

Avaliação do volume de água pluvial drenado em um empreendimento habitacional: estudo de caso em Londrina - PR

Evaluation of volume of drained rainwater in a housing project: case study in Londrina - PR

Luciano Gardano Elias Bucharles
Sandra Márcia Cesário Pereira da Silva

Resumo

O crescimento urbano, principalmente decorrente da implantação de empreendimentos habitacionais de interesse social de alta densidade populacional, demanda um acentuado aumento da disponibilidade de serviços públicos. Porém, são poucas as informações acerca das suas conseqüências. O presente trabalho apresenta a análise da drenagem de água pluvial em um empreendimento deste tipo, através da avaliação dos hidrogramas de cheia em quatro situações distintas: antes da implantação do empreendimento, com o leito natural; após a implantação, sem as alterações de projeto; após a implantação, com as alterações de projeto introduzidas pelos moradores, que resultou em um aumento da área impermeabilizada; após a implantação do empreendimentos com as alterações de projeto, mas considerando a execução de trincheiras de infiltração. O estudo indicou que a implantação do empreendimento aumentou em 1.127% o volume escoado superficialmente ao longo de toda a área do empreendimento. A introdução de trincheiras de infiltração individuais em cada um dos 331 terrenos residenciais reduziria esse volume em 41%. O custo unitário das trincheiras (US\$ 168) pode ser compensado pela redução dos gastos com o sistema de drenagem pública do empreendimento, situação esta que atenderia aos requisitos ambientais e de sustentabilidade do empreendimento.

Luciano Gardano Elias
Bucharles
Instituto de Criminalística do
Paraná
Polícia Científica do Estado do
Paraná
Rua Ohio, 144
Jardim Los Angeles
Londrina - PR - Brasil
CEP 86020-530
Tel.: (43) 3324-3327
E-mail: gardano@sercomtel.com.br

Sandra Márcia Cesário Pereira
da Silva
Centro de Tecnologia e Urbanismo
Universidade Estadual de Londrina
Rodovia Celso Garcia Cid, PR 445,
KM 379
Caixa Postal 6001
Londrina -PR - Brasil
CEP 86051-990
Tel.: (43) 3371-4082
E-mail: rosan@sercomtel.com.br

Recebido em 25/02/07
Aceito em 29/05/07

Palavras-chave: Escoamento superficial. Drenagem urbana. Trincheiras de infiltração. Empreendimentos Habitacionais de Interesse Social.

Abstract

The urban growth, especially resulting from the development of social interest housing projects of high population density, demands a substantial increase in the availability of public services. However, there is little information concerning the consequences of those projects. This article presents an analysis of rainwater drainage in a specific social interest housing project, by the assessment of flood hydrograms in four distinct situations: before the construction of the project, considering the natural river-bed; after the construction of the project, without considering the design changes introduced by the dwellers; the actual situation, considering those design changes, which resulted in an increase of the impermeable area; the actual situation, but considering the construction of infiltration trenches. The study indicated that the construction of the project increased the volume of rain-water superficial flow in 1.127%. By contrast, the construction of individual infiltration trenches in each one of the 331 residential lots would reduce this volume in 41%. The cost of each trench (US\$ 168) can be compensated by the cost reduction of the project public drainage system. Moreover, this solution would comply with the project environmental and sustainability requirements.

Keywords: Superficial flow. Urban drainage. Infiltration Trenches. Social interest housing project.

Introdução

A crescente urbanização das cidades brasileiras, observada nas últimas décadas, tem sido acompanhada por grandes problemas relacionados a praticamente todos os aspectos da infra-estrutura: saneamento, transporte, habitação, abastecimento e drenagem, entre outros.

O presente estudo faz parte de um projeto nacional denominado Requali, desenvolvido a partir da Rede Nacional de Pesquisa, com a participação do Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas, da Universidade Estadual de Feira de Santana e da Universidade Estadual de Londrina, sob a coordenação da Universidade Federal do Ceará, motivo pelo qual foi escolhido um EHIS, no modelo Programa de Arrendamento Residencial (PAR), para as devidas análises. Está alinhado ao plano estratégico para ciência, tecnologia e inovação na área de Tecnologia do Ambiente Construído, com ênfase no segmento habitacional. A CEF coopera com o desenvolvimento do projeto Requali por intermédio das Gerências de Apoio ao Desenvolvimento Urbano das cidades de Porto Alegre, RS, Fortaleza, CE, e Salvador, BA. Também há a cooperação da Companhia de Habitação de Londrina, PR, da Secretaria Municipal da Habitação e Cooperativismo de Pelotas, RS, e do Departamento Municipal de Habitação, além de 11 empresas construtoras do país.

O objetivo deste trabalho é avaliar o volume de água pluvial drenado decorrente da implantação de um empreendimento habitacional horizontal, propondo medidas mitigadoras.

Drenagem de águas pluviais

O processo de urbanização conduz à impermeabilização dos solos, pela qual uma parcela de água que infiltrava no solo passa a compor o escoamento superficial, aumentando os volumes escoados e as vazões de pico, ao mesmo tempo em que ocorre a redução do tempo de concentração, fazendo com que os hidrogramas de cheias se tornem mais críticos. Essas alterações provocam um aumento na frequência e na magnitude das inundações, conforme reiteradamente noticiado pela imprensa nas mais diversas regiões do país. Já nos cursos d'água observam-se, além do aumento do volume, velocidades maiores de escoamento.

Método de Curva-Número do Soil Conservation Service

O Método de Curva-Número (*CN*), do Soil Conservation Service (SCS), desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, trata da separação do escoamento, que é a parcela de chuva efetiva a ser utilizada para a determinação do hidrograma de escoamento direto. O algoritmo embutido para a propagação do escoamento superficial é o hidrograma triangular.

Esse método tem sido bastante utilizado para a simulação de hidrogramas de cheias, servindo, também, para se preverem riscos de inundações em determinado local. Justifica-se sua aplicação principalmente pelo reduzido número de parâmetros e pela facilidade na aplicação. Dispõe-se, também como vantagem, a utilização de um único parâmetro (*CN*) e a vasta bibliografia existente em experiências de sua utilização.

