

# Análise da distribuição temporal das chuvas em eventos hidrológicos extremos

*The analysis of time distribution of rainfall in heavy storms*

Fernando Girardi de Abreu<sup>1</sup>, Lôide Angelini Sobrinha<sup>2</sup>, João Luiz Boccia Brandão<sup>3</sup>

## RESUMO

O objetivo da pesquisa foi analisar a influência da distribuição temporal das chuvas em eventos hidrológicos extremos na bacia do Córrego do Gregório (São Carlos, São Paulo). Foram aplicadas duas metodologias de distribuição temporal das chuvas e adotados períodos de retorno de 25, 50 e 100 anos: o método de Huff 1º quartil e o método dos blocos alternados; e simularam-se as manchas de inundação com o software HEC-GeoRAS. A alteração do método de distribuição temporal das chuvas resultou em hidrogramas com diferenças de até 46% na vazão de pico, 57% nas áreas da mancha de inundação da região e 1,5 m na altura de inundação.

**Palavras-chave:** mancha de inundação; distribuição temporal das chuvas; simulação hidrológica

## ABSTRACT

The research objective was to analyze the time distribution of rainfall caused by flash floods in Gregorio watershed (São Carlos, São Paulo, Brazil). Two methodologies of temporal distribution of rainfall were applied for adopted return periods of 25, 50 and 100 years: the Huff 1<sup>st</sup> quartile method and the alternating blocks method; wherein the flood inundation areas were simulated with HEC-GeoRAS software. The time distribution of both rainfall methods exhibit 46% discrepancy in peak flow, 57% in flood inundation area and 1.5 m in water depth.

**Keywords:** flood inundation area; time distribution of rainfall; hydrological simulation.

## INTRODUÇÃO

As inundações urbanas no Brasil são decorrentes, principalmente, da alteração do uso do solo provocada pelo processo de urbanização, que se acentuou a partir da década de 1950, e causam, além de perdas humanas, disrupção da vida cotidiana da população atingida, prejuízos econômicos e impactos ambientais.

No município de São Carlos, São Paulo, ao analisar as notícias históricas de jornais com base nos anos de 1940 a 2004, foram encontrados 82 eventos de inundações ou alagamentos. Somente na bacia do Córrego do Gregório, localizado no centro da cidade, foram constatados 64 casos de inundação e 38 intervenções e obras relacionadas à drenagem urbana; porém, o problema ainda persiste nessa região (MENDES & MENDIONDO, 2007).

O Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável do Município de São Carlos (PMSC, 2011) fornece diretrizes para auxiliar a prefeitura municipal no gerenciamento da drenagem urbana,

de modo a subsidiar a tomada de decisão quanto à redução dos impactos causados pelas inundações.

Na elaboração do plano foram avaliadas as condições atuais da drenagem urbana e proposta a adoção de medidas mitigadoras de drenagem (estruturais e não estruturais). Como medidas estruturais, foram previstos 21 reservatórios de retenção *in-line* ao longo de diversas bacias hidrográficas do município. Em relação às medidas não estruturais, foram propostos: treinamento dos técnicos envolvidos na gestão da drenagem urbana; educação ambiental; orientação para projetos de engenharia; e elaboração de um manual de drenagem urbana.

Deve-se ressaltar que, normalmente, no Brasil e em diversos outros países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento, as pequenas e médias bacias urbanas e rurais não contam com dados hidrometeorológicos que permitam a avaliação de chuvas de projeto para cada local específico. Dessa forma, é comum a aplicação de equações de chuvas intensas com base em relações intensidade-duração-frequência (I-D-F), que fornecem

<sup>1</sup>Mestre e doutorando em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (USP), Brasil.

<sup>2</sup>Doutora em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos da USP - São Carlos (SP), Brasil.

<sup>3</sup>Doutor em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da USP. Professor doutor do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da USP - São Carlos (SP), Brasil.

**Endereço para correspondência:** Fernando Girardi de Abreu - Rua Trabalhador São Carlense, 400 - Parque Arnold Schimidt - 13566-590 - São Carlos (SP), Brasil - E-mail: abreu.fernando@gmail.com

**Recebido:** 04/03/15 - **Aceito:** 03/08/16 - **Reg. ABES:** 146750

o valor da intensidade máxima da precipitação ao longo de sua duração e período de retorno de um dado município.

A partir desse valor, é necessário definir o hietograma de projeto, que é o principal dado de entrada de chuva do modelo chuva-vazão, para então obter o hidrograma simulado. Para isso, é necessário distribuir os valores discretizados da chuva ao longo da duração escolhida para cada intervalo de tempo do hietograma.

O hietograma de projeto indica como um evento de precipitação é distribuído no tempo. O conhecimento da distribuição temporal da chuva é de extrema importância, já que pode influenciar significativamente na forma e no pico do hidrograma simulado.

Como, a priori, não se conhece essa distribuição temporal — que pode variar tanto no espaço como no tempo e também em relação ao tipo de precipitação —, é comum adotar-se distribuições empíricas que procuram representar as condições mais críticas possíveis da desagregação temporal da chuva e assim definir um hidrograma igualmente crítico, a despeito do método dos blocos alternados, apresentado por Tucci (1995).

Uma precipitação com pico de intensidade concentrada no final do evento originará um escoamento superficial maior do que outra cuja intensidade máxima se concentra no início do evento (BRANDÃO; RODRIGUES; COSTA, 2001).

De acordo com o autor, se o pico da intensidade da chuva ocorrer no final do evento, a precipitação efetiva será semelhante ao total precipitado, uma vez que as perdas iniciais já foram satisfeitas; ao contrário, se o pico da precipitação ocorrer no início do evento, só uma parte dessa precipitação gerará escoamento superficial, sendo que o restante irá satisfazer as perdas iniciais e, dessa forma, irá provocar uma vazão menor quando comparado à primeira situação.

Essa correlação entre a variação do pico de intensidade da chuva e a respectiva precipitação efetiva gerada é explicada por Viessman Junior, Lewis e Knapp (1989). Segundo o autor, o potencial do gradiente hidráulico do solo no início da chuva é elevado porque a frente de umedecimento permanece praticamente na superfície do solo. Entretanto, inicialmente, a velocidade de infiltração da água no solo é maior do que a intensidade da precipitação e, com o fornecimento contínuo das águas precipitadas, a zona de umedecimento aumenta e a velocidade de infiltração é reduzida; nesse momento ocorre a saturação da superfície do solo, gerando o escoamento superficial. Dessa forma, o comportamento da velocidade de infiltração da água no solo pode ser representado por uma curva de decaimento, como apresentada na Figura 1, onde  $K_s$  é o coeficiente de saturação do solo e  $t_p$  é o tempo a partir do qual ocorre um decaimento da velocidade de infiltração do solo.

Assim, com o intuito de analisar a influência da distribuição temporal das chuvas de modelos comumente utilizados em projetos de drenagem urbana (SÃO PAULO, 2012), essa pesquisa compara dois métodos de distribuição temporal da chuva para analisar o impacto

da aplicação desses na geração dos hidrograma de cheia, do mapa da área da mancha de inundação e de sua respectiva altura de inundação. Como resultado, foi verificada a alta sensibilidade dessas três variáveis à adoção do método de distribuição temporal.

Os métodos selecionados foram:

1. desagregação da chuva com pico de intensidade no início da precipitação, baseado no método de Huff 1º quartil (HUFF, 1967) e;
2. desagregação das chuvas com pico de intensidade na metade da duração da chuva, baseado no método dos blocos alternados (TUCCI, 1995).

Foram utilizados os softwares de modelagem chuva-vazão *Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modelling System* (HEC-HMS) e o modelo hidrodinâmico *Hydrologic Engineering Center - River Analysis System* (HEC-RAS), que forneceram resultados para definição de manchas de inundação obtidas a partir do software ArcGIS (versão 9.3) e do suplemento HEC-GeoRAS (versão 4.3).

## Distribuição temporal da chuva

Nos estudos hidrológicos voltados à drenagem urbana, normalmente são adotadas relações intensidade-duração-frequência (IDF) e modelos matemáticos do tipo chuva-vazão na definição dos hidrogramas de projeto.

