

APLICAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS PARA AVALIAÇÃO DE RESERVATÓRIOS DE RETENÇÃO E DETENÇÃO COMBINADOS À OBRA DE RECUPERAÇÃO DO CANAL DE MACRODRENAGEM NO CONTROLE DE CHEIAS EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA URBANIZADA

USE OF HYDROLOGICAL MODELS TO EVALUATE THE DETENTION AND RETENTION RESERVOIRS COMBINED WITH THE RECUPERATION OF THE MACRO DRAINAGE CHANNEL IN THE FLOOD CONTROL OF AN URBANIZED WATERSHED

Rodrigo Braga Moruzzi¹, Cenira Maria Lupinacci da Cunha² e Jefferson Nascimento de Oliveira³

¹Professor Doutor do Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento UNESP Campus de Rio Claro – Av. 24 A n°. 1515, Bairro Bela Vista, Rio Claro, SP. E-mail: rmoruzzi@rc.unesp.br.

²Professora Doutora do Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento UNESP Campus de Rio Claro – Av. 24 A n°. 1515, Bairro Bela Vista, Rio Claro, SP. E-mail: cenira@rc.unesp.br.

³Professor Doutor do Departamento de Engenharia Civil FEIS-UNESP Campus de Ilha Solteira. E-mail: jeffno@dec.feis.unesp.br

RESUMO

O objetivo do artigo foi avaliar o efeito de reservatórios de retenção e detenção e da intervenção na calha do canal fluvial no amortecimento do pico de cheias de uma bacia urbanizada localizada na cidade de Rio Claro, SP. Trata-se da aplicação de técnicas de modelagem e simulação hidrológica visando subsidiar ações corretivas na bacia hidrográfica. Para tal, foram empregados modelos hidrológicos visando determinação da chuva excedente, bem como da propagação da mesma nos canais. O modelo do *Soil Conservation Service* – SCS foi empregado para conversão chuva-vazão. A propagação em reservatórios e canais foi avaliada por meio dos modelos Pulz e Muskingum-Cunge não linear, respectivamente. O programa computacional IPHS1 foi utilizado nas simulações. Os resultados demonstraram que a combinação do aumento da capacidade do reservatório de retenção existente somada à implantação de reservatório de detenção (120.000 m³, correspondente a 1,5% da área da sub-bacia) e obras de melhorias em um trecho do canal principal (reduzindo n de 0,04 para 0,02) podem minimizar o efeito das inundações na bacia do Córrego da Servidão. Após as melhorias propostas, a vazão de excessos foi eliminada para os tempos de recorrência investigados: 5, 20, 50 e 100 anos. O prognóstico considerando a urbanização da área livre, correspondente a atual área de 24% de terreno para plantio, não ocasionou em aumento significativo da vazão escoada, dada a elevada taxa de urbanização da atual da bacia.

Palavras-chave: Simulação hidrológica, controle de cheias, modelo SCS, modelo Pulz, modelo Muskingum-Cunge, reservatórios de retenção e detenção.

ABSTRACT

The aim of this paper was to evaluate the effect of retention and detention reservoirs along with the regulation in channel flow upgrade on flood for an urban watershed located at Rio Claro, SP. For this purpose, modeling and simulation techniques were applied for runoff determination and its propagation in channel. The Soil Conservation Service – SCS hydrologic model as well as Pulz and non-linear Muskingum-Cunge model were used. The software IPHS1 was applied on simulations. The results pointed out that the combination of retention increasing and detention reservoir implementation (120,000 m³, corresponding to 1.5% of the watershed area) with the streamflow upgrade (n decreasing from 0,04 to 0,02) can minimize the flood on the investigated Servidão watershed. Further, after the proposed intervention, the flood was eliminated for the investigated times of recurrence: 5, 20, 50 and 100 years. The prognostic indicated that the available area occupation had a minor effect on flow increasing due to the observed high urbanization.

Keywords: Hydrologic simulation, flood control, SCS model, Pulz model, Muskingum-Cunge model, retention and detention reservoirs.

1 – INTRODUÇÃO

Atualmente, o uso da terra com fins urbanos constitui-se em fenômeno de considerável dimensão o qual cria uma série de questões ambientais. Entre tais questões, têm-se os desvios causados no ciclo hidrológico e a perturbação do sistema hidrográfico. Assim, a avaliação das situações de risco e das opções técnicas de resolução dos problemas

criados pela intensa urbanização torna-se cada vez mais importante.

Neste contexto, o estudo de bacias hidrográficas densamente urbanizadas que já apresentam problemas de cheias é essencial para a avaliação dos modelos e das técnicas disponíveis para a resolução de problemas deste tipo. Dessa forma, este artigo apresenta dados e discute a situação da bacia do Córrego da Servidão, sistema

hidrográfico amplamente afetado pela urbanização, que tem apresentado problemas cada vez mais sérios de cheias. Uma avaliação preliminar foi realizada por Moruzzi e Lupinacci (2009), a qual demonstrou a limitação do reservatório de retenção existente para atenuação de pico na área da bacia investigada.

Assim, neste artigo foram avaliados os efeitos combinados de medidas estruturais na atenuação de enchentes em uma bacia com alto grau de urbanização, enfatizando o reservatório de retenção (já existente) e ações virtuais concernentes ao reservatório de detenção e a intervenção na calha fluvial em um trecho localizado a jusante do reservatório de detenção. Por fim, foi avaliado o cenário futuro prevendo a urbanização da área rural remanescente na bacia hidrográfica.

2 – MÉTODOS

2.1 Considerações iniciais

A chuva de projeto foi determinada a partir da equação de chuvas intensas apresentada em Moruzzi e Oliveira (2009), conforme Equação 1. Foram investigadas precipitações de 1 hora de duração para tempos de recorrência de 5, 20, 50 e 100 anos.

$$I = \frac{560,9.T^{0,141}}{(7,4 + d)^{0,65}} \quad (1)$$

onde:

I = intensidade de chuva (mm.h⁻¹)
 T = período de retorno (anos)
 d = duração da chuva (minutos)

A chuva excedente foi obtida por meio do algoritmo do Soil Conservation Service – SCS (2004) para seis intervalos de tempo de 600 s cada. As Equações 2 e 3 apresentam o algoritmo para obtenção da vazão excedente de acordo com o método proposto pelo *Soil Conservation Service* (SCS).

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (2)$$

onde: P =precipitação; S =potencial máximo de armazenamento do solo para perda inicial correspondente a 20% da capacidade de armazenamento.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

Onde: CN varia entre 0, para condutividade hidráulica infinita, e 100, para uma bacia totalmente impermeável.

O modelo do SCS foi utilizado em conjunto com os modelos de atenuação em reservatórios e propagação em canais. O método de Pulz foi utilizado para verificar o efeito dos reservatórios no hidrograma e o modelo de Muskingum-Cunge não linear para condutos fechados foi empregado para propagação da onda de cheia em canais.

