

Análise de desempenho de medidas estruturais e não estruturais de controle de inundações em uma bacia urbana

Performance analysis of structural and non-structural flood control measures in an urban watershed

Thiago Galvão Tiradentes Decina¹, João Luiz Boccia Brandão²

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo analisar, por meio de simulações hidrológicas e hidráulicas, o desempenho de algumas medidas de controle de inundação, estruturais e não estruturais. Para tanto, os mapas e demais informações espaciais da bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, em São Carlos (SP), foram digitalizadas com auxílio do *software* de geoprocessamento ArcGIS® e imagens de satélite de alta resolução. Com base nessas informações, foram propostos cenários alternativos que incorporaram as medidas de controle. Através da utilização dos *softwares* HEC-HMS e HEC-RAS realizaram-se as modelações hidráulicas e hidrológicas, utilizando tempos de retorno de 25, 50 e 100 anos para a chuva de projeto. Com os resultados obtidos (hidrogramas de cheia e manchas de inundação referentes a cada tempo de retorno), foi possível analisar as medidas, comparando-se os diferentes cenários. Concluiu-se, para este caso, que os melhores resultados correspondem à associação das medidas estruturais e não estruturais. Contudo, também foi verificado que, mesmo com a concretização do cenário mais favorável, o problema das inundações não seria satisfatoriamente equacionado, o que revela a necessidade de se considerar outras medidas para minimizar os prejuízos decorrentes das inundações, tais como medidas de controle na fonte, seguros contra inundações e sistemas de alerta antecipados.

Palavras-chave: inundações; medidas de controle; modelação hidráulico-hidrológica; HEC-HMS; HEC-RAS.

ABSTRACT

The present study shows an analysis of the performance of some structural and nonstructural flood control measures by means of hydrologic and hydraulic simulations. The basin of the Gregório River, in São Carlos (SP), Brazil, was scanned and scenarios that incorporate the management measures were created, both with the aid of the GIS software ArcGIS and high-resolution satellite images. Hydraulic and hydrologic modeling were performed by HEC-HMS and HEC-RAS software using return periods of 25, 50 and 100 years for the design storm. The results (flood hydrographs and flooding areas for each return period) allowed analyzing the measures by comparing the different scenarios and the best results corresponded to the association of structural and nonstructural measures. However, even by implementing the best scenario, the problem of flooding would not be satisfactorily solved, revealing the need to consider other measures to minimize flood damage, such as runoff source control measures, flood insurance and early warning systems.

Keywords: floods; management measures; hydraulic-hydrological modeling; HEC-HMS; HEC-RAS.

¹Mestre em Engenharia Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP) – São Carlos (SP), Brasil.

²Doutor em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da USP – São Carlos (SP), Brasil.

Endereço para correspondência: Thiago Galvão Tiradentes Decina – Rua São Joaquim, 1244 – Vila Monteiro (Gleba I) – 13560-300 – São Carlos (SP), Brasil – E-mail: thiago_galvaol@hotmail.com

Recebido: 25/04/13 – **Aceito:** 17/09/15 – **Reg. Abes:** 116134

INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, o Brasil apresentou um intenso crescimento da população urbana, que atualmente corresponde a mais de 80% de seus habitantes. O acelerado processo de urbanização, principalmente a partir dos anos 80, foi realizado sem o planejamento adequado e praticamente sem infraestrutura. Um importante desdobramento dessa realidade é a geração de impactos sobre os recursos hídricos, principalmente sobre a drenagem urbana. A impermeabilização do solo, causada pelo desenvolvimento da malha urbana, altera profundamente o escoamento superficial das águas pluviais. O volume que anteriormente à urbanização era retido pela vegetação e infiltrava no solo, passa a escoar rapidamente até atingir os canais de drenagem, o que resulta em um aumento significativo da vazão máxima dos rios, causando inundações que podem ter consequências catastróficas (TUCCI, 1995).

A saída tradicionalmente adotada por muitos engenheiros responsáveis pela drenagem urbana foi a de canalizar os cursos d'água, a fim de aumentar a velocidade de escoamento e expulsar a água rapidamente. Tal solução, porém, acaba por transferir o problema para áreas a jusante na bacia hidrográfica, aumentando a magnitude e frequência das inundações, o que deixa claro que a drenagem deve ser incorporada na fase inicial do desenvolvimento urbano. Desse modo, aparece a necessidade de se planejar ações preventivas e corretivas para se controlar as inundações, e integrar essas medidas ao planejamento urbano como um todo, por meio dos planos diretores (CANHOLI, 2005).

As medidas de controle de inundação podem ser estruturais, quando envolvem obras de engenharia, ou não estruturais, como zoneamento, sistemas de alerta e seguros. Um planejamento consistente deve contemplar uma integração harmoniosa entre medidas estruturais e não estruturais, e destas com o desenvolvimento urbano, seguindo sempre o critério fundamental de que não se deve ampliar a cheia natural do curso d'água (WALESH, 1989; TUCCI & GENZ, 1995).

Um meio de se avaliar o desempenho dessas medidas antes de sua implantação é a utilização de modelos hidrológicos e hidráulicos. Lançando-se mão de softwares que realizem a modelação, é possível criar cenários e simular eventos hidrológicos para que se possam avaliar as consequências da implantação das medidas de controle. Desse modo, metodologias podem ser desenvolvidas no sentido de auxiliar o poder público no processo de tomada de decisão.

Nesse contexto, este trabalho propõe a utilização de modelação hidráulica e hidrológica a fim de se analisar as consequências da implantação de algumas medidas de controle, através da simulação de cenários de uso e ocupação do solo que incorporam medidas estruturais e não estruturais na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, em São Carlos (SP), região que tradicionalmente sofre com inundações.

METODOLOGIA

Área de estudo

Este estudo foi aplicado a uma parcela da bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, o qual nasce a leste da cidade de São Carlos, a aproximadamente 900 m de altitude e percorre cerca de 7 km até sua foz no Córrego do Monjolinho. O curso d'água cruza a área urbana de São Carlos no sentido leste-oeste, passando pelo centro comercial da cidade, região densamente povoada e ocupada por áreas de intenso comércio. A área total da bacia hidrográfica é de 18,93 km²

Neste estudo, a bacia não foi considerada em sua totalidade. Como um dos objetivos essenciais deste trabalho é avaliar as áreas inundadas da região do Mercado Municipal de São Carlos, as áreas mais a jusante da bacia hidrográfica não foram contempladas. Assim sendo, a região estudada compreende desde as cabeceiras da bacia até uma seção do córrego próxima ao encontro da Avenida Alfredo Maffei com a Rua Visconde de Inhaúma, com uma área total de 17,45 km². Tal região pode ser visualizada na Figura 1.

A fim de se proceder à modelação hidrológica da região de interesse, foi realizada uma delimitação de sub-bacias para posterior aplicação do método do *Soil Conservation Service*, dos EUA (SCS), visando o cálculo da chuva efetiva. Para tanto, foi utilizado um levantamento topográfico com equidistância das curvas de nível de 5 metros, fornecido pelo Centro de Divulgação Científica e Cultural (CDCC), órgão vinculado à Universidade de São Paulo, além de um levantamento da rede de microdrenagem da bacia feito por Collodel (2009). A delimitação das sub-bacias resultou na configuração expressa na Figura 2.

