

DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA ESTUDAR A PROPAGAÇÃO DE UMA CHEIA EM FACE DA VARIABILIDADE DA RUGOSIDADE E DA DECLIVIDADE DO CANAL

*Carla Freitas de Andrade*¹; *Patrícia Freire Chagas*² & *Raimundo Oliveira de Souza*³

RESUMO - Vários estudos foram realizados nos últimos anos, na tentativa de desenvolver modelos matemáticos para conhecer as áreas propícias a inundações próximas de um sistema hídrico. Porém, a maior parte desses modelos computacionais é altamente sofisticada, consomem bastante tempo e não são entendidos e aplicados facilmente por engenheiros inexperientes. Por essa razão, há necessidade de se desenvolver um software mais simples, eficiente, e mais fácil de ser usado, como ferramenta para fornecer subsídios e poder prever que áreas próximas de sistemas fluviais urbanos podem ser inundadas, mediante a influência de uma onda de cheia, prevendo um eficiente controle das áreas de risco. Este trabalho discute a capacidade e eficiência do programa computacional QUARIGUA (Análise Quantitativa do Risco de Enchentes em Rios), escrito em FORTRAN 90, baseado nas equações da hidrodinâmica, usando a técnica de Newton-Raphson, e com a influência de uma onda dinâmica. Os resultados mostraram que o programa desenvolvido apresenta uma promissora perspectiva na previsão de risco de inundação para áreas críticas quando se varia os parâmetros hidráulicos da rugosidade e da declividade.

ABSTRACT – Many studies have been carried out in recent years in attempts to develop mathematical models capable to identify vulnerable areas to floods which are located near riverine systems. However, most of these computational models are often highly sophisticated, time consuming and not easily understood and promptly applied by inexperienced engineers. There appears, for this reason, to exist a definite need for the development of simpler, efficient, more comprehensive and easier to use computational tools for the prediction of which areas near urban riverine systems may be flooded under the influence of a dynamic wave, predicting an efficient control of such risk areas. This paper discusses the capability and efficiency of a computational program QUARIGUA (Risk Quantitative Analysis of Floods in Rivers), written in FORTRAN 90, based on the hydrodynamics equations, using the Newton-Raphson technique, and under the influence of a dynamic wave. The results show that the program QUARIGUA presents a promising perspective for risk prediction of floods in critical riverine areas, considering channel bed slope and roughness variations.

Palavras-chaves: Equação de Saint-Venant, método numérico, escoamento em rios.

1) Doutora em Recursos Hídricos - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici – Bloco 713 – Fortaleza, Ceará – Brasil – CEP 60.451-970 – Fone: (85) 3366.9771, (85) 32625464. Fax: (85) 3366.9627 – e-mail: engenheiracarla@yahoo.com
Professora da Faculdade Christus.

2) Doutora em Recursos Hídricos – Instituto de Gestão de Água do Rio Grande do Norte – IGARN, e-mail: pfchagas@yahoo.com

3) Professor PHD - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici – Bloco 713 – Fortaleza, Ceará – Brasil – CEP 60.451-970 – Fone: (85) 3366.9771. Fax: (85) 3366.9627 – e-mail: rsouza@ufc.br

1 – INTRODUÇÃO

Em face dos inúmeros problemas sociais que hoje afetam o Brasil e o mundo, fica-se diante da falta de moradia que a população carente enfrenta. Conseqüentemente, estas pessoas acabam por procurar habitar as áreas que estão vazias, por pertencerem ao domínio do Estado. Contudo, estas áreas acabam sendo as regiões que, de uma forma ou de outra, trazem risco à vida. Se estas terras forem localizadas próximas a rios, poderão trazer, como risco, as cheias e inundações, além de enormes problemas de saneamento básico.

As inundações são responsáveis por diversos problemas que são relatados em todo o mundo. No Brasil, um país pobre, onde a maior parte dos seus habitantes não tem local seguro para morar, onde as cidades não têm um crescimento organizado, nem um planejamento urbano, as cheias trazem conseqüências danosas, tais como o desabrigo de milhares de pessoas que moram em áreas de risco, problemas de saúde pública, além do caos nos sistemas de transporte.

Estes problemas podem ser observados no Brasil e em lugares do mundo inteiro, como é o caso da China, de Bangladesh, de Veneza, dentre outros, que enfrentam severas cheias durante o ano, deixando as cidades em total estado de calamidade pública.

Contudo, estes problemas só podem ser resolvidos mediante a intervenção de políticas públicas, pois consiste de um problema de natureza social. Por outro lado, o governo, muitas vezes, não dispõe de dados e informações a respeito da questão, fato este que estabelece a necessidade de informações para tomar as devidas providências no controle destas áreas de risco.

A fim de auxiliar as autoridades governamentais, responsáveis pelo planejamento urbano e pelo controle das áreas com risco de cheia, esta pesquisa, que tem como objetivo estudar o comportamento da propagação de cheias, em função das características hidráulicas e hidrológicas da bacia, poderá contribuir com os gestores nas questões pertinentes ao planejamento de ocupação dessas áreas.

Portanto, espera-se que, ao final dessa pesquisa, haja uma contribuição efetiva nas questões do planejamento de zonas urbanas sujeitas à inundação, de modo que permita uma maior ação por parte dos governantes no desenvolvimento de políticas públicas, atuando, assim, no processo de ocupação desordenada dessas áreas.

2 – METODOLOGIA

As equações da continuidade e da quantidade de movimento, do escoamento unidimensional, foram desenvolvidas por Saint–Venant. Estas equações são a base do desenvolvimento dos modelos de escoamento, utilizados para representar o escoamento superficial em bacias e o escoamento em rios.

Com a aplicação destas equações, é possível se estudar os processos que determinam as alturas dos níveis de água, no curso principal do rio e nas várzeas de inundação, através de modelos matemáticos.

Com base no modelo físico, pode ser desenvolvido um modelo matemático relativo à hidrodinâmica de rios. Neste contexto, pretende-se desenvolver formulações que permitam avaliar as alturas de água para cada tipo de cheia, para se prever que áreas próximas ao curso de água correm o risco de serem inundadas, quando comparadas com a cota do terreno.

Observa-se que se pode ter uma variedade de possibilidades de várzeas de inundação, pois, para cada quantidade de chuva, pode-se obter uma área de inundação diferente. Assim, pode-se trabalhar com uma chuva torrencial, e prever a maior área que deve ser inundada, isolando-a, por exemplo, para fins de moradia.

As equações fundamentais do modelo podem ser compostas pelas equações do Balanço de Massa e pelas Equações do Movimento, variando no tempo e no espaço, para diferentes situações de simulação e variações dos níveis de água.