É na desagregação das precipitações para a determinação dos hietogramas de projeto que reside o grande problema do hidrólogo, visto que para cada distribuição temporal das chuvas tem-se hidrogramas diferentes (CANHOLI, 2005). A metodologia dos blocos alternados é caracterizada como uma solução simples e uma condição crítica. Esse método propõe a desagregação dos totais de chuva em intervalos de tempo discretizados pela sua duração total. Assim, a partir dos incrementos totais acumulados de precipitação, transformados em altura de chuva, os blocos obtidos são rearranjados numa sequência tal que, no centro da duração da chuva, situe-se o bloco maior e, em seguida, os demais blocos, em ordem decrescente, um à direita e o outro à esquerda do bloco maior, alternadamente (TUCCI, 1995).

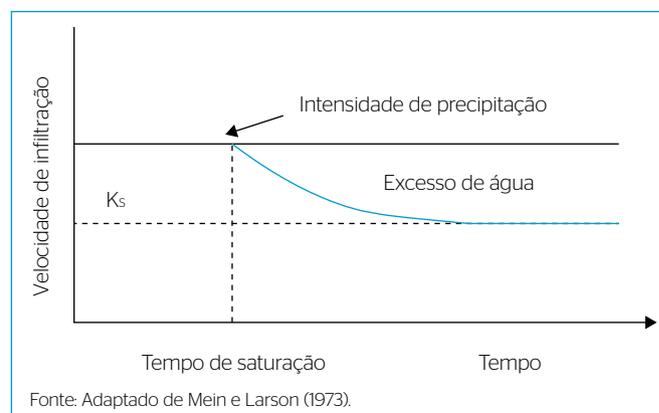


Figura 1 - Variação da velocidade de infiltração com o tempo.

De acordo com Canholi (2005), a distribuição dos blocos no hietograma é arbitrária e pode conduzir a diversas configurações; porém, existem algumas regras empíricas que devem conduzir a picos mais elevados. Uma dessas regras impõe que a parcela mais intensa da precipitação seja colocada entre um terço e metade da duração da chuva. Os outros blocos devem ser colocados alternadamente. Nesse método, quanto menor o passo de tempo empregado, maiores as intensidades de pico.

O método descrito por Huff (1967) classifica as precipitações em quatro grupos, com durações divididas em quatro partes iguais para cada. O autor analisou 261 eventos de chuva em 11 anos de registro, com duração de 30 minutos a 48 horas, de 49 postos espalhados numa área de 1 mil km<sup>2</sup>. A área considerada no estudo era rural, com terreno plano e com elevações de 200 a 300 m.

Nesse método, uma precipitação isolada foi definida como a chuva intensa, separada da precipitação que a antecede, por um intervalo de seis horas ou mais. O critério adotado na classificação foi baseado no valor da chuva média da rede de postos pluviométricos utilizados no experimento e apenas as precipitações que excederam 13 mm foram adotadas no estudo. As distribuições temporais foram expressas em termos de probabilidade, devido à grande variabilidade existente.

Assim, as precipitações foram classificadas e agrupadas de acordo com o quartil em que a chuva mais intensa ocorreu. Para os dados de chuva de cada quartil, fez-se uma análise estatística, com o objetivo de se obter as curvas adimensionais de distribuição temporal, associadas a uma probabilidade de excedência (probabilidade da chuva exceder a curva adimensional de distribuição temporal no respectivo quartil). Essa subdivisão foi efetuada de acordo com a localização do pico da precipitação em cada um dos quatro quartis (HUFF, 1967). As curvas de probabilidade de excedência de chuva descritas por Huff são apresentadas na Figura 2.

Utilizando o gráfico de distribuição temporal de chuvas do primeiro quartil pelo método de Huff (Figura 2A) é possível estabelecer, para cada percentual de duração de chuva, o percentual de chuva acumulada total e o percentual de chuva acumulado por intervalo de tempo. Como exemplo de aplicação, é apresentada na Tabela 1 uma chuva com duração de uma hora em que o hietograma de projeto se enquadra no primeiro quartil com 50% de probabilidade de excedência (Figura 2A).

Ao observar as durações das chuvas e seus respectivos quartis, Huff (1967) obteve as frequências associadas a essas chuvas, conforme Tabela 2. Observa-se na tabela que as precipitações intensas de curta duração (menor do que 12 horas), normalmente de maior interesse para os projetos de drenagem urbana, foram classificadas com maior frequência entre o 1º e o 2º quartil; além disso, 66% das chuvas analisadas enquadraram-se no 1º ou no 2º quartil, com duração menor do que 12 horas.

De acordo com o Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais de São Paulo (SÃO PAULO, 2012), o tipo de distribuição temporal das chuvas de projeto e a fixação da duração estão sujeitas a diversas

orientações metodológicas, implicando em resultados de descargas máximas e volumes de cheias que podem ser bastante discrepantes. Destaca também que, nos projetos de drenagem de bacias urbanas, tem sido adotada, na maioria das vezes, chuvas com duração de 2 ou 3 horas e distribuição conforme o método dos blocos alternados ou o método de Huff 1º quartil. Somente para bacias com áreas maiores que 100 km<sup>2</sup>, foram adotados chuvas de 6 horas e distribuição dos blocos alternados ou Huff 2º quartil.

Para a elaboração de hietogramas de projeto característicos em Portugal, Brandão, Rodrigues e Costa (2001) aplicaram o método de Huff (1967) em três postos pluviométricos, localizados nas cidades de Lisboa, Évora e Faro, em Portugal. Dentre as conclusões dos autores, verificou-se a predominância, entre as chuvas analisadas, de hietogramas do tipo Huff 1º quartil, ou seja, ocorrência da maior intensidade da precipitação no primeiro quarto da duração.

Os autores também realizaram análises das precipitações em relação a sua probabilidade de excedência, de modo a comparar os resultados com aqueles obtidos por Huff (1967). Os dados foram analisados estatisticamente e agrupados nos quartis e suas respectivas excedências para probabilidade de 10, 50 e 90%. Os resultados mostraram boa correlação entre os dados observados e aqueles obtidos por Huff. Os resultados para os postos pluviométricos analisados com 10% de probabilidade de excedência são apresentados na Figura 3.

Vasconcelos, Andrade e Mendiondo (2007) realizaram análise estatística das chuvas baseada no método de Huff para a região do Córrego do Gregório em São Carlos, São Paulo. Os dados foram obtidos a partir de uma estação hidrometeorológica próxima ao divisor de águas da bacia e de um pluviógrafo às margens do mesmo córrego (próximo ao fórum da cidade).

Os autores selecionaram 71 eventos no período de janeiro de 2004 a dezembro de 2005 e consideraram apenas os eventos com precipitação total superior a 10 mm e duração entre 45 minutos e 6 horas. Para caracterizar os eventos e dividir as chuvas nos respectivos quartis, foram elaborados gráficos adimensionais relativos à precipitação e duração da chuva.

Os resultados mostraram que 31% das chuvas pertencem ao grupo do 1º quartil, 45% ao grupo 2º quartil, 21% ao grupo 3º quartil e 1% ao grupo 4º quartil. Dessa forma, as chuvas na região podem ser caracterizadas, para o período analisado, com picos de intensidade que se situam entre o 1º e o 2º quartil em 76% das ocorrências.

