

Parâmetros do Hidrograma Unitário para Bacias Urbanas Brasileiras

Carlos E. M. Tucci

Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre - RS - tucci@iph.ufgrs.br

Recebido: 01/02 - revisão: 06/02 - aceito: 05/03

RESUMO

Na determinação da vazão de cheia numa bacia urbana é necessária a estimativa da vazão de pico, tempo de concentração, tempo de pico entre outros parâmetros de projeto. SCS (1975) apresentou como estimar estes parâmetros para bacias americanas a partir dos conceitos do hidrograma triangular e do uso de relações preparadas para bacias rurais com a correção do tempo de concentração para bacias urbanas. Estas relações geralmente são apresentadas sem uma comprovação de dados observados devido ao seu uso para projeto. Neste artigo são apresentadas relações para obtenção dos parâmetros com base em dados de bacias brasileiras. A estimativa dos valores é comparada com o método do SCS. As equações apresentadas possuem algumas limitações de uso e devem ser utilizadas de forma preliminar até que uma amostra maior de dados permita o estabelecimento de relações mais precisas.

Palavras-chave: hidrograma unitário; parâmetros; urbano.

INTRODUÇÃO

A determinação do hidrograma de projeto de uma bacia hidrográfica depende de dois componentes principais, a separação do volume de escoamento superficial e a propagação deste volume para jusante. Este último componente dos modelos hidrológicos geralmente utiliza a teoria de sistemas lineares, ou seja o hidrograma unitário (HU). Os conceitos e os procedimentos para estimativa do HU são encontrados nos livros de hidrologia (Tucci, 1993).

As limitações do HU para estimativa do escoamento superficial são as seguintes: (a) representação linear do escoamento superficial que tem um comportamento não-linear; (b) distribuição uniforme da precipitação dentro do intervalo de tempo; (c) distribuição espacial uniforme da precipitação; (d) erros nos métodos de separação do escoamento superficial e subterrâneo geram valores hidrológicos para a determinação do HU. Estas limitações se traduzem em HU diferentes, de acordo com cada evento. A estimativa do HU médio de cada bacia é obtida com algum grau de subjetividade e depende dos objetivos para o qual o mesmo será usado. Quando o HU é utilizado para estimar uma inundação freqüente (< 2 anos), a sua determinação é realizada com base em eventos observados de pequena e média magnitude. No caso em que o mesmo é utilizado para estimativa de eventos raros (> 50 anos) deve-se utilizar os dados de um ou dois dos maiores eventos registrados para estimar o HU e evitar o uso de eventos pequenos que podem introduzir abatimentos no hidrograma. Como o tempo de escoamento varia com a magnitude de uma cheia, um evento de pequena magnitude possui uma velocidade menor de esco-

amento (dentro da calha menor do rio) e tenderá a subestimar o HU de um evento maior, que possui maior velocidade de escoamento e menor tempo de resposta (este é o efeito não-linear do escoamento que o método não reproduz).

A determinação do HU é função dos dados observados de precipitação e vazão com intervalo de tempo compatível com o tempo de concentração da bacia. A disponibilidade destes dados é muito pequena, principalmente em áreas urbanas. Mesmo que houvesse dados, as bacias sofrem freqüentes alterações do solo, tornando as séries de dados não - estacionárias.

Para resolver este tipo de problema e simular cenários de desenvolvimento urbano futuro, foram desenvolvidos HU sintéticos baseados em características morfológicas, de tipo e de uso do solo das bacias. SCS (1975) utilizou a metodologia já conhecida do modelo SCS que simula o escoamento superficial através de um HU triangular, para alterar seu parâmetro, que é o tempo de concentração, em função da parcela de área impermeável da bacia e de canalização da bacia. Na referida publicação não são feitas referências aos dados utilizados para o estabelecimento das funções.

Diaz e Tucci (1987) utilizaram dados de algumas bacias brasileiras e desenvolveram equações de regressão para os parâmetros de vazão de pico e do tempo de pico e outros tempos relacionados com o HU. O referido estudo classificou as equações de regressão em quatro grupos, de acordo com a área impermeável e a área de drenagem. Esta classificação baseava-se na hipótese de que bacias rurais (pequena área impermeável) e com área de drenagem muito grande poderiam alterar criar tendenciosidade na estimativa dos parâmetros.