A primeira equação fundamental do escoamento em rios e canais é a equação da *continuidade*. Ela é deduzida a partir do princípio da conservação de massa, aplicado ao elemento de controle, definido pelo trecho de um rio. Na forma diferencial, a equação da continuidade pode ser representada como se segue:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q, \quad (1)$$

onde Q é a vazão em m^3/s ; A é a área da seção molhada em m^2 ; x é a distância no sentido longitudinal em m; t é o tempo em segundos; e q é a vazão por unidade de largura de contribuição lateral em $\text{m}^3/\text{s} / \text{m}$.

A contribuição lateral distribuída da bacia hidrográfica, ou da entrada de um afluente, é introduzida através do termo q da equação. Quando existem áreas laterais de inundação, que atuam

apenas armazenando volumes durante o escoamento, este processo também pode ser considerado através do termo de contribuição lateral da equação da continuidade, ou seja, através do termo q , da Equação (1), que é composto pela vazão por unidade de comprimento de contribuição da bacia e pela vazão de troca com a área de armazenamento.

A segunda equação fundamental do escoamento em rios denomina-se equação dinâmica, e representa o princípio da conservação da quantidade de movimento, aplicado ao elemento de controle considerado. Quantidade de movimento é uma das muitas formas de descrição do estado de movimento de um corpo, e este princípio é definido pela Segunda Lei de Newton.

A segunda lei de Newton afirma que a soma das forças, aplicadas a um volume de controle, é igual à taxa de variação da quantidade de movimento, armazenada dentro do volume de controle, mais o efluxo líquido da quantidade de movimento, através da superfície de controle, existindo a influência de forças externas. Matematicamente, este processo pode ser expresso da seguinte forma:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gAS_f + gAS_e + B.W_f + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gAS_0 \quad (2)$$

onde g é a aceleração da gravidade, S_f é a declividade da linha de atrito, S_e é a declividade da perda por redemoinho, W_f é o fator de cisalhamento do vento e B é a largura do canal.

As Equações (1) e (2) são as equações do escoamento unidimensional não permanente variado para canais abertos, ou **Equações de Adhémar Jean Barré de Saint-Venant**, matemático e engenheiro francês (1797–1886). Elas foram publicadas em 1870 nos Anais da Academia Francesa de Ciências, e se constituem um conjunto de equações governantes do escoamento em rios e canais, com um sistema de duas equações, com derivadas parciais em relação a x e a t , cuja integração exata é, normalmente, muito complicada e sua solução analítica só é possível em casos especiais. Entretanto, existem diferentes técnicas numéricas para sua resolução.

O emprego da Equação (1) com a Equação (2), quando são considerados todos os termos envolvendo aceleração e pressão, estabelece os fundamentos do modelo de propagação de uma onda dinâmica de cheia, denominado *modelo hidrodinâmico*. Esta será a onda a ser estudada no decorrer desta pesquisa, ou seja, será feita uma modelagem considerando as equações de Saint-Venant em seu estado completo.

2.1 – Método Numérico

Para aplicações práticas dos modelos hidrológicos formados por equações diferenciais complexas, suas soluções são obtidas por métodos numéricos, admitidos como sendo uma ferramenta muito poderosa para o estudo de uma importante classe de problemas no campo dos recursos hídricos, como o problema de delimitar as profundidades da água, para determinar as áreas propícias a inundações.

No passado, por causa de dificuldades matemáticas, soluções analíticas podiam ser obtidas por métodos aproximados. Felizmente, o uso do computador tem tornado possível a obtenção de soluções numéricas das equações completas, e, portanto, atualmente não se fica mais restrito a métodos aproximados.

A análise de escoamentos em longo prazo e em longos trechos do rio e a solução das equações completas da continuidade e da quantidade de movimento requerem métodos rápidos e precisos. A dificuldade fundamental, na análise de escoamento não permanente gradualmente variado, é identificar um esquema numérico que seja preciso, rápido e eficiente.

Sendo o método das diferenças finitas um método simples e que produz bons resultados, foi escolhido para se trabalhar com a discretização do modelo da onda dinâmica, para estudar a propagação do escoamento em rios naturais e delimitar as alturas dos níveis de água.

Geralmente, na modelagem usando o método das diferenças finitas, a região é aproximada por uma malha formada por retângulos. Os espaçamentos podem ser constantes, podem variar ao longo de cada eixo, ou podem variar de um eixo para outro. Em cada nó, cada derivada da expressão matemática é aproximada por uma expressão algébrica, com referência aos nós adjacentes. Como valores iniciais, pode-se assumir que os valores da vazão e da profundidade, para todas as posições no canal, no tempo inicial $t = t_0$, são conhecidos. O eixo t pode ser considerado a posição de contorno do canal a montante, e a última linha traçada paralela ao eixo t , denominada a N -ésima linha, pode ser usada para representar o contorno do canal a jusante (ANDRADE, 2003).

Para as condições de contorno a montante, pode-se assumir que um hidrográfico de vazão é dado no ponto $x = x_0$, e, além disso, é adotado que as condições de contorno a jusante são dadas pela seção de controle.

Trabalhando primeiramente com a equação da continuidade, substitui-se as expressões aproximadas necessárias na Equação (1), obtendo a seguinte equação:

$$\begin{aligned}
& \theta \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta x_i} + (1-\theta) \frac{Q_{i+1}^j - Q_i^j}{\Delta x_i} + \frac{A_i^{j+1} + A_{i+1}^{j+1} - A_i^j - A_{i+1}^j}{2\Delta t_j} + \\
& \theta \frac{q_i^{j+1} + q_{i+1}^{j+1}}{2} + (1-\theta) \frac{q_i^j + q_{i+1}^j}{2} = 0
\end{aligned} \tag{3}$$

Trabalhando agora com a equação da quantidade de movimento, substitui-se também os termos aproximados na Equação (2), obtendo a seguinte expressão:

$$\begin{aligned}
& \frac{Q_{i+1}^{j+1} + Q_{i+1}^j}{2\Delta t_j} - \frac{Q_i^j + Q_{i+1}^j}{2\Delta t_j} + 2 \left[\theta \frac{\left(\frac{Q_i^{j+1}}{A_i^{j+1}} + \frac{Q_{i+1}^{j+1}}{A_{i+1}^{j+1}} \right)}{2} + (1-\theta) \frac{\left(\frac{Q_i^j}{A_i^j} + \frac{Q_{i+1}^j}{A_{i+1}^j} \right)}{2} \right] \\
& \left[\theta \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta x_i} + (1-\theta) \frac{Q_{i+1}^j - Q_i^j}{\Delta x_i} \right] - \\
& \left[\theta \frac{\left[\frac{(Q_i^{j+1})^2}{(A_i^{j+1})^2} + \frac{(Q_{i+1}^{j+1})^2}{(A_{i+1}^{j+1})^2} \right]}{2} + (1-\theta) \frac{\left[\frac{(Q_i^j)^2}{(A_i^j)^2} + \frac{(Q_{i+1}^j)^2}{(A_{i+1}^j)^2} \right]}{2} \right] \\
& \left[\theta \frac{A_{i+1}^{j+1} - A_i^{j+1}}{\Delta x_i} + (1-\theta) \frac{A_{i+1}^j - A_i^j}{\Delta x_i} \right] + g \left[\theta \frac{A_i^{j+1} + A_{i+1}^{j+1}}{2} + (1-\theta) \frac{A_i^j + A_{i+1}^j}{2} \right] \\
& \left[\theta \frac{y_{i+1}^{j+1} - y_i^{j+1}}{\Delta x_i} + (1-\theta) \frac{y_{i+1}^j - y_i^j}{\Delta x_i} \right] - g \left[\theta \frac{A_i^{j+1} + A_{i+1}^{j+1}}{2} + (1-\theta) \frac{A_i^j + A_{i+1}^j}{2} \right] S_0 + \\
& g \left[\theta \frac{A_i^{j+1} + A_{i+1}^{j+1}}{2} + (1-\theta) \frac{A_i^j + A_{i+1}^j}{2} \right] \\
& \left[\theta \frac{S_{f_i}^{j+1} + S_{f_{i+1}}^{j+1}}{2} + (1-\theta) \frac{S_{f_i}^j + S_{f_{i+1}}^j}{2} \right] = 0
\end{aligned} \tag{4}$$