Para a determinação do volume de escoamento superficial, apresenta-se uma expressão para a razão entre a precipitação total acumulada (*P*, em mm), com o volume superficial acumulado (*Q*, em mm) pela infiltração, e o escoamento da bacia. Tem-se como resultante a equação:

$$Q = \frac{(P - Ia)^2}{P + S - Ia}, \quad (1)$$

onde:

Q = volume superficial acumulado (mm);

P = precipitação total acumulada (mm);

Ia = perdas iniciais (mm); e

S = armazenamento do solo (mm).

O volume das perdas iniciais é estimado para condições médias em torno de 20% da capacidade de armazenamento do solo, ou seja:

$$Ia = 0,2 \times S. \quad (2)$$

A substituição da Equação 2 na Equação 1 resulta nas Equações 3 e 4, tendo-se as seguintes condições de contorno:

$$Q = 0 \quad P < Ia \quad (3)$$

$$Q = \frac{(P - 0,2 \times S)^2}{P + 0,8 \times S} \quad P > Ia. \quad (4)$$

A determinação da camada superior do solo *S*, onde ocorre o vazamento, é estabelecida mediante uma escala de valores em que a variável é o parâmetro *CN*, classificado de acordo com o tipo e

uso do solo para diferentes zonas. A expressão relaciona S e CN através da Equação 5:

$$S = 25,4 \times \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right). \quad (5)$$

A escala estabelece para a variável CN um valor mínimo (1) e um valor máximo (100). Também identifica as condições de cobertura do solo, variando desde uma cobertura permeável até uma cobertura completamente impermeável, representada pelo valor máximo. A Tabela 1 estima os valores de CN para diferentes tipos de solo em regiões urbanizadas.

Os tipos de solo A, B, C e D reproduzem a situação apresentada na Tabela 2. Cada um desses tipos representa uma capacidade diferente de produzir escoamento superficial, infiltração e permeabilidade.

A classificação do solo da Tabela 2 está baseada na tradução que o SCS fez para os solos norte-americanos. Todavia, já há uma proposta de modificação dessa classificação com base em características dos solos brasileiros, levando-se em consideração também o perfil do solo, e não somente a granulometria (GENOVEZ; SARTORI; LOMBARDI NETO, 2005).

O Método SCS distingue três condições de umidade antecedente do solo, conforme mostrado na Tabela 3. Os valores do parâmetro CN indicados na Tabela 1 referem-se às condições médias de umidade antecedente, que corresponde à condição II de umidade antecedente do solo, de acordo com a Tabela 3. No método do SCS também podem ser utilizadas as condições de umidade antecedente I e II, embora a condição II seja a mais utilizada.

Utilização ou cobertura do solo	A	B	C	D
Pastagens ou terrenos em más condições	68	79	86	89
Baldios em boas condições	39	61	74	80
Prado em boas condições	30	61	74	80
Bosques ou zonas com cobertura ruim	45	66	77	83
Florestais: cobertura boa	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golf, cemitérios, boas condições.				
Com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80
Com relva em 50% a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritório	89	92	94	95
Zonas industriais	81	88	91	93
Zonas residenciais				
Lotes de (m ²)				
% média impermeável				
≤ 500	65	77	85	90
1.000	38	61	75	83
1.300	30	57	72	81
2.000	25	54	70	80
4.000	20	51	68	79
Parques de estacionamento, telhados, viadutos	98	98	98	98
Arruamento e estradas				
Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais	98	98	98	98
Paralelepípedos	76	85	89	91
Terra	72	82	87	89

Fonte: Tucci e Marques (2001)

Tabela 1 - Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas - Tabela resumida

Tipo de solo	Descrição
A	Solos de baixo escoamento superficial e alta infiltração; solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a 8%; não há rochas, nem camadas argilosas, nem mesmo densificadas, até a profundidade de 1,5 m; o teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1%.
B	Solos menos permeáveis do que o anterior; solos arenosos menos profundos do que o tipo A e com menor teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas, esse limite pode subir a 20% graças à maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir, respectivamente, a 1,2% e 1,5%. Não pode haver pedras nem camadas argilosas até 1,5 m, mas é quase sempre presente camada mais densificada que a camada superficial.
C	Solos barrentos com teor total de argila de 20% a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até a profundidade de 1,2 m. No caso de terras roxas, esses dois limites máximos podem ser de 40% e 1,5 m. Nota-se, a cerca de 60 cm de profundidade, camada mais densificada que no tipo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade.
D	Solos argilosos (30-40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 50 cm de profundidade. Ou solos arenosos como os do tipo B, mas com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados.

Fonte: Tucci e Marques (2001)

Tabela 2 - Tipos de solo de acordo com sua capacidade de escoamento superficial e infiltração

Condição	Descrição
I	Solos secos: chuvas nos últimos 5 dias não ultrapassam 15 mm
II	Situação média na época de cheias: chuvas nos últimos 5 dias totalizam entre 15 mm e 40 mm
III	Solo úmido (próximo da saturação): chuvas dos últimos 5 dias superiores a 40 mm e condições meteorológicas desfavoráveis a altas taxas de evaporação

Fonte: Tucci e Marques (2001)

Tabela 3 - Condições de umidade antecedente do solo

Ressalta-se que o modelo não considera os efeitos de percolação, ou seja, o modelo não permite avaliar o escoamento subterrâneo e também não considera o processo de recuperação da capacidade de infiltração do solo.

Medida alternativa de controle das enchentes urbanas (trincheiras de infiltração)

As trincheiras de infiltração são estruturas lineares, que possuem comprimento extenso em relação à largura e à profundidade, que podem ser instaladas nos lotes residenciais, com o objetivo de captar, armazenar e infiltrar as águas precipitadas sobre todo o lote ou parte dele (SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL, 2000).

A proposta inicial para a implantação das trincheiras de infiltração é a de que elas capturem uma parcela do escoamento superficial gerado dentro do lote, reduzindo, assim, o volume de água pluvial que chega até as galerias existentes e retardando os picos dos hidrogramas de cheias de

bacias e microbacias urbanizadas, ou seja, a implantação das trincheiras de infiltração resultaria em um aumento do tempo de concentração da bacia.

