

Metodologia para o Dimensionamento de Trincheiras de Infiltração para o Controle do Escoamento Superficial na Origem

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

Departamento de Hidráulica e Saneamento, EESC/USP
melissa.graciosa@gmail.com; emm@sc.usp.br; fazal@sc.usp.br

Recebido: 26/03/07 – revisado: 11/04/07 – aceito: 07/05/08

RESUMO

É proposta uma metodologia para o dimensionamento de trincheiras de infiltração para o controle do escoamento superficial no lote onde é gerado. O método baseia-se no balanço hídrico, em que o volume de entrada é estimado com base na curva idf, e o de saída, com base na taxa de infiltração do solo. Para a estimativa da taxa de infiltração, são apresentadas duas metodologias: uma baseada no modelo de infiltração horizontal de Philip, e outra baseada em um modelo bidimensional de simulação da infiltração por meio da equação de Richards'. Os modelos propostos foram calibrados por meio de ensaios experimentais realizados em dois tipos de solo, um arenoso e outro argiloso.

Palavras-chave: Dimensionamento de trincheiras de infiltração; infiltração bidimensional; modelos de infiltração.

INTRODUÇÃO

Trincheiras de infiltração são dispositivos de controle do escoamento superficial na origem, que têm a função de coletar, armazenar e infiltrar as águas de chuva (Mikkelsen e Jacobsen, 1993). Este tipo de instalação visa restabelecer, em parte, a infiltração das águas pluviais, componente do ciclo hidrológico que se perde parcial ou totalmente com a urbanização da bacia hidrográfica.

As trincheiras podem ser superficiais ou subterrâneas, e preenchidas ou não com brita. A geometria longa e estreita objetiva reduzir a área de base, que tende a colmatar devido às partículas sólidas presentes na água infiltrada, ao mesmo tempo em que aumenta a relação entre a principal área de infiltração (os lados) e o volume de armazenamento (Mikkelsen et al., 1996). O preenchimento com brita, ou outros materiais, embora reduza o volume útil da trincheira, propicia maior estabilidade do talude e melhores condições de segurança, além de permitir que a área em planta seja aproveitada para outros fins. Para que o uso de trincheiras seja aplicado em larga escala, são necessárias maiores constatações de seu desempenho a longo prazo, bem como ferramentas que auxiliem no projeto e dimensionamento.

OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia de dimensionamento de trincheiras de infiltração de águas pluviais, baseada no balanço hídrico, para duas diferentes formulações de modelos de infiltração.

Dimensionamento de trincheiras de infiltração

Uma vez determinado o período de retorno a ser atendido por um sistema de trincheiras de infiltração, deve-se proceder aos demais critérios de projeto pertinentes. Uma das etapas a ser cumprida é o dimensionamento das trincheiras. Para tanto, a literatura apresenta variados métodos, que, em geral, baseiam-se no balanço hídrico no interior da trincheira. Desta forma, o volume de armazenamento é obtido subtraindo-se o volume de saída do volume de entrada.

As principais variações entre os métodos encontrados na literatura consistem na forma de obtenção dos volumes de entrada e saída, seja pelo método do hidrograma unitário, seja pelo método racional, ou, no caso dos volumes de saída, qual o modelo de infiltração adotado. O método proposto neste trabalho utiliza a curva idf para a estimativa do volume de entrada e os modelos de infiltração de

Philip e Richards' para a estimativa do volume de saída.

METODOLOGIA

Os modelos tradicionais de infiltração, tais como Philip, Horton, Kostikov e Green & Ampt, entre outros, usualmente quantificam a infiltração de forma unidimensional. Entretanto, no caso das trincheiras de infiltração, o movimento da água no entorno da estrutura ocorre nas duas direções de sua seção transversal, e sofre uma variação, ainda que pequena, ao longo do comprimento da trincheira.

