

Modelagem de um Sistema Filtro-Vala-Trincheira de Infiltração pelo Método de PULS Adaptado para Calibração de Parâmetros

Alessandro Hirata Lucas^{*}; Ademir Paceli Barbassa^{*}; Rodrigo Braga Moruzzi^{*}

aless_hirata@yahoo.com.br; barbassa@power.ufscar.br; rmoruzzi@rc.unesp.br

Recebido: 12/05/12 - revisado: 28/06/12 - aceito: 03/01/13

RESUMO

Com o objetivo de contribuir com pesquisas e com a aplicação de técnicas compensatórias, especificamente, sistemas de infiltração, foi construído, operado e modelado um sistema Filtro – Vala – Trincheira de infiltração (FVT) em escala real. O método de PULS foi empregado para a modelagem a partir do monitoramento das precipitações, das vazões afluentes ao sistema FVT e dos níveis de armazenamento na trincheira e vala de infiltração. Para simplificação da representação matemática foram adotadas algumas hipóteses, entre elas, foram desprezados os efeitos da variação das taxas de infiltração e da lâmina armazenada em depressões do solo com o tempo para eventos isolados e para eventos consecutivos. A calibração foi realizada por meio dos parâmetros de infiltração f_v (taxas de infiltração da vala) e f_p (taxa de infiltração da trincheira), os quais constituíram as adaptações necessárias para a aplicação do modelo, além da calibração dos parâmetros de retenção h_f (lâmina retida na área do filtro gramado) e h_v (lâmina retida na área da vala). Os erros decorridos do modelo foram avaliados por meio de valores médios do coeficiente de Nash - Sutcliffe (NS), do erro de nível máximo de armazenamento ($h_{m\acute{a}x}$) e do erro de tempo de esvaziamento (T_{esvaz}), os quais resultaram em 0,65, 11% e 19%, respectivamente, na fase de calibração do modelo. A validação resultou em valores médios de NS e erros relativos de $h_{m\acute{a}x}$ e T_{esvaz} de 0,43, 29% e 36%, respectivamente. As simplificações podem ter sido a causa da imprecisão do modelo para eventos consecutivos e eventos de longa duração. Em contrapartida, a modelagem simulou as etapas de funcionamento do sistema FVT adequadamente, com resultados bastante satisfatórios quando analisados individualmente (NS de até 0,98, erro de $h_{m\acute{a}x}$ de até -9,3% e erro de T_{esvaz} de até 1,9%).

Palavras-chave: sistema-filtro-vala-trincheira de infiltração, técnicas compensatórias, modelagem, método de PULS.

INTRODUÇÃO

As estruturas de detenção e/ou retenção, como trincheiras, valas, poços de infiltração, pavimentos permeáveis e microrreservatórios em lotes são comumente aplicados em países da Europa e na América do Norte desde 1970 e tem ganhado atenção no Brasil nos últimos anos. Suas principais vantagens sobre as medidas convencionais (rede de microdrenagem composta por condutos) são regularizar o escoamento superficial, reduzir as vazões das redes de drenagem, preservar o tempo de concentração das águas nas bacias hidrográficas e remover poluentes (URBONAS e STAHLRE, 1993; BAPTISTA et al., 2005; CANHOLI, 2005). Em outras palavras, compensar os efeitos da urbanização e da impermeabilização do solo.

Por se tratarem de soluções inovadoras no Brasil no âmbito da drenagem urbana, a representação dos fenômenos e processos físicos destas estruturas utilizando-se modelos matemáticos torna-se importante. Através da simulação de seu comportamento, possibilita-se prever resultados e consequências futuras, além de contribuir para a interpretação de seu funcionamento. Como exemplo de trabalhos envolvendo a modelagem de estruturas de infiltração, citam-se Graciosa et al. (2008) e Lima (2009). Os autores verificaram a representatividade de modelos de infiltração por meio do monitoramento da umidade do solo de trincheiras de infiltração em operação e a aplicação dos modelos no dimensionamento destas estruturas. A modelagem é, portanto, importante ferramenta para estudos de concepção e análises de viabilidade de implantação.

A escolha de um modelo hidrológico depende da complexidade do sistema, da capacidade de representação, facilidade de uso e quantidade de dados exigidos, ajuste e verificação dos parâmetros,

^{*}Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos

definição de cenários de aplicação, e estimativa de incerteza dos resultados (TUCCI, 1998).

Neste trabalho utilizou-se o método de PULS, conforme apresentado por Cudworth Júnior (1989), para modelagem do sistema Filtro-Vala-Trincheira de infiltração (FVT), construído em escala real no campus da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Selecionou-se o método de PULS por ser simples na sua concepção e capaz de representar as etapas de funcionamento do sistema e determinar as vazões de saída por meio de taxas de infiltração que não foram monitoradas. O método possibilitou a incorporação e calibração de parâmetros de entrada obtidos em campo.

DESCRIÇÃO DO SISTEMA FVT

O sistema FVT (Figura 1) foi construído em escala real para drenagem do escoamento superficial direto (ESD) produzido pelo Edifício do Departamento de Medicina (Dmed), com área construída de 1701m².

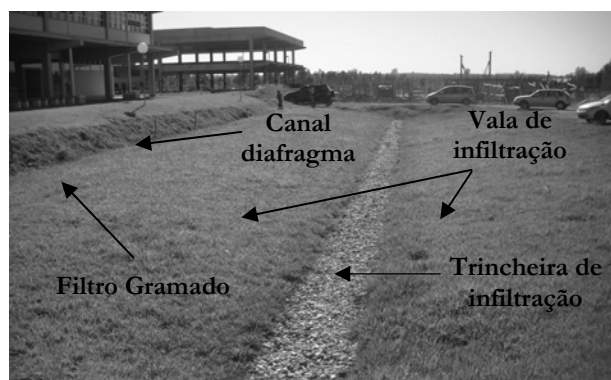


Figura 1 - Sistema Filtro-Vala-Trincheira de infiltração
(Gutierrez et al., 2010)

O sistema (FVT) foi dimensionamento pelo método da curva envelope (*Rain-Envelope Method*), conforme apresentado por Urbonas e Stahre (1993), utilizando a equação de chuva da cidade de São Carlos, elaborada por Barbassa (1991), para chuvas com período de retorno de 10 anos. No dimensionamento, considerou-se coeficiente de permeabilidade do solo de $5,00 \times 10^{-6}$ m/s, característicos de areia média argilosa (GUTIERREZ et al, 2010). Desprezaram-se as áreas de infiltração do filtro gramado, do fundo e metade das paredes da trincheira como fator de segurança. A Tabela 1 apresenta as dimensões das estruturas do sistema FVT.