A Equação 4 apresenta o modelo de propagação em reservatório empregado (Pulz). Esse modelo considera a variação de armazenamento no tempo em função das vazões de entrada e saída do reservatório. O termo da esquerda contempla as incógnitas do problema que se constituem pelo armazenamento e pela saída do reservatório no tempo t_2 .

$$\frac{S_2}{\Delta t} + 0.5.O_2 = \frac{S_1}{\Delta t} - 0.5.O_1 + 0.5.(I_1 + I_2) \quad (4)$$

Onde: I_i = vazões de entrada; O_i = vazões de saída; S_i = acumulação para $t_1 \leq i \leq t_2$.

Como existem duas incógnitas, a Equação 5 é aplicada para obtenção da vazão de saída para cada intervalo. A estimativa pode ser obtida por meio da relação cota *versus* volume para um dado reservatório e pela relação vazão *versus* cota, que depende do tipo de extravasor.

$$O_2 = f.\left(\frac{S}{\Delta t} + 0.5.O_2\right) \quad (5)$$

A Equação 6 apresenta o modelo clássico de propagação em canais utilizado (Muskingum). A principal limitação do modelo é que ele não pode ser aplicado para simulação em rios com efeitos de jusante. Nas simulações apresentadas neste trabalho, o escoamento de excesso foi propagado na rua, utilizando a versão do modelo de Muskingum-Cunge não linear adaptado especificamente para condutos fechados, que admite contribuição lateral distribuída.

$$\frac{dS}{dt} = I - O ; S = K[X.I + (1 - X).O] \quad (6)$$

Onde: I_i = vazões de entrada; O_i = vazões de saída; S_i = acumulação; K e X são denominados parâmetros de ajuste do canal, representativos do tempo de deslocamento e da influência das vazões de entrada e saída do trecho nas funções de armazenamento.

Os referidos modelos foram combinados com base na Metodologia de Modelagem Orientada a Objetos aplicada a Sistemas de Recursos Hídricos, apresentada por Viegas Filho (2000), empregando o programa computacional denominado IPHS1 apresentado em Tucci *et al.* (1989).

2.2 Área de estudo

A área de estudo refere-se à bacia hidrográfica do Córrego da Servidão, afluente do Rio Corumbataí, compondo parte do sítio urbano da cidade de Rio Claro, que está localizada no setor Centro-Leste do Estado de São Paulo.

A bacia do Córrego da Servidão caracteriza-se por topografia suave, visto que se encontra sobre os terrenos arenosos vinculados a Formação Rio Claro a qual capeia os topos subtabulares, atualmente, densamente edificados, que compõem boa parte do interflúvio entre o Rio

Corumbataí, do qual o Córrego da Servidão é afluente, e o Ribeirão Claro. Neste trabalho, avaliou-se o terreno da alta e média bacia que se encontra submetido à intensa urbanização, a qual convive com problemas frequentes de cheia. Assim, dos 18,01 km² da bacia, foram estudados 13,61 km².

A rede de drenagem do Córrego da Servidão compõe um território com área aproximada de 19,6785 km² (1.967,85 ha), com o eixo principal de fluxo na direção e sentido norte-sul. Sua forma é alongada na direção norte-sul (aproximadamente 13,5 km de extensão) e sua maior largura é de aproximadamente 2,5 km, em seu médio curso. A Figura 1 ilustra a forma, dimensão e sub-bacias desta bacia hidrográfica e a Figura 2 apresenta uma vista aérea de parte da área de estudo com destaque ao reservatório de retenção existente.

Visando analisar de forma mais detalhada a bacia, o trecho estudado foi discretizado em quatro microbacias, cujas características de área e declive são apontadas na Tabela 3 abaixo. A discretização da bacia foi realizada levando-se em consideração as ocupações, locais de interesse e obras hidráulicas.

A área apresenta um desnível altimétrico de cerca de 110 m entre seu divisor de cabeceira principal e a foz do canal do Córrego, com respectivamente 645 m e 535 m de altitude. O canal do córrego, que apresenta direção geral norte-sul, possui duas mudanças de direção, no médio curso e baixo curso, próximo à sua foz, ambas com orientação NE/SW, sugerindo controle geológico estrutural. Essa contextualização geológica e geomorfológica confere à bacia uma forma alongada fora dos padrões convencionais. Do ponto de vista hidrológico esta forma induz a um menor tempo de concentração das águas pluviais que escoam diretamente na superfície, favorecendo a ocorrência de pontos de inundação.

Em termos de contextualização geomorfológica da bacia do rio Corumbataí, um fato interessante a ser indicado, é que a calha do canal do Córrego da Servidão é altimetricamente sobrelevada em relação às calhas do rio Corumbataí e do Ribeirão Claro, que drenam ligeiramente paralelas entre si, a primeira situada a oeste e a segunda à leste do Córrego. A calha do Córrego da Servidão, em grande parte de seu percurso, situa-se altimetricamente em torno da cota 605/610 m, enquanto o Corumbataí e o Ribeirão Claro em 550 m e 570 m, respectivamente. Isto é indicativo que o canal do córrego da Servidão está em nível topográfico mais elevado que seus dois canais vizinhos, conferindo a esta bacia, pelo menos teoricamente, um maior potencial erosivo.

Do ponto de vista climático, a área de estudo situa-se em faixa zonal do tipo Cw, conforme classificação de Köppen, caracterizado por verões chuvosos e invernos mais secos.

