

IV-084 - TRANSPORTE DE MASSA DE UMA DESCARGA DE POLUENTE DURANTE A PROPAGAÇÃO DE UMA ONDA EM UM RIO

Maria Patrícia Sales Castro⁽¹⁾

Engenheira Química, Mestre em Saneamento Ambiental e Doutoranda em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará (UFC).

Ticiania Fontoura Vidal⁽²⁾

Engenheira Química, Mestre em Saneamento Ambiental e Doutoranda em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará (UFC).

Alice Rocha de Souza⁽³⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade Federal do Tocantins (UFT). Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG/PB). Doutoranda em Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC)

Patrícia Freire Chagas⁽⁴⁾

Engenheira Civil, Mestre e Doutora em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará (UFC).

Raimundo Oliveira de Souza⁽⁵⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Mestre em Recursos Hídricos pela Colorado State University (CSU). Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo (USP). Professor da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Endereço⁽¹⁾: Rua Humberto Monte, S/Nº - Campus do Pici, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental-DEHA, Bloco 713, Fortaleza-Ceará. CEP- 60.445-760. Fone: (85) 33669771- e-mail: patricia.sales@gmail.com

RESUMO

O crescimento das cidades nas últimas décadas tem sido responsável pelo aumento da pressão das atividades antrópicas sobre os recursos naturais. A impermeabilização do solo, a ocupação desordenada comprometendo mananciais são alguns dos pontos que agravam o problema das enchentes. A falta de saneamento básico tem como principal problema a poluição dos corpos d'água, onde são introduzidos matéria e/ou energia alterando as características da água e podendo afetar a biota. A resposta dos corpos hídricos ao lançamento de despejos industriais e domésticos varia em função de suas características físicas, químicas e biológicas e da natureza das substâncias lançadas. Esta pesquisa teve como objetivo aplicar um modelo de transporte de poluentes associado a um programa computacional de propagação de cheia a fim de avaliar o efeito difusivo desta carga pontual lançada em um rio durante a propagação da onda cinemática. Os resultados mostram que a concentração do poluente varia ao longo do comprimento do rio para diferentes parâmetros hidráulico.

PALAVRAS-CHAVE: Qualidade de água, propagação de onda, difusão de poluentes.

INTRODUÇÃO

A crescente poluição dos corpos hídricos é um problema mundial e o seu controle representa um desafio para os gestores de recursos dos recursos hídricos, não só no Brasil, mas também no mundo. Este problema é mais intenso nos grandes centros urbanos, onde há uma maior demanda por água potável e os lançamentos de poluentes são mais frequentes e concentrados (NAHON, 2006)

Muitos são os autores com trabalhos desenvolvidos sobre qualidade de água, como por exemplo Santos (2008), Nunes (2007), Oppa (2007), Machado (2006), Nemes (2006), Barros (2008) e Chagas (2005).

Segundo Dias (2003) devem-se entender os fenômenos físicos, químicos e biológicos responsáveis pelo movimento e dispersão dos contaminantes nesse sistema. Os fenômenos físicos, relacionados a hidrologia, são regidos por leis fundamentais da física, tais como: conservação de massa, leis da dinâmica newtoniana, e leis

da termodinâmica. Essas leis, quando aplicadas a meios contínuos, são representadas por equações diferenciais parciais que assumem diferentes formas, de acordo com o fenômeno a ser estudado.

Segundo Von Sperling (2005) O processo de autodepuração em corpos d'água está vinculado ao restabelecimento do equilíbrio no meio aquático, após as alterações induzidas pelos despejos afluentes. Uma das etapas da avaliação do impacto que um despejo industrial causa em um corpo hídrico e da eficácia das medidas de controle é a quantificação das cargas poluidoras afluentes.

A modelagem matemática tem se tornado uma importante ferramenta para quantificar a qualidade de água nos mais diversos sistemas hídricos. Estas formulações se tornaram mais frequentes a partir dos anos 60 com os avanços dos métodos numéricos e os sistemas computacionais. (GOMES, 2011)

Lopes *et. al* (2004) apresentaram uma análise global em modelos hidrodinâmicos para estudar a qualidade e sua influencia na flora aquatica. O trabalho mostrou que a relação entre o hábitat físico e alvo das especies aquaticas é uma condição necessária, mas não suficiente para uma viável população de uma especie aquatica.

