

MAPEAMENTO PRELIMINAR DE ÁREAS URBANAS DE INUNDAÇÃO

PRELIMINARY MAPPING OF INUNDATION IN URBAN AREAS

Hélio César Suleiman¹ e Ademir Paceli Barbassa²

Universidade Federal de São Carlos

Departamento de Engenharia Civil – Área de Concentração Engenharia Urbana
Rod. Washington Luiz km 235 - 13565.905 São Carlos, SP Brasil

¹Mestrando em Engenharia Urbana - e-mail: heliosul@barretos.com.br

²Professor Departamento de Engenharia Civil - e-mail: barbassa@power.ufscar.br

ABSTRACT

This paper proposes a methodology aiming to provide a computational tool to outline areas with higher or lower risk of flood for planning a draining system and urban use. A hydrodynamic propagation model was developed by using the MacCormack explicit scheme, making it possible to be applied in urban channels. In the case of inundations, corresponding plates and sections are recorded for further generating the inundation preliminary map with the aid of a topographic software. Tests focused on hydrodynamic propagation in a real channel, stream of the *Retiro Saudoso*, in the city of Ribeirão Preto, state of São Paulo, having a map representing an estimative flooding area. The final outcome of this work might be used as part of a decision-making support system for authorities as to flood as the program might be applied to estimate and to map flood along a channel.

Keywords: hydrodynamic propagation, flooding area, MacCormack scheme, urban drainage, inundation preliminary map.

RESUMO

Com o objetivo de fornecer uma ferramenta computacional para delimitar áreas de maior ou menor risco de ocorrência de enchentes, para uso urbano e planejamento do sistema de drenagem chegou-se à metodologia proposta. Desenvolveu-se um modelo de propagação hidrodinâmica utilizando o esquema explícito MacCormack, possibilitando sua aplicação a canais urbanos. Na ocorrência de inundações as lâminas e as seções correspondentes são registradas para, posteriormente, gerar-se o mapa preliminar de inundação com o auxílio de um *software* topográfico. Os testes tiveram como ênfase a propagação hidrodinâmica em um canal real, córrego do Retiro Saudoso, na cidade de Ribeirão Preto, SP, tendo como produto um mapa representando uma área estimada de inundação. O resultado final deste trabalho pode ser utilizado como parte de um sistema de apoio de decisões por autoridades no que se refere à inundação, uma vez que o programa pode ser aplicado para estimar e mapear a inundação ao longo de um canal.

Palavras-Chave: propagação hidrodinâmica, área de inundação, esquema MacCormack, drenagem urbana, mapa preliminar de inundação.

1 - INTRODUÇÃO

A busca de soluções para os problemas urbanos que afetam a qualidade de vida das populações não pode prescindir, atualmente, dos conceitos de inundações e enchentes em áreas urbanas, que são freqüentes em várias cidades do país, que quando atingem áreas densamente ocupadas, provocam prejuízos consideráveis, os quais em muitos casos são irreparáveis através da perda de vidas humanas.

Atualmente as cidades vêm passando por sérios problemas relacionados às enchentes. Os motivos são vários, mas pode-se dizer que um dos principais agente causador de uma cheia é a ocupação indiscriminada das áreas de várzea.

O desenvolvimento urbano brasileiro produz um aumento na freqüência das inundações devido à impermeabilização do solo, canalização dos cursos d'água e efeitos provocados pela formação de ilhas de calor que

ocorrem em áreas densamente urbanizadas, e são responsáveis por chuvas mais intensas e localizadas.

As regiões baixas das cidades ou os fundos de vale são identificados como locais problemáticos e é lá que ocorrem as enchentes.

Considerando-se que as inundações são fenômenos naturais que podem ocorrer independentemente da ação do homem e que as cidades são espaços complexos de intervenção, as formas de apropriação do solo urbano, a despeito de todo o conhecimento tecnológico disponível, têm agravado as conseqüências desse fenômeno. A sua elucidação implica no reconhecimento de sua amplitude que apresenta interações com diversas outras estruturas urbanas. A ausência de um planejamento integrado com propostas que contemplem atuações a curto, médio e longo prazos, não permitem um desempenho com maior efetividade na superação do problema.

Vários municípios não possuem em seu cadastro técnico as áreas estimadas de inundação. Pretende-se com

este trabalho fornecer uma ferramenta computacional a fim de estimar áreas inundáveis para uso urbano e planejamento do sistema de drenagem, auxiliando assim, o poder municipal nas tomadas de decisões quanto ao uso e ocupação de área sujeita a inundação.

Foram explorados os seguintes componentes fundamentais: introduzir modelo de propagação hidrodinâmica para condições variadas de escoamento; re-estudar as condições de contorno internas e externas, no modelo proposto por Chaudhry (1993), possibilitando mudanças na geometria das seções, alteração de declividade e comprimento nos trechos e nas condições de montante e jusante do canal; aplicar o modelo a uma situação de inundação real; e gerar um mapa com a projeção horizontal da área inundada.

2 - FUNDAMENTAÇÕES TEÓRICAS

Pires (1997), implementou e testou o modelo MPHRC (Barbassa, 1991) para o mapeamento de áreas urbanas de inundação utilizando para representar área de inundação um modelo numérico de terreno. A proposta final foi denominada de Modelo de Propagação Hidrodinâmica para Redes de Canais e Mapeamento de Áreas Inundáveis (MPHRC-MAI).

