

APLICAÇÃO DE MÉTODOS HIDROLÓGICOS PARA AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES ATUAIS E FUTURAS DO SISTEMA DE MACRODRENAGEM DA CIDADE DE SÃO CARLOS – SP

Andrea Monteiro Lira¹ & Rodrigo de Melo Porto²

Resumo – Devido às consequências, cada vez mais freqüentes, provocadas pelas enchentes ao longo da história da cidade de São Carlos – SP, e em consideração a pouca atenção dedicada à drenagem, houve grande interesse em analisar as áreas mais afetadas deste município, devido à urbanização e inadequada ocupação da mesma, que tem causado diversos impactos no meio ambiente, pois as inundações atingem a população de forma intensa e provoca prejuízos sociais e econômicos. Em consideração a todas estas questões, este trabalho visa contribuir na avaliação das condições atuais e futuras da urbanização e seu impacto nos hidrogramas de cheias em várias seções da área urbana, com a utilização do modelo EESC, através de três metodologias estabelecidas para determinar os hidrogramas de cheias.

Abstract – Due to the consequences, more and more frequent, provoked by the inundations along the history of the city of São Carlos - SP, and in consideration the little attention dedicated to the drainage, there was great interest in analyzing the most affected areas of this municipal district, due to the urbanization and inadequate occupation of the same, that has been causing several impacts in the environment, because the floods reach the population in an intense way and it provokes social and economical damages. In consideration the all these subjects, this work seeks to contribute in the evaluation of the current and future conditions of the urbanization and your impact in the hidrogramas of floods in several sections of the urban area, with the use of the model EESC, through three established methodologies to determine the hydrographs of floods.

Palavras-chave - controle de enchentes; drenagem urbana; urbanização.

¹ Eng. Civil, Mestranda PPG-SHS/EESC/USP, Cx. P. 359, São Carlos-SP, CEP 13566-590, Tel (0xx16) 273.9553, Fax (0xx16) 273.8269, e-mail: andrea_mlira@yahoo.com.br

² Eng. Civil, Prof. Assoc., Departamento de Hidráulica e Saneamento, EESC/USP, Cx. P. 359, São Carlos – SP, CEP 13566-590, Tel (0xx16) 273.9534, Fax (0xx16) 273.8269, e-mail: rodrigo@sc.usp.br

INTRODUÇÃO

Os municípios brasileiros apresentaram, ao longo dos anos, um crescimento significativo da população urbana que intensificou as alterações e transformações do uso e ocupação do espaço e os efeitos gerados pela urbanização fazem-se sentir sobre todo o aparelhamento urbano relativo a recursos hídricos: abastecimento de água, transporte e tratamento de esgotos sanitários e drenagem pluvial que, por sua vez, causam marcas permanentes nos processos de infiltração e drenagem de áreas urbanizadas.

As cidades brasileiras despreparadas, do ponto de vista, da oferta adequada de infra-estruturas urbanas, de moradia e, até mesmo de empregos, estão enfrentando sérios problemas com inundações esporádicas em suas malhas urbanas, que causa os mais variados prejuízos, desde vidas humanas até destruições de infra-estruturas urbanas.

Assim, como a falta de planejamento na área urbana é intensa no País, torna-se fundamental a existência de sistemas de drenagem urbana que funcionem de maneira eficiente, para garantir o escoamento das massas líquidas, a segurança e o bem-estar da população, pois a implantação de uma política de intervenção de controle de inundações, de caráter não-estrutural, como planejamento e disciplinamento do uso do solo nas áreas inundáveis e de encostas, e medidas de retenção e detenção do escoamento superficial, são necessárias para o processo de redução de inundações urbanas.

Neste estudo, as técnicas hidrológicas de drenagem urbana aplicam-se a bacias hidrográficas de pequeno porte e por não dispor de séries históricas de registros de vazões urbanas, que possam ser utilizadas neste projeto de macrodrenagem, mas apenas dados de precipitação, mesmo assim com reduzido número de postos, não foi possível levantar diretamente o hidrograma unitário representativo da bacia, sendo necessário o uso da técnica do hidrograma unitário sintético, para determinação dos hidrogramas de projeto.

O hidrograma unitário de uma bacia é a representação da resposta dela a um estímulo chuvoso, e resulta dos diversos processos elementares de armazenamento e trânsito do escoamento superficial. Aceitando-se que o Hidrograma unitário é uma característica invariante de cada bacia, então seus parâmetros como vazão de pico, tempo de ascensão e outros, dependem de como se processa o escoamento superficial e, portanto das características geomorfológicas da bacia.

Conceitualmente os hidrogramas unitários sintéticos são classificados como empíricos e conceituais. Os primeiros não dependem de qualquer curva teórica a que tenham de obedecer e consideram apenas os parâmetros fundamentais que os definem, e a correlação é determinada a partir das características da bacia. Neste caso, se pode citar os hidrogramas de Snyder, regionalização de Diaz e Tucci, Triangular do *Soil Conservation Service*, entre outros. Já os hidrogramas conceituais devem obedecer a um certo tipo de curva, que se admite representar

conceitualmente o fenômeno físico de transformação chuva-vazão. Entre eles estão os hidrogramas de Nash e Gray.

Diante disso, este trabalho busca traçar algumas diretrizes para o gerenciamento dos sistemas de macrodrenagem urbana da cidade de São Carlos, e será analisada a importância da determinação de parâmetros e da análise da metodologia a ser estudada na solução dos problemas de drenagem urbana nos centros urbanos. Para atingir os objetivos será feita uma aplicação através de três metodologias simples, hidrograma de Nash, hidrograma triangular do SCS e hidrograma de regionalização de Diaz e Tucci, na busca de minimização de problemas em pontos críticos da cidade de São Carlos.

