

Simulação Hidráulica de Trincheiras de Infiltração de Águas Pluviais

Melissa Cristina Pereira Graciosa, Eduardo Mario Menciondo, Fazal Hussain Chaudhry

Departamento de Hidráulica e Saneamento, escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

Melissa.graciosa@gmail.com; emm@sc.usp.br; fazal@sc.usp.br

Recebido: 26/03/07 – revisado: 02/10/07 – aceito: 13/06/08

RESUMO

É apresentado um modelo bidimensional de infiltração, para a estimativa dos volumes infiltrados e do campo de umidade em torno de trincheiras de infiltração de águas de chuva. O modelo, baseado na equação de Richards', foi originalmente desenvolvido por Tabuada et al (1995) para o estudo do campo de umidade em torno de sulcos de irrigação. A formulação utiliza curvas de retenção e de condutividade hidráulica não saturada. O objetivo é proporcionar uma ferramenta para auxílio ao dimensionamento de trincheiras para o controle do escoamento superficial na origem. O modelo foi calibrado para dois solos, um com maior teor de argila e silte, e outro maior teor de areia. Foram feitas uma validação, em que se considerou as mesmas condições iniciais de campo, e uma simulação, partindo da condição inicial de solo saturado. Os resultados revelaram redução do escoamento superficial devida ao uso de trincheiras, mas forneceram volumes infiltrados inferiores aos observados. Isto ocorreu, possivelmente, devido às incertezas nas curvas de retenção, com relação à distribuição não-homogênea dos diâmetros dos poros. A capacidade de infiltração das trincheiras para volumes aplicados equivalentes a uma determinada chuva de projeto foi satisfatória no sentido de reduzir o escoamento superficial gerado no lote, mesmo sob condições iniciais de saturação do solo.

Palavras chave: Trincheiras de infiltração; controle do escoamento na origem.

INTRODUÇÃO

A urbanização de uma bacia hidrográfica tende a impermeabilizar áreas anteriormente permeáveis, modificando as condições de infiltração e escoamento (Lawrence et al., 1996). A drenagem convencional encaminha a vazão proveniente de áreas impermeabilizadas para os canais, que muitas vezes não são capazes de veiculá-la, ocasionando inundações.

Para mitigar inundações em uma bacia pode-se aumentar sua capacidade de drenagem ou reduzir seu hidrograma afluente (Gedolf et al., 1994). A segunda alternativa é mais condizente com o conceito de desenvolvimento urbano sustentável, podendo ser aplicada na macrodrenagem ou na origem da formação do escoamento superficial, ou seja, nos lotes, estacionamentos e ruas. O controle na origem pode ser complementar ou alternativo ao sistema convencional de drenagem (Mikkelsen et al., 1996), e atuar no sentido de retardar, infiltrar ou reaproveitar as águas de chuva.

As trincheiras de infiltração têm a função de coletar, armazenar e infiltrar as águas de chuva (Mikkelsen e Jacobsen, 1993). Podem ser superficiais ou

subterrâneas e preenchidas ou não com brita ou outro material poroso. A geometria longa e estreita serve para reduzir a área de base, que tende a ser obstruída por partículas presentes na água infiltrada (colmatação), e aumentar a relação entre os lados (principal área de infiltração) e o volume de armazenamento (Mikkelsen et al., 1996), além de diminuir a área em planta ocupada.

Para que trincheiras de infiltração sejam utilizadas em larga escala é necessário desenvolver ferramentas para o seu projeto e dimensionamento.

OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é propor uma ferramenta para simular a infiltração em trincheiras a partir de condições iniciais de umidade, utilizando o modelo de infiltração bidimensional de Richards'.

METODOLOGIA

Modelo numérico

O modelo de Richards' foi escolhido por possuir as seguintes vantagens (Tabuada et al 1995):

- Levar em conta as condições iniciais de umidade do solo, e,
- Descrever o movimento da água no solo, e não apenas quantificar volumes infiltrados.

O modelo de Richards', expresso pela **Equação 1**, tem base na Equação de Darcy-Buckingham e na Equação da Continuidade. Ele descreve o movimento da água no solo em função da condutividade hidráulica não saturada.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla (k(\theta) \nabla \phi) \quad (1)$$

Em que: θ = umidade volumétrica; t = tempo; $k(\theta)$ = condutividade hidráulica em função da umidade, e ϕ = potencial total da água no solo, dado pela soma dos potenciais de pressão (ϕ_p), pneumático (ϕ_n), mátrico (ϕ_m), gravitacional (ϕ_g), de temperatura (ϕ_T) e osmótico (ϕ_O).

Tabuada et al. (1995) quantificaram o campo de umidade em torno de sulcos curtos de irrigação, a partir da equação de Richards' bidimensional. Este modelo é aqui aplicado às trincheiras de infiltração, com as mesmas considerações de Tabuada et al (1995), quais sejam:

- As trincheiras são suficientemente curtas para se considerar instantâneo o avanço da frente de molhamento, o que permite uma abordagem bidimensional;
- São assumidos: água e solo incompressíveis; solo não expansivo ($\phi_p=0$ na zona não saturada); meio homogêneo e isotrópico (vale o ajuste de van Genuchten); efeitos de temperatura e osmose desprezíveis ($\phi_T=0$; $\phi_O=0$) e efeitos de histerese negligenciados (curva de retenção constante na irrigação e drenagem).

O modelo requer a curva de retenção $\phi_m=f(\theta)$ e de condutividade hidráulica não saturada do solo $k(\theta)$. A entrada é a umidade inicial do solo. As condições de contorno (**Quadro 1**) são as condições de fluxo nos limites do domínio (**Figura 1**), para cada uma das três fases do processo de infiltração: Fase 1 - Abastecimento: a água entra na trincheira, e a lâmina d'água é crescente; Fase 2 - Recessão: lâmina d'água é decrescente após o término do abastecimento, e Fase 3 - Redistribuição: movimento da água no solo após o término da recessão.