Deste modo, o ajuste a um modelo unidimensional forneceria uma aproximação pouco condizente com a realidade, razão pela qual buscou-se um modelo que descrevesse o movimento da água no solo não saturado de forma bidimensional, o que é feito pelo modelo de Richards. Os modelos empíricos de infiltração possibilitam estimar somente o volume de infiltração, ao passo que o modelo de Richards', além do cálculo do volume de infiltração, descreve também o movimento da água no solo, considerando suas condições iniciais de umidade. Entretanto, o modelo de infiltração horizontal de Philip revelou-se adequado para estimativas iniciais e cálculos aproximados de pré-dimensionamento, em situações em que não se dispõe de dados precisos sobre as características físicas do solo, necessários à aplicação do modelo de Richards'.

Modelo de Richards' – programa *BIDISUL*

O modelo baseia-se na substituição da Equação de Darcy-Buckingham para a quantificação do movimento da água em meio não saturado (**Equação 1**) na Equação da Continuidade (**Equação 2**), originando uma equação diferencial que descreve o movimento da água no solo em função da condutividade hidráulica não saturada $K(\theta)$.

$$\vec{q} = -k(\theta)\nabla\phi t \quad (1)$$

Em que:

$k(\theta)$ é a condutividade hidráulica em função da umidade, e

ϕt = potencial total da água no solo, dado pela soma dos potenciais de pressão (ϕp), pneumático (ϕn), mátrico (ϕm), gravitacional (ϕg), de temperatura (ϕT) e osmótico (ϕO).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{q} \quad (2)$$

Em que:

t é tempo;

θ é a umidade volumétrica, e

q é a densidade de fluxo (relação entre a vazão que passa pelo solo e a área efetiva de escoamento, com dimensão $L T^{-1}$);

Substituindo 1 em 2 tem-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (k(\theta)\nabla\phi t) \quad (3)$$

A Equação 3 é conhecida como Equação de Richards', e pode ser escrita em termos de condutividade hidráulica não saturada ou em termos de potencial mátrico (curva de retenção).

Em 1995, *Tabuada et al.* propuseram um método que quantifica bidimensionalmente o campo de umidade em torno de sulcos curtos de irrigação, estruturas utilizadas na agricultura, semelhantes em geometria e comportamento hidráulico às trincheiras de infiltração. Graciosa (2005) adaptou o modelo de Tabuada *et al.* (1995) para a quantificação da infiltração em trincheiras. O equacionamento detalhado do modelo e a descrição do programa computacional, original e adaptado, são apresentados em: Tabuada (1995), Graciosa (2005) e Graciosa (2008). O modelo tem as seguintes características:

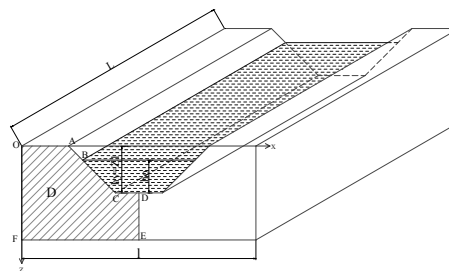


Figura 1 – Domínio do modelo de infiltração bidimensional. Fonte: Tabuada *et al.* (1995).

- **Domínio:** a seção transversal da trincheira é trapezoidal, podendo ser assumida a condição particular de inclinação nula de talude, que gera seção retangular, e é adotada a condição de simetria mostrada na **Figura 1**.
- **Parâmetros:** curva de retenção $m=f(\theta)$, ajustada pelo modelo de van Genuchten

(1980), dada pela **Equação 4**, e condutividade hidráulica não saturada do solo $k(\theta)$, ajustada pelo modelo de Mualem (1976, *apud Libardi, 2000*), dada pela **Equação 5**;

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha_v \cdot |\phi_m|)^n\right]^m} \quad (4)$$

Em que:

θ = umidade; θ_r = umidade residual; θ_s = umidade de saturação; α_v , m , n = parâmetros do modelo.

$$K(\theta) = K_0 \omega^l \left[1 - \left(1 - \omega^{\frac{1}{m}}\right)^m\right]^2 \quad (5)$$

Em que:

$$\omega = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, e$$

$l = 0,5$ para solos de textura média a arenosa.