Para a estimativa do coeficiente *Curve Number* (CN – parâmetro do método do SCS) das bacias e diagnóstico da situação atual da região, foi realizada a classificação do uso e ocupação do solo da área de estudo utilizando imagem obtida pelo satélite World View 2, datada de 2 de junho de 2011. Assim, com auxílio do *software* ArcGIS 9.3^o definiram-se 6 classes de uso e ocupação do solo: Parques e canteiros, Terrenos baldios, Vias e lotes ocupados, Agricultura, Floresta e Pastagem. A Tabela 1 indica as áreas correspondentes a cada classe, assim como sua porcentagem em relação à área total.

Cenários

A análise das medidas de controle de inundações pôde ser realizada a partir da avaliação de alguns cenários de uso e ocupação do solo da bacia. Para cada cenário proposto, foi realizada a modelação hidrológica da área de estudo utilizando o método SCS com auxílio do programa HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*). As simulações tiveram o objetivo de gerar hidrogramas relacionados a eventos chuvosos para períodos de retorno de 25, 50 e 100 anos. Posteriormente, as vazões de pico calculadas nos nós da bacia foram utilizadas para gerar manchas de inundação

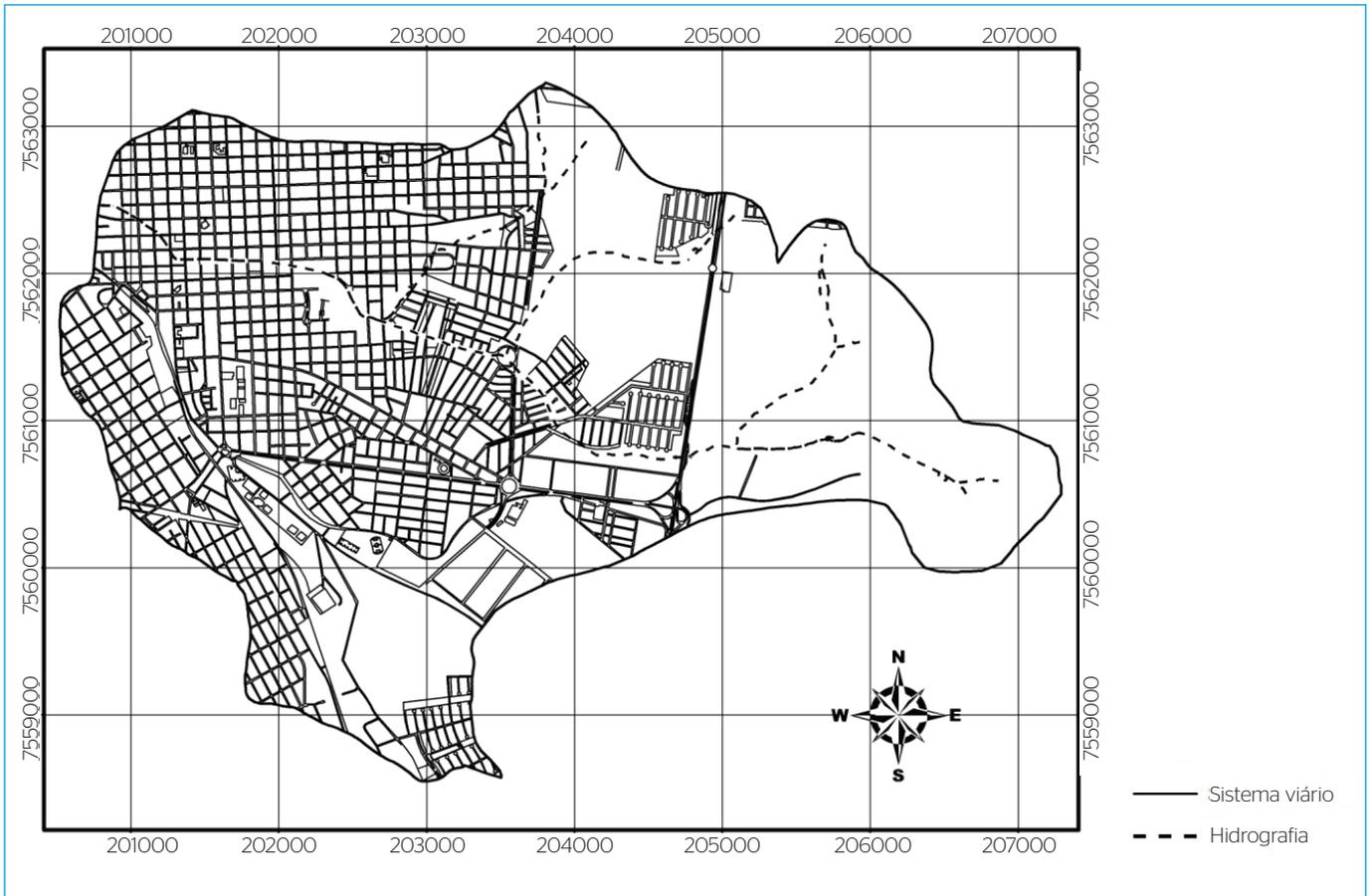


Figura 1 - Área de estudo: bacia do Córrego do Gregório em São Carlos - SP. Datum WGS 84 Zona 23 S.