Neste artigo foi realizada uma triagem dos dados de Diaz e Tucci (1987) através de uma análise seletiva considerando: (a) eventos com dados históricos consistentes; (b) bacias urbanas com pelo menos 15% de área impermeável; (c) bacias urbanas inferiores a 50 km². Estes critérios têm como objetivo evitar qualquer tendência na equação de regressão, concentrando-se dentro do universo usual das bacias urbanas que são freqüentemente encontradas no país. Estes resultados devem ser utilizados para prognósticos de riscos de até 10 anos de tempo de retorno, já que as amostras das bacias são compostas por eventos de cheia pequenos e médios. Não foi possível estabelecer o tempo de retorno dos eventos devido ao período curto dos dados.

HU TRIANGULAR

Definições

Na Figura 1 é apresentado o HU triangular, onde Q_p é a vazão de pico do HU (m³/s), t_p é o tempo de pico a partir da origem (minutos). Usualmente o t_p é definido como o tempo a partir do centro da precipitação, denominado aqui de t_{pp} ; d é a duração da precipitação (minutos) e t_c é o tempo de concentração (minutos); t_r é o tempo recessão do hidrograma unitário.

Vazão máxima do HU

Com base nos dados dos Hidrogramas unitários determinados no estudo de Diaz e Tucci (1987) foram selecionadas as bacias com área menor que 50 km² e área impermeável superior a 10%. O HU de cada bacia foi determinado no estudo referido por pelo menos dois eventos. Os dados selecionados são apresentados na Tabela 1.

Utilizando o ajuste por mínimos quadrados de uma equação de regressão não-linear através da linearização por logaritmos, resultou na seguinte equação para a vazão de pico:

$$Q_p = 0,0585.A^{0,607}.AI^{0,691} \quad (1)$$

onde Q_p é a vazão máxima do HU em m³/s, para 1 mm de precipitação efetiva; A é a área da bacia em km² e AI a área impermeável em % e $R^2 = 0,92$. Na Figura 2 pode-se observar o ajuste dos valores. A vazão específica máxima do HU fica:

$$q_p = \frac{58,5.AI^{0,691}}{A^{0,393}} \quad (2)$$

onde q_p é obtido em l/(s.km²).

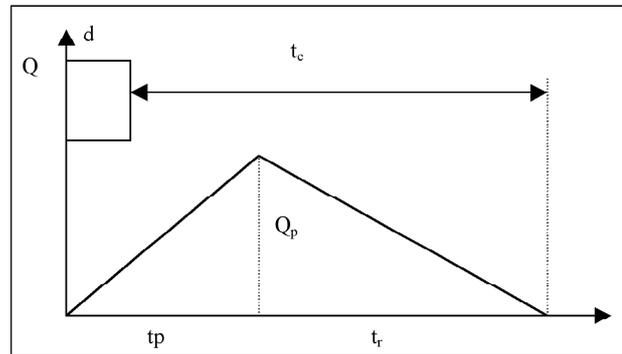


Figura 1. Parâmetros do hidrograma unitário triangular.

Considerando uma bacia com 80% de área impermeável (geralmente o limite superior de impermeabilização), resulta:

$$q_p = \frac{1208,3}{A^{0,393}} \quad (3)$$

Para uma bacia de 2 km², a vazão máxima específica do HU é 0,920 m³/(s.km²).

Segundo Campana e Tucci (1994) a relação entre densidade habitacional e área impermeável para bacias > 2 km² e densidade habitacional (DH) < 120 habitantes/hectare é:

$$AI = 0,489 DH \quad (4)$$

Substituindo (4) em (1) e (2) é possível relacionar a vazão e a vazão específica máxima do HU com a densidade habitacional:

$$Q_p = 0,035684.A^{0,607}.DH^{0,691} \quad (5)$$

$$q_p = \frac{35,684.DH^{0,691}}{A^{0,607}}$$

Tempo de pico e de concentração

Utilizando o mesmo conjunto de dados foi também regionalizado o tempo de pico a partir da origem em função da vazão específica. A equação obtida foi:

$$t_p = \frac{10,71}{(Q_p / A)^{1,1143}} \quad (6)$$

onde t_p é obtido em minutos. O coeficiente de determinação obtido foi de $R^2 = 0,82$. Na Figura 3 é apresentado o ajuste dos pontos.