Os dados levantados foram introduzidos no modelo EESC que através das três metodologias, os hidrogramas calculados foram analisados e comparados entre si, e logo em seguida foi feita uma comparação entre eles e o hidrograma observado, para dar maior confiabilidade ao método escolhido. Através da aplicação do modelo se determinou vazão de cheia para cenário atuais e futuros.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos propostos, inicialmente atualizou-se o Modelo EESC, para reavaliar a influência do grau de impermeabilização das bacias dos Córregos do Gregório, Tijuco Preto e Mineirinho, e do Rio Monjolinho. Além disso, foi feita uma nova discretização do conjunto de sub-bacias para uso deste modelo com alterações no código do programa, para inserir dois outros métodos de cálculo do hidrograma de cheia, o método de NASH (1960) e o método de regionalização de DIAZ e TUCCI (1989).

A rede de macrodrenagem de São Carlos foi modificada e com a discretização realizada, o número de sub-bacias aumentou e conseqüentemente o número de trechos. Devido à nova discretização, a alteração feita nos arquivos de dados do modelo EESC necessitou do levantamento das seções transversais de alguns córregos, para a determinação dos coeficientes α e β do método da onda cinemática.

Os dois métodos implantados, que fizeram criar dois novos programas e o método do *Soil Conservation Service* (SCS), já presente na versão atual do modelo EESC, foram utilizados para um estudo de comparação e avaliação entre os três hidrogramas de cheia obtidos a partir dos três métodos utilizados, através do modelo EESC.

Foram feitos ainda estudos comparativos e avaliações entre os hidrogramas de cheia simulados para algumas bacias de interesse apresentadas na rede de macrodrenagem de São Carlos, em relação às condições de inundações em que a cidade de São Carlos apresenta no decorrer de

longos anos. Para isso, foram feitas simulações do comportamento hidrológico para uma seção de cada bacia nas condições atuais em que o modelo se encontra e futuras.

A comparação entre os três modelos foi feita a partir de determinadas situações, que se mantiveram inalteradas, de modo que os resultados pudessem ser cotejados. As sub-bacias escolhidas foram analisadas nas seguintes condições:

a) Equação intensidade-frequência-duração utilizada para a cidade de São Carlos, BARBASSA (1991).

$$i = \frac{1519Tr^{0,236}}{(t+16)^{0,935}}$$

onde i – intensidade em mm/h; Tr – período de retorno em anos; t – tempo de duração da chuva em minutos.

b) A distribuição temporal local da chuva, para um determinado período de retorno, foi feita aplicando-se um método de blocos alternados, que rearranjou os incrementos de chuva, de duração D, na forma, P₆, P₃, P₁, P₂, P₄, P₅, P₇, P₈, etc. O hietograma de chuva efetiva foi gerado pelos métodos do SCS, Nash e o de regionalização de Diaz e Tucci, através da especificação do número de deflúvio (N), para cada sub-bacia, e cujo escoamento superficial direto é dado por:

$$Re = \frac{(R - 5080 / N + 50,8)^2}{(R + 20320 / N - 203,2)}$$

onde Re – excesso de chuva em milímetro; R – precipitação em milímetros; N – número de deflúvio que define o complexo hidrológico solo-vegetação.

c) O tempo de concentração das sub-bacias foi determinado pela expressão de George Ribeiro, RIBEIRO (1961).

$$tc = \frac{16L}{(1,05 - 0,2p)(100I)^{0,04}}$$

onde tc – tempo de concentração, em minutos; L – comprimento do talvegue, em Km; p – a relação entre a área coberta de vegetação e a área total da sub-bacia; I – declividade média do talvegue.

Métodos utilizados

Foram comparados dois hidrogramas unitários conceituais, Diaz e Tucci e Nash e um empírico, o triangular do SCS.

O método do SCS escolhido nesse estudo por sua simplicidade, praticidade e familiaridade entre os profissionais da área, esse método foi desenvolvido para pequenas bacias rurais e eventos chuvosos diários, mas tem sido adaptado para as condições urbanas, pelo estabelecimento de valores do parâmetro “número de deflúvio”, para bacias urbanas e suburbanas, LINDLEY (1976).

O Serviço de Conservação de Solo dos EUA desenvolveu esta metodologia visando uma aplicação prática e segura, para regiões onde não se disponha de dados históricos de vazão. A partir de dados topográficos e geomorfológicos disponíveis da região em estudo, este hidrograma unitário sintético é representado por um triângulo, através de relações entre o tempo de pico, a vazão de pico e o tempo de base.

O hidrograma unitário instantâneo do método de Nash é apresentado por, NASH (1960):

$$u(t) = \frac{1}{K\Gamma(n)} e^{-t/K} \left(\frac{t}{K}\right)^{n-1}$$

A equação seguinte representa a “curva-S”: $S(t) = \int_0^t u(t)dt$

$$\text{portanto: } S(t) = \frac{1}{\Gamma(n)} \int_0^{t/K} e^{-t/K} \left(\frac{t}{K}\right)^{n-1} d\left(\frac{t}{K}\right) \rightarrow S(t) = I(n, t/K)$$

onde, $I(n, t/k)$ é a função Gama incompleta de ordem n para t/k .

O Hidrograma Unitário de duração T é dado por:

$$u(T, t) = \frac{1}{T} [s(t) - s(t - T)]$$

$$u(T, t) = \frac{1}{T} [I(n, t/K) - I(n, (t - T)/K)]$$

onde esta é a equação geral do hidrograma unitário de duração T .

GRANDSHTEIN e RYZHIK (1965) aproximaram a Função Gama incompleta pelo somatório a seguir:

$$I(n, t/K) = \frac{1}{\Gamma(n)} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i (t/K)^{n+1}}{i!(n+i)}$$

De acordo com PORTO e RIGUETTO (1995), com base em NASH (1960), os parâmetros da distribuição n , k estão relacionados com as características fisiográficas da bacia, como segue:

$$n = \frac{L^{0.1}}{0.43}$$

$$K = \frac{8.921A^{0.3}}{(S^{0.3}L^{0.1})}$$

onde, L – é o comprimento do curso d’água principal, em Km; A – a área da bacia, em Km²; S – a declividade média do talvegue (1/10.000), em m/m.