As trincheiras de infiltração são constituídas por valetas preenchidas por material granular com índice de vazios em torno de 40% (seixo, brita, pedra-de-mão ou outro) (TUCCI; MARQUES, 2001). Conforme Cruz *et al.* (1999), um filtro de geotêxtil é colocado envolvendo o material de enchimento, sendo recoberto por uma camada de material granular, formando uma superfície drenante. Além da função estrutural, o geotêxtil impede a entrada de finos no dispositivo, reduzindo o risco de colmatção precoce e podendo trabalhar, ainda, como filtro anticontaminante. As trincheiras de infiltração devem ser aplicadas segundo as seguintes limitações técnicas (TUCCI; MARQUES, 2001):

- (a) o solo suporte deve apresentar taxas mínimas de infiltração de 12 mm/h (solo natural) e de 8 mm/h (solo saturado);

- (b) profundidade mínima do lençol freático e da camada impermeável de 1,20 m;
- (c) não devem ser instaladas sobre aterros ou em terrenos de grande declividade; e
- (d) adequadas para pequenas áreas de drenagem, como lotes individuais ou quarteirões.

Dimensionamento de uma trincheira de infiltração pelo método racional

Sendo um dispositivo de controle linear, adapta-se bem em áreas com pequenas larguras. Pode-se fixar seu comprimento com base no traçado arquitetônico e nas dimensões do terreno; por exemplo, comprimento coincidente com a largura de um estacionamento ou com o comprimento de um lote residencial. A trincheira não deve ser muito estreita, de modo que dificulte a execução, nem muito larga, para não exigir muito espaço do terreno. Normalmente, constata-se larguras entre 0,80 m e 1,00 m. Fixando-se o comprimento e a largura, a altura da trincheira é definida pelo dimensionamento da camada de brita (H) (SILVEIRA, 2003).

A Secretaria de Urbanismo, Obras e Viação (SUOV) da Prefeitura Municipal de Londrina (PML) estabeleceu uma forma rápida e prática de dimensionamento da trincheira de infiltração. Para tanto, aplicou a fórmula do método racional para um lote de 250 m² ($Q = C \times I \times A$, onde Q é a vazão de projeto; C é o coeficiente de escoamento superficial; I é intensidade de precipitação de projeto; e A é a área de captação da água pluvial), sendo verificado o volume escoado superficialmente para determinado tempo de duração da chuva, levando-se em consideração o tempo de retorno do projeto.

A seguir, a trincheira foi dimensionada de maneira que armazenasse, em um primeiro momento, todo o volume escoado superficialmente para, depois, infiltrá-lo ao solo (considerando a porosidade do material granular, período de retorno da chuva, permeabilidade do solo natural e saturado). Obteve-se, assim, um coeficiente único α englobando todas essas variáveis.

Essa nova equação determina, de fato, o volume útil da trincheira a partir da multiplicação da área de contribuição pelo coeficiente α . No caso em estudo, esse coeficiente apresenta um valor de 0,04680 (construção residencial e porcentagem permeável da superfície de contribuição de 15%).

Assim, o volume útil da trincheira é calculado através da Equação 6. Como o índice de vazios do material granular utilizado (brita 4) é em torno de 40% (TUCCI; MARQUES, 2001), o volume útil

calculado deve ser multiplicado por 2,5, a fim de se obter o efetivo volume de projeto da trincheira:

$$V_{\text{projeto}} (\text{m}^3) = \text{área de contribuição} \times \alpha \times 2,5, \quad (6)$$

onde:

V_{projeto} = volume da trincheira de infiltração (m³);

α = coeficiente das características de ocupação e do solo; e

2,5 = coeficiente de compensação do índice de vazios do material granular.

Dimensionamento de uma trincheira de infiltração pelo método Rain-Envelope

O Método *Rain-Envelope*, apresentado por Urbonas e Stahre (1993), é de aplicação simples e direta a partir dos dados de caracterização do local de implantação e da curva Intensidade–Duração–Frequência (IDF).

O método baseia-se na determinação dos volumes acumulados de entrada e saída do dispositivo. O volume da trincheira deverá ser suficiente para armazenar a máxima diferença entre os volumes acumulados de entrada e saída, levando-se em consideração a porosidade do material de preenchimento.

A curva de volumes de entrada é construída com base na curva IDF local. Já os volumes de saída são determinados com base nas características de infiltração/percolação do solo e da área disponível para infiltração/percolação.

Uma vez que as estruturas de infiltração/percolação são usadas principalmente para pequenas bacias, o cálculo de escoamento pode ser feito com base no Método Racional. Dessa forma, obtém-se o volume afluente acumulado através da multiplicação da vazão pelo tempo, resultando em:

$$V_t = 3600 \times C \times \left(\frac{It}{1000} \right) \times t \times A, \quad (7)$$

onde:

V_t = volume total escoado no tempo t para uma precipitação de T anos de retorno (m³);

C = coeficiente de escoamento superficial (adimensional);

I = intensidade de precipitação de T anos de retorno (l/s/ha);

t = duração da precipitação (h); e

A = área da bacia de contribuição (ha).

O volume pode ser calculado utilizando-se uma curva IDF para determinado período de retorno T . Para pequenas bacias, pode-se utilizar a

simplicação de considerar um bloco único de precipitação, de intensidade constante, sendo o volume escoado igual ao produto de It por t .

No entanto, os blocos únicos de precipitação representam apenas a intensidade média da máxima intensidade de precipitação, não se considerando a precipitação anterior e posterior à máxima. Como o dimensionamento das estruturas de infiltração/percolação depende principalmente do volume escoado, é importante considerar a parte da precipitação não incluída no cálculo através de bloco único de precipitação.

Urbanas e Stahre (1993) estudaram como o escoamento de blocos únicos de precipitação diferia dos resultados obtidos usando simulação contínua, com registros cronológicos de precipitação. Assumindo-se que no último caso os resultados obtidos são mais precisos, já que representam melhor o processo natural, eles concluíram que um acréscimo em torno de 25% ao volume calculado pelo Método Racional pode ser mais preciso. Dessa forma, a Equação 7 é alterada para considerar esse fato:

$$Vt = 1,25 \times \left[3600 \times C \times \left(\frac{It}{1000} \right) \times t \times A \right] \quad (8)$$

Para o dimensionamento, pode-se considerar que apenas as áreas impermeáveis contribuirão para a estrutura, tendo o coeficiente de escoamento superficial C o valor entre 0,85 e 0,95 (URBONAS; STAHRÉ, 1993).