Os programas MPHRC e MPHRC-MAI visam representar o armazenamento da água em áreas de inundação lateral definidas pelo relevo, quando o escoamento ultrapassar o nível da borda do canal e extravasar para seu entorno.

O modelo hidrológico utilizado é distribuído conforme Barbassa (1991). Possibilita representar as redes de canais, naturais ou artificiais, e redes de sarjetas. O escoamento nos canais é feito por propagação cinemática e nas sarjetas o escoamento é permanente e uniforme. As bacias podem ser subdivididas em tantas sub-bacias quantas se queira. As sub-bacias são caracterizadas pelas áreas impermeabilizadas diretamente conectadas. As demais áreas incluem informações de seu percentual impermeabilizado, sendo a geração do escoamento, nesta parcela das sub-bacias, realizado pelas equações de Manning e da continuidade depois de deduzidas as parcelas infiltradas e retidas. O modelo trata a precipitação variando espacial e temporalmente. O MPHRC foi programado em linguagem Pascal 5.5.

O MPHRC-MAI possui como base o MPHRC, sendo implementado com cálculo de armazenamento lateral por dois métodos: polinomial e modelagem numérica de superfície. O modelo foi testado frente aos dados reais de vazões e níveis de inundações levantadas em agosto de 1984 na cidade de Brusque, SC, e através da adoção de hidrogramas para trecho de canal urbano na bacia do córrego Retiro Saudoso em Ribeirão Preto, SP. O trabalho teve como resultados mapas com áreas de inundação que servirão de parâmetros comparativos com a metodologia sugeridas no presente trabalho. O MPHRC-MAI foi programado em linguagem Delphi, versão 1.0.

Chaudhry et al (1987, 1989, 1990 e 1991) e Navarro e Saviron (1992) desenvolveram pesquisas sobre a aplicação do método numérico MacCormack na simulação de

escoamentos em canais regulares onde ocorrem fenômenos como ressaltos hidráulicos e variações de fundo. O esquema fundamenta-se na aplicação de diferenças finitas de segunda ordem de acuracidade como forma de representar as ondas de choque do fenômeno (Neves, 1999).

A grande limitação do uso do método é a condição de estabilidade, condição de Courant ou número de Courant (Equação 1).

$$C_n = \frac{\text{velocidade real da onda}}{\text{velocidade numérica da onda}} = \frac{|V| \pm c}{\Delta x / \Delta t}; \Delta t \leq \frac{\Delta x}{V \pm c} \quad (1)$$

Onde: C_n = número de Courant; Δt = passo de tempo (s); Δx = espaçamento da malha (m); $V \pm c$ = é a velocidade ou celeridade absoluta da onda (velocidade medida em relação às margens do canal (m/s); o sinal positivo indica quando a onda se propaga no sentido do escoamento). (Porto, 1998).

Neves (1999) afirmou que essa condição limita o uso do esquema numérico a pequenos intervalos de tempo, exigindo-se um processo exaustivo de cálculo.

O espaçamento Δx não pode ser aumentado para permitir um Δt maior, pois a precisão da solução depende do número de seções por comprimento de onda. Quanto menor for esta relação, maiores serão os erros numéricos de amortecimento e dispersão.

A discretização numérica do esquema MacCormack em um canal é feita através das seções transversais distanciadas de Δx , e o tempo é dividido em intervalos Δt .

2.1 Esquema Numérico MacCormack

As equações de governo podem ser escritas na forma conservativa como:

$$U_t + F_x + S = 0 \quad (2)$$

Ou na forma matricial:

$$U = \begin{pmatrix} A \\ VA \end{pmatrix}; F = \begin{pmatrix} VA \\ V^2A + g \end{pmatrix}; S = \begin{pmatrix} 0 \\ -gA(S_0 - S_f) \end{pmatrix} \quad (3)$$

Onde: t = tempo (s); x = distância ao longo do canal (m); A = área molhada (m^2); V = velocidade de escoamento (m/s); g = aceleração da gravidade (m/s^2); S_0 = declividade do fundo do canal (m/m); S_f = declividade da linha d'água ou declividade da linha de energia (m/m).

Passo Predictor:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{U_i^p - U_i^k}{\Delta t} \quad (4)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{F_i^k - F_{i-1}^k}{\Delta x} \quad (5)$$

Substituindo as Equações (4) e (5) em (2), para o passo *predictor*, tem-se:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + S = 0 \quad (6)$$

$$\frac{U_i^P - U_i^k}{\Delta t} + \frac{F_i^k - F_{i-1}^k}{\Delta x} + S = 0 \quad (7)$$

$$\frac{U_i^P - U_i^k}{\Delta t} = -\frac{F_i^k - F_{i-1}^k}{\Delta x} - S_i^k \quad (8)$$

$$U_i^P - U_i^k = -\frac{\Delta t}{\Delta x} (F_i^k - F_{i-1}^k) - S_i^k \Delta t \quad (9)$$

$$U_i^P = U_i^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_i^k - F_{i-1}^k) - S_i^k \Delta t \quad (10)$$

Onde, $2 \leq i \leq N$

É através da equação (10) que os valores de velocidade (V) em (m/s) e profundidade (Y) em (m) são calculados, em todas as seções. Esses valores são também utilizados na parte *corrector* nos cálculos de F^P e S^P .