DIAZ e TUCCI (1989) realizaram um estudo com dados de dezenove bacias urbanas e sub-urbanas brasileiras, através do Hidrograma de Projeto para um certo período de retorno, pois uma das dificuldades no estudo de bacias urbanas é a determinação desse hidrograma, devido à falta de dados históricos. Ele utilizou a técnica do hidrograma unitário para bacias urbanas, visando uma melhor estimativa, com características de ocupação de cidades brasileiras, que estabeleceu a regionalização dos parâmetros que caracterizam o Hidrograma Unitário (HU).

Com os dados das dezenove bacias, estabeleceu regressões dos parâmetros que definem a forma do HU, com algumas características físicas das bacias.

A metodologia de regionalização do HU consiste nas seguintes etapas:

- Seleção dos eventos;
- Separação dos escoamentos;
- Determinação do HU para cada evento;
- Determinação do hidrograma unitário médio;
- Regionalização dos hidrogramas unitários médios.

As variáveis selecionadas para a correlação foram: vazão de pico do hidrograma unitário em m^3/s (Q_p), tempo de pico em minutos (t_p), tempo de base em minutos (t_b), largura do hidrograma a 50% do pico em minutos (L_{50}), largura do hidrograma a 25% do pico em minutos (L_{25}), área da bacia em Km^2 , perímetro da bacia em Km, comprimento do talvegue do curso principal, porcentagem da área impermeável e comprimento do talvegue principal até o centro de gravidade da bacia em Km.

O hidrograma unitário regionalizado de Diaz e Tucci é definido com base nas variáveis Q_p , t_p , L_{50} e L_{25} , sendo que o tempo de base (t_b) é obtido com base no volume unitário.

O modelo

O modelo hidrológico distribuído, denominado EESC, desenvolvido por RIGHETTO e PORTO (1994), considera a real necessidade de métodos hidrológicos simples, facilmente entendíveis, que não requer grande esforço computacional e possa ser facilmente aplicável em situações locais.

Construído com essas características, o modelo EESC tem com objetivo resolver os problemas relativos aos efeitos do aumento da urbanização e analisar a bacia como um todo ou uma determinada seção de interesse, foi desenvolvido um modelo hidráulico-hidrológico computacional, específico para a área urbana da cidade de São Carlos, que abrange todas as bacias dos córregos Gregório e do Monjolinho até a seção do pontilhão da FEPASA, alcançando cerca de $76,079 km^2$.

A área foi dividida em 54 bacias, trechos e seções de interesse, dos quais foram levantados os parâmetros hidráulicos, hidrológicos e topográficos. Dessa maneira, o modelo permite a análise em

qualquer ponto da rede de drenagem, através de hidrogramas de cheias em função de um período de retorno especificado, constituindo assim, num modelo distribuído de grande interesse para o planejamento da rede de macrodrenagem urbana.

As ocupações crescentes de áreas poderão ser simuladas pelo modelo, através de alterações das características de ocupação e uso do solo da área específica em estudo. O modelo será aplicado em estudos de planejamento urbano enfocando problemas decorrentes do efeito da urbanização na rede de drenagem, analisando o comportamento da área de interesse em diferentes situações da evolução do crescimento urbano.

Esse modelo configura a rede de drenagem de modo a acoplar todas as sub-bacias a nós ou seções de rede de canais, gera hidrogramas de sub-bacias e propaga ondas de cheias ao longo dos canais principais.

O modelo é composto de três partes. A primeira define numericamente a configuração da rede de drenagem e acopla todas as sub-bacias de cabeceiras e intermediárias a nós ou seções da rede de canais. Na segunda, com os principais parâmetros hidrológicos básicos de cada sub-bacia, obtém a transformação da chuva em vazão por meio de metodologias estabelecidas: o método do SCS, o método de Nash e o método de regionalização de Diaz e Tucci, para se fazer uma avaliação final, depois de gerado o hidrograma de cheia para todas as sub-bacias, método a método. A terceira considera a capacidade de transporte dos canais, por meio do “*routing*” de cheia.

Utilização do modelo

O modelo matemático para a simulação hidrológica do sistema de macrodrenagem da cidade de São Carlos, neste caso, denominado modelo EESC, está programado em linguagem FORTRAN, e é constituído de um programa principal, denominado EESC, que utiliza duas sub-rotinas imbutidas no programa principal. A sub-rotina SCS foi programada para gerar hidrogramas de cheias nas sub-bacias de um sistema de macrodrenagem, onde utiliza o procedimento do *Soil Conservation Service*, para gerar hidrogramas sintéticos. A sub-rotina PROPAG permite que o programa EESC realize a propagação de cheias ao longo dos canais principais do sistema de drenagem.

Para se fazer a simulação de hidrogramas de cheias em um sistema de macrodrenagem qualquer, restrito a bacias cujos escoamentos em canais possam ser expressos por equacionamento cinemático, são utilizados quatro arquivos de dados, denominados CHUVAD, DREDAD, SUBDAD E TREDAD. As simulações são realizadas quando o programa do modelo EESC solicita, via tela, a especificação do período de retorno (TR) e da duração da chuva (DC). O modelo permite 2 saídas : via tela que pode ser através de tabela ou gráfico e via arquivo.

Área de estudo

O município de São Carlos está inserido em duas grandes bacias hidrográficas: Mogi-Guaçu e Tietê-Jacaré, fazendo parte de dois Comitês Estaduais de Bacias Hidrográficas. A maior parte da zona urbana está localizada na Bacia do Tietê-Jacaré, mas a ocupação de uso urbano tem se expandido em direção à Bacia do Mogi-Guaçu.

Além disso, o município está localizado na zona de recarga do Aquífero Guarani, e já utiliza 40,6% da água que consome de poços profundos localizados neste aquífero. A preferência pela cidade de São Carlos para este estudo é por apresentar ao longo dos anos graves inundações e as microbacias de maior relevância são: Microbacia do Monjolinho, a do Feijão e a do Quilombo. Entre essas bacias a escolhida foi a Bacia do Monjolinho, pois é onde está localizada a área urbana da cidade, que está em processo progressivo de impermeabilização, gerando problemas de inundações em diversas áreas.

