

Cálculo de Áreas Inundáveis Devido a Enchentes para o Plano Diretor de Drenagem Urbana de São Carlos (PDDUSC) na Bacia Escola do Córrego do Gregório

Regina Mambeli Barros

UNIFEI, Av. BPS, 1303, Itajubá-MG
mambeli@unifei.edu.br.

Eduardo Mário Mendiondo, Edson Wendland

EESC/ USP, Escola de Engenharia/São Carlos, São Carlos-SP
emm@sc.usp.br, ew@sc.usp.br

Recebido: 27/04/05 – Revisado: 05/04/06 – Aceito: 23/05/07

RESUMO

O mapeamento de inundações tem sido objeto de estudo para o desenvolvimento de Planos Diretores (PD). Desde 2002, a Prefeitura Municipal de São Carlos-SP (PMSC) desenvolve seu PD com diretrizes para prevenção e controle de enchentes. No entanto, o cenário atual é o de execução de obras estruturais anti-enchentes, onerosas e de soluções pontuais. Pela ausência de planejamento prévio da urbanização em áreas de risco, a região do Mercado Municipal de São Carlos (MMS) é a principal atingida pelas enchentes na várzea do Córrego do Gregório. Este estudo provê elementos à tomada de decisão no PD através de medidas estruturais e não-estruturais como o mapeamento de enchentes. Foram inventariados os eventos críticos que produziram inundações próximo ao MMS, via entrevista à população da várzea. Para essas datas e para a simulação de chuvas, foram simulados os escoamentos com transformação chuva-vazão integrada e propagação simples através de um modelo concentrado IPHS-1 e um modelo distribuído HIDRORAS, cujos resultados foram comparados. Os parâmetros do modelo foram calibrados usando dados monitorados. As incertezas inerentes aos modelos foram identificadas. Os eventos simulados oferecem importantes subsídios para o mapeamento de inundações, a discutir na agenda do PD da Cidade. Foram estudadas medidas estruturais de controle de inundação, consistindo em um “piscinão” sem necessidade de escavação, e não-estruturais, como o acréscimo de áreas de infiltração. Concluiu-se que, para bacias urbanas, como a bacia do córrego do Gregório, as alterações nos padrões de fluxo de escoamento devido às vias urbanas são mais bem representadas pelo modelo distribuído HIDRORAS, apesar de se reservar uma parcela de incertezas quanto a este modelo, como a atribuição de valores ao parâmetro da condutividade hidráulica saturada.

Palavras-chave: Enchentes, drenagem urbana, áreas inundáveis.

INTRODUÇÃO

As inundações em bacias urbanas têm sido um dos principais focos de preocupação dos governantes por todo o mundo nos países suscetíveis a este problema. As atividades humanas que interferem no regime hídrico acentuam ainda mais esta problemática, e diversos trabalhos têm sido desenvolvidos na tentativa de prognosticar – através de modelos hidrológicos - cenários extremos de enchentes e quantificar seus riscos, para que assim,

possam ser formuladas políticas a fim de minimizar ou impedir que tais cenários ocorram.

Nesse sentido, existem inúmeros modelos hidrológicos já testados e diversos estudos de validação e aplicação, visando ao prognóstico de inundações em bacias hidrográficas. Com vistas à minimização de incertezas de modelagem, tornam-se essenciais: a verificação da acuracidade da informação disponível e; a redução das dificuldades na representação da diversidade e, sobretudo, a variabilidade de parâmetros e variáveis associados aos processos hidrológicos.

Geralmente, um sistema de previsão hidrológica é composto de três componentes: (a) um modelo que descreve os processos-chave de interesse, (b) uma série de parâmetros que representam as propriedades que governam processos críticos, e (c) entradas meteorológicas apropriadas que guiam a resposta da bacia (d) o conhecimento do estado inicial da bacia, possível fonte de erros significativos de modelagem, a saber: estado inicial de umidade do solo, volumes de água armazenados e em escoamento nos corpos d'água, estado da cobertura vegetal em função da estação do ano, etc. Estes componentes muitas vezes não são conhecidos totalmente, devido à heterogeneidade multi-escala espaço-tempo do sistema hidrológico (Sivapalan et al., 2004).

O PUB (Predictions on Ungauged Basins) é uma iniciativa da IAHS (International Association of Hydrological Sciences) que considera que uma pluralidade de caminhos de modelos e modelamentos podem ser válidas para a mesma bacia e aplicação (modelos empíricos, modelos estocásticos, modelos distribuídos). Enquanto cada método tem suas próprias limitações, cada um também incorpora diferentes informações e diferentes formas de conhecimento, e cada um pode ter alguma vantagem sobre o outro. Assim, uma avaliação comparativa de desempenhos de previsão de uma variedade de modelos, quando simultaneamente aplicados a bacias monitoradas selecionadas, pode levar ao cruzamento de idéias e discernimentos dentro da resposta da bacia, e aprimoramentos gerais nas descrições do processo, contribuindo para a harmonização dos caminhos de modelamentos.

De acordo com Samuels (1998), não existe nenhum modelo hidrológico universal, que possa ser aplicado em todas as circunstâncias. Métodos de estimativa de enchentes necessitam ser encontrados para alcançarem os requisitos das intenções finais de uso da informação e da disponibilidade de dados para o procedimento da estimativa. Entre as principais áreas de aplicação citadas pelo autor (op. cit.), destaca-se: a investigação de futuros cenários.

O desafio consiste no uso do modelo hidrológico mais adequado com a mais acurada representação de uma bacia, em diversos cenários, para um prognóstico confiável de medidas estruturais e não-estruturais de intervenção, a fim de se minimizar os impactos oriundos de urbanização já existente e a ser desenvolvida.

Diversos autores têm utilizado em seus trabalhos, o mapeamento ou zoneamento de inundações como medida não-estrutural de controle

de inundações, obtidos muitas vezes a partir de resultados de vazões críticas simuladas com modelos hidrológicos. Naef et al. (2002) contemplaram o potencial de redução do escoamento superficial devido às mudanças no uso do solo, sugerindo alterações para reduzir as enchentes em bacias urbanas. Niehoff et al (2002) concluíram que as condições da geração de escoamento superficial dependem muito da característica do evento de precipitação e da escala. Os autores afirmaram que eventos convectivos são de muito maior relevância para a formação de enchentes em micro-bacias. Para cálculo do risco de enchentes, diversos modelos hidrológicos têm sido utilizados (IPH II, IPH IV, entre outros) e também rotinas propostas (p.ex. Leopardi et al., 2002). Dentre os modelos contidos no pacote IPHS-1 v. 2.04 (UFRGS, 2003) encontram-se modelos de separação de escoamento como o IPH II (Tucci et al, 1981 apud TUCCI, 1998) e o SCS (1986). Shim et al (2002) utilizaram versões especializadas dos modelos hidrológicos HEC-1 e HEC-5 em um Sistema de Suporte a Decisão (DSS – *Decision Support System*) que se integra a um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Os autores (op. cit.) concluíram que os resultados de estudo de caso indicaram que este Sistema para controle de enchentes reduz substancialmente os impactos de enchentes nas várzeas.