A taxa com que a água percola no solo pode ser estimada pela Lei de Darcy para fluxo unidimensional:

$$U = k \times \nabla \phi, \quad (9)$$

onde:

U = velocidade do fluxo (m/s);

k = condutividade hidráulica saturada (m/s); e

$\nabla \phi$ = gradiente hidráulico (m/m).

A Lei de Darcy se aplica ao escoamento subterrâneo em solo saturado (URBONAS; STAHRÉ, 1993). Apesar de o fundo da trincheira estar a pelo menos 1,20 m acima do nível da água, é recomendado assumir que o solo estará saturado quando a trincheira estiver em operação. Isso deve ser feito devido à falta de conhecimento preciso e da grande variabilidade das características dos solos. Não é possível generalizar que valor de condutividade hidráulica deverá ser utilizado no dimensionamento. Portanto, devem ser feitos testes locais para a determinação desse parâmetro.

Esses valores apenas dão uma idéia da ordem de grandeza da condutividade hidráulica em função do tipo de solo. Assim, não se deve fazer um planejamento da utilização de dispositivos de infiltração apenas pela classificação do solo. Observe-se, ainda, que os sistemas de infiltração devem ser dimensionados com considerável margem de segurança, devido à dificuldade de se determinar a condutividade hidráulica k , à variabilidade espacial de k , ao risco de colmatção e à incerteza nos métodos de dimensionamento (JONASSON, 1984). Uma vez que os solos tendem a se tornar gradualmente colmatados com o tempo, reduzindo sua condutividade hidráulica disponível, é recomendado que a condutividade de campo (obtida pelos testes) seja reduzida por um fator de segurança (2 ou 3) para o projeto de estruturas de infiltração (URBONAS; STAHRÉ, 1993).

O fato de se considerar para dimensionamento a condutividade hidráulica saturada já é uma forma de considerar um coeficiente de segurança, pelo fato de esse valor não considerar efeitos de capilaridade enquanto o solo apresenta-se não-saturado.

O cálculo do volume da estrutura de percolação (infiltração) é feito considerando-se a porosidade efetiva do material de enchimento. Assim, o volume útil para armazenamento será o volume referente aos vazios da trincheira.

Visto que o fundo está sujeito a uma colmatção mais rápida, em função da deposição de sedimentos, alguns autores recomendam que ele seja considerado impermeável. Assim, considera-se que a saída de água da trincheira por percolação (infiltração) somente ocorrerá pelas paredes verticais (URBONAS; STAHRÉ, 1993).

A Lei de Darcy será considerada para se estimar a taxa de água percolada. Considerando-se o tempo de enchimento e esvaziamento da estrutura, pode-se aproximar a taxa média de saída de água como a média entre as vazões de saída para o enchimento e o esvaziamento da estrutura. Simplificando essa média, pode-se considerar o nível de água constante na altura média da estrutura. Considerando-se o solo saturado (situação crítica para o funcionamento do dispositivo), obtém-se gradiente hidráulico unitário, e a Lei de Darcy resulta na seguinte expressão para a determinação da vazão de saída da estrutura (URBONAS; STAHRÉ, 1993):

$$V_{perc}(t) = k \times \nabla \phi \times \frac{A_{perc}}{2} \times 3600 \times t_p, \quad (10)$$

onde:

$V_{perc}(t)$ = volume de água percolado no solo (m³);

k = condutividade hidráulica do solo (m/s);

$\nabla\phi = \text{gradiente hidráulico} = 1,0$;

$A_{perc} = \text{área total dos lados da estrutura de percolação (m}^2\text{)}; e$

$t_p = \text{tempo de percolação (h)}$.

O volume V da trincheira será obtido pela diferença entre o volume afluente e o volume de saída da trincheira, sendo o cálculo efetuado por um processo iterativo, no qual se estimam as dimensões iniciais. Efetua-se, em seguida, uma verificação dessas dimensões, considerando-se os volumes de entrada e de saída na estrutura. De acordo com o resultado dessa verificação, aumentam-se ou reduzem-se as dimensões, até que valores compatíveis sejam encontrados.

$$V = \text{máx}[V_i(t) - V_{perc}(t)] \quad (11)$$

$$V = \text{máx} \left[\begin{array}{l} 1,25 \times 3600 \times C \times \frac{It}{1000} \times \\ t \times A - k \times 1,0 \times \frac{A_{perc}}{2} \times 3600 \times t \end{array} \right] \quad (12)$$

Dividindo-se ambos os lados da equação por $C \times A$, obtêm-se:

$$D = \text{máx}(4,5 \times It \times t - 3,6 \times E \times t), \quad (13)$$

onde:

$$D = \frac{V}{C \times A}$$
$$E = \frac{1000 \times k \times \left(\frac{A_{perc}}{2}\right)}{C \times A}$$

O parâmetro D é o volume específico de percolação, que representa o volume de armazenamento em metros cúbicos por hectare de área impermeável de contribuição. O parâmetro E é a vazão específica de saída da bacia, em litros por segundo, por hectare de área impermeável de contribuição.

O volume e a duração crítica da chuva para o dispositivo podem ser obtidos de forma analítica pela utilização da derivada da Equação 12, de acordo com a curva IDF local (MIKKELSEN, 1991):

$$V_d = \text{máx}(V_e - V_s) \Rightarrow V_d = V_e - V_s$$

$$\text{Se } \frac{d(V_e - V_s)}{dt} = 0,$$

onde:

$V_d = \text{volume de dimensionamento (m}^3\text{)}$;

$V_e = \text{volume acumulado de entrada (m}^3\text{)}$; e

$V_s = \text{volume acumulado de saída (m}^3\text{)}$.

Métodos de pesquisa

A análise da drenagem de água pluvial no EHS foi feita através da avaliação dos hidrogramas de cheia em quatro situações distintas do empreendimento, a saber:

- antes da implantação do EHS, com o leito natural;
- após a implantação, sem as alterações de projeto;
- após a implantação, com as alterações do projeto introduzidas pelos moradores (aumento da área impermeabilizada – situação real); e
- real, com trincheira de infiltração.