Tabela 1 - Dimensões das estruturas do sistema FVT.
(Adaptado de Gutierrez et al., 2010)

	Filtro	Trincheira	Vala
Comprimento (m)	43,5	40,00	43,50
Largura (m)	4,30	0,80	8,00
Profundidade (m)	¹ n.a	1,30	0,45
Volume (m ³)	¹ n.a	² 16,64	93,96

¹não se aplica; ²considerando porosidade média da brita de 47%.

O FVT foi construído com escavação e nivelamento do solo. A vala foi coberta com placas gramadas e o interior da trincheira foi envolto com manta geotêxtil e preenchido com brita nº 3. Na parte superior da trincheira havia uma camada de areia de 0,10 m, visando auxiliar na remoção de finos e na prevenção da colmatação da trincheira, conforme recomendado por Urbonas e Stahre (1993). A camada de areia foi recoberta por uma camada de 0,05 m de seixo rolado.

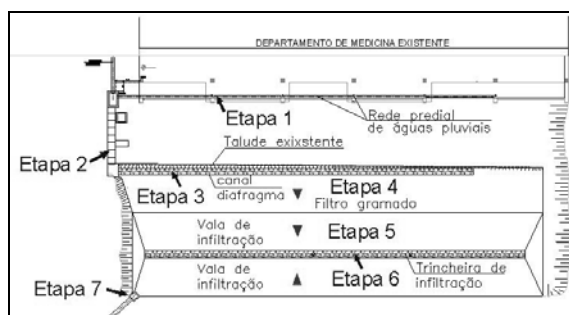


Figura 2 - Planta do sistema FVT.
(Adaptado de Gutierrez et al., 2010)

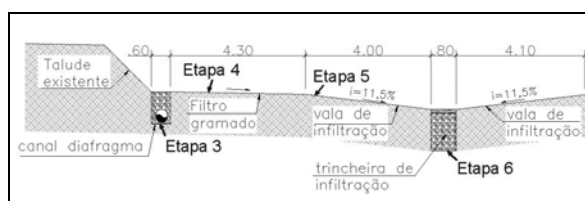


Figura 3 - Corte típico do sistema FVT.
(Adaptado de Gutierrez et al., 2010)

O funcionamento do sistema FVT seguiu as seguintes etapas (Figuras 2 e 3), segundo Gutierrez et al. (2010): (1) - O ESD produzido pelo Dmed é conduzido por meio da rede de drenagem predial a uma canaleta; (2) - na canaleta, com 0,60 metros

(m) de largura, é feita a medição de vazão do escoamento superficial por meio de vertedor instalado no canal; (3) - o escoamento é distribuído para o filtro gramado por meio de um canal diafragma, composto por uma tubulação de 250 mm de PVC perfurado (*manifold*), recoberto com brita, envolto por lona plástica; (4) - as águas pluviais escoam pelo filtro gramado (plano com inclinação de 2%), o qual contribui com perdas por infiltração e armazenamento em depressões e na remoção de poluentes; (5) - as águas são conduzidas para a vala de infiltração (plano com inclinação de 11,5%) onde também ocorrem perdas por armazenamento em depressões permeáveis e infiltração; (6) - após o escoamento pela vala de infiltração, as águas são retidas na trincheira de infiltração; (7) - em caso do extravasamento do sistema as águas são encaminhadas para a rede de drenagem convencional existente. O extravasor está a 1,75 m de altura em relação à cota de fundo da trincheira.

MONITORAMENTO DO SISTEMA FVT E OBTENÇÃO DE DADOS DE CAMPO

Ensaio em campo para determinação da capacidade de infiltração superficial foram realizados pelo método de duplo anel, em que prevalece infiltração vertical (ASTM, 2009), sendo o parâmetro representado pelo parâmetro f_v . A duração dos ensaios foi de 6 horas, conforme recomendado por ASTM (2009). Ensaio de infiltração ao longo da profundidade do solo foram realizados pelo método do poço invertido, em que prevalece infiltração horizontal (BARBASSA et al., 2009), sendo o parâmetro representado pelo parâmetro f_p . Realizou-se o umedecimento do solo durante 24 horas anteriormente à execução do mesmo, conforme recomendado por MDE (2000). Em ambos os métodos o intervalo mínimo entre ensaios no mesmo ponto foi de 48 horas para garantir que não houvesse interferência do teor umidade do solo nos resultados. Este intervalo também foi adotado em caso de precipitação na área.

A capacidade de infiltração final obtida pelos ensaios resultou em valores característicos de solo composto por frações de areia e argila, conforme Terzaghi et al. (1996). A diferença dos valores de capacidade de infiltração é consequência da compactação por máquinas durante a fase construtiva do sistema (GUTIERREZ, et al., 2010). O interva-

lo e a média dos valores balizaram a calibração da modelagem do sistema FVT (Tabela 2).

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de infiltração em campo

	Mínimo (m/s)	Média (m/s)	Máximo (m/s)	Desvio padrão
1f_v	$2,78 \times 10^{-6}$	$6,05 \times 10^{-6}$	$9,05 \times 10^{-6}$	$6,27 \times 10^{-6}$
2f_p	$1,30 \times 10^{-5}$	$2,30 \times 10^{-5}$	$3,05 \times 10^{-5}$	$1,79 \times 10^{-5}$

¹valores obtidos em ensaio de duplo anel;

²valores obtidos em ensaio de poço invertido.

Foram realizadas medidas de precipitações, vazões afluentes ao sistema FVT e dos níveis de água no interior da trincheira e da vala de infiltração. A precipitação foi monitorada utilizando um pluviômetro digital e outro não digital, instalados na estação climatológica da UFSCar, denominada estação “São Carlos – SP”, de acordo com INMET (2011), localizado a 400 m do sistema FVT.

As medidas de vazões afluentes ao sistema FVT foram realizadas empregando sensor de nível eletrônico e vertedor triangular de 90° e utilizando-se a fórmula de Thompson (Equação 1), apresentada por Lencastre (1983) e verificada em laboratório a partir do nível de água acima da crista do vertedor.

$$I = 1,42 x h_{\text{vert}}^{2,5} \quad (1)$$

onde: I é a vazão de afluente (m^3/s); e h_{vert} o nível de água acima da crista do vertedor (m).

O nível de água no interior da trincheira e vala de infiltração foi monitorado por outro sensor de nível eletrônico instalado em um poço de monitoramento. O poço de monitoramento tem em sua extensão furos que permitem a entrada de água para medição de seu nível (Figura 4).