## Simulação hidráulico-hidrológica

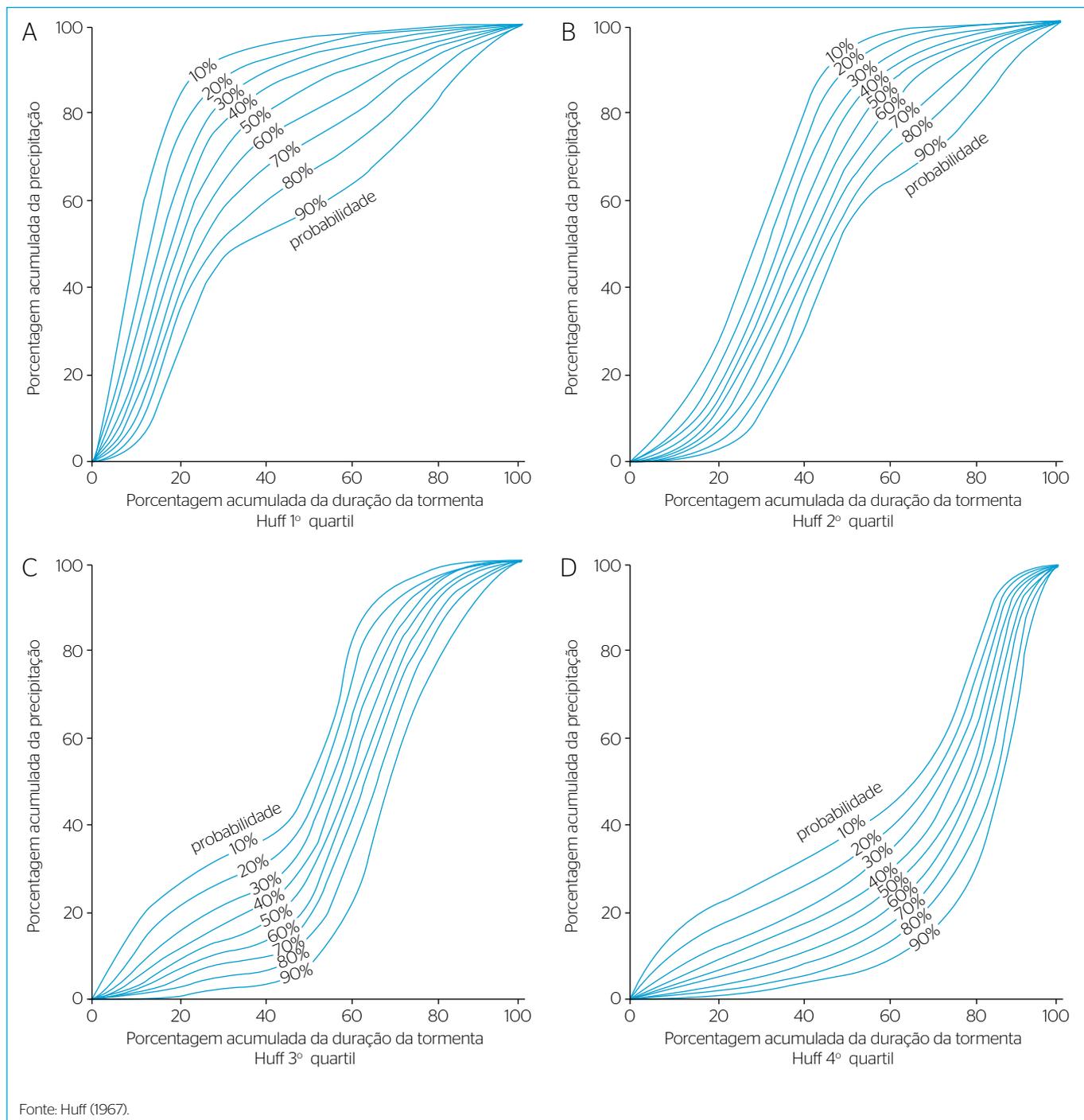
A plataforma HEC, desenvolvida pelo *Hydrologic Engineering Centre*, do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (*U.S. Army Corps of Engineers*) possui um conjunto de módulos capazes de simular diversos processos em bacias hidrográficas dendríticas (USACE, 2004).

O módulo *Hydrologic Modeling System* (HMS) simula processos hidrológicos e, dentre eles, destaca-se o processo de transformação chuva-vazão. O módulo *River Analysis System* (RAS) é um programa aplicado à simulação de perfis de linha de água em rios e reservatórios, na hipótese de fluxo unidimensional e regime de escoamento permanente, gradualmente variado, subcrítico, supercrítico ou misto, bem como em regime não permanente (transiente). Como dados de entrada, são necessárias: as seções transversais da calha do rio; o perfil longitudinal; a definição

das condições de contorno e dos coeficientes de rugosidade de Manning e os valores de vazão a serem escoados no trecho.

O módulo RAS apresenta a vantagem de se comunicar com o software ArcGIS através da plataforma HEC-GeoRAS, que permite exportar as informações necessárias à modelagem hidráulica a partir de modelos digitais de terreno (MDT).

Desse modo, as manchas de inundação podem ser traçadas através do HecGeoRas, utilizando o MDT gerado com as curvas de nível.



**Figura 2** - Curvas de probabilidade de excedência de chuva descritas por Huff.

**Tabela 1** - Percentual de chuva acumulada no tempo para a distribuição de Huff 1º quartil com 50% de probabilidade de excedência.

$\Delta t$ (min)	% de duração	% acumulada de chuva	% no intervalo
12	20	50	50
24	40	78	28
36	60	88	10
48	80	95	7
60	100	100	5
Total			100

Fonte: Tucci (1995).

**Tabela 2** - Relação duração da chuva - quartil - frequência.

Duração da chuva (horas)	Quartil	Frequência (%)
Menor do que 12	1º	30
Menor do que 12	2º	36
Entre 12 e 24	3º	19
Maior do que 24	4º	15

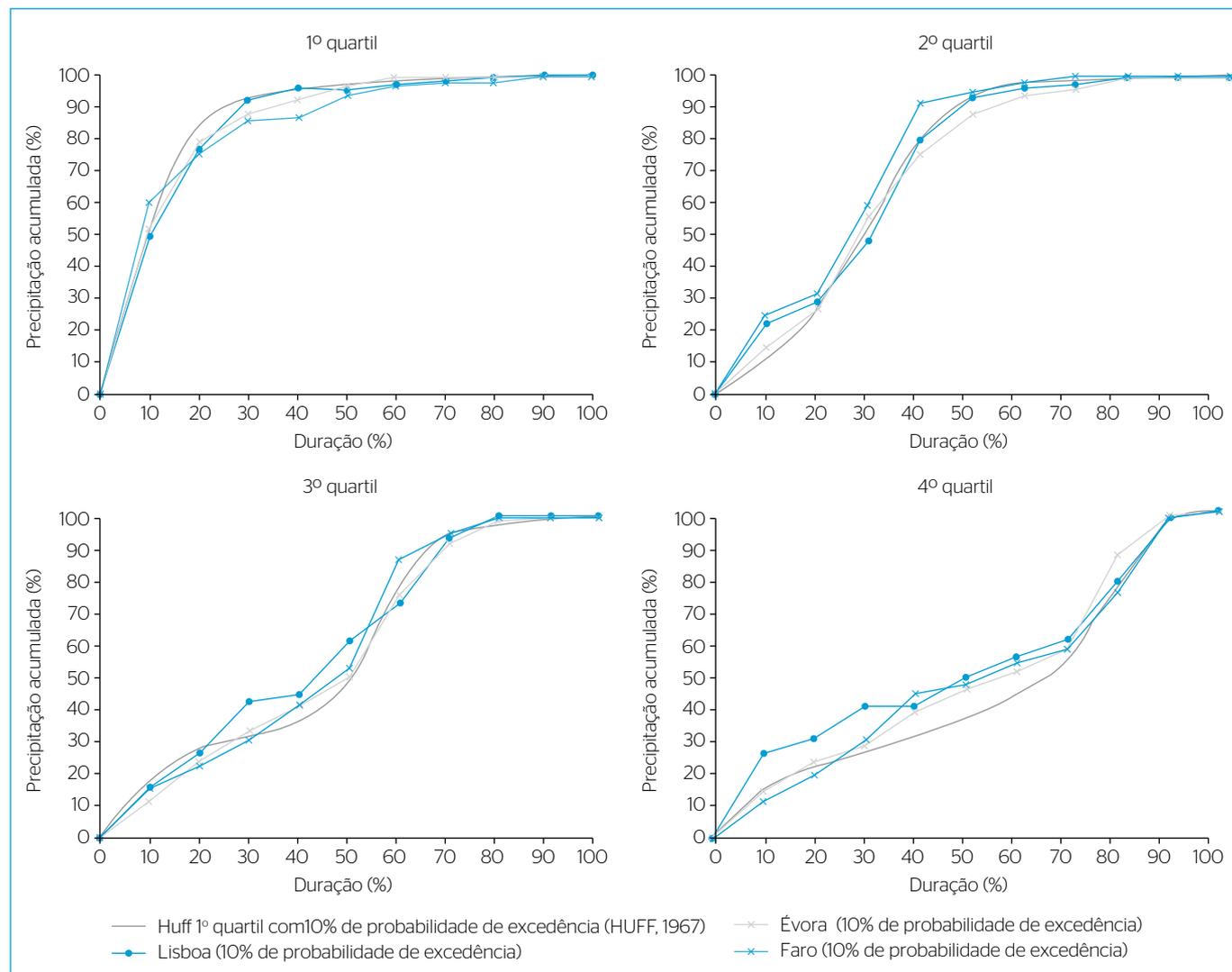
Fonte: Adaptado de Tucci (1995) e Canholi (2005).