Even *et. al* (2007) apresentaram um trabalho onde o objetivo foi verificar os impactos causados na qualidade da água do rio Sena pelo lançamento de efluentes e ondas de cheias. O estudo concluiu que numa escala temporal e espacial, os modelos de qualidade de água devem considerar a liberação da substancia composta por gorduras.

Zhang *et. al* (2008) desenvolveram um modelo implícito para resolver as equações de Sant-Venant em um sistema de rios com o intuito de estudar a qualidade de água dos mesmo. O modelo consistia em determinar as concentrações transientes de uma série de constituintes com base na teoria do programa WASP, onde os autores simularam transformações bioquímicas onde determinavam a gordura de nutriente, com o objetivo de avaliar o crescimento e morte do fitoplancton.

Esta pesquisa desenvolveu um modelos advectivo-difusivo conjuntamente com um modelo de propagação de cheia em rios naturais. Para descrever a propagação de onda as equações de Saint-Venant foram reduzidas até a equação da onda cinemática. Para a determinação da concentração do poluente conservativo utilizou-se as equações de transporte de massa. O sistema de equações parciais desses dois modelos foi resolvido usando algoritmos das diferenças finitas. Para este trabalho foi desenvolvido um programa em linguagem FORTRAN que permitiu a realização de simulações para diversos cenários a fim de avaliar o campo de concentração do poluente conservativo durante a propagação da onda cinemática e verificar o comportamento da onda cinemática ao longo do leito do rio.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo que está se desenvolvendo se resume na aplicação do modelo matemático do transporte de massa em um modelo de propagação da onda cinemática, aplicado em um rio natural afim de verificar o comportamento do poluente ao longo do rio. Assim a metodologia será composta do desenvolvimento do modelo da propagação da onda cinemática e do modelo matemático de transporte de massa.

Como o objetivo da pesquisa é avaliar o efeito difusivo de uma descarga de poluentes conservativos sobre a propagação de onda cinemática em rio, inicialmente formulou-se um modelo matemático de qualidade de água baseado nos principios de transporte de massa:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \dots\dots\dots (1)$$

Onde C é a concentração do poluente [M/L³]; U é a velocidade na direção x [L/T]; $E_x = 0,05937 \frac{Q}{S_0 B}$ definido como coeficiente de dispersão longitudinal [L²/T]; B é a Largura do rio [L]; S₀ é a declividade do rio [L/L]; Q é a vazão do rio [L³/T]; x coordenada cartesiana [L] e t é o tempo [T].

A velocidade U é determinada através da solução do modelo da onda cinemática. O desenvolvimento do modelo matemático para escoamento em rios é bem mais complexo, mesmo em situações mais simples, como a propagação de uma onda de cheia em um canal prismático e retilíneo, no qual não ocorre extravasamento da seção, nem aporte lateral de vazão. O escoamento da água, como fenômeno, é regido por leis físicas, e representado quantitativamente por variáveis tais como vazão, profundidade, área e velocidade. O comportamento do movimento da água, em rios e canais, é representado matematicamente por duas equações diferenciais, que controlam a conservação de massa e de quantidade de movimento do escoamento. Tais equações são comumente chamadas de equações de Saint– Venant. A dedução destas equações foi apresentada por Yen (1973)

1.1 Equação da Continuidade

A primeira equação fundamental do escoamento em rios e canais é a equação da continuidade. Na aplicação a rios, como o princípio original referem-se à conservação de massa, os volumes de água serão multiplicados pela massa específica, de maneira que o balanço resultante seja feito em termos de massa através do mesmo elemento de controle. (Andrade, 2006).

