



Avaliação de equações de drenagem para regime não permanente em condições de laboratório



Sérgio N. Duarte¹, Décio E. Cruciani², Denis C. Cararo³, Karina S. Passos⁴ & Aleksandro D.V. Lopes⁴

¹ ESALQ/USP, Av. Pádua Dias 11, CEP 13418-900, Piracicaba, SP. Fone: (19) 429-4217, Fax: (19) 433-0934. E-mail: snduarte@carpa.ciagri.usp.br (Foto)

² ESALQ/USP. Fone: (19) 429-4217. E-mail: cruciani@carpa.ciagri.usp.br

³ ESALQ/USP. Fone: (19) 429-4217. E-mail: dccararo@carpa.ciagri.usp.br

⁴ ESALQ/USP. Fone: (19) 429-4217. E-mail: karinapassos@icqmail.com; advlopes@carpa.ciagri.usp.br

Protocolo 095 - 14/08/2000

Resumo: Na drenagem agrícola, os drenos são instalados, geralmente, sobre a camada impermeável ou a certa distância acima desta. A profundidade de instalação dos drenos e a do perfil, a condutividade hidráulica e a porosidade drenável são parâmetros de importância no cálculo do espaçamento de drenos. Diversas equações são sugeridas para o cálculo deste espaçamento, porém não há uma única equação que se adapte bem a todas as situações. Este trabalho foi desenvolvido no Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz/USP", utilizando-se um modelo reduzido para simulações, preenchido com areia, com o objetivo de definir a equação mais apropriada quando os drenos são instalados em duas situações distintas, ou seja, sobre uma camada impermeável ou acima desta. A partir de ensaios de vazão e de carga hidráulica em condições de regime permanente, pode-se estimar a condutividade hidráulica pela fórmula de Ernst. Em uma segunda fase e se medindo o volume de água drenado, determinou-se a porosidade drenável. Posteriormente, realizando-se ensaios sob condições de regime não-permanente, compararam-se os dados medidos com os estimados pelas fórmulas de Boussinesq-Glover, Schilfgaard, Glover-Dumm, Terzidis, Hammad, Kirkham e Glover, cujos resultados indicaram que a melhor fórmula a ser utilizada na condição em que os drenos se localizam sobre a camada impermeável, é a de Boussinesq-Glover; já para o caso em que estes estão instalados acima da camada impermeável, a equação de Schilfgaard, seguida pela equação de Glover-Dumm, foi a que apresentou melhor desempenho.

Palavras-chave: drenos, equações, modelo reduzido

Evaluation of drainage equations for non permanent state in laboratory conditions

Abstract: In drainage for agriculture the field drains are usually located over the impermeable layer, or at a certain distance above it when the layer is at a great depth. The depth of installation of the drains, the depth of the profile, the hydraulic conductivity and the drainable porosity are parameters of fundamental importance in the calculation of the drain spacing. Several equations are suggested for the calculation of this spacing. However, there is not a single equation that adapts well to all the situations found in the field. This work was conducted at the Drainage Laboratory belonging to the Rural Engineering Department of the Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP, Brazil, using a reduced hydrologic model filled with sand, with the objective of defining the most appropriate equation in two different situations: when the drains are installed on or above an impermeable layer. Tests of flow (recharge) and hydraulic head (level of the water-table) under steady state conditions allowed the determination of the hydraulic conductivity using the Ernst formula. In a second stage, measuring the volume of water drained from the soil, the drainable porosity were determined. Later on, measuring the flow and water-table depth under conditions of non permanent state, the measured data were compared with those estimated by the formulas of Boussinesq-Glover, Schilfgaard, Glover-Dumm, Terzidis, Hammad, Kirkham and Glover. The results indicated that the best spacing formula for drains to be used under conditions where the same are located over the impermeable layer is that of Boussinesq-Glover. On the other hand, when drains are located above the impermeable layer the Schilfgaard equation followed by the Glover-Dumm equation gave the better results.