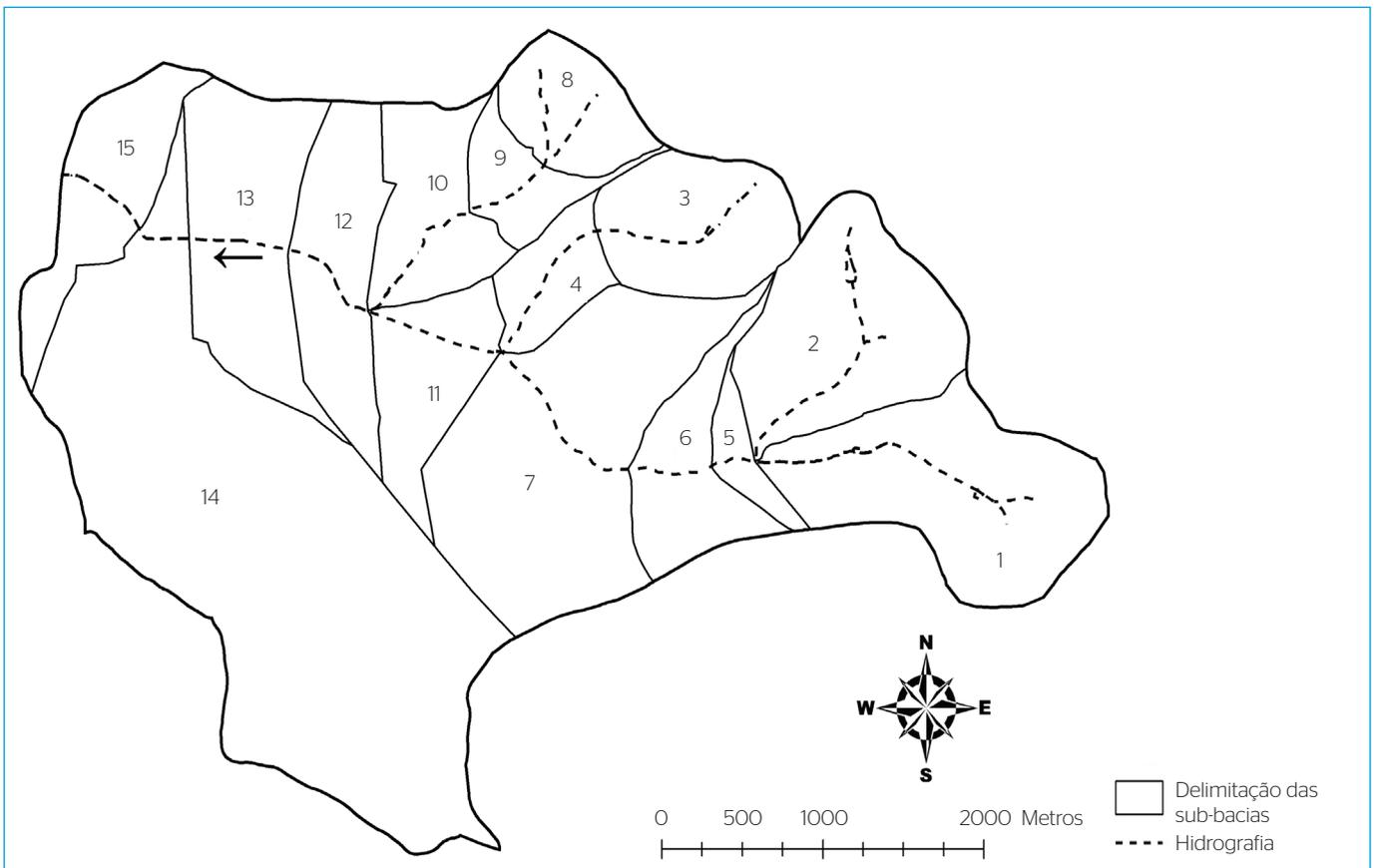


Figura 2 - Delimitação das sub-bacias para modelação hidrológica, com a numeração utilizada no estudo e indicação da hidrografia.

com o *software* HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*), a fim de se comparar as áreas inundáveis associadas aos diferentes cenários.

Foram propostos sete cenários neste estudo, a saber:

- Cenário 1 – “Atual”, que considera a situação atual da bacia do Gregório, na qual há ocorrências de inundações.
- Cenário 2 – “Plano diretor” (PD), onde é simulada uma ocupação do solo da área de estudo que segue as diretrizes presentes no Plano Diretor do Município de São Carlos (PMSC, 2005).
- Cenário 3 – “Plano diretor e medidas estruturais”, no qual são consideradas as diretrizes do Plano Diretor e algumas medidas estruturais para o controle de inundações.
- Cenário 4 – “Plano diretor e medidas não estruturais”, no qual as diretrizes do Plano Diretor são combinadas a medidas não estruturais de controle de inundações que visam disciplinar a ocupação do solo na bacia.
- Cenário 5 – “Plano diretor, medidas estruturais e medidas não estruturais”, que associa as diretrizes do Plano Diretor às medidas estruturais e não estruturais presentes nos Cenários 3 e 4, respectivamente.
- Cenário 6 – “Sem plano diretor”, onde a ocupação de toda a bacia é feita de forma não planejada, refletindo o padrão de urbanização atual nas áreas ainda não ocupadas.
- Cenário 7 – “Hipotético”, que considera uma ocupação planejada de maneira prévia ao assentamento da população, em que as diretrizes do Plano Diretor do Município de São Carlos e as medidas não estruturais propostas são implantadas desde o início da ocupação.

É necessário destacar que os Cenários 2 e 3 consideram o máximo adensamento urbano permitido pelo atual Plano Diretor, e,

consequentemente, refletem a condição de máxima impermeabilização do solo permitida pelas diretrizes do plano. Os Cenários 4, 5 e 7 também fazem essa consideração, porém ao adotar medidas não estruturais de controle de inundações, resultam em menor impermeabilização do solo das bacias quando comparados aos Cenários 2 e 3.

As medidas estruturais presentes nos Cenários 3 e 5 consistem em 5 reservatórios de detenção *in-line*, cujos projetos encontram-se no Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável do Município de São Carlos (PMSC, 2011). Estes reservatórios localizam-se nos exutórios das sub-bacias 3, 5, 6, 8 e 9, que podem ser visualizadas na Figura 2. Em todos os casos, o descarregador de fundo projetado é circular, com diâmetro de 0,80 m e construído em concreto com entrada em aresta viva. Dados referentes aos reservatórios podem ser visualizados na Tabela 2.

As medidas não estruturais consideradas neste estudo podem ser encontradas nos trabalhos de Alves (2005) e Boldrin (2005), que também trabalharam com a criação de cenários na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório. Para compor os cenários que as utilizam, foram escolhidas as seguintes medidas:

- averbação de reserva legal nas áreas ainda não ocupadas da bacia hidrográfica, considerando que 20% dos novos loteamentos serão ocupados com florestas em boas condições;
- determinação de que um terço das áreas públicas (que, segundo o Plano Diretor do Município de São Carlos, corresponderão a 18% dos novos loteamentos) seja considerado área verde.

Com os dados do planejamento do uso do solo e as medidas de controle de inundação propostas, foi possível calcular o CN de cada sub-bacia para cada cenário, baseado nas tabelas elaboradas pelo USDA (1986), que indicam o valor de CN para diferentes tipos de uso do solo. Assim foi possível construir a Tabela 3, em que são indicados os valores do CN médio para cada sub-bacia e cada cenário.

Tabela 1 – Áreas e porcentagens correspondentes a cada classe de uso do solo.

Classe de uso do solo	Área (m ²)	Porcentagem (%)
Parques e canteiros	400.887	2,30
Terrenos baldios	2.801.336	16,06
Vias e lotes ocupados	8.453.181	48,46
Agricultura	694.977	3,98
Floresta	1.948.072	11,17
Pastagem	3.144.028	18,03
Total	17.442.248	100

Tabela 2 – Dados referentes aos reservatórios.

Reservatório	Sub-bacia	Comprimento do descarregador de fundo (m)	Coefficiente de descarga do descarregador de fundo	Tipo de vertedor	Largura do vertedor (m)
G1 - B 93.5	5	56,30	0,60	Creager/WES	5,00
G2 - B 83.5	6	27,35	0,69	Soleira espessa	5,00
S1 - B 84.5	3	38,80	0,65	Soleira espessa	5,00
La1 - B 97.5	8	20,20	0,72	Soleira espessa	9,50
La2 - B 98.5	9	27,10	0,69	Soleira espessa	13,19

Simulação hidrológica

A transformação da chuva excedente em vazão foi realizada com o método do hidrograma unitário do SCS. Para o cálculo do tempo de concentração de cada sub-bacia, utilizou-se a fórmula de George Ribeiro (1961 *apud* GARCEZ, 1967), escolhida por apresentar bons resultados para pequenas bacias urbanas e rurais (SILVEIRA, 2005). Tal fórmula pode ser visualizada na Equação 1.

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

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).

A fórmula supracitada também foi utilizada para calcular o tempo de concentração da área de estudo como um todo, a fim de usá-lo na determinação das chuvas de projeto. Dessa forma, este parâmetro foi calculado para todos os cenários e se escolheu o maior tempo para realizar a simulação dos eventos chuvosos, aproximadamente 120 minutos.

Assim, adotou-se a curva intensidade-duração-frequência (IDF) proposta por Barbassa (1991) para calcular a intensidade das chuvas de projeto. A Equação 2 descreve a curva.

$$i = \frac{1519 \times T^{0,236}}{(t+16)^{0,935}} \quad (2)$$

em que: i : intensidade ($mm h^{-1}$); T : período de retorno (anos); t : duração da chuva (min).