Para isso, esse suplemento do ArcGIS sobrepõe os níveis de água simulados pelo software hidráulico HEC-RAS ao MDT.

## METODOLOGIA

### Área de estudo

A bacia hidrográfica do Córrego do Gregório localiza-se na cidade de São Carlos, São Paulo, e representa uma região que sofre inundações frequentes. Sua área é de 18,9 km<sup>2</sup> e possui duas regiões com características distintas: uma urbanizada e outra em processo de urbanização. A região que se encontra em processo de urbanização conta com aproximadamente 10,4 km<sup>2</sup> e localiza-se a montante da bacia. Essa parte da bacia apresenta características rurais, originalmente ocupada por vegetação de cerrado e atualmente possui sua mata ciliar bastante degradada. A jusante, onde o processo de urbanização é mais avançado,

**Figura 3** - Resultados obtidos por Brandão, Rodrigues e Costa (2001) para os postos de Portugal e comparação dos resultados com os obtidos por Huff (1967) com 10% de probabilidade de excedência.

encontram-se fragmentos de mata ciliar, contudo, o leito maior do córrego foi ocupado por avenidas marginais e edificações.

A área de estudo está inserida na área urbanizada do Córrego do Gregório e representa o maior centro econômico do município, conforme Figura 4. A delimitação das sub-bacias, utilizada na modelagem chuva-vazão, é apresentada na Figura 5. Em ambas as figuras as manchas de inundação simuladas referem-se à área circulada na sub-bacia 12.

### Cobertura e uso da terra

O processo de classificação da cobertura e do uso da terra foi realizado por Decina (2012) de forma manual, com base em uma imagem do satélite *WorldView-II* de 2 de junho de 2011. O arquivo da imagem contém uma banda pancromática (PAN) com resolução espacial

de 0,5 m e quatro bandas multiespectrais (MS) com resolução espacial de 2 m: vermelho, verde, azul e infravermelho próximo. Foi aplicado o processo de fusão entre as bandas PAN e MS (composição RGB) a fim de aumentar a resolução espacial, que foi de 0,5 m. Essa etapa foi realizada com o software ArcGIS 9.3.

A partir da classificação da cobertura e do uso da terra é possível atribuir um valor de *curve number* (CN) médio para cada sub-bacia do sistema. O mapa da cobertura e do uso da terra da bacia do Córrego do Gregório é apresentado na Figura 6.

### Tempo de concentração da bacia

Os tempos de concentração das sub-bacias foram calculados pela equação proposta por George Ribeiro (RIBEIRO, 1961), expressa na Equação 1.

$$t_c = \frac{16L_t}{(1,05 - 0,2p)(100S_m)^{0,04}} \tag{1}$$

Em que:

- $t_c$ : tempo de concentração (min);
- $L_t$ : comprimento do talvegue (km);
- $S_m$ : declividade média da bacia ( $m.m^{-1}$ );
- $p$ : fração da área da bacia coberta com vegetação (adimensional).

### Metodologia de distribuição das chuvas

Foram abordados os seguintes métodos de distribuição de chuvas:

1. método dos blocos alternados; e
2. método de Huff (1967).

No método dos blocos alternados, o pico de intensidade da chuva foi alocado na metade do tempo de sua duração. No método de Huff 1º quartil, o pico da intensidade foi alocado no começo da precipitação.

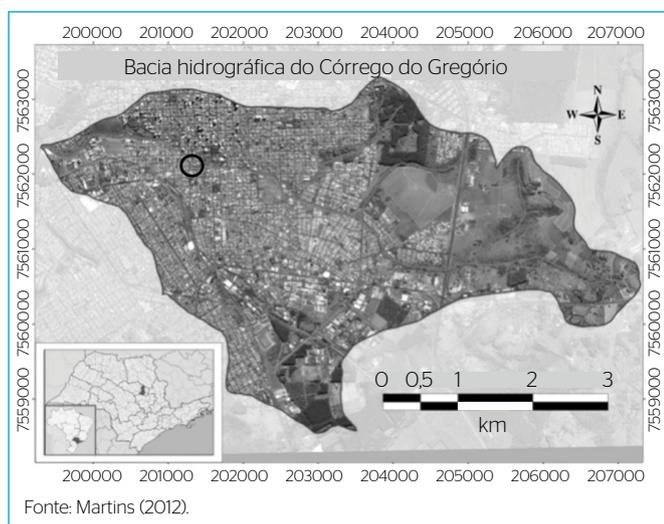


Figura 4 - Imagem de satélite com a delimitação da bacia do Córrego do Gregório.

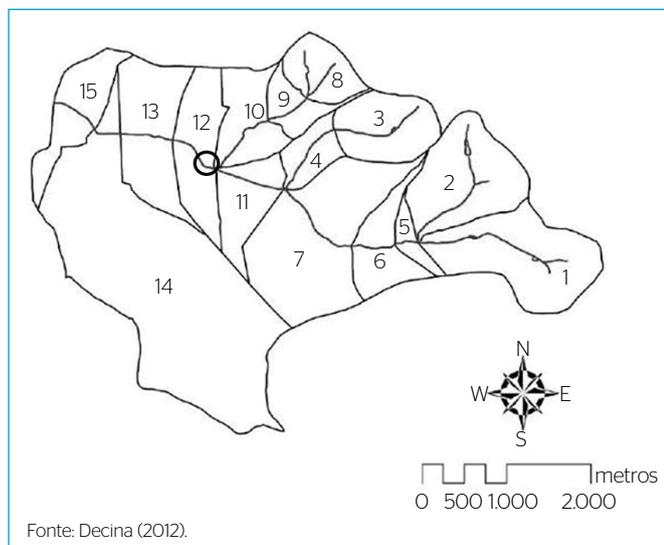


Figura 5 - Configuração das sub-bacias do Córrego do Gregório para modelagem chuva-vazão.

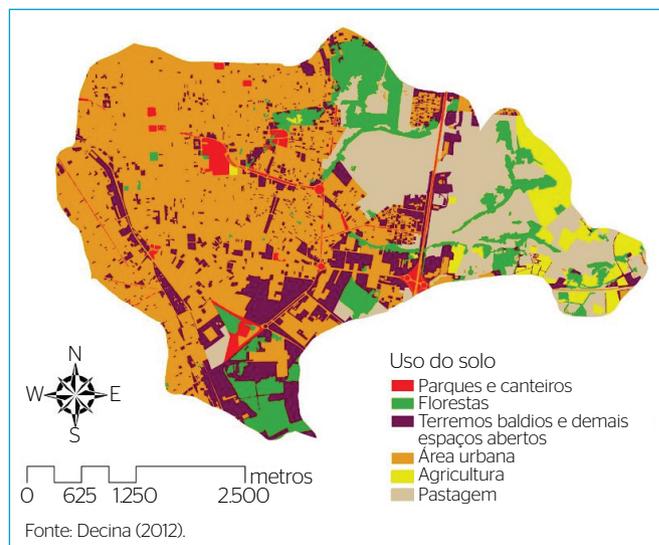


Figura 6 - Cobertura e uso da terra classificados para a bacia do Córrego do Gregório.

Foram adotadas chuvas para os tempos de retorno de 25, 50 e 100 anos de acordo com a curva IDF elaborada por Barbassa (1991). A distribuição da chuva pelos dois métodos e períodos de retorno é apresentada na Figura 7.

