



XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

ANÁLISE DA VARIABILIDADE TEMPORAL DE BASE NA PROPAGAÇÃO DA ONDA CINEMÁTICA EM UM RIO

Maria Patrícia Sales Castro^{1} & Karyna Oliveira Chaves de Lucena² & Tayane de Lima Santos³ & Nosliana Nobre Rabelo⁴ Juliana Alencar Firmo de Araújo⁵ & Raquel Jucá de Moraes Sales⁶ & Silvia Helena Lima dos Santos⁷ & Patricia Freire Chagas⁸ & Raimundo Oliveira de Souza⁹*

Resumo – O Modelo da Onda Cinemática foi aplicado em um rio natural, para estudar a propagação de uma onda de cheia neste corpo hídrico. Esta pesquisa tem como objetivo analisar a variabilidade temporal de base na propagação de uma onda cinemática em um rio, verificando de que forma estes podem influir nos riscos de enchentes. Esse modelo é uma derivação do Modelo da Onda Dinâmica, a partir de simplificações nas Equações de Saint Venant, onde alguns termos são desprezados. No processo de solução das equações diferenciais, pertinentes ao modelos, foi usado o Método das Diferenças Finitas, sendo que o esquema de aproximação explícita foi aplicado para a onda cinemática. Para esta pesquisa, um programa computacional, em linguagem PYTHON, foi desenvolvido e permitiu que várias simulações fossem realizadas, para diferentes cenários encontrados nos rios naturais. A partir dos resultados gerados se observa que o coeficiente de rugosidade exerce influência no tempo de base da propagação da onda cinemática no tempo, tornando assim este modelo uma ferramenta viável para previsão de enchentes em áreas susceptíveis.

Palavras-Chave – Enchentes, Equação da Onda cinemática, propagação da onda.

ANALYSIS OF TEMPORAL VARIABILITY BASE OF THE KINEMATIC-WAVE FLOOD ROUTING IN RIVER

¹ *Doutoranda em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. Mestre em Saneamento Ambiental. E-mail: patricia.sales@gmail.com.

² Professora do Instituto Federal do Ceará (IFCE) – Campus Quixadá. Doutora e Mestre em Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará. E-mail: kk.oliveira.chaves@gmail.com.

³ Doutoranda e Mestre em Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará. E-mail: tyanedelimasantos@gmail.com.

⁴ Doutoranda em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. Mestre em Programa de Desenvolvimento. E-mail: nosliana_rabelo@hotmail.com.

⁵ Professora do Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS). Doutora em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. Mestre em Recursos Hídricos. E-mail: judiaraujo@yahoo.com.br.

⁶ Professora da Universidade de Fortaleza (UNIFOR). Doutora e Mestre em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. E-mail: raqueljuca@gmail.com.

⁷ Professora da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB). Doutora e Mestre em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. E-mail: silvia.santos@unilab.edu.br.

⁸ Pesquisadora e Engenheira civil pela Companhia de Águas e Esgotos do RN. Doutora e Mestre em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. E-mail: pfchagas@yahoo.com

⁹ Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (UFC). E-mail: rsouza@ufc.br.



XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS
26 de novembro a 01 de dezembro de 2017
Florianópolis- SC

Abstract – The Kinematic Wave was applied in a natural river, to study the propagation of a flood wave in this body of water. This research aims to analyze the temporal variability of base kinematic wave routing in a river, checking how these can influence the risk of flooding. Those models are getting from the Dynamic Wave Model, starting from simplifications in Saint Venant's Equations, where some terms are despised. In the process of solution of the differential equations, concerning with the model, the Finite Difference Method was used, and the explicit approach was applied for the kinematic wave. For this research, a computational program, in PYTHON language, it was developed. It allowed that some simulations could be made for different sceneries, normally, found in the natural rivers. From the results generated can be observed that the roughness coefficient influences the time base of wave propagation in time, making this model a viable tool for forecasting flooding in susceptible areas.

Keywords – Flooding, Kinematic wave equation, Flood routing.

1. INTRODUÇÃO

O entendimento dos processos de propagação de uma onda de cheia, em seu deslocamento em um curso d'água, é hoje um dos mais sérios problemas enfrentados por engenheiros e pesquisadores que trabalham com Engenharia de Recursos Hídricos. Este fenômeno, comum em vários países sejam estes países desenvolvidos ou subdesenvolvidos, é responsável por inúmeras tragédias, tendo em vista, em primeiro lugar, a sua alta imprevisibilidade e, além disso, a grande falta de planejamento das autoridades governamentais que não adotam uma política pública efetiva que proíba que grandes populações ocupem áreas de risco, propícias a enchentes.

