

# DISTRIBUIÇÃO DA UMIDADE NO SOLO E DO POTENCIAL MATRICIAL MEDIDO E ESTIMADO, USANDO-SE LINHA-FONTE COM FLUXO EM REGIME PERMANENTE<sup>1/</sup>

Márcio Mota Ramos<sup>2/</sup>  
Paulo Afonso Ferreira<sup>2/</sup>  
Salassier Bernardo<sup>2/</sup>  
Manoel Vieira<sup>3/</sup>

## 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a demanda de alimentos cresceu vertiginosamente. Áreas anteriormente não utilizadas para produção, por motivo de carência d'água no solo, são exploradas atualmente graças ao processo de irrigação.

O movimento da água no solo e o desenvolvimento e aperfeiçoamento de novas técnicas de aplicação têm sido objeto de muitas pesquisas. Quando aplicada no solo, a água infiltra-se e redistribui-se no seu perfil, de acordo com seu estado de energia. A água no solo pode conter energia em diferentes formas e quantidades; as duas principais formas são a cinética e a potencial. Geralmente, a energia ciné-

---

<sup>1/</sup> Parte da tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, pelo primeiro autor, como um dos requisitos para a obtenção do grau de «Magister Scientiae» em Engenharia Agrícola.

Recebido para publicação em 31-03-1980.

<sup>2/</sup> Universidade Federal de Viçosa — Dep. de Engenharia Agrícola 36570 Viçosa, MG.

<sup>3/</sup> Universidade Federal de Viçosa — Dep. de Matemática 36570 Viçosa, MG.

tica é negligenciada, em razão da baixa velocidade da água no solo. A energia potencial, em consequência de sua posição e condição interna, é muito importante na determinação do estado e do movimento da água, uma vez que a transferência desta ocorre de um ponto de maior potencial para um de menor.

A equação diferencial cuja solução descreve a distribuição do potencial hidráulico através de uma região de fluxo é a de Richards, que admite a validade da equação de Darcy (2, 8, 11).

Numerosos esforços têm sido feitos no sentido de desenvolver soluções analíticas e numéricas das equações diferenciais que descrevem o movimento da água no solo, quando a fonte utilizada é um ponto ou uma linha («point and line source») (9, 13, 16, 17, 19, 20). Todavia, nem todos os investigadores têm comparado os resultados dessas soluções com os obtidos no campo e/ou no laboratório.

Diante dessa necessidade, os objetivos deste trabalho foram comparar os valores de potencial matricial determinados experimentalmente e os estimados por soluções linearizadas da equação diferencial de fluxo de água no solo, em duas dimensões; e estabelecer as características hidrodinâmicas de dois solos, um de Viçosa e outro de Jaíba, pelo ajustamento de valores de parâmetros do modelo matemático usado aos dados experimentais.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Viçosa.

Para determinar a distribuição do potencial matricial num material de solo homogêneo, utilizou-se um modelo de laboratório e um fluxo de água permanente, de uma linha-fonte situada na superfície do material de solo.

### 2.1. *Modelo de Laboratório*

O modelo de laboratório consistiu numa caixa de madeira impermeabilizada, com dimensões internas de 140 cm de altura, 140 cm de largura e 15 cm de comprimento.

A face frontal (140cm x 140cm) constituiu-se de uma régua de madeira, com 140cm x 10cm na parte inferior, e de uma esquadria metálica, com 140cm x 130cm, com quatro vidros iguais, de 6 mm de espessura, que possibilitaram a visualização da frente de umedecimento dos solos estudados.

A linha-fonte foi constituída de três microtubos, com as extremidades na superfície do solo, com espaçamentos de 5cm de distância, numa linha central, na direção da dimensão de 15cm.

A carga hidráulica nos microtubos foi mantida constante com a utilização de duas garrafas de Mariotte interligadas, graduadas em escala de 50 cm<sup>3</sup>.

Um lençol freático, com 300 cm de profundidade, em relação à superfície do solo, foi simulado com a colocação de quatorze velas de porcelana porosa, uniformemente distribuídas, a 5cm do fundo da caixa (Figura 1). As velas, de 15cm de comprimento e 2,5cm de diâmetro externo, tinham tampões de PVC rígido colados nas extremidades. Os tampões foram perfurados para serem conectados a duas mangueiras de plástico transparente, uma de escorva e outra de drenagem, de 0,6cm de diâmetro.

As mangueiras que mantinham pendente a coluna de água das velas foram interligadas, de modo que somente num ramo a água descia até o reservatório de nível constante, e desse para uma proveta graduada, onde as perdas de água por evaporação foram minimizadas com a colocação de cobertura plástica. Essa inter-

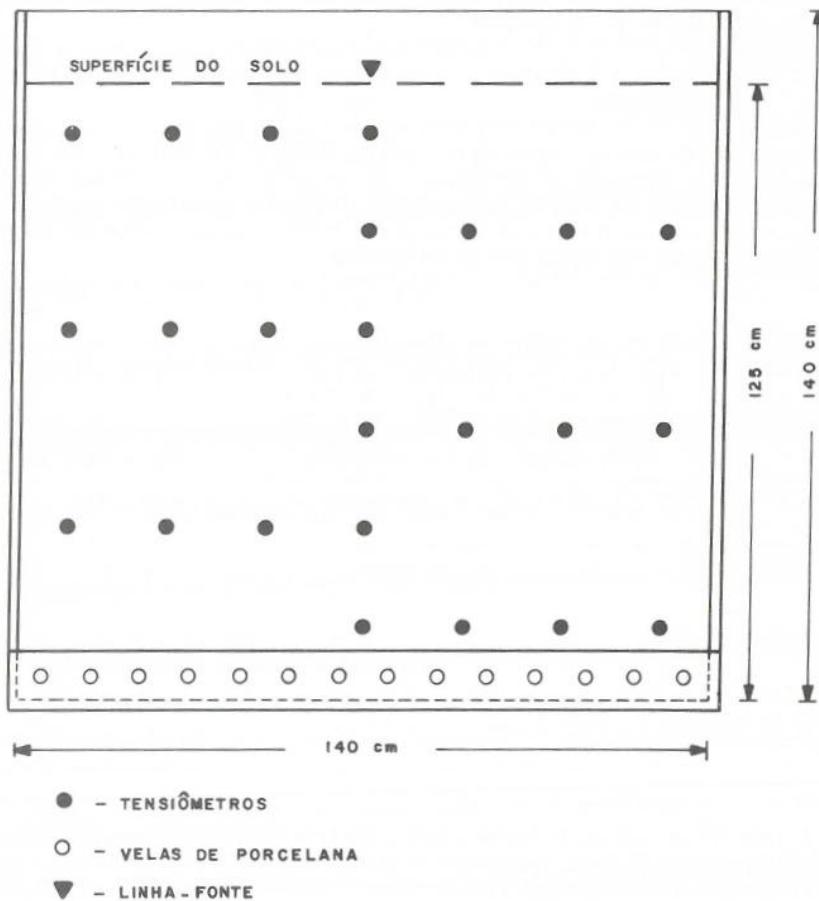


FIGURA 1 - Vista frontal do modelo de laboratório, mostrando a disposição das velas de porcelana, a distribuição dos tensiômetros e a posição da linha-fonte.

ligação das velas originou uma sucção constante do plano extrator.

