

## VI-209 - ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE CHEIAS, E SUAS CONSEQUÊNCIAS NAS QUESTÕES AMBIENTAIS DE RIOS URBANOS

**Patrícia Freire Chagas<sup>(1)</sup>**

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Ceará - UFC. Mestre em Engenharia Civil – Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Doutora em Engenharia Civil – Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. Pesquisadora pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (PNPD/CAPES) no Centro de Tecnologia (LARHISA) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

**Arthur Mattos<sup>(2)</sup>**

Bacharel em Meteorologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro/Inst. Geociências. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela USP/EESC. Doutor em Hidráulica e Saneamento pela USP/EESC. Professor Adjunto do Centro de Tecnologia (LARHISA) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua São João 1233 apto 1901 – Bl. A - Lagoa Seca - Natal - RN - CEP: 59.022-390 - Brasil - Tel: (84) 3213-4870 - e-mail: [pfchagas@yahoo.com](mailto:pfchagas@yahoo.com)

**Endereço<sup>(2)</sup>:** Rua DR. ORLANDO DE AZEVEDO, 1995 – Capim Macio – Natal - RN - CEP: 59.082-050 - Brasil - Tel: (84) 32075906 / 3215-3775 - e-mail: [armattos@ct.ufrn.br](mailto:armattos@ct.ufrn.br)

### RESUMO

O objetivo desta pesquisa é de estudar a propagação de uma onda de cheia, em rios naturais, mediante a aplicação do PROGRAMA QUALYRISK, escrito em linguagem FORTRAN, com base nos seus parâmetros hidráulicos e hidrológicos. Desta forma a pesquisa procura avaliar suas consequências nas questões ambientais de rios urbanos. Para a solução das Equações de Saint Venant foram empregadas o Método das Diferenças Finitas, com esquema explícito. Os resultados mostram que elementos como celeridade e amplitude da onda de cheia são fortemente influenciados pelo coeficiente de rugosidade. Por exemplo, considerando a entrada de uma onda em um canal, com uma determinada declividade, quanto maior for o coeficiente de rugosidade, menor é a celeridade da onda e menor é a amplitude da mesma.

**PALAVRAS-CHAVE:** Propagação de Onda de Cheia, Modelagem Matemática, Questões Ambientais, Rios Urbanos.

### INTRODUÇÃO

Em muitas ocasiões, é importante saber como se comporta uma onda de cheia, em rios naturais. A definição de áreas inundáveis relacionadas a cheias naturais é uma ferramenta importante na elaboração de planos de ação emergencial. Historicamente, o objetivo dos cálculos de propagação de cheias ao longo de rios foi prever a magnitude e o tempo de ocorrência de vazões para que pudessem ser realizadas ações para proteger as vidas de pessoas e minimizar prejuízos materiais.

Para o desenvolvimento do tema e apresentação de processos metodológicos de propagação, é conveniente, dadas as suas devidas peculiaridades, mostrar como se dá esse processo de propagação de ondas de cheias, em rios naturais, com base nos seus parâmetros hidráulicos e hidrológicos. Os modelos hidráulicos-hidrológicos são construídos utilizando-se as equações da continuidade e da quantidade de movimento na sua forma completa ou simplificada.

As equações da continuidade e quantidade de movimento, deduzidas por Saint Venant, são alicerce para modelar o escoamento em rios e canais. Através das equações de Saint Venant podem ser deduzidos modelos que são classificados como: (i) hidrodinâmicos, que utilizam as equações em sua forma mais completa; (ii) de difusão, que não consideram os termos de inércia; (iii) de onda cinemática, não consideram os termos de inércia, nem os termos de pressão; (iv) e de armazenamento, que levam em conta apenas os efeitos de armazenamento do escoamento.

## METODOLOGIA UTILIZADA

Para este trabalho, desenvolveu-se um modelo hidrodinâmico que possibilitou a determinação das variáveis de controle, como vazão, velocidade, profundidade e área molhada, nas várias seções de um rio natural. A partir da formulação básica e das condições iniciais e de contorno, a construção do modelo é finalizada com o desenvolvimento de um modelo numérico, para resolver as Equações Diferenciais de Saint-Venant e determinar os campos de escoamentos no tempo e no espaço.