Os resultados obtidos com a curva IDF foram então distribuídos temporalmente através do método dos blocos alternados. Como a duração de cada bloco do hietograma deve ser menor ou igual a 1/10 do tempo de concentração das bacias modeladas (IPH, 2005), escolheu-se o intervalo de 1 minuto para a construção dos hietogramas.

O software HEC-HMS também possibilita o cálculo do amortecimento dos hidrogramas gerados. Assim, dentre os métodos disponíveis para calcular a propagação da onda de cheia nos canais, escolheu-se o

método da Onda Cinemática, pelo fato do canal estudado apresentar uma alta declividade, superior a $0,002 m.m^{-1}$ (USACE, 2000). Para tanto, foi necessário especificar alguns parâmetros, como a geometria das seções transversais do canal, seu comprimento (L_c), coeficiente de rugosidade de Manning (n), declividade do curso d'água (S_c), largura do fundo (b , para canais trapezoidais e retangulares) e declividade das paredes (Z , para canais trapezoidais, referente à razão entre a distância horizontal e a distância vertical das paredes laterais do trapézio). A Tabela 4, a seguir, indica, para os trechos do canal do Córrego do Gregório considerados, os parâmetros citados anteriormente, e a Figura 3 indica a localização destes trechos na bacia hidrográfica.

Dessa forma, foi possível gerar os hidrogramas referentes a cada cenário, para os períodos de retorno considerados (25, 50 e 100 anos).

Tabela 4 - Dados dos trechos do canal utilizados pelo Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System.

Trecho	Formato	L_c (m)	n	S_c (m/m)	b (m)	Z
1	Trapezoidal	282,16	0,030	0,0242	4	2
2	Trapezoidal	541,70	0,030	0,0092	4	2
3	Trapezoidal	1118,23	0,030	0,0162	4	2
4	Trapezoidal	858,62	0,025	0,0630	6	1
5	Trapezoidal	654,10	0,025	0,0153	6	1
6	Retangular	631,33	0,020	0,0130	7	-
7	Retangular	338,55	0,020	0,0044	7	-
8	Retangular	591,1	0,020	0,0083	7	-

L_c : comprimento; n : coeficiente de rugosidade de Manning; S_c : declividade do curso d'água; b : largura do fundo (para canais trapezoidais e retangulares); Z : declividade das paredes (para canais trapezoidais, referente à razão entre a distância horizontal e a distância vertical das paredes laterais do trapézio).

Tabela 3 - Valores de Curve Number médio para cada sub-bacia e para cada cenário.

Sub-bacia	Cenários						
	1 Atual	2 PD	3 PD e medidas estruturais	4 PD e medidas não estruturais	5 PD, medidas estruturais e não estruturais	6 Sem PD	7 Hipotético
1	66,51	77,73	77,73	72,88	72,88	91,46	72,38
2	62,99	77,26	77,26	73,38	73,38	90,92	72,27
3	68,97	88,68	88,68	82,60	82,60	91,38	80,68
4	72,95	83,67	83,67	82,98	82,98	89,41	80,19
5	65,55	84,09	84,09	77,71	77,71	91,12	77,32
6	78,97	90,79	90,79	85,62	85,62	92,08	82,59
7	78,98	93,29	93,29	88,70	88,70	94,16	82,75
8	66,55	88,53	88,53	82,34	82,34	89,59	80,45
9	80,17	90,93	90,93	87,38	87,38	91,54	81,80
10	87,39	91,75	91,75	91,79	91,79	92,01	82,28
11	90,50	94,34	94,34	93,56	93,56	94,61	82,25
12	91,24	92,80	92,80	92,61	92,61	92,90	83,17
13	93,11	94,50	94,50	94,43	94,43	94,57	83,52
14	85,11	93,67	93,67	90,66	90,66	94,20	83,49
15	93,32	94,95	94,95	94,73	94,73	95,04	83,08

PD: Plano diretor.

Simulação Hidráulica

O objetivo desta etapa foi calcular os perfis de superfície da água em escoamento no canal estudado, e assim, analisar as consequências das cheias simuladas pelo modelo hidrológico. Para tanto, foi utilizado o programa HEC-RAS, em conjunto com a extensão HEC-GeoRAS.

A simulação hidráulica foi realizada no trecho do canal compreendido entre as ruas Campos Sales e José Bonifácio, percorrendo uma extensão de 980 metros. Tal região foi escolhida por sofrer com problemas de inundações que remontam aos primórdios da ocupação urbana de São Carlos (MENDES *et al.*, 2005) e está indicada na Figura 4.

A partir do levantamento de curvas de nível com espaçamento de 1 metro, realizado pela empresa OESA e digitalizado por Graciosa (2010), pôde-se gerar um modelo digital do terreno (MDT) com auxílio do *software* ArcGIS 9.3^o, o qual pode ser visualizado na Figura 5.

Com o HEC-GeoRAS, as informações topográficas das seções transversais do córrego foram importadas ao HEC-RAS, onde foram editadas. Após a edição das seções transversais, foi necessário atribuir valores do coeficiente *n* de Manning à calha do rio e à planície de inundação. Para todos os cenários, com exceção do Cenário 7 – *Hipotético*, o trecho simulado foi dividido em dois outros trechos para a atribuição do

coeficiente *n*. Ao trecho de montante, com extensão de 210 metros, adotou-se *n* igual a 0,025. Em relação aos 770 metros da parcela de jusante e às várzeas, foram atribuídos os valores de 0,020 e 0,035, respectivamente. Para o Cenário 7, tanto para as várzeas quanto para a calha do córrego, o valor do coeficiente *n* de Manning escolhido foi de 0,035 (PORTO, 2006).

Realizou-se a simulação hidráulica para regime de escoamento permanente com os valores da vazão de pico de cada cenário, a fim de se obter os níveis da lâmina d'água nas seções transversais. O arquivo gerado foi então exportado de volta ao ArcGIS 9.3^o novamente através do HEC-GeoRAS. No ambiente do ArcGIS 9.3^o, foi feita a sobreposição das lâminas d'água com o MDT da área de estudo, o que gerou dois arquivos: um polígono (vetor) com o delineamento da mancha de inundação, e um *raster* com um valor referente à profundidade da inundação para cada célula.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Simulação hidrológica

Nas Figuras 6 a 8, são mostrados os hidrogramas calculados no exutório do sistema em cada cenário.