Key words: drains, equations, reduced model

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por alimentos, a procura por terras agricultáveis e por técnicas que viabilizem a exploração agrônômica e econômica de áreas com problemas ocasionados pelo excesso de água no solo, são algumas razões que justificam o uso da drenagem. Nas últimas décadas vêm sendo executados projetos de drenagem agrícola na região Sudeste do Brasil objetivando-se, em geral, incorporar várzeas úmidas de pequena extensão ao processo produtivo, a partir da retificação ou limpeza dos cursos d'água adjacentes, sistematização do solo e implantação de drenos abertos (Duarte, 1996). Segundo Antonini (1989), a possibilidade de utilização de drenos tubulares em áreas agrícolas, apresentam grande potencial. Conforme Coelho (1984) o uso de drenos tubulares possui a vantagem de não ocupar área de plantio e não interferir no manejo de solo e plantas, embora seja um sistema de maior custo de implantação, em relação aos drenos abertos.

O dimensionamento de um sistema de drenagem com drenos tubulares inclui a relação entre a carga hidráulica (h) no semi-espaçamento entre os drenos e a distância entre eles (L). As fórmulas desenvolvidas para a determinação de L baseiam-se no movimento da água no solo, caracterizado por duas situações, em que a primeira considera este movimento em condições em que não há variação do valor do potencial total em dado ponto, isto é, regime de escoamento permanente e a segunda leva em conta o movimento em condições em que ocorre variação do potencial total com o tempo, ou seja, regime de escoamento não permanente (Millar, 1978; Pizarro, 1978; Cruciani, 1986; Beltrán, 1986; Ferreira, 1986).

Coelho (1984) afirma que a caracterização das principais propriedades físicas do solo é de grande importância no dimensionamento de sistemas de drenagem e em qualquer pesquisa relativa a esta área, dentre as quais se destacam a condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) e a porosidade drenável (μ), que podem ser determinadas por diferentes métodos (Luthin, 1973; Millar, 1978; Pizarro, 1978; Cruciani, 1986) e se constituem em dados de entrada para as fórmulas pelas quais se determina o espaçamento entre drenos; no entanto, há que se ressaltar que, dentre essas fórmulas, existem algumas que se ajustam melhor a certas condições geométricas do perfil, como no caso de drenos localizados junto à camada impermeável. Albuquerque (1982) afirma, com base em seus resultados, que há melhor eficiência da equação de Boussinesq-Glover, nestas condições.

Visando verificar o grau de adequação de cada fórmula, muitos autores procuraram estudar a teoria da drenagem em condições de campo ou de laboratório (Hoover & Schwab, 1969; Perrier et al., 1972; Luthin, 1973; Albuquerque, 1982; Prata Filho, 1982; Coelho, 1984); no entanto, existem ainda dúvidas em relação a qual equação utilizar, dentre as muitas propostas. Considerando-se o movimento permanente, destacam-se as de Hooghoudt e Ernst (Pizarro, 1978) e, para o não permanente, as de Glover-Dumm (Pizarro, 1978), Glover, Boussinesq-Glover, Hammad (Schilfgaard, 1974), Tapp-Moody, Schilfgaard e Kirkham (Albuquerque, 1982).

Este trabalho tem o objetivo de avaliar o desempenho de várias equações para estimativa do espaçamento entre drenos, em regime não-permanente, verificando-se quais as que

forneçam valores de posição do lençol freático que mais se aproximam dos dados observados. Para tal, utilizaram-se um modelo reduzido em laboratório e duas situações experimentais: drenos tubulares situados imediatamente sobre a camada impermeável e drenos tubulares localizados acima da camada impermeável.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi conduzido no Laboratório de Drenagem, localizado no Departamento de Engenharia Rural, pertencente à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, em duas etapas.

Primeira etapa

Realizaram-se adaptações em uma unidade reduzida de estudo hidrológico (Modelo H117D fabricado pela empresa Didacta Italia) conforme visualizado na Figura 1. As adaptações consistiram da troca dos emissores de água, de microaspersores para gotejadores e da instalação de dois drenos subterrâneos.