O enunciado da equação da continuidade diz que a diferença entre a taxa de escoamento da massa para fora e a taxa de escoamento da massa para dentro é igual à taxa de efluxo de massa resultante através do volume de controle. Assim, a equação da continuidade é dada na sua forma diferencial por:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

1.2 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 taxa da variação do momentum dentro do volume de controle e a taxa de efluxo de momentum resultante através da superfície de controle. Logo, a equação da quantidade de movimento é dada na sua forma diferencial por:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \left(\frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + S_f \right) = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

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

As ondas cinemáticas descrevem escoamentos onde as forças de pressão e as forças inerciais são desprezíveis, assim a equação 3 torna-se:

$$S_f = S_0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

A equação 4, associada com a equação 2, temos a formulação básica da onda cinemática, onde a linha de energia é paralela a linha de fundo do canal.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + k(Q) \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

Onde: x é a distância a jusante [L], t é o tempo, $k(Q)$ é a celeridade da onda [L/T] e $Q(x,t)$ é a vazão [L^3/T]. Para este estudo temos que a contribuição lateral é igual à zero.

Foi utilizado o método das diferenças finitas explícito para se resolver o modelo da onda cinemática e pelo método das diferenças finitas implícito para o modelo matemático para a difusão do poluente conservativo. Para resolver as equações diferenciais parciais envolvidas foi desenvolvido um programa computacional em Fortran.

Para as simulações, considerou-se um canal retangular com comprimento de 50.000 m, que foi discretizado em 50 trechos de 1.000 m de comprimento cada, na direção longitudinal do rio. Com relação ao tempo foram definidos 500 intervalos de 150 s, perfazendo um tempo máximo de, aproximadamente, 2 h. A vazão inicial do rio é de $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Os valores da declividade do canal, da rugosidade e da vazão inicial são definidos de acordo com a simulação desejada.

RESULTADOS

A primeira simulação trata de estudar o comportamento da vazão (Q), em função do comprimento do canal (x), onde é possível observar como a onda cinemática se comporta ao longo do canal por um determinado período de tempo, para uma declividade de 0,0001 e um número de Manning de 0,01 (Figura 1).

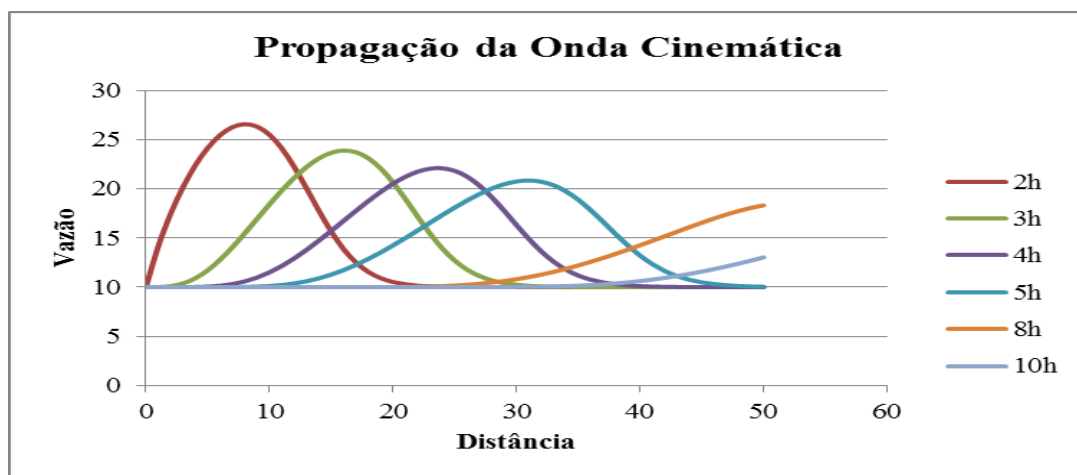


Figura 1: Hidrograma para vazão versus comprimento para diferentes tempos.

A segunda simulação trata de verificar o comportamento da propagação da onda para uma determinada declividade fixa, ao longo da extensão do rio para diferentes números de Manning em determinado tempo (Figura 2). Através da figura é possível verificar que, para diferentes números de Manning, quanto menor o coeficiente de rugosidade, maior será o pico da onda,. Entretanto deve ficar claro que este amortecimento é devido à dissipação da energia causado pelo atrito das paredes do canal. Os resultados ainda mostram que com o passar do tempo, a onda se dispersa inteiramente ao longo do canal, como era de se esperar, tendo em vista o efeito descrito anteriormente.