A Microbacia do Monjolinho é caracterizada por ser abastecedora de água do município e receptora do esgoto da cidade. Ela é responsável por fornecer um ponto importante de captação de abastecimento de água pelo Córrego do Espraiado. O Córrego do Monjolinho que dá nome à bacia, nasce na área urbana e possui um ponto de lançamento de todo o esgoto da cidade que é lançado *in natura* ao corpo d'água.

Caracterização da bacia de estudo

A importância da caracterização das bacias hidrográficas urbanas fundamenta a avaliação dos parâmetros que condicionam a vazão. Isto porque se deve ter como princípio, durante o processo de urbanização e implantação do sistema de drenagem, a permanência das condições hidrológicas naturais da bacia.

O levantamento do meio físico pode ser desenvolvido caracterizando os seguintes aspectos: delimitação de bacias hidrográficas, topografia, pluviometria, temperatura, permeabilidade das diferentes camadas de solo, entre outros.

Para realizar esta caracterização foram utilizados os seguintes instrumentos:

- Mapas topográficos, na escala de 1:10.000;
- Fotos aéreas;
- Mapas de tipo de solo;
- Visita de campo.

A Bacia do Monjolinho está situada no município de São Carlos, São Paulo e apresenta uma ocupação predominantemente residencial, com algumas edificações unifamiliares. A Figura 1 apresenta a Bacia do Monjolinho, com a especificação da malha urbana do município de São Carlos e indicação dos córregos que serão avaliados neste estudo.



Figura 1 - Bacia do Monjolinho.

O Córrego do Gregório é o afluente principal do Rio Monjolinho, pois é o córrego que atravessa a parte mais densa da cidade de São Carlos, e o que contribui para as cheias, em vista da crescente urbanização de sua bacia. A situação é bastante agravante neste córrego, principalmente na parte central da cidade, onde áreas residenciais e comerciais são as mais atingidas e prejudicadas. Através da Figura 2 pode se ter uma noção da dimensão do problema de inundação que ocorre nessa área.



Figura 2 – Enchente em fevereiro de 2002, na região do Mercado Municipal.

RESULTADOS

Neste item são apresentados e analisados os resultados obtidos durante este período de desenvolvimento da pesquisa. O modelo EESC foi aplicado em parte da Bacia do Monjolinho, na Bacia do Tijuco Preto, na Bacia do Gregório e na Bacia do Mineirinho, São Carlos – São Paulo.

Os dados utilizados em cada arquivo de dados, em relação à rede de macrodrenagem de São Carlos, foram inseridos no programa de pré-processamento do modelo. A partir de então, os arquivos com os dados de entrada do modelo principal foram utilizados no programa principal, responsável pela simulação dos hidrogramas.

Discretização da bacia de estudo

A discretização inicial com um total de 54 sub-bacias, na qual parte da Bacia do Monjolinho considerada neste trabalho foi subdividida e sua macrodrenagem foi discretizada em 7 tramos com 35 seções. Essa discretização apresentava duas sub-bacia com áreas muito grandes em relação às outras e ao estudo, por isso resolveu-se dividi-las em duas totalizando 56 sub-bacias, mas foi necessário para a nova discretização criar uma sub-bacia de área zero, pois a configuração da rede de macrodrenagem de São Carlos ficaria melhor representada. Então, a nova discretização, representada pela Figura 3, ficou representada por 57 sub-bacias, 11 tramos e 42 seções.