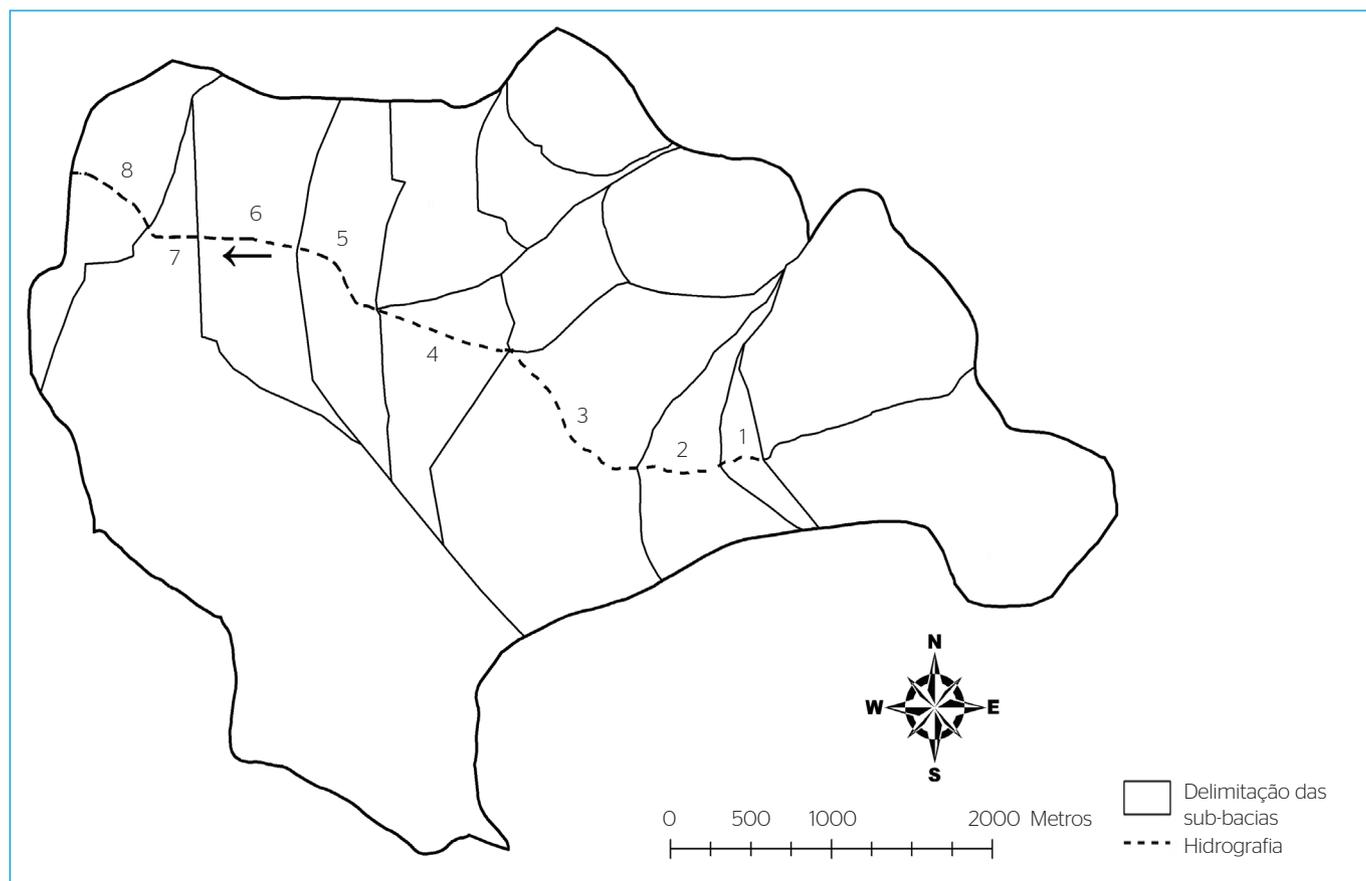


Figura 3 - Identificação dos trechos do canal indicados na Tabela 4.

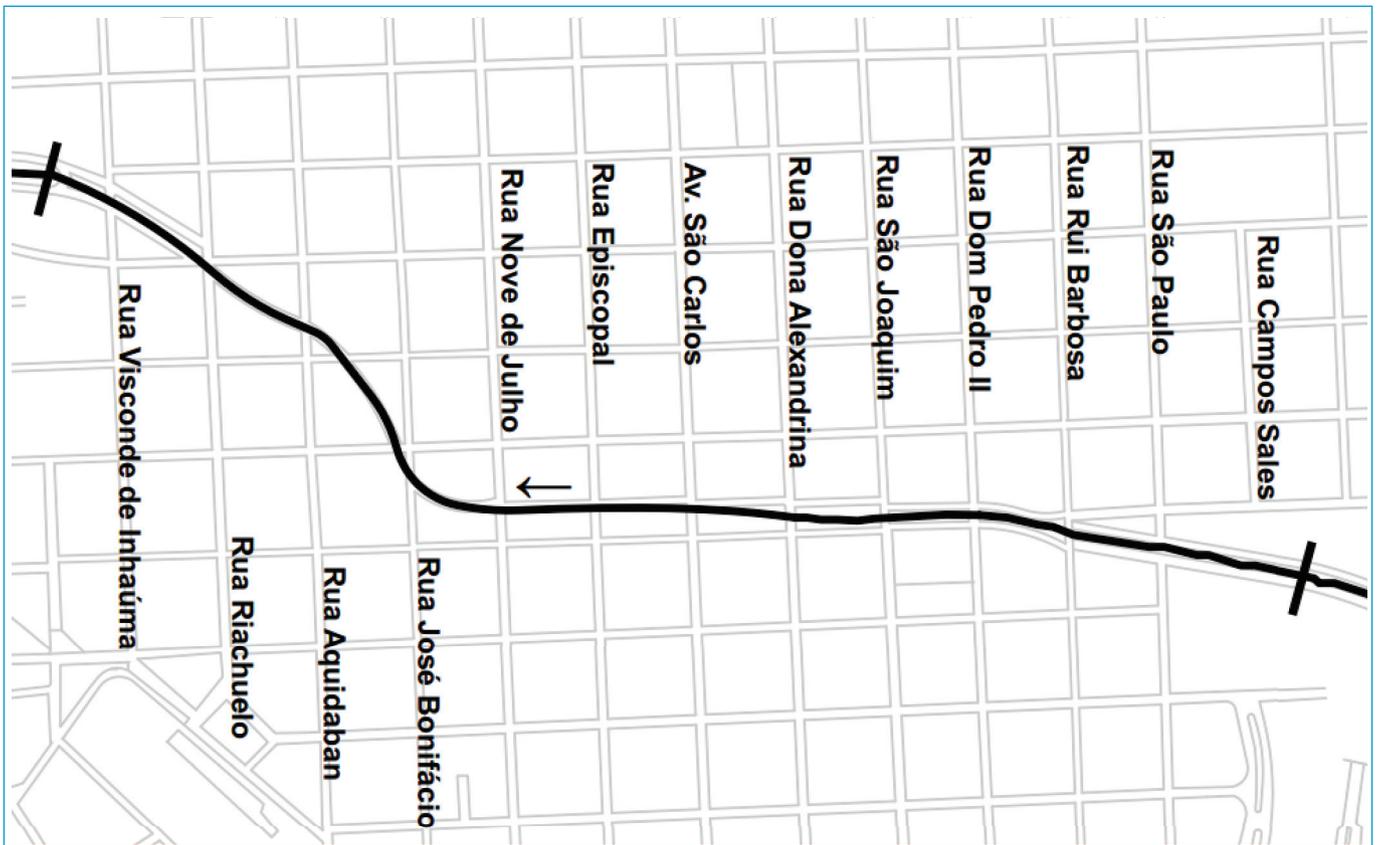


Figura 4 - Localização das ruas e seções que limitam a área onde foi realizada a modelação hidráulica.