Uma das dificuldades, na análise de escoamento não permanente gradualmente variado, é identificar um esquema numérico que seja preciso, rápido e eficiente. Amein e Fang (1970) e Amein

e Chu (1975) recomendaram resolver o sistema de equações algébricas lineares, resultante da representação numérica das equações de Saint–Venant pelo método das diferenças finitas, pelo método iterativo de Newton–Raphson. Esta técnica é um método de solução de sistemas de equações algébricas não lineares, onde são atribuídos valores por tentativa às incógnitas.

A análise do procedimento mostra que este método é reduzido a soluções sucessivas de sistemas de equações lineares. A convergência do procedimento depende muito da escolha dos valores iniciais a serem atribuídos. Quanto mais próximos os valores atribuídos estiverem dos valores reais, mais rápida é a convergência. Se os valores atribuídos são escolhidos de uma maneira completamente arbitrária, o sistema pode não convergir.

O sistema não linear pode ser linearizado segundo:

$$f(x^{k+1}) \approx f(x^k) + J(x^k)(x^{k+1} - x^k), \quad (5)$$

onde $J(x^k)$ é o Jacobiano, representando a matriz dos coeficientes formada pelas primeiras derivadas parciais de $f(x)$, em relação às várias variáveis Q e A , calculadas em x^k .

As equações governantes do presente trabalho foram resolvidas através de um programa computacional, chamado QUARIGUA, escrito em linguagem FORTRAN 90.

3 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Inicialmente, para verificar a eficiência do programa computacional QUARIGUA, desenvolvido para esta pesquisa, na análise da vazão, comparou-se os resultados gerados pelo programa com os resultados obtidos, também numericamente, por um modelo proposto por Keskin e Agiralioglu (1997) e outro proposto por Akan e Yen (1981).

Os erros relativos, entre os valores máximos da solução numérica do programa computacional QUARIGUA e os valores máximos da solução de Keskin e Agiralioglu (1997), a saber, 5,80 %, 10,40 % e 14,31 %, são bem aceitáveis. O erro relativo entre os resultados do programa QUARIGUA e o resultado obtido por Akan e Yen (1981), para um único valor da distância ao longo do canal igual a $x = 600$ m, corresponde a 4,18 %. Tal diferença entre as soluções numéricas decorre do fato de que cada uma delas foi resolvida através de um método numérico diferente, com diferentes aproximações e suposições. Contudo, estas diferenças são aceitáveis, o que mostra a eficiência do programa computacional desenvolvido para esta pesquisa.

Em vista da boa concordância na comparação apresentada, iniciou-se o processo de simulação da onda dinâmica para o estudo da vazão e da profundidade do canal.

Ao se obter os valores referentes ao comportamento da profundidade da água do rio, pode-se delimitar, diante de mapa topográfico, as áreas que poderão ser inundadas por uma determinada onda de cheia.

Preliminarmente, simulou-se uma onda de cheia se propagando em um canal, cujas características foram definidas com base em dados registrados na literatura, e observou-se o comportamento da vazão e da profundidade do escoamento ao longo do tempo e da distância na direção da corrente.

Os estudos se concentram, primeiramente, na evolução de uma onda dinâmica em um canal de seção retangular uniforme, para se obter o comportamento dos diferentes parâmetros analisados pelo programa computacional, para diferentes tempos e distâncias ao longo do curso do canal. O canal foi definido com comprimento de 80.000 m, largura fixa de 15 m, declividade de 0,00005 m/m e coeficiente de rugosidade de Manning de 0,07.

Na modelagem numérica, usando o programa computacional QUARIGUA, a malha $x-t$ foi discretizada em 800 trechos de 100 m de comprimento cada, na direção x da corrente, e em 96 intervalos de tempo de 9 min, perfazendo um tempo máximo de 864 min.

A Figura 1 apresenta o comportamento da vazão, para diferentes intervalos de tempo, mostrando a propagação da onda ao longo do canal na direção da corrente.

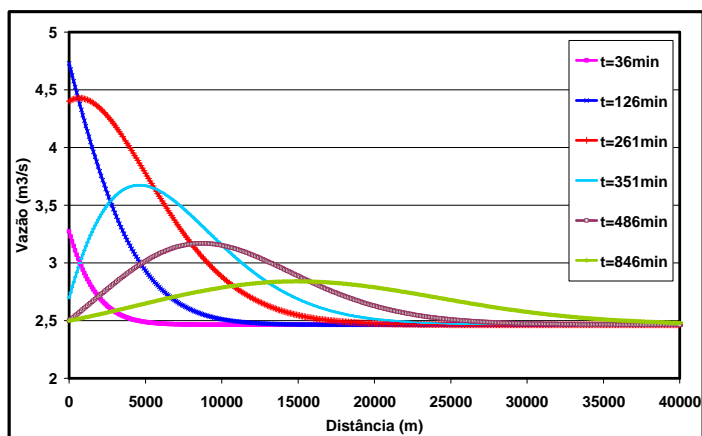


Figura 1 – Propagação da onda para diferentes tempos

Através da Figura 1 acima, pode-se observar que a onda tem uma propagação regular, alterando sistematicamente o valor da vazão no tempo e no espaço. A diferença, ΔX , entre as distâncias X_2 e X_1 , correspondentes às posições de duas cristas consecutivas, isto é,

$X_2 - X_1 = \Delta X$, dividida pelo acréscimo de tempo, Δt , correspondente, representa a velocidade de propagação da onda (ANDRADE, 2003).