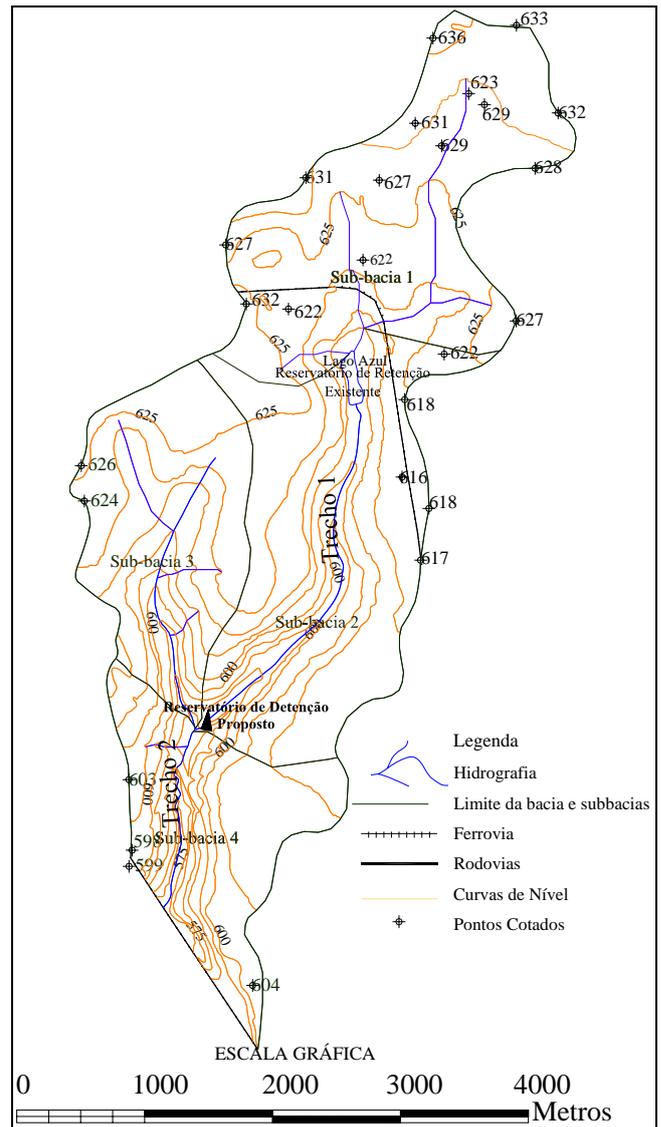


Figura 1 – Localização da Bacia do Córrego da Servidão no contexto do espaço urbano delimitada para o presente estudo.



Figura 2 – Vista aérea da Bacia do Córrego da Servidão de montante para jusante com destaque ao reservatório de retenção existente (Lago Azul).

2.2.1 Condições pedológicas

Os solos que ocorrem na bacia do Córrego da Servidão compõem-se de Latossolos Vermelho-Amarelo cujas características, analisadas nos poucos espaços não impermeabilizados da área, através de tradagens, indicam corresponder às unidades Coqueiro e Laranja Azeda, identificadas nos arredores do espaço urbano por Koffler, *et al.* (1992) e descritas por Oliveira e Prado (1984).

O Latossolo Vermelho-Amarelo – unidade Coqueiro caracteriza-se por textura média ao longo do perfil, sendo que os teores de areia são responsáveis pela sua alta friabilidade e pequena plasticidade. Já o Latossolo Vermelho-Amarelo – unidade Laranja Azeda, apesar de ainda manter o caráter de textura média ao longo do perfil, apresenta grau de argila levemente superior ao da unidade Coqueiro. Contudo, o teor de areia fina ainda caracteriza a unidade Laranja Azeda como friável (OLIVEIRA e PRADO, 1984).

Os dados apresentados por Oliveira e Prado (1984) foram utilizados para a classificação dessas unidades de acordo com os grupos hidrológicos utilizados pelo *Soil Conservation Service*, conforme a Tabela 1.

Considerando as categorias elencadas pelo referido método ponderou-se, para o presente estudo, que as unidades pedológicas que ocorrem na bacia do Córrego da Servidão enquadram-se, apesar das pequenas diferenças comentadas, no Grupo C.

Tabela 1 – Descrição dos grupos hidrológicos de solos proposta por SCS. Fonte: Tucci (1998)

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

2.3 O uso e ocupação da terra

A bacia do Córrego da Servidão constitui-se no espaço onde se iniciou o processo de urbanização de Rio Claro. Dessa forma, considerando as atividades de campo e a planta cadastral, identificaram-se os principais tipos de uso da terra. O cruzamento deste dado com o grupo hidrológico do solo (Tabela 2) foi utilizado para a entrada de dados no modelo de precipitação-vazão. Para as simulações referentes ao presente estudo foram consideradas as condições antecedentes de umidade da situação AMCII, pois correspondem a uma situação média em que a umidade do solo corresponde à capacidade de campo.

Tabela 2 – Exemplo de valores de CN em função da cobertura e do tipo hidrológico de solo (condição II de umidade) proposto por SCS. Fonte: Tucci (1998)

Tipo de uso do solo/ Tratamento/ Condições hidrológicas	Grupo Hidrológico			
	A	B	C	D
Uso Residencial, %				
Tamanho médio do lote até 500 m ²	77	85	90	92
1000 m ²	61	75	83	87
1500 m ²	57	72	81	86
Estacionamentos pavimentados, telhados	98	98	98	98
Ruas e estradas:				
Pavimentadas, com guias e drenagem	98	98	98	98
com cascalho	76	85	89	91
de terra	72	82	87	89
Áreas comerciais (85% de impermeabilização)	89	92	94	95
Distritos industriais (72% impermeável)	81	88	91	93
Espaços abertos, parques, jardins:				
boas condições, cobertura grama > 75%	39	61	74	80
condições médias, cobertura grama > 50%	49	69	79	84

2.4 Etapas de simulação e descrição dos elementos

As simulações realizadas seguiram a seqüência representada pelas Etapas:

- simulação da situação atual, considerando o efeito do reservatório de retenção existente (Lago Azul);
- simulação do efeito isolado do reservatório de detenção virtual;
- simulação do cenário contemplando ações virtuais combinadas, constituídas de: c.1) aumento da capacidade de reservação do Lago Azul (reservatório de retenção) ao invés de liberar maior vazão por meio de estruturas de saída, o que causaria o incremento da vazão de excessos observada no Trecho 2 do Córrego da Servidão; c.2) aumento da capacidade de escoamento do Trecho 2, aumentando a velocidade do escoamento por meio da retirada do material depositado no fundo do canal e, por fim; c.3) aumento da vazão das estruturas de saída do reservatório de detenção (Wenzel) visando minimizar o transbordamento do reservatório.

A sub-bacia 1 apresenta contribuição concentrada no reservatório de retenção existente, denominado Lago Azul. O córrego da Servidão foi dividido em dois trechos (1 e 2)

consecutivos. O trecho de água (Trecho 1) que liga o reservatório de retenção ao reservatório de detenção possui uma bacia conectada com contribuição distribuída. Ao reservatório de detenção liga-se de forma concentrada a sub-bacia denominada Wenzel. Finalmente, ao trecho de água 2, que liga o reservatório de detenção a seção de interesse, foi conectada a sub-bacia 4 de forma distribuída. Os trechos simulados são canalizados e fechados, com seção transversal constante.

A Figura 3 apresenta a subdivisão da bacia analisada.