A bacia do Córrego do Gregório tem sido usada em estudos comparativos de hidrologia urbana (p.ex. Germano, 2001). Nesta bacia de 18,9 km², os eventos de inundação estão associados às precipitações convectivas. Em 2003, ela apresenta alta urbanização no centro, e baixa urbanização na sua foz e a montante (Esteves & Mendiondo, 2003). Nas várzeas ocupadas na sua parte central, conhecida como “região do Mercado Municipal de São Carlos (MMSC)”, ocorrem freqüentemente inundações, prejudicando os comerciantes e moradores alocados nesta área. Segundo dados da Defesa Civil do Município de São Carlos, (Caballero, 2002, comunicação pessoal) a região do MMSC sofre em média de quatro a cinco grandes enchentes por ano, com prejuízos em torno de até R\$ 90.000,00 em cada um destes eventos. A região do MMSC foi a principal região citada pelos moradores em Barros et al (2003) e Righetto et al. (2003) como prejudicada pelas inundações. Neste Ponto de Controle e em duas outras seções (Figura 4), denominadas Estação 4 (E4) e Estação 5 (E5), monitoradas por Silva (2003), foram estudados os eventos críticos de inundações, avaliando-se as respectivas vazões. Este trabalho visa apresentar uma metodologia para dar suporte ao Plano Diretor (PD)

através de medidas não-estruturais como o mapeamento de enchentes em bacias de interesse. Como o processo é adaptativo, ele é continuamente atualizado a partir de novos dados coletados no projeto “Experimento piloto de gerenciamento de bacias hidrográficas para o Plano Diretor de São Carlos” (FINEP/FIPAI-EESC/DAEE, 2003).

METODOLOGIA

Este estudo propôs prever a vazão na bacia urbana do Córrego do Gregório – através da pluralidade de modelamentos, comparando-se os resultados de vazão oriundos entre um modelo concentrado, IPHS-1 (UFRGS, 2001) e um distribuído HIDRORAS (Silva, 2003) – em função de diferentes impactos hidrológicos decorrentes da urbanização atual (CLASS 4) e prevista em cenários diferentes (CLASS 5), preconizados pelo *Plano Diretor de São Carlos* (PDSC). Durante este processo, foram identificadas as incertezas inerentes a cada tipo de modelamento para verificar-se a adequação desses ao estudo de caso dessa sub-bacia urbana.

Para utilização dos modelos, concentrado IPHS-1 e distribuído HIDRORAS, tornaram-se essenciais: a preparação e análise dos dados de entrada: dados geométricos advindos da *Prefeitura Municipal de São Carlos* (PMSC); caracterização da área de estudo - para extração de parâmetros dos modelos e obtenção dos MNTs - necessários como dados de entrada ao modelo HIDRORAS e para o mapeamento das áreas inundáveis.

Não obstante, para calibração e validação dos modelos, foi necessária a comparação com eventos monitorados através da análise de uma curva-chave, com base nas metodologias de construção e extrapolação no interior (Sefione, 2002) e exterior às margens (Tucci & Silveira, 1985 apud Sefione, 2002). Assim, a seguir são apresentadas: a preparação dos dados para os parâmetros de entrada de ambos os modelos; a discretização do IPHS-1 e a preparação das imagens raster para o modelo distribuído HIDRORAS; bem como a metodologia de calibração e validação. Para o mapeamento de áreas inundáveis, a metodologia utilizada foi apresentada conectando um programa em Visual Fortran ® ao SIG IDRISI 32® para secção do MNT por um plano cortante, considerando a linha piezométrica, baseado no Step Method.

Preparação dos dados iniciais.

Foram feitas duas imagens de Modelo Numérico do Terreno (MNT), uma da sub-bacia inteira (MNT-1) e outra da área inundável da sub-bacia (MNT-2). A imagem MNT-1 foi obtida através das curvas de nível de 5 em 5 metros, disponíveis em CDCC/EESC/USP (2002). No SIG-IDRISI 32® foram utilizadas as ferramentas TIN de execução do MNT com estas curvas de nível. Esta imagem, “MNT-1” (figura 1) foi, então, utilizada para extração de informações para dados de entrada no modelo concentrado IPHS-1 e como uma das imagens de entrada no modelo distribuído de Silva (2003). Para tal, foram então, digitalizadas as curvas de nível referentes às cotas entre 793 e 815 metros inclusas nas folhas 06 e 10 das cartas do município de São Carlos (AEROMAPA BRASIL S. A., 1970). Vale ressaltar que, o exutório da bacia do Gregório deságua no córrego do Monjolinho. Novamente, foram utilizadas as ferramentas TIN de execução de MNT do SIG-IDRISI 32®, obtendo-se desta forma, MNT-2 (figura 2), que foi posteriormente utilizada para a delimitação das áreas de inundação, após serem devidamente georreferenciadas de acordo com as coordenadas UTM e sobreposto às quadras (figura 2).

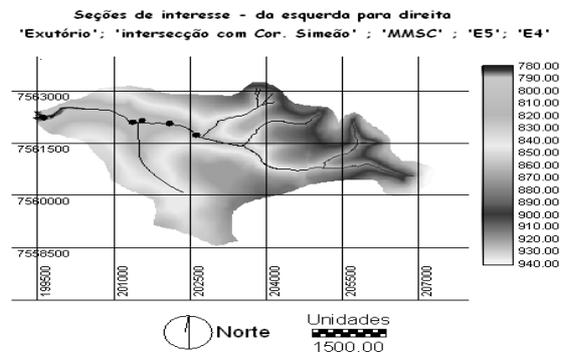


Figura 1 - MNT da sub-bacia do Córrego do Gregório, “MNT-1” com indicação do “MNT-2” e MMSC.

Os modelos hidrológicos - IPH II e SCS – foram utilizados em conjunto com o de propagação de ondas de Muskingum, ambos disponíveis no pacote “Modelos Hidrológicos – IPHS-1 – V. 2.04” do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS, 2003).

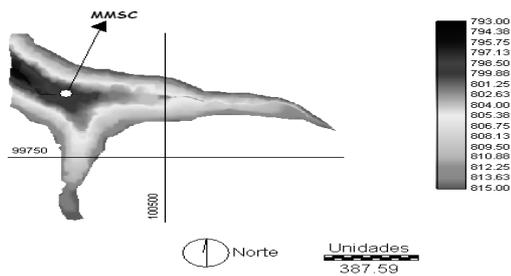


Figura 2 - MNT da área inundável da sub-bacia do Córrego do Gregório “MNT-2” com indicação do MMSC (Coordenadas locais).

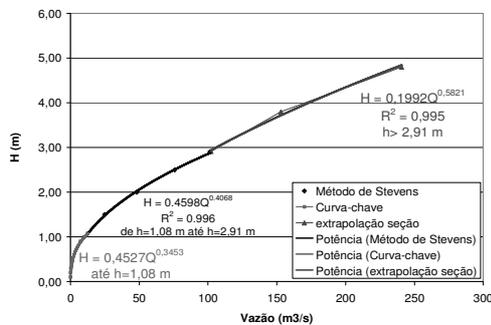


Figura 3- Curva-chave para seção de controle E5, montante do MMSC, na bacia do Gregório (extrapolação pelo Método de Stevens).