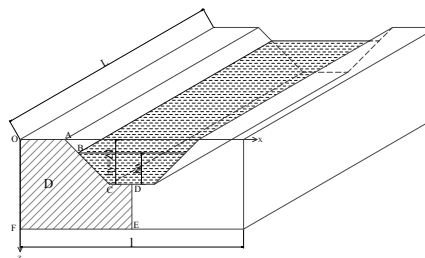


Figura 1 – Domínio do modelo de infiltração bidimensional. Fonte: Tabuada et al (1995).

Tabela 1 - Condições de contorno no domínio, nas três fases da infiltração. Fonte: Tabuada et al (1995).

Superfície de contorno (Conforme Fig. 1)	Fase de Abastecimento $0 < t < t_{abast}$	Fase de Recessão $t_{abast} < t < t_{rec}$	Fase de redistribuição $t_{rec} < t < t_{redistr}$
CD	$\phi_m(x, Z_1, t) = h_0(t)$	$\phi_m(x, Z_1, t) = h_{rec}(t)$	$K(\phi_m) \left(\frac{\partial \phi_m}{\partial z} - 1 \right) = 0$
BC	$\phi_m(x, z, t) = h_{tabas}(x, z, t)$	$\phi_m(x, z, t) = h_{rec}(x, z, t)$	$\bar{q} \cdot \bar{N} = 0$
AB	$\bar{q} \cdot \bar{N} = 0$	$\bar{q} \cdot \bar{N} = 0$	$\bar{q} \cdot \bar{N} = 0$
AO	$K(\phi_m) \left(\frac{\partial \phi_m}{\partial z} - 1 \right) = 0$	$K(\phi_m) \left(\frac{\partial \phi_m}{\partial z} - 1 \right) = 0$	$K(\phi_m) \left(\frac{\partial \phi_m}{\partial z} - 1 \right) = 0$
OF	$\frac{\partial \phi_m}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial \phi_m}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial \phi_m}{\partial x} = 0$
DE	$\frac{\partial \phi_m}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial \phi_m}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial \phi_m}{\partial x} = 0$
FE	$\phi_m = \phi_{m_{in}}$	$\phi_m = \phi_{m_{in}}$	$\phi_m = \phi_{m_{in}}$

Em que: t_{abast} = tempo de abastecimento, ou tempo de alimentação de água para a trincheira; t_{rec} = tempo de recessão, ou tempo que a água demora para infiltrar totalmente após o término do abastecimento; $t_{redistr}$ = tempo de redistribuição, ou limite de tempo em que se deseja estudar a fase de redistribuição de água ao redor da seção transversal da trincheira. x = direção horizontal, paralela ao fundo da trincheira; ϕ_m = potencial mátrico; $\phi_{m_{in}}$ = potencial mátrico inicial; Z_1 = profundidade da trincheira; h_0 = profundidade da lâmina d'água; h_{abast} = profundidade média da lâmina d'água na fase de abastecimento; h_{rec} = profundidade média da lâmina d'água na fase de recessão; $K(\phi_m)$ = condutividade hidráulica não saturada; $\bar{q} \cdot \bar{N}$ = Fluxo de água na direção normal à superfície de contorno. A densidade de fluxo q é dada pela **Equação 2**:

$$\vec{q} = -K(\theta) \frac{\partial \phi_m}{\partial x} \vec{i} - K(\theta) \left(\frac{\partial \phi_m}{\partial z} - 1 \right) \vec{k} \quad (2)$$

A Equação de Richards' é escrita em termos de potencial mátrico (**Equação 3**) e discretizada por diferenças finitas, resultando na **Equação 4**. Maiores detalhes sobre a discretização encontram-se em Tabuada *et al.* (1995).

$$c(\phi_m) \frac{\partial \phi_m}{\partial t} = \frac{\partial k(\phi_m)}{\partial x} \cdot \frac{\partial \phi_m}{\partial x} + \frac{\partial k(\phi_m)}{\partial z} \cdot \left(\frac{\partial \phi_m}{\partial z} - 1 \right) \quad (3)$$

$$\text{Em que: } c(\phi_m) \frac{\partial \phi_m}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \Rightarrow c(\phi_m) = \frac{\partial \theta}{\partial \phi_m}$$

$$C_{i,j} \frac{(\phi_{m,i,j}^{t+1} - \phi_{m,i,j}^t)}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta x} \left[K_{i,j+1/2}^t \frac{(\phi_{m,i,j+1}^{t+1} - \phi_{m,i,j}^{t+1})}{\Delta x} - K_{i,j-1/2}^t \frac{(\phi_{m,i,j}^{t+1} - \phi_{m,i,j-1}^{t+1})}{\Delta x} \right] + \frac{1}{\Delta z} \left\{ K_{i+1/2,j}^t \left[\frac{(\phi_{m,i+1,j}^{t+1} - \phi_{m,i,j}^{t+1})}{\Delta z} - 1 \right] - K_{i-1/2,j}^t \left[\frac{(\phi_{m,i,j}^{t+1} - \phi_{m,i-1,j}^{t+1})}{\Delta z} - 1 \right] \right\} \quad (4)$$

É adotada a condição de simetria no domínio, que foi discretizado em elementos retangulares de dimensões Δx e Δz , criando uma matriz de m linhas e n colunas, como indicado na **Figura 2**.

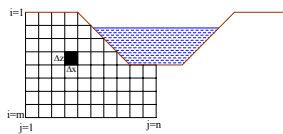


Figura 2 - Discretização do domínio.