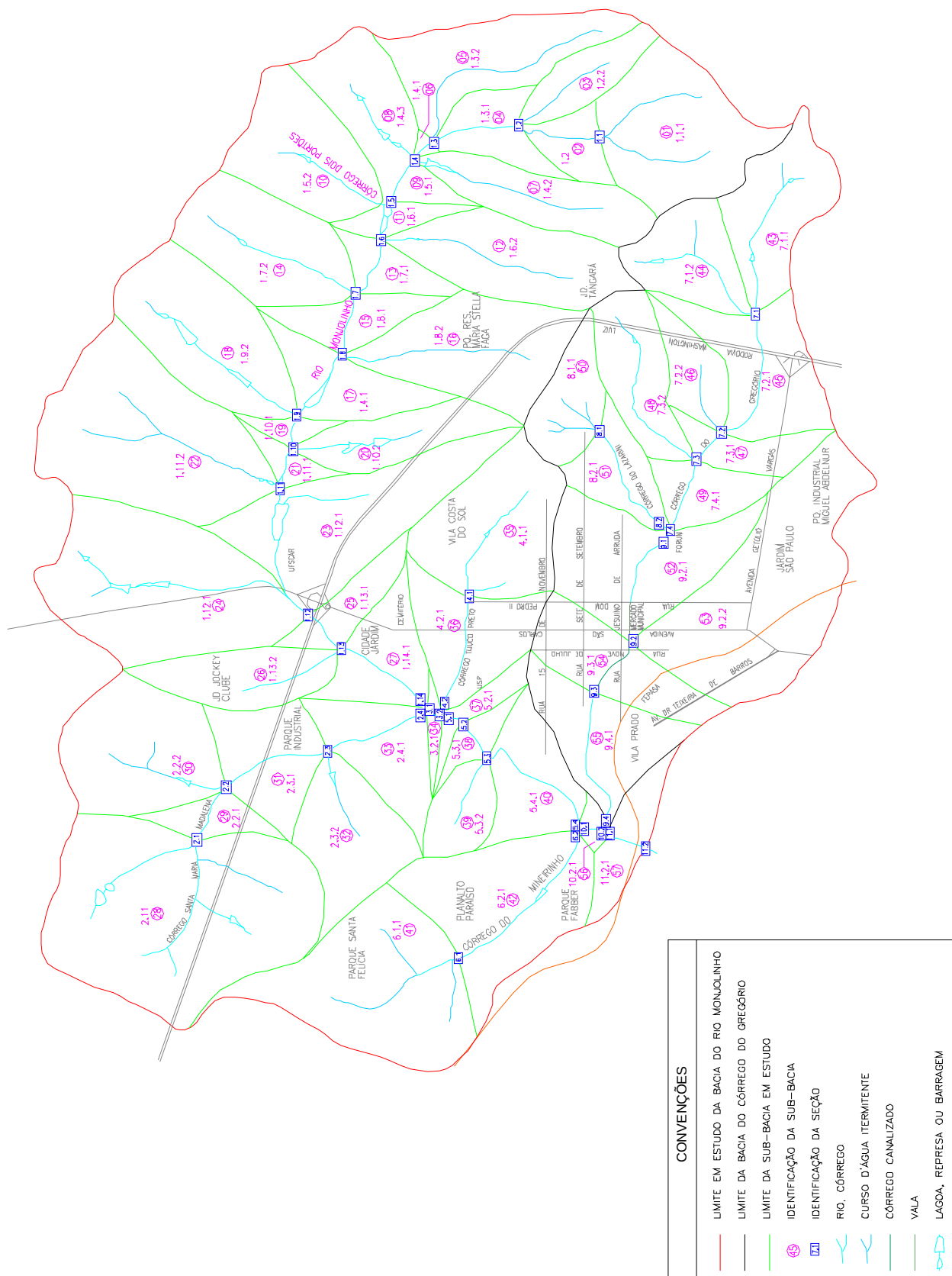


Figura 3 – Nova discretização da rede de macrodrenagem da cidade de São Carlos.

Devido a nova discretização houveram modificações em alguns arquivos de dados e estas modificações iniciaram com os parâmetros α e β , que são variáveis pertencentes ao arquivo de dados TREDAD, utilizados no cálculo da propagação ao longo de cada trecho. A Tabela 1 mostra os valores de α e β calculados após essa discretização.

Tabela 1 – Valores de α e β de toda a rede de macrodrenagem de São Carlos.

Tramo	Trecho	α	β
1	13	0,85	0,69
1	14	1,06	0,69
3	2	1,31	0,66
4	2	0,43	0,73
5	2	0,63	0,68
5	3	1,06	0,69
5	4	0,97	0,69
6	3	0,59	0,79
6	4	0,80	0,78
6	5	0,61	0,75
6	6	0,78	0,71
6	7	0,81	0,71
7	2	1,15	0,70

Com a divisão das sub-bacias 41 (em 41 e 42) e 49 (em 50 e 51), e a criação de uma sub-bacia de área zero aumentou o número de sub-bacias, tramos e conseqüentemente de seções, modificando o arquivo DREDAD, que possui a configuração da rede de macrodrenagem.

No arquivo SUBDAD foi inserida as sub-bacias criadas com as respectivas variáveis utilizadas para a leitura deste arquivo, a Tabela 2 especifica os valores determinados para essas variáveis.

Tabela 2 – Valores das variáveis utilizadas no arquivo SUBDAD para as sub-bacias criadas.

Nº da Sub-bacia	Número de Deflúvio – N	Comprimento do Curso Principal – L (Km)	Grau de Cobertura Vegetal – PP (decimal)	Declividade Média do Talvegue – S (m/m)	Área de Drenagem – A (Km ²)
41	75	2,32	0,50	0,02763	3,244
42	75	2,10	0,50	0,01718	2,194
50	90	0,83	0,25	0,07542	0,781
51	90	1,47	0,25	0,02072	0,851

O aumento do número de tramos da rede de canais e portanto do número de trechos, o arquivo TREDAD que contém os dados dos trechos da rede de canais, teve alguns valores das variáveis

modificados devido à nova discretização, além disso, os novos valores de α e β especificados na Tabela 1, foram substituídos pelos valores iniciais.

Simulações

A apresentação do hidrograma de cheia gerado após a simulação para análise e comparação dos três métodos já mencionados será feita adotando-se para o período de retorno (TR), 10 anos e para duração da chuva (DC), 1 hora. Para isso, simulou-se hidrogramas em sub-bacias e seções, principalmente nas sub-bacias 41 e 49 que foram modificadas e no exutório da parte da Bacia do Monjolinho considerada neste estudo. Em seguida, foram realizadas simulações para cenários futuros, nas seções do Mercado Municipal e do Fórum (F), a partir do ano em que foram medidos os dados, ou seja, no ano de 1980 e 2000 para as respectivas seções. Nas figuras e tabelas a seguir serão feitas as análises e comparações dos três métodos e entre eles e o hidrograma observado, através dos hidrogramas de cheia, apresentados graficamente sem modificações (discretização inicial) e com modificações (nova discretização). As simulações obtidas neste trabalho para análise e comparação com os hidrogramas observados foram feitas com a discretização inicial nas seções 6.4 (Fórum) e 6.5 (Mercado Municipal). Essas seções estão especificadas na nova discretização (Figura 3) pelas seções 7.4 (Fórum) e 9.2 (Mercado Municipal).

Hidrograma Observado

O Hidrograma Observado utilizado neste estudo foi obtido a partir dos trabalhos de MACHADO (1981) e SILVA (2003). O primeiro trabalho são dados medidos em 1980 e o segundo são dados de 2000, a escolha feita por estes dois trabalhos foi devido à possibilidade de inserção de valores no arquivo de dados no modelo utilizado, podendo obter duas alternativas para verificação do modelo e comparação dos hidrogramas gerados pelos três métodos com o hidrograma observado.