Essa análise permitiu fazer uma comparação hipotética entre os volumes de água pluvial precipitados sobre o empreendimento e que efetivamente seriam direcionados ao corpo d'água nas quatro situações mencionadas.

O modelo hidrológico escolhido para avaliação dos quatro cenários propostos foi o Método de Curva-Número (CN), do *Soil Conservation Service* (SCS). Para tanto, foi utilizado o software de distribuição gratuita denominado Sistema de Análise de Bacias Complexas (ABC 6), desenvolvido pelo Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões, pertencente ao Departamento de Engenharia Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, o qual pode ser obtido no site <http://143.107.96.240/labsid/> (LABSID, 2007).

Roteiro de cálculo para utilização do sistema de análise de bacias complexas

Com o Sistema ABC 6 foram determinados os hidrogramas de cheia da bacia, nas situações analisadas. Para tanto, foi necessário o fornecimento dos seguintes dados de entrada:

- área total da bacia (km²);
- área total impermeável da bacia (km²): consideram-se as vias públicas, calçadas e áreas impermeabilizadas das unidades habitacionais;
- comprimento do talvegue (m): no EHS, nas situações (4.ii), (4.iii) e (4.iv), foram tomadas como talvegue as canalizações de drenagem das águas pluviais existentes, conforme projeto da rede coletora. Na situação (4.i) foi tomado como talvegue o oferecido pelo relevo natural do solo naquela situação;
- declividade média da bacia (m/km): a declividade obtida é a da bacia, e não a do

talvegue, obtida a partir do perfil do terreno antes da implantação do EHS;

(e) diferença de cotas (m): diferença entre a cota mais alta e a cota mais baixa;

(f) determinação da intensidade da tormenta de projeto: no EHS a proposta foi avaliar as quatro situações mencionadas ao longo de uma mesma tormenta de projeto, com tempo de duração de 15 minutos. Foi utilizada a relação Intensidade–Duração–Frequência (IDF) proposta por Fendrich (1998) para Londrina, a partir da seleção das maiores precipitações anuais ocorridas entre 1986 e 1998, com durações de 10 min, 20 min, 30 min, 1 h, 3 h, 6 h, 12 h e 24 h. Já os tempos de recorrência, ou seja, a frequência em que as precipitações ocorrem, foram de 2, 3, 5, 10, 20 e 50 anos (FENDRICH, 1998). Nessas condições, a Equação da Chuva de Londrina apresenta os seguintes elementos (FENDRICH, 1998):

$$i = \frac{(K \times Tr)^m}{(t + to)^n}, \quad (14)$$

onde:

i = intensidade de chuva máxima (mm/h);

Tr = tempo de recorrência (anos);

t = tempo de duração da chuva (min); e

K , to , m , n = parâmetros variáveis da equação.

Através da aplicação dessa equação para várias opções de tempo de recorrência e tempo de duração das chuvas, foi possível calcular as intensidades médias de precipitação de chuva para a cidade de Londrina, PR, conforme se observa na Tabela 4;

(g) determinação do hietograma: será utilizado o método dos blocos alternados para a confecção do hietograma, visando distribuir as quantidades precipitadas da chuva de projeto no tempo. Escolheu-se esse método pelo fato de concentrar as maiores alturas precipitadas na primeira metade da duração da tormenta, que, segundo Tucci *et al.* (1995), foi o observado por diversos autores em tormentas variáveis;

(h) determinação do período de retorno: o período de retorno tr utilizado na intensidade da tormenta de projeto será relativo à ocupação da via onde o EHS se encontra. No Estado do Paraná, para microdrenagem, esse período é estimado pela SUDERHSA em dois ou três anos. Todavia, a fim de se trabalhar com boa margem de segurança, pode-se adotar um período de retorno de cinco anos;

(i) determinação dos picos de vazão: será adotado o Método do Hidrograma Triangular do SCS.

Justifica-se essa escolha pela facilidade da obtenção dos parâmetros e pela variedade de parâmetros CN que o método oferece, possibilitando a simulação da bacia nas quatro situações diferentes de cobertura;

(j) determinação do tempo de concentração: a Equação de KIRPICH, constante do banco de dados do Sistema ABC 6, foi obtida a partir da análise de diversos loteamentos *in natura*, motivo pelo qual será utilizada no cálculo do tempo de concentração tc da bacia na situação (4.i) (Equação 15). Será desprezado o efeito de armazenamento produzido pelas galerias, como indicado por Tucci *et al.* (1995).

$$tc = 57 \times \frac{L^{1,155}}{h^{0,385}}, \quad (15)$$

onde:

tc = tempo de concentração (min);

L = comprimento do talvegue (km); e

h = diferença de cotas (m).

Nas situações (4.ii), (4.iii) e (4.iv), onde já há impermeabilização parcial do solo, será adotada a metodologia do SCS (TUCCI, 2000) (Equação 16).

$$tc = 3,42 \times \frac{L^{0,8}}{S^{0,5}} \times \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7}, \quad (16)$$

onde:

tc = tempo de concentração (min);

L = comprimento do talvegue (km);

S = declividade do leito (m/m); e

CN = parâmetro Curva-Número (adimensional);

(k) escolha da condição de umidade antecedente do solo: normalmente é adotada a condição II da Tabela 3;

(l) determinação do grupo hidrológico do solo: Tabela 2; e

(m) determinação do CN : Tabela 1.