Na Figura 2, pode-se observar a propagação da onda, ao longo do tempo, para diferentes seções do canal. Através da figura, percebe-se que a energia de propagação da onda dissipa-se rapidamente ao longo do tempo. Isto é causado principalmente pelo fator de atrito presente na equação de Saint-Venant, e, por conseguinte, este resultado obtido na presente simulação está inteiramente de acordo com os fundamentos teóricos do modelo. Portanto, pode-se constatar que o programa computacional QUARIGUA, desenvolvido a partir da metodologia proposta, produz resultados compatíveis com outros resultados de propagação de onda de cheia, apresentados em estudos anteriores registrados na literatura específica (KESKIN e AGIRALIOGLU 1997).

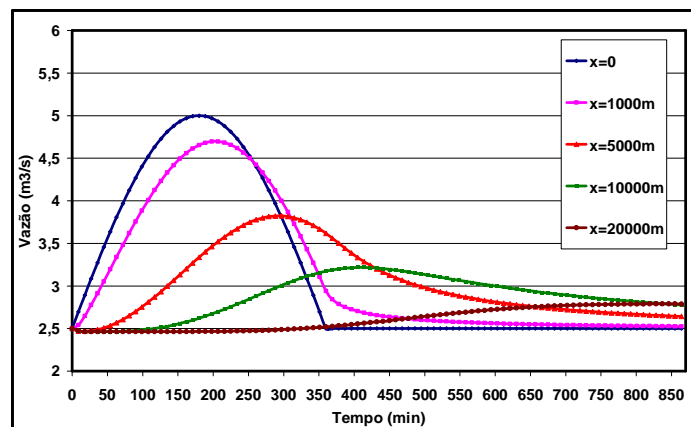


Figura 2 – Propagação da onda para diferentes seções do canal

Objetivando verificar a versatilidade e a eficiência do presente modelo matemático-computacional na solução de problemas práticos, mudaram-se as características do canal para mostrar como os parâmetros em estudo se comportam diante de determinadas variações. Considerou-se, novamente, a evolução de uma onda dinâmica em um canal de seção retangular uniforme, com comprimento de 50.000 m, largura fixa de 50 m, declividade de 0,00005 m/m e coeficiente de rugosidade de Manning de 0,01. A hidrógrafa de entrada dos dados foi considerada como tendo uma distribuição triangular.

O canal foi dividido em 100 trechos de 500 m de comprimento cada, e o programa gerou uma nova hidrógrafa interpolada com 40 intervalos de tempo de 3 minutos. Os resultados obtidos através do programa QUARIGUA permitem uma análise da distribuição da vazão ao longo do canal, para diferentes intervalos de tempo (Figura 3), e ao longo do tempo, para diferentes seções do canal (Figura 4).

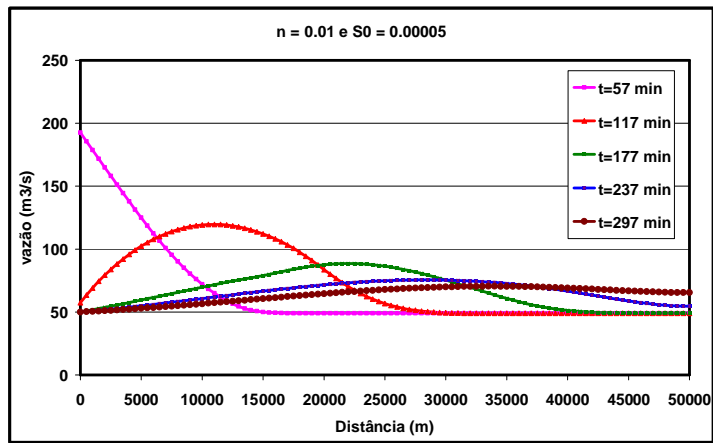


Figura 3 – Propagação da onda para diferentes tempos

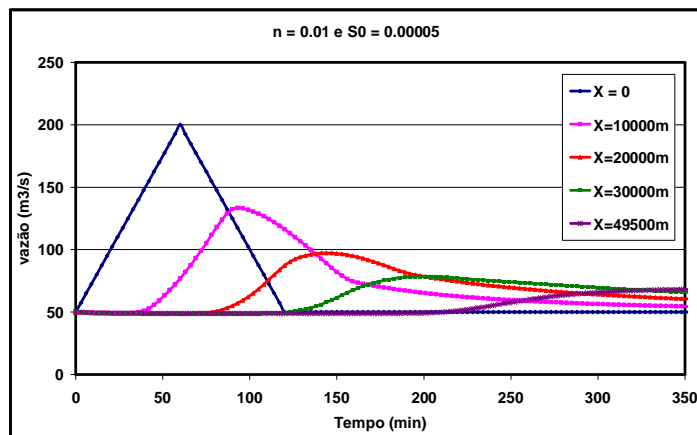


Figura 4 – Propagação da onda para diferentes seções do canal

Considerando este mesmo canal anterior, pode-se observar pelas Figuras 5 e 6, o comportamento da profundidade do escoamento ao longo do canal, para diferentes intervalos de tempo de observação, e ao longo do tempo, para diferentes seções do canal.

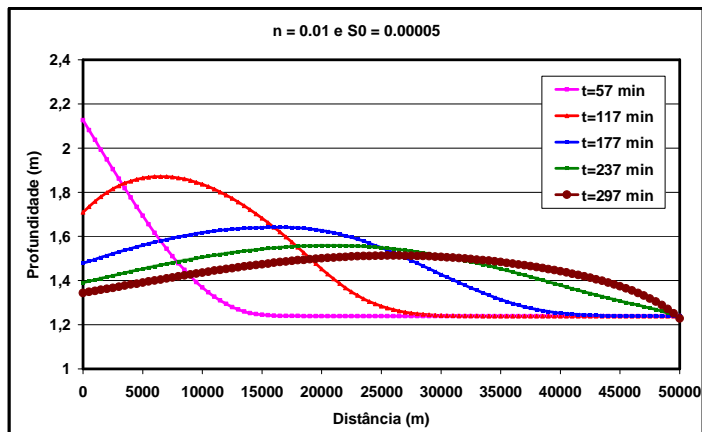


Figura 5 – Comportamento da profundidade para diferentes tempos

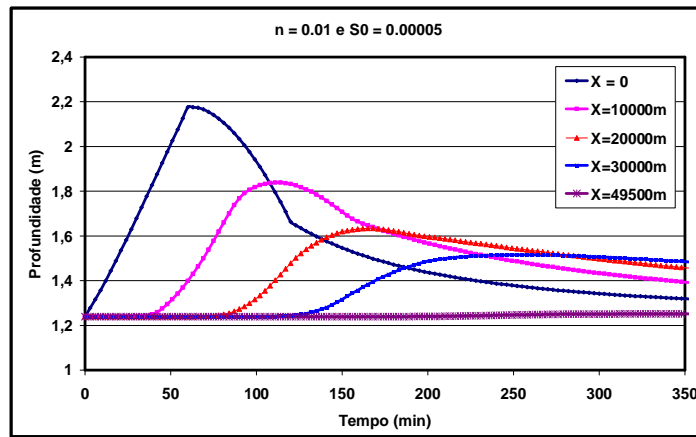


Figura 6 – Comportamento da profundidade para diferentes seções do canal

As Figuras 7 e 8 mostram o desenvolvimento do processo de dissipação da energia de propagação da onda dinâmica considerada. Desta forma, estão sendo apresentados os picos de vazão e de profundidade do escoamento, ao longo do canal, para diferentes tempos.