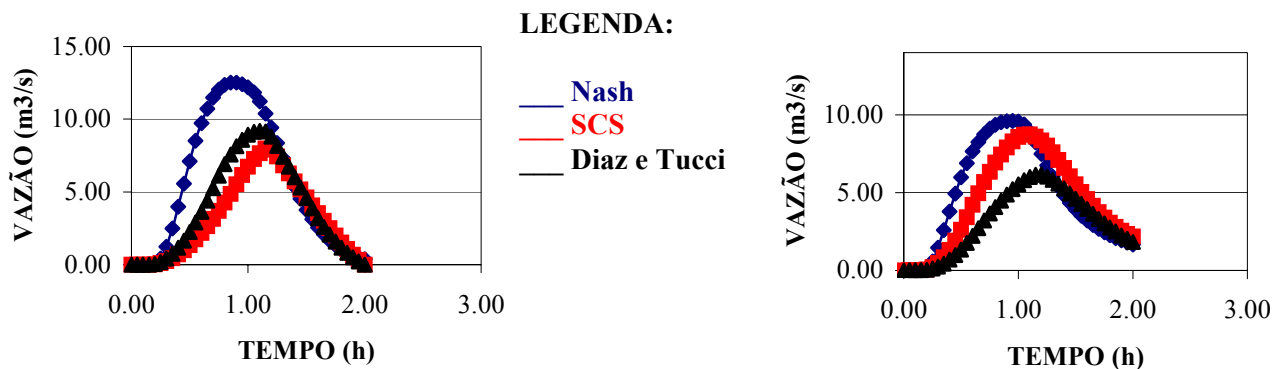


Figura 4 – Hidrogramas de cheia da sub-bacia 41, sem modificações.

Figura 5 – Hidrogramas de cheia da seção 6.2, com modificações.

Tabela 3 – Valores da vazão de pico para os três métodos com o referente tempo.

Método	Figura 4 (sem modificações)		Figura 5 (com modificações)	
	Vazão de Pico (m ³ /s)	Tempo (h)	Vazão de Pico (m ³ /s)	Tempo (h)
NASH	12,52	0,90	9,60	0,95
SCS	9,20	1,10	8,73	1,10
DIAZ E TUCCI	7,98	1,15	6,16	1,20

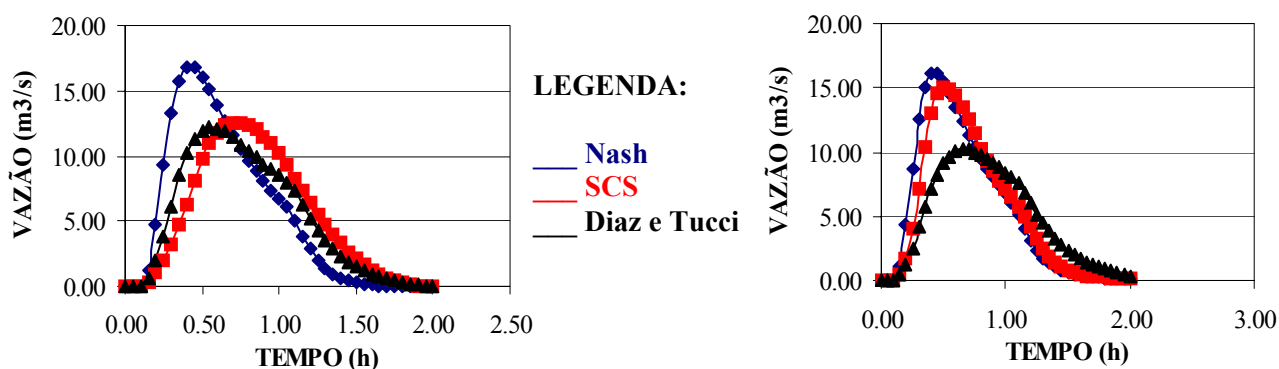


Figura 6 – Hidrogramas de cheia da sub-bacia 49, sem modificações.

Figura 7 – Hidrogramas de cheia da seção 8.2, com modificações.

Tabela 4 – Valores da vazão de pico associado ao tempo para os três métodos.

Método	Figura 6 (sem modificações)		Figura 7 (com modificações)	
	Vazão de Pico (m ³ /s)	Tempo (h)	Vazão de Pico (m ³ /s)	Tempo (h)
NASH	16,76	0,40	16,15	0,40
SCS	12,51	0,75	15,08	0,50
DIAZ E TUCCI	12,16	0,55	10,18	0,65

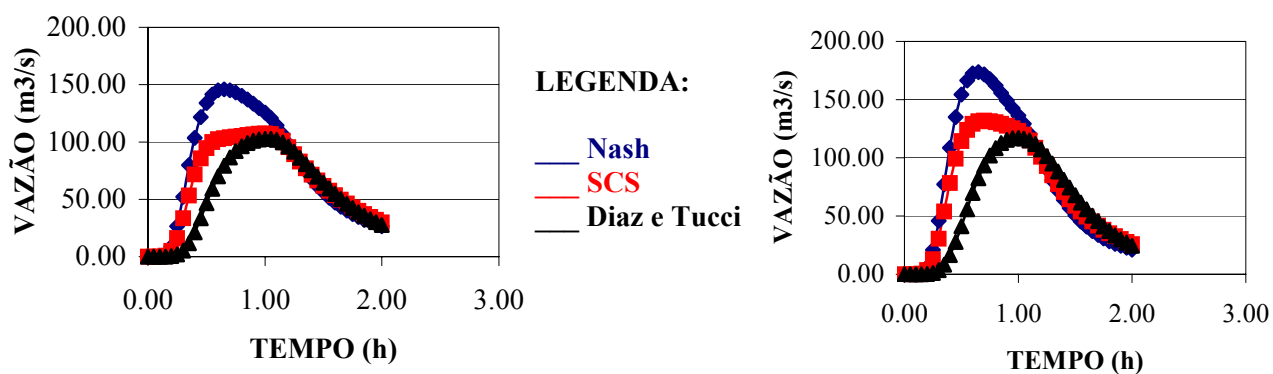


Figura 8 – Hidrogramas de cheia da seção 7.2, sem modificações.

Figura 9 – Hidrogramas de cheia da seção 11.2, com modificações.

Tabela 5 – Valores da vazão de pico associado ao tempo para os três métodos.