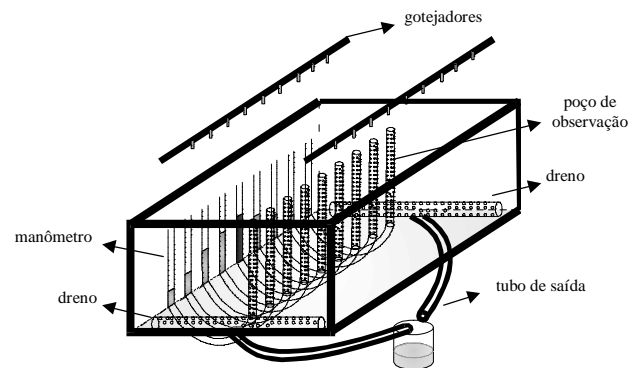


Figura 1. Unidade reduzida para estudos hidrológicos adaptado para a realização dos ensaios de drenagem, na primeira etapa

Inicialmente, confeccionaram-se os drenos reduzidos de plástico perfurado, com 1,5 cm de diâmetro externo e 60 cm de comprimento, revestidos com bidim OP-30, dispostos no fundo do reservatório. Instalaram-se onze poços de observação verticais espaçados a 0,16 m, conectados ao fundo do modelo reduzido, visando monitorar o nível do lençol freático. Preencheu-se o reservatório, cujas dimensões são 0,6 x 1,80 x 0,40 m (largura, comprimento e altura, respectivamente) com areia muito fina, passada em peneira de 0,5 mm, até uma profundidade de 0,24 m.

Realizaram-se 16 ensaios em regime permanente, simulando-se diferentes recargas, utilizando-se gotejadores distribuídos acima da areia. Foram utilizadas duas linhas com 9 gotejadores de fluxo turbulento (marca Carborundum), espaçados 0,16 m. Mediram-se as alturas do lençol freático no poço de observação central e os respectivos volumes coletados nos drenos durante períodos de 15 min. Uma vez determinadas as recargas, dividindo-se os valores da soma das vazões escoadas nos dois drenos pela área do fundo do reservatório (1,08 m²) foi possível estimar-se a condutividade hidráulica (K) a partir da fórmula de Ernst para escoamento vertical e horizontal, apresentada na Eq. 1, para a condição de drenos tubulares localizados sobre a

camada de impedimento, em solo homogêneo, conforme Pizarro (1978).

$$h = \frac{R h}{K} + \frac{R L^2}{8 K D} \quad (1)$$

em que:

- h - altura do lençol freático sobre o plano localizado na linha dos drenos na posição de seu semi-espacamento, m
- R - recarga, m d⁻¹
- L - espaçamento entre drenos, m
- D - distância média do lençol freático à camada de impedimento, m

Na Eq. 1 adotou-se a simplificação de se considerar D = h/2, conforme sugerido por Schilfgaard (1974), para drenos assentados sobre a camada impermeável. Ela pode ser reescrita, apresentando-se conforme as Eqs. 2 e 3.

$$R = K_0 f(h) \quad (2)$$

em que:

$$f(h) = \frac{4 h^2}{(4 h^2 + L^2)} \quad (3)$$

Assim, plotando-se os valores de R em função de f(h) e forçando a reta de regressão a passar pela origem, o coeficiente angular da reta de regressão passa a representar o valor de K₀.

A fim de se conhecer a porosidade drenável (μ) da areia colocada no reservatório, realizaram-se 16 ensaios em que se mediu o volume de água escoado pelos drenos e a respectiva variação da posição do lençol freático. A porosidade drenável foi obtida dividindo-se o volume de água drenado pelo volume total de solo. A partir desse teste, calculou-se o valor médio e o coeficiente de variação dos valores determinados.

Em seguida, realizaram-se 5 testes de rebaixamento do lençol freático, de 22 cm até 7 cm acima do fundo do modelo e se anotaram os tempos correspondentes às posições intermediárias em intervalos de 1 cm, em que os valores considerados corresponderam à média desses 5 testes; posteriormente, utilizando-se os dados de K₀ e μ obtidos nas primeira e segunda fases, simularam-se rebaixamentos do lençol freático a partir da posição h₀ = 22 cm. As fórmulas utilizadas foram as de Boussinesq-Glover, Glover-Dumm, Schilfgaard, Terzidis, Hammad, Kirkham e Glover, conforme apresentadas nas Eqs. 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10, onde a variável ht foi colocada em evidência.

