

ANÁLISE DO RISCO AMBIENTAL EM RIOS MEDIANTE APLICAÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO BIDIMENSIONAL DIFUSO CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DA ONDA DIFUSIVA

Juliana Alencar Firmo de Araújo¹; Raquel Jucá de Moraes Sales²; Patrícia Freire Chagas³; Maria Patrícia Sales de Castro⁴; Sílvia Helena Lima dos Santos⁵; Rejane Félix Pereira⁶; Juliana Sales Frota⁷ & Raimundo Oliveira de Souza⁸

Resumo – Este trabalho tem como objetivo analisar as relações entre campos de concentração de um poluente diante da propagação da onda difusiva em rios naturais, mediante a aplicação de um modelo bidimensional de transporte de massa, na sua forma *fuzzy*, de modo que campos de risco ambiental possam ser estudados. Os resultados foram obtidos com o uso de um programa computacional, em linguagem FORTRAN, que permitiu a realização de várias simulações para diferentes cenários. Os resultados mostraram que a presença da onda difusiva nos modelos de transporte tem um comportamento bem diferente da do comportamento obtido sem a presença de um escoamento permanente, mostrando, assim, que estudos mais detalhados são sempre necessários para conclusões definitivas para estes problemas relacionados com a qualidade de água.

Palavras-Chave – Análise de risco *fuzzy*. Mecânica fluvial. Modelagem de qualidade de água.

ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL RISK IN RIVERS THROUGH APPLICATION OF A BIDIMENSIONAL DIFFUSE MATHEMATICAL MODEL CONSIDERING THE INFLUENCE OF THE DIFFUSIVE WAVE

Abstract – This work aims to analyze the relations between concentration fields of a pollutant before diffusive wave propagation in natural rivers by applying a bidimensional model of mass transport in its *fuzzy* form so that environmental risk could be studied. The results were obtained with the use of a computer program, FORTRAN, which allowed the execution of several simulations for different scenarios. The results showed the presence of the diffusive wave in the transport models has a very different behavior from the behavior obtained without the presence of a permanent flow, showing, therefore, that more detailed studies are always necessary for definitive conclusions for these problems related to the water quality.

Keywords – *Fuzzy* risk analysis. Fluvial mechanics. Water quality modeling.

¹ Professora Doutora do Centro Universitário Christus e da Universidade de Fortaleza. E-mail: judiaraujo@yahoo.com.br;

² Professora Doutora da Universidade de Fortaleza. E-mail: raqueljuca@gmail.com;

³ Pesquisadora Doutora da Companhia de Saneamento do Rio Grande do Norte. E-mail: pfchagas@yahoo.com;

⁴ Doutoranda da Universidade Federal do Ceará. E-mail: patricia.sales@gmail.com;

⁵ Professora Doutora da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira. E-mail: silvia.santos@unilab.edu.br;

⁶ Professora Doutora da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira. E-mail: rejanefp@gmail.com;

⁷ Graduanda do Centro Universitário Unichristus. E-mail: juliana.sales.frota@gmail.com;

⁸ Professor Doutor titular da Universidade Federal do Ceará. E-mail: rsouza@ufc.br.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A presença de componentes físicos, químicos e biológicos nos rios associada à dinâmica fluvial presente nestes ecossistemas permite a existência de processos extremamente complexos, fazendo com que sua descrição através de modelos matemáticos se torne uma missão desafiadora. Isto implica a necessidade de se estabelecer um conjunto de simplificações criteriosas, de modo a se ter resultados que venham descrever esses processos com um grau de realismo.

A utilização de modelos matemáticos para avaliar as questões de lançamento e assimilação de poluente em um corpo d'água é uma ferramenta de suma importância, em virtude da complexidade dos processos determinantes nas questões da qualidade de água (CHAPRA, 1997).

A formulação de um modelo matemático para descrever as interações físicas químicas e biológicas em um sistema aquático vem sendo realizada com mais frequência após o desenvolvimento de sistemas computacionais, considerando esta complexidade citada anteriormente.