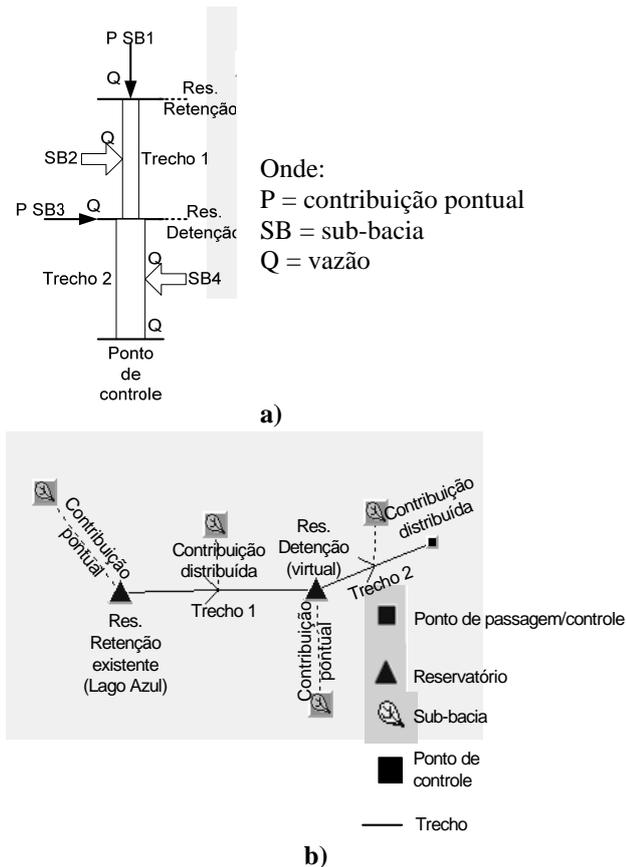


Figura 3 – a) Discretização e b) subdivisão dos módulos utilizados no programa computacional IPHS1 para representação das sub-bacias que compõem a bacia do Córrego da Servidão.

A Tabela 3 apresenta as características das sub-bacias pertencentes à bacia do Córrego da Servidão.

O declive do terreno foi reconhecido a partir da média da declividade calculada em perfis transversais estabelecidos, de acordo com a variação da equidistância das curvas de nível sobre a planta topográfica da área. Já o declive do canal foi calculado a partir do comprimento e das altitudes relativas entre nascente e foz destes.

O reservatório de retenção possui área em planta aproximada de 400 m x 80 m com crista do vertedor de saída localizada a 0,5 m acima do nível do espelho de água e com 2 m de comprimento de soleira. A cota máxima do reservatório localiza-se a 2 m do espelho de água. Uma comporta de fundo de 1m² foi posicionada para auxiliar a extravazão do sistema.

O canal do trecho 1 do córrego da Servidão possui 3626 m de comprimento com 25 m de desnível, área

transversal retangular de 3 m de altura por 4 m de largura com coeficiente de Manning (n) de 0,03 para todo trecho, correspondente a canais dragados em condições regulares, de acordo com Porto (1998). Os excessos foram propagados superficialmente na rua na qual foi adotada n de 0,013, considerando superfície de argamassa de cimento para as sarjetas, de acordo com Porto (1998).

Tabela 3 – Principais características das sub-bacias que compõem o trecho estudado da bacia do Córrego da Servidão

Sub-bacia	Área (km ²)	Declive do Terreno (%)	Declive do Canal (%)	Uso e Ocupação	
1	4,22	0,89	0,79	16,35%	Distrito Industrial.
				4,02%	Espaços abertos (condições médias)
				79,63%	Uso residencial (até 500 m ²)
2	4,33	1,27	0,68	2,5 %	Distrito Industrial.
				3,23 %	Espaços abertos (condições médias)
				94,27 %	Uso residencial (até 500 m ²)
3	2,72	1,58	1,5	5,5 %	Distrito Industrial.
				7,72 %	Espaços abertos (condições médias)
				86,78 %	Uso residencial (até 500 m ²)
4	2,34	2,46	0,66	24 %	Terreno para plantio.
				2,99 %	Espaços abertos (condições médias)
				73,01 %	Uso residencial (até 500 m ²)

O reservatório de detenção (ação virtual objeto da avaliação) foi simulado na confluência dos córregos Wenzel e da Servidão, o qual possui área em planta de 200 m de comprimento por 200 m de largura por 3 m de altura correspondendo a, aproximadamente, 1,5% da área da sub-bacia. As estruturas de saída foram compostas por: i) um vertedor de 3 m de largura com cota da crista em 1,5 m e valor do coeficiente da fórmula prática de 1,84, correspondentes a $(2/3xCdx(2g)^{1/2}$, conforme Porto (1998) onde Cd é o valor do coeficiente de descarga e g é o valor da aceleração da gravidade e, ii) por dois orifícios de fundo 0,64 m² cada, considerando uma face, correspondente ao perímetro de fundo, em que há supressão da contração do jato. Evidentemente, os coeficientes de vazão adotados incorporam as hipóteses simplificadoras de velocidade de

montante uniforme, pressão atmosférica na lâmina vertente, que os efeitos oriundos da viscosidade, tensão superficial, turbulência e escoamentos secundários possam ser desprezados e que o escoamento possa ser tratado como bidimensional, conforme observado por Porto (1998).

Para tempos de recorrência superiores a 5 anos, foi previsto operações de manobra por meio da abertura de mais 2 orifícios de 0,64 m²/cada e uma comporta do tipo stop-log para rebaixar em 0,7 m a cota da crista do vertedor.

O canal do trecho 2 possui 1514 m de comprimento com 10 m de desnível, área de seção transversal igual ao trecho 1 e n de 0,04, considerado devido ao acúmulo de sedimentos transportados para o referido trecho. Da mesma forma que no trecho 1, os excessos foram propagados superficialmente na rua para o valor de n de 0,013.

As análises do amortecimento do reservatório (*flood routing*) foram feitas por meio de método iterativo, conforme proposto em Canholi (2005) e ilustrado no diagrama da Figura 4.

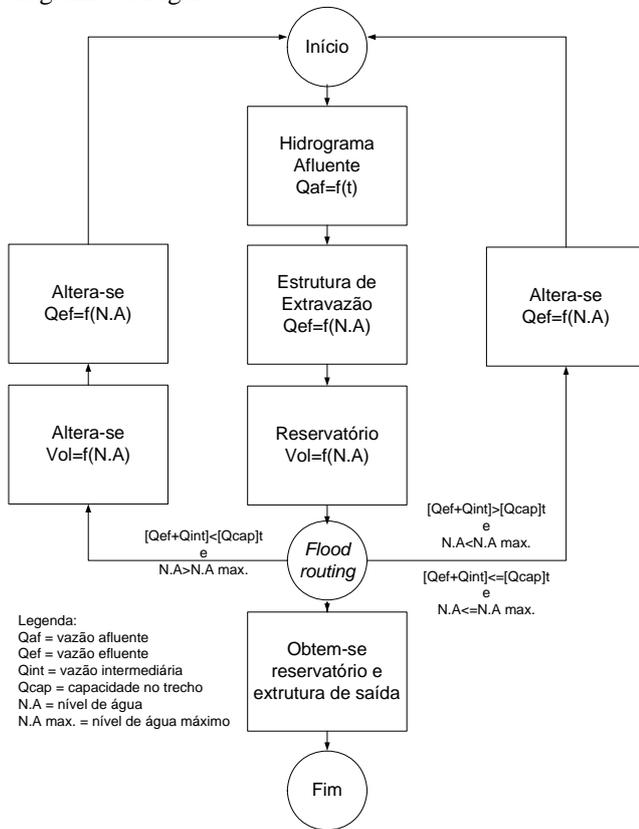


Figura 4 – Diagrama ilustrativo do processo iterativo utilizado para definição do volume do reservatório, conforme proposto por Canholi (2005).