Segundo Gomes (2006) o estudo de propagação de ondas de cheias, através de modelos matemáticos, tem se tornado uma alternativa na busca de soluções para esta classe de problema, tentando municiar os agentes gestores do planejamento urbano de melhores informações pertinentes aos problemas de enchentes. Para tal, há a necessidade de se buscar um conhecimento sustentável, capaz de fornecer subsídios consistentes no controle e ocupação dessas áreas.

Os modelos para estudo de onda de cheia podem ser usados para descrever A transformação de chuva torrencial em escoamento superficial sobre uma bacia hidrográfica, ou produzir uma hidrógrafa do escoamento e, então, considerar esta hidrógrafa como dado de entrada na extremidade a montante de um rio. Detalhes sobre esta metodologia se encontram expostos nos trabalhos de (CHOW, 1988) e (HENDERSON, 1966).

O tratamento matemático na solução das equações de Saint Venant ainda é bastante estudado. Várias simulações têm sido realizadas, com diversas situações de escoamento,



XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017
Florianópolis- SC

visando um completo entendimento desse processo hidráulico-hidrológico (BARRY e BAJRACHARYA, 1995). Embora já tenham sido feitas várias tentativas para resolver analiticamente essas equações, sua complexidade somente permitiu a obtenção de soluções aproximadas, com resultados bastante satisfatórios (CHALFEN e NIEMIEC, 1986).

O modelo mais simples é o modelo da onda cinemática, que despreza a aceleração local, a aceleração convectiva e os termos de pressão na equação da quantidade de movimento. Isto é, supõe que $S_0 = S_f$ e as forças de atrito e gravidade se compensam. (ANDRADE, 2003)

Smith (1980) estudou propagação de ondas de cheias usando o Modelo da Onda Cinemática. O autor desenvolveu vários testes, com o objetivo de avaliar o grau de precisão da solução da equação da onda cinemática, no que diz respeito aos processos de linearização da mesma. A performance dos Métodos das Diferenças Finitas, especificamente, neste caso, foi avaliada. Para a aplicação de métodos explícitos um fator de ponderação e um fator de atenuação de onda foram desenvolvidos. Uma análise bastante consistente sobre essas técnicas de solução dos modelos simplificados de onda de cheia foi apresentada.

Yen e Tsai (2001) estudaram a propagação de ondas de cheia, usando a onda cinemática e a onda de difusão, e observou que a onda sem inércia ou onda cinemática, que ignora os termos inerciais e convectivo na equação da quantidade de movimento, é uma simplificação da onda dinâmica completa.

A propagação de onda de cheias é descrita pelo sistema de equações de Saint-Venant. As simplificações das equações de Saint-Venant até a equação da onda cinemática é um método comumente utilizado para este tipo de aplicação. A equação da onda cinemática pode ser resolvida pelo método das diferenças finitas explícito. Para solução de suas respectivas equações diferenciais parciais foi desenvolvido um programa em linguagem PYTHON que permitiu simulações para diversos cenários a fim de avaliar o comportamento da onda cinemática para diferentes tempos de base e coeficientes de rugosidade.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo Porto (2006) as leis básicas que servem base para os estudos relativos aos transitórios hidráulicos em escoamentos livres, são a equação da continuidade (conservação da massa) e a equação dinâmica (equação da quantidade de movimento).

2.1 Equação da Continuidade

A primeira equação fundamental do escoamento em rios e canais é a equação da continuidade. (Andrade, 2006). Considerando um volume de controle na seção transversal de comprimento Δx muito pequeno, conforme Figura 1, temos que as vazões Q_1 e Q_2 não são necessariamente as mesmas, diferem na quantidade.

XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS
26 de novembro a 01 de dezembro de 2017
Florianópolis- SC

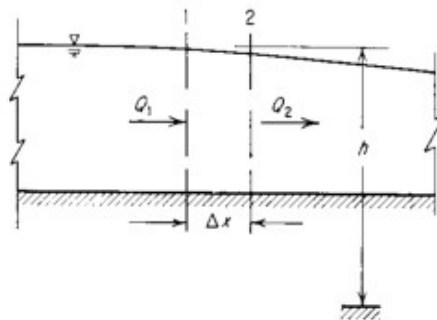


Figura 1 – Esboço para a definição da equação da continuidade

Sendo h a altura da superfície da água do volume de controle e o volume entre as seções 1 e 2 estão aumentando a uma taxa de $B \frac{\partial h}{\partial t} \Delta x$, onde B é a largura da superfície da água. Temos, a equação da continuidade é dada na sua forma diferencial por (Henderson, 1966):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots(1)$$

2.2 Equação da Quantidade de Movimento

O enunciado da equação da quantidade de movimento diz que o somatório das forças atuantes sobre um volume de controle é igual a soma da variação temporal da quantidade de momentum dentro do volume de controle e o fluxo total da quantidade de movimento através da superfície de controle. (Henderson, 1966). Logo, a equação da quantidade de movimento é dada na sua forma diferencial por:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \left(\frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + S_f \right) = 0 \dots\dots\dots(2)$$

Onde: Q é a vazão (m^3/s); x é o comprimento longitudinal (m); t é o tempo (s); A é a área da seção transversal do fluxo (m^2); y é a profundidade da água no canal (m); S_0 é a declividade de fundo do canal (m/m); S_f é a declividade de linha de energia; e g é a aceleração da gravidade (m^2/s).

Segundo Cunge *et.al.*(1980) o sistema formado pelas equações da continuidade (equação 1) e da quantidade de movimento (equação 2) é conhecido como equações de Saint-Venant, nome este dado ao seu formulador. Se os termos referentes as forças de pressão e de inercia na equação de Saint-Venant são desprezíveis, a equação será convertida em equação da onda cinemática, dada pela equação:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C(Q) \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots(3)$$



XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS
26 de novembro a 01 de dezembro de 2017
Florianópolis- SC

Onde: x (m) é a distância a jusante, t (s) de tempo, C (m.s-1) é uma função não linear da vazão Q (x, t) (m³.s-1) e geralmente conhecido como celeridade, onde $C(Q) = Q^{1-\beta} / \alpha\beta$. Considerando que não há contribuição lateral $q_l = 0$.

3. METODOLOGIA

Para discretizar o problema, considere uma pequena malha mostrada na Figura 2. De acordo com a figura, a linha é representada pelo índice i e a coluna pelo índice j . Os passos no espaço e no tempo são respectivamente iguais a Δx e Δt . (CHOW, 1988)

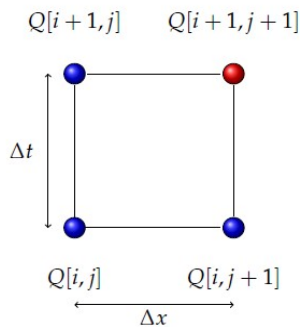


Figura 2 – Malha para discretização da onda cinemática

O ponto em vermelho significa que o valor é desconhecido, os pontos na cor azul significam que os valores são conhecidos. De acordo Gomes (2006) as derivadas discretizadas no tempo e no espaço são dadas:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \approx \frac{Q[i+1, j+1] - Q[i, j+1]}{\Delta t} \dots\dots\dots(4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \approx \frac{Q[i+1, j+1] - Q[i+1, j]}{\Delta x} \dots\dots\dots(5)$$

$$c(Q) \approx \frac{1}{\alpha\beta} \left(\frac{Q[i+1, j] + Q[i, j+1]}{2} \right) \dots\dots\dots(6)$$

Substituindo as equações (4), (5) e (6) na equação (3) e rearranjando temos:

$$Q[i+1, j+1] = \frac{Q[i, j+1] + \gamma Q[i+1, j]}{1 + \gamma} \dots\dots\dots(7)$$

Os códigos desenvolvidos neste trabalho foram feitos no Python com o intuito de resolver as equações diferenciais envolvidas no modelo matemático.

Para cada declividade do leito foi realizada uma simulação onde se variou o tempo de base da onda, com o intuito de estudar o comportamento do campo de escoamento, ou seja, onde a variabilidade afeta a vazão do mesmo.