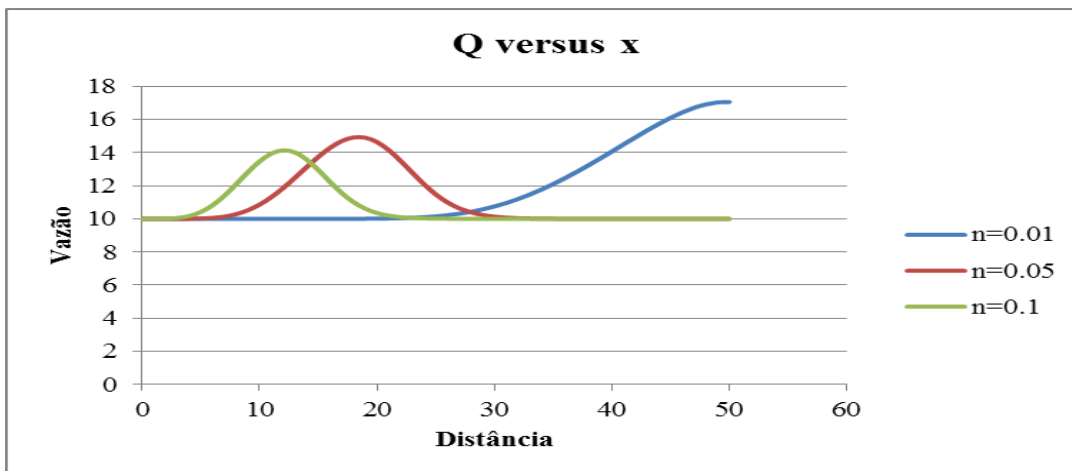


Figura 2: Comportamento da Vazão, da onda cinemática ao longo do rio, em $t=10$ hs, $CQ=2$ e $S_0=0.00004$, para diferentes coeficientes de rugosidade.

Na Figura 3 verifica-se que o coeficiente de rugosidade desempenha importante papel no transporte de massa. Os resultados mostram que quanto menor o coeficiente de rugosidade, maior será o espalhamento da nuvem do poluente ao longo do eixo do rio. Isto é decorrente do fato de que o coeficiente de dispersão é função da vazão. Quanto menor a rugosidade maior será a vazão, como ficou claro na análise anterior.

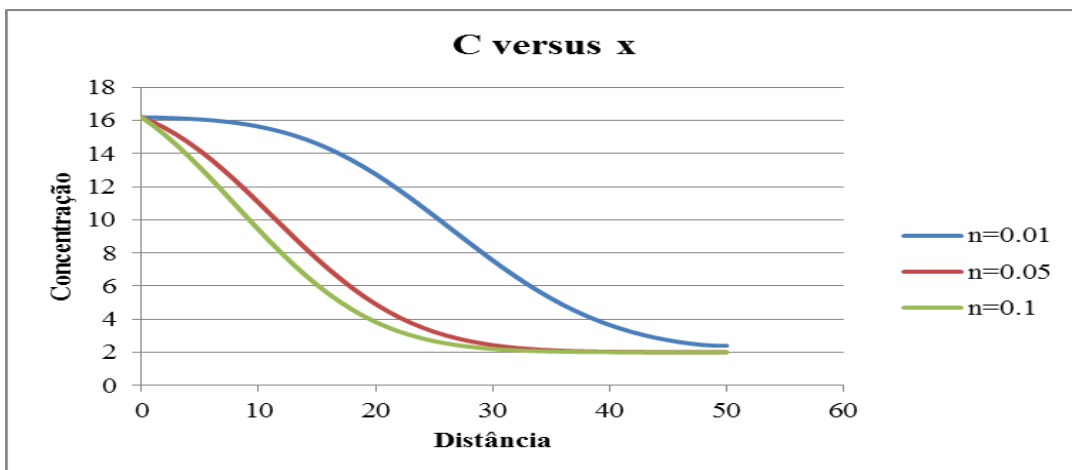


Figura 3: Comportamento da Concentração do poluente ao longo do rio, em $t=10$ hs, $CQ=2$ e $S_0=0.00004$, para diferentes coeficientes de rugosidade.