Em cada nó (ij), o valor de ϕ_m é calculado para o instante $t+1$, partindo-se do valor no instante t . No primeiro intervalo Δt , ϕ_m é dado pela condição inicial do solo. A umidade correspondente é calculada pela relação $\phi_m(\theta)$. O volume infiltrado é determinado pela **Equação 5**:

$$V(t) = 2 \left[L \int_D (\theta_{x,z,t} - \theta_{in}) dx dz \right] \quad (5)$$

Em que: θ_{in} e $\phi_{m, in}$ são, respectivamente, a umidade volumétrica o potencial mátrico iniciais.

Para cada instante t calcula-se o potencial mátrico que satisfaça à **Equação 4**, a partir das relações $K=K(\phi_m)$ e $c(\phi_m)$ e da umidade inicial. A formulação é detalhada em Tabuada *et al.* (1995a), que descreve o programa computacional *BIDISUL*, cujo fluxograma é apresentado na **Figura 3**.

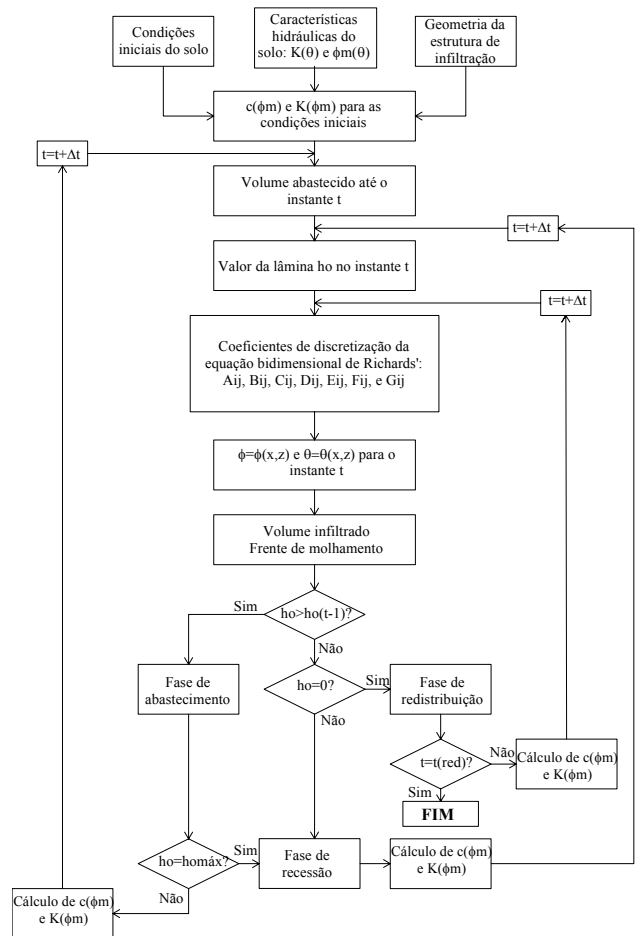


Figura 3 - Fluxograma do modelo BidiSul. Fonte: Tabuada et. al., 1995.

Programa computacional

Para a adaptação do programa BidiSul foi adaptado para o cálculo da infiltração em trincheiras, foi adotado o modelo de condutividade hidráulica não saturada de van Genuchten, no lugar do ajuste polinomial proposto originalmente. Isto foi feito para reduzir as incertezas de calibração, optando por um único conjunto de parâmetros para todas as equações do modelo.

Ademais, as alterações no programa foram estruturais, consistindo em:

1. Compilar em Linguagem Fortran 90 (o original foi Fortran 77);
2. Identificar o programa para melhor visualizar as estruturas e comandos;
3. Organizá-lo em sub-rotinas para facilitar o debug;

4. Criar uma sub-rotina para a leitura de dados, com a função de organizar em um único arquivo de entrada as variáveis que, no código original, eram inseridas manualmente;
5. Criar arquivos de saída para armazenar as variáveis calculadas em cada intervalo t , a fim de acompanhar os resultados parciais;
6. Inserir comentários de modo a facilitar a compreensão do código;

Calibração dos parâmetros

Curva de retenção do solo $\theta_m(\theta)$

Foi utilizado o modelo de Van Genuchten (1980), dado pela **Equação 6**:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha_v \cdot |\phi_m|)^n\right]^m} \quad (6)$$

Em que:

θ = umidade volumétrica do solo; θ_r = umidade residual; θ_s = umidade de saturação; ϕ_m = potencial mátrico; α_v , m , n = parâmetros do modelo.

Condutividade hidráulica não saturada $k(\theta)$

Foi adotada a **Equação 7**, de Van Genuchten (1980) a partir do modelo de Mualem (1976, *apud Libardi, 2000*).

$$K(\theta) = K_0 \omega^l \left[1 - \left(1 - \omega^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (7)$$

Em que: $\omega = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$, e $l = 0,5$ para solos de textura média a arenosa.

Condições iniciais

A umidade inicial foi obtida em campo com sonda de nêutrons. O modelo foi calibrado em dois solos, Solo 1 e Solo 2, cujos parâmetros físicos são apresentados na Tabela 2:

Tabela 2 – Propriedades Físicas dos Solos

Composição granulométrica	Solo 1		Solo 2	
Argila	16,2	45,0	25,0	30,0
Silte	28,8		5,0	
Areia fina	30,0		30,0	
Areia média	23,4	55,0	35,0	69,9
Areia grossa	1,6		4,9	
Pedregulho	0,0	0,0	0,1	0,1
Massa específica do solo (ρ_s) (g/cm³)	1,617		1,833	
Massa específica dos sólidos (ρ_s) (g/cm³)	2,886		2,696	
Massa específica aparente seca (ρ_d) (g/cm³)	1,360		1,690	
Condutividade hidráulica saturada (m/s)	5,69E-05		6,73E-05	

O volume de enchimento das trincheiras foi de 3,47 m³, calculado com base na seguinte chuva de projeto: período de retorno de 2 anos, duração de 25 minutos, em um lote de 250 m², com 60% de área impermeável, utilizando a curva idf de São Carlos (**Equação 8**, Barbassa, 1991). Os níveis d'água foram monitorados nas Fases 1 e 2 com transdutores de pressão e o campo de umidade foi monitorado na Fase 3 com sonda de nêutrons.

$$i = \frac{1519 \cdot T^{0,236}}{(t + 16)^{0,935}} \quad (8)$$

Em que: i = intensidade de precipitação, mm/h; T = período de retorno, anos; t = tempo de precipitação, min. Os ajustes da curva de van Genuchten obtidos para os Solos 1 e 2 são mostrados na Tabela 3, e as curvas de retenção, nas **Figuras 4 e 5**.