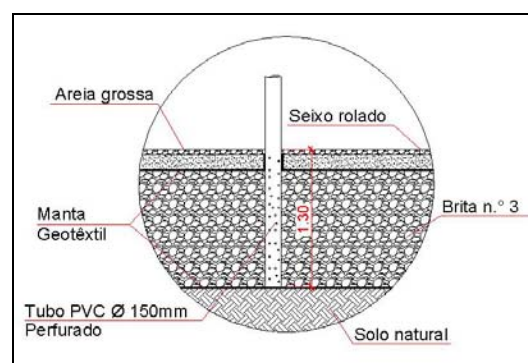


Figura 4 - Detalhe do poço de monitoramento do sistema de infiltração

MODELAGEM DO SISTEMA FVT

O método de PULS utiliza a equação de continuidade (Equação 2) em que a partir dos valores das vazões de entrada, são associadas às relações entre cota e vazão, volume e nível, e calculados a vazão de saída por infiltração e o volume de armazenamento na estrutura para cada intervalo de tempo (TUCCI, 1998).

$$I - Q = \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

onde: I é a vazão de entrada (m^3/s); Q é a vazão de infiltração (m^3/s); V é o volume de água reservado (m^3); e t o tempo (s).

O método de PULS foi utilizado por Kuo et al. (1989) para dimensionamento de trincheiras de infiltração, variando sua geometria e verificando o nível de água armazenada, e por Silva et al. (2009) para modelagem de uma trincheira e uma vala de infiltração.

A variação do volume armazenado para cada intervalo de tempo é obtido integrando-se a equação de continuidade (Equação 2) no tempo t , resultando na Equação 3 (BAPTISTA et al., 2005):

$$\int_{V_t}^{V_{t+1}} dV = \int_{t\Delta t}^{(t+1)\Delta t} I(t)dt - \int_{t\Delta t}^{(t+1)\Delta t} Q(t)dt \quad (3)$$

A Equação 3 pode ser reescrita em diferenças finitas para determinação do volume de armazenamento e da vazão de saída para cada intervalo de tempo (CHOW, 1964; BAPTISTA et al., 2005). A equação supracitada reorganizada resulta na Equação 4. As incógnitas, portanto, são V_{t+1} e Q_{t+1} , que podem ser obtidas por uma curva cota x vazão de saída (CUDWORTH JÚNIOR, 1989).

$$\frac{2V_{t+1}}{\Delta t} + Q_{t+1} = I_t + I_{t+1} - Q_t + \frac{2V_t}{\Delta t} \quad (4)$$

As vazões infiltradas nas áreas do filtro gramado e da vala de infiltração foram calculadas utilizando a capacidade de infiltração obtida em ensaio duplo anel (f_v), onde ocorre infiltração preferencialmente vertical. A infiltração da trincheira foi calculada utilizando valores obtidos em ensaios de poço invertido (f_p), onde ocorre infiltração preferencialmente horizontal e a diferentes profundidades. Considerou-se o fundo da trincheira como área de infiltração, pois, ao desprezar o fundo da estrutura como superfície de infiltração pode-se estar subes-

timando a vazão de infiltração nesta fase inicial de operação, conforme evidenciado por Souza (2002) e Graciosa (2005);

Assim, a vazão de infiltração na trincheira foi calculada por meio do produto da área de infiltração pela capacidade de infiltração (Equações 5 e 6).

$$Q_t = f_p \times L_t \times l_t \quad (5)$$

e,

$$Q_p(h) = f_p \times h(t) \times L_t \times 2 \quad (6)$$

onde: Q_t é a vazão de infiltração pelo fundo da trincheira (m^3/s); f_p é a capacidade de infiltração da trincheira, obtida em ensaios de campo de poço invertido (m/s); L_t e l_t são comprimento e a largura da trincheira, respectivamente (m); Q_p é a vazão de infiltração pelas paredes da trincheira (m^3/s); e $h(t)$ o nível de água na trincheira (m) para cada intervalo de tempo t .

A vazão de infiltração da trincheira Q_{trinch} é a somatória da vazão pelas paredes e pelo fundo da mesma (Equação 7).

$$Q_{trinch} = \sum_{t=0}^T Q_f(t) + Q_p(t) \quad (7)$$

onde: Q_{trinch} é a vazão por infiltração da trincheira (m^3/s)

A vazão de infiltração da vala foi obtida pela Equação 8, para representação de situações com nível de água armazenada superior a 1,30 m, cota a partir da qual o volume excedente é armazenado.

$$Q_{vala}(h) = f_v \times L_v(t) \times l_v(t) \quad (8)$$

onde: Q_{vala} é a vazão por infiltração da vala de infiltração (m^3/s); f_v é a capacidade de infiltração, obtida em ensaios de campo com duplo anel (m/s); L_v é o comprimento médio da vala (m); e l_v a largura da vala (m), sendo l_v determinada a partir do nível de água na vala e sua forma geométrica, portanto:

$$l_v(h) = 2 \times (h(t) / \tan 6,42^\circ) \quad (9)$$

A vazão de infiltração do filtro gramado e da lateral da vala a montante da trincheira (etapas 4 e 5, das Figuras 2 e 3) foi obtida pela Equação 10, para os instantes em que houve escoamento ao longo do mesmo, ou seja, enquanto houve vazão de entrada no sistema de infiltração.

$$Q_{\text{filtro}} = f_v \times [(L_f \times l_f) + (L_v \times l_v \times 0,5)] \quad (10)$$

onde: L_f e l_f são o comprimento e a largura do filtro gramado (m).

Portanto:

$$Q(h) = Q_{\text{rinch}}(t) + Q_{\text{vala}}(t) + Q_{\text{filtro}} \quad (11)$$

O fluxograma da Figura 5 apresenta esquematicamente as etapas da modelagem do sistema FVT e são descritos a seguir.