Método	Figura 8 (sem modificações)		Figura 9 (com modificações)	
	Vazão de Pico (m ³ /s)	Tempo (h)	Vazão de Pico (m ³ /s)	Tempo (h)
NASH	145,99	0,65	173,75	0,65
SCS	107,50	1,00	131,75	0,70
DIAZ E TUCCI	102,70	1,00	117,14	1,00

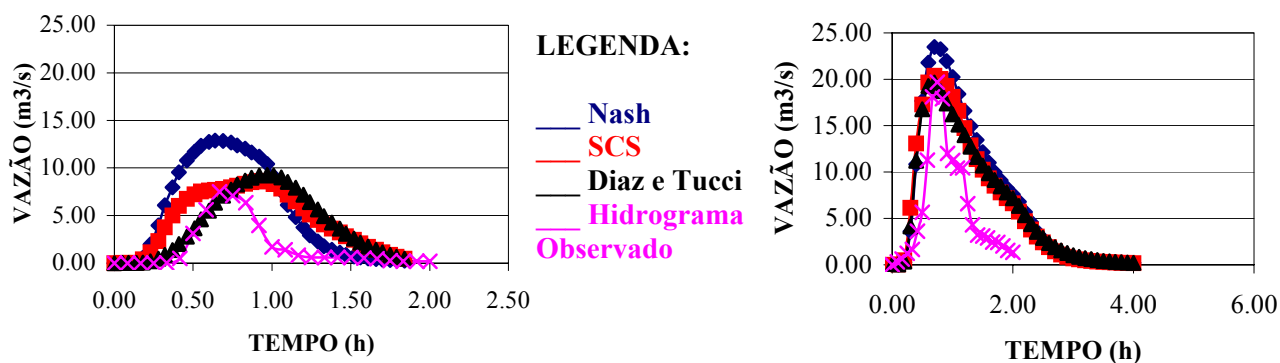


Figura 10 – Hidrogramas calculados e hidrograma observado para a seção do Mercado Municipal.

Figura 11 – Hidrogramas calculados e hidrograma observado para a seção do Fórum.

Tabela 6 - Valores da vazão de pico associado ao tempo para os três métodos e para o hidrograma observado.

Método	Figura 10 (Mercado Municipal)		Figura 11 (Fórum)	
	Vazão de Pico (m ³ /s)	Tempo (h)	Vazão de Pico (m ³ /s)	Tempo (h)
NASH	12,87	0,64	23,49	0,70
SCS	8,64	0,92	20,38	0,70
DIAZ E TUCCI	9,27	0,97	19,67	0,70
HIDROGRAMA OBSERVADO	7,50	0,67	19,69	0,75

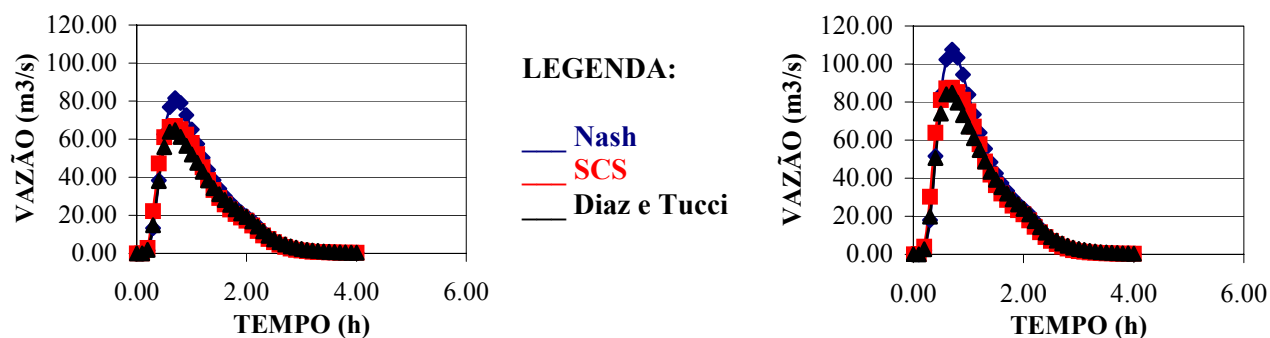


Figura 12 – Hidrogramas calculados para a seção do Fórum, com TR = 25 anos.

Figura 13 – Hidrogramas calculados para a seção do Fórum, com TR = 50 anos.

Tabela 7 – Valores da vazão de pico associado ao tempo para os três métodos, na seção do Fórum.

Método	Figura 12		Figura 13	
	Vazão de Pico (m ³ /s)	Tempo (h)	Vazão de Pico (m ³ /s)	Tempo (h)
NASH	81,44	0,70	107,64	0,70
SCS	66,97	0,70	87,55	0,70
DIAZ E TUCCI	64,73	0,70	84,80	0,70

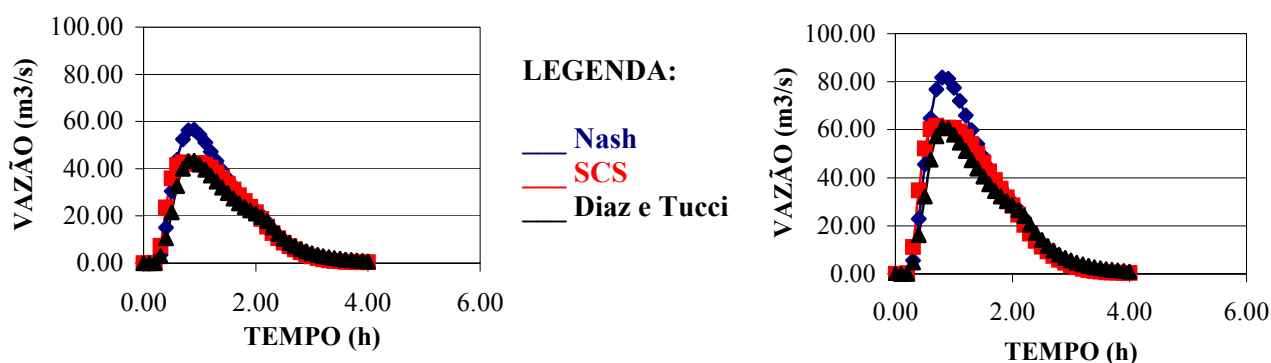


Figura 14 – Hidrogramas calculados para a seção do Mercado Municipal, com TR=25 anos.