Tabela 3 – Ajuste da curva de retenção

	Solo 1	Solo 2
Teta - r (cm³/cm³)	0,108	-0,081 *
Teta - s (cm³/cm³)	0,529	0,375
Alfa	6,7227	6,355
m	0,2144	0,1344
n	1,2729	1,1552

* A umidade residual (θ_r) negativa não é fisicamente possível, pois trata-se do teor de umidade remanescente no solo. No entanto, a regressão dos valores observados à equação de Van Genuchten gerou este valor negativo. A fixação de um θ_r , igual a zero ou ao valor mínimo de umidade observado, de modo a "forçar" um θ_r não negativo, gerou inconsistência nos demais parâmetros, que não encontram convergência no processo de regressão. Uma análise sobre as possíveis causas que podem gerar este resultado é apresentada adiante.

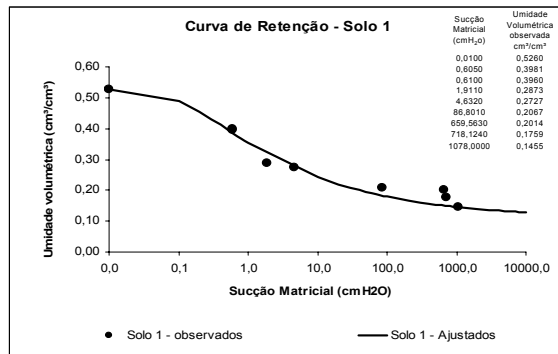


Figura 4 - Curva de retenção Solo 1

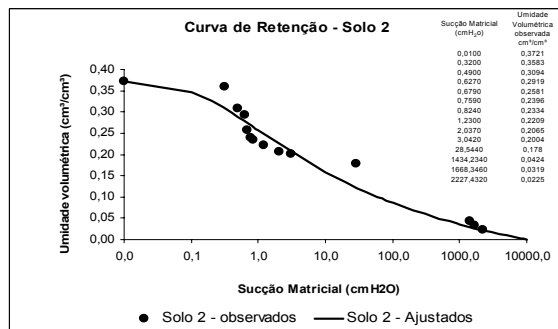


Figura 5 - Curva de retenção Solo 2

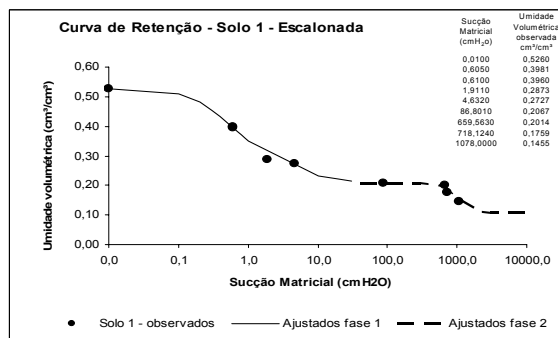


Figura 6- Curva de retenção Solo 1 – escalonada

Incertezas

A distribuição dos pontos de potencial mátrico versus umidade volumétrica do Solo 2 é heterogênea, com dois módulos bem definidos. O modelo de van Genuchten ajusta-se bem a apenas parte da curva de retenção. As **Figuras 6 e 7** apresentam as curvas dos Solos 1 e 2 ajustadas em duas fases. Segundo Soto (2004), a forma escalonada da curva pode-se dever a que, em uma determinada faixa de sucção, os valores de umidade estejam associados a poros de dimensões uniformes, em outra faixa de

sucção, esses valores estariam associados a um conjunto de poros de menores dimensões (distribuição bimodal dos poros).

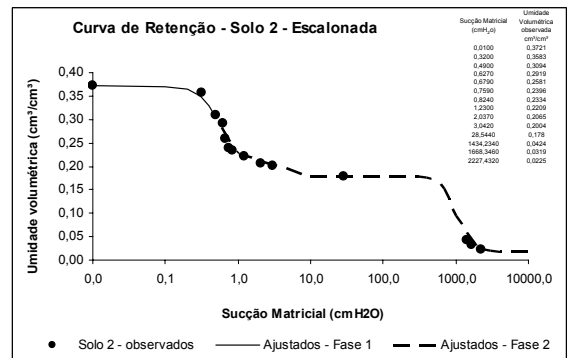


Figura 7- Curva de retenção Solo 2 – escalonada

Novos ensaios foram realizados como medida de certificação, e os resultados se confirmaram. Isso indica que o modelo de van Genuchten deve ser aplicado por partes da curva de retenção quando há comportamento multi-modal de distribuição das dimensões dos poros. Mais adiante é discutido como essa distribuição heterogênea influencia na aplicação do modelo aos solos estudados.

Simulações

Para cada solo, foram feitas a validação do modelo e uma simulação saturada, conforme descrito a seguir.

Validação: Consistiu em simular os experimentos de campo, com os mesmos dados iniciais. A finalidade foi comparar os resultados experimentais e numéricos, a fim de verificar a adequação do modelo.

Simulação saturada: Consistiu em simular uma condição crítica de operação da trincheira, atribuindo a todos os pontos do domínio umidade inicial de saturação.