Tabela 1- Aferições de velocidade e altura do nível d’água. Fonte: SILVA (2002)

V _{média} (m/s)	h (m)
0,250	0,180
0,158	0,260
0,991	0,590
1,591	0,640
1,250	0,710
1,990	1,080

Para calibração dos parâmetros do modelo de separação de escoamento IPH II (contido no pacote IPHS-1 v. 2.03, (UFRGS, 2003), foi necessário a comparação com vários eventos monitorados. Silva (2002) monitorou, entre 07/01/00 a 31/03/00, eventos chuva-vazão com linígrafos em duas estações: Estação 4 (E4) e Estação 5 (E5). Para os

eventos constantes na tabela 1, Silva (2002) monitorou em E5 o valor de velocidade média na seção transversal e cotas (Tabela 1). Para cada altura registrada, os valores da Área Molhada (AM) e Perímetro Molhado (PM) da seção natural de E5 foram calculados. Utilizando a fórmula de Manning (n = 0,035), foi aprimorada uma curva-chave e uma equação de ajuste conforme a Figura 3.

A equação da curva-chave foi usada para estabelecer a variação da vazão em função do tempo para eventos de precipitação ocorrido em 06/02/00 (dois eventos), 26/01/00 e 11/02/2000. As estes eventos, foram comparados os resultados da simulação com o IPH II, até que os parâmetros para este modelo fossem calibrados.

Procedeu-se com a simulação de cenários para o IPHS-1 em cinco diferentes graus de urbanização, para a sub-bacia do Córrego do Gregório discretizada em nove sub-bacias (denominadas Sub 1 a Sub 9).

Estes cenários foram obtidos de acordo com a classificação das imagens de satélite LANDSAT em cinco diferentes classificações. O intuito foi a comparação dos resultados obtidos com as simulações em dois diferentes modelos hidrológicos (IPHS-1 concentrado x distribuído de SILVA, 2003), para verificação e análise das incertezas inerentes às simulações hidrológicas em uma bacia urbana.

Para o IPHS-1, os valores de CN das sub-bacias contribuintes a montante foram, portanto, alterados de acordo com a quantidade de pixels representantes de três diferentes tipos de classificação de uso do solo: 1.mata densa, 2.mata rasteira e 3.área urbana. Os valores alocados à impermeabilização buscaram representar o estágio de atual urbanização, em conformidade com análise de mapas atuais (CDCC/EESC/USP, 2002; Prefeitura Municipal de São Carlos, 2003).

Os valores alocados à impermeabilização buscaram representar o estágio de atual urbanização, em conformidade com análise de mapas atuais (CDCC/EESC/USP, 2002; Prefeitura Manucipal de São Carlos, 2003).

A simulação foi realizada para eventos de precipitação de chuvas convectivas de 30 e 60 minutos de duração – escolhidas com base em estudos na bacia, como em SHS – Consultoria e Projetos de Engenharia LTDA., 1993 e 1999 - para os respectivos períodos de retorno: 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 50 anos, reordenando os picos de chuva máxima aos 25% de sua duração total. Os intervalos de tempo da Precipitação foram de 5 minutos.

Tabela 2 – Valores de CN para as cinco classificações de urbanização

		CLASS 1 ^d	CN ^e / IMP ^f (%)	CLASS 2 ^d	CN ^e / IMP ^f (%)	CLASS 3 ^d	CN ^e / IMP ^f (%)	CLASS 4 ^d	CN ^e / IMP ^f (%)	CLASS 5 ^d	CN ^e / IMP ^f (%)
Sub 1	1 ^a	51,86 %	62,39 (CN)	51,86 %	62,39 (CN)	33,98 %	67,34 (CN)	90,28 %	57,15 (CN)	76,97 %	58,98 (CN)
	2 ^b	43,12 %		43,12 %		42,16 %		3,64 %		17,22 %	
	3 ^c	5,02 %		5,02 %		23,86 %		6,09 %		5,81 %	
Sub 2	1 ^a	47,56 %	67,72 (CN)	19,18 %	83,28 (CN)	18,99 %	83,78 (CN)	57,96 %	69,72 (CN)	21,77 %	87,70 (CN)
	2 ^b	33,88 %		22,97 %		20,73 %		11,58 %		4,26 %	
	3 ^c	18,55 %		57,84 %		60,29 %		30,46 %		73,97 %	
Sub 3	1 ^a	48,61 %	66,34 (CN)	35,69 %	70,46 (CN)	27,27 %	73,02 (CN)	49,94 %	69,84 (CN)	10,53 %	80,99 (CN)
	2 ^b	13,58 %		12,79 %		12,65 %		0,57 %		2,83 %	
	3 ^c	37,81 %		51,52 %		60,08 %		49,48 %		86,63 %	
Sub 4	1 ^a	48,70 %	67,72 (CN)	47,75 %	68,01 (CN)	43,53 %	69,29 (CN)	50,77 %	69,37 (CN)	36,90 %	72,55 (CN)
	2 ^b	16,66 %		16,66 %		16,58 %		2,47 %		8,61 %	
	3 ^c	34,64 %		35,59 %		39,89 %		46,77 %		54,49 %	
Sub 5	1 ^a	22,68 %	72,99 % (IMP)	22,68 %	72,99 (IMP)	22,68 %	72,99 (IMP)	12,66 %	87,34 (IMP)	8,20 %	84,97 % (IMP)
	2 ^b	4,34 %		4,34 %		4,34 %		0,00 %		6,82 %	
	3 ^c	72,99 %		72,99 %		72,99 %		87,34 %		84,97 %	
Sub 6	1 ^a	30,52 %	64,78 % (IMP)	30,52 %	64,78 (IMP)	30,52 %	64,78 (IMP)	9,77 %	90,02 (IMP)	9,77 %	90,02 % (IMP)
	2 ^b	4,70 %		4,70 %		4,70 %		0,21 %		0,21 %	
	3 ^c	64,78 %		64,78 %		64,78 %		90,02 %		90,02 %	
Sub 7	1 ^a	26,13 %	63,24 % (IMP)	26,13 %	63,24 (IMP)	26,13 %	63,24 (IMP)	6,19 %	93,64 (IMP)	6,19 %	93,64 % (IMP)
	2 ^b	10,64 %		10,64 %		10,64 %		0,17 %		0,17 %	
	3 ^c	63,24 %		63,24 %		63,24 %		93,64 %		93,64 %	
Sub 8	1 ^a	26,08 %	67,46 % (IMP)	26,08 %	67,46 (IMP)	26,08 %	67,46 (IMP)	5,69 %	94,05 (IMP)	5,69 %	94,05 % (IMP)
	2 ^b	6,47 %		6,47 %		6,47 %		0,26 %		0,26 %	
	3 ^c	67,46 %		67,46 %		67,46 %		94,05 %		94,05 %	
Sub 9	1 ^a	32,42 %	58,22 % (IMP)	32,42 %	58,22 (IMP)	32,42 %	58,22 (IMP)	20,37 %	79,29 (IMP)	20,37 %	79,29 % (IMP)
	2 ^b	9,36 %		9,36 %		9,36 %		0,34 %		0,34 %	
	3 ^c	58,22 %		58,22 %		58,22 %		79,29 %		79,29 %	