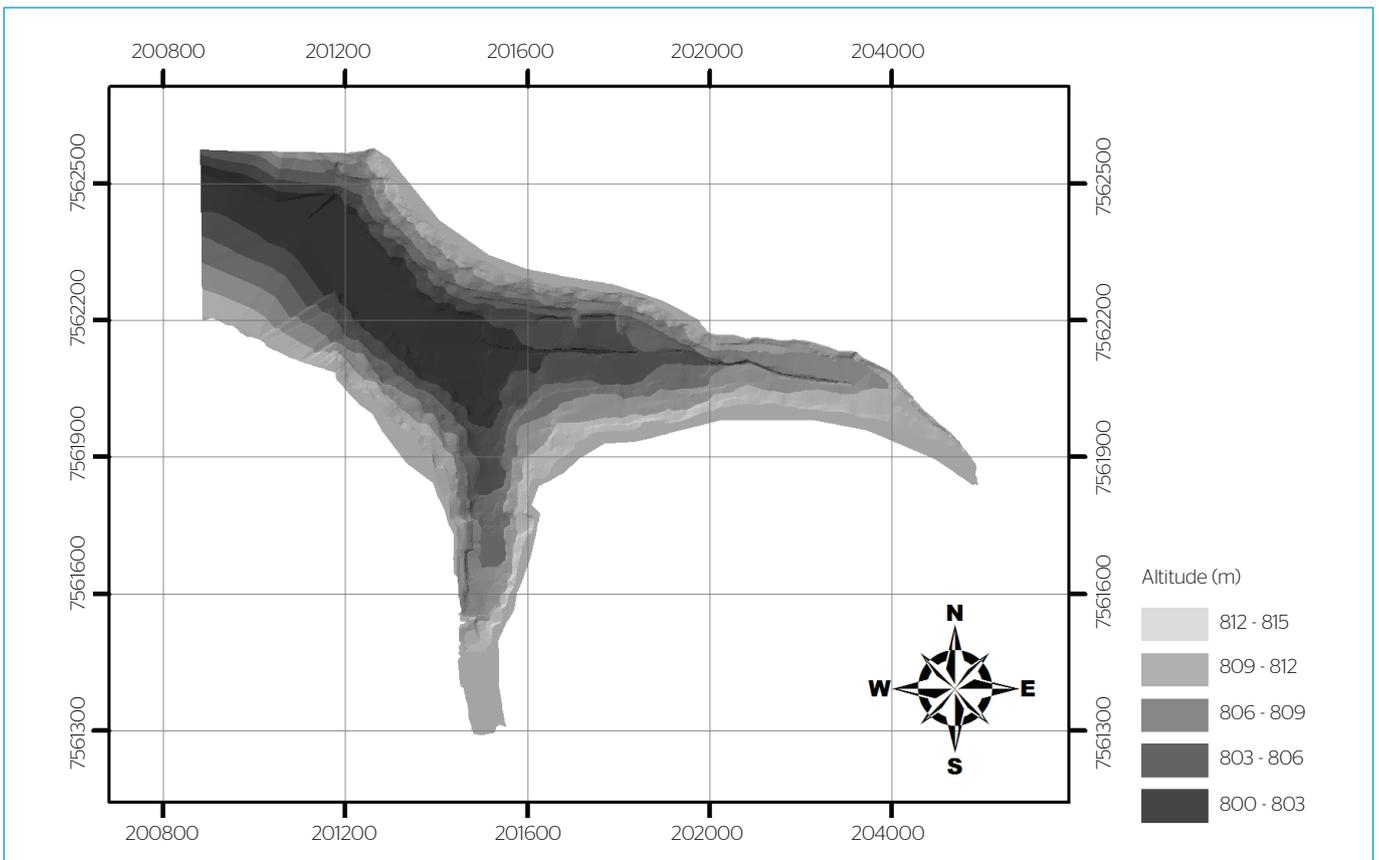


Figura 5 - Modelo Digital do Terreno utilizado na simulação hidráulica. Datum WGS 84 Zona 23 S.

A fim de melhor comparar os resultados obtidos para cada cenário, a Tabela 5 apresenta os picos das vazões indicados nos hidrogramas.

Com os resultados obtidos, algumas considerações podem ser feitas. Primeiramente nota-se que o Cenário 6 apresenta valores muito altos da vazão de pico, em decorrência da alta impermeabilização sofrida pelo solo da área de estudo. Dessa forma, torna-se nítido que o planejamento urbano tem um papel preponderante no controle de inundações.

A simulação do Cenário 2 mostra que as diretrizes do Plano Diretor do Município de São Carlos não são suficientes para evitar inundações, dado que este apresentou maiores valores para as cheias máximas em comparação ao Cenário 1 – *Atual*, o qual

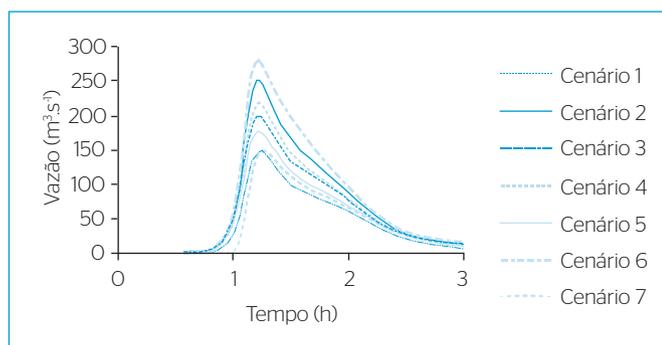


Figura 6 – Hidrogramas calculados para o exutório da área de estudo, para um tempo de retorno de 25 anos.

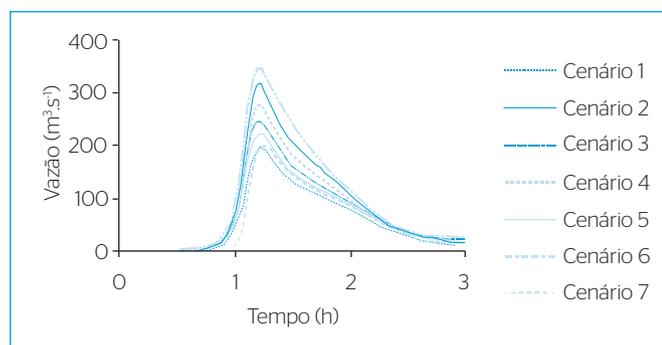


Figura 7 – Hidrogramas calculados para o exutório da área de estudo, para um tempo de retorno de 50 anos.

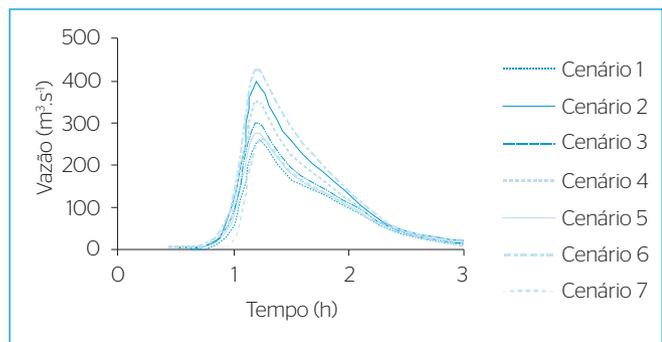


Figura 8 – Hidrogramas calculados para o exutório da área de estudo, para um tempo de retorno de 100 anos.

já é crítico. Desse modo, faz-se necessária a existência de outros mecanismos reguladores da ocupação urbana, ou uma revisão das diretrizes contidas no plano.

O Cenário 3 mostra que os reservatórios reduzem significativamente os picos de vazão. Percebe-se este efeito ao se comparar os resultados deste cenário com o Cenário 2, visto que ambos apresentam a mesma configuração de uso do solo. Entretanto, os valores alcançados ainda são maiores que os do Cenário 1 – *Atual*, o que mostra que esta solução não deve ser adotada isoladamente.