- **Condições iniciais:** umidade inicial;
- **Condições de contorno:** temporalmente variáveis nas três fases da infiltração, referem-se às condições de fluxo nos limites do domínio, e são detalhadamente descritas em Tabuada *et al.* (1995) e Graciosa (2006).
- **Dados de saída:** volumes infiltrados e perfis de umidade nas três fases da infiltração: (1) alimentação (lâmina d'água crescente no interior da trincheira), (2) recessão (lâmina d'água decrescente) e (3) redistribuição da água no entorno da trincheira (lâmina d'água nula).
- **Hipóteses:** as trincheiras são curtas o suficiente para que seja considerado instantâneo o avanço da frente de molhamento, o que permite uma abordagem bidimensional do problema; água e solo incompressíveis; solo não-expansivo ($p=0$ na zona não saturada); meio homogêneo e isotrópico (vale o ajuste unimodal de van Genuchten); efeitos de temperatura e osmose desprezíveis ($T=0$; $O=0$), bem como a histerese (curva de retenção constante na irrigação e drenagem).
- **Programa computacional:** a **Equação 3** foi discretizada por diferenças finitas (Tabuada *et al.*, 1995) e o modelo para sulcos de irrigação foi programado em linguagem Fortran 77, posteriormente adaptado para trincheiras de infiltração por Graciosa

(2005), em linguagem Fortran 90. Detalhes do equacionamento do modelo, bem como do programa computacional podem ser obtidos em Tabuada *et al.* (1995), Graciosa (2005) e Graciosa (2008).

Modelo unidimensional horizontal de Philip

Apesar do processo de infiltração em trincheiras ser multidimensional, uma análise pelo modelo de infiltração horizontal de Philip, em que a taxa de infiltração decai com o tempo, fornece um meio de dimensionar o volume da trincheira considerando a vazão de infiltração correspondente ao tempo de precipitação.

$$i = \frac{C}{2\sqrt{t}} \quad (6)$$

$$I = C\sqrt{t} \quad (7)$$

$$V_{inf}(t) = I(t) \cdot A_{inf} \quad (8)$$

Em que:

V_{inf} = volume infiltrado até o instante t , em m^3 ;

t = tempo, s

I = infiltração acumulada até o instante t , em m^3/m^2 ;

A_{inf} = área efetiva de infiltração, em m^2 .

i = taxa de infiltração no instante t , em $m^3/s.m^2$

C = sortividade, grandeza relacionada com a capacidade do solo homogêneo de absorver água em relação à sua umidade inicial, $m^3/s^{1/2}.m^2$

Dimensionamento

O volume de entrada na trincheira adotado em projeto é estimado em função da intensidade e tempo de precipitação e da área de drenagem, e é expresso pela **Equação 9**.

$$V_p = \frac{10^3}{3,6} i \cdot t_d \cdot A_d \quad (9)$$

Em que:

V_p = volume de projeto, em m^3

i = intensidade de precipitação, em mm/h

t_d = tempo de precipitação, em s

A_d = área de drenagem conectada à trincheira de infiltração, em m^2

A intensidade de precipitação é estimada com base na curva de intensidade-duração-

frequência, da forma apresentada na **Equação 10**.

$$i = \frac{a \cdot T^b}{(t + c)^d} \quad (10)$$

Em que:

i = intensidade de precipitação, em mm/h;

T = período de retorno, em anos;

T_d = tempo de precipitação, ou duração da chuva, em minutos

a, b, c e d são parâmetros ajustados empiricamente.

O método considera que a água é enacaminhada para a trincheira a partir do telhado. Assim, a área de drenagem A_d é estimada com base nas dimensões e na taxa de ocupação do lote.

Volume infiltrado (V_{inf})

O volume infiltrado após um tempo de operação da trincheira pode ser obtido de duas formas:

- utilizando o programa computacional *BIDISUL* desenvolvido por Tabuada *et al.* (1995), adaptado por Graciosa (2005). O arquivo de saída *WATERLEVEL.DAT* fornece os valores de volume infiltrado acumulado em cada instante - durante e após a irrigação.
- com base no modelo de infiltração horizontal de Philip (**Equações 6 a 8**). O ajuste é obtido experimentalmente.