A acumulação d'água em um trecho de rio é mostrada simplificada na figura abaixo, onde é possível identificar a cunha de armazenamento.

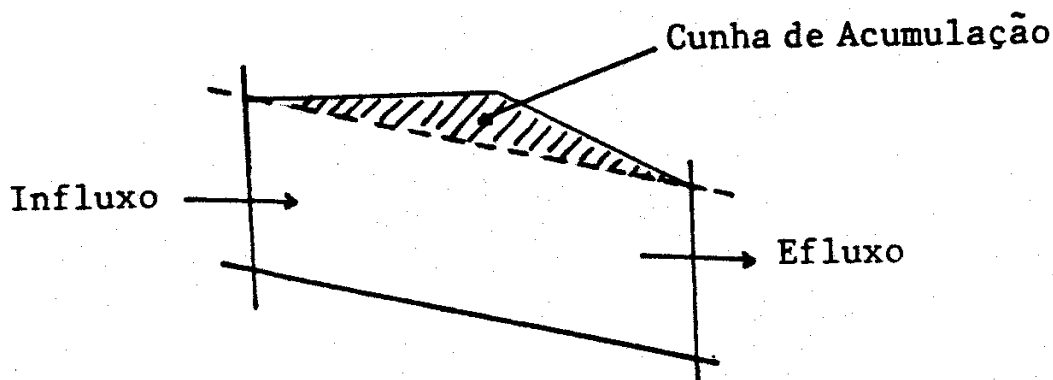


Figura 1: Acumulação de água em um trecho de rio.

## MODELO HIDRODINÂMICO PARA UM SISTEMA HÍDRICO

Para avaliar o comportamento da propagação de uma onda de cheia, em função dos parâmetros hidráulicos de um rio, é necessário encontrar uma solução para as equações de Saint-Venant e, assim, verificar como esses parâmetros influenciam a propagação de uma onda dinâmica.

Neste processo são observadas algumas condições fundamentais. Considera-se o escoamento unidimensional, ao longo de todo o campo de estudo considerado. Assim, a equação do movimento é calculada, apenas na direção  $x$ , ao longo do eixo longitudinal do canal principal. A pressão tem uma distribuição hidrostática. O fluido é incompressível e a densidade constante. As equações de Saint-Venant são descritas pela equação da continuidade e pela equação do movimento.

- **Equação da continuidade**

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

(1)

- **Equação da quantidade de movimento**

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (Q^2 / A)}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial y}{\partial x} - S_0 \right) + gAS_f = 0$$

(2)

Onde:  $x$  – distância longitudinal ao longo do canal;  $t$  – tempo;  $A$  – área da seção transversal do escoamento;  $q$  – entrada lateral de vazão por unidade de comprimento do canal;  $y$  – profundidade da água no canal;  $S_0$  – declividade de fundo do canal;  $S_f$  – declividade de linha de energia;  $B$  – largura do canal, na superfície da água;  $g$  – aceleração da gravidade.

- As condições iniciais são:

$$Q(x,0)=Q_0$$

$$A(x,0)=A_0$$

Onde:  $Q_0$  é a descarga inicial para determinados escoamentos, e  $A_0$  é a seção transversal inicial.

- As Condições de contorno de montante são:

$$Q(0,t) = f(t), \text{ para } 0 < t < t_p$$

$$Q(0,t) = g(t), \text{ para } t_p < t < t_b$$

$$Q(0,t) = h(t), \text{ para } t > t_b$$

Onde  $t_p$  é o tempo de pico e  $t_b$  é o tempo de base.

Geralmente, representa-se uma onda de cheia através de uma função periódica, por exemplo, senoidal. Neste caso, as equações (1) e (2) podem ser transformadas em apenas uma equação, do tipo:

$$Q(0,t) = Q_0 \left( 1 + a \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right)$$

(3)

Onde:  $a$  representa a amplitude da onda; e  $T$  representa o período da onda de entrada.