A validação e a simulação foram feitas de modo a serem encerradas em duas possíveis circunstâncias: a lâmina d'água atingir a capacidade máxima da trincheira ou o tempo total de abastecimento (igual ao do experimento de campo) ser atingido.

Parâmetros e dados de entrada:

A curva de retenção de van Genuchten foi ajustada com os parâmetros mostrados no **Quadro 3**.

O domínio foi discretizado conforme a **Figura 8**, com elementos retangulares de dimensões $\Delta x=1,25$ cm e $\Delta z=10$ cm. Estes foram dimensionados de modo que a inclinação de sua diagonal fosse igual à do talude da trincheira, condição do modelo. O intervalo de tempo adotado foi $\Delta t=2$ minutos.

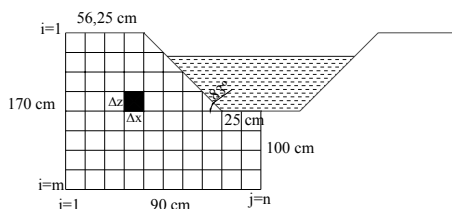


Figura 8 – Discretização do domínio

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo fornece como resultados:

- 1) os níveis d'água na trincheira nas fases de alimentação e recessão, e
- 2) a umidade em cada nó do domínio na fase de redistribuição.

Os perfis de umidade observados, validados e simulados são apresentados nas **Figuras 11 a 18 e 21 a 24**.

Validação:

Os resultados das validações são apresentados nas **Figuras 9 a 18**. As **Figuras 9 e 10** mostram o nível d'água validado e observado, e as **Figuras 11 a 18** apresentam perfis de umidade observados e simulados, durante a redistribuição. Para a melhor visualização, foram interpoladas linhas de isomidade utilizando o método *natural neighbor*, com Razão = 1 e Ângulo = 0.

Os resultados das simulações são apresentados nas **Figuras 19 e 20**, que mostram os níveis d'água, validados e simulados, e nas **Figuras 21 a 24**, que mostram perfis de umidade simulados.

Na validação para o Solo 1, verificou-se que, ao final da Fase 1 ($t = 72$ min), ainda não havia sido atingido o nível máximo na trincheira. Isto revela uma estimativa superestimada da infiltração em comparação com os dados observados, em que, para a mesma vazão e tempo de alimentação, o nível máximo foi atingido. O Solo 2 apresentou comportamento distinto: o nível máximo na trincheira, de 67,2 cm, foi atingido aos 50 minutos da alimentação,

ou seja, 20 minutos antes do observado, revelando uma estimativa de infiltração inferior à observada.

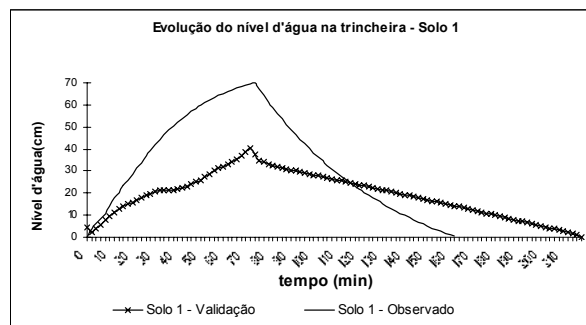


Figura 9 – Nível d'água na trincheira Solo 1 - Validação e valores observados

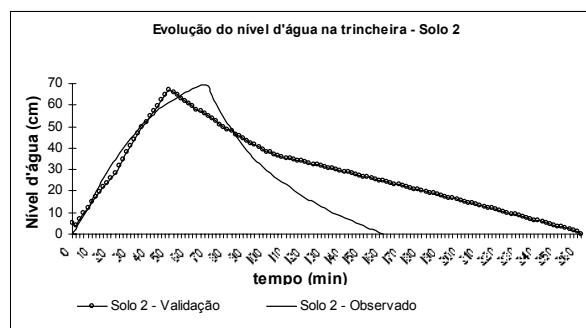


Figura 10 – Nível d'água na trincheira Solo 2 - Validação e valores observados

Se, durante a alimentação, a infiltração foi superestimada para o Solo 1 e subestimada para o Solo 2, na recessão a validação apresentou valores de infiltração muito abaixo dos observados para ambos os solos, subestimando a capacidade de infiltração da trincheira, conforme mostram as **Figuras 9 e 10**. No Solo 1, a fase de recessão acabou aos 162 minutos, e, no Solo 2, aos 160 minutos. Os valores simulados foram de 218 minutos para o Solo 1 e 262 minutos para o Solo 2.

Na validação do modelo, na fase de redistribuição, os Solos 1 e 2 rapidamente atingiram a umidade de saturação no perfil, o que não ocorreu nos ensaios observados. No instante $t=0$ da redistribuição a parte inferior do domínio, nos dois Solos, apresenta-se totalmente saturada, conforme pode ser observado nas **Figuras 11 a 14**.

A defasagem na capacidade de drenagem do solo nas validações em relação aos ensaios de campo, nos primeiros instantes após o término da recessão, é também observada nas horas seguintes, em que a drenagem ocorre mais lentamente que o

observado, conforme ilustram as **Figuras 15 a 18**.

O Solo 2 drenou mais rapidamente que o Solo 1. O Solo 2 já apresentava umidade próxima à do início do experimento no instante $t=5h$, enquanto que, no Solo 1, ainda era observada umidade próxima da saturação na região inferior do domínio, após 48 horas do início da alimentação.

Constata-se, assim, uma tendência de que o modelo subestime a capacidade de infiltração do solo, em todas as fases, o que deve-se, possivelmente, às incertezas do ajuste unimodal da curva de retenção.