O modelo de Philip foi escolhido, entre outros modelos unidimensionais de infiltração (Kostiakov, Horton), por ter amparo físico na teoria do escoamento em meio poroso, por meio da equação de Darcy-Buckingham, conforme saliente Libardi (1995). No entanto, este modelo tende a subestimar o volume infiltrado, por considerar a condição de colmatção total do fundo da trincheira, o que não necessariamente ocorre em condições práticas de operação. Outra fonte de incerteza no uso do modelo é o fato de ele considerar as paredes da trincheira verticais, o que não necessariamente corresponde à realidade em campo. Os ensaios conduzidos para a calibração apresentada neste trabalho foram feitos em trincheiras com inclinação das paredes de aproximadamente 90°.

Estudos futuros, quantitativos do processo de colmatção, serão muito úteis no sentido de proporcionar uma estimativa do volume infiltrado mais condizente com a realidade de operação de trin-

cheiras. Na ausência desses estudos, trabalha-se com a hipótese considerada mais crítica, que é a de colmatção total do fundo.

A área de infiltração é estimada com base nas mesmas considerações assumidas por Jonasson (1984, *apud* Mikkelsen e Jacobsen, 1993; Mikkelsen *et al.*, 1996), segundo as quais:

- a área superficial da base é totalmente colmatada;
- a superfície lateral de infiltração nas extremidades da trincheira é desprezível;
- a infiltração ocorre, portanto, somente na superfície lateral da trincheira, e
- o nível d'água médio é igual a $\frac{1}{2}H$, em que H é a altura útil da trincheira.
- Obtém-se a área efetiva de infiltração (A_{inf}) pela **Equação 11**:

$$A_{inf} = 2 \cdot L \cdot \frac{H}{2} = LH \quad (11)$$

Volume efetivo de armazenamento ($V_{a,ef}$)

$$V_{a,ef} = v \cdot V_t \quad (12)$$

Em que

v = volume de vazios, ou porosidade da brita utilizada para o enchimento da trincheira.

Assim, o volume efetivo de armazenamento da trincheira de infiltração deve ser igual a:

$$V_{a,ef} = \left(\frac{10^3}{3,6} i \cdot t_d \cdot A_d \right) - (I \cdot L \cdot H) \quad (13)$$

Em que:

i = intensidade de precipitação, em mm/h;

t_d = tempo, em s;

A_d = área de drenagem da trincheira, em m²;

I = infiltração acumulada até o instante t , em m³/m²;

A_{inf} = área efetiva de infiltração = $L \cdot H$ (m²).

Considerando a porosidade da brita, de acordo com a **Equação 13**, o volume da trincheira deve ser igual a:

$$V_t = \frac{\left[\left(\frac{10^3}{3,6} i \cdot t_d \cdot A_d \right) - (I \cdot L \cdot H) \right]}{\phi} \quad (14)$$

As dimensões da trincheira são: B (largura), H (profundidade) e L (comprimento). O processo de dimensionamento é iterativo, e consiste de adotar valores iniciais para H e L, para o cálculo do lado direito da **Equação 14**, e, por esta equação, obter o valor de B, verificar a viabilidade construtiva e refazer os cálculos, se necessário, adotando novos valores para H e L.

Exemplo de dimensionamento para dois diferentes tipos de solo

A seguir é apresentado um exemplo de dimensionamento de trincheiras de infiltração, baseado nas características físicas de dois diferentes tipos de solo (Solo 1 e 2), nos quais foram instaladas trincheiras experimentais. Estes solos estão localizados na cidade de São Carlos – SP, e suas características físicas são resumidamente apresentadas no **Quadro 1**.

Tabela 1 - Propriedades físicas dos solos experimentais.