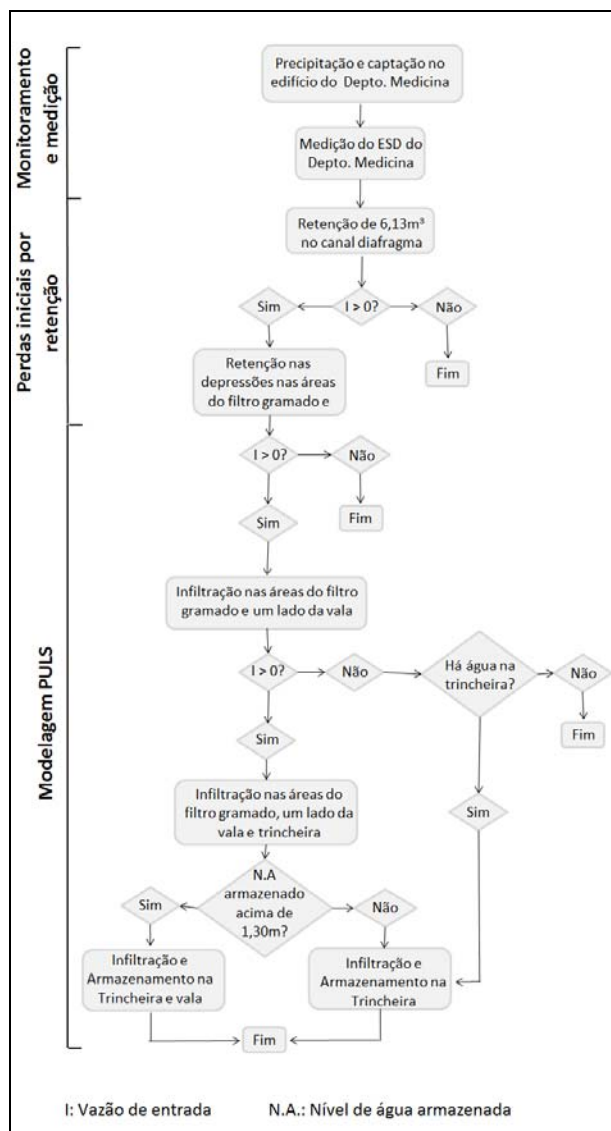


Figura 5 - Fluxograma ilustrativo do algoritmo empregado para modelagem pelo método de PULS

- 1) Determinou-se a vazão de entrada no filtro gramado (etapa 4 das Figuras 2 e 3) corresponde à vazão medida no canal retangular (etapa 2 da Figura 2), considerando a perda no canal diafragma de distribuição (etapa 3 das Figuras 2 e 3), correspondente ao volume 6,13m³. O escoamento superficial gerado nas áreas do filtro gramado e vala de infiltração foi desconsiderado devido à impossibilidade de determinação do mesmo por medição, uma vez que são áreas de drenagem e, portanto, recebem o ESD do Dmed.
- 2) Foram considerados no balanço as perdas por infiltração no solo, representada pelos parâmetros f_v (infiltração nas áreas do filtro gramado) e f_p (infiltração nas paredes e fundo da trincheira), e o armazenamento em depressões permeáveis, representado pelos parâmetros h_f (lâmina retida nas áreas do filtro gramado), h_v (lâmina retida nas áreas da vala, a montante da trincheira). Tais perdas referem-se às etapas 4 e 5 das Figuras 2 e 3, respectivamente, nos intervalos de tempo em que houve escoamento de entrada no sistema FVT;
- 3) No caso de haver vazão afluyente ao sistema, foi contabilizada a infiltração nas áreas do filtro, um lado da vala e trincheira. Caso contrário, a infiltração ocorreu somente do volume retido na própria trincheira de infiltração;
- 4) No caso de haver infiltração e armazenamento da vala de infiltração para nível de água armazenada acima de 1,30 metros, considerou-se a hipótese de que a infiltração da vala (infiltração preferencialmente vertical) não interfere na infiltração das paredes da trincheira (preferencialmente horizontal) e vice-versa para simplificação de execução do método.

Para modelagem do sistema FVT pelo método de PULS foram realizadas adaptações no método original visando a calibração dos parâmetros de infiltração (f_v e f_p) e de retenção (h_v e h_f). O cálculo do nível de armazenamento e da vazão de saída do sistema FVT seguiu os procedimentos descritos abaixo. Os procedimentos 3 e 4 foram adaptados visando a calibração de parâmetros f_v e f_p .

1. Traçado da curva cota x vazão de descarga por infiltração, que corresponde à saída do sistema FVT;

2. No instante $t+1$, os termos da direita da Equação 4 são conhecidos e determina-se $2V_{t+1}/\Delta t + Q_{t+1}$;
3. A partir de $2V_{t+1}/\Delta t + Q_{t+1}$ é obtido o nível de água armazenada pela curva cota x descarga;
4. Conhecido o nível de água, calcula-se a vazão por infiltração.

A repetição desse processo para cada intervalo de tempo permite a obtenção do hidrograma efluente e o volume armazenado no sistema.

A modelagem foi realizada inserindo-se dados de vazões afluentes ao sistema, obtidas através do monitoramento por equipamento eletrônico, e obtendo-se como resposta níveis de água na trincheira e na vala e tempos de esvaziamento.

Analísaram-se os resultados de cálculo de nível de água armazenada na trincheira e na vala verificando-se o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (1970) (Equação 12), graficamente, verificando-se erros de níveis de água máximo na trincheira e vala e erros dos tempos de esvaziamento da estrutura, por meio da comparação dos dados calculados com observados.

$$NS = 1 - \frac{\sum (obs - calc)^2}{\sum (obs - obs)^2} \quad (12)$$

onde: NS é o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, sendo o resultado tanto melhor quanto mais próximo de 1; *obs* são os valores observados; e *calc* são os valores calculados.

Para a modelagem do sistema FVT foram necessárias precipitações de intensidade e/ou duração que permitiram modelar a estrutura como um reservatório de águas pluviais, em outras palavras, capazes de armazenar água na estrutura. Não foi possível comparar as vazões de infiltração calculadas com observados por não se dispor de equipamento de medidas de infiltração de água e de umidade do solo. Os eventos foram selecionados para modelagem seguindo os critérios abaixo descritos:

1. Existência de vazões afluentes medidas, descontadas as perdas, e;
2. Existência de lâminas superiores a 10mm no interior da trincheira.

Dessa forma, foram selecionados 9 eventos monitorados no ano de 2011 para modelagem do sistema FVT, descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Eventos selecionados para modelagem do sistema FVT. Datas referentes ao ano de 2011.

Data do evento	Precip. (mm)	*Intens. média (mm/min)	Tr (anos)	Nível máximo observado (m)	Tempo de esvaziamento observado (min)
23/jan	10,80	0,36	0,0	0,14	111
04/fev	41,79	0,12	1,4	0,83	226
14/fev	13,72	0,57	0,1	0,16	104
16/fev	26,92	0,59	1,0	0,55	189
23/fev	14,22	0,44	0,1	0,34	148
26/fev	40,39	0,47	3,3	1,33	278
27/fev	49,28	0,54	8,6	1,55	383
12/mar	22,10	0,54	0,4	0,64	213
28/mar	27,43	0,46	0,7	1,26	258

* considerada toda a duração do evento chuvoso

Análise de sensibilidade

Verificou-se a sensibilidade dos parâmetros h_f (lâmina retida nas áreas do filtro gramado), h_v (retenção nas áreas da vala de infiltração), f_v (infiltração nas áreas do filtro gramado) e f_p (infiltração nas paredes e fundo da trincheira), apresentados na Tabela 4. Fez-se a análise de sensibilidade dos parâmetros que representam retenção em áreas permeáveis separadamente daqueles que representam a infiltração de água no solo, a partir de valores médios como referência.