3 – RESULTADOS

Para todas as sub-bacias, referenciadas na Tabela 3, o valor do CN ponderado obteve valores em torno de 89. Tal fato deveu-se ao elevado percentual de uso residencial (>73% em todas as sub-bacias) com lotes inferiores a 500m².

Considerando as etapas e descrições apresentadas no item 2.4, seguem os resultados referentes à avaliação da situação atual (Etapa 1). Salienta-se que cada intervalo de

tempo corresponde a 600 s, ou seja, o intervalo de 5 no eixo da abscissa corresponde a 50 minutos.

O efeito do reservatório de retenção (Lago Azul) na amortização do hidrograma de entrada proveniente da sub-bacia 1 para diferentes períodos de recorrência, pode ser observado na Figura 5(a). Nessa, são apresentados o hidrograma de entrada (à esquerda) e o de saída do reservatório de retenção existente (à direita), para cada período de retorno. Os hidrogramas apresentam atenuações da ordem de 2,5 vezes para as vazões máximas, entretanto nota-se pela análise da Figura 5(b), que nessas condições o nível de água supera a cota máxima do reservatório (2 m a partir do espelho de água) causando inundação da área adjacente, fato corriqueiramente observado nas proximidades do reservatório, e amplamente noticiado pela imprensa local.

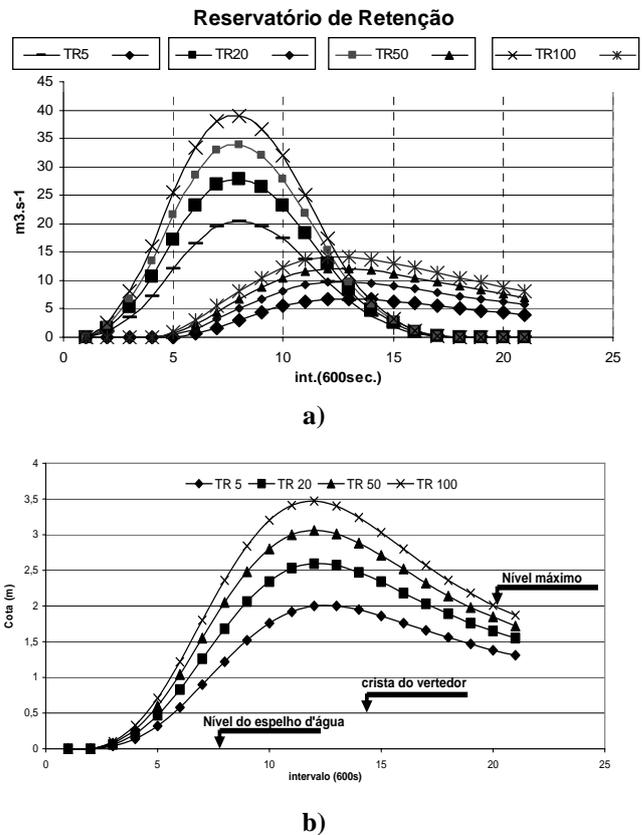
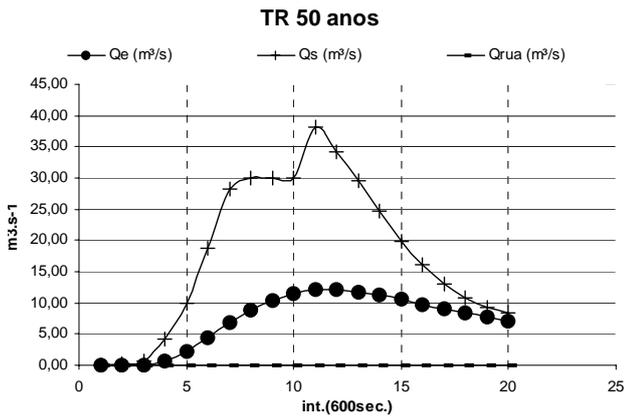
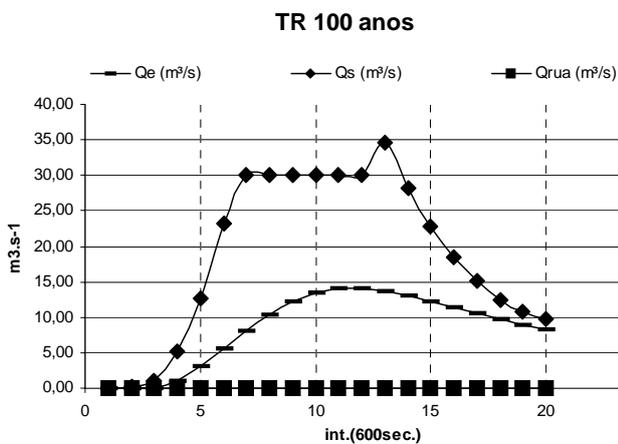


Figura 5 – a) Efeito do reservatório de retenção (Lago Azul) nos hidrogramas de cheias para tempos de recorrência de 5, 20, 50 e 100 anos; b) Cota do reservatório de retenção (Lago Azul) para diferentes tempos de recorrência. 600 s por intervalo.

O efeito da vazão propagada a partir do reservatório de retenção existente (lago Azul) no trecho 1 do canal (Córrego da Servidão) pode ser visualizado na Figura 6 para os tempos de recorrência de 50 e 100 anos, respectivamente. As vazões são representadas por: Q_e = vazão de entrada; Q_s = vazão de saída, e; Q_{rua} = vazão de excessos propagada na rua. 600 s por intervalo.



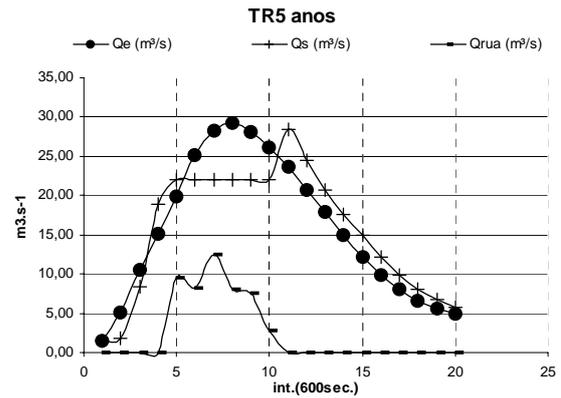
a)



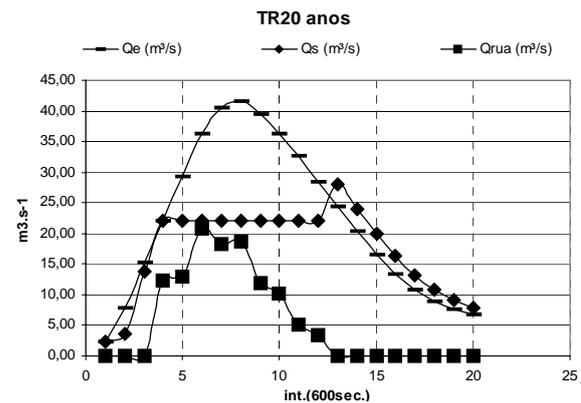
b)

Figura 6 – a) Efeito da vazão propagada a partir do reservatório de retenção para o trecho 1 do Córrego da Servidão para o período de retorno de 50 anos; b) Efeito da vazão propagada a partir do reservatório de retenção para o trecho 1 do Córrego da Servidão para o período de retorno de 100 anos. Q_e = vazão de entrada; Q_s = vazão de saída, e; Q_{rua} = vazão de excessos propagada na rua. 600 s por intervalo.