Quando se estuda qualidade de água mediante a aplicação de modelos matemáticos, dois tipos de modelos podem ser considerados. O primeiro, conhecido como modelo determinístico, trata da solução de problemas onde não há necessidade de análise de incertezas. Neste caso, estudo de risco não pode ser considerado com esta classe de modelos. O outro tipo de modelo, chamado de modelo estocástico, trata de problemas onde análise de incerteza precisa ser realizada. Os modelos estocásticos, no entanto, necessitam de um banco de dados consistente para sua aplicação.

A teoria de sistemas difusos adicionado a um modelo dinâmico tem como principal benefício aproximar o comportamento do sistema, onde não existem funções analíticas ou numéricas, ou seja, sistemas complexos. Alternativamente, a teoria dos conjuntos difusos pode ser utilizada na avaliação de sistemas mais convencionais, menos complexos. Para alguns problemas, soluções exatas nem sempre são necessárias, assim, uma solução aproximada, porém rápida, pode ser útil numa tomada de decisão preliminar, ou como estimativa inicial em uma técnica numérica para poupar custos computacionais, ou em inúmeras situações onde os valores de entrada para o sistema são vagos, ambíguos ou desconhecidos.

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia que permite o cálculo do risco e confiabilidade *fuzzy* em rios. A metodologia consistiu na aplicação de um modelo bidimensional de transporte de massa na sua forma *fuzzy* na presença de uma onda difusiva. Para esse estudo, foi realizada uma comparação da influência da onda difusiva nos campos de risco provenientes das concentrações simuladas ao longo do rio. Por fim, foram apresentados os resultados obtidos que permitem o cálculo desses funcionais (risco e confiabilidade) em escala espacial.

2. METODOLOGIA

A formulação do modelo matemático que compõe o estudo consiste da equação da onda difusiva, na sua forma *fuzzy* juntamente com a equação da onda da difusão advectiva em duas dimensões. A substância usada foi considerada conservativa proveniente de um derramamento instantâneo.

2.1. Modelo da Onda Difusiva

A equação da onda difusiva é uma simplificação da onda dinâmica de Saint Venant definida como sendo (STURM, 2001):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \Phi(x,t) \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} = D(x,t) \cdot \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (1)$$

Sendo a celeridade da onda difusiva definida por:

$$\Phi(x,t) = \frac{dQ}{dA} \quad (2)$$

O coeficiente de difusão aparente da onda é dado por:

$$D(x,t) = \frac{Q}{2\beta S_o} \quad (3)$$

Onde:

$Q \rightarrow$ Vazão do corpo hídrico [L^3T^{-1}];

$\alpha \rightarrow$ Parâmetro geométrico do rio definido por:

$$\alpha = \left[\frac{nP^{2/3}}{S_o^{1/2}} \right]^{3/5} \quad (4)$$

$n \rightarrow$ Coeficiente de rugosidade de Manning;

$P \rightarrow$ Perímetro molhado [L];

$S_o \rightarrow$ Declividade do fundo do canal [L/L];

$\beta \rightarrow$ Constante de valor igual a 3/5 quando a fórmula de Manning é aplicada.

2.2. Modelo de Transporte

Foi aplicado um modelo de transporte em duas dimensões definido por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (5)$$

Onde:

$C \rightarrow$ Concentração média na seção da substância poluente [ML^{-3}];

$t \rightarrow$ Tempo [T];

$u \rightarrow$ Velocidade na direção longitudinal [LT^{-1}];

$x, y \rightarrow$ Distâncias longitudinal e transversal [L];

$E_x, E_y \rightarrow$ Coeficientes de difusão nas direções longitudinal e transversal, respectivamente.

2.3. Teoria Fuzzy

A teoria dos conjuntos *fuzzy* (ZADEH, 1965; ZIMMERMANN, 1985) é um método matemático usado para caracterizar e quantificar a incerteza e imprecisão nos dados e relações funcionais. Conjuntos difusos são especialmente úteis quando o número de dados não é suficiente para caracterizar a incerteza por meio de medidas padrão da estatística envolvendo a estimativa de frequências.