A desagregação das chuvas aplicadas foi a mesma para as duas chuvas de projeto. Entretanto, os picos de intensidade foram alocados em diferentes durações da chuva. Os hietogramas das chuvas de projeto foram analisados de acordo com os resultados obtidos por Huff (1967) para comparar o seu enquadramento nos respectivos quartis. Para isso, as distribuições temporais da chuva com o rearranjo dos blocos alternados e do Huff 1º quartil (Figura 7) foram adimensionadas quanto ao percentual da precipitação acumulada pelo percentual da duração e procedeu-se à comparação de acordo com a probabilidade de excedência nos respectivos quartis (Figura 2).

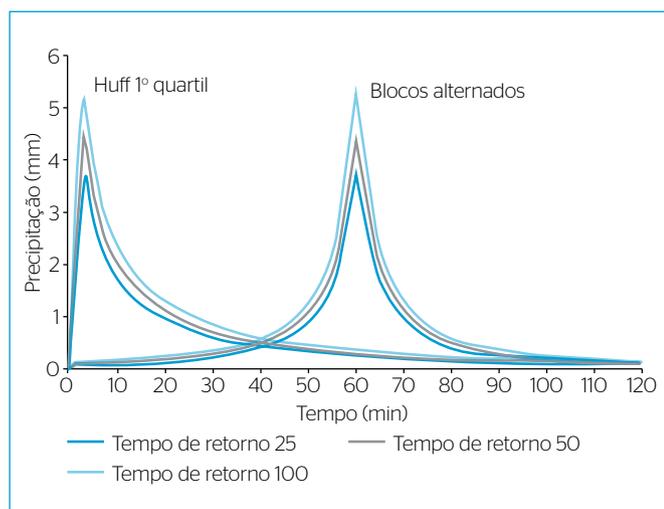
### Simulação hidráulica-hidrológica

As precipitações aplicadas pelos diferentes métodos, as áreas de cada sub-bacia e os valores de CN foram os principais dados de entrada do modelo chuva-vazão (HEC-HMS). Os três períodos de retorno de chuva associados aos dois hietogramas de projeto resultaram em seis simulações. A área de cada sub-bacia, o valor de CN médio atribuído e o respectivo tempo de concentração são apresentados na Tabela 3.

Os hidrogramas de cheia gerados no HEC-HMS serviram como dados de entrada para o modelo hidrodinâmico HEC-RAS. Os arquivos contendo as simulações hidrodinâmicas foram exportados para o HECGeoRAS; e foram elaborados os mapas contendo as manchas de inundação.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados neste tópico os resultados da análise dos hietogramas de chuva, dos hidrogramas gerados com o HEC-HMS e das áreas da mancha de inundação com as respectivas alturas atingidas pela água.



**Figura 7** - Distribuição temporal da chuva de São Carlos pelo método dos blocos alternados e Huff 1º quartil.

## Hietogramas das chuvas

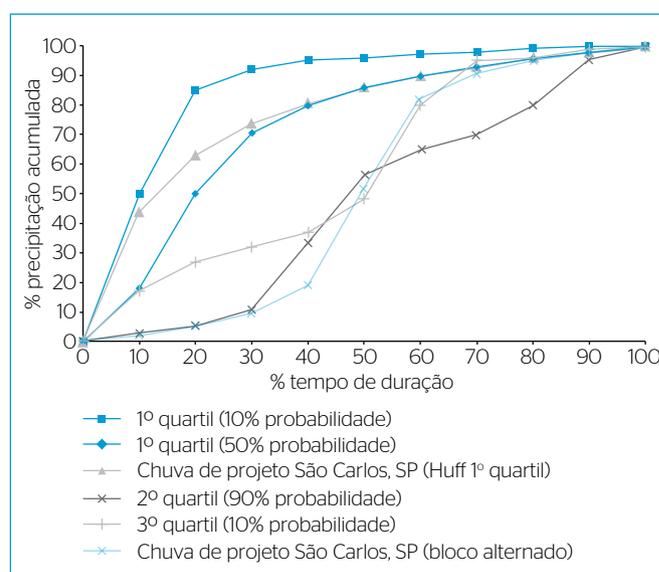
Essa análise demonstra que as curvas representativas de Huff são aquelas com 10% e 50% de probabilidade de excedência para o 1º quartil, com 90% de probabilidade de excedência para o 2º quartil e com 10% de probabilidade de excedência para o 3º quartil (Figura 2). Para realizar a comparação com essas curvas, são apresentadas na Figura 8 as curvas adimensionais de São Carlos baseadas na discretização proposta pelo método dos blocos alternados e Huff 1º quartil (linhas espessas).

A análise da Figura 8 permite observar que o hietograma de projeto de São Carlos, São Paulo, baseada no método Huff 1º quartil, possui a

**Tabela 3** - Área, *curve number* e tempo de concentração das sub-bacias do Córrego do Gregório.

Sub-bacia	Área (m²)	Curve number	Tempo de concentração (min)
1	1597.795	66,51	39,5
2	1349.366	62,99	34,2
3	865.454	68,97	21,2
4	392.052	72,95	15,9
5	188.991	65,55	5,0
6	645.155	78,97	9,5
7	2.214.448	78,98	18,5
8	538.384	66,55	11,5
9	363.343	80,17	9,2
10	718.825	87,39	14,3
11	676.579	90,50	14,0
12	899.996	91,24	10,3
13	1.190.867	93,11	9,7
14	5.038.564	85,11	58,4
15	765.842	93,32	9,4

Fonte: Adaptado de Decina (2012).



**Figura 8** - Comparação entre o percentual acumulado de chuva em relação ao tempo para a chuva de projeto de São Carlos, São Paulo e a distribuição de Huff.

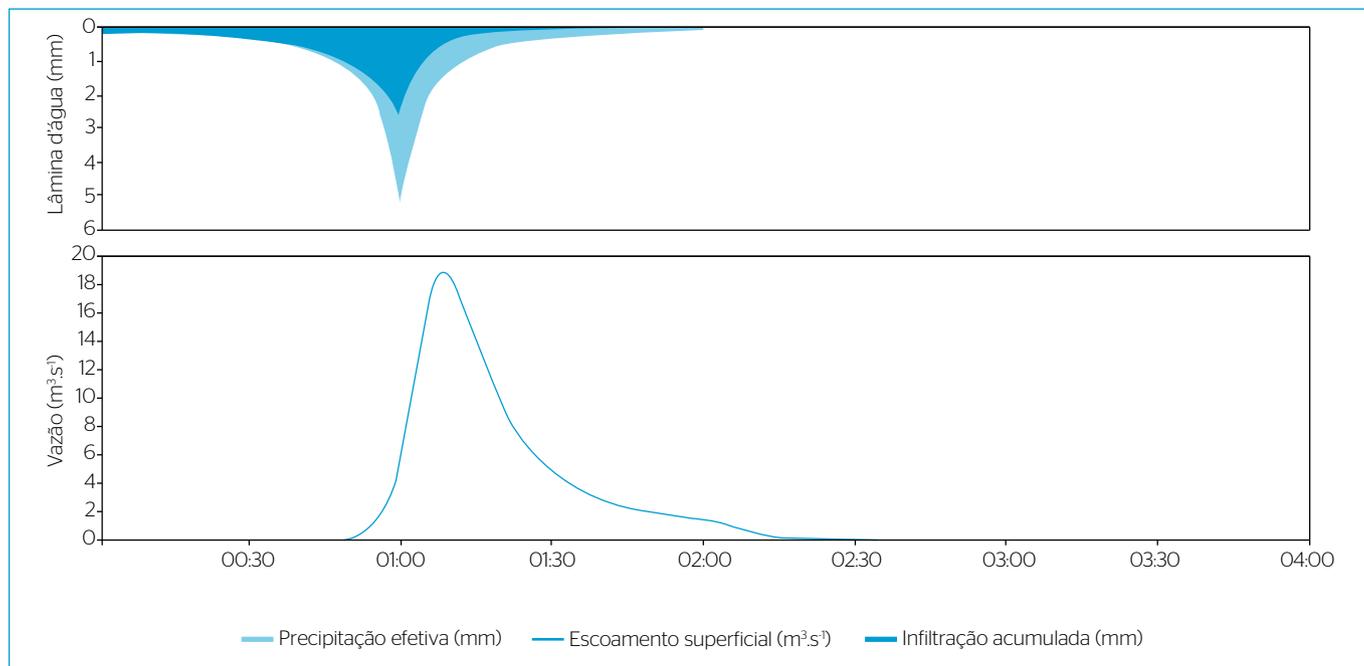
máxima intensidade no início de sua duração, como observadas por Huff para o 1º quartil entre 10 e 50% de probabilidade de excedência.