$$ht = \frac{2 h_0 \mu L^2}{9 K_0 t h_0 + 2 \mu L^2} \quad (4)$$

em que:

- ht - altura do lençol freático sobre o plano localizado na linha dos drenos na posição de seu semi-espacamento, após o rebaixamento, m
- h₀ - altura inicial do lençol freático sobre o plano localizado na linha dos drenos na posição de seu semi-espacamento, m
- μ - porosidade drenável, decimal
- t - tempo, d

$$ht = \frac{1,16 h_0}{e \frac{\pi^2 K_0 D t}{\mu L^2}} \quad (5)$$

$$ht = \frac{2 h_0 D}{\left(e \frac{9 K_0 D t}{\mu L^2} (2 D + h_0) - h_0 \right)} \quad (6)$$

$$ht = D \ln \left(1 - \frac{4 \left(1 - e^{-\frac{h_0}{D}} \right)}{\frac{\pi^2 K_0 D t}{\mu L^2}} \right) \quad (7)$$

$$ht = \frac{h_0}{\left(\frac{2 \pi K_0 t}{e^{\mu L \ln \left(\frac{L^2}{2 \pi^2 r D} \right)}} \right)} \quad (8)$$

em que:

- r - raio do dreno, m

$$ht = \frac{h_0}{\frac{K_0 t}{(e^{1,16 L \mu})}} \quad (9)$$

$$ht = \frac{4 h_0}{\frac{\pi^2 K_0 D t}{(\pi e^{\mu L^2})}} \quad (10)$$

Nessas equações também foi adotada a simplificação de se considerar D = h₀/2.

Finalmente, os valores das sucessivas posições do lençol freático (ht) simulados foram comparados com os valores medidos.

Para se avaliar o desempenho de cada equação de regime não permanente, calcularam-se os erros padrões (Eq. 11) entre os valores observados e calculados, além de representá-los graficamente.

$$e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (hm(i) - hc(i))^2}{N}} \quad (11)$$

em que:

- e - erro-padrão, cm

hm(i) - altura do lençol freático medida, cm
 hc(i) - altura do lençol freático calculada, cm
 N - número de posições do lençol freático.

Segunda etapa

Esta etapa do trabalho também foi realizada no Laboratório de Drenagem do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, utilizando-se a mesma unidade reduzida de estudo hidrológico.

Aqui, utilizando-se o mesmo equipamento da primeira etapa, os drenos foram instalados a 0,18 m acima da camada impermeável (fundo do reservatório) espaçados de 1,80 m, e o reservatório, foi preenchido com o mesmo material arenoso até 0,36 m de profundidade.

Os ensaios foram realizados por meio de simulações de recargas em regime permanente, utilizando-se os mesmos gotejadores distribuídos acima da areia. Realizaram-se 22 medidas, correlacionando-se a altura do lençol freático (observando-se a leitura do poço central) com o respectivo volume coletado dos dois drenos a cada tempo, após a estabilização do nível da água. A recarga também foi calculada dividindo-se a vazão dos drenos pela área de fundo do tanque, tornando possível, então, estimar-se a condutividade hidráulica, a partir da fórmula de Ernst, para escoamento vertical, horizontal e radial apresentada na Eq. (12).

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{K_o} \left(1 + \frac{L^2}{8(d + \frac{h}{2})h} + \frac{L}{\pi} \ln\left(\frac{d}{\pi r}\right) \frac{1}{h} \right) \quad (12)$$

em que:

d - distância do plano que passa na linha dos drenos ao fundo do tanque, m

A Eq. (12) pode ser rearranjada e expressa da seguinte forma Eq. (13):

$$R = K_o f(h) \quad (13)$$

sendo:

$$f(h) = \frac{1}{\left(1 + \frac{L^2}{8(d + \frac{h}{2})h} + \frac{L}{\pi} \ln\left(\frac{d}{\pi r}\right) \frac{1}{h} \right)} \quad (14)$$

Assim, plotando-se os valores de R em função do termo dependente de h, a condutividade hidráulica passa a ser representada pelo coeficiente angular da equação de regressão, impondo-se a condição desta passar pela origem.

Visando à determinação da porosidade drenável, pelo mesmo método já descrito na etapa 1, realizaram-se ensaios saturando-se a areia até 0,36 m.