Passo *Corrector*:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{U_i^C - U_i^k}{\Delta t} \quad (11)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{F_i^P - F_{i-1}^P}{\Delta x} \quad (12)$$

Substituindo as Equações (11) e (12) em (2) tem-se:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + S = 0 \quad (13)$$

$$\frac{U_i^C - U_i^k}{\Delta t} = -\frac{F_i^P - F_{i-1}^P}{\Delta x} + S_i^P = 0 \quad (14)$$

$$\frac{U_i^C - U_i^k}{\Delta t} = -\frac{F_i^P - F_{i-1}^P}{\Delta x} - S_i^P \quad (15)$$

$$U_i^C - U_i^k = -\frac{\Delta t}{\Delta x} (F_i^P - F_{i-1}^P) - S_i^P \Delta t \quad (16)$$

$$U_i^C = U_i^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_i^P - F_{i-1}^P) - S_i^P \Delta t \quad (17)$$

O valor de U^i em tempo desconhecido $k+1$ é dado por:

$$U_i^{k+1} = \frac{1}{2} (U_i^P + U_i^C) \quad (18)$$

Sendo $1 \leq i \leq (N-1)$; os índices: C, k, P, i referem-se respectivamente a: valor da variável após o passo *corrector*, tempo, variáveis calculadas durante o passo *predictor* e seção que está sendo calculada.

O esquema MacCormack é estável se o número do *Courant* (C) for menor ou igual a 1 ($C_n \leq 1$). Esta condição tem que ser satisfeita em cada ponto da malha, durante todo o processo computacional.

2.2 Programa proposto por Chaudhry

Chaudhry (1993) apresenta um programa de propagação hidrodinâmica utilizando o esquema explícito MacCormack para canais regulares.

Como condição inicial, admitiu-se profundidade e vazão constantes. A jusante do trecho do canal considerado, uma vazão constante e igual à zero é considerada, produzida pelo fechamento súbito de uma comporta na seção.

As seções consideradas por Chaudhry (1993) possuem as mesmas características físicas da seção tipo admitida (largura de fundo, coeficiente de rugosidade, declividade lateral da seção, declividade de fundo, vazão e profundidade constantes), que são utilizadas como dados de entrada, além do número de seções e do tempo de propagação da onda.

As condições de contorno são: na extremidade de montante é considerada a profundidade inicial de escoamento (dado de entrada) e na extremidade de jusante é admitida uma vazão igual à zero.

Em todas as seções são calculados os passos *predictor* e *corrector*, finalizando somente quando $i \leq$ número de seções.

O programa calcula o número de *Courant* (C_n) em todas as seções, verificando assim a estabilidade numérica.

Como dado de saída do programa tem-se: velocidade e altura de lâmina d'água em todas as seções.

3 - METODOLOGIA

Há, na literatura, várias metodologias para elaborar simulações de inundação nas quais se enfatiza as vantagens e restrições de sua aplicabilidade. Optou-se por utilizar o modelo de propagação de enchentes, com discretização das equações de *Saint Venant* pelo esquema explícito de diferenças finitas de MacCormack, segundo Chaudhry (1993), a fim de garantir a estabilidade frente à variação no escoamento. Planejou-se sua aplicação à área com problema de inundação para que se pudessem avaliar os resultados. A metodologia empregada no desenvolvimento do trabalho compreendeu as seguintes etapas: (1) critério para escolha do local de estudo; características de interesse da bacia; histórico de inundação da área em estudo, (2) caracterização dos canais, (3) características da topografia da área sujeita a inundação, (4) implementação e teste do programa, com representação da área estimada de inundação e (5) estudo de caso com aplicação do método proposto e avaliação dos resultados.

O município de Ribeirão Preto localiza-se no Estado de São Paulo, a 329 km da capital do estado, e com as seguintes coordenadas geográficas: 21°10'42 Sul e 42°48'24 Oeste; clima tipo mesothermal, com invernos secos e verões úmidos. As temperaturas médias anuais oscilam entre as mínimas de 11,4°C e máximas de 27,8°C.

O período chuvoso tem início entre outubro e novembro e se estende até março. A estação seca tem início em abril e se estende até setembro (DAEE, 2002).

O córrego Retiro Saudoso é um dos principais afluentes do córrego Ribeirão Preto e sua bacia possui grande ocupação urbana. Justifica-se estudar o caso do córrego Retiro Saudoso, situado na cidade de Ribeirão Preto, SP, por ele estar sujeito à inundação há várias décadas e por contar com estudos acadêmicos e de órgãos de governo. Possui comprimento total de talvegue de, aproximadamente, 14 km.

A junção do córrego Retiro Saudoso com o córrego Ribeirão Preto ocorre no encontro das avenidas Gerônimo Gonçalves e Francisco Junqueira, no centro da cidade, como observado na Figura 1.



Figura 1: Junção do córrego Retiro Saudoso com o córrego Ribeirão Preto. Fonte: Secretaria de Planejamento e Gestão Ambiental de Ribeirão Preto.