Nota: a) 1 representa mata densa, b) 2 representa a mata rasteira e c) 3 representa a área urbana; d) CLASS 1, CLASS 2, CLASS 3, CLASS 4 com os valores de CN atribuídos de modo a representar o estágio de urbanização equivalente a classificação 2 da imagem LANDSAT de satélite (tabela 2), e CLASS 5 equivalente a classificação 4 da imagem LANDSAT de satélite, porém com acréscimos de “manchas” de urbanização. IMP – Grau de impermeabilização; e) valores de CN foram usados quando o modelo de separação de escoamento utilizado foi o SCS; f) valores de IMP (%) foram usados quando o modelo de separação de escoamento utilizado foi o IPH II.

Os valores de alguns dados de entrada foram cedidos através de arquivos de obras realizadas e em execução pela Prefeitura Municipal de São Carlos (PMSC). Estes dados incluem as seções e comprimentos dos trechos canalizados e a geometria destes. Para os valores das cotas de fundo a montante e a jusante, foi desenvolvido o Modelo Numérico do Terreno (MNT-1) da bacia do Córrego do Gregório a partir de S.I.G. com IDRISI 32®. Para os Pontos de Controle (PCs, Figura 4),

foram extraídos, via MNT-1, os valores das cotas a montante e jusante dos diversos trechos estudados.

A partir de entrevistas realizadas (Barros et al, 2003) com diversos comerciantes afetados pelas enchentes na região do MMSC, foi possível atribuir preliminarmente um tempo de concentração de 25 minutos. Vale ressaltar que os comerciantes afetados constantemente pelas inundações possuem o conhecimento empírico do intervalo entre o início da chuva e o pico de vazão, bem como do tempo para que haja o esvaziamento das águas do córrego

do interior de seus estabelecimentos. Os valores iniciais foram atribuídos aos parâmetros do modelo IPH II, isto é K , I_0 , I_b e $R_{máx}$ foram extraídos a partir de estudo realizado por Germano (2001). As tabelas 3 a 7 apresentam os valores de entrada para os diversos parâmetros no modelo IPH II e Muskingum. A derivação para o Córrego do Monjolinho foi considerada com “Derivação com % da Vazão” em 100%.

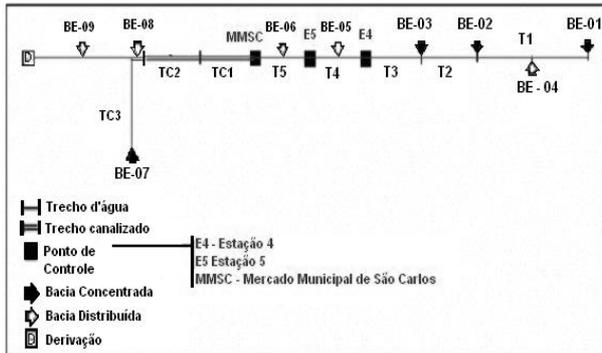


Figura 4 - Discretização da bacia do Córrego do Gregório para o modelo concentrado IPHS-1.

Tabela 3 – Parâmetros das Bacias (BEs) para o modelo IPH II, adaptado de SILVA (2003)

Bacia (Figura 2)	Área (km ²)	H ^a	I ₀ ^b (mm/h)	I _b ^b (mm/h)	R _{máx} ^c (mm)
BE-1	1,39	Na ^d	Na	Na	Na
BE-2	1,35	Na ^d	Na	Na	Na
BE-3	1,43	Na ^d	Na	Na	Na
BE-4	4,84	Na ^d	Na	Na	Na
BE-5	2,27	0,85	50	5	18
BE-6	4,17	0,85	50	5	5
BE-7	0,56	0,85	50	5	5
BE-8	1,74	0,85	50	5	14
BE-9	1,14	0,85	50	5	14

Nota: a) H representa a capacidade máxima de percolação ; b) parâmetros da equação de Horton: I₀ - capacidade de infiltração do solo quando a umidade é S₀ (t=0) c; I_b - capacidade de infiltração quando o solo está saturado; c) capacidade máxima do reservatório superficial, R_{máx} (mm); d) Na - Não aplicável em razão do uso do SCS para a sub-bacia.

Tabela 4 – Características para os trechos (T) da planície de inundação do canal principal ao modelo IPH II, conforme figura 4.

Planície inundação			
Trecho	Largura (m)	n	Altura (m)
T5	14	0,025	0,1
T6	14	0,025	0,1

Nota: Os demais trechos não foram considerados como planície de inundação.

Tabela 5 – Característica para os trechos (T) do canal principal para o modelo IPH II, conforme Figura 4.

Trecho	Altura (m)	Largura (m)	L _{trecho} (m)	Cota de fundo (m)	
				Montante	Jusante
T1	3	4	2350	856	826
T2	3	4	800	826	823
T3	3	4	800	823	816
T4	3	4	550	816	810
T5	3	6	750	810	798
T6	3	6	750	810	798
T7	10	15	1850	791	780

Tabela 6 – Coeficientes de rugosidade dos trechos (T) do canal principal ao modelo IPH II, conforme Figura 2.

Trecho	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
n	0,1	0,08	0,045	0,045	0,025	0,045	0,045

Nota: Valores extremos de rugosidade de Manning são devidos à alta heterogeneidade do curso de água do Gregório.

Tabela 7 – Trechos Canalizados (TCs), afluentes ao Córrego do Gregório, conforme Figura 2.

Elemento	L _{trecho} (m)	n	Tipo de seção	Cota de fundo (m)	
				Montante	Jusante
T1	60	0,014	Ret. (3,80 x 6,00 m)	798,00	797,79
T2	700	0,014	Circ. (φ = 4,0871 m)	797,79	791,00
T3	1500	0,014	Ret. (1,90 x 1,10 m)	854,00	798,00

Utilização do modelo distribuído HIDRORAS (Silva, 2003).

Trata-se de um modelo hidrológico distribuído tendo como princípio o pressuposto de que a área da bacia pode ser representada por células oriundas de um MNT, sendo que, em cada célula, um equacionamento hidráulico – hidrológico é especificado e os escoamentos são propagados para as células de jusante.