Realizaram-se testes de rebaixamento do lençol freático medindo-se o tempo médio necessário para que o lençol caísse a posições sucessivas, desde 12 cm até 1 cm acima da linha dos drenos.

A partir dos dados de condutividade hidráulica (K_o) e porosidade drenável (μ) obtidos, foram simulados rebaixamentos do lençol freático utilizando-se as mesmas equações de espaçamento entre drenos, para regime não permanente, citadas anteriormente (Eqs. de número 4 a 10).

Nesta etapa, o parâmetro D foi calculado pela fórmula

$$D = deq + \frac{ho}{2} \quad (15)$$

O valor da espessura do extrato equivalente de Hooghoudt (deq) foi calculado pela Eq. (16) citada por Smedema & Rycroft (1983).

$$deq = \frac{\pi L}{8 \ln\left(\frac{L}{pm}\right)} \quad (16)$$

em que:

pm - semiperímetro da seção tubular, m

O desempenho das equações também foi medido calculando-se o erro-padrão das posições medidas e estimadas do lençol freático.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeira etapa

Conforme se observa na Figura 2, o ajuste à equação de Ernst apresentou coeficiente de determinação ajustado de 0,8049 e revelou valor de K_o igual a 31,506 $m d^{-1}$. A porosidade drenável média obtida na segunda fase foi de 1,44%, existindo um coeficiente de variação de 29,94% entre as medições. Embora o coeficiente de variação tenha sido elevado, considerando-se condições de laboratório, o valor reduzido da porosidade drenável obtido se justifica tendo em vista a pequena tensão a qual a areia foi submetida.

Utilizando-se a condutividade hidráulica, porosidade drenável, foi possível comparar-se as equações para regime não permanente com os dados do ensaio de rebaixamento, conforme se visualiza na Figura 3.

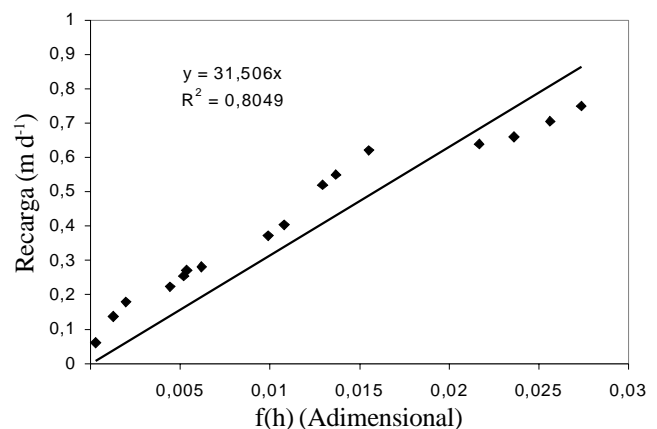


Figura 2. Relação entre a recarga e a função do termo independente f(h) utilizando-se ajuste à equação de Ernst, na primeira etapa do ensaio

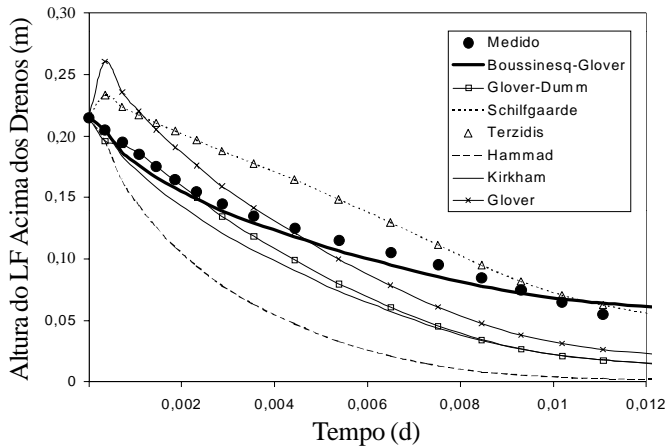


Figura 3. Comparação das equações de espaçamento entre drenos instalados sobre a camada impermeável

Nota-se grande aproximação dos dados medidos com os estimados pela fórmula de Boussinesq-Glover, o que a torna mais recomendável para drenos situados sobre a camada impermeável.