O trecho do córrego Retiro Saudoso foi caracterizado a partir de levantamentos realizados por Pires (1997), DAEE (2002) e visitas ao local pelas seguintes variáveis:

- Extensão dos trechos de seção homogênea;
- Dimensão das seções transversais (largura do fundo, profundidade, inclinação dos taludes, entre outros).
- Tipo do material usado na construção e seu estado de conservação;
- Cotas topográficas do fundo do canal e da rua.

No item 2 (Fundamentações Teóricas) foi descrito, sucintamente, o funcionamento do programa apresentado por Chaudhry (1993) e que serviu de base para o presente trabalho.

As equações utilizadas no modelo são solucionadas pelo esquema de MacCormack, que se fundamenta na aplicação de métodos numéricos de diferenças finitas.

A descrição numérica do esquema MacCormack considera uma grade espaço-tempo e dois grupos de representações finitas para uma grandeza U , denominada *predictor* e *corrector*, através de seções transversais, discretizadas no canal e distanciadas de Δx e o tempo é dividido em intervalos Δt . Calculam-se os valores de velocidade (V) e altura de lâmina d'água (Y) em todas as seções, no passo *predictor*, utilizando a Equação 10, sendo posteriormente corrigidas quando houver condição de contorno interna. Esses valores são também utilizados no passo *corrector* nos cálculos de F^p e S^p .

Os valores de velocidade (V) e lâmina d'água (Y) são calculados no passo *corrector* utilizando-se a Equação 17, cujos valores são corrigidos no caso de haver condição de contorno interna.

Com a Equação 18 são calculados os valores finais de velocidade (V) e lâmina d'água (Y) após os passos *predictor* e *corrector*.

Os índices P , i , k , C referem-se respectivamente: ao passo de tempo *predictor*, a seção que está sendo calculada, ao tempo e ao passo de tempo *corrector*.

O programa foi desenvolvido em *Mallab*, por ser de fácil utilização, possuir em sua plataforma vários algoritmos de cálculo numérico e também recursos gráficos.

O modelo incorpora condições de contorno internas, dentro da calha do canal, tais como alargamentos de seções, alterações nos comprimentos e mudanças de declividades nos trechos, verificando assim mudanças relativas ao regime de escoamento e também estreitamento na largura do canal devido a pontes ou outras interferências urbanas, causando aumento de velocidade de escoamento e inundação.

Fazem parte do arquivo de entrada os seguintes dados: número de trechos considerados, comprimento relativo a cada trecho do canal em estudo, cota de fundo e cota da rua (normalmente tomada em relação à margem com menor cota) em cada seção e forma das seções (se são regulares ou não, fornecendo ao programa a inclinação dos taludes, quando houver a necessidade dos mesmos).

Na situação inicial, correspondente ao tempo inicial de propagação ($T=0$ segundo), a vazão foi mantida constante em todas as seções e a lâmina d'água calculada. Foi considerada para tanto escoamento permanente uniforme. Como condição de contorno externa utiliza-se, na seção de montante, um hidrograma afluente e na seção de jusante do trecho considerado, uma curva chave do tipo polinomial, fornecida por Pires (1997), cuja equação é mostrada a seguir.

$$Q = 0,071719029 + 9,4645712y + 4,978388y^2 \quad (19)$$

Sendo: Q a vazão em m^3/s e y a lâmina d'água em metros.

Nas seções onde havia alargamentos e estreitamentos de seções introduziu-se a condição de contorno interna. As

contribuições laterais do canal bem como as perdas de carga entre as seções foram desprezadas. Para isso consideraram-se subseções imediatamente a montante e a jusante da seção em que sofreu alargamento ou contração. Nesses pontos foram aplicadas as equações do balanço de energia e da continuidade, segundo as Equações 20 e 21.

$$Y_M + \frac{Q_M^2}{2gA_M^2} = Y_J + \frac{Q_J^2}{2gA_J^2} \quad (20)$$

Onde: Y_M é a lâmina d'água da seção de montante (m); A_M é a área molhada da seção de montante (m^2); Y_J é a lâmina d'água da seção de jusante (m); A_J é a área molhada da seção de jusante (m^2); Q é a vazão na seção de montante e de jusante (m^3/s), considerada constante segundo a equação da continuidade:

$$Q_M = Q_J \quad (21)$$

A condição de estabilidade é verificada em cada ponto da malha durante todo o processo computacional. O passo de tempo Δt é calculado para cada trecho e o menor valor encontrado é utilizado no cálculo do próximo passo de tempo da propagação da onda. Utiliza-se o menor valor de Δt para garantir a condição de estabilidade.

Ao determinar o próximo passo de tempo de propagação, o programa busca no hidrograma de entrada a vazão correspondente àquele tempo e calcula então as características hidráulicas para cada seção. O processo de verificação de estabilidade se repete até que o tempo de propagação seja igual ou inferior ao tempo total definido como dado de entrada. Caso a condição não seja satisfeita, o programa avança em qual seção isto ocorre. O passo de tempo é então reduzido e os cálculos repetidos.

Os passos de tempo predictor e corrector iniciam-se na seção imediatamente após a seção considerada como inicial (seção de montante), calculando-se a vazão e a lâmina d'água em todas as seções, nos dois passos de tempo. Depois de realizada a propagação de cada passo de tempo, tem-se conhecidas velocidades e lâminas em todas as seções do canal.