Para a chuva de projeto baseada no método dos blocos alternados com pico na metade da duração, percebe-se que em até 50% do tempo de duração da chuva (eixo x), a curva se assemelha à verificada por Huff para o 2º quartil com 90% de probabilidade de excedência; e para o percentual da duração acima de 50% tem boa conformação com a curva do 3º quartil com 10% de probabilidade de excedência. Esse resultado é decorrente

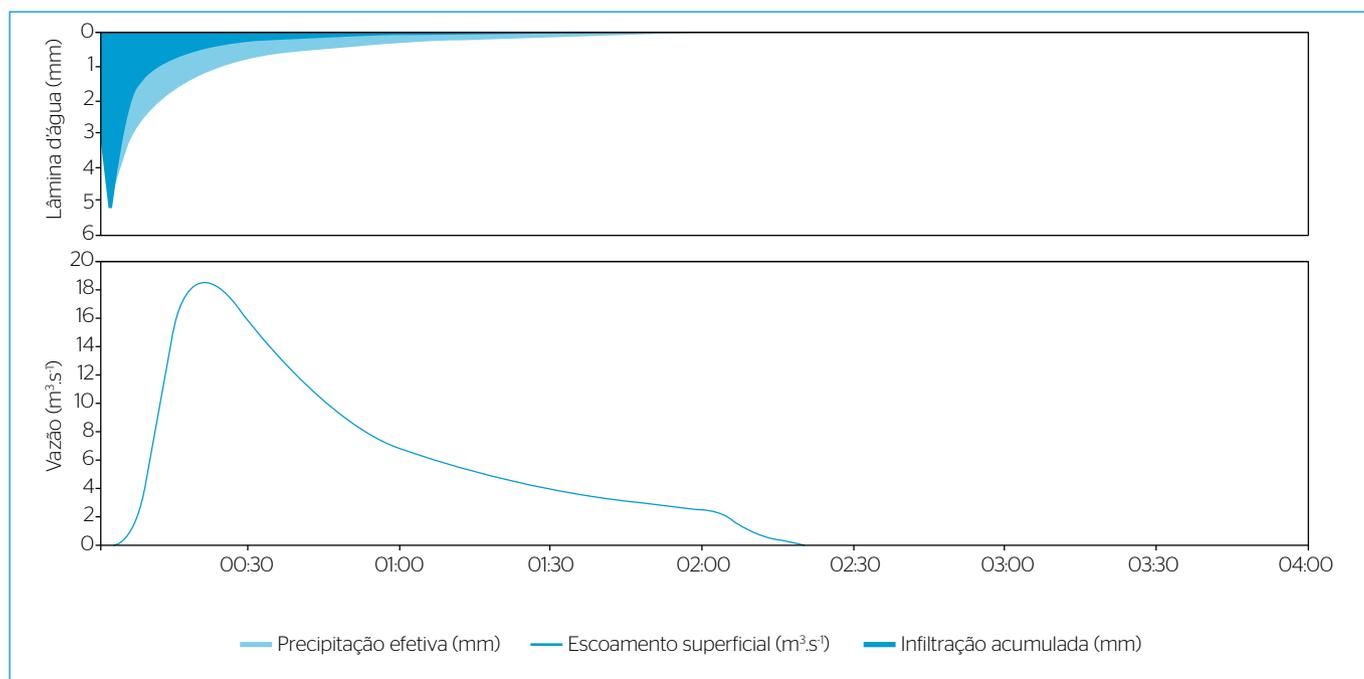
do pico da chuva encontrar-se exatamente na metade do intervalo total da chuva, ou seja, entre o término do 2º quartil e o início do 3º quartil.

### Hidrogramas de cheia

Os hietogramas e hidrogramas de cheia para o tempo de retenção (TR) de 100 anos pelos 2 métodos de distribuição de chuva (blocos alternados e Huff 1º quartil) elaborados com o software HEC-HMS são apresentados, respectivamente, nas Figuras 9 e 10.



**Figura 9** – Hidrograma de cheia obtido pelo software Hec-HMS com tempo de retorno de 100 anos sob método de distribuição temporal blocos alternados.



**Figura 10** – Hidrograma de cheia obtido pelo software Hec-HMS com tempo de retorno de 100 anos sob método de distribuição temporal Huff 1º quartil.

Nos gráficos apresentadas nas Figuras 9 e 10, a linha inferior refere-se ao hidrograma de escoamento superficial; na parte superior, a parte escura representa a parcela infiltrada e a parte clara, a precipitação efetiva.

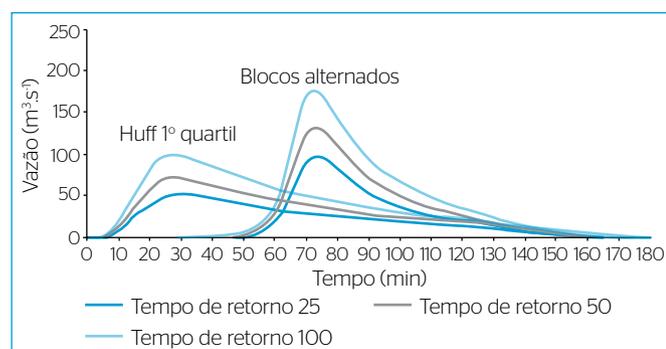
Pelas figuras, pode-se notar que, pelos hidrogramas gerados, o método dos blocos alternados produziu um pico significativamente maior de escoamento superficial. Dentre os fatores envolvidos com grande sensibilidade dessa variável, observa-se que o pico da vazão ocorreu 10 minutos após o pico da chuva (em 1 hora e 10 minutos) no método dos blocos alternados, enquanto que, pelo método de Huff 1º quartil, o pico ocorreu 24 minutos após o início da precipitação (aos 27 minutos).

Verificou-se também, pelos hidrogramas gerados (Figuras 9 e 10), que tais discrepâncias são geradas pela maior perda (*precipitation loss*), a qual é decorrente da maior infiltração e das perdas iniciais (abstrações iniciais) observadas pelo método de Huff 1º quartil.

Conclui-se que o solo infiltrou uma carga maior de água durante o pico da precipitação no método de Huff 1º quartil, amortecendo o restante do escoamento gerado, de modo a gerar um hidrograma mais alongado e de menor pico em relação ao obtido pelos blocos alternados.

Percebe-se ainda pelas figuras que, pelo método de Huff 1º quartil, o pico do hidrograma ( $\approx 9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) corresponde a, aproximadamente, metade do valor do pico do hidrograma obtido pelo método dos blocos alternados ( $\approx 19 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Essa discrepância entre os picos simulados pode ser explicada pela maior capacidade de infiltração do solo no começo da precipitação pelo método de Huff 1º quartil. Na Figura 11 são apresentados os hidrogramas resultantes da sub-bacia 12 para o tempo de retorno de 25, 50 e 100 anos pelos dois métodos de distribuição de chuvas.

Pela Figura 11 é possível perceber que os valores de vazão de pico dos hidrogramas de cheia simulados com base no método dos blocos alternados é praticamente o dobro do valor obtido pelo método de Huff 1º quartil em todos os tempos de retorno simulados (entre 46 e 44% superior). Esses dados corroboram o que foi anteriormente explicado por Viessman Junior, Lewis e Knapp (1989) e Brandão, Rodrigues e Costa (2011).



**Figura 11** - Hidrograma de cheia da bacia do Córrego do Gregório para os dois métodos de distribuição temporais em estudo.