Tabela 4- Parâmetros utilizados para a análise de sensibilidade com vistas à calibração do modelo PULS

Parâmetros calibrados	Intervalo de valores	Unidade
h_f	0 a 20,0	mm
h_v	0 a 12,5	mm
f_v	Obtidos em ensaios de infiltração	m/s
f_p	Obtidos em ensaios de infiltração	m/s

Considerou-se evento de 16/02/2011 para a análise de sensibilidade em que se registraram valores intermediários de precipitação, período de retorno, nível de água armazenada na trincheira e tempo de esvaziamento, representativo dos demais eventos. Os resultados da análise de sensibilidade são apresentados nas Tabelas 5 e 6 e Figuras 6 e 7.

Constatou-se que os parâmetros h_v , h_f , f_v e f_p são sensíveis à calibração para modelagem pelo método de PULS. Os parâmetros h_v e h_f influenciam de forma mais acentuada no nível máximo armazenado na trincheira e, em menor magnitude, nos tempos de esvaziamento (Figura 7). Os parâmetros f_v e f_p influenciam de forma mais expressiva nos tempos de esvaziamento do sistema e nível máximo armazenado na trincheira e no formato da curva de nível de armazenamento calculada (Figura 6).

Tabela 5 - Sensibilidade dos parâmetros de retenção h_v e h_f

Variação do parâmetro (%)	Valor de h_v (mm)	Valor de h_f (mm)	Erro nível máximo (%)	Erro tempo de esvaziamento (%)
-90	0,6	1,0	22,0	8,5
-60	2,5	4,0	10,2	6,4
-30	4,4	7,0	0,0	2,1
0	6,3	10,0	0,0	0,0
30	8,1	13,0	-8,5	-2,1
60	10,0	16,0	-16,9	-6,4
90	11,9	19,0	-25,4	-10,6

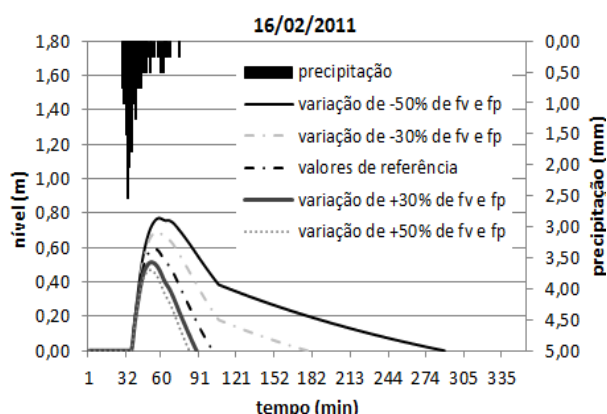


Figura 6 - Resultado da variação dos parâmetros de infiltração f_v e f_p

Tabela 6 - Sensibilidade dos parâmetros de retenção f_v e f_p

Variação do parâmetro	Valor de f_v (m/s)	Valor de f_p (m/s)	Erro nível máximo (%)	Erro tempo de esvaziamento (%)
-50	$3,03 \times 10^{-6}$	$1,15 \times 10^{-5}$	30,5	391,5
-30	$4,24 \times 10^{-6}$	$1,61 \times 10^{-5}$	16,9	159,6
-15	$5,14 \times 10^{-6}$	$1,96 \times 10^{-5}$	8,5	44,7
0	$6,05 \times 10^{-6}$	$2,30 \times 10^{-5}$	0,0	0,0
15	$6,96 \times 10^{-6}$	$2,65 \times 10^{-5}$	-6,8	-12,8
30	$7,87 \times 10^{-6}$	$2,99 \times 10^{-5}$	-13,6	-23,4
50	$9,08 \times 10^{-6}$	$3,45 \times 10^{-5}$	-20,3	-34,0

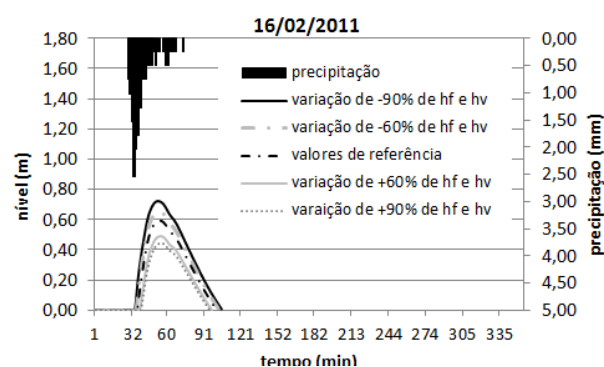


Figura 7 - Resultado da variação dos parâmetros de retenção h_f e h_v

Calibração

Para calibração, simularam-se os eventos com características distintas de precipitação (total precipitado e período de retorno) e de retenção na trincheira e vala (nível de água e tempo de esvaziamento). Foram utilizados os eventos ocorridos em 23/01/2011, 16/02/2011 e 27/02/2011.

Para a calibração do parâmetro h_f considerou-se o valor máximo de 20 milímetros, característico de áreas planas, e para calibração de h_v considerou-se valor máximo de 12,5 milímetros, característico de áreas com declividade suave (HORTON, 1935 apud CHOW, 1964). Perdas por interceptação vegetal foram desprezadas, uma vez que não havia vegetação densa na área de estudo.

Os parâmetros f_v e f_p foram calibrados a partir do intervalo de valores obtidos em ensaios de infiltração em campo, conforme apresentado na Tabela 2.

A calibração resultou em valores médios de coeficiente de Nash - Sutcliffe (NS), erro relativo de nível máximo de armazenamento ($h_{máx}$) e erro rela-

tivo de tempo de esvaziamento (T_{esvaz}) de 0,65, 11% e 19%, respectivamente. Os parâmetros h_f e h_v calibrados resultaram em valores médios de 7,8 e 14,3 milímetros, respectivamente. Os parâmetros f_v e f_p calibrados resultaram em valores médios de $3,63 \times 10^{-6}$ m/s (13,1 mm/h) $1,37 \times 10^{-5}$ m/s (49,3 mm/h), respectivamente. Na Tabela 7 e nas Figuras 8 a 10 são apresentados os resultados da calibração dos parâmetros.