A distribuição do potencial matricial foi determinada por vinte e quatro tensiômetros, usando o mercúrio como líquido manométrico. Tais tensiômetros consistiram numa cápsula de porcelana porosa, de 2,0cm de comprimento e 1,5cm de diâmetro externo, e de dois tubos de náilon, de 3,2mm de diâmetro externo.

A extremidade livre do tubo manométrico foi mergulhada em cuba de mercúrio, colocada junto a uma escala graduada em mm, o que permitiu a leitura direta da altura da coluna de mercúrio. A extremidade livre do tubo de escorva foi fechada com tampão feito de fio de cobre.

## 2.2. Localização, Amostragem e Classificação dos Materiais de Solo Usados no Experimento

A amostra de solo de Viçosa foi retirada da Horta do Fundão, próximo da rodovia Viçosa — Visconde de Rio Branco. As amostras foram retiradas de uma camada superficial de 15cm de profundidade. O solo foi classificado, preliminarmente, como Latossolo-Vermelho-Amarelo Distrófico. Os resultados da análise granulométrica do solo encontram-se no Quadro 1.

QUADRO 1 - Distribuição granulométrica e classificação textural dos solos de Viçosa e Jaíba

Solo	Distribuição granulométrica				Classificação textural
	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	
%					
Viçosa	35	13	9	43	Argila-arenosa
Jaíba	9	20	28	43	Argila

A amostra de solo de Jaíba foi retirada da área da Estação Experimental da EPAMIG, distrito de Jaíba, município de Manga, Estado de Minas Gerais. A retirada da amostra foi feita como anteriormente. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Escuro Eutrófico (1). Os resultados da análise granulométrica encontram-se no Quadro 1.

## 2.3. Colocação dos Solos e dos Tensiômetros na Caixa, Curvas de Avanço da Frente de Umedecimento e Determinação dos Valores de Potencial Matricial

As amostras de solo coletadas foram secadas ao ar, nas condições ambientais do laboratório, e passadas em peneira de 4mm de malha. Os teores de umidade (em peso) das amostras de Viçosa e Jaíba foram 15,7% e 3,3%, respectivamente.

A colocação do solo na caixa foi feita em camadas de aproximadamente 5cm (2), misturando-se cada camada com a precedente, para evitar a separação de partículas por tamanho e formar um meio homogêneo, até a altura de 125 cm.

O peso de cada camada foi determinado e corrigido para peso de solo seco em estufa. Fez-se uma ligeira acomodação do solo na caixa. As densidades aparentes finais dos solos de Viçosa e Jafba foram de 1,12 e 1,35 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente.

Os tensiômetros iam sendo colocados em posições preestabelecidas, conforme se vê na Figura 1, à medida que se enchia a caixa. Os tensiômetros, espaçados de 20cm, foram dispostos num plano central, situado entre as faces frontal e posterior da caixa. Completado o enchimento dessa, a fonte de água foi ligada, tendo início a contagem do tempo de avanço da água no perfil. As vazões da linha-fonte por unidade de comprimento (cm), mantidas constantes para cada solo, foram de  $1,94 \times 10^{-2}$  e  $1,56 \times 10^{-2} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente, para os solos de Viçosa e Jafba.

O avanço da frente de umedecimento foi acompanhado periodicamente, fazendo-se um contorno na face de vidro, no final de cada período de tempo, até o completo umedecimento do perfil. Em seguida, escorvou-se o plano extrator, iniciando-se a drenagem do excesso de água no perfil.

A superfície do solo foi coberta com plástico, para prevenir a evaporação.

O fluxo de água da fonte por unidade de comprimento da linha (cm) foi ajustado para valores menores  $1,41 \times 10^{-3}$  e  $1,64 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente, para os solos de Viçosa e Jafba, de conformidade com os fluxos usados por THOMAS *et alii* (17).

A distribuição do potencial matricial foi determinada por leituras diretas das colunas de mercúrio, feitas pela manhã, aproximadamente às 8 horas, para evitar influências da variação da temperatura na coluna de mercúrio e a formação de bolhas de ar na coluna pendente. As leituras foram precedidas de escorvas nas velas de porcelana, na tarde anterior. Esse procedimento continuou até que os fluxos de entrada e saída fossem igualados.

Os valores da coluna de mercúrio, lidos para cada ponto do solo, foram utilizados para determinar o potencial matricial, usando a expressão.

$$h = Y - 12,6(L + 0,61) \quad (1)$$

em que  $h$  é o potencial matricial (cm de água),  $Y$  a distância vertical do nível de mercúrio ao tensiômetro (cm),  $L$  a altura da coluna de mercúrio (cm), 12,6 a constante que converte leitura de coluna de mercúrio em coluna de água e 0,61 o fator de correção da interação da capilaridade do mercúrio e da água no tubo manométrico (cm de Hg).

Os valores de potencial matricial, calculados na equação 1, foram utilizados para traçar o perfil de distribuição de potencial matricial no plano xz.

A condutividade hidráulica saturada foi determinada, para os dois solos, com permeâmetros de carga constante, de acordo com a metodologia descrita por KLUTE (6).

A determinação das curvas de retenção de água no solo foi feita segundo o método da coluna de água pendente, descrito por RICHARDS (15).

#### 2.4. Modelo Matemático

A equação de continuidade para um sistema de coordenadas cartesianas, x, y, z, e para fluxo em regime permanente, derivado de uma linha-fonte de extensão infinita na direção y, é da forma

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

em que  $q_x$  e  $q_z$  são os componentes do fluxo no plano xz.