O programa verifica então se a cota do fundo somada à lâmina d'água é maior do que a cota da rua. Caso isso seja verificado o programa busca em qual seção e em qual passo de tempo ocorreu o extravasamento do canal, registrando essas informações em um outro arquivo. Esses dados são então utilizados em um *software* de topografia, no presente trabalho utilizou-se o *software TOPOGRAF*, gerando um modelo numérico de terreno a fim de identificar à curva de nível que dará origem a área de inundação estimada.

No caso de haver extravasamento de água do canal para o sistema viário, a cota máxima obtida, somando-se a cota de fundo e a lâmina de água (cota máxima de inundação) é projetada horizontalmente no sentido longitudinal e transversal do canal com o objetivo de definir a área inundada.

Conhecidas as cotas máximas de inundação (em metros) em uma determinada seção do canal passa-se às

estimativas da área inundação com a utilização do *software* topográfico.

É traçado um eixo de referência (no eixo do canal) para que possam ser lançadas as cota de fundo do canal. Após as cotas serem lançadas o *software* realiza a triangulação por meio de malhas, e posterior geração de curvas de nível.

Os dados referentes às coordenadas XYZ são utilizados em um arquivo de representação de superfície de base CAD, no formato DXF, mantendo-se constantes as coordenadas X e Y, variando apenas a coordenada Z. A coordenada Z é obtida somando-se a altura da lâmina d'água gerada pelo modelo de propagação hidrodinâmica e a cota do terreno, que projetada horizontalmente sobre a superfície delimita a área de inundação gerando assim, o mapa representativo da área de potencial de inundação.

O modelo foi testado sob várias condições de escoamento e aplicado ao canal do córrego Retiro Saudoso em Ribeirão Preto, SP, onde já havia cálculo de mancha de inundação usada para comparar com os resultados obtidos no presente trabalho.

4 – ANÁLISES DO RESULTADO

O modelo de propagação hidrodinâmica desenvolvido permite calcular vazões, velocidades e lâminas em quaisquer tempos e em todas as seções do canal. A cota máxima de inundação é utilizada na estimativa das áreas de inundadas, projetando-a nas direções transversais e longitudinais do canal.

Considera-se que a mancha ou área inundada foi estimada de forma simplificada neste trabalho, pois não se consideraram as vazões de extravasamento externas à calha do canal e as contribuições laterais para as áreas inundadas. Assim, o nível de água no canal tende a ser maior que aquele em uma cheia real.

O trecho em estudo é um segmento do córrego Retiro Saudoso compreendido entre as avenidas Independência e a Gerônimo Gonçalves. Foi representado por 9 trechos e 10 seções, numeradas de jusante para montante, possuindo um comprimento total de 1.700 metros.

As seções tipo consideradas são regulares, sendo nove do tipo retangular e uma do tipo trapezoidal. O perfil de fundo possui declividades variáveis em cada trecho considerado. Sete seções possuem uma laje de cobertura, devido à travessia sobre o canal.

As seções possuem revestimentos de fundo e lateral, ao longo de todo o trecho considerado, em concreto, que se encontra em péssimo estado de conservação. O coeficiente de Manning para todos os trechos do canal foi adotado como 0,022 o que corresponde a um canal revestido em concreto projetado rugoso e alvenaria de pedra segundo Chow (1964).

O modelo exige, como dados de entrada, a definição do número de seções do canal, o tempo de simulação, várias características geométricas do canal, informações sobre discretização do hidrograma e as cotas relativas ao perfil longitudinal do canal.

O tempo de propagação, em segundos, é retirado do hidrograma afluente utilizado na seção de montante.

Os dados de entrada são mostrados na Tabela 1, onde: CLS é o comprimento de cada seção em (m), iniciando-se na seção de montante; B0 é a largura de fundo das seções em (m), iniciando-se na seção de montante; S é a declividade do talude do canal H:V; S0 é a declividade de fundo em (m/m) dos trechos entre as seções do canal; CMM é o coeficiente de Manning (adimensional); CTRua é a cota topográfica da rua em (m) para cada seção levantada e CTF é a cota topográfica do fundo do canal em (m) para cada seção levantada.

Tabela 1: Dados de entrada para o modelo de propagação hidrodinâmica.

Seção	CLS (m)	B0 (m)	S	S0 (m/m)	CMN	CTRua (m)	CTF (m)
1	0	8,5	0	0,00994	0,022	524,92	521,28
2	120	12,0	0	0,00242	0,022	524,56	520,99
3	220	14,0	1	0,00254	0,022	523,98	520,43
4	100	10,0	0	0,00084	0,022	523,33	520,37
5	320	9,0	0	0,00252	0,022	522,90	519,54
6	300	9,0	0	0,00130	0,022	522,60	519,15
7	220	9,0	0	0,00250	0,022	522,10	518,60
8	100	10,0	0	0,00110	0,022	521,90	518,71
9	100	10,0	0	0,00152	0,022	521,45	518,56
10	200	14,0	0	0,00124	0,022	521,66	518,36

As condições iniciais de velocidade (V) e lâmina (Y) em todas as seções do canal são calculadas para o tempo inicial T=0 segundo, considerando escoamento permanente e uniforme nos trechos do canal a partir da primeira vazão do hidrograma afluente à seção de montante do canal.