O Cenário 4 – *Plano diretor e medidas não estruturais*, apresenta valores da vazão de pico menores que o Cenário 2, porém maiores que o Cenário 3. Isto acontece devido ao fato de a bacia apresentar um alto grau de urbanização, e as medidas não estruturais, neste caso, são aplicadas somente às porções ainda não loteadas da área de estudo. Todavia, é possível perceber o efeito deste tipo de solução no Cenário 7 – *Hipotético*, que apresentou os menores valores de cheia dentre todos os cenários, com exceção do Cenário 1 – *Atual*. Isto demonstra que os resultados obtidos são mais eficazes quando medidas não estruturais são adotadas previamente à ocupação urbana.

Dentre os cenários aplicáveis, o que obteve os menores valores nas vazões de pico foi o Cenário 5, que associou medidas estruturais e não estruturais. Tal resultado mostra um efeito sinérgico entre os dois tipos de medidas, e aponta um caminho viável a ser considerado no contexto do planejamento da drenagem urbana.

Simulação hidráulica

A simulação hidráulica foi realizada com suporte do programa HEC-RAS, cujos resultados foram exportados ao ArcGIS 9.3^o, a fim de se realizar a análise espacial da mancha de inundação. Para tanto, foram inseridos como dados de entrada os valores de vazão máxima associados aos nós abrangidos pela área de estudo. Desse modo, foi possível proceder à simulação das lâminas d'água e posterior processamento

Tabela 5 – Vazões máximas dos hidrogramas calculados para os tempos de retorno considerados.

Cenários	Vazões máximas simuladas (m ³ .s ⁻¹)		
	TR = 25 anos	TR = 50 anos	TR = 100 anos
1 – Atual	148,7	197,2	258,7
2 – Plano diretor	253,2	316,1	392,4
3 – Plano diretor e medidas estruturais	198,6	244,8	299,9
4 – Plano diretor e medidas não estruturais	219,3	278,9	351,3
5 – Plano diretor, medidas estruturais e não estruturais	176,8	222,2	276,1
6 – Sem plano diretor	278,8	345,6	425,9
7 – Hipotético	147,3	199,3	264,6

TR: tempo de retorno.

no SIG, com o objetivo de gerar os mapas de inundação. A Figura 9 indica a área inundada referente ao Cenário 1 – *Atual*, para uma chuva de projeto com tempo de retorno de 25 anos:

A fim de se comparar os resultados obtidos com a simulação hidráulica de todos os cenários, calculou-se, com auxílio do SIG, a área inundada para cada cenário e tempo de retorno. Os resultados obtidos nesta etapa podem ser visualizados na Tabela 6.

A exemplo do que se observou na simulação hidrológica, o Cenário 2 apresentou valores altos para as áreas inundadas, o que mostra, novamente, que apenas as diretrizes presentes no zoneamento do Plano Diretor do Município de São Carlos não são suficientes para evitar os prejuízos. Entretanto, até mesmo as medidas propostas no Cenário 5, que é o cenário futuro com prognóstico mais favorável, não foram capazes de equacionar o problema, visto que as áreas inundadas neste cenário são mais extensas que as do Cenário 1 – *Atual*, que já representa uma situação problemática.

Observa-se também que o Cenário 7 apresenta valores relativamente altos para as áreas inundadas, apesar das vazões máximas serem as menores dentre todas as situações analisadas, com exceção do Cenário 1. Isto acontece devido ao valor atribuído para o coeficiente de rugosidade de Manning, n , do canal. Como o Cenário 7 considera uma situação hipotética, em que não houve intervenções na calha do rio, foi atribuído um coeficiente n de 0,035 para o canal, bem maior que o valor presente nos outros cenários (PORTO, 2006). Desse modo, o canal do Cenário 7 é mais rugoso, e por isso necessita de uma área molhada maior para veicular a mesma vazão, o que resulta em maiores manchas de inundação. Uma saída desejável, porém inviável neste caso onde a expansão urbana na bacia hidrográfica já está consolidada, é averbar as reservas legais de forma contígua aos rios, de modo a criar

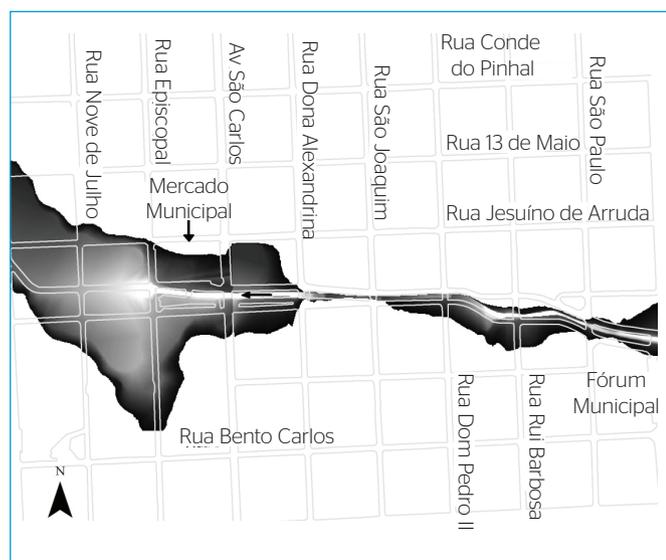


Figura 9 – Mancha de inundação para o Cenário 1 – *Atual*, para tempo de retorno de 25 anos.

um corredor verde ao longo dos corpos hídricos para que a planície de inundação não alcance as vias e lotes (ALVES, 2005).

É importante ressaltar que a modelação hidráulica e geração de mapas de inundação podem ser utilizadas como ferramentas para o cálculo dos prejuízos associados a estes eventos, etapa fundamental para a análise econômica de medidas de controle (GRACIOSA, 2010; MACHADO, 2005; NAGEM, 2008). Além disso, a elaboração de manchas de inundação pode alimentar sistemas de alerta antecipado (BORGA *et al.*, 2011; PRIEST *et al.*, 2011).

CONCLUSÕES

Este estudo teve como proposta analisar os hidrogramas e manchas de inundação referentes a diversos cenários de uso e ocupação do solo, a fim de se verificar o efeito de medidas estruturais, não estruturais e a sua associação.

Diante dos resultados das simulações, é necessário destacar que os Cenários 1 e 7 se apresentam como condições de controle, pois diferentemente dos outros cenários, não se configuram como situações futuras possíveis. O Cenário 1 – *Atual* refere-se às condições atuais de uso e ocupação do solo, e o Cenário 7 reflete uma situação hipotética, na qual as medidas não estruturais são incorporadas desde o início da ocupação urbana.

A partir dos hidrogramas gerados, verificou-se que as medidas estruturais apresentaram bons resultados na diminuição das vazões de pico. Contudo, não podem ser vistas como única solução, pois a simulação do Cenário 3 – *Plano diretor e medidas estruturais* revelou que as vazões máximas obtidas são maiores que as do Cenário 1 – *Atual*, o qual já é problemático. Além disso, os reservatórios apresentam altos custos associados à sua implantação, e são indicados como medidas corretivas (WALESH, 1989). Neste caso, as medidas propostas pelo “Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável do Município de São Carlos” que compõem este estudo apresentaram um custo estimado da ordem de 18 milhões de reais (PMSC, 2011).

Dentre os cenários factíveis, o que apresentou os resultados mais favoráveis (menores vazões de pico) foi o Cenário 5, que considerou a

Tabela 6 – Área ocupada pela mancha de inundação para cada cenário de acordo com o tempo de retorno.