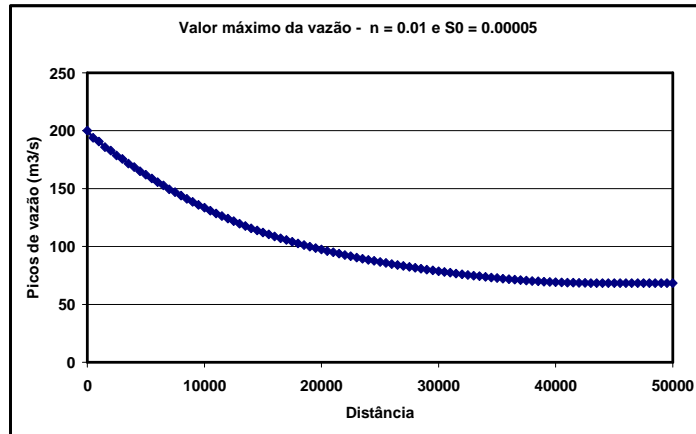


Figura 7 – Valores dos picos de vazão ao longo do canal

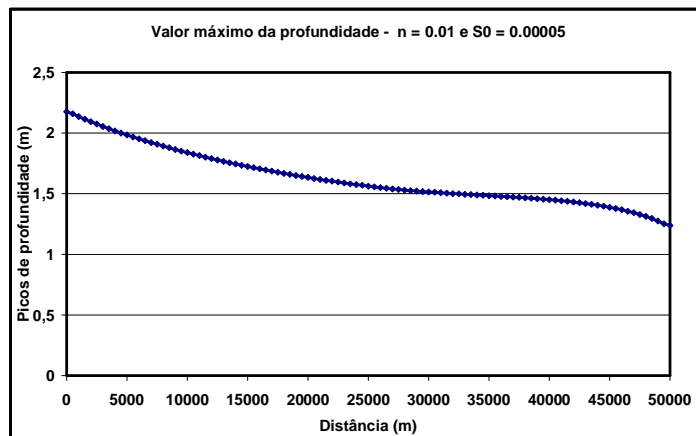


Figura 8 – Valores dos picos da profundidade ao longo do canal

Ciente da eficiência e da versatilidade do programa computacional desenvolvido para o modelo aqui proposto, procurou-se explorar a sua robustez, através da avaliação do comportamento da vazão e da profundidade do escoamento diante de variadas situações simuladas. Inicialmente, considerou-se a influência da declividade no comportamento da propagação da onda e na variação das profundidades ao longo do canal.

Admitindo um canal de seção retangular com 50.000 m de comprimento, largura de 50 m e coeficiente de rugosidade de Manning, n , igual a 0,01, simulou-se o comportamento da vazão e da profundidade, supondo três diferentes valores da declividade do fundo do canal, S_0 , a saber, 0,0001; 0,00005; e 0,00001.

Como o foco, no presente estudo, é determinar as áreas mais propícias a enchentes, é importante um bom conhecimento sobre o comportamento das alturas de água. Portanto, iniciam-se as simulações procurando estabelecer a influência da declividade no comportamento da profundidade do escoamento ao longo do canal.

A Figura 9 mostra o comportamento da profundidade do escoamento ao longo do canal, para um determinado tempo, ou seja, a 120 minutos da entrada de uma onda dinâmica, considerando diferentes valores da declividade do fundo do canal (S_0). A Figura 10 ilustra o comportamento da altura de água do escoamento, ao longo do tempo, para uma determinada seção que se encontra a 10.000 m do início do canal, sob a influência de diferentes S_0 .

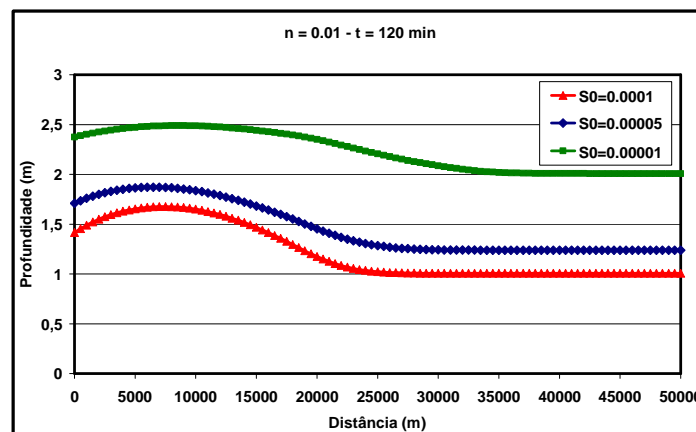


Figura 9 – Comportamento da profundidade, ao longo do canal, para $t = 120$ min

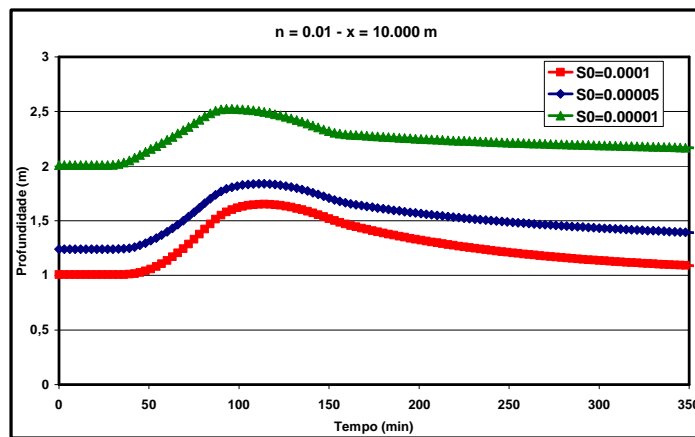


Figura 10 – Comportamento da profundidade, ao longo do tempo, para $x = 10.000$ m

Nas Figuras 9 e 10, nota-se como a declividade influencia os níveis da altura de água. Quanto maior a declividade, menores são os níveis da cota de água ao longo do canal. Isto pode ser explicado através de uma complexa relação deste parâmetro hidráulico com o escoamento. Sabe-se que canais com baixa declividade têm uma forte capacidade de armazenamento, o que provoca uma elevação da superfície livre dos mesmos. Isto ocorre porque a capacidade de transporte do rio fica muito pequena. A componente da força de gravidade na direção do escoamento atua de forma menos intensa. Entretanto, esta relação não é simples, tendo em vista a não linearidade do modelo (ANDRADE, 2006).