A ideia proposta por Lotfi Zadeh sugere que definir a função de pertinência é a chave para a tomada de decisão quando há incerteza. De acordo com Ganoulis (1994) o conceito central da teoria dos conjuntos difusos é a função de pertinência que representa numericamente o grau em que um elemento pertence a um conjunto. Se um elemento pertence a um conjunto difuso em algum grau, o valor da sua função de pertinência pode ser qualquer número entre 0 e 1. Quando a função de

pertinência de um elemento pode ter apenas os valores 0 ou 1, a teoria dos conjuntos se reduz à teoria clássica dos conjuntos.

Um conjunto difuso consiste em um conjunto de pares ordenados que contém o elemento (ω) e seu valor de pertinência $\mu_{\tilde{F}}(\omega)$. Formalmente, um conjunto \tilde{F} é chamado *fuzzy* em um universo Ω , se ela consiste de pares ordenados tais que:

$$\tilde{F} = \{(\omega, \mu_{\tilde{F}}(\omega)) : \omega \in \Omega; \mu_{\tilde{F}}(\omega) \in [0,1]\} \quad (6)$$

2.4. Equação do transporte de poluentes *fuzzificada*

Foi aplicada a teoria dos conjuntos difusos na equação (5), e admitida a média temporal da concentração e da velocidade da substância poluente. Assim:

$$\frac{\partial \tilde{C}}{\partial t} + \tilde{u} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\tilde{E}_x \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\tilde{E}_y \frac{\partial \tilde{C}}{\partial y} \right) \quad (7)$$

Onde:

- \tilde{C} → Função de pertinência para a concentração;
- \tilde{u} → Função de pertinência para o campo de velocidade longitudinal;
- \tilde{E}_x → Função de pertinência para o coeficiente de dispersão longitudinal;
- \tilde{E}_y → Função de pertinência para o coeficiente de dispersão transversal.

2.5. Modelo de onda difusiva *fuzzificada*

Foi aplicada a teoria dos conjuntos difusos na equação (1). Assim:

$$\frac{\partial \tilde{Q}}{\partial t} + \frac{d\tilde{Q}}{d\tilde{A}} \cdot \frac{\partial \tilde{Q}}{\partial x} = \frac{\tilde{Q}}{2B\tilde{S}_0} \cdot \frac{\partial^2 \tilde{Q}}{\partial x^2} \quad (8)$$

Onde:

- \tilde{S}_0 → Função de pertinência para a declividade de fundo.
- \tilde{A} → Função de pertinência para área transversal do rio.

2.6. Análise de risco

O risco é um assunto relativamente novo no campo dos recursos hídricos e da engenharia ambiental. Apesar de muitos desenvolvimentos teóricos terem sido alcançados ao longo dos últimos anos, o progresso tanto no entendimento quanto na aplicação da análise de risco continua lento.

Segundo Chagas (2005), o risco é inerente às atividades humanas e às decisões que são tomadas no cotidiano. O conjunto de ações no presente, associado ao desenvolvimento tecnológico e científico tem produzido um aumento significativo no aumento do risco a que as pessoas se expõem. Dentro dos vários tipos de risco podem-se citar os riscos causados por exposição a ambiente com baixa qualidade ambiental, o risco das empresas de seguros, o risco de contaminação de alimentos

por uma aplicação inadequada de pesticidas, até os riscos de mau desempenho profissional, tanto do ponto de vista moral como espiritual.

Para o cálculo do risco, a metodologia *fuzzy* prevê uma relação entre a carga poluente e uma resistência que nada mais é do que os limites estabelecidos em norma (resolução CONAMA nº 430, 2011). Esses limites normalmente estabelecem as condições de qualidade do corpo hídrico. É importante observar que esta comparação é feita na teoria *fuzzy* em forma de funções de pertinência.