Os dados de entrada para este modelo distribuído foram as seguintes imagens:

- Arquivo MNT da sub-bacia do Gregório: Esta imagem de entrada foi a “MNT-1”.
- Arquivo de imagem do sistema viário. Trata-se de um arquivo raster representativo de ruas e quadras.
- Arquivo de imagem do uso do solo: Foram inseridas as imagens - raster - representativas dos cenários de urbanização (CLASS 1 a CLASS 5).
- Arquivo vetor da rede de drenagem. Arquivo vetor de atributos da imagem representativa dos canais de drenagem.
- Arquivo raster da rede de drenagem. Imagem raster - representativa dos canais de drenagem.
- Arquivo de chuva: Foram utilizados os mesmos arquivos de chuva de projeto simulados com o IPHS-1. Os intervalos de tempo da Precipitação também foram de 5 minutos.
- Arquivo vetor dos pontos de vazão: onde foram indicados os pontos nos quais foi desejado o conhecimento da vazão. Estes pontos foram digitalizados no software SIG-IDRISI 32® em uma camada sobreposta ao “MNT-1” (figura 1).
- Arquivo raster da condutividade hidráulica saturada: foi realizada uma correspondência entre a classificação do uso do solo e a condutividade hidráulica saturada, de acordo com valores encontrados na literatura (p. ex. Queiroz, 1996). Para este parâmetro, e para o parâmetro de rugosidade, foi realizada uma análise de sensibilidade, cujos resultados encontram-se no item a seguir “Resultados”.

A seguir para utilização da curva-chave em MMSC, com os valores de vazão obtidos por ambos modelos hidrológicos, foi feito neste estudo uma

delimitação de área inundada por meio de um corte na imagem “MNT-2” de acordo com a declividade da linha d’água, calculada pelo “Step Method” (Porto, 1998). Esta metodologia foi proposta para ser utilizada por Fazal Hussain Chaudhry (2004, *comunicação pessoal*).

Para execução desta delimitação foi utilizado o SIG-IDRISI 32®, por meio de um Modelo Numérico do Terreno (MNT), o “MNT-2”, através de ferramentas de reclassificação. Este procedimento foi associado a uma rotina em VISUAL FORTRAN®, por meio de um plano representativo do remanso, ou seja, da declividade da linha d’água.

RESULTADOS

Os resultados das simulações mais representativas encontram-se representados nas Figura 5 a 8 e nas tabelas 8 e 9.

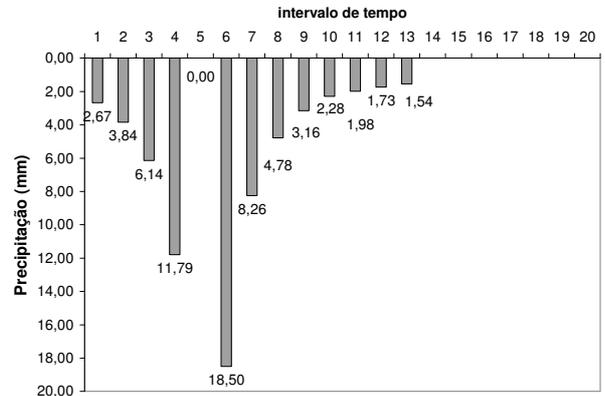


Figura 5 – Simulação de Chuva de 60 min de duração e 50 anos de período de retorno (TR).

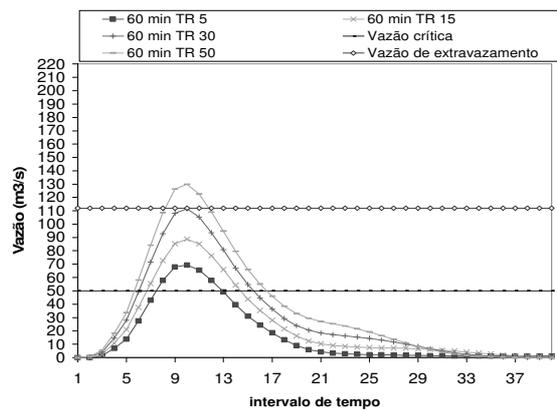


Figura 6 - Simulações com o modelo concentrado IPHS-1 para CLASS 4, duração da chuva de 60 min para diferentes tempo de retorno na bacia do Gregório no posto de controle MMSC, em frente à “Padaria Caiçara”.

Cálculo de Áreas Inundáveis Devido a Enchentes para o Plano Diretor de Drenagem Urbana de São Carlos (PDDUSC) na Bacia Escola do Córrego do Gregório

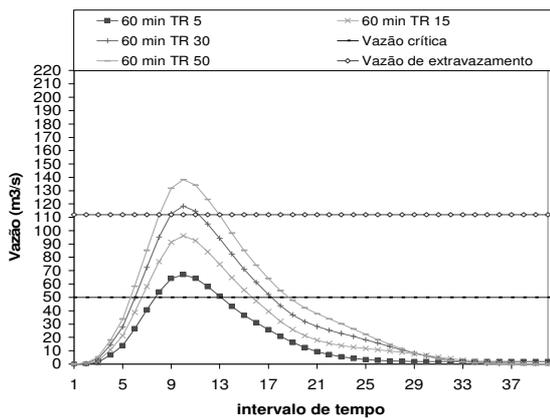


Figura 7 - Simulações com o modelo concentrado IPHS-1 para CLASS 5, duração da chuva de 60 min para diferentes tempo de retorno na bacia do Gregório no posto de controle MMSC, em frente à “Padaria Caiçara”.

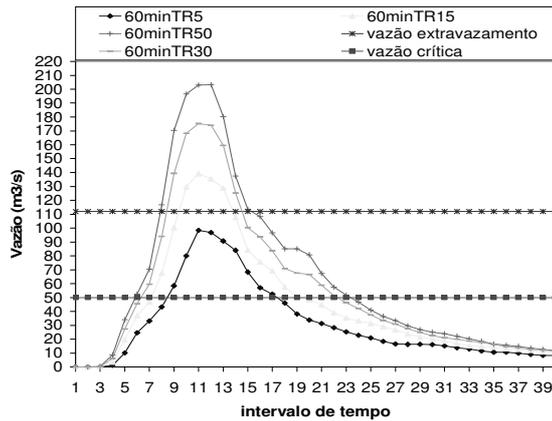


Figura 10 - Simulações com o modelo distribuído HIDRORAS para CLASS 5, duração da chuva de 60 min para diferentes tempo de retorno na bacia do Gregório no posto de controle MMSC, em frente à “Padaria Caiçara”.

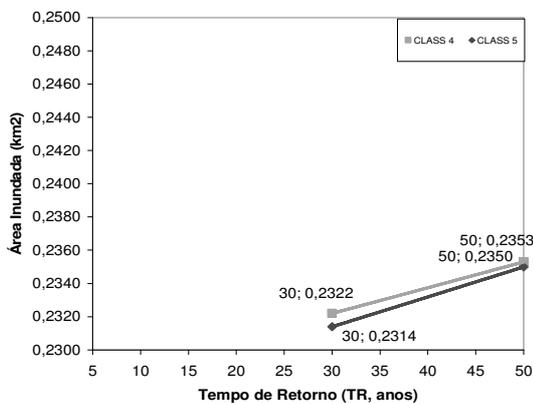


Figura 8 - Área Inundada em CLASS 4 e CLASS 5 (chuva de 60 min, modelo concentrado IPHS-1).