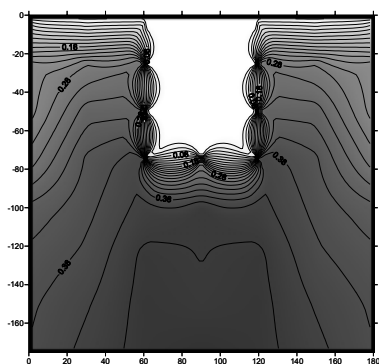


Figura 11 – umidade observada no Solo 1 em $t = 0$ da redistribuição

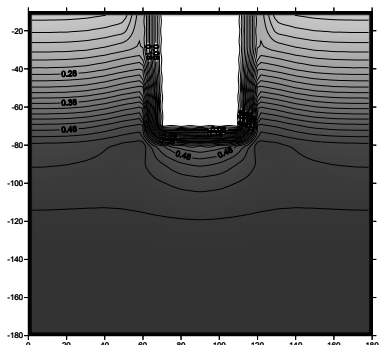


Figura 12 – Validação: Perfil de umidade Solo 1 em $t = 0$ da redistribuição (NA = 0)

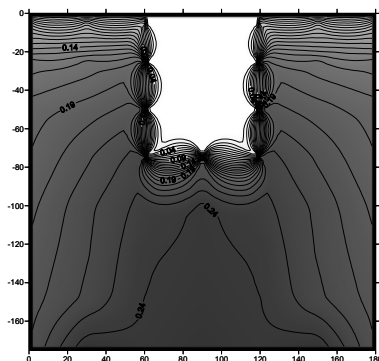


Figura 13 – Umidade observada no Solo 2 em $t = 0$ da fase de redistribuição

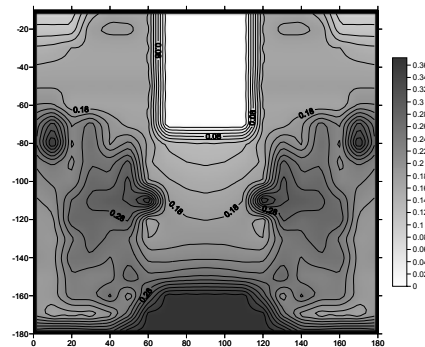


Figura 14 – Validação: Perfil de umidade Solo 2 em $t = 0$ da redistribuição (NA = 0)

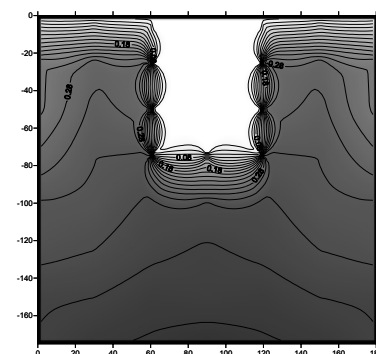


Figura 15 – umidade observada no Solo 1 em $t = 5h$ da redistribuição

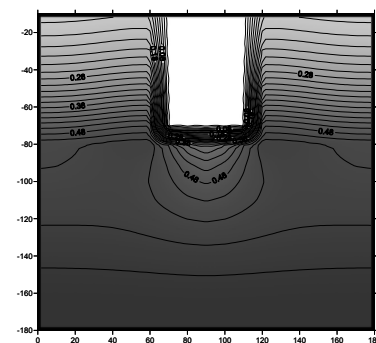


Figura 16 – Validação: Perfil de umidade do Solo 1 em $t = 5h$ da redistribuição.

Simulação:

Na simulação, a lâmina d'água máxima foi atingida, no Solo 1, aos 38 minutos, e, no Solo 2, aos 32 minutos, o que ocorreu, no solo 1, 34 minutos antes que na validação, e, no solo 2, 18 minutos antes, conforme observa-se nas **Figuras 19 e 20**. Também se observa que, na simulação, a recessão no Solo 1 cessou aos 344 minutos, e no Solo 2, aos 336 minutos. O volume total infiltrado no Solo 1 foi de $1,64 \text{ m}^3$, e, no Solo 2, de $1,50 \text{ m}^3$. O comportamento dos dois solos, na simulação saturada, foi semelhante.

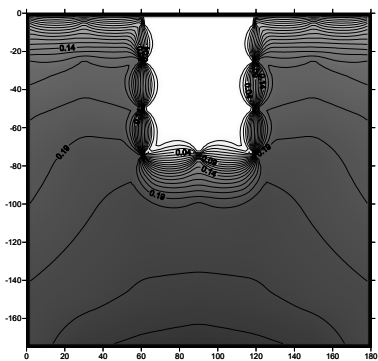


Figura 17 – Perfil de umidade observado do Solo 2 em t = 5h da fase de redistribuição