No presente estudo, a carga poluente representa as concentrações calculadas ao longo do rio, a partir de um lançamento instantâneo. Já a resistência representa a concentração limite de uma substância pelo qual o corpo hídrico é considerado poluído definido por norma.

Para o cálculo do risco, há a necessidade que tanto a concentração como a resistência sejam expressos na forma *fuzzy*. Neste caso, o programa computacional calcula as concentrações ao longo do rio em forma de funções de pertinência. Por outro lado, a resistência é transformada em função de pertinência mediante a aplicação de um fator nas concentrações que definem o limite das concentrações aceitáveis por norma.

Para este trabalho foi considerado um desvio padrão de 25% da média. Assim, temos duas categorias de funções de pertinência definidos por:

$$\tilde{L} = [L_L, L_M, L_U] \quad \tilde{R} = [R_L, R_M, R_U] \quad (9)$$

Onde:

- \tilde{L} → Função de pertinência para a carga de concentração medida;
- L_L → Limite inferior da carga com grau de pertinência 0 (zero);
- L_M → Valor da carga com grau de pertinência 1 (um);
- L_U → Limite superior da carga com grau de pertinência 0 (zero);
- \tilde{R} → Função de pertinência para a resistência estabelecida por norma;
- R_L → Limite inferior da resistência com grau de pertinência 0 (zero);
- R_M → Valor da resistência com grau de pertinência 1 (um);
- R_U → Limite superior da resistência com grau de pertinência 0 (zero).

Uma vez calculadas essas duas funções de pertinência, define-se a função marginal de segurança (\tilde{M}) como:

$$\tilde{M} = \tilde{R} - \tilde{L} \quad (10)$$

Como deve ser observado, \tilde{M} é resultado de uma operação entre funções de pertinência também é uma função de pertinência.

É importante notar que:

- Se $\tilde{M} \geq 0 \rightarrow RF = 0$ e $GF = 1$;
- Se $\tilde{M} < 0 \rightarrow RF = 1$ e $GF = 0$.

Onde:

- RF → Risco *fuzzy* que representa a possibilidade de falha do sistema;
- GF → Garantia *fuzzy* que representa a segurança do sistema não falhar.

De acordo com a teoria *fuzzy*, o risco e a garantia são definidos por:

$$RF = \frac{\int_{-\infty}^0 \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad GF = \frac{\int_0^{+\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad (10)$$

Onde:

$\tilde{M} \rightarrow$ Função marginal de segurança;
 $m \rightarrow$ Números *fuzzy* da função marginal de segurança.

Este conjunto de procedimentos caracteriza uma metodologia para a determinação do índice de risco *fuzzy* e do índice de confiabilidade *fuzzy*, o qual será empregado neste trabalho para a determinação do risco de contaminação de um rio sujeito ao recebimento de uma carga poluente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após uma série de simulações realizadas a partir do uso do programa computacional desenvolvido para esta pesquisa, foi possível apresentar resultados do comportamento do risco e considerando a presença de uma onda difusiva se propagando rio abaixo. Esses resultados mostram o comportamento de uma nuvem poluente, proveniente de um lançamento instantâneo no centro do rio, de uma massa de 900 kg conservativa. Nesta pesquisa, não há qualquer necessidade de se definir a natureza da substância, considerando que esta investigação focou somente no comportamento dinâmico e de transporte da massa poluente, sob a presença de uma onda de cheia.

A figura 1 mostra os perfis da onda de cheia proveniente do modelo da onda difusiva, para diferentes tempos. De acordo com a figura, é possível ver a capacidade de dispersão da onda em questão pela presença de um termo difusivo que compõe o modelo e que depende da declividade do fundo do canal. Este termo altera significativamente o comportamento da onda de cheia, mostrando que a onda fica menos intensa, mas fica mais espalhada ao longo do canal. Por exemplo, para o modelo da onda cinemática, em 60 minutos, a onda chega apenas a 2,5 km. Já para o caso da onda difusiva, em 60 minutos a onda chega a 10 km de distância. Este é um importante resultado que certamente irá alterar o comportamento do risco ao longo do canal.