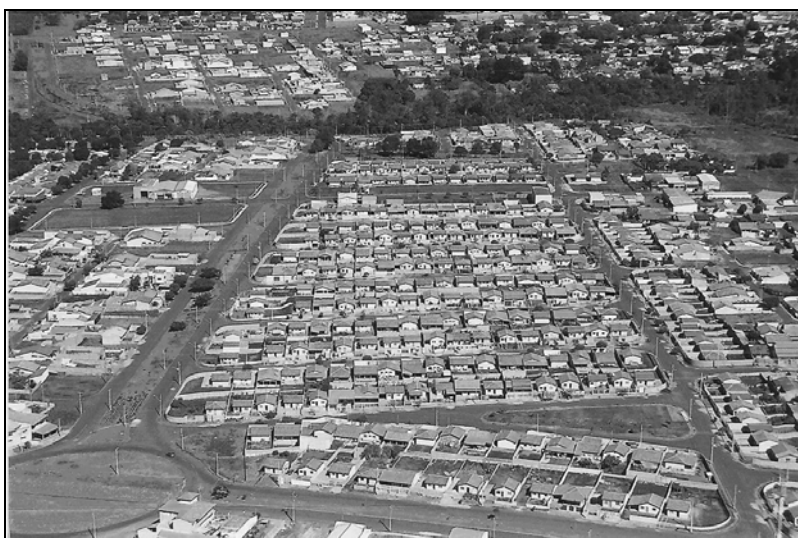
Resultados e discussão

A avaliação da drenagem superficial foi realizada a partir dos levantamentos feitos no local (Figuras 1 e 2).

Tr (anos)	t 10 min	t 15 min	t 30 min	t 60 min	t 180 min	t 360 min	t 720 min	t 1440 min
2	119,49	105,09	76,09	51,47	17,75	9,96	6,68	3,73
3	128,03	109,88	79,36	53,36	18,76	10,61	7,03	4,04
5	143,71	118,69	85,36	56,81	20,62	11,81	7,68	4,62
10	163,40	129,74	92,90	61,15	22,94	13,30	8,50	5,34
20	182,27	140,34	100,13	65,31	25,17	14,74	9,28	6,04
50	206,70	154,06	109,49	70,70	28,06	16,60	10,30	6,94

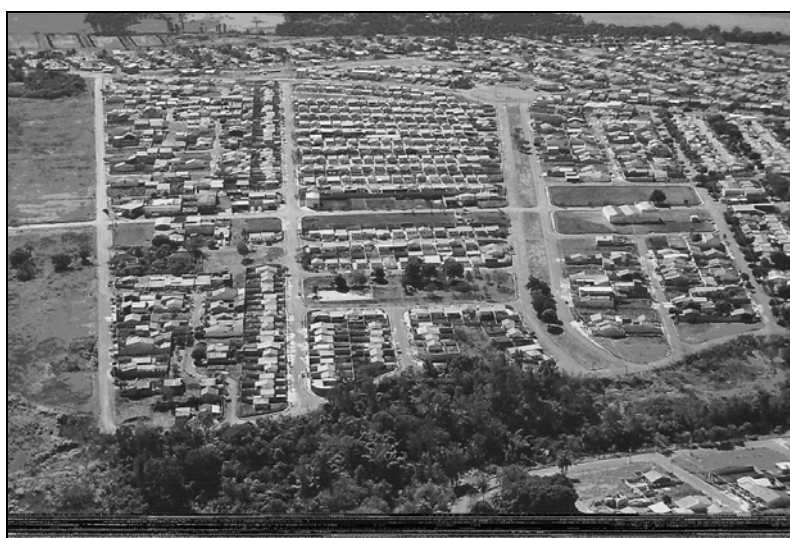
Fonte: Fendrich (1998)

Tabela 4 - Intensidades médias de precipitação de chuva para Londrina (mm/h)



Fonte: CELESTINO, José Clóvis. [Vista aérea do EHIS]. Londrina: Aero Star Fotos Aéreas, 2006. Fotografias.

Figura 1 - Vista aérea do EHIS em estudo



Fonte: CELESTINO, José Clóvis. [Vista aérea do EHIS]. Londrina: Aero Star Fotos Aéreas, 2006. Fotografias.

Figura 2 - Vista aérea mais ampla do EHIS incluindo o entorno da área

Área média dos terrenos das unidades habitacionais

O conjunto habitacional estudado é composto de 331 unidades, tendo sido pesquisadas 64 dessas unidades. A área média dos terrenos das 64 unidades habitacionais pesquisadas é de 285,98 m² ± 66,75 m², sendo a maior ocorrência a de terrenos com 250 m². O menor terreno apresenta área de 250 m², enquanto o maior terreno apresenta área de 529 m². A soma total dos terrenos das 64 unidades habitacionais é de 18.303 m².

Área média impermeabilizada dos terrenos das unidades habitacionais

A área média impermeabilizada dos terrenos das 64 unidades habitacionais, na situação 4.iii, é de 173,95 m² ± 73,35 m². A menor área impermeabilizada é de 62 m², enquanto a maior área impermeabilizada é de 394 m². A soma total das áreas impermeabilizadas dos terrenos das 64 unidades habitacionais é de 11.133 m². Como o total de área dos terrenos dessas mesmas 64 unidades habitacionais é de 18.303 m², resta uma área livre de 18.303 – 11.133 = 7.170 m², equivalente a 39% da área total dos 64 terrenos.

Taxa média de impermeabilização dos terrenos das unidades habitacionais

A taxa média de impermeabilização dos terrenos das unidades habitacionais selecionadas, na situação 4.iii, é a diferença entre a área total e a área livre anteriormente calculada, ou seja, 100% – 39% = 61%.

Variação dos volumes escoados superficialmente no EHIS

Para a avaliação da variação dos volumes escoados superficialmente, com o auxílio do Sistema ABC 6, são necessários alguns valores referentes ao EHIS, tais como:

- (a) área total da bacia (do empreendimento, englobando os lotes residenciais e comerciais, ruas, calçadas e praças): 0,188 km²;
- (b) a área total impermeável da bacia apresenta duas situações: de projeto e após as alterações promovidas pelos moradores. Na situação de projeto (4.ii), a área total impermeável é de 0,078 km², obtida pela soma da área total das vias públicas (0,057 km²) e da área impermeabilizada original de projeto dos terrenos das 331 unidades habitacionais: 0,021 km². Na situação após as alterações promovidas pelos moradores (4.iii), a área total impermeável é de 0,122 km², obtida pela

soma da área total das vias públicas (0,057 km²) e da área impermeabilizada real dos terrenos das 331 unidades habitacionais: área total dos terrenos (0,106 km²) x taxa média de impermeabilização dos terrenos (61%): 0,065 km²;