Este resultado vem corroborar o fato desta equação ter sido integrada especialmente para a condição de camada de impedimento rasa. As outras equações apresentaram maiores desvios, não se recomendando seu uso nestas condições. Assim, o artifício de se utilizar $D = ho/2$ visando permitir o uso dessas equações em condições de barreira rasa, não garante um bom desempenho dessas fórmulas. Com exceção das equações de Terzidis e Schilfgaard, que apresentaram curvas coincidentes, as demais fórmulas tenderam a superestimar o rebaixamento do lençol freático, o que implica em uma superestimativa do espaçamento entre drenos, acarretando em excesso de umidade do solo. A Tabela 1 apresenta os valores de erro-padrão entre as posições do lençol freático medidas e simuladas pelas equações de regime não-permanente.

Tabela 1. Erro padrão entre as posições do lençol freático medidas e simuladas

Equações	Erro-padrão (cm)
Boussinesq-Glover	0,78
Glover-Dumm	2,97
Schilfgaard	2,86
Terzidis	2,86
Hammad	6,11
Kirkham	3,30
Glover	2,94

O erro-padrão de apenas 0,78 cm, detectado entre os dados medidos e a fórmula de Boussinesq-Glover, realça a eficiência desta equação para drenos instalados sobre a camada impermeável, concordando com os resultados obtidos por Albuquerque (1982).

Segunda etapa

A Figura 4 apresenta os valores de R em função do termo dependente de h, relativos ao modelo proposto por Ernst. Verifica-se que o coeficiente de determinação ajustado foi de 0,9787 e o valor da condutividade hidráulica (K_0) da areia foi de 7,1022 $m d^{-1}$ nesta etapa. A diferença no valor de K_0

em relação à primeira etapa se deve, possivelmente, a alterações no grau de compactação da areia, quando do segundo preenchimento do tanque. A porosidade drenável média obtida na segunda fase foi de 1,38%, com desvio padrão de 5,6%.

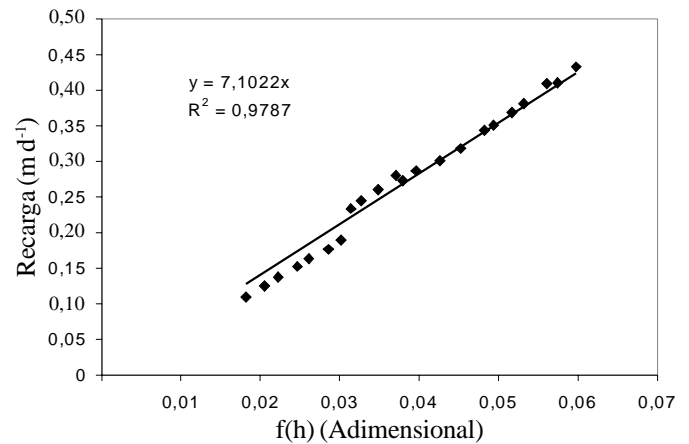


Figura 4. Relação entre a recarga e a função do termo independente f(h) utilizando-se ajuste à equação de Ernst, na segunda etapa do ensaio

Quanto aos testes de rebaixamento do lençol freático, verificou-se que a equação que mais se aproximou dos dados obtidos em laboratório foi a equação de Schilfgaard, seguida pela equação de Glover-Dumm, que descreveu o rebaixamento relativamente bem na fase final do processo (Figura 5, Tabela 2).

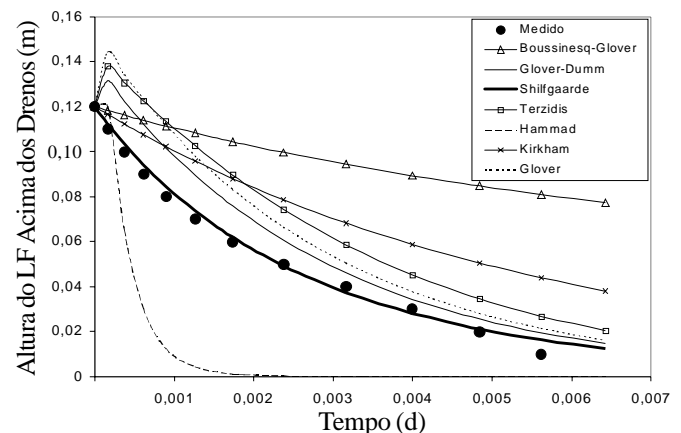


Figura 5. Comparação entre o rebaixamento do lençol medido e simulado pelas equações de regime não permanente, para drenos instalados acima da camada impermeável