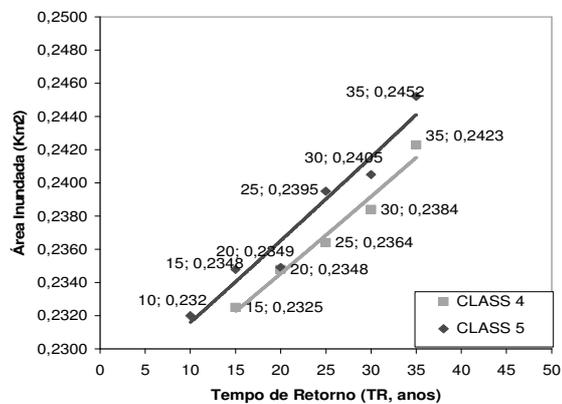


Figura 11 - Área Inundada em CLASS 4 e CLASS 5 (chuva de 60 min, modelo distribuído).

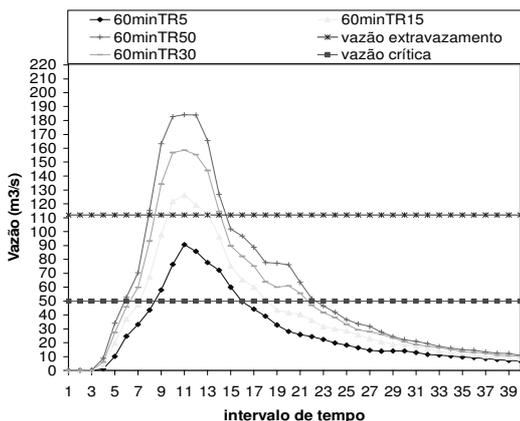


Figura 9 - Simulações com o modelo distribuído HIDRORAS para CLASS 4, duração da chuva de 60 min para diferentes tempo de retorno na bacia do Gregório no posto de controle MMSC, em frente à “Padaria Caiçara”.

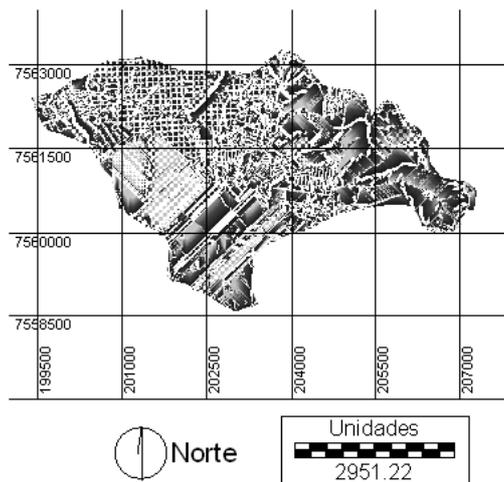


Figura 12 - Imagem de densidade de drenagem oriunda de simulação com o Modelo Distribuído HIDRORAS.

Tabela 7 – Picos de Vazão com o modelo concentrado IPHS-1 para TR de 50 anos.

		Impermeabilização									
		CLAS S 1	CLAS S 2	CLAS S 3	CLAS S 4	CLAS S 5	CLAS S 1	CLAS S 2	CLAS S 3	CLAS S 4	CLAS S 5
E4	Q (m ³ /s)	12,05	18,52	21,03	11,23	24,46	19,33	29,02	33,89	23,64	36,77
	TR (anos)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	t _{instante} (min)	60	75	85	95	75	75	90	95	100	85
E5	Q (m ³ /s)	36,60	34,30	36,30	37,31	47,79	44,90	46,53	49,48	44,72	61,46
	TR (anos)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	t _{instante} (min)	55	60	60	55	55	60	70	70	60	65
MMSC	Q (m ³ /s)	91,62	90,43	91,94	117,82	126,12	101,04	99,38	101,08	129,79	138,23
	TR (anos)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	t _{instante} (min)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Junção	Q (m ³ /s)	99,69	98,62	100,06	106,62	106,62	102,66	107,54	102,66	107,18	107,18
	TR (anos)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	t _{instante} (min)	50	50	50	50	45	50	50	50	45	45

Tabela 8 – Picos de Vazão com o modelo distribuído HIDRORAS para TR de 50 anos.

		Impermeabilização									
		CLAS S 1	CLAS S 2	CLAS S 3	CLAS S 4	CLAS S 5	CLAS S 1	CLAS S 2	CLAS S 3	CLAS S 4	CLAS S 5
E4	Q (m ³ /s)	92,10	108,84	109,94	103,63	123,14	99,97	115,05	116,81	110,88	130,59
	TR (anos)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	t _{instante} (min)	50	45	45	45	45	50	45	45	45	45
E5	Q (m ³ /s)	98,52	113,39	115,33	107,86	124,58	107,58	121,76	123,12	118,96	135,80
	TR (anos)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	t _{instante} (min)	50	50	50	50	55	55	55	55	55	55
MMSC	Q (m ³ /s)	156,67	169,67	171,51	172,80	190,18	166,24	181,07	183,00	184,23	203,20
	TR (anos)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	t _{instante} (min)	55	55	55	55	55	55	55	55	55	60
Junção	Q (m ³ /s)	157,32	170,02	171,82	178,44	193,37	174,16	188,68	190,60	195,37	212,61
	TR (anos)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	t _{instante} (min)	60	60	60	55	60	60	60	60	45	60

DISCUSSÃO

Com o uso do modelo distribuído, para as precipitações de duração de 60 minutos (Figura 9), em CLASS 4 o valor máximo de vazão simulado para TR 50 anos seria de 184,23 m³/s em MMSC, aos 55 min. Entretanto, as simulações entre os modelos

distribuído e concentrado diferem bastante, pois, para o mesmo caso com o uso do IPHS-1, para TR-50 anos em CLASS 4, Q_{E4}= 23,64 m³/s, Q_{E5}=44,72 m³/s e Q_{MMSC}=129,79 m³/s, na Figura 6 e tabela 7. Observando as tabelas 7 e 8 e figuras 6 e 7 (vazões obtidas com o uso do modelo concentrado IPHS-1), 9 e 10 (modelo distribuído HIDRORAS), para simulações com CLASS 4 e CLASS 5 e 60 min, os

valores de vazão oriundos dos dois modelos diferiram bastante. Tanto no IPHS-1 quanto no modelo distribuído de Silva (2003) os valores não se alteraram entre E4 e E5, porém a valores de picos de vazão maiores com o modelo distribuído. Isto pode ser resultado das alterações dos padrões de escoamento contemplado no modelo distribuído (Figura 12) devido à urbanização.