Cenário	Áreas das manchas de inundação (m ²)		
	TR = 25 anos	TR = 50 anos	TR = 100 anos
1	87.123	97.912	108.751
2	108.632	117.958	130.201
3	97.299	105.761	112.921
4	103.169	112.537	121.618
5	95.060	103.786	111.790
6	113.271	121.780	133.335
7	100.155	110.327	119.132

TR: tempo de retorno.

associação entre as medidas estruturais e não estruturais. Este resultado indica um aspecto interessante no contexto do controle de inundações, que mostra a importância de se analisar a combinação de medidas de diferentes naturezas.

Em comparação ao Cenário 2, que só considera as diretrizes do plano diretor, as medidas do Cenário 5 são responsáveis por uma redução nas vazões de pico de 30,2, 29,7 e 29,6% quando são analisadas, respectivamente, as chuvas de projeto com períodos de retorno de 25, 50 e 100 anos. No entanto, estas medidas não se mostraram capazes de solucionar o problema, pois em relação ao Cenário 1 – *Atual*, o Cenário 5 apresenta um aumento nas vazões de pico de 18,9, 12,7 e 6,7% para chuvas com períodos de retorno de 25, 50 e 100 anos, respectivamente. Situação análoga ocorre quando são analisadas as áreas das manchas de inundação, em que as áreas inundadas do Cenário 5, quando comparadas ao Cenário 1, apresentam aumentos de 9,1, 6,0 e 2,8% para períodos de retorno de 25, 50 e 100 anos, respectivamente.

Percebe-se também neste caso, onde a bacia está intensamente urbanizada, que a adoção das medidas não estruturais não é tão efetiva, como foi demonstrado com a simulação do Cenário 4 – *Plano diretor e medidas não estruturais*. Entretanto, verificou-se que ao incorporar este tipo de medida na fase inicial do planejamento urbano, os resultados são

significativamente melhores, o que ficou claro com o Cenário 7. Dessa forma, torna-se visível o caráter preventivo das medidas não estruturais, conforme mencionado por Welsh (1989). Tais resultados mostram a importância do planejamento urbano para o controle de inundações.

A simulação hidráulica mostrou que há ocorrência de inundações na área estudada para todos os cenários simulados, sem exceção. Estes resultados mostram ser necessários estudos de outros tipos de medidas de controle para minimizar os prejuízos. Dada a dificuldade, ou impossibilidade, de se conter o córrego dentro de seu leito menor, percebe-se que é preciso abordar a utilização de medidas que visam harmonizar a convivência entre a população e as inundações.

Segundo Tucci (2005), as inundações são fenômenos naturais em que o rio ocupa seu leito maior. Assim, a não ocupação dessas áreas é uma saída mais econômica em comparação à adoção das dispendiosas medidas estruturais corretivas.

Os resultados deste estudo mostram a dificuldade em resolver o problema das inundações urbanas, e evidenciam que a abordagem preventiva do problema pode apresentar resultados mais eficazes, através de uma adequada regulação do uso do solo. Dessa forma, é ressaltada a importância de se pensar a drenagem da bacia hidrográfica anteriormente à sua ocupação, e assim, planejá-la de forma a compatibilizar os usos do solo com o ciclo hidrológico.

REFERÊNCIAS

- ALVES, E.M. (2005) *Medidas não-estruturais na prevenção de enchentes em bacias urbanas: cenários para a bacia do Gregório, São Carlos - SP*. 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, 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*. 1991. 327 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- BOLDRIN, R.S. (2005) *Avaliação de cenários de inundações urbanas a partir de medidas não-estruturais de controle: trecho da bacia do Córrego do Gregório, São Carlos - SP*. 2005. 202 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- BORGA, M.; ANAGNOSTOU, E.N.; BLÖSCHL, G.; CREUTIN, J.D. (2011) Flash flood forecasting, warning and risk management: the HYDRATE project. *Environmental Science & Policy*, v. 14, n. 7, p. 834-844.
- CANHOLI, A.P. (2005) *Drenagem urbana e controle de enchentes*. São Paulo: Oficina de textos, 301 p.
- COLLODEL, M.G. (2009) *Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão*. 2009. 219 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- GARCEZ, L.N. (1967) *Hidrologia*. São Paulo: Edgard Blücher, EDUSP, 249 p.
- GRACIOSA, M.C.P. (2010) *Modelo de seguro riscos hidrológicos com base em simulação hidráulico-hidrológica como ferramenta de gestão do risco de inundações*. 163 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS - IPH. (2005) Prefeitura Municipal de Porto Alegre. Departamento de Esgotos Pluviais. *Plano Diretor de Drenagem Urbana: Manual de Drenagem Urbana*. Volume VI. Porto Alegre 159 p.
- MACHADO, M.L.; NASCIMENTO, N.; BAPTISTA, M.; GONÇALVES, M.; SILVA, A.; LIMA, J.C.; DIAS, R.; SILVA, A.; MACHADO, E.; FERNANDES, W. (2005) Curvas de danos de inundação versus profundidade de submersão: desenvolvimento de metodologia. *Revista REGA*, v. 2, n. 1, p. 35-52.

- MENDES, H.C.; SILVA, T.G.O.; SOTO, I.; MENDIONDO, E.M. (2005) Levantamento histórico de inundações na sub-bacia do Gregório, São Carlos - SP, a partir de análise de notícias de jornais antigos. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 16, 2005, João Pessoa. Anais... João Pessoa: ABRH, p. 1-13.
- NAGEM, F.R.M. (2008) *Avaliação econômica dos prejuízos causados pelas cheias urbanas*. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS - PMSC. (2005) Lei nº 13.691, de 25 de novembro de 2005. Institui o Plano Diretor do Município de São Carlos e dá outras providências. São Carlos, 25 Nov. Disponível em: <http://www.saocarlos.sp.gov.br/images/stories/pdf/Lei_13691_05_Plano_Diretor.pdf>. Acesso em: 23 Mar. 2013.
- 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. 213 p. Relatório Síntese. Volume II - Medidas Estruturais, Medidas Não Estruturais e Custos. Contrato nº 87/09 - Processo nº 6.965/07.
- PORTO, R.M. (2006) *Hidráulica Básica*. 4ª edição. São Carlos: EESC-USP, Projeto REENGE, 519 p.
- PRIEST, S.J.; PARKER, D.J.; HURFORD, A.P.; WALKER, J.; EVANS, K. (2011) Assessing options for the development of surface water flood warning in England and Wales. *Journal of Environmental Management*. v. 92, n.12, p. 3038-3048.
- SILVEIRA, A.L.L. (2005) Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v. 10, n. 1, p. 5-23.
- TUCCI, C.E.M. (1995) Inundações Urbanas. In: TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.L.; BARROS, M.T (Eds.). *Drenagem Urbana*. Porto Alegre: ABRH/ Editora da Universidade/UFRGS, cap. 1, p. 15-36.
- TUCCI, C.E.M. & GENZ, F. (1995) Controle do Impacto da Urbanização. In: TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.L.; BARROS, M.T. (Eds.). *Drenagem Urbana*. Porto Alegre: ABRH/ Editora da Universidade/ UFRGS, cap. 7, p. 277-347.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS - USACE, (2000) Hydrologic Engineering Center. *HEC - HMS Hydrologic Modeling System: Technical Reference Manual*. Davis: HEC, 138 p.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA, (1986) Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division. *Urban Hydrology for Small Watersheds*. Technical Release 55. 2ª edição. Washington: NRCS, 164 p.
- WALESH, S.G. (1989) *Urban Surface Water Management*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 518 p.