Tabela 7 - Resultados da calibração dos parâmetros h_f , h_v , f_v e f_p pelo método de PULS

	Data do evento			Média
	23/jan	16/fev	27/fev	
Precipitação (mm)	10,80	26,92	49,28	-
**Intensidade (mm/min)	0,36	0,59	0,54	-
h_f (mm)	8	13	3	7,8
h_v (mm)	15	20	8	14,3
f_v (m/s)	$2,78 \times 10^{-6}$	$4,60 \times 10^{-6}$	$4,00 \times 10^{-6}$	$3,79 \times 10^{-6}$
f_p (m/s)	$1,30 \times 10^{-5}$	$1,30 \times 10^{-5}$	$1,50 \times 10^{-5}$	$1,37 \times 10^{-5}$
$h_{\text{máx}}$ observado (m)	0,14	0,55	1,55	-
$h_{\text{máx}}$ calculado (m)	0,18	0,58	1,54	-
T_{esvaz} observado (min)	111	189	443	-
T_{esvaz} calculado (min.)	63	164	447	-
NS nível armazenado	0,10	0,90	0,94	0,65
Erro $h_{\text{máx}}$ (%)	26,7	6,1	-0,6	11,1
Erro T_{esvaz} (%)	-43,2	-13,2	0,9	*19,1

*considerada média absoluta; ** considerada toda a duração do evento chuvoso

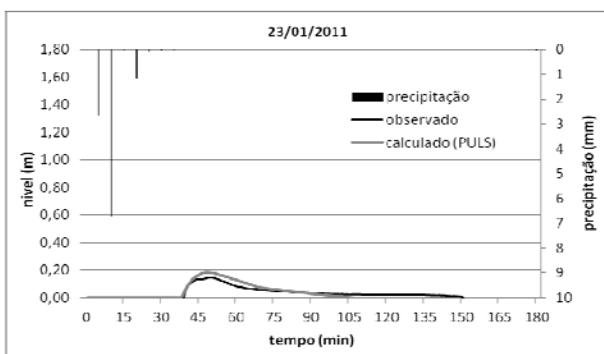


Figura 8 - Níveis de água armazenada na trincheira observados, e calculados por PULS para evento do dia 23/01/2011

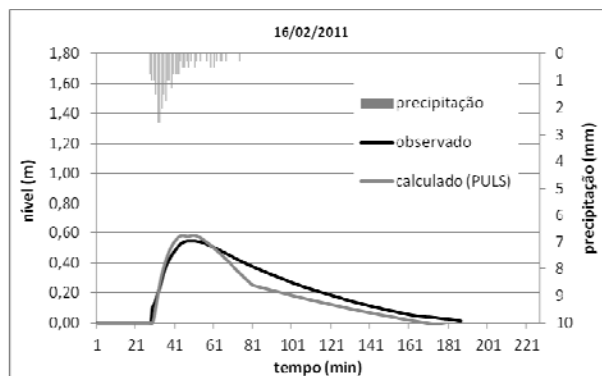


Figura 9 - Níveis de água armazenada na trincheira, observados e calculados por PULS para evento do dia 16/02/2011

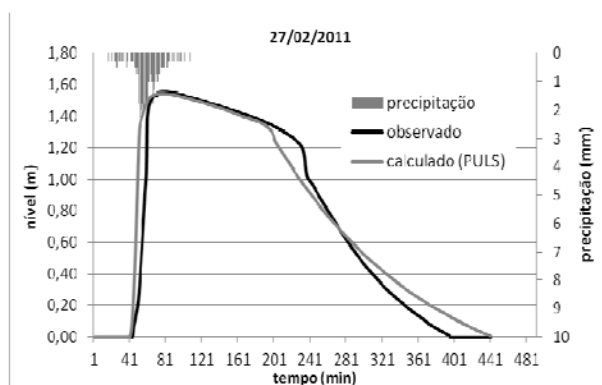


Figura 10 - Níveis de água armazenada na trincheira, observados e calculados por PULS para evento do dia 27/02/2011

Validação

Para aplicação do método de PULS foram consideradas algumas hipóteses, a saber: foram adotados valores médios dos parâmetros calibrados; a capacidade de infiltração foi suposta constante no tempo; e as perdas no sistema foram consideradas constantes para todos os eventos monitorados.

A validação utilizando-se valores médios de cada parâmetro calibrado apresentou valores médios de NS, erro relativo de $h_{\text{máx}}$ e erro relativo de t_{esvaz} de 0,43, 29% e 36%, respectivamente (Tabela 8 e Figuras 11 a 16).

O método de PULS, ao considerar capacidade de infiltração constante, não representa a variação entre a capacidade de infiltração inicial e final do solo proporcionada pelo umedecimento do solo, seja em eventos consecutivos ou de longa duração.

Outro importante fator são os valores iniciais de retenção em depressões permeáveis nas áreas do filtro e vala gramados e no canal diafragma que foram desconsiderados no caso de eventos recorrentes.

Tais hipóteses podem ser responsáveis pelas limitações de representatividade do modelo em todos os eventos monitorados, impossibilitando as simulações contínuas e a representação dos efeitos de redução das taxas de infiltração e da satisfação das perdas iniciais em depressões existentes em eventos recorrentes e que atuam sobre os níveis de armazenamento e tempos de esvaziamento do sistema, interferindo nos resultados da modelagem. A influência dessas limitações sobre as simulações puderam ser observadas, por exemplo, no evento de 12/03/2011 (Figura 15), que corresponde a 54% da precipitação total observada no dia.

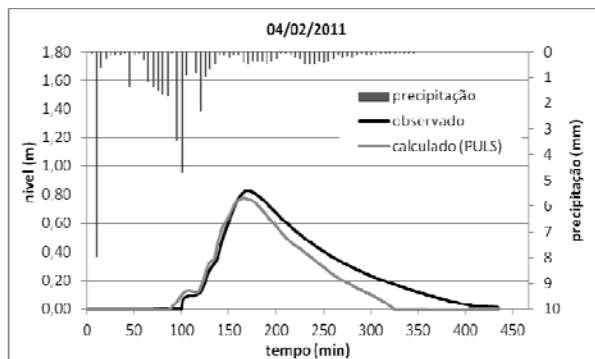


Figura 11 - Níveis de água armazenada na trincheira observados e validados por PULS para evento do dia 04/02/2011

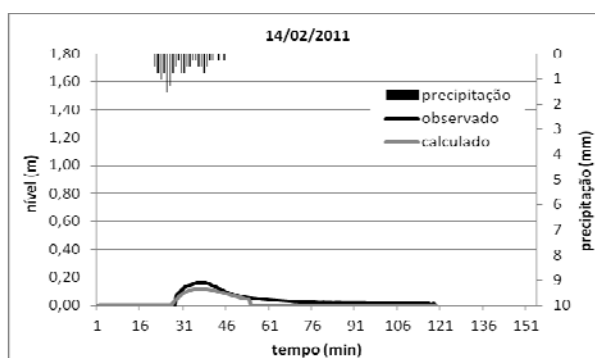


Figura 12 - Níveis de água armazenada na trincheira observados e validados por PULS para evento do dia 14/02/2011