Figura 15 – Hidrogramas calculados para a seção do Mercado Municipal, com TR = 50 anos.

Tabela 8 – Valores da vazão de pico associado ao tempo para os três métodos, na seção do Mercado Municipal.

Método	Figura 14		Figura 15	
	Vazão de Pico (m ³ /s)	Tempo (h)	Vazão de Pico (m ³ /s)	Tempo (h)
NASH	56,44	0,90	81,74	0,80
SCS	42,66	0,70	61,63	0,70
DIAZ E TUCCI	43,40	0,90	61,06	0,80

CONCLUSÃO

As análises efetuadas em diversas sub-bacias e seções do sistema, com a discretização inicial e com a nova discretização incluindo as apresentadas neste trabalho, permitem concluir que para as bacias rurais ou com quase nenhuma urbanização, a Figura 4 que apresenta a sub-bacia 41, o método de Nash gerou vazões de pico relativamente maiores que os outros métodos, da ordem de 27%.

Para bacias com alto grau de urbanização, como a sub-bacia 49 (Figura 6), a diferença entre a vazão de pico do método de Nash com os métodos do SCS e de Diaz e Tucci, também apresentou uma elevada diferença, em torno de 25 %.

A diferença entre as vazões de pico dos métodos do SCS e o de Diaz e Tucci para a sub-bacia 41 foi pequena, na ordem de 13%. Já a sub-bacia 49, os dois métodos apresentaram suas vazões de pico muito próximas, em torno de 3%.

Apenas para a sub-bacia 41 que é muito plana e relativamente grande, antes da nova discretização, o método de Nash produziu um hidrograma com vazão de pico menor e tempo de pico maior, em relação à sub-bacia 49 que mostra através da Tabela 4, o oposto ao apresentado para a sub-bacia 41 na Tabela 3.

Com a nova discretização, ou seja, com a divisão das sub-bacias 41 e 49 as simulações realizadas nas seções 6.2 e 8.2 (Figuras 5 e 7) apresentaram para os três métodos vazões de pico menores e tempos de pico maiores, com exceção do método do SCS que gerou vazão de pico maior e tempo de pico menor, quando este tempo não permaneceu o mesmo. Esta análise pode ser observada através das Tabelas 3 e 4.

Também foram simuladas vazões no exutório final da rede de macrodrenagem da cidade de São Carlos, especificado pela seção 7.2 (discretização inicial) e 11.2 (nova discretização) para se obter a influência na vazão com a criação de mais duas sub-bacias (Figuras 8 e 9), e através da Tabela 5, mostra os valores obtidos para as vazões geradas pelos três métodos e observa-se que as vazões de pico aumentaram e os tempos de pico permaneceram o mesmo ou diminuíram.

Este trabalho necessitou de dados medidos para dar credibilidade ao que se está afirmando no parágrafo acima, e estes foram obtidos a partir dos trabalhos de MACHADO (1981) e SILVA (2003), que disponibilizaram de dados medidos para a obtenção da curva-chave e conseqüentemente do hidrograma observado, onde se fez a comparação entre eles e os três métodos.

As comparações entre os hidrogramas observados e calculados pelos três métodos estão apresentadas nas Figuras 10 e 11, onde se pode observar entre as figuras que realmente o método de Nash está superdimensionado em relação aos outros dois métodos, a vazão pico obtida está bem maior e por isso, chegou-se a conclusão que o método do SCS e o de Diaz e Tucci são mais confiáveis na utilização de hidrogramas unitários nas bacias urbanas e rurais brasileiras. As simulações futuras a partir do ano de medição dos dados medidos nas seções já citadas, estão mostradas nas Figuras 12, 13, 14 e 15.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBASSA, A.P. (1991). *Simulação do Efeito da Urbanização sobre a Drenagem Pluvial na Cidade de São Carlos/SP*. São Carlos. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo.

- GRADSHTEIN, J.S. e RYZHIK, J.M. (1965). *Table of Integral Séries and Products*. Academic Press, New York, 4ª Edição, 1086 p.
- LINDLEY, R.W.(1976). *A Case Study: Green Trail Development, Lisle Illinois*. Proceedings National Symposium on Urban Hydrology, Hydraulics, and Sediment Control, Univ of Kentucky.
- MACHADO, E.S. (1981). *Modelo Hidrológico Determinístico para Bacias Urbanas*. Dissertação de Mestrado, EESC – USP, 286p.
- NASH, E.J. (1960). *A Unit Hydrograph Study, with Particular Reference to British Catchments*, Proceedinngs of Institution of Civil Engineers, Volume 17, pages 249 – 282.
- PORTO, R.M.; RIGHETTO, A.M. (1995). *Análise Comparativa de Métodos Hidrológicos Simples em Drenagem Urbana – XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Recife, 7 a 12 de Novembro de 1995. Volume 3, página 505 – 514.
- RIBEIRO, G. (1961). *Acerca do Cálculo da Vazão de Obras D’Arte*. Revista do Clube de Engenharia, nº 249, Rio de Janeiro, 404 p.
- SILVA, K.A. (2003). *Análise da Variabilidade Espacial da Precipitação e Parâmetros Hidrológicos em Bacia Experimental: Estudo da Transformação da Chuva em Uma Pequena Bacia Hidrográfica Urbana*. São Carlos. Dissertação (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, Volume I (163 p) e Volume II (256 p).
- TUCCI, C.E.; DIAZ, O.B.P. (1989). *Regionalização de Hidrogramas Unitários de Bacias Brasileiras*, R.B.E., Volume 7, páginas 19 - 29.