Estas equações, não lineares, contêm em sua representação matemática todos os elementos que, direta ou indiretamente, influenciam no processo de escoamento do fluido no canal. Através delas, podem-se prever os efeitos da presença de tributários, da variação da seção do canal, da mudança na função de resistência, nas paredes e no fundo do canal, da função de declividade de fundo do canal, da presença de áreas de inundações, entre outros fatores. Basta que, para isso, a função seja modelada adequadamente. Evidentemente, a modelagem de tais funções implica em significativos esforços computacionais no processo de solução das equações (DOODGE; NAPIARKOWSKI, 1987).

Para solução das equações de Saint-Venant foi usada uma metodologia simplificada proposta por Keskin (1997), onde a principal simplificação é de considerar a calha do rio retangular. Assim, tem-se:

$$A = B \cdot y$$

(4)

Diferenciando a equação (4), e considerando a largura constante, tem-se:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{1}{B} \frac{\partial A}{\partial x}$$

(5)

Substituindo a equação (5) na (2), tem-se:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2 \frac{Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} + \left( \frac{gA}{B} - \frac{Q^2}{A^2} \right) \frac{\partial A}{\partial x} + gA(S_f - S_0) = 0 \quad (6)$$

A velocidade no Sistema Internacional, SI, é dada pela equação de Manning:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S_f^{1/2}$$

(7)

Onde  $R$  é o raio hidráulico e  $n$  é o coeficiente de rugosidade. Para as condições de estudo, a seguinte relação pode ser estabelecida:

$$R = A / P$$

(8)

$$P = 2y + B$$

(9)

Dada as equações (8) e (9) e obtendo-se as derivadas parciais, tem-se:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = 2 \frac{\partial y}{\partial x}$$

(10)

$$\frac{\partial R}{\partial x} = \frac{1}{P} \left( 1 - \frac{2A}{BP} \right) \frac{\partial A}{\partial x}$$

(11)

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{2}{3} \frac{1}{n} R^{-1/3} S_f^{1/2} \frac{\partial R}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{1}{n} S_f^{1/2} R^{2/3} \frac{\partial S_f}{\partial x}$$

(12)

Como  $\frac{\partial S_f}{\partial x}$  é muito pequeno com relação aos outros termos, o segundo termo do lado direito da equação (12) pode ser desprezado, e a equação pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{2}{3} \frac{1}{n} R^{-1/3} S_f^{1/2} \frac{\partial R}{\partial x}$$

(13)

Definindo a vazão como  $Q=VA$ , pode-se obter a derivada parcial:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial V}{\partial x} A + V \frac{\partial A}{\partial x}$$

(14)

Substituindo as equações (10), (11) e (13) na equação (14) e reorganizando-a, tem-se:

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \frac{1}{V \left( \frac{5}{3} - \frac{4R}{3B} \right)} \frac{\partial Q}{\partial x}$$

(15)

A formulação final do modelo, substituindo a equação (15) na equação (12), após algumas simplificações, resume-se em:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \alpha \frac{\partial Q}{\partial x} + \beta = 0$$

(16)

na qual:

$$\alpha = 2 \frac{Q}{A} + \frac{\frac{gA}{B} - \frac{Q^2}{A^2}}{\frac{Q}{A} \left( \frac{5}{3} - \frac{4R}{3B} \right)}$$