Decompondo o potencial hidráulico, H, em seus componentes matricial, h, e de posição, z, e considerando a validade da equação de Darcy e a direção, z, positiva para baixo, tem-se

$$\frac{\partial}{\partial X} \left( K(h) - \frac{\partial h}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left( K(h) - \frac{\partial h}{\partial Z} \right) - \frac{\partial K(h)}{\partial Z} = 0 \quad (3)$$

Definindo um potencial matriz de fluxo  $\phi$ , como em GARDNER (3), GILLETT (4), ALLRED (4), RAATS (14) e WARRICK (18), da forma

$$\phi = \int_{-\infty}^h K(h) dh \quad (4)$$

em que a condutividade hidráulica,  $K(h)$ , é uma função unívoca de  $h$ , de forma exponencial, isto é:

$$K(h) = K_0 e^{\alpha h} \quad (5)$$

em que  $K_0$  é a condutividade hidráulica saturada ( $\text{cm/s}$ ) e  $\alpha$  uma constante empírica que depende das características hidráulicas do solo ( $\text{cm}^{-1}$ ), a equação 3 transforma-se numa equação diferencial parcial linear, ou seja:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial Z^2} - \alpha \frac{\partial \phi}{\partial Z} = 0 \quad (6)$$

A solução da equação 6, para uma única linha-fonte, à profundidade  $D$ , é apresentada em RAATS (14):

$$\begin{aligned} \phi(X, Z) = & (q/2\pi) \left\{ \phi_\infty(X, Z-D) + \exp(-2D) \phi_\infty(X, Z+D) - \right. \\ & \left. - 2 \exp(2Z) \int_{Z+D}^{\infty} \exp(-2\xi) \phi_\infty(X, \xi) d\xi \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

em que  $q$  é o fluxo por unidade de comprimento da linha ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ),  $X = \alpha x/2$  (adimensional),  $Z = \alpha z/2$  (adimensional),  $D = \alpha d/2$  (adimensional),  $x$  e  $z$  são coordenadas reais ( $\text{cm}$ ),  $d$  é a profundidade da linha-fonte ( $\text{cm}$ ),  $\xi$  é uma variável «dummy» de integração e  $\phi_\infty$  é o potencial matriz de fluxo em um meio infinito, que, segundo PHILIP (10, 12), é

$$\phi_\infty(X, Z) = (q/2\pi) \exp(Z) Y_0(X^2 + Z^2)^{1/2} \quad (8)$$

em que  $Y_0$  é uma função Bessel modificada, de segunda espécie e ordem zero.

A generalização da equação 7 para um número infinito de linhas-fontes, paralelas e localizadas em  $X_1, X_2, \dots, X_j$ , está em LOMEN e WARRICK (7):

$$\phi_n = \sum_{j=1}^{\infty} \phi_L(X - X_j, Z, T) \quad (9)$$

em que  $\phi_n$  é o potencial matriz de fluxo para um número n de linhas.

O potencial matricial,  $h$ , foi calculado a partir dos valores de  $\phi$  obtidos nas equações 7 e 9 pela relação

$$h = \ln(\alpha\phi/K_0) / \alpha \dots \quad (10)$$

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **3.1. Curvas de Avanco da Frente de Umedecimento**

As curvas de avanço da frente de umedecimento, para os solos de Viçosa e Jaíba, encontram-se na Figura 2.

Para o solo de Viçosa, vê-se que o efeito da gravidade sobre as curvas foi predominante ao da capilaridade, resultando num perfil de umedecimento mais alongado no sentido vertical. Isso se deve, provavelmente, ao seu alto teor de areia, 48%, sendo maior a porcentagem de areia grossa, e ao diâmetro dos agregados estáveis contidos nesse solo, em relação ao de Jaíba. Tanto a porcentagem de areia quanto o tamanho dos agregados estáveis contribuíram para maior porcentagem de macroporosidade do solo, seguindo-se, assim, um elevado valor de condutividade hidráulica saturada, igual a  $109 \text{ cm dia}^{-1}$ , quando comparado com o do solo de Jaíba,  $12 \text{ cm dia}^{-1}$ . Esses parâmetros contribuíram para que a condutividade hidráulica não saturada também atingisse valores elevados para altos valores de  $h$  (Figura 3), favorecendo o movimento vertical descendente da água no perfil do solo.

No solo de Jaiba, com 43% de argila e 28% de silte, ao contrário do anterior, o efeito da força de capilaridade foi elevado, resultando na formação de um perfil molhado, de dimensões horizontais e verticais bastante próximas (Figura 2 b.).

Ao analisar, conjuntamente, as curvas de avanço dos dois solos, vê-se que o tempo para atingir o fundo da caixa foi bem maior para o solo de Jafba. O curto espaço de tempo para o solo de Viçosa provavelmente se deve a maiores valores da condutividade hidráulica não saturada, para altos valores de potencial matricial, à menor capacidade de retenção de água (Figura 4) e à umidade inicial mais elevada (15,7%), em comparação com a do solo de Jaíba, que foi de 3,3%.

### *3.2. Valores de Potenciais Matriciais Medidos e Estimados*

Os valores de potencial medidos nos solos de Viçosa e Jaíba foram lidos em altura de coluna de mercúrio e transformados em coluna de água pela equação 1. Os valores estimados foram computados a partir das equações 7, 9 e 10, utilizando-se um programa escrito em FORTRAN IV.

A equação 7 é muito sensível a mudanças nos valores de  $\alpha$ , e o melhor valor desse parâmetro, para cada solo, foi determinado por meio de teste, na solução matemática, de diversos valores desse parâmetro para valores de condutividade hidráulica saturada e de vazão da linha-fonte dos dois solos, um de cada vez, obtendo-se os valores estimados de potencial matricial para os mesmos pontos em que foram medidos. Os valores de potencial matricial estimados foram comparados com os valores medidos, até que se conseguisse a melhor aproximação entre eles.

Para o solo de Viçosa, o valor de  $\alpha$  que melhor ajustou os valores estimados do potencial matricial aos valores medidos foi  $0,18 \text{ cm}^{-1}$ ; para o solo de Jaíba,  $0,06 \text{ cm}^{-1}$ . Esses valores foram maiores que os relatados por PHILIP (13) e GILLETT e