Para cada simulação foi utilizado um canal natural retangular com as seguintes características: comprimento igual a 50 km, largura de 50 m, número de Manning (n) de 0,01;

XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS
26 de novembro a 01 de dezembro de 2017
Florianópolis- SC

0,05; 0,1 e uma vazão inicial uniforme (Q_0) de 50 m³/s. A variação temporal da vazão é expressa pela função senoidal (CHAPRA, 1997):

$$Q = Q_0 \left(1 + k \cdot \text{sen} \frac{\pi t}{T} \right), \text{ para } 0 \leq t \leq T \text{ e, } Q = Q_0, \text{ para } t < T$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A primeira simulação foi realizada para o canal natural conforme descrito no item anterior. Para este cenário, a declividade foi de $S_0=0,001\text{m/m}$, $n = 0,01$ e tempo de base de 2 hr. Assim é possível, entender como a vazão da onda cinemática se comporta ao longo do tempo de passagem no canal.

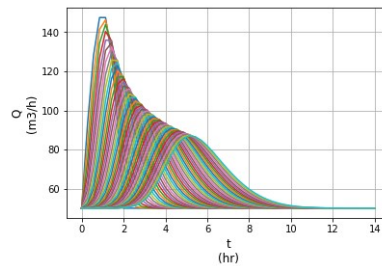


Figura 3 - Hidrograma para onda cinemática vazão em função do tempo, para valores fixos de $S_0 = 0.0001$, $n = 0,01$ e tempo de base = 2h

No gráfico da Figura 3 cada curva é traçada mantendo x constante, ou seja, a primeira curva é obtida para $x_0 = 0$, a segunda curva é obtida para $x = x_0 + \Delta x$, e assim por diante.

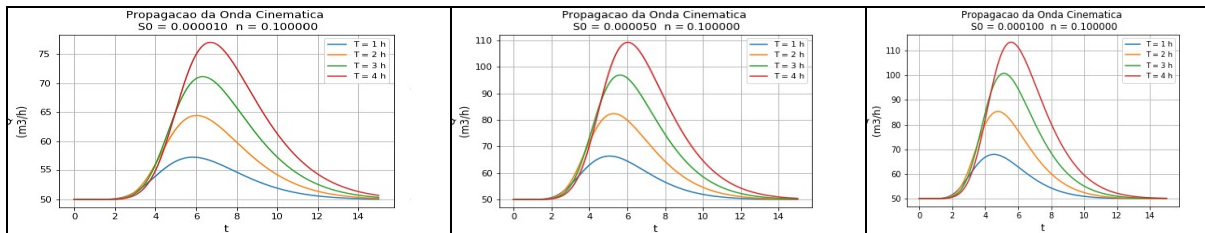


Figura 4 - Hidrograma para onda cinemática, na seção 10 km em função do tempo de base

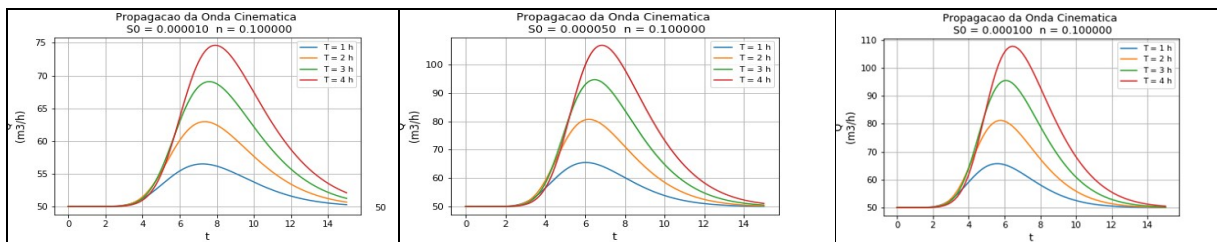


Figura 5 - Hidrograma para onda cinemática, na seção 30 km em função do tempo de base

XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017
Florianópolis- SC

As Figuras 4 e 5, para os diferentes tempos de base, os resultados mostraram a suave elevação da vazão no momento que a onda chega à seção considerada. Esta elevação prossegue até atingir seu pico que corresponde ao momento em que a onda de cheia atinge o seu máximo, retornando em seguida até atingir o seu valor inicial antes da entrada da onda de cheia. É importante destacar a característica da onda cinemática onde o processo de amortecimento nos seus picos é muito pequeno. Isto é explicado pelo fato de que a onda cinemática não prevê processo de amortecimento. Os resultados mostram que quanto maior for a declividade maior será a celeridade da onda e menor será a amplitude da mesma.