(17)

e

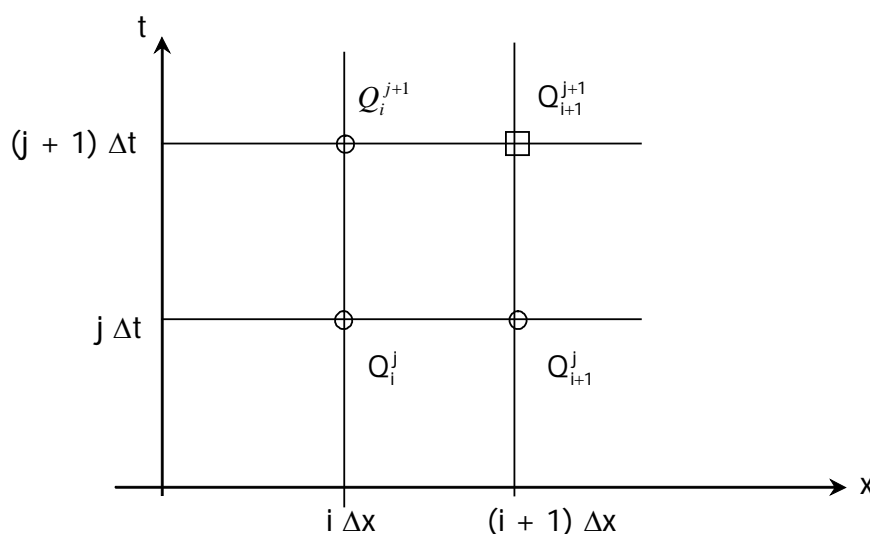
$$\beta = gA(S_f - S_0)$$

(18)

Neste modelo hidrodinâmico, serão determinadas duas variáveis dependentes. A primeira é a área da seção transversal, ao longo do canal, para cada intervalo de tempo. A segunda é a vazão ao longo do canal para as mesmas condições anteriores. Como a investigação exige o conhecimento de duas variáveis dependentes, há necessidade de se ter duas equações diferenciais. Isto é resolvido através da solução das equações (16) e (1).

Com respeito à solução numérica das equações diferenciais da onda dinâmica, utilizou-se o Método das Diferenças Finitas com um esquema explícito. O domínio da função desejada é discretizado através de uma malha ortogonal bidimensional,  $x-t$ . A malha é formada por linhas traçadas paralelamente ao eixo dos  $x$ , tomado ao longo do canal e ao longo da corrente, e por linhas traçadas paralelamente ao eixo dos tempos. Cada nó da malha  $x-t$  é identificado por um par de índices  $(i, j)$ . O índice  $i$  inferior identifica a posição do nó ao longo do eixo dos  $x$ , índice espacial, e o índice  $j$  superior identifica a posição do mesmo nó ao longo do eixo dos tempos, índice temporal.

As linhas paralelas ao eixo dos tempos estão espaçadas entre si de  $\Delta x$  e as linhas paralelas ao eixo dos  $x$  estão espaçadas entre si de  $\Delta t$ . Os valores das incógnitas no instante  $(j+1)\Delta t$  são obtidos sequencialmente ao longo da linha do tempo, a partir dos valores das variáveis anteriormente calculados para o instante  $t$ . Assim, são considerados conhecidos os valores da vazão  $Q_i^{j+1}$  e  $Q_{i+1}^j$ , enquanto que o valor desconhecido e, portanto, a determinar, é a vazão  $Q_{i+1}^{j+1}$ . A Figura 2 exemplifica o esquema descrito.



**Figura 2: Diferenças finitas para solução da equação de propagação da onda dinâmica (Chow, 1988).**

De acordo com a discretização proposta por Ven Te Chow (1988) a formulação da derivada espacial de  $Q$  é encontrada através da relação:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta x}$$

(19)

Da mesma forma, a derivada temporal de Q é definida por:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^j}{\Delta t}$$

(20)

Assim, a equação (16) pode ser escrita na forma,

$$Q_{i+1}^{j+1} = \frac{Q_{i+1}^j + \frac{\Delta t}{\Delta x} \alpha_m Q_i^{j+1} - \beta_m \Delta t}{1 + \alpha_m \frac{\Delta t}{\Delta x}}$$

(21)

Calculado o valor de  $Q_{i+1}^{j+1}$  substitui-se na equação (1) e calcula-se  $A_{i+1}^{j+1}$  através da formulação:

$$A_{i+1}^{j+1} = A_{i+1}^j - \frac{\Delta t}{\Delta x} (Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}) + \frac{\Delta t}{2} (q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^j)$$

(22)