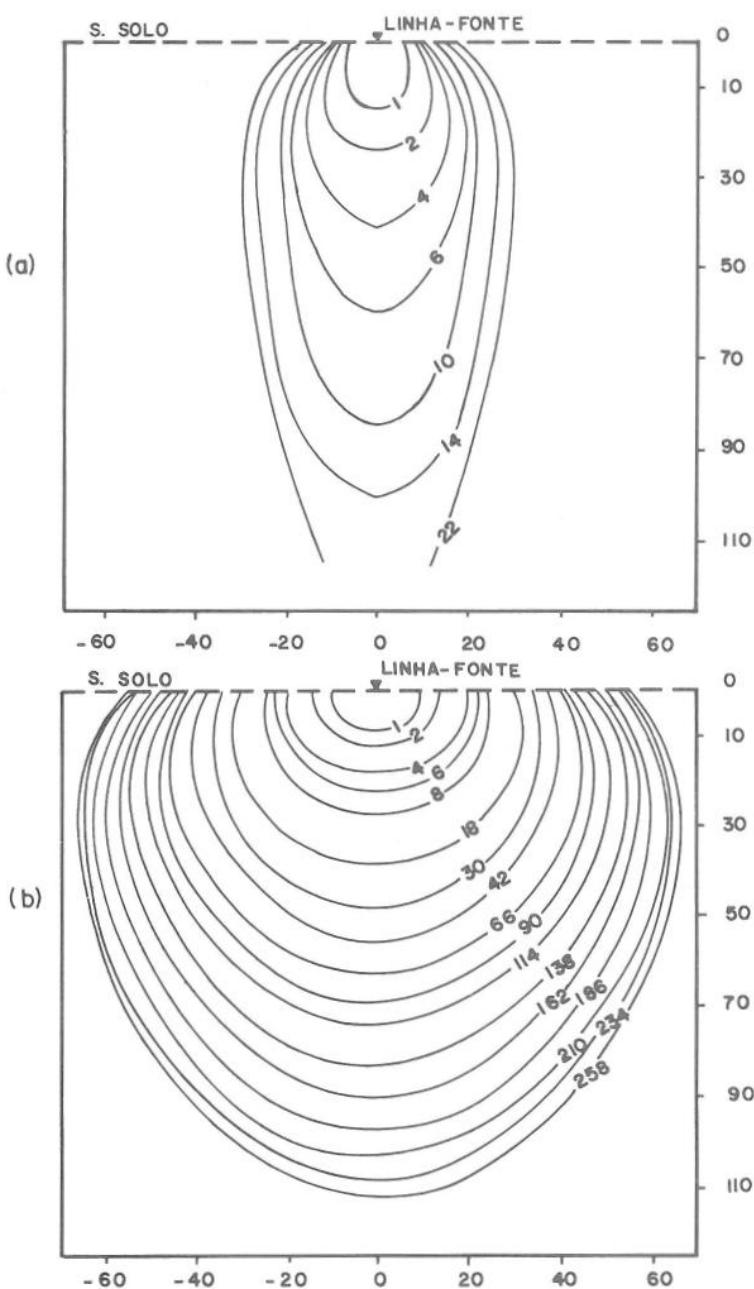


FIGURA 2 - Curvas de avanço da frente de umedecimento, em horas, para os solos de (a) Viçosa e (b) Jaíba, usando-se simetria bilateral.

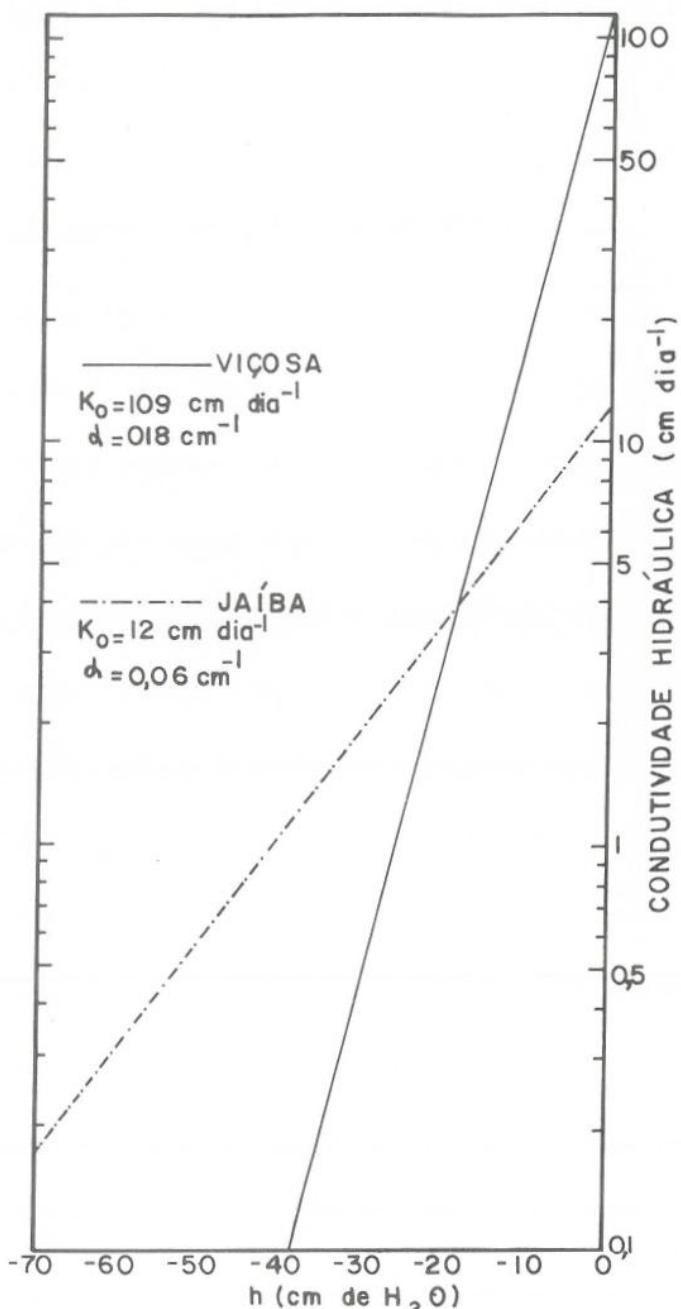
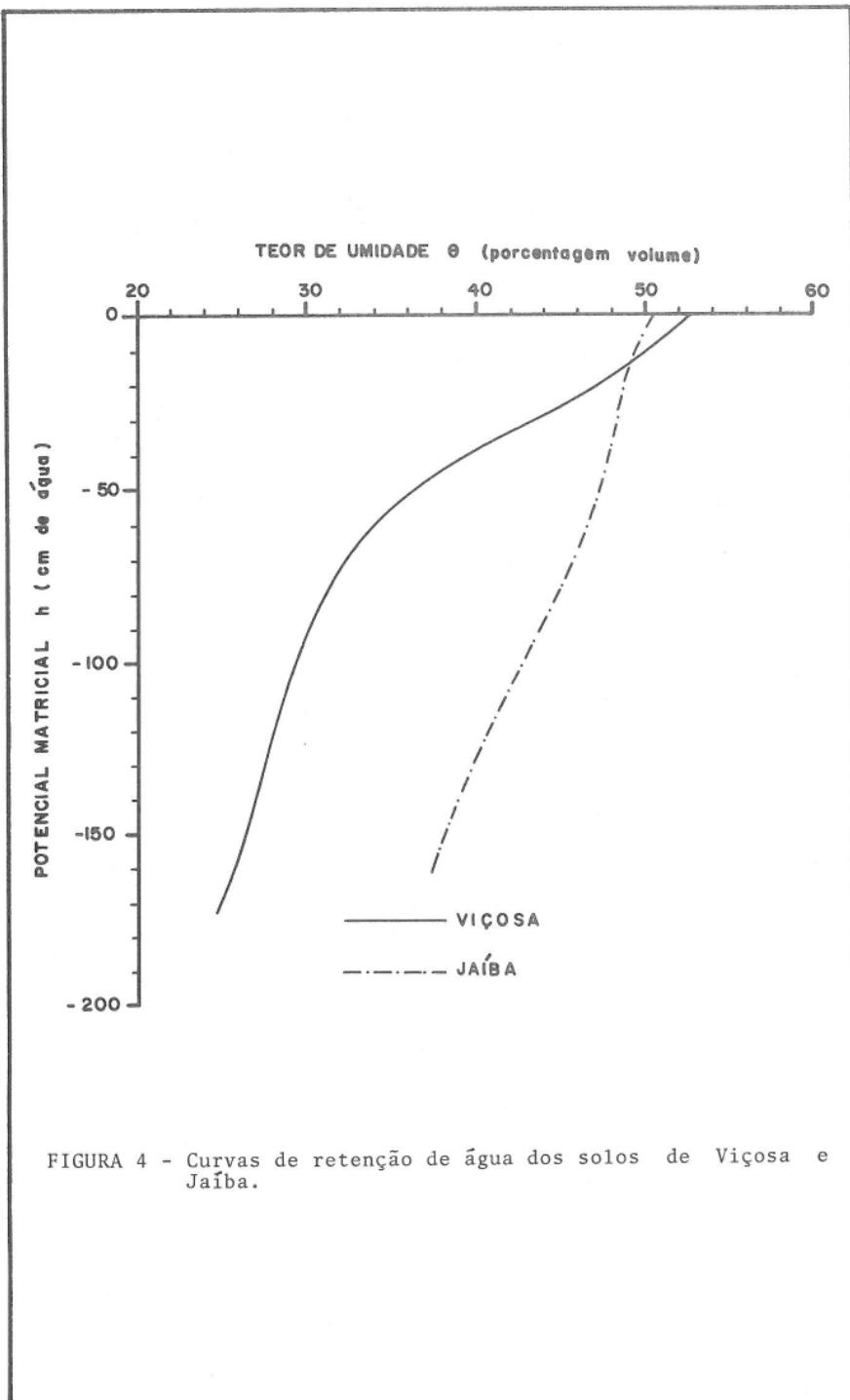