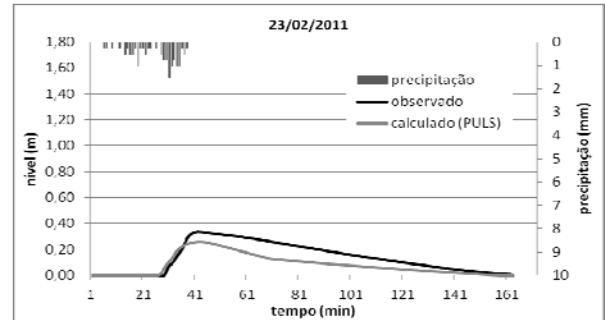


Figura 13 - Níveis de água armazenada na trincheira observados e validados por PULS para evento do dia 23/02/2011

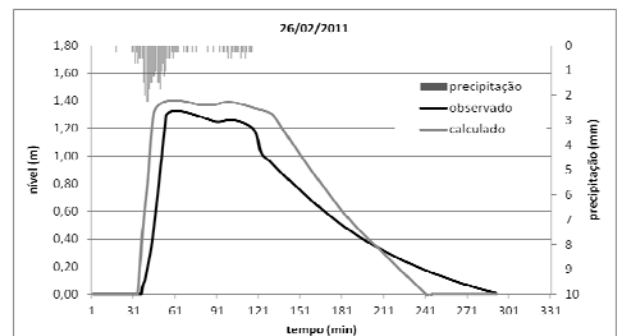


Figura 14 - Níveis de água armazenada na trincheira observados e validados por PULS para evento do dia 26/02/2011

A utilização de valores médios dos parâmetros calibrados não representou satisfatoriamente o funcionamento do sistema em todos os eventos simulados. Entretanto, ao analisar eventos individualmente, observam-se resultados de NS de até 0,98, erro de $h_{\text{máx}}$ de até -9,3% e erro de T_{esvaz} de até 1,9%. Possíveis melhorias podem ser obtidas se representados os efeitos de decaimento e ascensão dos valores de f_v , f_p , h_v e h_f .

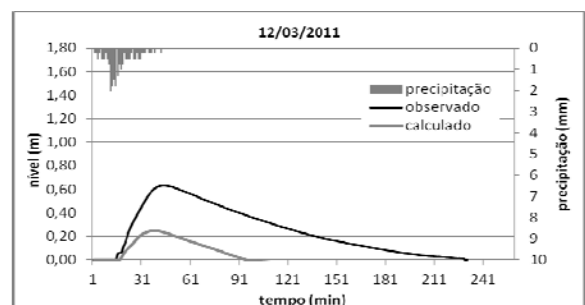


Figura 15 - Níveis de água armazenada na trincheira observados e validados por PULS para evento do dia 12/03/2011

Tabela 8 - Resultados da validação dos eventos modelados pelo método de PULS

Dados observados						Dados calculados		Comparações		
Evento	Precipitação (mm)	**Intensidade média (mm/min)	Tr (anos)	$h_{\text{máx}}$ obs. (m)	$T_{\text{esvaz.}}$ obs. (min)	$h_{\text{máx}}$ calc. (m)	$T_{\text{esvaz.}}$ calc. (min)	NS nível de água	Erro $h_{\text{máx}}$ (%)	Erro $T_{\text{esvaz.}}$ (%)
04/fev	41,79	0,12	1,4	0,83	226	0,80	135	0,94	-3,1	-35,4
14/fev	13,72	0,57	0,1	0,17	104	0,07	21	0,30	-57,0	-77,9
23/fev	14,22	0,44	0,1	0,34	148	0,23	127	0,51	-30,4	-9,5
26/fev	40,39	0,47	3,3	1,33	278	1,39	220	0,81	4,9	-20,5
12/mar	22,10	0,54	0,4	0,64	213	0,20	56	-0,98	-68,0	-71,4
28/mar	27,43	0,46	0,7	1,26	258	1,14	263	0,98	-9,3	1,9
Média								0,43	*28,8	*36,0

*considerada média absoluta; ** considerada toda a duração do evento chuvoso

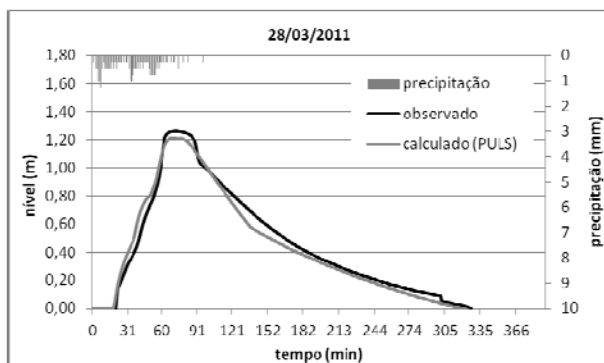


Figura 16 - Níveis de água armazenado na trincheira observados e validados por PULS para evento do dia 28/03/2011

CONCLUSÃO

O sistema FVT é complexo e envolve o funcionamento de estruturas de infiltração conectadas. A simulação representou as etapas de funcionamento do sistema, individualmente ou em conjunto, como a infiltração nas áreas do filtro gramado, na vala e na trincheira de infiltração. Além disso, possibilitou determinar as vazões por infiltração, os níveis e os volumes de armazenamento de água, bem como os tempos de funcionamento e de esvaziamento das estruturas conectadas.

Para a modelagem do sistema FVT utilizando o método de PULS foi realizada a adaptação do modelo para calibração de parâmetros de infiltração. Também foram calibrados os parâmetros de

retenção para representação das perdas iniciais por armazenamento em depressões permeáveis.

Quando analisados globalmente, o método apresentou erros relativos de $h_{\text{máx}}$ entre -68% a 27%, erros relativos de $T_{\text{esvaz.}}$ entre -78% a 1,9% e valores de NS entre -0,98 a 0,98. Evidentemente, foram observadas variações nos resultados das simulações de evento para evento, decorrentes da simplificação matemática. Acredita-se que tal fato deve-se às hipóteses simplificadoras adotadas, decorrentes da variação da infiltração e da lâmina armazenada em depressões do solo com o tempo. Essas simplificações não foram representativas de fenômenos hidrológicos envolvidos, pois não representam os efeitos do decréscimo da taxa de infiltração em função do umedecimento do solo e da variação da lâmina inicial armazenada em depressões em eventos consecutivos. O cômputo da variação da umidade no tempo pode aumentar a precisão das simulações, no entanto deve-se avaliar o benefício decorrente da introdução desse nível de complexidade.