## RESULTADOS OBTIDOS

Para verificar a eficiência do modelo hidrodinâmico e do programa computacional na análise da vazão, comparou-se os resultados gerados pelo programa desenvolvido com os resultados do modelo proposto por Akan e Yen (1981 apud Keskin, 1997). Nesta simulação considerou-se um canal retangular com comprimento de 2000 m, declividade de fundo de 0,0005m/m; coeficiente de rugosidade de 0,0138 e largura do canal de 5 m. Na discretização em x, dividiu-se o canal em 20 trechos, com  $\Delta x = 100m$ , e simulou-se para 150 intervalos de tempos com  $\Delta t = 10s$ , totalizando um tempo de 1500 segundos. Para simular a propagação de onda considerou-se uma hidrógrafa triangular com as seguintes vazões:  $Q(0,0) = 3m^3/s$ ,  $Q(0,10min) = 12 m^3/s$  e  $Q(0,20min) = 3 m^3/s$ .

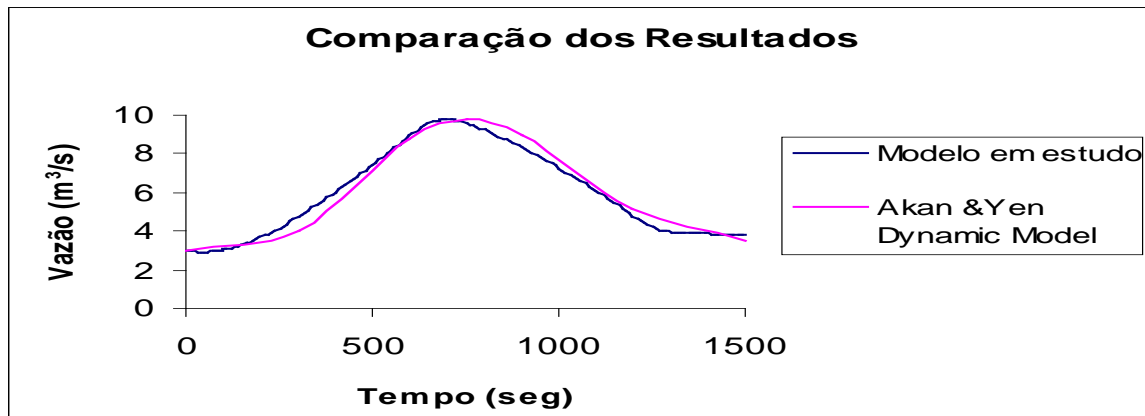


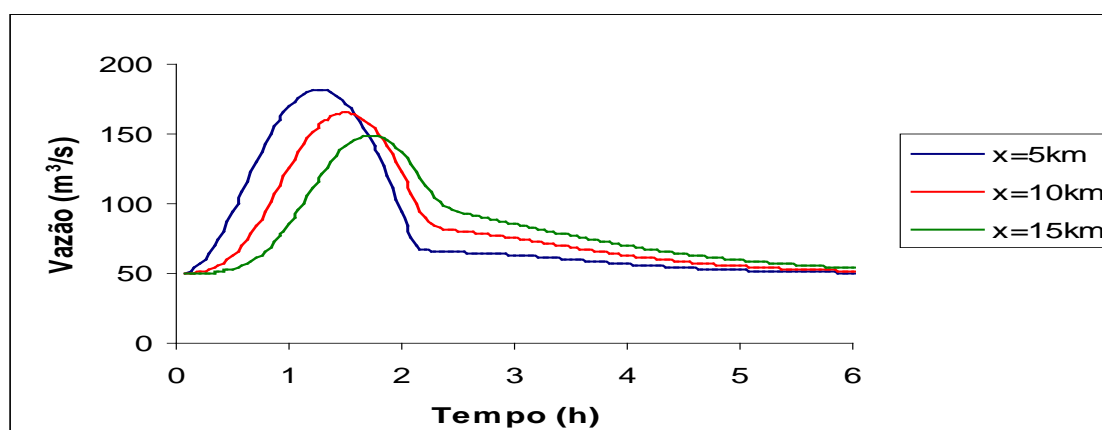
Figura 3: Comparação entre os resultados do modelo em estudo com o modelo de Akan e Yen (Keskin, 1997).