A condição de contorno interna, como alargamento e ou estreitamento de seções foi tratada segundo a conservação de energia entre duas seções, uma imediatamente a montante da seção onde há a condição de alargamento ou estreitamento e outra imediatamente a jusante. Toda vez que o programa identifica qualquer mudança na dimensão da largura de fundo de uma determinada seção, automaticamente, o programa identifica duas seções, equidistantes da seção original, uma a montante e outra a jusante. A distância definida para essas seções intermediárias foi de 1 metro.

O programa foi testado, inicialmente, empregando-se vários hidrogramas hipotéticos a fim de testar a estabilidade numérica do modelo.

Testes preliminares, a fim de verificar a equação da continuidade e hidrogramas para seções de montante e jusante em todos os passos de tempo, foram produzidos e seus volumes calculados. A sobreposição dos hidrogramas é mostrada na Figura 2, para o tempo de propagação de 140 minutos (8.400 segundos ou 2 horas e 20 minutos).

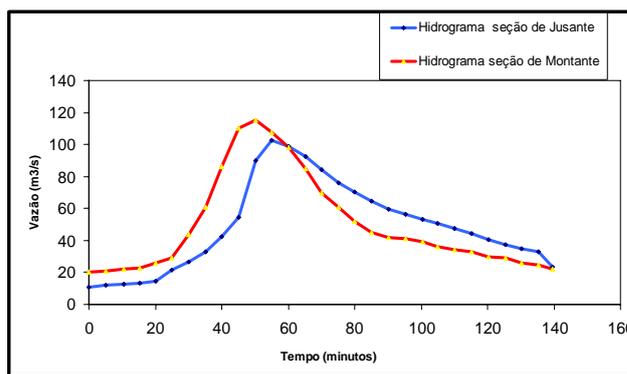


Figura 2: Hidrogramas das seções de montante e jusante, tempo de propagação 140 minutos (8.400 segundos).

Várias simulações foram realizadas com o objetivo de testar a estabilidade numérica do modelo, para tanto se utilizou hidrogramas hipotéticos e alterações relativas à declividade de fundo do canal a fim de obter velocidades mais elevadas.

Verificadas a estabilidade do modelo e a equação da continuidade, empregou-se o hidrograma mostrado na Figura 3 com objetivo de estabelecer uma relação, de estimativa de mancha de inundação, entre os valores obtidos pelo modelo proposto e os obtido por Pires (1997).

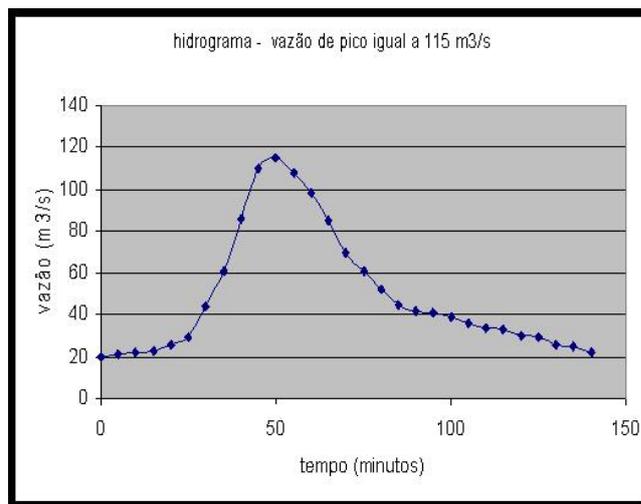


Figura 3: Hidrograma adotado, vazão de pico de 115 m³/s. Fonte: Pires (1997).

Usou-se, para estimativa da mancha de inundação, o hidrograma apresentado na Figura 3, com vazão de pico de 115 m³/s devido ao fato de que para esta vazão tem-se a mancha de inundação produzida pelo MPHRC-MAI. A vazão de 115 m³/s, segundo DAEE (2002), corresponderia a uma chuva com período de retorno próximo a 50 anos.

A tabela 2 mostra os resultados da propagação hidrodinâmica, velocidade, lâmina d'água e número de Courant (C_N). A lâmina d'água atingiu o máximo valor no tempo t = 55,15 minutos.

Tabela 2: Parâmetros hidráulicos calculados para o tempo 55,15 minutos em todas as seções do córrego Retiro Saudoso

Seção	CTRua (m)	CTF (m)	Y (m)	V (m/s)	C _N
1	524,92	521,28	2,15841	0,69227	0,74609
2	524,56	520,99	2,43041	0,59548	0,75707
3	523,98	520,43	2,82234	0,68087	0,69420
4	523,33	520,37	2,83834	0,66320	0,99828
5	522,90	519,54	3,28853	0,74303	0,90962
6	522,60	519,15	3,64049	0,16169	0,92894
7	522,10	518,60	3,83392	0,38695	0,85954
8	521,90	518,71	3,67849	-0,5281	0,96396
9	521,45	518,56	3,72965	-0,6471	0,93071
10	521,66	518,36	3,98593	-0,1170	0,76828

Sobre a seção 10 existe uma laje de cobertura, aproximadamente 18,00 metros, fazendo com que nesse ponto a seção seja fechada. Observa-se na Tabela 3 velocidades negativas nas seções 8, 9 e 10. Cabe ressaltar que ao analisar os resultados em todos os passos de tempo notou-se que as velocidades negativas iniciaram-se em um determinado passo de tempo ($t = 50,30$ minutos), mantendo-se negativas por um intervalo de tempo e retornando ao valor positivo novamente ($t = 87,62$ minutos). As velocidades negativas ocorreram no intervalo de tempo próximos àqueles onde a seção transversal de saída (jusante) fica “afogada”, ou seja, onde a capacidade de escoamento da seção é menor que a vazão que nela esteja escoando, provocando um efeito de remanso no escoamento (Sartos, 1999). Após esse tempo, começa a haver um equilíbrio entre a vazão que entra na seção com a que sai da mesma, tornando as velocidades positivas novamente; a capacidade de escoamento da calha volta ao normal.