FIGURA 3 - Relação entre a condutividade hidráulica ( $K$ ) e o potencial matricial ( $h$ ), para os solos de Viçosa e Jaíba.



ALLRED (4). Todavia, com respeito à textura, os valores ajustados mostram-se coerentes com os de tais autores, isto é, o solo de Viçosa, que tem maior porcentagem de areia, apresentou valor de  $\alpha$  superior ao de Jaíba, que tem maior porcentagem de silte, embora tenham a mesma quantidade de argila.

O valor de  $\alpha$  que mais diferiu dos valores usados pelos referidos autores foi o do solo de Viçosa, estando o valor 0,18 cm<sup>-1</sup> acima da amplitude de valores por eles mencionada para solos dessa classe textural. Isso se deve, provavelmente, à grande porcentagem de areia grossa e ao maior diâmetro dos agregados granulares presentes, que condicionaram alta porcentagem da macroporosidade, elevando o valor de  $\alpha$ .

A relação entre a condutividade hidráulica e o potencial matricial está representada em papel semi-logarítmico, para os dois tipos de solo, conforme se vê na Figura 3. A condutividade hidráulica do solo de Viçosa, em comparação com a do solo de Jaíba, decresceu mais profundamente com os valores de  $h$ , a partir do ponto de saturação. Isso ocorreu, provavelmente, graças ao fato de a seção transversal útil para o fluxo ter decrescido rapidamente, de acordo com o potencial matricial, evidenciando a grande porcentagem de macroporosidade.

Os valores de potenciais matriciais dos dois solos, medidos e estimados, foram utilizados para traçar curvas de eqüipotencial matricial para a região de fluxo estudada (Figuras 5 e 6).

O formato e a disposição das linhas de eqüipotenciais matriciais para valores medidos e estimados, dos dois solos, assemelham-se, para a região de fluxo estudada. Observa-se que, para os valores medidos, as curvas são mais achatadas que para os valores estimados, sendo esse achatamento mais pronunciado no solo de Jaíba. Esse efeito, possivelmente, decorreu da uniformidade de valores de potencial ao longo das velas de porcelana que formaram o plano extrator. THOMAZ *et alii* (17) também observaram esse efeito e admitiram que o achatamento pode ser resultado da influência da sucção constante produzida pelas velas de porcelana no fundo da caixa de solo.

A comparação entre os valores de potencial matricial medidos e estimados, para o solo de Viçosa, mostrou que a diferença relativa entre eles foi menor que 10%, para mais de 70% da região de fluxo próxima da linha-fonte, sendo que, mais próxima à linha-fonte, o ajustamento do modelo aos valores experimentais foi quase perfeito. Na região próxima do plano extrator, as diferenças observadas foram de 10 a 14%. Apenas nos pontos situados a mais ou menos 60 cm da fonte e a 10 cm de profundidade tal diferença atingiu 20%.

A comparação entre valores de potencial matricial medidos e estimados, para o solo de Jaíba, mostrou que, para 50% da região de fluxo, as diferenças foram menores que 10%, ocorrendo, semelhantemente ao caso anterior, diferenças mínimas na região próxima da linha-fonte. Para o restante da região de fluxo, os valores estiveram em torno de 15%; próximo do plano extrator, as diferenças foram em torno de 100%. Embora as previsões para o solo de Jaíba sejam piores que as alcançadas com o solo de Viçosa, elas apresentaram ainda melhores aproximações que as relatadas por THOMAS *et alii* (17).