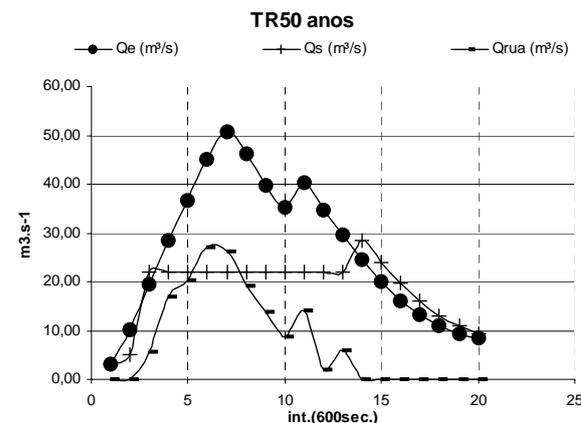
Observa-se que, mesmo para os maiores valores de período de retorno investigados (TR de 100 anos), o trecho 1 não apresenta problemas de cheias. O mesmo não foi observado para o trecho 2 do Córrego da Servidão, que recebe contribuição da bacia do Wenzel. Verifica-se, na Figura 7, que a ocorrência de cheias ocorre mesmo para o tempo de recorrência de 5 anos e, evidentemente, se agrava para períodos de retorno superiores.



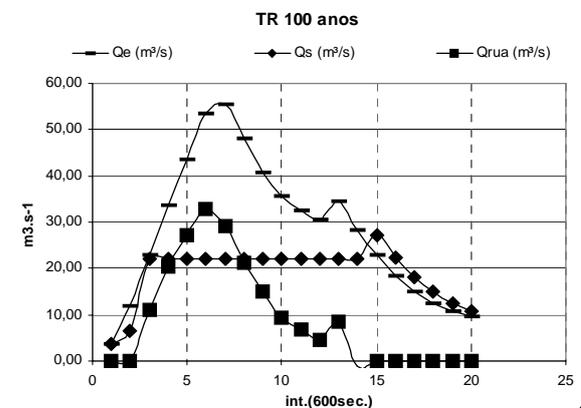
a)



b)



c)



d)

Figura 7 – Propagação das cheias para diferentes períodos de recorrência no trecho 2 do Córrego da Servidão: a) 5 anos; b) 20 anos; c) 50 anos e, d) 100 anos. Q_e = vazão de entrada; Q_s = vazão de saída, e; Q_{rua} = vazão de excessos propagada na rua. 600 s por intervalo.

Diante do problema detectado pela simulação (e confirmado pelos registros conforme descrito em Moruzzi et al., 2007) e considerando a elevada urbanização da bacia, optou-se pelas ações virtuais de intervenção na calha, visando aceleração do escoamento do canal no trecho 2 do Córrego da Servidão (jusante da sub-bacia 3) e pela detenção em reservatório (objeto de simulação) localizado na sub-bacia 3 (Wenzel). Antes, porém, foi verificado o efeito do reservatório de detenção isoladamente (Etapa 2), visando minimizar a propagação das cheias (Figura 8). O efeito do reservatório de detenção, locado na sub-bacia 3 (Wenzel), no hidrograma de cheias do trecho 2 antes (SR – sem reservatório) e depois (CR – com reservatório) da introdução do reservatório pode ser observado na Figura 8-a.

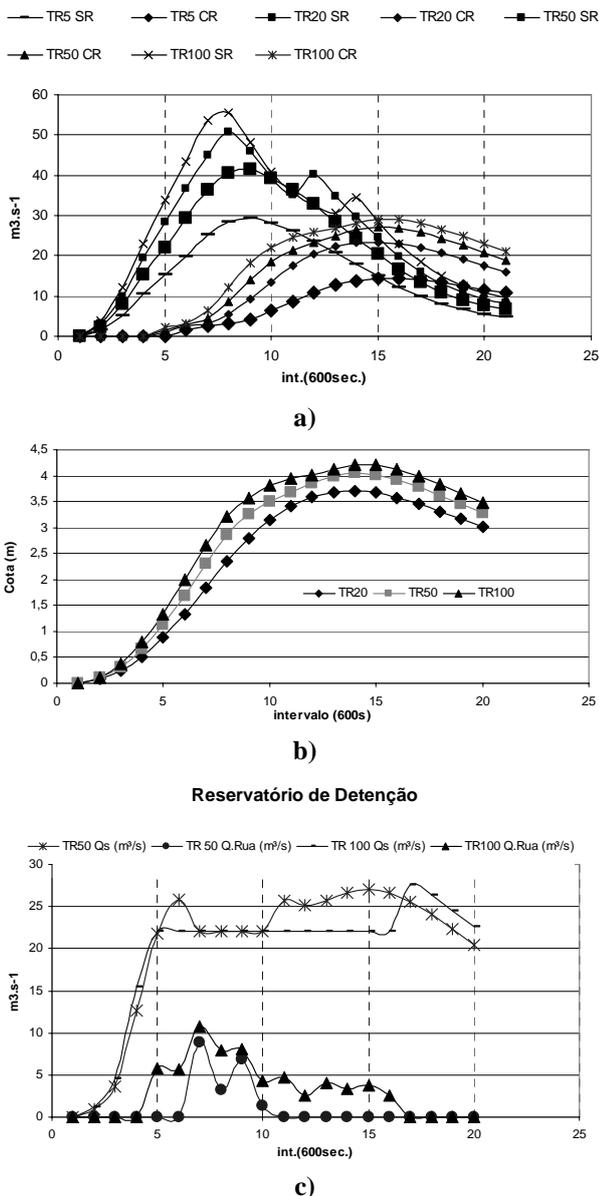


Figura 8 – a) Hidrogramas de cheias antes (SR) e depois do reservatório de detenção (CR) para diferentes períodos de recorrência no trecho 2 do Córrego da Servidão, b) Cotas máximas do reservatório de detenção virtual, c) Propagação da vazão efluente ao reservatório de detenção no trecho 2. Q_e = vazão de entrada; Q_s = vazão de saída, e; Q_{Rua} = vazão de excessos propagada na rua. 600 s por intervalo.