Se o cenário for alterado, de forma que a declividade seja menor, o nível de água aumenta. Logo, quando se tem um canal, cujo leito está cheio de detritos, diminuindo assim a sua declividade, ao ocorrer uma onda de cheia, em razão, por exemplo, de uma chuva, as alturas do nível de água devem ser maiores do que se o canal estivesse limpo. Com isso, os riscos de uma cheia aumentam e a sua dimensão também.

É importante salientar a importância da declividade em um estudo de risco de inundação, pois este estudo está diretamente ligado às alturas atingidas pela água, durante a passagem de uma onda de cheia, e estas alturas variam bruscamente com a mudança da declividade.

Com relação à influência da declividade quando se refere à vazão, pode-se perceber, pelas Figuras 11 e 12, que a mesma também é bastante influenciada pela variação da declividade.

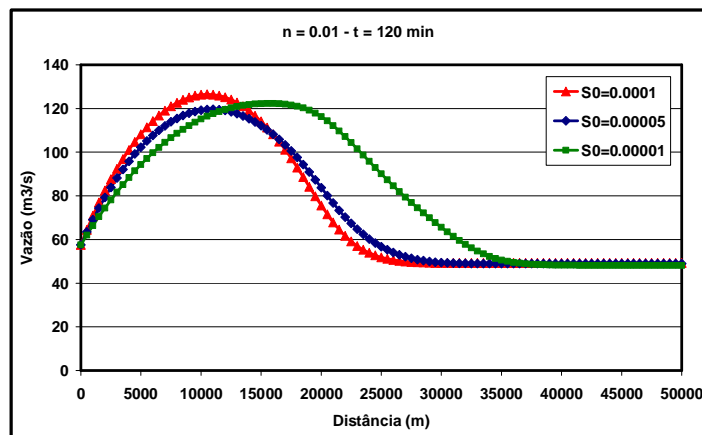


Figura 11 – Comportamento da vazão, ao longo do canal, para $t = 120$ min

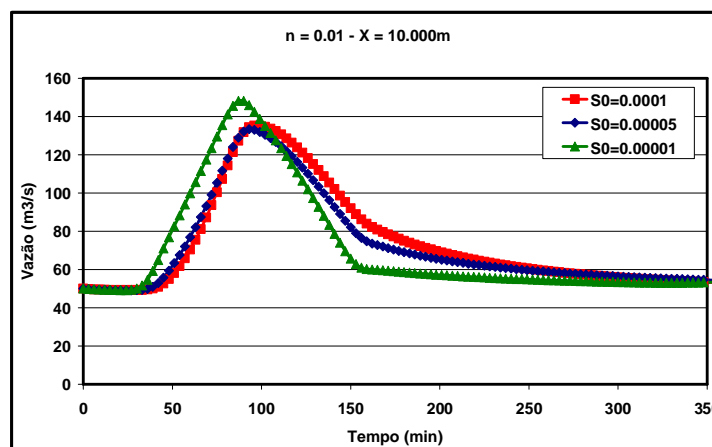


Figura 12 – Comportamento da vazão, ao longo do tempo, para $x = 10.000$ m

Observa-se que a vazão é diretamente proporcional a certa potência da declividade, e, portanto, quando a declividade sofre uma diminuição, por fatores já relatados anteriormente, a vazão, conseqüentemente, também diminui. Entretanto, este resultado não se verifica para os picos de vazão. Na Figura 11, percebe-se, nitidamente, o pico de vazão maior para o canal com menor declividade.

Todas estas próximas simulações foram feitas considerando, agora, um valor de n maior, para saber se os gráficos aqui abordados têm o mesmo comportamento quando se aumenta o valor do coeficiente de rugosidade.

As Figuras 13 e 14 mostram o comportamento da profundidade do escoamento ao longo do canal, considerando as mesmas características anteriores, porém mudando o valor da rugosidade de Manning de 0,01 para 0,1.

Comparando as Figuras 9 e 13, percebe-se que as alturas de água, ao longo do canal, têm o mesmo comportamento, para qualquer que seja o valor da declividade do canal (S_0). Ou seja, tanto

faz simular para um valor de n maior ou para um valor de n menor, que o comportamento das curvas da profundidade continua o mesmo. Percebe-se somente um aumento no valor das profundidades. Por exemplo, a curva de profundidade, quando $S_0 = 0,00001$, na Figura 9, inicia em aproximadamente 2,4 m e torna-se constante com a profundidade de 2 m. Já na Figura 13, ela começa com aproximadamente 8,7 m e torna constante com 8 m. Este fato é explicado considerando a influência do fator de atrito sobre a capacidade de escoamento do canal. Quando o fator de atrito cresce muito, reduz consideravelmente a capacidade de escoamento, fazendo com que grande parte da água que chegue ao canal fique retida no mesmo. Com isso, o nível de água sobe muito, aumentando, assim, o risco de transbordamento. Este fato será observado mais claramente nas simulações pertinentes à análise de risco.

Outra observação que merece ser registrada na comparação entre as Figuras 9 e 13, é que, quando o valor da rugosidade n é maior, a onda tende a se dissipar mais rapidamente, ou seja, a sua amplitude é menor ao longo do tempo. Isto mostra que nesta situação os picos de propagação caem consideravelmente pelas razões anteriormente citadas.

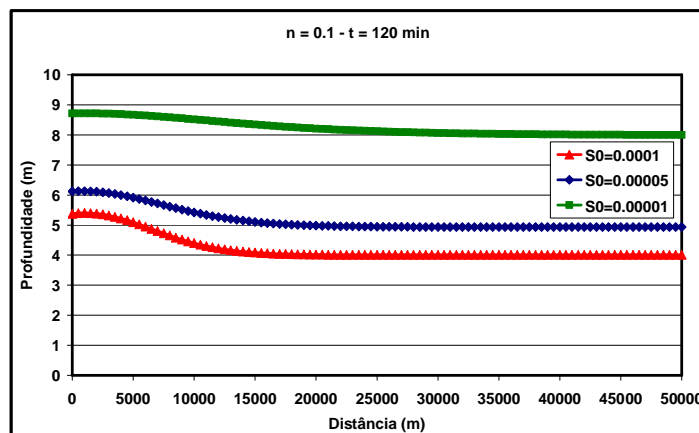


Figura 13 – Comportamento da profundidade, ao longo do canal, para $t = 120$ min

Quando se compara as Figuras 10 e 14, que apresentam o comportamento da profundidade, ao longo do tempo, para uma determinada seção do canal, percebe-se, mais uma vez, uma maior dissipação da onda com rugosidade de Manning mais elevada (Figura 14). As razões para este fato são explicadas pela influência do fator de atrito no processo de propagação, onde maiores rugosidades acarretam maiores dissipações de energia de propagação. Isto mostra que, canais com altos coeficientes de rugosidade, têm um tempo de detenção hidráulica alto, o que faz com que os períodos de enchente se tornem mais longos.

