journal**, v.56, p.35-41, 1971.
- NIMAH, M. N.; HANKS, R. J. Model for estimating soil, water, plant, and atmospheric interrelations: I. Description and sensitivity. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.37, p.522-527, 1973.
- PHILIP, J.R. Steady infiltration from buried point sources and spherical cavities. **Water Resource Research**, v.4, p.1039-1047, 1968.
- POGUE, W.R.; POOLEY, S.G. Tensiometric management of soil water. In: INTERNATIONAL DRIP/TRICKLE IRRIGATION CONGRESS, 3., 1985, Fresno, California. **Proceedings...** Fresno: [s.n.], 1985. p. 761-766.
- PRASAD, R. A. A linear root water uptake model. **Journal of Hydrology**, v.99, p.297-306, 1988.
- RAATS, P.A.C. Steady infiltration from point sources, cavities and basins. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.35, p.689-694, 1971.
- RUSSO, D. Determining soil hydraulic properties by parameter estimation: On the selection of a model for the hydraulic properties. **Water Resource Research**, v.24, p.453-459, 1988.
- SHANI, U.; HANKS, R.J.; BRESLER, E.; OLIVEIRA, C.A.S. Field method for estimating hydraulic conductivity and matric potential-water content relations. **Soil Science Society of America Journal**, v.51, p.298-302, 1987.
- WARRICK, A.W.; LOMEN, D. O.; AMOOZEGAR-FARD, A. Linearized moisture flow with root extraction for three dimensional steady conditions. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.911-914, 1980.
- WRIGHT, J.L. New evapotranspiration crop coefficients. **Journal of Irrigation and Drainage**, v.108, n.2, p.57-74, 1982.