- (c) comprimento do talvegue: máximo de 727,00 m;
- (d) declividade média da bacia: a declividade média do EHIS é de aproximadamente 70 m/km. Esse valor é semelhante à declividade original do terreno, antes da implantação do EHIS, visto que as vias públicas praticamente acompanham a declividade natural da área;
- (e) diferença de cotas: máximo de 44,00 m;
- (f) determinação da intensidade de tormenta de projeto: para a precipitação de projeto foram utilizados os valores obtidos pela relação de IDF de Londrina, PR, conforme Fendrich (1998), para um tempo de retorno de cinco anos;
- (g) determinação do hietograma: utiliza-se o método dos blocos alternados para a confecção do hietograma;
- (h) determinação do tempo de concentração: com as Equações 15 e 16 são calculados os tempos de concentração em cada uma das quatro situações em análise;
- (i) determinação dos picos de vazão: os picos de vazão serão calculados pelo Método do Hidrograma Triangular do SCS, constante do banco de dados do Sistema ABC 6, através dos parâmetros intensidade de tormenta, período de retorno e tempo de concentração;
- (j) determinação do grupo hidrológico do solo: o solo da cidade de Londrina, em virtude de suas características físicas (MIGUEL *et al.*, 2002), será classificado como pertencente ao grupo B do método do SCS (SILVA, 2004);
- (k) escolha da condição de umidade antecedente do solo: a umidade prévia do solo será escolhida como sendo a condição II do SCS;
- (l) determinação do CN: a Tabela 1 apresenta os valores de CN para a área em estudo. Na situação 4.i, considera-se a cobertura do solo como sendo “baldios em boas condições”, resultando em um CN de 61. Nas situações 4.ii, 4.iii e 4.iv, considera-se a cobertura do solo como sendo “zonas residenciais, com % média impermeável de 65%”, resultando em um CN de 85.

Primeira situação: antes da implantação do EHIS, com leito natural (4.i)

A área do EHIS, antes da implantação, era toda em cobertura vegetal. Pela análise do hidrograma

observa-se que antes da urbanização do EHIS a vazão máxima de escoamento superficial ocorria 30 minutos após o início da chuva, com valor aproximado de 0,29 m³/s. Constatou-se, também, que o escoamento superficial iniciava-se após 8 minutos do início da chuva. O volume escoado superficialmente foi de 289 m³.

Segunda situação: após a implantação do EHIS (situação de projeto - 4.ii)

Com a implantação do EHIS, surgiram áreas impermeabilizadas, alterando as características verificadas quando do terreno com cobertura natural. Pela análise do hidrograma, observa-se que a urbanização introduziu severas alterações no escoamento superficial da área. A vazão máxima de escoamento superficial passou a ocorrer 20 minutos após o início da chuva, com valor aproximado de 1,63 m³/s. O volume escoado superficialmente foi de 3.474 m³, ou seja, um aumento da ordem de 1.102% em relação à situação de pré-urbanização da área.

Terceira situação: após a implantação do EHIS (situação real - 4.iii)

Após a ocupação das unidades habitacionais, os moradores passaram a aumentar a área impermeabilizada, conforme visto anteriormente. Assim, surgiram novas áreas impermeabilizadas, alterando as características originais do projeto. A vazão máxima de escoamento superficial passou a ocorrer 18 minutos após o início da chuva, com valor aproximado de 1,78 m³/s. O volume escoado superficialmente foi de 3.546 m³, ou seja, um aumento da ordem de 1.127% em relação à situação de pré-urbanização da área e de 2% em relação à situação originalmente projetada.

Dimensionamento da trincheira de infiltração para o EHIS

Método Racional - adotado pela Prefeitura Municipal de Londrina

Como definição desse estudo, a água captada a ser direcionada à trincheira de infiltração é oriunda exclusivamente das coberturas de cada unidade habitacional, não sendo captada a água oriunda das demais áreas impermeabilizadas de cada terreno. Assim, a porcentagem permeável da área de contribuição é de 15% (TUCCI *et al.*, 1995). Em tais condições, tratando-se de unidades residenciais, observa-se que o valor de α é de 0,04680. Assim, o volume de projeto da trincheira de infiltração será, conforme a Equação 6, de 5,4 m³.

A partir do volume, determinam-se as dimensões da trincheira (altura, largura e profundidade). O comprimento da trincheira é fixado em virtude do comprimento do lote residencial. Analisando-se a planta de implantação do empreendimento, verifica-se que os menores lotes possuem área retangular de 250 m², sendo um comprimento de 25,00 m e uma largura de 10,00 m. Assim, é possível a construção de uma trincheira com comprimento de até 25,00 m.

A largura da trincheira não deve ser muito estreita, de modo que dificulte a execução, nem muito larga, para não exigir muito espaço do terreno. Normalmente, constata-se larguras entre 0,80 m e 1,00 m. No presente caso, utilizou-se para o dimensionamento a largura padrão da pá de uma retroescavadeira (0,80 m). Para o comprimento foi adotado um valor de 6,00 m, no intuito de se estimar uma profundidade pequena da trincheira, evitando-se, com isso, interferências desse sistema com as fundações das unidades habitacionais. A profundidade da trincheira é, portanto, de:

$$V = C \times L \times H, \quad (17)$$

onde:

V = volume (m³);

C = comprimento (m);

L = largura (m); e

H = profundidade (m).

$$5,4 = 6,00 \times 0,80 \times H$$

$$H = 1,2 \text{ m}$$

Método *Rain-Envelope*

Através da Equação 12 calcula-se o volume da trincheira de infiltração, a partir de dimensões preestabelecidas. Essa dimensão inicial é aquela calculada no método anterior (6,00 x 0,80 x 1,20). O coeficiente de escoamento superficial C tem valor de 0,85 para telhados (TUCCI *et al.*, 1995). A área da bacia de contribuição A é a área da cobertura de cada unidade habitacional (46 m²). A duração t é de 15 minutos. A intensidade da precipitação It é de 118,9 mm/h (Tabela 4). A condutividade hidráulica do solo k é de 10^{-9} (URBONAS; STAHR, 1993). Por fim, a área total aproximada dos lados da estrutura de percolação A_{perc} , considerando-se as dimensões preestabelecidas, é de 16 m². Aplicando-se esses valores acima na Equação 12, após a necessária conversão das unidades para adequação à da formulação e a reiteração dos cálculos, obteve-se um volume para a trincheira de infiltração de **4,7 m³**.