## Área da mancha de inundação

As manchas de inundação foram geradas com a utilização da plataforma HEC, através do módulo RAS (HEC-RAS) e do HECGeoRAS 4.3, suplemento do ArcGIS 9.3.

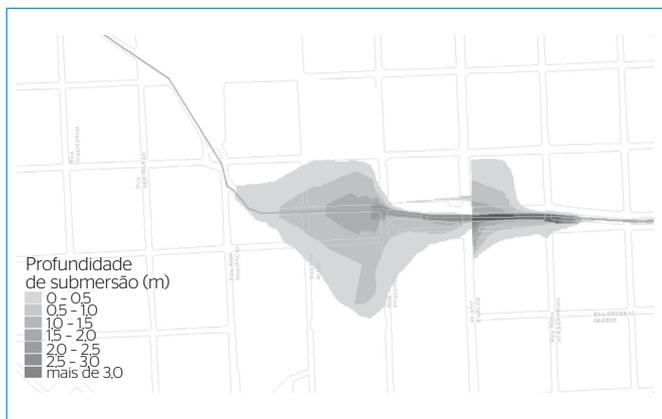
Com o uso dessas ferramentas, foram mensuradas as áreas de abrangência da mancha de inundação em cada evento pelos dois métodos de distribuição temporal das chuvas, para comparar o seu impacto do ponto de vista geográfico. As áreas das manchas de inundação são apresentadas nas Figuras 12 a 17 e os valores das áreas de abrangência de cada mancha de inundação e a vazão calculada na sub-bacia 12 são apresentados na Tabela 4.

Os resultados obtidos pelo método de Huff 1º quartil com relação à área das manchas de inundação para os eventos de TR de 25 e 50 anos mostraram-se entre 50 e 60% inferiores em comparação ao método dos blocos alternados. Apenas para o TR de 100 anos essa diferença cai para 28%. Esse fato está associado às características topográficas da área sujeita a inundações, que se configura como um vale estreito com cotas altimétricas baixas. Em cotas mais elevadas o vale se alonga, e assim um significativo aumento na vazão não é necessariamente acompanhado por um correspondente acréscimo na área inundada.

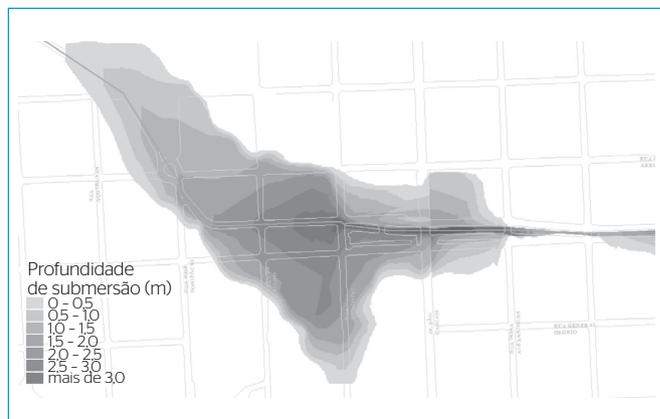
Observou-se que a vazão de pico e a área da mancha de inundação para o TR de 25 anos com blocos alternados são semelhantes às obtidas pelo método de Huff 1º quartil com TR de 100 anos, fato que evidencia a grande sensibilidade das simulações quanto ao método de distribuição de chuva na avaliação da probabilidade de recorrência.

A distribuição temporal das chuvas pouco altera a proporção da vazão de escoamento superficial gerado entre os TR, que variou de 44 a 46% entre os TR na comparação entre os 2 métodos de distribuição temporal propostos; porém, altera significativamente a área de abrangência da mancha de inundação, já que variou entre 57 e 28% a diferença entre as manchas de inundação entre os TR de 25 e 100 anos, respectivamente, demonstrando que as variáveis “área de abrangência da inundação” e “vazão gerada pelo escoamento superficial” não possuem uma correlação diretamente proporcional, principalmente para maiores TR. Esses resultados estão de acordo com os argumentos explicados anteriormente por Viessman Junior, Lewis e Knapp (1989).

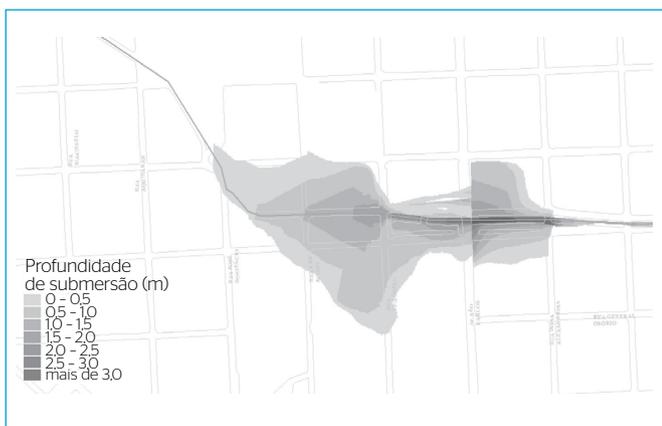
Além da área da mancha de inundação, outra variável importante é a altura ou profundidade atingida pela água na mancha de inundação. Pelo método de Huff, constata-se que, para os tempos de retorno de 25 e 50 anos, foi verificada altura da inundação com valores de até 1,5 m de profundidade na área da mancha de inundação, enquanto que para os blocos alternados, essa altura superou os 3 m. Essa relação é essencial à avaliação de prejuízo de uma região, já que a profundidade de submersão é uma das principais variáveis utilizadas como dado de entrada na modelação de prejuízos diretos em imóveis, dentre outros. Abreu (2013) considera que os prejuízos diretos provocados pelas inundações urbanas são muito sensíveis à desagregação da chuva de projeto adotada, já que apenas a alteração dessa variável resultou numa taxa



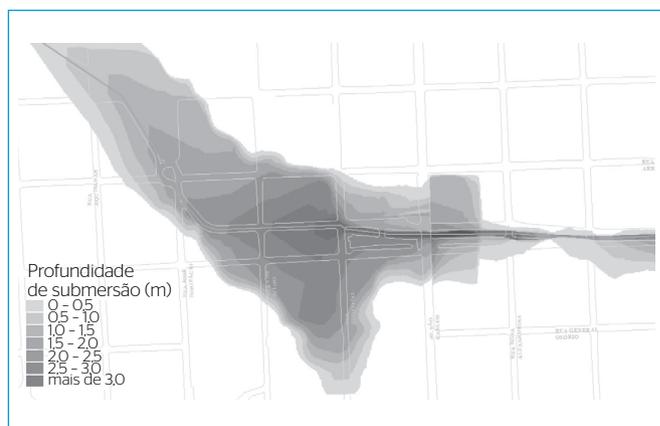
**Figura 12** – Mancha de inundação para tempo de retorno 25 anos sob o método de distribuição temporal de chuvas Huff 1º quartil.



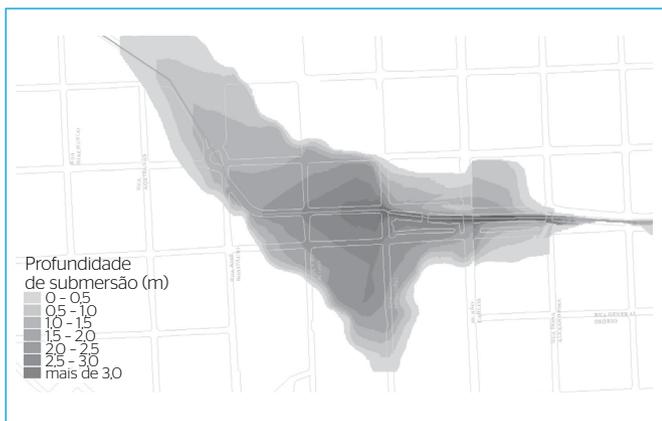
**Figura 15** – Mancha de inundação para tempo de retorno 25 anos sob o método de distribuição temporal de chuvas blocos alternados.