Com o modelo distribuído HIDRORAS, para as precipitações de duração de 60 minutos (Figura 10), em CLASS 5 na Estação E5, para o período de retorno TR 50 anos, seria simulado uma vazão correspondente à 135,80 m³/s em E5 aos 55 min e 130,59 m³/s em E4 aos 45 min. Para o mesmo caso com o uso do IPHS-1 para TR-50 anos em CLASS 5, $Q_{E4}= 36,77 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{E5}=61,46 \text{ m}^3/\text{s}$ e $Q_{\text{MMMSC}}=138,23 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 7, tabela 8). Para TR de 30 anos no MMSC em simulação com o modelo HIDRORAS, ocorreria uma vazão de 158,60 m³/s, aos 55 min, o que já extravasaria a calha, chegando até ao valor de 184,23 m³/s para TR de 50 anos, aos 55 min. Estes valores para a junção entre os trechos canalizados do Gregório e do Simeão seriam de, respectivamente, 98,39 m³/s em 55 min após o início do evento (TR 30 anos) e 203,20 m³/s aos 65 minutos (TR 50 anos). Neste ponto crítico, a partir de TR de 02 anos, a vazão já ultrapassaria os 50 m³/s, e o pico seria em torno de 76,56 m³/s (tabela 8).

No modelo distribuído é considerado que o escoamento proveniente das áreas permeáveis e impermeáveis contribuem para o escoamento nas ruas seguindo o caminho de maior declividade do terreno. Assim, a consideração de sub-bacias em áreas urbanas levando-se em consideração somente as curvas de nível pode levar a incertezas nos resultados. São necessários observação e conhecimento em eventos de precipitação para analisar os novos padrões de escoamento, devido a presença de urbanização e rede de galerias de águas pluviais. No IPHS-1 as sub-bacias foram delineadas de acordo com as curvas de nível. Entretanto, em uma bacia urbanizada os padrões divergem bastante, devido a presença de quadras e tubulações. Por esta razão, os valores no MMSC não foram tão diferentes quanto em E4 e E5, embora ainda menores no IPHS-1. Neste modelo, a alta dependência no valor CN para o SCS e Área Impermeabilizada para o IPH II nos modelos de separação de escoamento e o alto grau de incerteza a eles inerentes, estes parâmetros podem explicar estas diferenças.

Em bacias a serem simuladas é de suma importância verificar o comportamento da infiltração de acordo com o período bem como

especialmente. Algumas características locais são peculiares e muitas vezes são desprezadas quando na discretização de modelos e/ou construção de imagens. Por exemplo, ainda de acordo com Silva (2003), as curvas de nível contornando as cabeceiras do primeiro afluente do Córrego do Gregório pela sua margem direita são necessárias para retenção das águas pluviais, o que foi comprovado pelas baixas capacidades de infiltração obtidas nessa área.

Logo, a consideração de resultados obtidos em uma pequena área como representativo da condutividade hidráulica para uma região pode conduzir a resultados muito distintos.

Distinto, também da realidade poderiam estar os modelos devido ao fato de não se considerar sobre a variação do posicionamento da célula de precipitação e seus efeitos sobre a vazão como resposta da bacia de drenagem, como preconizado em Shing (1998). É conhecido que na sub-bacia do Córrego do Gregório há uma tendência da célula de chuva de se movimentar no sentido oeste-leste, sendo que na maioria das vezes em Silva (2003) as precipitações tiveram início na parte sudoeste da área de estudo.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A cidade de São Carlos sofre com o problema de inundações frequentes, e uma das principais regiões afetadas é a do Mercado Municipal de São Carlos (MMSC), inserida na sub-bacia do Córrego do Gregório. A região do MMSC é uma área de várzea urbanizada, cuja importância econômica para o município é grande, porém com trechos canalizados insuficientes para condução de vazão. A fim de estimular a motivação da sociedade civil em relação à drenagem urbana e gestão de recursos hídricos foram realizadas entrevistas (Barros et al., 2003) aos principais atingidos pelas cheias urbanas na região do mercado municipal, cujos resultados indicaram o interesse social pelo assunto. Assim, tornou-se necessário a estimativa de vazões para prognóstico de cenários de urbanização através do uso de modelos hidrológicos. No entanto, como se trata de uma bacia urbana, a questão residiu em qual modelo deveria ser utilizado.

Para tal foram utilizados, comparados e analisadas as incertezas inerentes de dois modelos, o concentrado IPHS-1 e o distribuído HIDRORAS. Foram simulados diversos cenários de acordo com as diversas classificações de imagem de satélite LANDSAT para avaliação das vazões com diferentes

tempos de retorno (TR) e durações (30 e 60 minutos).

- Embora ainda hajam incertezas quanto à calibração do modelo concentrado IPHS-1, ele forneceu resultados bastantes satisfatórios para uma delimitação das áreas inundáveis. Estas incertezas consistem na concepção do modelo SCS e na ausência da possibilidade de se representar o movimento da célula da precipitação sobre a bacia, bem como das galerias de águas pluviais e estrangulamentos locais, como pontes. As incertezas residem ainda no fato que sub-bacias delineadas funcionariam como uma malha de grande resolução que atenuaria a complexidade e padrões locais da geração de escoamentos e fluxos de água.
- As simulações com o IPHS-1, utilizando-se os modelos de separação de escoamento foram altamente dependentes dos valores de CN (SCS) e AIMP (IPH II), o que reflete a importância do grau de urbanização sobre os picos de vazão em pontos inundáveis em uma bacia, bem como reflete também o alto grau de incerteza na classificação do uso do solo para atribuição do CN.
- As simulações com o modelo distribuído forneceram vazões maiores que as obtidas com o modelo concentrado IPHS-1. Provavelmente, isto se deu devido à inclusão da contribuição dos padrões de escoamento modificados devido a urbanização e pelo grau mais acurado de discretização deste tipo de modelo (resolução de 10 metros). Esta acuracidade, dependendo do grau de incerteza dos parâmetros de entrada pode refletir muito nos resultados. No caso deste estudo, o modelo não foi tão sensível aos de parâmetros com alto grau de incerteza de condutividade saturada e rugosidade. Talvez a condutividade hidráulica saturada não tenha sido tão sensível à mudança em seus valores devido ao alto grau de resolução da malha (10 metros).
- O alto grau de incerteza do parâmetro da condutividade hidráulica saturada reside no fato de seu valor poder ser muito modificado espacialmente, devido ao basalto, ou ação erosiva do escoamento superficial e práticas de manejo do solo, por exemplo. Logo, uma distribuição espacial

deste parâmetro, bem como a consideração de valores médios geram incertezas. Também quanto a precipitação, escassas informações poderiam conduzir e incertezas, como preconizado por SHING (1998).

AGRADECIMENTOS

À CAPES pela concessão de bolsa de doutoramento a Regina Mambeli Barros (doutoranda do SHS-EESC/USP) e a FINEP/FNDCT/CT-HIDRO, pelo projeto do edital: GURH 03/2002, convênio FIPAI 01.02.0086.00, da EESC/USP e DAEE/SP.