A relação do tempo de pico diretamente em função da área em área impermeável fica:

Tabela 1. Valores de algumas bacias brasileiras (Diaz e Tucci, 1987).

Bacia	Cidade	Vazão de pico do HU m ³ /s	Área km ²	Área impermeável %	Tempo de pico min	Comprimento km
Cascatinha	Porto Alegre	1,57	7,42	22	60	4,9
B. Carvalho	Porto Alegre	0,84	3,4	18	60	2,41
S. Vicente	Porto Alegre	2,51	2,51	55	10	2,4
Mathias	Joinville	0,65	1,86	16	30	2,5
Mandaqui	São Paulo	5,31	19	58	45	6,1
Carapicuíba	São Paulo	2,03	23,1	19	150	8,9
A Espiraiada	São Paulo	3,47	12	60	45	7,8
Ipiranga	São Paulo	6,66	27,1	50	60	10,1
R. Vermelho	São Paulo	3,37	14,4	25	60	6,3
Jaguaré	São Paulo	2,6	13,9	32	30	7,7
Tiquatira	São Paulo	4,82	17,3	62	60	8,4
Pirajuçara	São Paulo	7,74	57,9	35	140	19,8

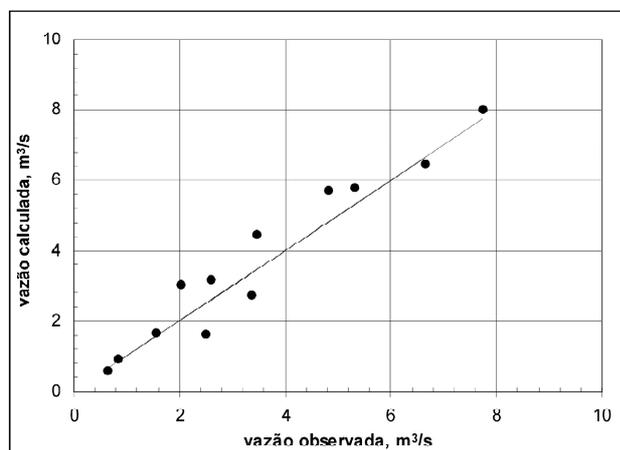


Figura 2. Ajuste da regressão da vazão de pico do HU.

$$t_p = \frac{253,25.A^{0,438}}{AI^{0,77}} \quad (7)$$

Da mesma forma que na equação anterior pode-se obter o tempo de pico em função da densidade habitacional:

$$t_p = \frac{439,31.A^{0,438}}{DH^{0,77}}$$

válida para $DH < 120$ hab/hectare e bacias com $A > 2$ km².

No método do HU triangular a área do triângulo é igual a 1 e corresponde ao volume estimado para 1 cm de precipitação efetiva. Neste caso, os tempos são em minutos. A equação fica:

$$\frac{Q_p \cdot (t_p + t_r) \cdot 60 \cdot 10^3}{2.A \cdot 10^6} = 1$$

Desta equação é possível obter tempo de base ou $t_r + t_p$:

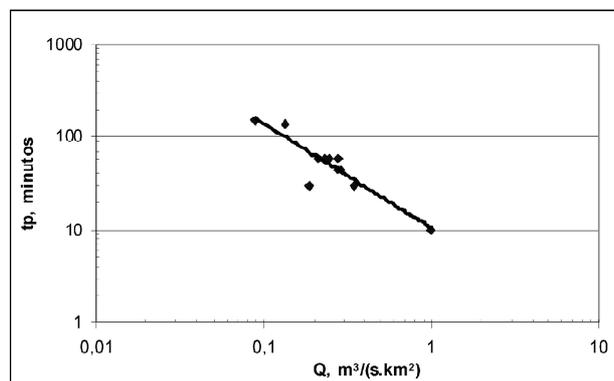


Figura 3. Relação entre tempo de pico e vazão específica em algumas bacias urbanas.

$$t_r + t_p = \frac{100.A}{3.Q_p} \quad (8)$$

Considerando a definição de t_c (Figura 1):

$$t_c = t_r + t_p - d \quad (9)$$

A duração $d = 1/\Delta t$, para que o volume seja unitário, onde Δt é o intervalo de tempo da precipitação. Para que o hidrograma seja adequadamente representado deve-se adotar $\Delta t < (1/5) t_c$. O tempo de concentração pode ser estimado substituindo a Equação (8) na Equação (9), resulta:

$$t_c = \frac{27,778}{Q_p / A} \quad (10)$$

onde t_c é obtido em minutos.