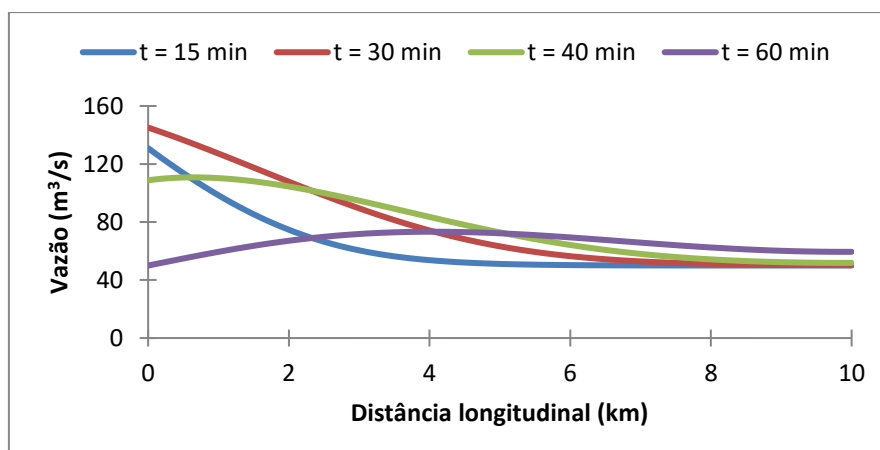


Figura 1 – Vazões na seção longitudinal para diferentes tempos, sob a influência da onda difusiva.

A figura 2 mostra os resultados para os perfis das concentrações, para diferentes tempos. Como foi dito anteriormente, é possível notar que, para este modelo de onda de cheia, há um potencial muito maior de dispersão da nuvem poluente na presença da onda de cheia em questão. Para os mesmos tempos de observação, é possível ver que as concentrações da substância considerado cai para valores próximos de 1 mg/L já para um tempo de 30 minutos, resultados estes, bem diferente daqueles observados anteriormente, para a onda cinemática. Este resultado comprova a análise feita anteriormente.

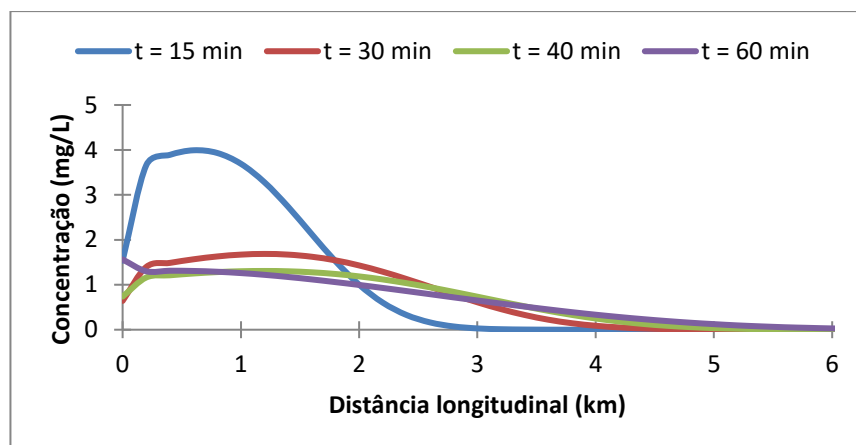


Figura 2 – Concentrações na seção longitudinal para diferentes tempos, sob a influência da onda difusiva.

A figura 3 mostra os perfis do risco para este cenário com a presença de uma onda difusiva. Neste caso, fica muito claro que o que tem sido dito ao longo destas análises. Aqui pode ser claro que a influência da onda difusiva no processo de dispersão do poluente, causado pela dispersão da onda difusiva. Através da figura pode se ver que o risco máximo para um tempo de 30 minutos é de 0,15, enquanto que para um tempo de 40 minutos o risco máximo não passa de 0,05, o que é muito baixo para os padrões de qualidade de água sujeitos a um lançamento de uma massa poluente.