A mesma análise pode ser feita para vazão (Q) e a concentração do poluente (C) em relação ao tempo. (Figuras 4 e 5). Atentando que na figura 4 o pico máximo da maior onda ocorre para o menor valor de coeficiente de rugosidade no tempo de 2,5 hs. Na figura 5, a concentração do poluente atinge seu máximo em 11,0 hs, mantendo-se estável a concentração em torno de 16 mg/L ao longo da propagação da onda. Os resultados mostram que para menor rugosidade, maior é a celeridade da onda, fazendo com que a mesma chegue mais rápido na seção de 10 km, trazendo com ela a nuvem poluente. Isto está mostrado na figura 5.

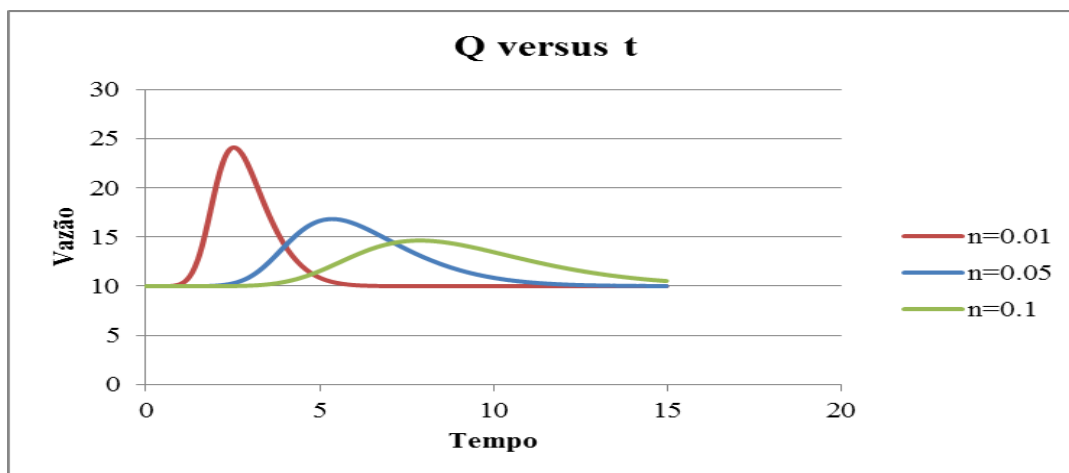


Figura 4: Hidrograma de vazão versus tempo, na seção 10 km, CQ =2 e $S_0=0.00004$, para diferentes coeficientes de rugosidade.

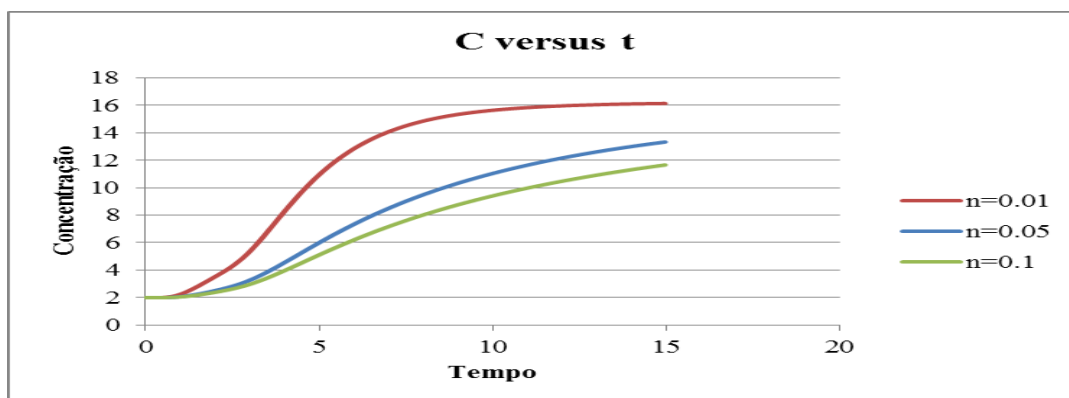


Figura 5: Comportamento da Concentração do poluente em relação ao tempo, na seção 10 km, CQ =2 e $S_0=0.00004$, para diferentes coeficientes de rugosidade

As figuras 6 e 7 contêm resultados comparativos entre diferentes valores de concentração inicial do poluente conservativo em relação à vazão e a concentração final, respectivamente.