Tabela 2. Valores do erro-padrão entre as posições do lençol freático medidas e simuladas na segunda etapa do trabalho

Equação	Erro-padrão (cm)
Boussinesq & Glover	4,80
Glover-Dumm	1,53
Schilfgaard	0,46
Terzidis	2,47
Hammad	4,18
Kirkham	2,54
Glover	2,27

CONCLUSÕES

Sem dispensar futuras avaliações em dimensões reais, os resultados obtidos em tanque com areia em dimensões reduzidas, revelaram que:

1. A fórmula de Boussinesq-Glover é a melhor equação a ser utilizada na estimativa do espaçamento entre drenos em condições de regime não permanente, quando os mesmos estão localizados sobre a camada impermeável.

2. As demais equações neste caso, não apresentaram desempenho satisfatório.

3. Por outro lado, quando os drenos se encontram acima da camada impermeável, a equação Schilfgaard, seguida pela equação de Glover-Dumm, foi a que melhor descreveu o rebaixamento do lençol freático.

LITERATURA CITADA

- Albuquerque, P.E.P. Validade de algumas equações de drenagem para drenos cobertos em condições de laboratório. Viçosa: UFV, 1982, 84p. Dissertação Mestrado
- Antonini, J.C. dos A. Desempenho dos drenos sem envelope e com envelope sintético em relação ao dos drenos com envelope de material mineral, submetidos ao regime de escoamento não-permanente. Viçosa: UFV, 1989, 58p. Dissertação Mestrado.
- Beltrán, J.M. Drenaje Agrícola. v.1. Madrid: Ministério de Agricultura, Pesca y Alimentacion/Instituto Nacional de Reforma Agrária y Desarrollo Agrário, 1986. 208p. Série de Ingenieria Rural y Desarrollo Agrário - Manual Técnico 5
- Coelho, E.F. Desempenho de algumas equações de drenagem e dos drenos abertos e cobertos em condições de campo. Viçosa: UFV, 1984, 80p. Dissertação Mestrado
- Cruciani, D.E. A drenagem na agricultura. São Paulo : Nobel, 1986, 337p.
- Duarte, S.N. Desenvolvimento e validação de um modelo computacional para simular o desempenho de sistemas de drenagem em regiões úmidas. Viçosa: 1996, 129p. Tese Doutorado
- Ferreira, P.A. Dificuldades e perspectivas da pesquisa em drenagem. In: Ferreira, M.E. (ed.) Aproveitamento de várzeas. Jaboticabal, UNESP, 1986. p.105-117.
- Hoover, J.R.; Schwab, G.O. Effect of tile depth, spacing, and cropping practices on drain discharge. Transactions of the ASAE. St. Joseph, v.11, p.150-152, 1969.
- Luthin, J.N. Drainage engineering. New York : Robert E. Krieger Publishing Company Huntington, 1973, 250p.
- Millar, A..A. Drenagem de terras agrícolas: Bases agrônômicas. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1978. 276p.
- Perrier, E.R.; MacKenzie, L.B.; Grass, L.B.; Shull, H.H. Performance of a tile drainage system: An evaluation of a tile design and management. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.15, p.440-44, 1972.
- Pizarro, F. Drenage agrícola y recuperacion de suelos salinos. Madrid : Editorial Agrícola Española, 1978. 525p.
- Prata Filho, D.A. Validade de algumas equações de drenagem para drenos abertos, em condições de laboratório. Viçosa: UFV, 1982, 100p. Dissertação Mestrado
- Schilfgaard, J.V. Nonsteady flow to drains. In: Schilfgaard, J.V. Drainage for agriculture. Madison : American Society of Agronomy, 1974. p.245-270.
- Smedema, L.K.; Rycroft, D.W. Land drainage. Ithaca: Cornell University Press, 1983. 377p.