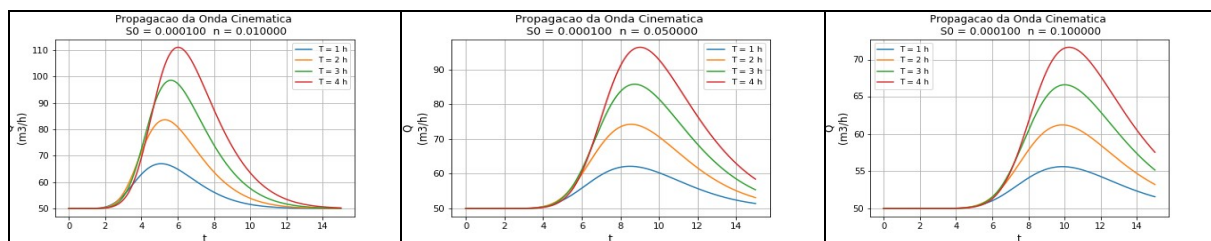


Figura 6 - Hidrograma para onda cinemática, na seção 10 km, para diferentes números de Manning (n) em função do tempo de base

Na Figura 6, é possível verificar para os diferentes tempos de base, que os resultados de uma simulação para três coeficientes de rugosidade mantendo os demais parâmetros. Neste caso, os valores para “n” foram 0,1; 0,05 e 0,01. Os resultados mostram que este parâmetro tem uma influência maior sobre os modelos de onda cinemática. No caso da onda cinemática o coeficiente de rugosidade atua tanto na velocidade de propagação como na amplitude da onda de cheia. Os resultados mostram que quanto maior for a rugosidade menor é a celeridade da onda.

5. CONCLUSÃO

O programa computacional desenvolvido para resolver equações diferenciais, responde com eficiência aos objetivos da pesquisa, apresentando excelentes resultados para as mais diversas situações práticas encontradas no seu campo de trabalho.

Os resultados apresentaram que a rugosidade apresenta papel importante na propagação da onda cinemática. Os mesmos mostram que quanto maior o valor do coeficiente de rugosidade menor será a celeridade da onda ao longo da extensão do rio, aumentando os riscos de enchentes.

REFERENCIAS

- a) ANDRADE, C. F. (2003). *Aplicação dos Modelos Hidrodinâmicos para Estudar Índices de Poluição em Rios Urbanos, em Função dos Seus Parâmetros Hidráulicos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.



XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

- b) ANDRADE, C. F. (2006). *Estudo de planícies de inundação através da análise dos parâmetros hidráulicos do canal principal e sua influência na avaliação do risco fuzzy de enchentes*. Tese – Universidade Federal do Ceará, Programa de pós-graduação em Engenharia Civil - Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, pp 56-66.
- c) BARRY, D. A.; BAJRACHARYA, K (1995). On the Muskingum-Cunge Flood Routing Method, *Environment International*, Pergamon, v. 21, nº 5, p. 485-490.
- d) CUNGE, J. A., HOLLY, F.M.JR, AND VERWEY,A. (1980) “*Practical Aspects of Computational River Hydraulics*”. Pitman Publishing Ltd., London, UK. ISBN: 0273084429, 1, pp 7-23.
- e) CHAPRA, S.C. (1997), *Surface Water-Quality Modeling*, McGraw-Hill, New York, N.Y.
- f) CHALFEN, M., NIEMIEC (1986), A. Analytical and Numerical Solution of Saint-Venant Equations. *Journal of Hydrology*, v. 86, p. 1–13.
- g) CHOW, Ven Te (1988). *Open Channel Hydraulics*. 1st Ed., McGraw -Hill Book Co. New York, N.Y.. 680p.
- h) GOMES, V. U. (2006). *Estudo comparativo dos modelos da onda cinemática e da onda difusiva na análise de propagação de cheias, em função dos parâmetros hidráulicos da bacia*. Dissertação – Universidade Federal do Ceará, Programa de pós-graduação em Engenharia Civil – Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, pp.47-49.
- i) HENDERSON, F. M. (1966). *Open Channel Hydraulics*. 1st Ed., Mcmillan Publishing Co. Inc., New York, N.Y.. pp 4-7.
- j) PORTO, R. M. (2006). *Hidráulica Básica*. Publicação EESC – USP,4º ed., p. 473.
- k) SMITH, A (1980). A Generalized Approach to Kinematic Flood Routing, *Journal of Hydrology*, Elsevier Science, 45, p. 71-89.
- l) YEN, B. C.; TSAI C. W. S. (2001) On Noninertia Wave versus Diffusion Wave in Flood Routing. *Journal of Hydrology*, Elsevier Science, 244, p. 97-104.