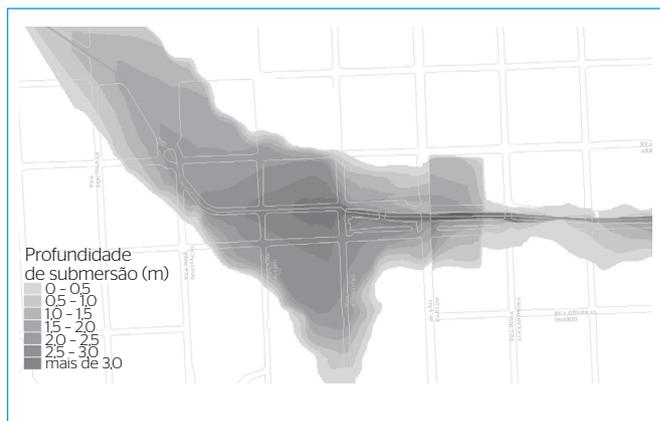
**Figura 13** – Mancha de inundação para tempo de retorno 50 anos sob o método de distribuição temporal de chuvas Huff 1º quartil.



**Figura 16** – Mancha de inundação para tempo de retorno 50 anos sob o método de distribuição temporal de chuvas blocos alternados.



**Figura 14** – Mancha de inundação para tempo de retorno 100 anos sob o método de distribuição temporal de chuvas Huff 1º quartil.



**Figura 17** – Mancha de inundação para tempo de retorno 100 anos sob o método de distribuição temporal de chuvas blocos alternados.

**Tabela 4** – Área de abrangência da mancha de inundação.

	Blocos alternados			Huff 1º quartil			Variação (%)		
Tempo de retorno (anos)	25	50	100	25	50	100	25	50	100
Área de abrangência (m²)	109.113	129.367	149.230	47.435	63.954	107.557	57	51	28
Vazão (m³.s⁻¹)	96	131	175	52	72	98	46	45	44

de incremento de prejuízos da ordem de sete vezes entre os métodos de distribuição de chuvas analisados.

## CONCLUSÕES

A geração dos hidrogramas de cheia utilizando as distribuições temporais de chuva de projeto pelos métodos dos blocos alternados e Huff 1º quartil demonstraram profundas diferenças nos resultados com relação à vazão de pico, à área da mancha de inundação e à profundidade da água obtida em cada evento. Através da modelagem hidráulico-hidrológica e de um software de sistema de informação geográfica (SIG), foi possível comparar os dois métodos.

Esta pesquisa demonstrou que a análise da distribuição temporal da tormenta de projeto é fundamental para a obtenção de resultados confiáveis sobre os efeitos das inundações em bacias urbanas.

O uso de métodos que geram resultados mais críticos, como o método dos blocos alternados, pode ser útil para o dimensionamento de projetos de grandes bacias hidrográficas; porém, em pequenas bacias hidrográficas, como as bacias urbanas, pode trazer resultados que não condizem estatisticamente com a realidade local, gerando prejuízos decorrentes do superdimensionamento de projetos. Além disso, o método dos blocos alternados na metade da duração da chuva, como é comumente aplicado, é arbitrário e carente de comprovação científica de sua aplicabilidade; e deve ser aplicado apenas quando não se possui qualquer informação da área e da característica temporal da chuva. Por outro lado, pode-se aplicar diferentes formas de hietogramas e métodos de desagregação, como os apresentados na Figura 2.

Nesta análise, foi possível constatar aumentos entre 32 e 46% na vazão máxima para o método dos blocos alternados em relação ao método de Huff 1º quartil, o que gerou entre 28 e 57% de aumento de área na mancha de inundação e incremento de 1,5 m na profundidade da água.

A falta de critérios quanto à correta desagregação das chuvas pode trazer incertezas significativas nos hidrograma simulados por modelos hidrológicas, já que podem sub ou superdimensionar seus efeitos e, por conseguinte, importar dados de entrada não condizentes com a realidade local, dificultando assim a elaboração de obras e projetos precisos.

A análise hidrológica demonstrou a grande variabilidade dos resultados frente à distribuição temporal da chuva adotada e demonstra que tais valores podem ser extremamente discrepantes. Portanto, uma análise profunda sobre as características da distribuição temporal das precipitações deve ser avaliada ao simular hidrogramas de cheia e manchas de inundação, tendo em vista a alta sensibilidade que a distribuição temporal das precipitações pode gerar aos resultados.

A análise da probabilidade de recorrência baseada em quartis por Huff (1967) traz subsídios à adoção de chuvas de projeto para múltiplas situações hidrometeorológica, variável essa incerta e influenciada pelas condições climáticas e atmosféricas locais.

Assim, conclui-se que a alteração do método de distribuição temporal das chuvas pode trazer incertezas significativas à transformação da chuva em vazão e, dessa forma, introduzir diferenças consideráveis aos resultados. Porém, o método de Huff traz possibilidades de desagregação temporal de chuvas menos arbitrárias e possibilidade de adaptação quanto às características locais, podendo ser aplicada de acordo com a área e o tempo de duração de chuva características da região, sendo assim importante ferramenta para a padronização de chuvas de projeto de acordo com o objetivo pretendido.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, F.G. (2013) *Análise da influência da distribuição temporal das chuvas intensas e de cenários de uso e ocupação do solo na quantificação dos prejuízos econômicos diretos provocados pelas inundações urbanas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos.
- BARBASSA, A.P. (1991) *Simulação do efeito da urbanização sobre a drenagem pluvial na cidade de São Carlos/SP*. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos.
- BRANDÃO, C.; RODRIGUES, R.; COSTA, J.P. (2001) *Análise de fenômenos extremos precipitações intensas em Portugal continental*. Lisboa: Direcção dos Serviços de Recursos Hídricos.
- CANHOLI, A.P. (2005) *Drenagem urbana e controle de enchentes*. São Paulo: Oficina de Textos. 302 p.
- DECINA, T.G.T. (2012) *Avaliação de medidas de controle de inundações na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, São Carlos, SP*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos.
- HUFF, F.A. (1967) Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resources Research*, v. 3, n. 4, p. 1007-1019.
- MARTINS, L.G.B. (2012) *Determinação de parâmetros hidrológicos por técnicas de sensoriamento remoto em macrodrenagem urbana*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos.
- MEIN, R.G. & LARSON, C.L. (1973) Modeling Infiltration during a steady rain. *Water Resources Research*, v. 9, n. 2, p. 384-394.

MENDES, H.C.; MENDIONDO, E.M. (2007) Histórico da expansão urbana e incidência de inundações: o caso da Bacia do Gregório, São Carlos - SP. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 12, n. 1, p. 17-27.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS - PMSC. (2011) Secretaria Municipal de Obras. SHS Consultoria e Projetos de Engenharia S/S Ltda. *Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável*. São Carlos: 2011. 213 p. Relatório Síntese. Volume II - Medidas Estruturais, Medidas Não Estruturais e Custos. Contrato nº 87/09 - Processo nº 6.965/07. 2011

RIBEIRO, G. (1961) Acerca do cálculo da vazão de obras d'arte: tempo de concentração. *Revista do Clube de Engenharia*, n. 291, p. 16-19.

SÃO PAULO. (2012) Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. *Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: aspectos tecnológicos; diretrizes para projetos*. São Paulo: SMDU. 130 p.

TUCCI, C.E.M. (1995) Inundações urbanas. In: TUCCI, C.E.M; PORTO, R.L.L.; BARROS, M.T. *Drenagem urbana*: Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS/ABRH. 1 ed. Cap. 1, p. 15-36.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS - USACE. (2004) *Basin-level digital elevation models: availability and applications*. The Red River of the North basin case study. IWR Report,04-R-1.

VASCONCELOS, A.F.; ANDRADE, J.P.M.; MENDIONDO, E.M. (2007) Análise qualitativa de eventos de precipitação intensa na Bacia do Gregório, São Carlos - SP. In: *Jornadas Internacionais sobre Gestión del Riesgo de Inundaciones y Deslizamientos de Laderas*. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/11131941-Analise-qualitativa-de-eventos-de-precipitacao-intensa-na-bacia-do-gregorio-sao-carlos-sp.html>>. Acesso em: 06 out. 2016.

VISSMAN JUNIOR, W.; LEWIS, G.L.; KNAPP, J.K. (1989) Infiltration. *Introduction to Hydrology*. 3 ed. New York: Harper & Row. p. 55-83.