Composição granulométrica	Solo 1		Solo 2	
Argila	16,2	45,0	25,0	30,0
Silte	28,8		5,0	
Areia fina	30,0	55,0	30,0	69,9
Areia média	23,4		35,0	
Areia grossa	1,6		4,9	
Pedregulho	0,0	0,0	0,1	0,1
Massa específica do solo (ρ) (g/cm ³)	1,617		1,833	
Massa específica dos sólidos (ρ_s) (g/cm ³)	2,886		2,696	
Massa específica aparente seca (ρ_d) (g/cm ³)	1,360		1,690	
Condutividade hidráulica saturada (m/s)	5,69E-05		6,73E-05	

1) Volume precipitado:

Para uma estimativa comparativa entre os dois solos, foram adotadas as seguintes condições:

- 15x20 m², com taxa de ocupação de 60% (área impermeável de 180m²).
- chuva de 20 minutos, com período de retorno de 1 ano. Utilizando a curva de intensidade-duração-frequência (idf) da cidade de São Carlos, proposta por Barbassa (1991), expressa pela Equação 15, obtém-se intensidade de precipitação $i=53$ mm/h. Assim, o volume precipitado sobre a área de drenagem é $V_p = 3,20$ m³;

$$i = \frac{1519 \cdot T^{0,236}}{(t+16)^{0,935}} \quad (15)$$

2) Volume infiltrado:

Modelo de Richards' – Programa BIDISUL

O volume infiltrado é função também das condições iniciais de umidade do solo. O Modelo de Richards' possibilita contemplar as diferentes possibilidades de configuração do perfil de umidade inicial e avaliar a resposta da trincheira frente a um determinado volume precipitado.

Para as condições de umidade inicial do experimento realizado, a infiltração acumulada após 20 minutos foi de 0,14 m³/m² no Solo 1, e 0,18 m³/m² no Solo 2.

Modelo de Philip

Os ensaios com trincheiras experimentais, realizados nos Solos 1 e 2, permitiram o ajuste ao modelo de Philip, apresentado no **Quadro 2**.

Tabela 2 - Parâmetros de ajuste ao modelo de Philip

	C (m ³ /s/m ²)
Solo 1	0,00571
Solo 2	0,00698

De acordo com a **Equação 7**, a infiltração acumulada em 20 minutos no Solo 1 é $I = 0,1978$ m³/m², e, no Solo 2, $I = 0,2418$ m³/m².

3) Volume de armazenamento:

Considerou-se que a trincheira é preenchida com brita 3 comercial, com porosidade de 45%.

Modelo de Richards' – Programa BIDISUL

O fluxograma do programa BIDISUL utilizado para a quantificação dos volumes infiltrados é apresentado em Tabuada (1995), Graciosa (2005) e Graciosa (2008).

Os dados de entrada do modelo são: umidade inicial do solo, curva de retenção (**Equação 4**) e curva de condutividade hidráulica não saturada (**Equação 5**). Com estes dados de entrada o programa fornece o volume infiltrado ou a infiltração acumulada I pela trincheira até o instante t considerado, o que permite calcular o volume de armazenamento da trincheira V_i por meio da **Equação 14**.

A tabela 3 apresenta os dados de entrada do modelo para os solos 1 e 2.

As condições iniciais de umidade na região de domínio ao redor da trincheira são apresentadas na **Figura 2** (Solo 1) e na **Figura 3** (Solo 2).

8,82	7,36	3,75			3,75	7,36	8,82
25,58	25,71	22,25			22,25	25,71	25,58
23,26	24,05	25,56			25,56	24,05	23,26
23,91	27,52	29,02	30,92	29,02	27,52	23,91	
26,38	28,42	30,46	32,77	30,46	28,42	26,38	
28,18	30,11	31,76	33,75	31,76	30,11	28,18	
29,10	30,94	28,70	35,06	28,70	30,94	29,10	

Figura 2 – Umidade inicial no solo ao redor da trincheira no Solo 1.

9,07	8,46	8,05			8,05	8,46	9,07
16,36	16,54	15,84			15,84	16,54	16,36
17,02	17,32	15,75			15,75	17,32	17,02
17,53	17,84	18,21	17,61	18,21	17,84	17,53	
18,17	18,24	19,08	18,51	19,08	18,24	18,17	
18,53	19,22	19,15	19,35	19,15	19,22	18,53	
19,25	19,33	19,68	20,62	19,68	19,33	19,25	

Figura 3 – Umidade inicial no solo ao redor da trincheira no Solo 2.