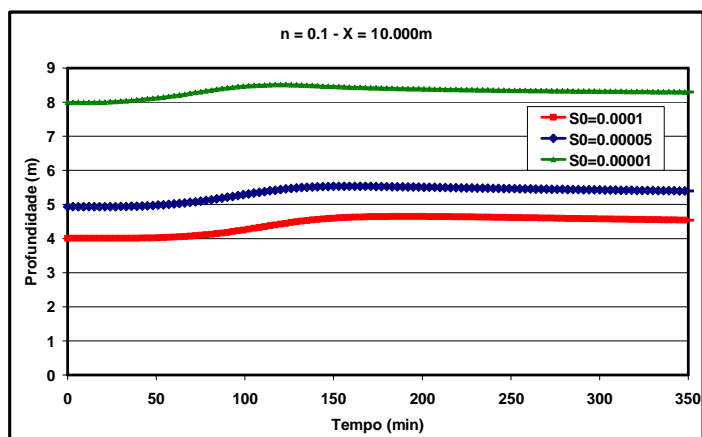


Figura 14 – Comportamento da profundidade, ao longo do tempo, para $x = 10.000 \text{ m}$

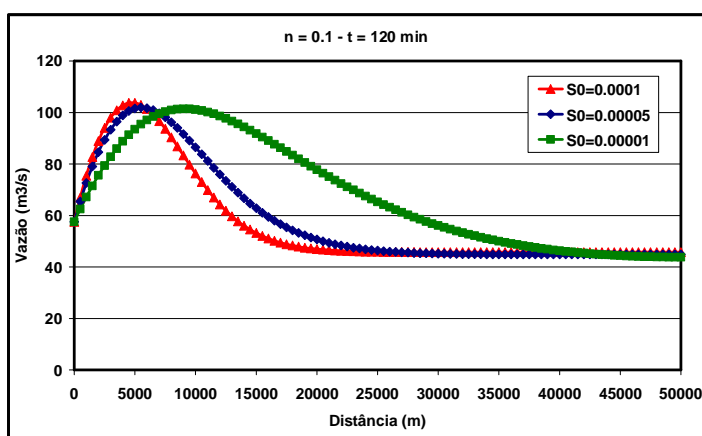


Figura 15 – Comportamento da vazão, ao longo do canal, para $t = 120 \text{ min}$

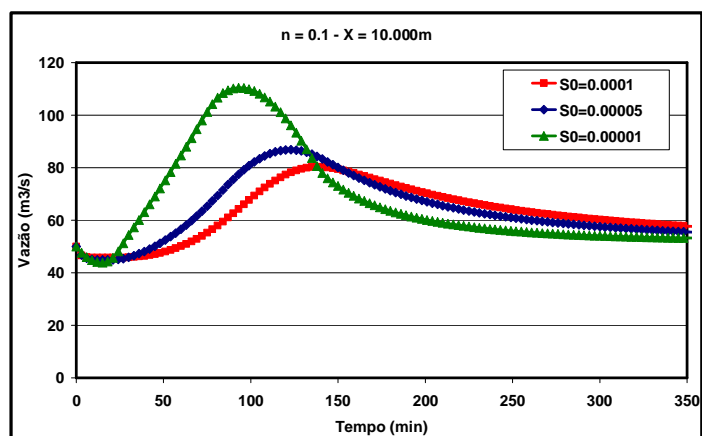


Figura 16 – Comportamento da vazão, ao longo do tempo, para $x = 10.000 \text{ m}$

Continuando o processo de simulação, considerou-se a influência da rugosidade sobre as profundidades do canal e sobre a vazão de escoamento do canal.

Observou-se que há uma relação entre a rugosidade e a profundidade do escoamento. Entretanto, deve ficar claro que esta relação observada é puramente qualitativa, não havendo como

se estabelecer uma relação quantitativa. É importante também ficar claro que nos modelos hidrodinâmicos, a declividade da linha de energia, S_f , é um termo não linear e que está presente nesta relação.

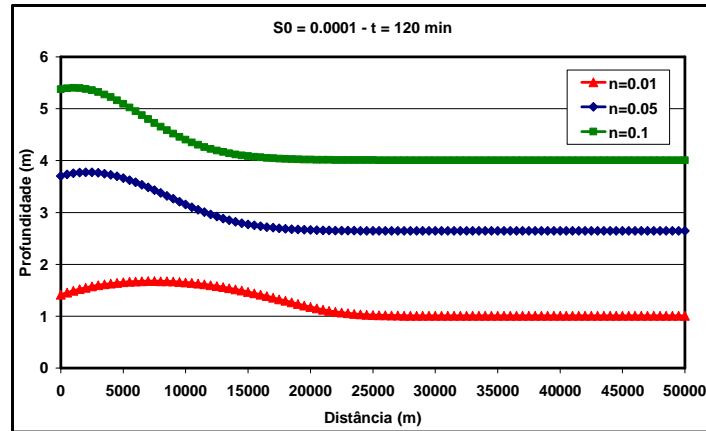


Figura 17 – Comportamento da profundidade, ao longo do canal, para $t = 120$ min

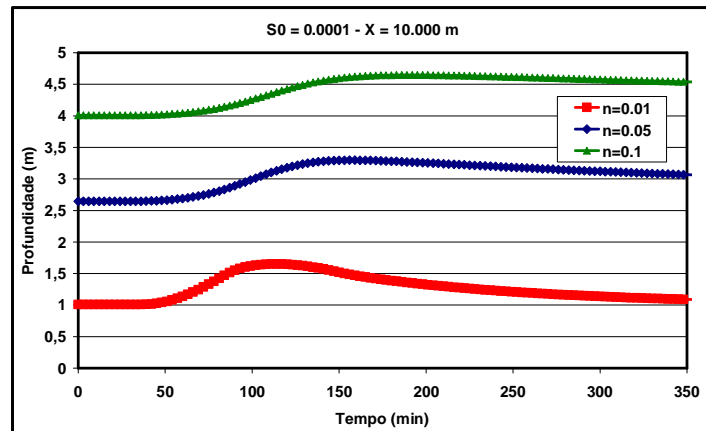


Figura 18 – Comportamento da profundidade, ao longo do tempo, para $x = 10.000$ m

Através das Figuras 17 e 18, percebe-se que a variação do coeficiente de rugosidade n induz a uma variação da profundidade no mesmo sentido. Por exemplo, para um canal de maior rugosidade, o nível de água é maior, e o canal tem maiores picos de altura da linha de água. Conseqüentemente, quando se tem um canal com menor rugosidade, os picos de altura também são menores, o que favorece a segurança de áreas próximas deste canal com relação à inundação.

Como a rugosidade está relacionada com as paredes do canal, dependendo do material ou da vegetação encontrada nestas paredes, os níveis de altura de água variam. Quando o material tem uma rugosidade mais elevada, estes níveis aumentam (ANDRADE, 2006).