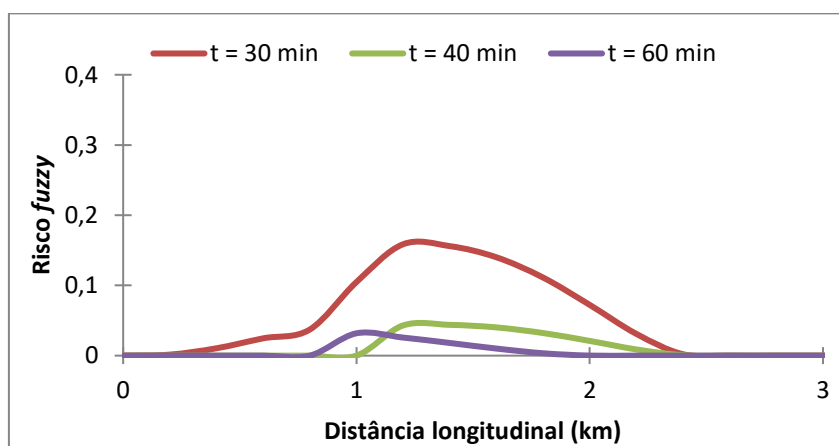


Figura 3 - Risco na seção longitudinal para diferentes tempos sob a influência da onda difusiva.

4. CONCLUSÕES

Após análise dos resultados obtidos de uma série de simulações para diferentes cenários, foi possível chegar a algumas conclusões pertinentes ao estudo em questão. Essas conclusões serão apresentadas a seguir.

O risco e a confiabilidade dependem do comportamento das concentrações dos poluentes no rio. É bom lembrar de que as concentrações que são usadas para determinar o risco e a confiabilidade são concentrações oriundas da resposta do rio ao lançamento de uma carga poluente. Assim, de acordo com este lançamento, de acordo com a capacidade de diluição do rio, o comportamento do risco e da confiabilidade poderá ser determinado.

Com relação às relações entre a hidrodinâmica e a o transporte de poluente, os estudos mostram que a presença de uma onda difusiva altera significativamente o comportamento das concentrações de poluentes. Foi verificado que uma nuvem poluente sofre influência da onda de cheia tanto nas questões de dispersão dos poluentes, quanto nas questões de alteração dos processos advectivos, fazendo com que a nuvem se desloque mais ou menos rápido ao longo do rio. Este resultado mostra que a presença de uma onda de cheia aumenta o potencial de diluição do rio, fazendo com que o mesmo se depure mais rapidamente.

Ainda com relação à presença de uma onda de cheia, foi verificado que a onda difusiva exerce uma influência significativa na diluição da nuvem poluente. Este resultado é explicado pela presença do termo difusivo na equação diferencial, o qual faz com que a influência da onda difusiva seja sentida em uma região maior.

Finalmente, os resultados mostram que esta metodologia envolvendo a teoria *fuzzy* nos problemas de transporte de poluente pode se tornar uma importante técnica na análise de problemas qualidade de água em rios, proveniente da concessão de lançamentos efluentes em rios com baixa capacidade de autodepuração, permitindo assim, que melhores análises possam ser desenvolvidas.

REFERÊNCIAS

- CHAGAS, P. F. *Perspectivas da Aplicação da Teoria Fuzzy para Cálculo de Risco em Sistemas Hidrodinâmicos. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.*
- CHAPRA, S. C. **Surface Water-Quality Modeling.** New York: McGraw-Hill, 1997, 844p.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011.** Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em 13/01/2016.
- GANOULIS, J. G. **Engineering risk analysis of water pollution: probabilities and fuzzy sets.** New York: VCH Publishers Inc., 1994.
- STURM, T. W. **Open channel hydraulics.** McGraw Hill Series. In: Water Resources and Environmental Engineering, 1st, 2001.
- ZADEH, L. A. **Fuzzy sets.** *Information and control.* vol.8, p. 338-353, 1965.
- ZIMMERMANN, H. J. **Fuzzy Set Theory and its Application.** Martinus Nijhoff, Dordrecht, p.363, 1985.