A Figura 3 apresenta a comparação descrita acima. Através dela, verifica-se que o resultado do modelo proposto apresenta resultados muito semelhantes ao modelo dinâmico de Akan e Yen, o que garante a validade da formulação empregada e a lógica de programação para os objetivos deste estudo.

Depois da verificação da eficiência do modelo hidrodinâmico desenvolvido, iniciou-se o processo de simulações para estudo da vazão e profundidade d'água no canal, considerando a entrada de uma onda dinâmica.

Nas simulações seguintes, considerou-se um canal retangular com comprimento de 50.000 m. A malha x-t foi discretizada em 50 trechos de 1000 m de comprimento cada, na direção longitudinal do rio, e em 500 intervalos de tempo de 150 seg, perfazendo um tempo máximo de 1250 min. A vazão inicial é de  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  e os valores da declividade do canal, da rugosidade e da vazão inicial são definidos de acordo com a simulação desejada.

A Figura 4 mostra a propagação de uma onda dinâmica senoidal para diferentes distâncias ao longo do canal, em função do tempo. Os dados usados foram: coeficiente de rugosidade igual a 0,0138; declividade do canal igual a 0,0001 m/m e vazão inicial igual a  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ . Os resultados desta figura mostram as hidrógrafas em três pontos: a 5 km, a 10 km e a 15 km da origem do canal. Os valores máximos da vazão, considerando as três diferentes distâncias, correspondem a 181,97; 165,01;  $149,13 \text{ m}^3/\text{s}$ , cujos tempos de pico valem respectivamente 1:15; 1:30; 1:50 horas. Verifica-se que há, para os parâmetros hidráulicos considerados, uma redução na amplitude da onda dinâmica no tempo, o que caracteriza uma dissipação de energia. Este fato é decorrente, principalmente, da presença do atrito na equação da hidrodinâmica. Se considerássemos o modelo da onda cinemática, onde a função de atrito é controlada pelo fator gravitacional, tal dissipação poderia ser bem menor.



**Figura 4:** Hidrógrafas ao longo do tempo, para as distâncias 5km, 10km e 15km da origem do canal.

A Figura 5 mostra para os mesmos dados anteriores, a distribuição temporal das alturas. Através da figura percebe-se que a influência da onda é mais significativa nas proximidades da entrada do canal, onde a energia de propagação é mais intensa. Por exemplo, na observação da entrada de uma onda, tomando como ponto de referência x igual a 15 km, verifica-se que a profundidade máxima é inferior àquela alcançada na posição correspondente a 5 km do ponto de referência. Entretanto, após o tempo de pico, percebe-se que a profundidade a 15 km fica superior à profundidade a 5 km. Isto é explicado pelo fato da propagação da onda perder energia de propagação e, com isso, boa parte do volume d'água que entra no canal, em forma de onda, acaba se armazenando na calha do mesmo.