GILLEY e ALLRED (4) mostraram que, para solos de textura fina, a correlação entre a condutividade hidráulica medida em condições de campo e a estimada pela relação exponencial é menor que a dos solos de textura grossa. Esta pode ser, provavelmente, uma hipótese válida para explicar as maiores diferenças observadas entre o potencial matricial medido e o estimado para o solo de Jaíba, quando comparado ao de Viçosa. A análise das Figuras 5 e 6 mostra que as maiores diferenças entre potenciais medidos e estimados ocorreram na região de fluxo próxima das velas de porcelana. Essas diferenças se devem à tendência de acanamento do solo, com consequente aumento da densidade aparente de acordo com a profundidade, à estimativa da condutividade hidráulica em função do potencial matricial e ao fato de a condição de contorno no fundo da caixa não ser bem simu-

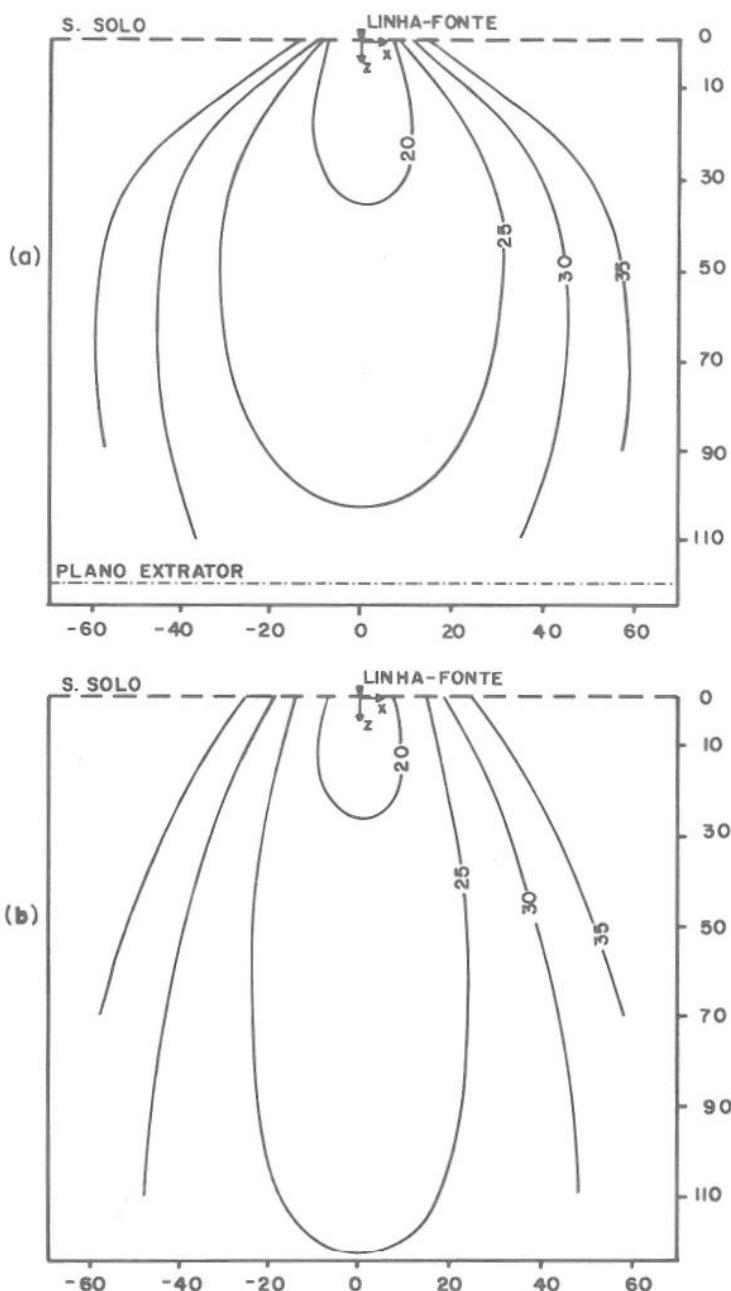


FIGURA 5 - Curvas de equipotencial matricial  $h$  (-cm de água) para o solo de Viçosa, usando-se simetria bilateral: a) valores medidos e b) valores estimados.

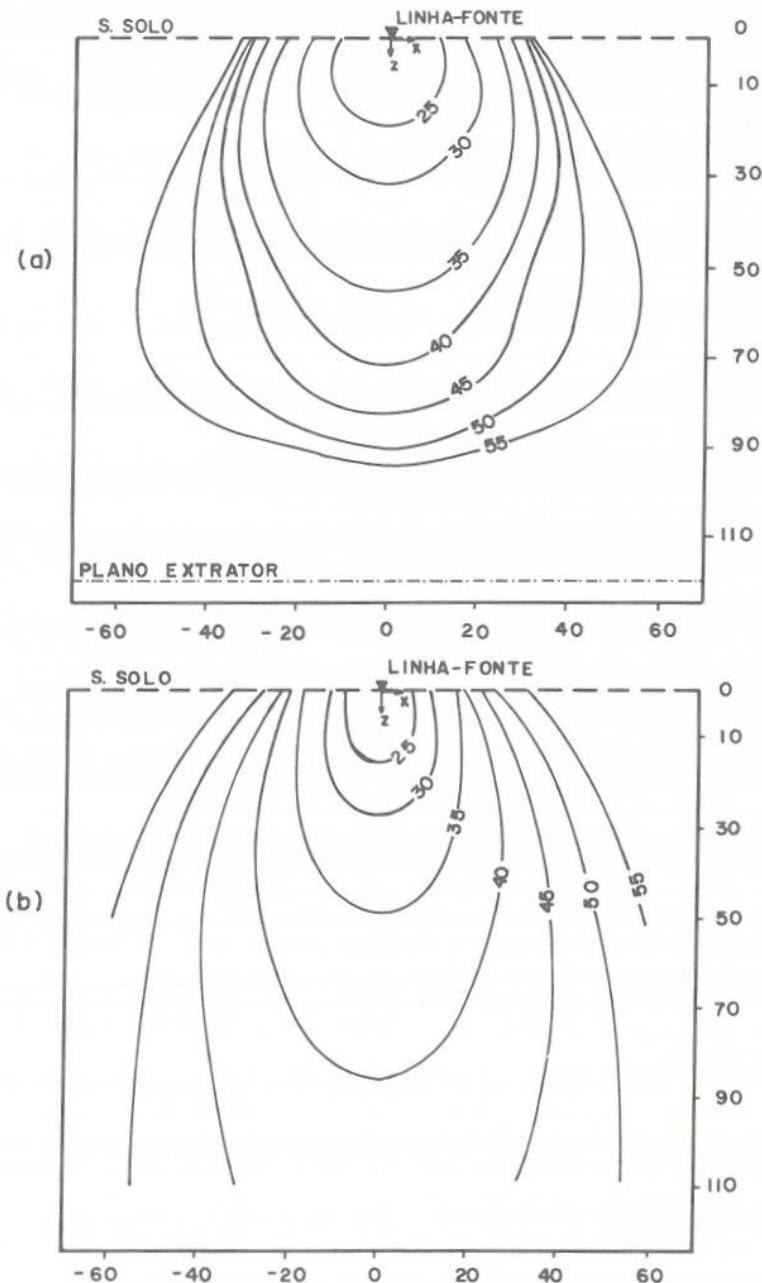


FIGURA 6 - Curvas de equipotencial matricial  $h$  (-cm de água) para o solo de Jaíba, usando-se simetria bilateral: a) valores medidos e b) valores estimados.

lada pela solução matemática.