A Tabela 3 apresenta os coeficientes da Equação de Van Genuchten (Equação 4) e da curva de condutividade hidráulica não saturada (Equação 5), para os solos 1 e 2. Em ambas as simulações foi adotada a duração $t_d = 72$ minutos, igual à duração do experimento utilizado na calibração.

Tabela 3 – parâmetros das curvas de retenção(van Genuchten) e de condutividade hidráulica não saturada para os Solos 1 e 2.

	Ajuste Solo 1	Ajuste Solo 2
θ_r (cm ³ /cm ³)	0,108	-0,080
θ_s (cm ³ /cm ³)	0,529	0,375
α	6,723	6,355
m	0,214	0,134
n	1,273	1,155

Inserindo estes dados de entrada no programa *BIDISUL*, obteve-se os volumes acumulados I_1 = (Solo 1) e I_2 = (Solo 2). Atribuindo $H=1$ m e $L=5$ m, foram obtidos os volumes de armazenamento $V_{11} = 5,44$ m³ (Solo 1) e $V_{12} = 5,00$ m³ (Solo 2). Isso implica em $B_1 = 1,09$ m (Solo 1) e $B_2 = 1,00$ m (Solo 2).

(b) Modelo de Philip

Atribuindo $H=1$ m e $L=5$ m, foram obtidos os volumes de armazenamento $V_{11} = 4,87$ m³ para o Solo 1 e $V_{12} = 4,37$ m³ para o Solo 2, o que conduz a $B_1 = 0,98$ m para o Solo 1 e $B_2 = 0,88$ m para o Solo 2.

Ou seja, de acordo com o modelo de Philip, no Solo 1, uma trincheira de $0,98 \times 1,00 \times 5,00$ m³, e, no Solo 2, uma trincheira de $0,88 \times 1,00 \times 5,00$ m³ ($B \times H \times L$), preenchidas com brita 3, são capazes de infiltrar o volume correspondente a uma chuva de período de retorno igual a um ano e duração de 20 minutos. Nas mesmas condições, de acordo com o modelo de Richards', o Solo 1 requer, uma trincheira de $1,09 \times 1,00 \times 5,00$ m³, e o Solo 2, uma trincheira de $1,00 \times 1,00 \times 5,00$ m³.

Os resultados levaram a que, para as mesmas condições de precipitação, o dimensionamento feito a partir do programa *BIDISUL* requer trincheiras de infiltração maiores que quando dimensionadas pelo modelo de Philip. Este resultado indica que o modelo de Philip, embora considere a condição de solo totalmente colmatado na base da trincheira, resulta em condições de infiltração melhores que as previstas pelo programa *BIDISUL*.

Algumas fontes de incerteza, relativas à hipótese de distribuição homogênea dos diâmetros dos poros, prevista no modelo *BIDISUL* desenvolvido a partir da Equação de Richards', são apresentadas em Graciosa (2005) e Graciosa (2008). Ambos os solos estudados possuem distribuição heterogênea de diâmetros dos poros.

Este resultado é também indicativo das condições do solo na ocasião em que se fez a calibração do modelo de infiltração. Para diferentes condições iniciais de umidade, é de se esperar um comportamento de infiltração diferente. Esta é uma incerteza relativa à simplificação de taxa de infiltração dependente apenas da taxa inicial e do tempo de infiltração.

Estimativa de custos

Os custos envolvidos diretamente são: escavação de terra, brita de preenchimento, dispositivos hidráulicos (tubos, conexões, calhas), manta geotêxtil e mão-de-obra. No entanto, a análise de custos de implantação deve ser feita, preferencialmente, considerando a implantação de um sistema integrado de trincheiras, em todo um loteamento, o que diminui os custos em relação à implantação em um único lote.

A Tabela 4 apresenta uma estimativa dos custos diretos, para a implantação de uma trincheira de infiltração de dimensões $0,90 \times 1,00 \times 5,00$ m³.