REFERÊNCIAS

- AEROMAPA BRASIL S. A. (1970). Planta Cadastral do Município de São Carlos. Vão de 1970. Escala 1: 2000.
- BARROS, R. M.; ESTEVES, R. L.; MENDIONDO, E. M.; WENDLAND, E. C. (2003) "Entrevista à Sociedade Civil sobre Gestão de Recursos Hídricos e Drenagem Urbana". In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, ABRH, Curitiba-PR. Anais.
- CDCC/EESC/USP (2002). "Bacias Hidrográficas de São Carlos"./ CD-Rom/.
- ESTEVES, R. L., MENDIONDO, E. M. (2003). Análise comparativa entre equações e observações do tempo de concentração em uma bacia urbana de São Carlos, SP In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, ABRH, Curitiba-PR (esta edição)
- FINEP/FIPAI-EESC/DAEE (2003) Experimento piloto de gerenciamento de bacias urbanas para o Plano Diretor de São Carlos, Nro. 01.02.0086.00 (www.busplanodiretor.hpg.com.br)
- GERMANO, A. (2001). Estimativa dos Parâmetros do Modelo IPH II para algumas bacias Urbanas Brasileiras. In: Drenagem Urbana – Avaliação e Controle (2001). Orgs.: TUCCI, C. E. M.; Editora da ABRH-UFRGS, Porto Alegre-RS.
- LEOPARDI, A.; OLIVERI, E.; GRECO, M. (2002). Two-dimensional modeling of floods to map risk-prone areas. *Journal of Water Resources Planning and Management*, New York, v.128,n.3, p.168-178, May/June.

- NAEF, F.; SCHERRER, S.; WEILER, M. (2002). A Process Based Assessment of the Potential to Reduce Flood Runoff by Land Use Change. *Journal of Hydrology*, Vol. 267, pp. 74-79.
- NIEHOFF, D.; FRITSCH, U.; BRONSTERN, A. (2002). Land-use Impacts on Storm-Runoff Generation: Scenarios of Land-Use Change and Simulation of Hydrological Response in a Meso-Scale Catchment in SW-Germany. *Journal of Hydrology*, Vol. 267, pp. 80-93.
- PORTO, R. M. (1998). *Hidráulica Básica*, ed. EESC/USP, São Carlos-SP.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS (2003). Macrozoneamento e Áreas de Especial Interesse Social, Reunião de Trabalho do Plano Diretor de São Carlos, Maio de 2003.
- QUEIROZ, E. A. (1996). A Utilização do Sistema de Informações Geográficas no Estudo da Dinâmica do Escoamento Superficial em Áreas Urbanas: Aplicação na Bacia do Córrego do Gregório. São Carlos, 1996. 207 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- RIGHETTO, J.M.; BARROS, R.M.; MEDIONDO, E.M. (2003). Avaliação da seguridade e percepção pública sobre riscos de enchentes em várzeas urbanizadas: o caso do micro-centro da cidade de São Carlos-SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15., 2003, Curitiba. *Anais...* [S.l.]: ABRH. 1 CD-ROM.
- SAMUELS, P. G. (1998). An Overview of Flood Estimation and Flood Prevention. IN: TOENSMANN, F.; KOCH, M. (eds.) (1998). RIVER FLOOD DEFENSE, vol. 2, pp. G-1-11.
- SHING, V.P. (1998). Effect of the direction of storm movement on planar flow. *Hydrological processes*, Chichester, v.12, n.1, p.147-170, Jan.
- SHS - CONSULTORIA E PROJETOS DE ENGENHARIA LTDA. (1993). Plano Diretor da macro-drenagem da cidade de São Carlos - Relatório de andamento n.4 – Análise Hidráulica, SHS - Consultoria e Projetos de Engenharia Ltda., São Carlos-SP, 28 p., 6 plantas.
- SHS - CONSULTORIA E PROJETOS DE ENGENHARIA LTDA (1999). Projeto hidráulico executivo das obras de complementação da galeria de águas pluviais do córrego do Gregório São Carlos-SP. São Carlos
- SOIL CONSERVATION SERVICE – SCS (1986). Urban hydrology for small watersheds, 2. ed, Washington : Department of Commerce.
- SEFIONE, A. L. (2002). “Estudo Comparativo de Métodos de Extrapolação Superior de Curvas-Chave”. 218 p. Dissertação (Mestrado), - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SHIM, K. C.; FONTANE, D. G.; LABADIE, J. W. (2002). Spatial Decision Support System for Integrated River Basin Flood Control. *Journal of Water Resources Planning and Management*, May, June 2002, pp. 190-201.
- SILVA, K. A.A. (2002). Dados hidrológicos monitorados entre Jan/01 e Mar/01 na sub-bacia do Córrego do Gregório./ CD-ROM. Inédito, EESC/USP, São Carlos.
- SILVA, K. A. A. (2003). “Análise da Variabilidade Espacial da Precipitação e Parâmetros Hidrológicos em uma Bacia Experimental: Estudo Teórico-Experimental da Transformação da Chuva em uma Pequena bacia Hidrográfica Urbana”. 400 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SIVAPALAN, M. et al. (2003). IAHS decade on predictions in ungauged basins (PUB), 2003-2012: shaping and exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal des Sciences Hydrologiques*, Oxford, v.48, n.6, p.857-890, Dec.
- TUCCI, C. E. M.; ORDONEZ, J. S.; SIMÕES, M. L. (1981). Modelo Matemático Precipitação-Vazão IPH II Alguns Resultados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 4., 1981, Fortaleza. *Anais...* ABRH.
- TUCCI, C. M. E. (1998). “Modelos Hidrológicos”, ed. ABRH, Porto Alegre-RS.
- TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA (1985). *Análise de Consistência de Dados Fluviométricos*. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS (2003). *IPHS-1 para Windows v.2.03 – Modelagem hidrológica e hidráulica*. Porto Alegre.

Calculation Of Flood-prone Areas For The Urban Drainage Master Plan In The City Of São Carlos (PDDUSC), Corrego do Gregório Basin

ABSTRACT

Since 2002, the Municipality of São Carlos, SP, Brazil (PMSC) has developed a Master Plan, thereby establishing guidelines for flood prevention and control. However, the present scenario shows expensive, on-site anti-flood works in São Carlos. Due to the absence of previous watershed planning, the area around the Municipal Market (MMSC) is continuously threatened by overspill flood events in the floodplain of Gregorio River. The purpose of this work is to provide information to support decision-making in the Master Plan using structural and nonstructural measures, such as flood zoning of risk-prone

areas. Critical flood events that produced inundation at MMSC were identified by interviewing people living in these urban risk-areas. Those critical events were simulated using integrated rainfall-runoff transformation and wave routing with the IPHS-1 concentrated model and the distributed model, HIDRORAS, whose results were compared. Input data were calibrated from monitored flood events. Uncertainties inherent to each model were identified. Results depict initial yardsticks for flood mapping to be included in the Master Plan agenda. Structural flood control measures consisting of a retention basin without excavation and non-structural measures such as increased infiltration area, were investigated. It was concluded that for urban watersheds like the Gregório basin, changes in the flow patterns due to urban streets are better represented by the distributed model, HIDRORAS. However, a number of uncertainties still remain for this model, such as the influence of saturated hydraulic conductivity of the soil.

Key-words: Floods, urban drainage, flood-prone areas.