Quando analisadas as simulações para cada evento individualmente, observam-se resultados bastante satisfatórios e erros em níveis aceitáveis, com valores próximos aos observados (NS de até 0,98, com erro de $h_{\text{máx}}$ de -9,3% e erro de $T_{\text{esvaz.}}$ de até 1,9%). Pode-se observar melhores resultados para níveis de armazenamento maiores, constatando que houve influência do nível de armazenamento sobre os erros de $h_{\text{máx}}$ e $T_{\text{esvaz.}}$ e valores de NS. Ressalta-se também que os menores registros de nível apresentam os maiores erros de leitura, fato inerente ao equipamento.

Em contraste com a simplicidade do modelo, observou-se representatividade do complexo

funcionamento real do sistema e coerência nas curvas de armazenamento de água, demonstrando ser alternativa para a verificação do dimensionamento e simulação da operação de estruturas de infiltração.

Para trabalhos futuros e avanços na modelagem do sistema, recomenda-se o monitoramento do teor de umidade do solo e da interação vala - trincheira na frente de umedecimento do mesmo; modelagem do sistema utilizando métodos de decréscimo da taxa de infiltração e simulações contínuas; e análise de incertezas das simulações hidrológicas.

REFERÊNCIAS

- ASTM. American Society for Testing and Material. D 3385-09: *Standard test method for infiltration rate of soils in field using Double-Ring Infiltrometer*. Pennsylvania, 2009.
- BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. *Técnicas compensatórias em Drenagem Urbana*. Porto Alegre: ABRH, 2005. 266 p.
- BARBASSA, A. P. *Simulação do Efeito da Urbanização sobre a Drenagem Pluvial da Cidade de São Carlos*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1991.
- BARBASSA, A. P.; OLIVEIRA JÚNIOR, C. X.; GUTIERREZ, L. A. R.; LUCAS, A. H. *Coefficiente de permeabilidade em ensaio de poço invertido: efeito do tempo de umedecimento prévio e métodos de cálculo*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18, 2009. Campo Grande. Anais...Campo Grande: ABRH, 2009.
- CANHOLI, A. P. *Projetos Hidráulicos*. In: Drenagem urbana e controle de enchentes. São Paulo: Oficina de textos, 2005, p.145-174.
- CHOW, V. T. *Handbook of applied hydrology: a compendium of water-resources technology*. MacGraw-Hill, 1964.
- CUDWORTH JÚNIOR, A. G. *A water resources technical publication*. In: Flood Hydrology Manual. United States Government Printing Office. Denver, 1992. p. 133 – 175.
- GRACIOSA, M. C. P. *Trincheiras de infiltração como tecnologia alternativa em drenagem urbana: modelagem experimental e numérica*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005. 232p.
- GRACIOSA, M. C. P.; MENDIONDO, E. M.; CHAUDHRY, F. H. *Metodologia para dimensionamento de trincheiras de infiltração para controle do escoamento superficial na origem*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 13, n.2, p. 207-214, 2008.
- GUTIERREZ, L. A. R.; LUCAS, A. H.; ANGELINI SOBRINHA, L.; BARBASSA, A. P.; MORUZZI, R. B.; TEIXEIRA, B. A. N. *Problemas construtivos em um sistema vala-trincheira de infiltração*. In 14º Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2010. Porto. Anais...Porto: 2010.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em <http://www.inmet.gov.br/sim/sonabra/convencionais.php>. Acesso em 23 de março de 2011.
- KUO, C. Y.; ZHU, J. L.; DOLLARD, L. A. *A study of infiltration trenches*. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University. Department of Civil Engineering. 1989.
- LENCASTRE, A. *Medições Hidráulicas. Orifícios e Descarregadores*. In: Hidráulica Básica. Edição Luso-Brasileira, 1983. p.305 - 352.
- LIMA, V. C. G. R. *Análise experimental e numérica de trincheira de infiltração em meio não saturado*. 2009. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Hidráulica e Saneamento. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade Estadual de São Paulo. São Carlos, 2009.
- MDE. Maryland Department of the Environment. *Maryland Stormwater Design Manual*. Center for Watershed Protection. v. 3, 2000.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. U. *River flow forecasting through conceptual model part I - A discussion of principles*. Journal of Hydrology, v. 10, Issue 3, p. 282-290, 1970.
- SILVA, A.; NASCIMENTO, N. O.; SEIDL, M.; VIEIRA, L. *Caracterização do escoamento urbano de origem viária e remoção de seus poluentes por meio de técnicas compensatórias*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18, 2009. Campo Grande. Anais...Campo Grande: ABRH, 2009.

SOUZA, V. B. *Estudo experimental de trincheiras e infiltração no controle do escoamento superficial*. Tese (Doutorado). Instituto de Pesquisas Hidráulicas e Saneamento, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. 127p.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. *Hydraulic and mechanical properties of soils*. In: _____ *Soil mechanics in engineering practice*. New York: John Wiley and Sons. 3. ed. 1996. p. 71-210.

TUCCI, C. E. M. *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1998. 669p.

URBONAS, B; STAHRE, D. *Stormwater: Best management practices and detention for water quality, drainage and CSO management*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993. 449p.

Filter-Grass, Swale And Infiltration Trench Modeling By PULS Method Adapted For Parameters Calibration

ABSTRACT

A full-scale system composed by filter-grass, swale and infiltration trench (FST) was made and modeled aiming to contribute to research and application of Best Management Practices. Rainwater, inflow and water levels in the system were measured and used as input to the PULS method. The infiltration loading rate was assumed constant in time and the storage effect on the flat area was ignored for both isolated and consecutive storms in order to simplify modeling. The system was calibrated using the infiltration loading on the swale (f_v) and in the trench area (f_p) as well the depression storages on the filter-grass (h_f) and swale areas (h_p). The Nash-Sutcliffe (NS) coefficient, the storage ($h_{m\acute{a}x}$) and the trench emptying time (T_{esvaz}) errors were used for model evaluation, which resulted in 0.65; 11% and 19%, respectively. The validation resulted in an NS of 0.43, $h_{m\acute{a}x}$ of 29% and T_{esvaz} of 36%. The model simplification may have caused model inaccuracy for consecutive and long term events. On the other hand, for simple events the model properly simulated the FST system operation resulting in an NS of up to 0.98, $h_{m\acute{a}x}$ error up to -9,3% and T_{esvaz} error up to 1.9%.

Key-words: filter - swale - trenches system, best management practices, modeling, PULS method