É importante concluir que os canais ricos em vegetação nas suas paredes têm um coeficiente de rugosidade maior, o que acarreta maiores níveis de profundidade de água, provocando, assim, maiores riscos de enchentes.

Portanto, pode-se concluir, com base nas informações fornecidas pelos gráficos, que a rugosidade influencia na avaliação do risco de enchentes. As áreas ribeirinhas mais propícias às enchentes são aquelas próximas dos canais cujas paredes são ricas em vegetação, as quais tem maior coeficiente de rugosidade de Manning, mantendo a declividade constante.

O estudo da influência da rugosidade, em relação à vazão, foi feito graficamente através das Figuras 19 e 20. Visualizando tais figuras, nota-se que os canais com rugosidade maior, têm menores picos de vazão, e a onda se propaga mais lentamente.

Entretanto, verifica-se, através dos gráficos, que esta variação não é linear. Para $n = 0,01$, a celeridade é bem maior do que quando se considera os dois outros valores de $n = 0,05$ e $n = 0,1$. Mostrando, por conseguinte, a complexa interação entre os diversos parâmetros. Mesmo assim, é possível concluir que, para um mesmo S_0 , o comportamento da vazão está vinculado ao comportamento da rugosidade.

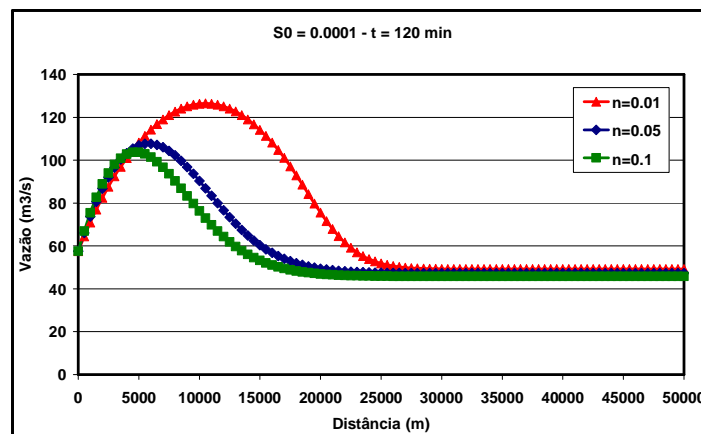


Figura 19 – Comportamento da vazão, ao longo do canal, para $t = 120$ min

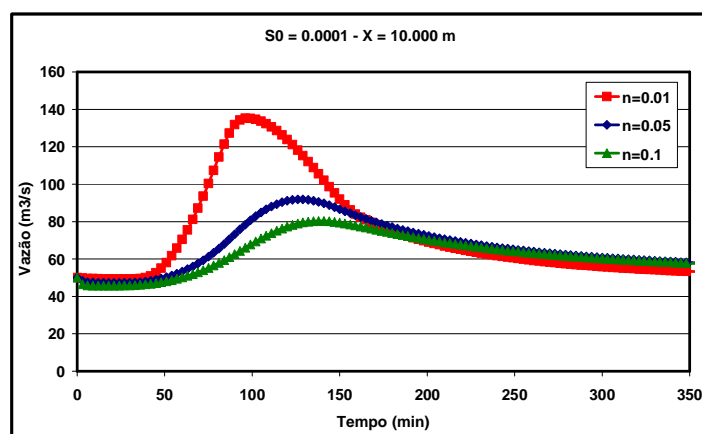


Figura 20 – Comportamento da vazão, ao longo do tempo, para $x = 10.000$ m

Vale salientar que, observando a Figura 19, conclui-se que o pico de vazão, para um canal com rugosidade menor, ocorre mais distante da origem, quando comparado com um canal de coeficiente de rugosidade mais elevado. A análise anterior, relacionada à celeridade, explica este fato, pois quanto maior é a rugosidade, menor é a celeridade. Isto faz com que a onda passe mais lentamente pelo canal. A Figura 20 mostra este fato.

Para o caso específico do risco de cheia, através do estudo da propagação da onda, confirma-se o que foi concluído quando se analisou a influência da rugosidade sobre a profundidade do canal.

Os gráficos mostram, ainda, que, para este cenário, se a rugosidade diminui, diminui também a cota do nível de água e aumenta a vazão e a sua celeridade de propagação. Isto faz com que a onda passa mais rapidamente sem se acumular, evitando o transbordamento. Ou seja, quando a rugosidade é menor, os picos de profundidade também são menores, e diminuem os riscos de uma enchente.

4 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Após uma série de simulações para representar diferentes situações práticas, realizadas com a aplicação do modelo matemático-computacional QUARIGUA, desenvolvido especialmente para esta pesquisa, os resultados encontrados permitem que as seguintes conclusões possam ser tiradas:

A versatilidade do programa computacional permite avaliar, de forma determinística, o comportamento da vazão e da profundidade do escoamento ao longo do canal, para diferentes intervalos de tempo de observação, e ao longo do tempo, para diferentes seções do canal. A distribuição da profundidade do escoamento, no espaço e no tempo, possibilita delimitar, diante de mapa topográfico, as áreas que poderão ser inundadas por uma determinada onda de cheia.

O estudo verificou, através de simulações, a influência dos parâmetros hidráulicos no processo de propagação da onda. Neste caso, o objetivo é avaliar de que forma a declividade e a rugosidade

influenciam este processo. A partir dos resultados obtidos, conclui-se que estes parâmetros atuam significativamente no movimento de uma onda de cheia. Por exemplo, para maiores rugosidades, há uma forte redução na amplitude da onda, fazendo com que, parte do volume de água que chega ao canal, fique armazenada no mesmo, aumentando a possibilidade de enchente. Por outro lado, o efeito inverso ocorre com a declividade. À medida que a declividade cresce, aumenta a capacidade de transporte do canal, reduzindo, por conseguinte, a possibilidade de enchente. Estes resultados obtidos a partir das simulações, comprovam a eficiência da metodologia proposta.

5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKAN, A. O.; YEN, C. Y. (1981). “*Diffusion–wave flood routing in channel networks*”. Journal of the Hydraulics Division, USA, ASCE, v. 107, n. HY6, pp. 719–723, June.

AMEIN, Michael; CHU, H. L. (1975). “*Implicit numerical modeling of unsteady flows. Proceedings of the American Society of Civil Engineers*”. Journal of the Hydraulics Division, USA, v. 101, n. HY6, pp. 1083–1117, June.

AMEIN, Michael; FANG, Ching S. (1970). “*Implicit flood routing in natural channels, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*”. Journal of the Hydraulics Division, USA, v. 96, n. HY12, p. 2481–2518, Dec.

ANDRADE, Carla Freitas. (2003). “*Aplicação dos Modelos Hidrodinâmicos para Estudar Índices de Poluição em Rios Urbanos, em Função dos Seus Parâmetros Hidráulicos*”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 165fl. Fev.

ANDRADE, Carla Freitas. (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 (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 212fl. Set.