Traçou-se o perfil hidrodinâmico longitudinal dos trechos do córrego do Retiro Saudoso para o tempo $t = 55,15$ minutos. A figura 4 mostra o perfil longitudinal bem como as cotas do fundo, da rua e o nível da água em cada seção.

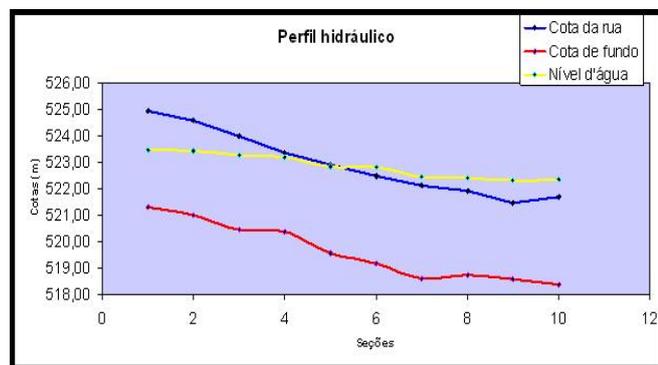


Figura 4: Perfil Hidráulico para o canal em estudo. Vazão de 115 m³/s. $t = 55,15$ minutos.

Nas seções próximas ao entroncamento dos córregos Ribeirão Preto e Retiro Saudoso, o extravasamento que aí ocorre faz com que as águas percorram as marginais no sentido oposto ao escoamento natural do curso d'água,

inundando assim grande parte da Avenida Francisco Junqueira, como mostra a Figura 5. Observa-se, ainda, na Figura 4, que o extravasamento do canal inicia-se próximo à seção 5.



Figura 5: Inundação na junção dos córregos Retiro Saudoso e Ribeirão Preto (2002). Fonte: Secretaria de Planejamento e Gestão Ambiental de Ribeirão Preto.

A área estimada de inundação, ver Figura 6, para o passo de tempo $t = 55,15$ minutos, foi de 156.313,47 m² o nível d'água atingiu à cota 522,36 m.

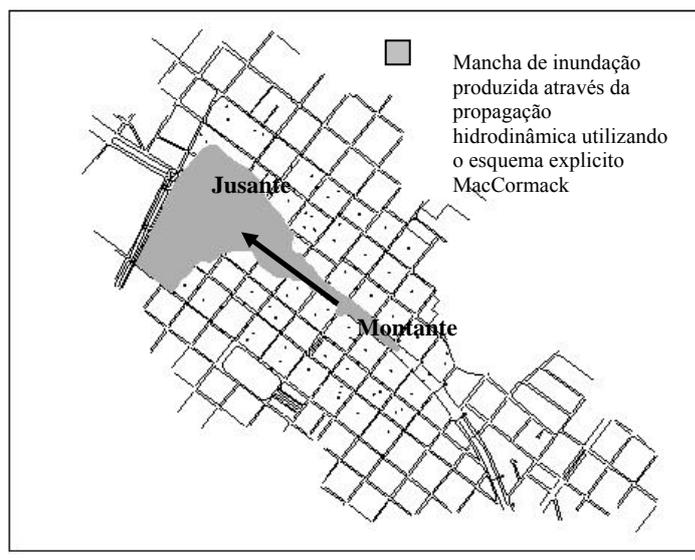


Figura 6: Área estimada de inundação com aplicação do modelo. Tempo de propagação = 55,15 minutos

Fez-se comparação da mancha de inundação estimada pelo modelo apresentado no presente trabalho com a área mapeada por Pires (1997), que foi estimada em 147.358,74 m², considerando as mesmas características geométricas e hidráulicas e mesmo hidrograma afluente.

Verificou-se que a mancha estimada por este modelo é maior que a de Pires (1997) a partir da seção 6 até a jusante do trecho. Este comportamento era esperado, pois o modelo considera somente a água dentro do canal. Isto faz com que o nível de água seja maior, consequentemente projetando uma maior área de inundação.

5 – CONCLUSÕES

Desenvolveu-se, neste trabalho, um modelo de propagação de enchentes empregando as equações completas de Saint Venant, discretizadas pelo método de diferenças finitas de MacCormack. O modelo assume que o escoamento é unidimensional, ignora as perdas de carga localizadas e não considera o armazenamento lateral dos canais. As mudanças de geometria das seções foram tratadas como condição de contorno interna.

O modelo foi testado em um trecho do córrego Retiro Saudoso, em Ribeirão Preto, SP, para diversas condições hidráulicas e hidrológicas. Os resultados foram comparados ao modelo de Pires (1997).