O tempo de concentração com base na área impermeável e a densidade habitacional DH ficam:

$$t_c = \frac{712,21.A^{0,397}}{AI^{0,691}} \quad (11)$$

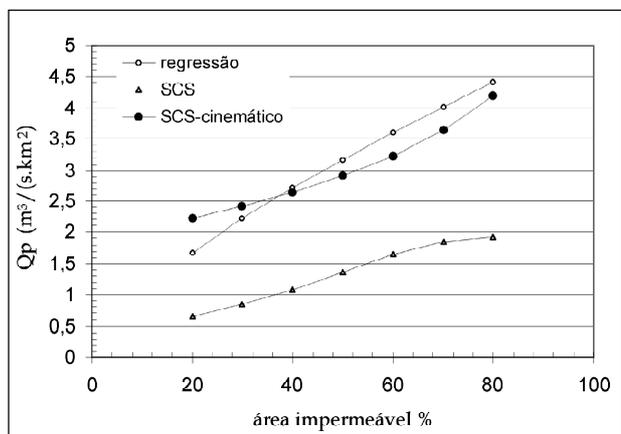


Figura 4. Comparação das estimativas das Vazões de pico do HU pelos dois métodos.

$$t_c = \frac{1172,6.A^{0,397}}{DH^{0,691}}$$

Relacionado os tempos de pico e concentração com base nas Equações (6) e (10), resulta:

$$\frac{t_p}{t_c} = \frac{0,386}{(Q_p / A)^{0,1143}} \quad (12)$$

Para as bacias em estudo os tempos variaram entre 0,39 e 0,49, com grande frequência para 0,45. No modelo SCS é adotado $t_p = 0,6 t_c$, que é muito alto. Pode-se observar da equação que a relação da Equação (11) diminui com o aumento da urbanização, como era de se esperar.

APLICABILIDADE

Uso das equações

As limitações das equações propostas são as seguintes:

- A amostra de bacias utilizadas é pequena;
- O número reduzido de eventos utilizados para algumas bacias;
- As equações representam HU com risco baixo. Estima-se que os resultados possam ser utilizados para risco de até 10 anos. Na medida que aumenta o risco a tendência será do HU ficar mais amortecido;
- Limitações inerentes ao método linear descrito dentro do texto;
- As equações não consideram o comprimento do rio principal e a declividade. Na regressão estas variáveis não se mostraram significativas. Esta situação ocorre devido a grande correlação entre a área de drenagem e estes parâmetros da bacia. No entanto, em situações específicas poderão resultar em erros;

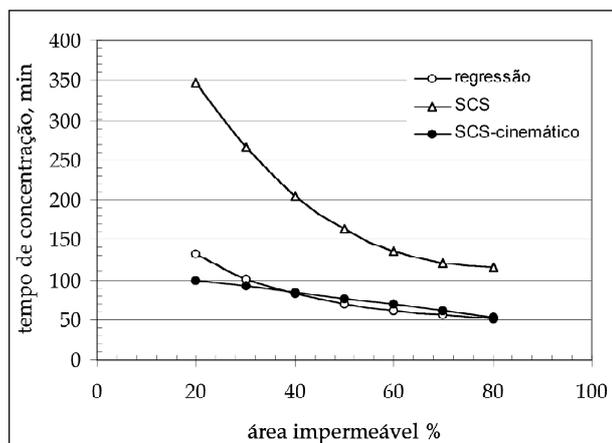


Figura 5. Comparação entre o tempo de concentração obtido pelos métodos.

- As equações devem ser utilizadas para bacias com áreas impermeáveis maiores que 15% e área de drenagem menor que 50 km². Fora deste intervalo as equações estariam extrapolando;
- A equação de área impermeável e densidade de drenagem foi deduzida baseada em bacias com área maior que 2 km², DH < 120 hab/hectares com dados de São Paulo, Curitiba e Porto Alegre e ocupação urbana predominantemente residencial;
- A equação de regressão do tempo de pico foi obtida com base na vazão de pico que por sua vez é obtida por regressão, o que já transporta incerteza de uma equação para outra.