Para as mesmas condições simuladas e apresentadas na Figura 8-a (vertedor com 1,5 m de altura da crista em relação ao fundo do reservatório e dois orifícios de $0,64 m^2$), observou-se que a cota máxima ultrapassou o valor máximo estabelecido (3 m) para o reservatório para TR superiores a 20 anos, obtendo-se cotas máximas de 3,71 m, 4,05 m e 4,22 m para valores de TR de 20, 50 e 100 anos, respectivamente (Figura 8-b). Ademais, a partir da simulação para valores de tempo de recorrência superiores a 50 anos, observou-se que o trecho 2 do Córrego da Servidão apresentava vazão de excessos propagadas na rua (Figura 8-c).

A partir dos resultados das simulações que resultaram no diagnóstico da situação atual (Etapa 1), bem como na verificação do efeito isolado do reservatório de detenção na bacia do Wenzel (Etapa 2), foi simulado o cenário contemplando ações virtuais combinadas (Etapa 3).

As simulações referentes ao incremento das estruturas de saída do reservatório de retenção (Lago Azul) não foram apresentadas, entretanto os resultados obtidos demonstraram que o incremento das descargas nas estruturas de saída, caracterizadas pela alteração da comporta de fundo de $0,6 \times 0,6 m$ para $2 \times 0,5 m$ (comprimento x altura), não foi suficiente para eliminar o problema local das cheias nos arredores do Lago Azul, pois as cotas máximas (de 3,47 m para 3,23 m) situavam-se ainda acima do limite. Estes resultados explicam a adoção da ação virtual, referente ao aumento da capacidade de reservação do reservatório de retenção (Etapa 3.1).

Paralelamente ao aumento da capacidade de reservação do reservatório de retenção existente (Lago Azul), foram simuladas as condições referentes à outra ação virtual (Etapa 3.2), referente à intervenção na calha do trecho 2, a jusante do reservatório de detenção. Foi investigada a recuperação do canal (n de 0,04, com bancos de sedimentos, para n de 0,02, com alvenaria de pedra argamassa) bem como a manobra de comportas de fundo e de uma comporta do tipo stop-log, localizada na crista do vertedor de saída. A última ação virtual combinada (Etapa 3.3) foi simulada considerando as estruturas de saída e manobras descritas no método. Os resultados são apresentados nas Figuras 9 e 10.

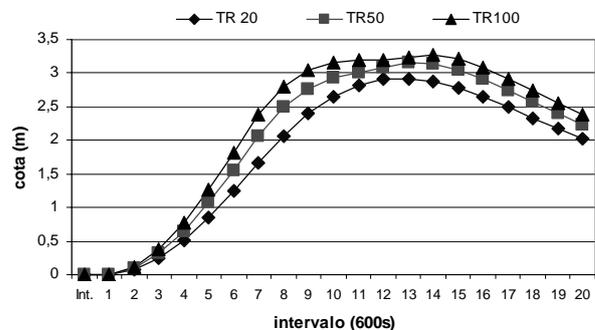


Figura 9 – Cotas do reservatório de detenção para os tempos de recorrência de 20, 50 e 100 anos com estruturas de saída compostas de quatro comportas de fundo de $0,64 m^2$ cada e comporta do tipo stop-log para rebaixamento da crista do vertedor a 0,8 m do fundo do canal. 600 s por intervalo.

Verifica-se, na Figura 9, que os valores de cota ultrapassam em 16 e 27 cm a cota máxima do reservatório para os valores de TR de 50 e 100 anos, respectivamente, sendo admitidas preliminarmente como valores toleráveis. Para as condições apresentadas na Figura 9 foram construídos os hidrogramas apresentados na Figura 10.

Verifica-se, pelos hidrogramas, que não existe vazão de excesso propagada na rua para os diferentes valores de períodos de retorno investigados, sugerindo que a adoção do reservatório com as referidas previsões de manobra das estruturas de saída somada a melhoria das condições do escoamento do canal foram suficientes para minimizar os efeitos das cheias na bacia do Córrego da Servidão.

Finalmente, e considerando as ações virtuais combinadas, foi feito um prognóstico para o cenário futuro no qual se considerou a ocupação da área de 24% da sub-bacia 4. Assim, conservaram-se todos os dados de entrada referentes às simulações anteriores com exceção da substituição da área de plantio por área urbanizada com lotes inferiores a 500 m², seguindo o mesmo padrão de ocupação das demais áreas da bacia investigada. Salienta-se que as simulações referentes ao cenário futuro contemplaram a estratégia referente às ações virtuais combinadas, referentes à Etapa 3.

Verificou-se que o incremento da vazão frente à ocupação da área para plantio por área residencial com lotes inferiores a 500 m², não foi significativo na vazão de pico (de 41,54 para 42,04 m³.s⁻¹ para TR100) e tampouco resultou em vazão de excessos (Figura 11). Tal fato deve-se ao processo consolidado da ocupação da bacia do Córrego da Servidão, objeto das ações virtuais investigadas.

Evidentemente, os resultados apresentados nesse trabalho constituem uma primeira avaliação sujeita às hipóteses simplificadoras dos modelos hidrológicos, aos dados coletados e ao ajuste dos parâmetros entre outras. Todavia, acredita-se que os resultados das simulações podem nortear a ação corretiva na bacia do Córrego Servidão, com ênfase em ações estruturais combinadas, visando minimizar a ocorrência das cheias há tempos noticiadas pela imprensa local e que muito atormenta a população da cidade de Rio Claro, SP.