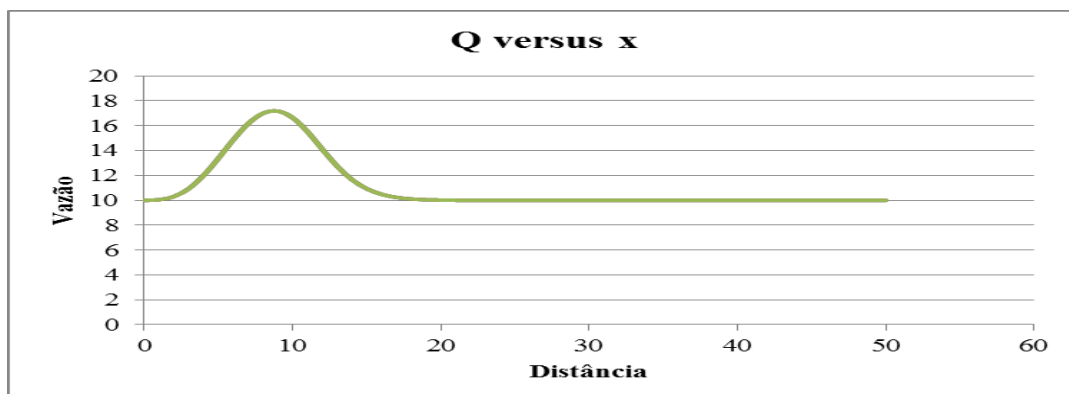


Figura 6: Hidrograma da Vazão ao longo do rio, em t=5hs, CQ =2, n=0.05 e $S_0=0.00004$, para diferentes valores de concentração inicial.

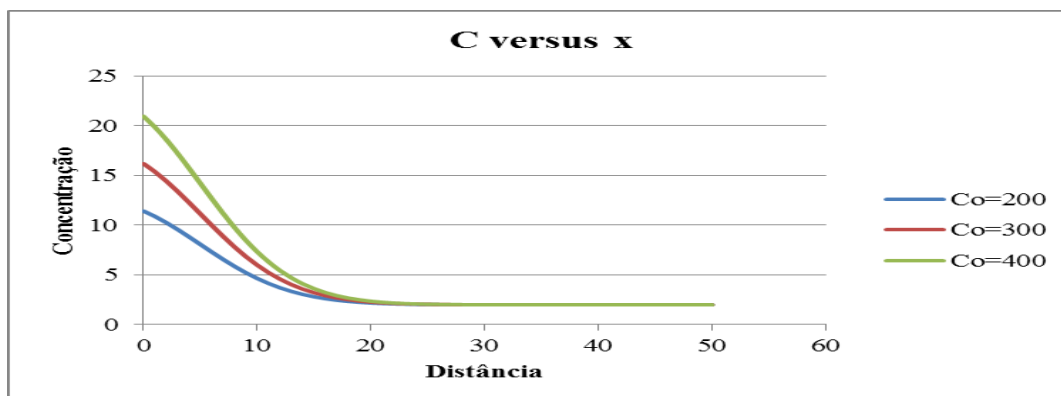


Figura 7: Comportamento da Concentração de poluente ao longo do eixo longitudinal, em $t=5\text{hs}$, $CQ=2$, $n=0.05$ e $S_0=0.00004$, para diferentes valores de concentração inicial.

Na figura 6, verifica-se o hidrograma da vazão da onda cinemática para os diferentes valores de concentração inicial no tempo igual a 5 hs onde o pico máximo da onda é de $17 \text{ m}^3/\text{h}$. Na Figura 7 mostra que a concentração do poluente ao longo do rio se mantém estável na mesma seção para diferentes os valores de concentração inicial, isto é, na seção 18 Km. No entanto, nas primeiras seções, os resultados são bem diferentes. Os resultados mostram que quanto maior for a concentração de lançamento, mas vazão vai ser necessário para a diluição desta massa poluente.

CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

A partir dos resultados gerados nesta pesquisa, pode-se constatar a importância do uso de técnicas combinadas de hidráulica e transporte de massa a fim de prever o impacto ambiental causado pela descarga de poluente industrial em rio. Pode-se constatar a viabilidade de se empregar a implementação de técnicas computacionais, cujas estas técnicas facilitou a solução dos modelos e, com isso, tornou-se possível avaliar as consequências de uma descarga contínua de efluentes em rios. Foi verificado, por exemplo, que a vazão desempenha importante papel no comportamento do perfil de concentração ao longo do rio. Foi verificado ainda que a rugosidade é um fator que determina a velocidade de transporte da nuvem poluente. Também foi verificado que a velocidade de diluição das concentrações do efluente é função da intensidade da onda de cheia. Finalmente, foi verificado que o programa desenvolvido para esta pesquisa mostrou-se eficiente, tanto na solução da equação de hidrodinâmica como na solução do modelo de transporte de poluente e que, neste caso, o mesmo pode ser incrementado para servir como uma ferramenta de modo a fornecer subsídios para a gestão de recursos hídricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BARROS, A. M. L. Modelagem da poluição pontual e difusa: aplicação do modelo moneris à bacia hidrográfica do Rio Ipojuca, Pernambuco. 2008. 218 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.
2. CHAGAS, P. F. Perspectivas da Aplicação da Teoria Fuzzy para o cálculo de risco em sistemas hidrodinâmicos. Tese defendida no Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para obtenção do título de doutor em recursos hídricos, 2005.
3. DIAS, N. L. Obtenção de uma solução analítica da Equação de Difusão-Advecção com decaimento de 1º ordem pelo método da Transformação da Similiaridade Generalizada. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v 8, n. 1, p.181-188, 2003.
4. EVEN, S.; MOUCHEL, J.M.; SERVAIS, P.; FLIPO, N.; POULIN, M.; BLANC, S.; CHABANEL, M.; PAFFONI, C.; Modelling the impacts of combined Swer Overflows on the river Seine water quality. Science of the Total Environment, n. 375, p 140-151, 2007.
5. GOMES, V. U. Aplicação da teoria FUZZY em um modelo bidimensional de transporte de massa, para estudar o risco FUZZY em rios urbanos, sujeitos a lançamentos de agentes poluentes. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará, 2011.
6. LOPES, L. F. G.; CARMO, J. S. A.; CORTES, R. M. V.; OLIVEIRA, D. Hydrodynamics and water quality modelling in a regulated river segment: application on the instream flow definition. Ecological Modelling, n. 173, p. 197-218, 2004.
7. MACHADO, M. B. Modelagem tridimensional da dispersão de poluentes em rios. 2006. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2006.
8. NEMES, P. D. Estudo de capacidade de suporte de carga de corpo receptor dos efluentes líquidos de uma lavanderia industrial. 2006. 121 f. Monografia (Conclusão de Curso em Tecnologia em Química Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
9. NAHON, I. M. Sistema de apoio à análise de outorga de lançamento de efluentes para a variável Demanda Bioquímica de Oxigênio: Estudo de caso da bacia do Alto Iguaçu. 2006. 175f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006
10. NUNES, D. G. Modelagem da autodepuração e qualidade da água do Rio Sujo. 2007. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2007.
11. OPPA, L. F. Utilização de modelo matemático de qualidade da água para análise de alternativas de enquadramento do Rio Vacacaí Mirim. 2007. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2007.
12. SANTOS, R. C. M. M. Estudo de parâmetros relevantes da poluição da água por efluentes de lavanderia e tinturaria industriais em um rio não perene. 2008. 113 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Processos Industriais) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2008.
13. Von Sperling, M. Introdução a qualidade da águas e ao tratamento de esgoto. 3ª edição, Belo Horizonte, UFMG/ABES, 2005.
14. ZANG, M.L.; SHEN, Y.M.; GUO,Y.; Development and Application of a Eutrophication water quality model for river networks. Journal of Hydrodynamics, n 20, p 719-726, 2008.
15. YEN, B. C.,(1973) Open–channel flow equations revisited. Water Resources, [S. L.], n. 51, p. 979– 1009