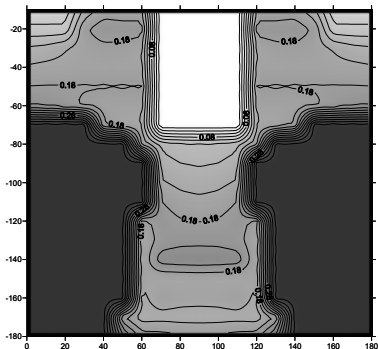


Figura 18 – Validação: Perfil de umidade do Solo 2 em t = 5h da redistribuição

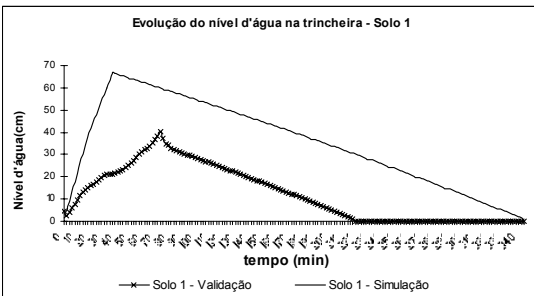


Figura 19 - nível d'água na trincheira na validação e simulação - Solo 1

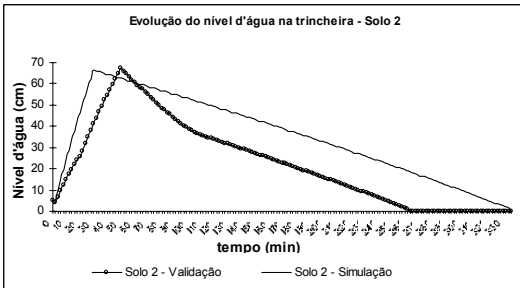


Figura 20 - nível d'água na trincheira na validação e simulação - Solo 2

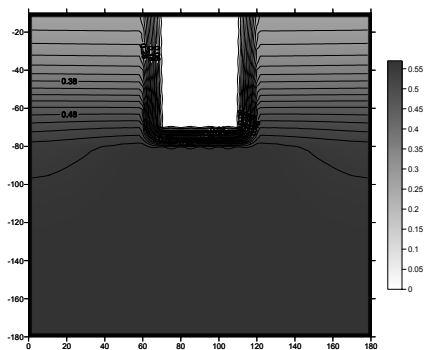


Figura 21 – Simulação: Perfil de umidade do Solo 1 em t=0 da redistribuição (NA = 0)

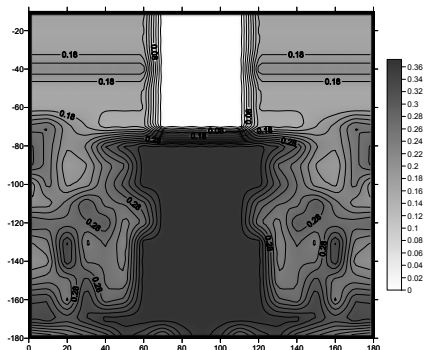


Figura 22 – Simulação: Perfil de umidade Solo 2 em t = 0 da redistribuição (NA = 0)

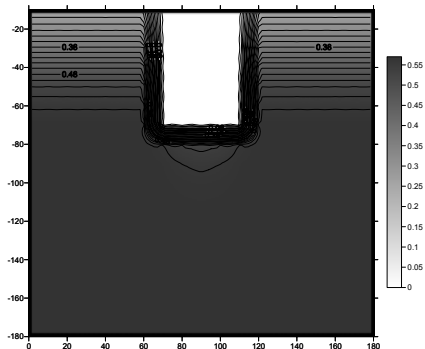


Figura 23 – Simulação: Perfil de umidade Solo 1 em t = 5h da redistribuição (NA = 0)

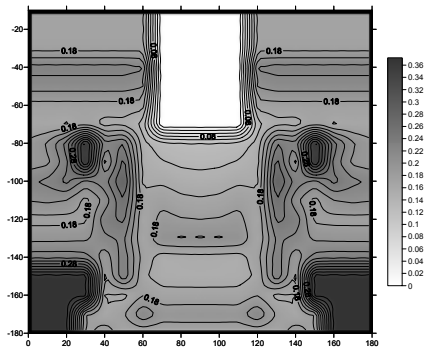


Figura 24 – Simulação: Perfil de umidade Solo 2 em t = 5h da redistribuição (NA = 0)

Ao final da recessão, a parte inferior do domínio, no Solo 2, ainda se encontrava saturada (**Figura 22**), enquanto que os demais pontos da malha já encontravam-se parcialmente drenados. Já no solo 1, no mesmo instante, toda a malha ainda apresentava valores de saturação (**Figura 21**). Se comparado com a validação, no mesmo instante, observa-se que nos dois solos apenas uma parte do perfil encontrava-se saturada (**Figuras 12 e 14**), indicando uma drenagem mais rápida que na Simulação. Este comportamento é condizente com a expectativa de menor capacidade de drenagem no solo saturado, e de drenagem mais rápida no Solo 2 (arenoso) que no Solo 1 (argiloso).

Nos instantes seguintes da redistribuição, os Solos 1 e 2 apresentaram comportamento distinto de drenagem. Nas primeiras horas da redistribuição, o Solo 2 (**Figura 24**) apresentou umidade inferior à do início da alimentação, enquanto que, no Solo 1, o perfil ainda se encontrava próximo da saturação (**Figura 23**). Este resultado era esperado, devido à maior tendência à retenção de água do Solo 1.

Embora as simulações tenham gerado valores divergentes dos observados, o comportamento simulado foi condizente com o observado e esperado, do Solo 1 em relação ao 2, e das simulações inicialmente saturadas em relação às inicialmente não-saturadas. Isto é um indicativo de que os resultados, embora sigam um padrão esperado, foram influenciados por incertezas nos ajustes dos parâmetros. As consequências destas incertezas para aplicações futuras do modelo são discutidas a seguir.

Considerações sobre as incertezas e consequências para a utilização futura do modelo

São duas as principais fontes de incerteza do modelo:

- a. Incertezas na calibração dos parâmetros do modelo, e
- b. Incertezas na precisão das medições feitas em campo.

Com relação à calibração dos parâmetros, a multimodalidade da distribuição dos diâmetros dos poros dos solos estudados constitui a principal fonte de incerteza.

A opção pelo modelo de van Genuchten para condutividade hidráulica não saturada, em lugar da equação polinomial proposta originalmente, proporciona um melhor ajuste da calibração, uma vez que é utilizado um único conjunto de parâmetros para todas as equações do modelo. No entanto,

os parâmetros da curva de van Genuchten são unimodais. A curva de van Genuchten é, juntamente com a equação de Richards', a base do modelo computacional, e divergências no seu ajuste em relação aos dados observados podem conduzir a estimativas também divergentes dos volumes infiltrados e perfis de umidade ao longo do processo de infiltração simulado.

Para aplicações futuras, a fim de mitigar esta fonte de incertezas, recomenda-se:

- Que sejam feitos experimentos, quando possível, em solos homogêneos;
- Que o modelo computacional seja ajustado de forma a permitir o ajuste da curva de forma escalonada, por trechos, de modo que a precisão dos resultados seja mais representativa da realidade.