Tabela 4 – Estimativa de custos diretos de implantação de uma trincheira de infiltração

Item	Unidade	Quantidade	Custo unitário R\$	Custo total R\$
Brita 3	m³	4,5	35,00	157,50
Escavação de solo	m³	4,5	16,70	75,15
Carga de terra	m³	4,5	10,62	47,79
Transporte de terra	m³	4,5	7,13	32,09
Manta geotêxtil	m²	11,8	2,30	27,14
MDO servente/ajudante	dia	1	25,00	25,00
Tubos e conexões				30,00
			Total:	394,67

A estimativa apresentada na Tabela 4 refere-se aos custos diretos de implantação de uma unidade de trincheira de infiltração. A implantação de um sistema de trincheiras em um loteamento requer estudos sobre os custos envolvidos indiretamente, tais como: estudos iniciais da bacia, programas de incentivo, elaboração de manuais de projeto, monitoramento do sistema, fiscalização e gerenciamento do funcionamento das trincheiras.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho propôs uma metodologia para o dimensionamento de trincheiras de infiltração, baseada no cálculo do volume de armazenamento da trincheira a partir estimativa do volume infiltrado. Este é estimado por dois modelos: Richards', bidimensional (cf. Tabuada et al, 1995; Graciosa, 2005 e Graciosa 2008) e Philip, unidimensional.

Os dois modelos foram calibrados com ensaios de campo em trincheiras experimentais, cf. Graciosa (2005) e Graciosa (2008). Ambos apresentaram valores semelhantes para os volumes infiltrados.

Foi feita uma análise econômica a qual resultou em custos diretos de implantação de uma trincheira de 5 m³ em R\$ 394,00.

Maiores estudos na área de dimensionamento devem ser conduzidos no sentido de avaliar a viabilidade prática da implantação de sistemas de trincheiras em loteamentos, incluindo principalmente os custos. Com relação a este item em particular, os estudos necessários estão relacionados aos custos indiretos, tais como: estudos iniciais da bacia, programas de incentivo, elaboração de manuais de projeto, monitoramento do sistema, fiscalização e gerenciamento do funcionamento das trincheiras, e na "popularização" dos métodos e materiais construtivos.

Trabalhos futuros devem ser desenvolvidos com relação aos estudos do efeito de colmatação

durante a vida útil da trincheira, de modo a permitir uma estimativa mais precisa do volume de armazenamento requerido para a trincheira.

Também são necessários estudos mais aprofundados do efeito da heterogeneidade da distribuição dos poros na solução da Equação de Richards' pelo modelo *BIDISUL*.

Este trabalho se propôs a estudar o tema "trincheiras de infiltração" no aspectos de dimensionamento. Outras possibilidades de estudo se abrem com tema. Recomenda-se que estas avaliações sejam aprimoradas em condições locais em bacias e que sejam incorporadas como tecnologias na escala de lote que favoreçam o gerenciamento integrado em bacias urbanas visando o Plano Diretor de drenagem urbana.

Recomenda-se que projetos em andamento, p.ex. "Experimento Piloto de Gerenciamento Integrado de Bacias Urbanas para o Plano Diretor de São Carlos", CT-HIDRO FINEP 01.02.0086.00, com interveniência do DAEE/SP continuem e aprimorem esta tecnologia de trincheiras de infiltração em pesquisas futuras.

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.
- GRACIOSA, M.C.P.** (2005). Trincheiras de infiltração como tecnologia alternativa em drenagem urbana: modelagem experimental e numérica. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 294p.
- GRACIOSA, M.C.P., MENDIONDO, E.M., CHAUDHRY, F.H.** (2008). Simulação hidráulica de trincheiras de infiltração de águas pluviais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, revisado e aceito para publicação, em preparação.
- 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.
- 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.
- 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.

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.

Methodology for Sizing Infiltration Trenches to Control Surface Runoff at the Source

ABSTRACT

A methodology is proposed to size infiltration trenches for surface runoff control on the lot where it is generated. The method is based on the water budget in which the inflow volume is estimated based on the idf curve and the outflow volume on the soil infiltration rate. Two methodologies are presented to estimate the infiltration rate: one based on Philip's horizontal infiltration model and the other based on a two-dimensional model to simulate infiltration using the Richards' equation. The models proposed were calibrated by experimental trials performed on two types of soil, one sandy and the other clayey.

Keywords: *Sizing infiltration trenches; two-dimensional infiltration; infiltration models.*