Utilizando as equações 7, 8, 9 e 10 e as curvas características apresentadas na Figura 4, e desconsiderando a evaporação na superfície do solo, a distribuição do potencial matricial,  $h$  (-cm de água), e da umidade,  $\theta$  (% em volume), para os dois solos, foi estimada para uma região de fluxo situada entre duas linhas-fonte, localizadas na superfície do solo. Os resultados encontram-se nas Figuras 7 e 8, respectivamente, para os solos de Viçosa e de Jaíba.

Essa simulação mostra a distribuição do potencial matricial e do teor de umidade esperados para solos que apresentam características físicas semelhantes às dos solos estudados, numa irrigação de pré-plantio, sendo a evaporação negligenciada. Os espaçamentos utilizados entre linhas-fonte foram 80, 100 e 120 cm.

A forma e a distribuição das linhas de eqüipotenciais matriciais variaram sensivelmente nos dois solos, para os espaçamentos usados.

Na distribuição da umidade, o efeito do espaçamento entre as linhas foi mais evidente no solo de Viçosa (Figura 7), principalmente em razão da menor capacidade de retenção de água a potenciais matriciais mais baixos, em comparação ao de Jaíba, para meio isotrópico. Isso demonstra que o espaçamento entre linhas de irrigação depende da capacidade de retenção de água e não das classes texturais, como se tem generalizado, pois, embora os dois solos tenham o mesmo teor de argila, o de Jaíba retém maior quantidade de água, graças à porcentagem mais elevada de silte, 28%, e ao melhor balanceamento dos tamanhos dos poros, conferido pela boa distribuição dos componentes texturais.

A mudança no espaçamento de 80 para 120 cm pouco alterou a distribuição da umidade no perfil do solo de Jaíba.

#### 4. RESUMO

Valores de potencial matricial foram medidos num Latossolo Vermelho-Amarelo, de Viçosa, Minas Gerais, e num Latossolo Vermelho-Escuro Eutrófico, de Jaíba, Minas Gerais, utilizando um modelo de laboratório. Os valores medidos foram comparados com os valores de potencial matricial estimados por soluções linearizadas da equação diferencial de fluxo de água no solo, em duas dimensões e regime permanente, estabelecendo-se características hidrodinâmicas dos dois solos pelo ajustamento do modelo matemático usado aos dados experimentais.

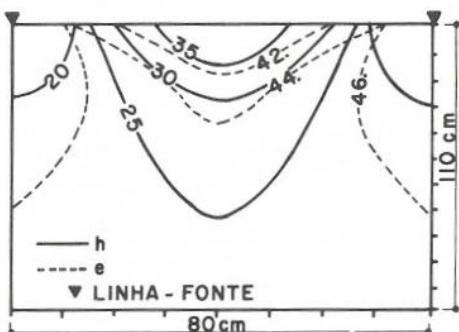
Verificou-se que, para o Latossolo Vermelho-Amarelo, que apresentou maior porcentagem de areia, 48%, embora apresentasse a mesma quantidade de argila do Latossolo Vermelho-Escuro Eutrófico, 43%, o modelo matemático usado foi bastante eficaz na simulação da distribuição do potencial matricial, sendo que, para mais de 70% da região de fluxo estudada, a discrepância entre valores medidos e estimados foi menor que 10%, quando se usou o valor do parâmetro empírico do solo,  $\alpha$ , igual a  $0,18\text{cm}^{-1}$ , e o da condutividade hidráulica saturada,  $K_0$ , igual a  $109\text{ cm dia}^{-1}$ .

Para o Latossolo Vermelho-Escuro Eutrófico, que apresentou 28% de silte e 29% de areia, a descrição matemática da distribuição do potencial matricial não foi tão eficaz, pois em apenas 50% da região de fluxo as diferenças entre potenciais medidos e estimados foram menores que 10%, fazendo-se o parâmetro empírico do solo,  $\alpha$ , e a condutividade hidráulica saturada,  $K_0$ , iguais a  $0,06\text{ cm}^{-1}$  e  $12\text{ cm dia}^{-1}$ , respectivamente.

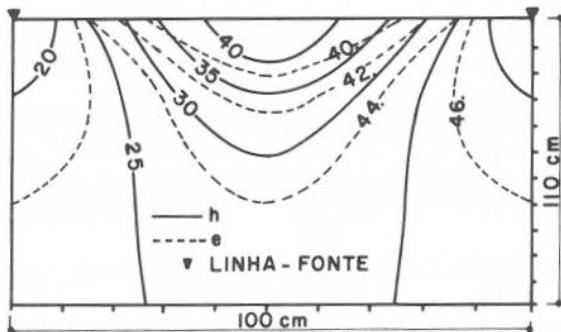
Nos dois solos, a região de fluxo mais próxima à linha-fonte teve melhor previsão para os valores de potencial matricial. A pior aproximação entre os valores medidos e estimados deu-se na região próxima ao fundo, onde se localizavam as velas de porcelana, que formaram o plano extrator, sob carga constante.

A distribuição do potencial matricial, para os espaçamentos entre linhas-fonte de 80, 100 e 120 cm, quando se desconsiderou a evaporação, mostrou-se bastante sensível às características hidráulicas dos solos ( $\alpha$  e  $K_0$ ), e a distribuição do teor

(a)



(b)



(c)

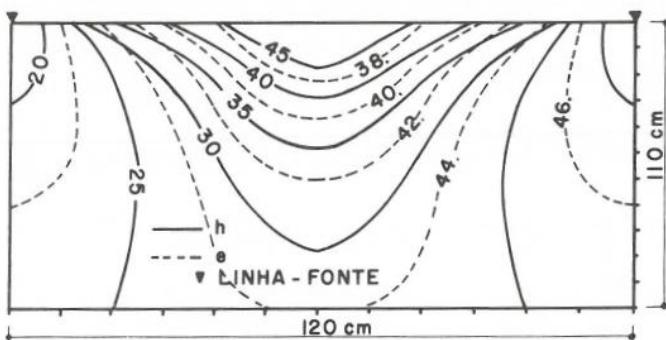


FIGURA 7 - Distribuição de potencial matricial  $h$  (-cm de água) e do teor de umidade  $\theta$  (porcentagem volume), esperados no solo de Viçosa, para espaçamento entre linhas-fonte de: (a) 80 cm, (b) 100 cm e (c) 120 cm.