Outra fonte de incerteza do modelo é o efeito de histerese, que é negligenciado na formulação. Embora as curvas de retenção dos Solos 1 e 2 tenham sido obtidas por processo de drenagem, e os ensaios de campo terem sido realizados também na drenagem, as variações na forma da curva no processo reverso, não previstas no modelo, aliadas às condições iniciais em que se realizaram os ensaios, podem influenciar na obtenção dos parâmetros da curva de retenção.

Com relação às incertezas nos ensaios de campo, elas se referem à precisão do equipamento utilizado para a medição da umidade na fase de redistribuição, no caso, sonda de nêutrons. As incertezas associadas à calibração do equipamento são, conforme descrito em Graciosa (2005):

- a representatividade do ponto de amostragem para a calibração da sonda;
- o ajuste linear das contagens ao teor de umidade do solo, e
- a natureza estocástica das iterações radioativas, embora sejam reduzidas pela adoção do critério da contagem padrão.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foi feito um estudo de simulação hidráulica de trincheiras de infiltração com o objetivo de calibrar um modelo empírico de infiltração bidimensional a partir de experimentos de campo em dois solos, sendo o primeiro com maior teor de argila e o segundo com maior teor de areia.

A simulação foi feita por meio do modelo de Richard's para escoamento em solo não saturado. Este modelo foi programado para solução computacional, inicialmente para aplicação em sulcos de irrigação, por Tabuada *et al* (1995) e, posteriormente, adaptado para trincheiras de infiltração por Graciosa (2005).

Os resultados das validações para os solos 1 e 2 indicam uma subestimativa da capacidade de infiltração dos solos, em comparação com os valores observados, especialmente na fase de redistribuição. Estes resultados podem se dever às incertezas discutidas anteriormente.

Os resultados das simulações revelaram que, partindo da pior hipótese, que é a condição de saturação do solo, as trincheiras são capazes de infiltrar 40% da chuva de projeto.

Com relação à simulação numérica, propõe-se para trabalhos futuros:

- 1) calibrar o modelo em solos de distribuição homogênea dos diâmetros dos poros, a fim de obter resultados que permitam validar o modelo com menor grau de incerteza;
- 2) incorporar o efeito escalonado das curvas de retenção no modelo computacional, permitindo sua aplicação de maneira mais ampla;
- 3) adaptar o software para o dimensionamento de trincheiras de infiltração, com base nas considerações sobre dimensionamento descritas em Graciosa, 2005.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo financiamento dos trabalhos realizados.

REFERÊNCIAS

- BARBASSA, A. P. (1991). Simulação do efeito de urbanização sobre a drenagem pluvial na cidade de São Carlos – SP. EESC – UUSP, 1991, 327p., Tese (doutorado em hidráulica e saneamento) – Departamento de Hidráulica e Saneamento.
- FUJITA, S. (1997). Measures to promote stormwater infiltration. *Water Science and Technology*, vol. 36, n.º 8, p. 289 – 293.
- GEDOLF, G.; JACOBSEN, P.; FUJITA, S. (1994). Urban stormwater infiltration perspectives. *Water Science and Technology*, vol. 29, n.º 1-2, p. 245-254.
- VAN GENUTCHEN, M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America*, vol. 44, p. 892-898.
- GRACIOSA, M.C.P. (2005). Trincheiras de infiltração como tecnologia alternativa em drenagem urbana: modelagem experimental e numérica. Dissertação de mestrado, EESC/USP.
- LAWRENCE, A. I.; MARSALEK, J., ELLIS, J. B.; URBONAS, B. (1996). Stormwater detention and BMPs. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 34, n.º 6, p. 799 – 813.
- LIBARDI, P. L. (2000) Dinâmica da água no solo 2.ed. Departamento de Ciências Exatas da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba-SP.
- MIKKELSEN, P.S.; JACOBSEN, P. (1993). Stormwater infiltration design based on rainfall statistics and soil hydraulics. *Proc. ASCE International Symposium on Engineering Hydrology*, San Francisco, California, July 25-30, pp. 653-658.
- MIKKELSEN, P. S.; JACOBSEN, P.; FUJITA, S. (1996). Infiltration practice for control of urban stormwater. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 34, n.º 6, p. 827-840.
- SOTO, M.A.F. (2004). Comparação entre métodos de imposição e de controle de sucção em ensaios com solos não saturados. Tese (Doutorado) – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
- TABUADA, M. A., REGO, Z. J. C., VACHAUD, G. E PEREIRA, L. S. (1995). Two-dimensional infiltration under furrow irrigation: modelling, its validation and applications. *Agricultural Water Management*, vol. 27, n.º 8-9, p. 105-123.

Hydraulic Simulation of Rainwater Infiltration Trenches

ABSTRACT

A two-dimensional infiltration model is presented to estimate infiltrated volumes and the humid area around rainwater infiltration trenches. The model, based on Richards' equation, was originally developed by Tabuada et al (1995) to study humid areas around the irrigation furrows. The formula uses retention and non-saturated hydraulic conductivity curves. The purpose is to provide a tool to help size the trenches to control surface runoff at the source. The model was calibrated for two soils, one with

higher clay and sit content, and the other with higher sand content. A validation was performed, considering the same initial condition of saturated soil. The results showed a reduction in surface runoff because of the use of trenches, but they supplied infiltrated volumes lower than those observed. This may have occurred due to uncertainties in the retention curves, as regards non-homogeneous distribution of the pore diameters. The infiltration capacity of the trenches for volumes applied equivalent to a given design rainfall was satisfactory in the sense that it reduced the surface runoff generated on the lot, even under initial conditions of saturated soil.

Keywords: *infiltration trenches; flow control at the source.*