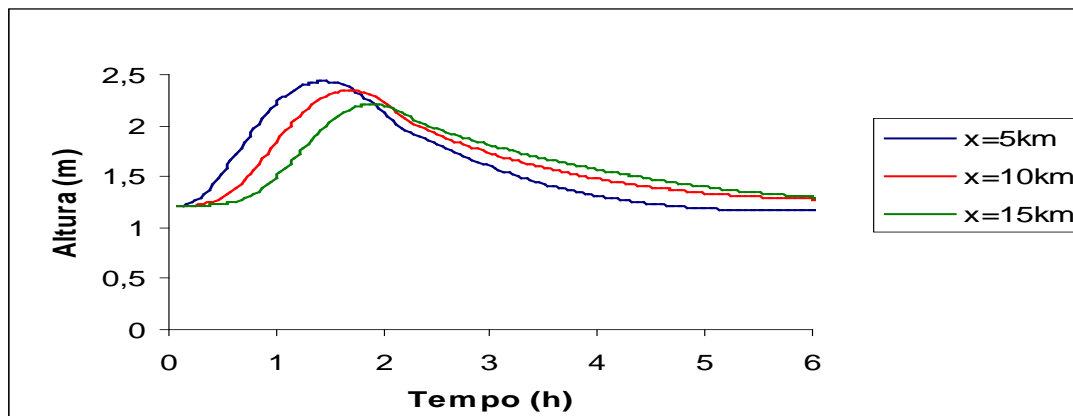


Figura 5: Comparação do comportamento das alturas do nível d'água, ao longo do tempo, para as distâncias 5km, 10km e 15km da origem do canal.

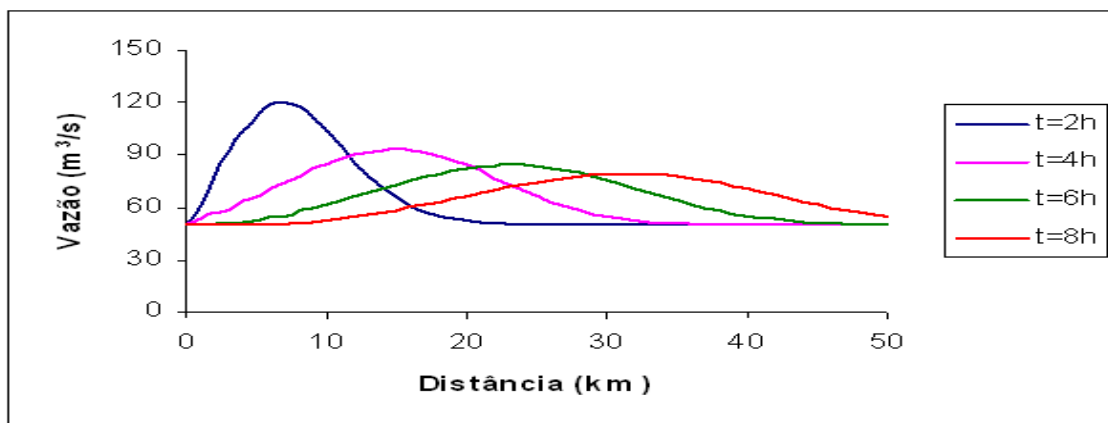


Figura 6: Propagação de uma onda dinâmica, ao longo do canal, para diferentes tempos, com  $n=0,05$  e  $S_0=0,0005$ .

A Figura 6 mostra os resultados da simulação da propagação de uma onda de cheia, para diferentes tempos, ao longo do canal. Neste caso, adotou-se  $S_0=0,0005$  e  $n=0,05$ . Os resultados mostram, de forma mais clara, a análise anterior. Através da figura, verifica-se que o pico de vazão diminui com o passar do tempo devido à influência do atrito na propagação da onda.