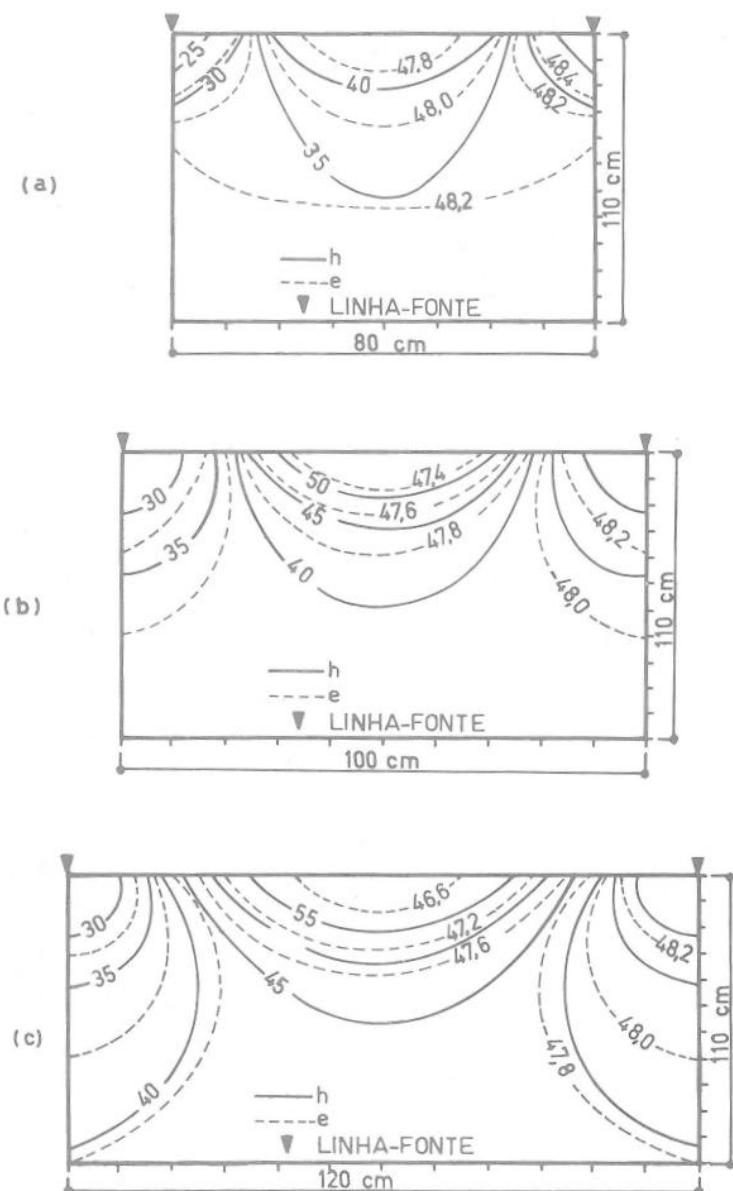


FIGURA 8 - Distribuição de potencial matricial  $h$  (-cm de água) e do teor de umidade  $\theta$  (porcentagem volume), esperados no solo de Jaíba, para espaçamento entre linhas-fonte de: (a) 80 cm, (b) 100 cm e (c) 120 cm.

de umidade no perfil do solo dependeu mais da capacidade de retenção de água.

### 5. SUMMARY

Steady soil water flow from line sources was analysed using a linearized form of the moisture flow equation. Both single and parallel line sources at the soil surface were considered.

Calculated distribution of capillary potentials were compared with those measured in a soil bin designed to model the soil water distribution from a surface irrigation system. When comparing the measured and calculated distribution of capillary potential, it was found that in most regions of the soil mass, the calculated capillary potentials were within 10% of the measured values.

Simulation of the distribution of the capillary potential and soil moisture content for three different line source spacings are given.

### 6. LITERATURA CITADA

1. EMBRAPA — EPAMIG — RURALMINAS. *Levantamento de reconhecimento com detalhes dos solos do Distrito Agroindustrial de Jaíba — Minas Gerais*. Belo Horizonte, Empresa de Pesquisas Agropecuárias de Minas Gerais, 1976. 242 p. (Boletim Técnico n.º 54).
2. FERREIRA, P.A. *Evapotranspiration and soil matric potentials using tension irrigation*. University of Arizona, 1977. 97p. (Tese de Ph.D.).
3. GARDNER, W.R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.*, 85: 228-232. 1958.
4. GILLEY, J.R. & ALLRED, E.R. Infiltration and root extraction from sub-surface irrigation laterals. *Transactions of the Am. Soc. of Agric. Eng.*, 17:927-933. 1974.
5. HILLEL, D., KRENTOS, V.D. & STYLIANOU, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. *Soil Sci.*, 114:395-400. 1972.
6. KLUTE, A. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil. In: Black, C.A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, American Soc. of Agron., 1965. p. 253-261.
7. LOMEN, D.O. & WARRICK, A.W. Time-dependent linearized infiltration: II. Line sources. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 38:568-572. 1974.
8. LUTHIN, J.N. *Drainage Engineering*. 2 ed. Huntington, Robert E. Krieger Publishing Co., 1973. 250 p.
9. NIELSEN, D.R., BIGGAR, J.W. & ERH, K.T. Spatial variability of field-measured soil-water properties. *Hilgardia*, 42:215-260. 1973.
10. PHILIP, J.R. Steady infiltration from buried point-sources and spherical cavities. *Water Resour. Res.*, 4:1039-1057. 1968.
11. PHILIP, J.R. Theory of infiltration. *Adv. Hydroscience*, 5:215-296. 1969.

12. PHILIP, J.R. General theorem steady infiltration from surfaces sources, with application to point and line sources. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34:709-714. 1970.
13. RAATS, P.A.C. Steady infiltration from line sources and furrows. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34:709-714. 1970.
14. RAATS, P.A.C. Steady infiltration from sources at arbitrary depth. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 36:339-401. 1972.
15. RICHARDS, L.A. Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Sci.*, 68: 95-112. 1949.
16. THOMAS, A.W., KRUSE, E.G. & DUKE, H.R. Steady infiltration from line sources buried in soil. *Transactions of the Am. Soc. Agric. Engr.*, 17:125-128. 1974.
17. THOMAS, A.W., DUKE, H.R., ZACHMANN, D.W. & KRUSE, E.G. Comparisons of calculated and measured capillary potentials from line sources. *Soil Sci. Soc. Am. Journal*, 40:10-14. 1976.
18. WARRICK, A.W. Time-dependent linearized infiltration: I. Point sources. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 38:383-386. 1974.
19. WARRICK, A.W. Solution to the one-dimensional linear moisture flow equation with water extraction. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 38:573-576. 1974.
20. ZACHMANN, D.W. & THOMAS, A.W. A mathematical investigation of steady infiltration from line sources. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37:495-500. 1973.