Comparação do HU obtido com as equações e o SCS

Considere uma bacia de 8 km² de área de drenagem com desnível 30 m ao longo do comprimento de rio de 4,5 km. A relação entre a área impermeável e o valor de CN foi obtido da tabela publicada por SCS (1975) para áreas urbanas residenciais. O tempo de concentração foi obtido por dois métodos: (a) método SCS onde a vazão é calculada com base no valor de CN, declividade e comprimento do rio e depois corrigida em função dos fatores de canalização e urbanização. Neste caso a proporção de área impermeabilizada e canalizada foi adotada igual; (b) método cinemático: para o trecho não urbanizado foi adotada a velocidade de 0,65 m/s e para o trecho urbanizado 2,0 m/s, caracterizando superfícies típicas destes cenários.

Nas Figuras 4 e 5 são apresentados os HU pelos três procedimentos. O HU obtido pelo método SCS onde o tempo de contração é obtido segundo descrito em SCS (1975) subestimou o pico e superestimou o tempo de concentração com relação à regressão, enquanto os resultados do

método cinemático e o da regressão descrito neste estudo apresentam resultando próximos entre si.

CONCLUSÕES

Com base numa amostra de dados de bacias brasileiras foram regionalizados os valores da vazão do pico e tempo de concentração do hidrograma unitário triangular. As equações resultantes dependem da área de drenagem e da área impermeável das bacias hidrográficas, embutindo dentro destas variáveis os outros parâmetros físicos das bacias. Esta análise foi realizada com uma amostra pequena de 12 bacias brasileiras. Para cada bacia foi estimado um HU representativo com base em dados de alguns eventos que caracterizam inundações pequenas e médias.

Para analisar a sua compatibilidade foi calculada a sua estimativa frente aos procedimentos de projeto utilizados quando não se dispõe de dados observados. O modelo SCS foi escolhido e duas alternativas foram analisadas: (a) tempo de concentração como descrito pelo método; (b) tempo de concentração obtido pelo método cinemático.

Os resultados comparativos mostraram que os resultados da regressão se aproximam dos valores do SCS com o tempo de concentração obtido pelo método cinemático.

A metodologia proposta deve ser utilizada com cuidado, examinando-se sempre a compatibilidade dos resultados obtidos frente às singularidades de cada caso e dos limites aplicação das regressões do método.

Metodologias de regionalização como a apresentada não substituem os dados, apenas procuram minimizar o impacto da falta de dados hidrológicos para um melhor ajuste de modelos hidrológicos.

AGRADECIMENTO

Estes resultados fazem parte da pesquisa desenvolvida no Instituto de Pesquisas Hidráulicas com fundos do PRONEX - CNPq.

REFERÊNCIAS

- CAMPANA, N. A. e TUCCI, C. E. M. (1994). Estimativa de área impermeável de macro bacias urbanas. *RBE. Caderno de Recursos Hídricos*, vol. 12 n. 2 p. 79-94.
- DIAZ, O. e TUCCI, C. E. M. (1987). Regionalização de hidrogramas unitários de bacias urbanas. *Caderno de Recursos Hídricos. Revista Brasileira de Engenharia*, vol. 7, n. 2, p. 19-30.
- SCS (1975). *Urban Hydrology for Small Watersheds*. Washington. U.S. Dept. Agr. (Technical Release. n. 55).
- TUCCI, C. E. M. (1993). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. EDUSP, Editora da UFRGS, ABRH, 952 p.

Unit Hydrograph Parameters for Brazilian Urban Basins

ABSTRACT

In order to determine the flood flow in an urban basin, it is necessary to estimate the peak flow, time of concentration, peak time, and other project parameters. The SCS (1975) showed how to estimate these parameters for American basins, based on the concepts of the triangular hydrograph and the use of relations prepared for rural basins, correcting time of concentration for urban basins. These relations are generally presented without proving the observed data, due to their use in projects. In this article, relations are presented to obtain the parameters based on data from Brazilian basins. The estimation of values is compared to the SCS method. There are a few limitations for the use of the equations presented, and they should be utilized preliminarily until a larger data sample allows establishing more precise relations.

Key words: unit hydrograph; parameters; urban.