Ressaltam-se os seguintes aspectos sobre as características do modelo e as aplicações realizadas: (1) Não há limite de seções a serem consideradas como dado de entrada; (2) o modelo re-ajusta o passo de tempo, garantindo sua estabilidade numérica; (3) o tempo computacional necessário para se rodar o programa foi bastante curto, para os números de seções e tempos considerados; (4) não há necessidade de grandes alocações na memória do micro computador, sendo necessário apenas alguns kbytes de espaço; (5) o modelo de propagação hidrodinâmico mostrou-se estável quando da modificação das declividades a fim de se obter velocidades mais elevadas, tendendo a um escoamento supercrítico; (6) a estimativa da mancha de inundação mostrou-se maior que aquela produzida pelo modelo de Pires (1997), por considerar, nesta pesquisa, a vazão apenas dentro da calha do córrego. Esta diferença em termos de área inundada atingiu aproximadamente 6,07%; (7) admite-se que o modelo fornece uma boa estimativa preliminar de área de inundação; (8) o modelo é relativamente simples de ser operado; (9) a geração do mapa é muito sensível ao levantamento topográfico, devendo-se representar o terreno de forma cuidadosa para minimizar erros.

Em função do exposto, a conclusão maior é de que o estudo das áreas de enchentes urbanas relacionando políticas públicas e o processo de uso e ocupação do solo tem caráter multidisciplinar, devendo envolver profissionais de diversas áreas tais como: hidrologia; hidráulica; saneamento básico e ambiental; geologia; sensoriamento remoto; arquitetura e urbanismo; entre outras.

Ao apresentar uma ferramenta que estime, mesmo que preliminarmente às áreas sujeitas à inundação, após a criação de um cadastro técnicos dessas áreas, o poder municipal poderá tomar providências no que diz respeito a: (a) Re-locação dos moradores e ou pontos de comércio das áreas impróprias para a proteção da população contra as enchentes urbanas e, nas áreas não ocupadas, prever usos possíveis como lazer e recreação por meio de parques ou outros usos; (b) em novos loteamentos e ocupações, respeitar as faixas de várzeas dos rios; (c) elaboração de zoneamento das áreas de várzeas, definindo os usos compatíveis, considerando os aspectos hidrológicos, hidráulicos, topográficos e geomorfológicos; (d) promover uma maior integração entre instituições públicas e as

comunidades que vivem em áreas sujeitas a inundação através da melhoria operacional da defesa civil.

De um modo geral, o método proposto mostra-se uma boa ferramenta aos órgãos técnicos municipais em estimar preliminarmente o mapeamento das áreas sujeitas a inundação e assim ajudar em um planejamento ou re-planejamento dessas áreas, atingindo assim o objetivo proposto no capítulo 3. Recomenda-se que se dê seguimento ao aprimoramento da metodologia utilizando-se outras ferramentas e interfaces, como por exemplo, a relação com a área viva de escoamento, a fim de garantir sempre que possível a maior proximidade entre os resultados obtidos e o observado. Sugere-se, também, maior número de aplicações do modelo com o objetivo de acumular experiência em mapeamento de inundações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBASSA, A.P. Simulação do Efeito da Urbanização sobre a Drenagem Pluvial da Cidade de São Carlos, SP. EESC-USP (1991). Tese de Doutorado.
- CHAUDHRY, M.H. Open channel flow. Prentice Hall, New Jersey, 1993.
- CHAUDHRY, M.H. et al. Simulation of one-dimensional dam-breach flows. *Journal of Hydraulic Research*, v. 25, n.1: 41-51, 1987.
- ___ Implicit methods for two-dimensional unsteady free-surface flows. *Journal of Hydraulic Research*, v. 27, n.3: 321-332, 1989.
- [5] ___ Explicit methods for two-dimensional unsteady free-surface. *Journal Hydraulic Engineering*, v.116, n.8: 1013-1034, 1990.
- ___ Numerical simulation of hydraulic jump. *Journal Hydraulic Engineering*, v.117, n.9: 1195-1211, 1991.
- CHOW, V.T. – Handbook of Applied Hydrology. McGraw-Hill, New York, 1964.
- DAEE (Departamento de Água e Energia Elétrica). Plano Diretor de Macro-drenagem de Ribeirão Preto. Março de 2002.
- NAVARRO, P.G. e SAVIRON, J.M. MACCORMACK'S method for the numerical simulation of one-dimensional discontinuous unsteady open channel flow. *Journal of Hydraulic Research*, v. 90, n.1, pp. 95-105, 1992.
- NEVES, L.A. A comparação entre duas condições de contorno num modelo não permanente unidimensional, aplicado ao esvaziamento de um canal retangular. Tese de Doutorado apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo na área Hidráulica e Saneamento, 1999.
- PIRES, A.A.O. Mapeamento de áreas urbanas de inundação. Dissertação apresentada à Universidade Federal de São Carlos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia com ênfase em Engenharia Urbana, São Carlos, 1997.
- PORTO, R.M. Hidráulica Básica. São Carlos: EESC/USP, 540p, 1998.
- SARTOS, J. Simulating the influence of backwater effects in sewer systems using hydrological model components. *Water Science & Technology*, v. 39, n.9, p. 145-152, 1999.