Considerando-se a mesma largura (0,80 m) e o mesmo comprimento (6,00 m) da trincheira calculada pelo Método Racional, a profundidade da trincheira calculada pelo Método *Rain-Envelope*, calculada pela Equação 17, é de 1,00 m.

Comparação entre os métodos Racional e *Rain-Envelope*

O volume calculado pelo Método Racional (5,4 m³) foi 15% superior ao determinado pelo Método *Rain-Envelope* (4,7 m³). Essa diferença de volume, entretanto, não altera significativamente as dimensões da trincheira. Considerando-se o mesmo comprimento e largura da trincheira para ambos os métodos, a diferença da profundidade será de apenas 20 cm. Assim sendo, como margem de segurança, adotam-se as dimensões calculadas pelo Método Racional.

Quarta situação: situação real, com trincheira de infiltração (4.iv)

A introdução de trincheiras de infiltração em cada um dos 331 lotes do EHS resultaria em uma diminuição de 41% do volume escoado superficialmente pelo loteamento, passando de 3.546 m³ para 2.073 m³.

Nessa nova situação, a vazão máxima de escoamento superficial ocorreria 22 minutos após o início da chuva. Todavia, ocorreria uma redução de 1,78 m³/s (situação real) para 1,02 m³/s (situação real com trincheira).

Observa-se, assim, que a introdução de trincheiras de infiltração nos 331 lotes do EHS, além de reduzir significativamente o volume de água pluvial drenada (1.473 m³ passam a infiltrar no solo), também servirá para aumentar o tempo de concentração da bacia, reduzindo os picos dos hidrogramas de enchentes.

Custo unitário de uma trincheira de infiltração para EHS

O valor unitário de cada trincheira de infiltração fica condicionado ao custo de escavação e aos custos dos materiais constituintes (material granular, geotêxtil e tubulação de PVC para poço de observação). Assim, o custo de implantação de uma trincheira de infiltração (já considerados os valores de mão-de-obra de colocação dos materiais), na cidade de Londrina, PR, é de US\$ 168,00. Sendo 331 unidades habitacionais, o custo de implantação em todo o EHS é de US\$ 55.608,00.

Conclusões

A taxa de impermeabilização média dos terrenos das 64 unidades habitacionais pesquisadas foi de 61%.

A implantação do EHS resultou em um acréscimo da ordem de 1.127% no volume de água pluvial escoado superficialmente.

A introdução de trincheiras de infiltração em cada unidade habitacional reduziria o volume de água escoado superficialmente em 41%, passando de 3.546 m³ para 2.073 m³.

O baixo custo da implantação das trincheiras de infiltração no EHS selecionado (US\$ 55.608,00), somado aos ganhos ambientais gerados, indica a viabilidade técnica, econômica e ambiental da adoção dessa medida.

Não se observa, em EHS, uma preocupação com a drenagem das águas pluviais. Simplesmente direciona-se o volume precipitado e escoado superficialmente para o corpo d'água mais próximo, carreando, com isso, as impurezas do meio, além de gerar todos os inconvenientes do aumento do volume de água escoado, em especial as enchentes urbanas.

Esses fatos são reiterados, representando exatamente a ausência de projetos ambientais sustentáveis que priorizem a adequada destinação do excedente de água pluvial escoado, gerado a partir da excessiva impermeabilização das áreas dos EHS.

O aumento significativo do número de EHS nas cidades, em especial nos grandes centros urbanos, aliado à eficiência e ao baixo custo de implantação de trincheiras de infiltração viabilizam a adoção desse sistema na grande maioria dos empreendimentos.

Assim, é indispensável que se torne obrigatória a adoção, ainda na fase de projeto, de sistemas que possibilitem o efetivo controle do volume de água pluvial que vier a se precipitar sobre um EHS, destinando-o da maneira ambientalmente mais correta.

Referências

CRUZ, M. A. S. *et al.* Estruturas de controle do escoamento urbano na microdrenagem. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 13., 1999, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABRH, 1999.

FENDRICH, R. **Chuvas intensas para obras de drenagem.** Curitiba: Champagnat, 1998.

- GENOVEZ, A. M.; SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos - partes 1 e 2: classificação e aplicação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 5-29, 2005.
- JONASSON, S. A. Dimensioning methods for stormwater infiltration systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 3., 1984, Göteborg. **Proceedings...** Göteborg: Chalmers University of Technology, 1984. v. 3, p. 1037-1046.
- LABSID. LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE SUPORTE E DECISÕES. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. **LABSID**. Disponível em: <<http://143.107.96.240/labsid/>>. Acesso em: 02 ago. 2007.
- MIGUEL, M. G. *et al.* Caracterização geotécnica do subsolo da cidade de Londrina/PR. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 10., 25-28 ago. 2002, Ouro Preto, MG. **Anais...** Ouro Preto, 2002.
- MIKKELSEN, P. S. Design/modelling of stormwater infiltration. In: GROTTKER, M.; SCHILLING, W. **Hydrological and pollutional aspects of stormwater infiltration**: proceedings of the Second European Junior Scientist Workshop. Luzern: [s.n.], 1991. p. 21-36.
- SILVA, D. F. **Ensaio de permeabilidade de campo**. Londrina: UEL, 2004. Exercício prático da disciplina de tópicos especiais em investigações geológicas e geotécnicas, promovido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento.
- SILVEIRA, A. L. L. da. Pré-dimensionamento hidrológico de pavimentos permeáveis e trincheiras de infiltração. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15., 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ABRH, 2003. v. 1, p. 1-11.
- SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL (Paraná). **Manual de drenagem urbana da região metropolitana de Curitiba**. Curitiba: SUDERHSA, 2000.
- TUCCI, C. E. M. *et al.* **Drenagem urbana**. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 1995.
- _____. **Hidrologia**. 2. ed. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 2000.
- TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. M. L. da M. **Avaliação e controle da drenagem urbana**. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 2001. 2 v.
- URBONAS, B.; STAHRÉ, P. **Stormwater**: best management practices and detention for water quality, drainage and CSO management. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.