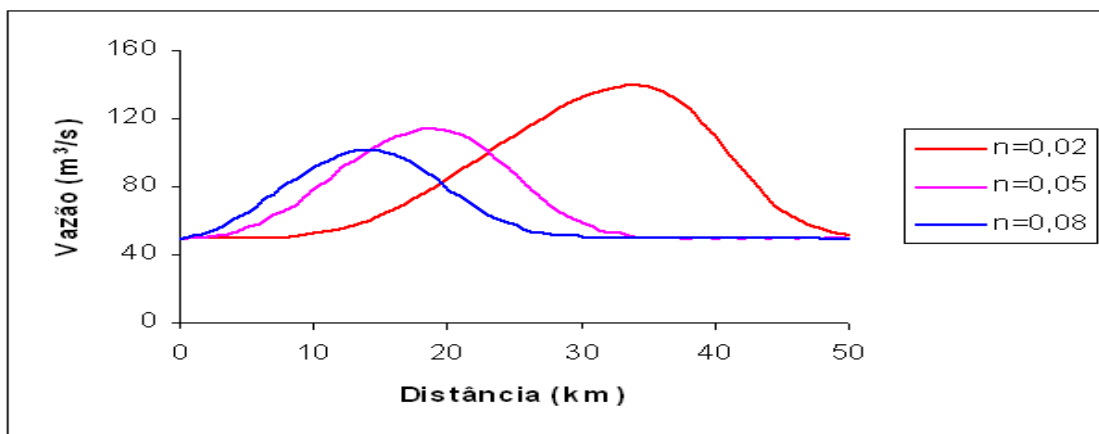


Figura 7: Propagação de uma onda dinâmica, ao longo do canal, em  $t=4h$ , para diferentes rugosidades e com  $S_0=0,001$ .



A Figura 7 mostra a propagação da onda dinâmica para diferentes rugosidades e considerando  $S_0=0,001$ . Comparando os resultados mostrados nessa figura verifica-se que quanto maior a rugosidade, maior é o processo de resistência ao escoamento e, conseqüentemente, a onda propaga-se mais lentamente. Os resultados mostram ainda que a amplitude da onda sofre redução com o aumento de  $n$ . Na figura 7 os picos da vazão para  $t=4h$ , são 140, 115 e 100  $m^3/s$ , para  $n$  igual 0,02; 0,05; 0,08 e ocorrem para  $x$  igual a 35, 20, 15 km, respectivamente.

## CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados, obtidos através da aplicação do programa computacional QUALYRISK, verificou-se que é possível estudar o comportamento de uma onda de cheia, para diferentes seções do rio, e diferentes tempos de propagação. O modelo numérico proposto mostrou-se eficiente, quando comparado com os resultados encontrados, na literatura, para diferentes metodologias de solução do modelo hidrodinâmico.

Através dos resultados, foi verificado que, ao longo do canal, uma onda dinâmica perde energia de propagação, causada, principalmente, pelo atrito do fluido com as paredes do canal. Isto pode ser verificado pela amplitude da onda para diferentes tempos e seções do canal. Ou seja, elementos como celeridade e amplitude da onda de cheia são fortemente influenciados pelo coeficiente de rugosidade. Por exemplo, considerando a entrada de uma onda em um canal, com uma determinada declividade, quanto maior for o coeficiente de rugosidade menor é a celeridade da onda e menor é a amplitude da mesma.

Assim, determinando os parâmetros hidráulicos do canal, podem-se avaliar as conseqüências ambientais nos rios urbanos a partir de mudanças em suas vazões e em suas profundidades. Com isso, é possível fazer um planejamento estratégico de como se comportar com eventos críticos nos sistemas hídricos em questão.

## AGRADECIMENTOS

Ao PNPd/CAPES pelo apoio financeiro para a realização do trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BAJRACHARYA, K. BARRY, D.A. Accuracy Criteria for Linearized Diffusion Wave Flood Routing. 1999. **Journal of Hydrology**, Elsevier Science, 195, p. 200-217, 1999.
2. CHAGAS, P. F. PERSPECTIVAS DA APLICAÇÃO DA TEORIA FUZZY PARA CÁLCULO DE RISCO EM SISTEMAS HIDRODINÂMICO. Tese doutorado. UFC, 2005.
3. CHOW, V. T. Applied Hydrology. New York: McGraw-Hill, 1988. 572p.
4. DOOGE, J. C. I.; NAPIORKOWSKI, J. J. The Effect of the Downstream Boundary Conditions in the Linearized Saint-Venant Equations. **Q. JI Mech. Appl. Math.**, Oxford University, v. 40, Pt. 2, 1987.
5. KESKIN, M. E. and AGIRALIOGLU, N. A Simplified Dynamic Model for Flood Routing in Rectangular Channels. **Journal of Hydrology**, 202, p. 302-314, 1997.
6. RIGHETTO, ANTONIO MAROZZI. Hidrologia e Recursos Hídricos. 1998. São Carlos: EESC/USP, 1998.
7. SILVA, R. C. V. da S.; MASCARENHAS, F. C. B.; MIGUEZ, M. G. **Hidráulica Fluvial**. v. I. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2003.