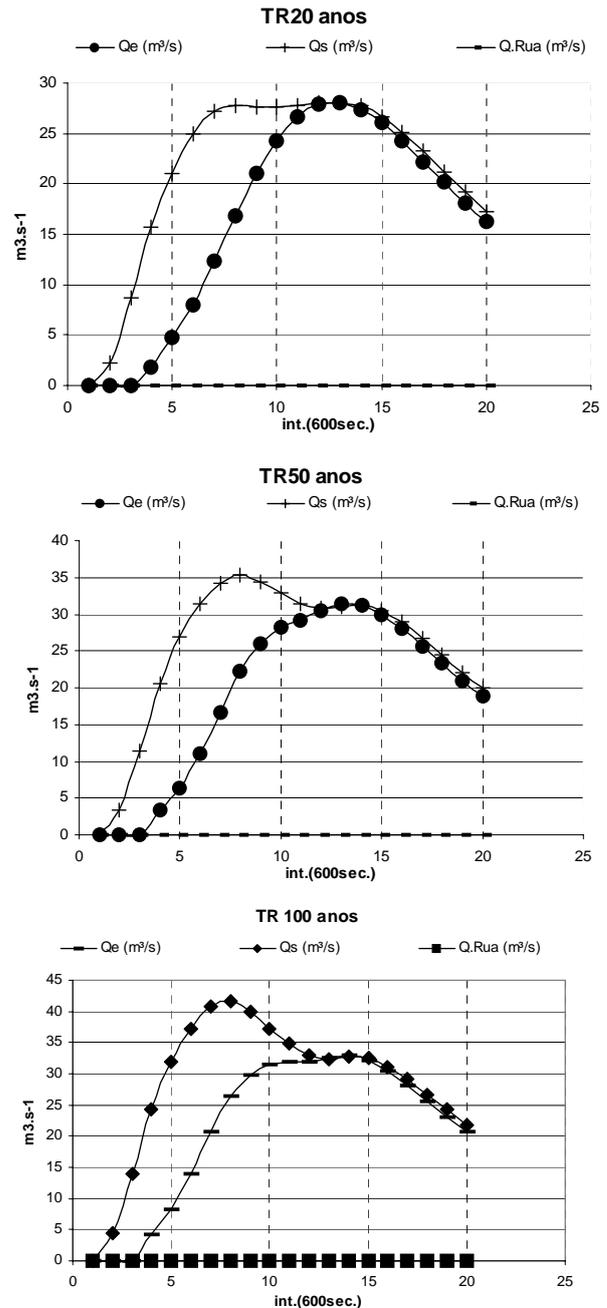


Figura 10 – Hidrogramas de cheias no trecho 2 do Córrego da Servidão para diferentes períodos de recorrência considerando o reservatório de retenção com estruturas de saída compostas de quatro comportas de fundo de 0,64 m² cada e comporta do tipo *stop-log* para rebaixamento da crista do vertedor a 0,8 m do fundo do canal e melhoria de escoamento do canal (n de 0,04 para 0,02). Q_e = vazão de entrada; Q_s = vazão de saída, e; Q_{Rua} = vazão de excessos propagada na rua. 600 s por intervalo.

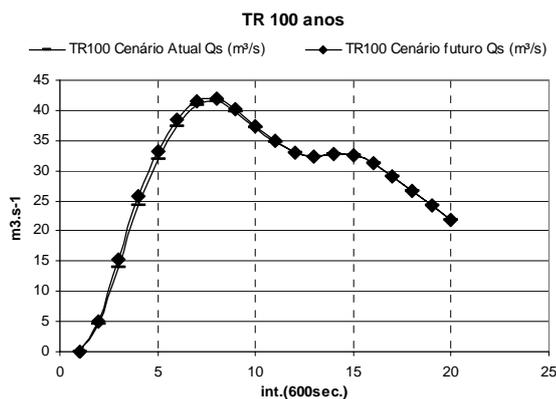


Figura 11 – Hidrogramas de cheias no trecho 2 do Córrego da Servidão para o período de recorrência 100 anos considerando o cenário futuro com substituição da área de plantio de 24%, disponível na sub-bacia 4, por área urbanizada com lotes inferiores a 500 m² e demais alterações combinadas nos reservatórios de retenção, de detenção e canal. Q_e = vazão de entrada; Q_s = vazão de saída, e; Q_{rua} = vazão de excessos propagada na rua. 600 s por intervalo.

4 – CONCLUSÕES

O diagnóstico da situação atual, considerando o reservatório de retenção existente, apontou para problemas de enchente nas redondezas do reservatório bem como no trecho 2 do canal.

Verificou-se que a adoção do reservatório de detenção isoladamente não foi suficiente para solucionar o problema da enchente no trecho 2 do Córrego da Servidão, incorrendo inclusive no agravamento do problema no local da implantação.

A integração de medidas estruturais virtuais combinadas, referentes ao incremento da capacidade do reservatório de retenção existente, o aumento da capacidade de escoamento do trecho 2 do Córrego da Servidão somada a amortização do reservatório de detenção do Wenzel, contemplando as estruturas de extravazão propostas, foi suficiente para eliminar as inundações naquela região para todos os tempos de recorrência considerados.

O prognóstico para ocupação das áreas disponíveis para plantio por áreas urbanizadas com lotes inferiores a 500m², permitiu verificar pouco incremento da vazão de pico de enchente (de 41,54 para 42,04 m³.s⁻¹ para TR100) devido à alta urbanização da área investigada.

Sugere-se, em trabalhos futuros, o aprimoramento da análise por meio da estimativa de custos de implantação do reservatório de retenção para diferentes volumes.

REFERÊNCIAS

- CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. 301 p.
- KOFFLER, N.F., MACHADO, M.L.A, DAROS, E. **Solos da Bacia do Rio Corumbataí**. Rio Claro: Departamento de Cartografia e Análise da Informação Geográfica/Instituto de Geociências e Ciências Exatas/Universidade Estadual Paulista. Escala: 1:50.000 (mapa). 1992.
- MORUZZI, R.B., PINTO, S. Dos A. F., ROSSETTI, L. A. F. G., PEREIRA, L.H., BERMUDEZ, M., BARBOSA, C. “Contribuição Metodológica para a Caracterização de Áreas Potenciais de Inundação em uma Bacia Hidrográfica Urbanizada, com o Suporte das Técnicas de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento: apresentação de dois cenários em um módulo piloto”... **Anais in: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, São Paulo, nov. 2007.
- MORUZZI, R.B.; LUPINACCI, C.M da C. “Reservoir Analysis For Storm Runoff Control In Urban Watershed: An Initial Study Approach”...**Anais in: DINCON'09 - 8th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications** realized at Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho" – Unesp, in Bauru city, May, 2009.
- OLIVEIRA, H.B. de; PRADO, H. **Levantamento Pedológico Semidetalhado do Estado de São Paulo: Quadrícula de São Carlos. II Memorial Descritivo**. Instituto Agrônomo de Campinas, 138 p. 1984
- PORTO, R.M. **Hidráulica Básica**. São Carlos: REENGE EESC/USP, 1998. 540 p.
- SOIL CONSERVATION SERVICE. National Engineering Handbook, Chapter 10. **Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall** U.S. Department of Agriculture, Washington, DC. July, 2004.
- TUCCI, C. E. M.; ZAMANILLO, E. A.; PASINATO H. D. **Sistema de Simulação Precipitação Vazão IPHS1**. IPH-UFRGS, Porto Alegre, 66 p. 1989
- TUCCI, C. E. Modelos Hidrológicos. Porto Alegre. Ed. UFRGS: **Associação Brasileira de Recursos Hídricos**, 1998. 669 p.
- VIEGAS FILHO, João Soares; LANNA, A. E. L.; MACHADO, A. A. “A Modelagem Orientada a Objetos Aplicada a Sistemas de Apoio à Decisão em Recursos Hídricos”...**Anais in: XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, p. 50-60. 1999.