



## XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

### APLICAÇÃO DA TEORIA FUZZY EM AMBIENTES DE INCERTEZAS DURANTE A ONDA DIFUSIVA

*Maria Patrícia Sales Castro<sup>1\*</sup> & Karyna Oliveira Chaves de Lucena<sup>2</sup> & Tician Fontoura Vidal<sup>3</sup> & Alice Rocha de Souza<sup>4</sup> & Nosliana Nobre Rabelo<sup>5</sup> Juliana Alencar Firmo de Araújo<sup>6</sup> & Raquel Jucá de Moraes Sales<sup>7</sup> & Silvia Helena Lima dos Santos<sup>8</sup> & Patricia Freire Chagas<sup>9</sup> & Raimundo Oliveira de Souza<sup>10</sup>*

**Resumo** – Este trabalho tem por objetivo aplicar a Teoria *Fuzzy* em modelos de ondas difusivas em canais naturais, visando verificar as incertezas relacionadas aos parâmetros hidrodinâmicos presentes nesses modelos. O modelo hidrodinâmico de propagação de cheias utilizado foi o modelo de onda difusa na sua forma *fuzzy*. Através dos esquemas de Diferença Finita Implícita foi resolvido as equações diferenciais. Para realizar um conjunto de simulações para diferentes cenários no corpo d'água foi desenvolvido um programa computacional, codificado em FORTRAN. Os resultados apontam que o comportamento da propagação da onda difusa *fuzzy* é influenciado pela característica de inclinação e do número de Manning ( $n$ ), tornando este modelo uma ferramenta viável para prever inundações em áreas susceptíveis.

**Palavras-Chave** – Propagação de Cheias, Onda Difusa *Fuzzy* e Incertezas.

### APPLICATION OF FUZZY SET THEORY IN UNCERTAINTIES ENVIRONMENTS DURING DIFFUSION ROUTING

**Abstract** – This research aims to apply the Fuzzy Theory in diffusive wave models at natural channels, in order to verify the uncertainties related to the hydrodynamic parameters present in these models. The hydrodynamic model of flood routing was Diffuse wave model in Fuzzy

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

<sup>2</sup> 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.

<sup>3</sup> Pesquisadora na Universidade Federal do Ceará (UFC). Doutora em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. Mestre em Saneamento Ambiental. E-mail: ticianafvidal@yahoo.com.br.

<sup>4</sup> Professora do Instituto Federal do Tocantins (IFTO). Doutora em Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará. Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental. E-mail: alycesouza@hotmail.com.

<sup>5</sup> Doutoranda em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. Mestre em Programa de Desenvolvimento e Meio Ambiente. E-mail: nosliana\_rabelo@hotmail.com.

<sup>6</sup> 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.

<sup>7</sup> Professora da Universidade de Fortaleza (UNIFOR). Doutora e Mestre em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. E-mail: raqueljuca@gmail.com.

<sup>8</sup> 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.

<sup>9</sup> 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

<sup>10</sup> Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (UFC). E-mail: rsoouza@ufc.br.



## XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

form. Through the Implicit Finite Difference schemes was solved partial differential. To carry out a set of simulations for the most different scenarios in the water body was developed a computer program, coded in FORTRAN. Results note that the behavior of fuzzy diffusive wave flood routing is influenced by slope feature and Manning's  $n$ , with this making this model a viable tool for predicting floods in susceptible areas.

**Keywords** – Flood Routing, Fuzzy Diffusive Wave and Uncertainties.

### INTRODUÇÃO

Impactos causados pela propagação das ondas de cheias afetam famílias, atividades econômicas, sistemas públicos e privados. A propagação da onda de cheia é um problema, tanto nos países desenvolvidos quanto nos países em desenvolvimento. Muitos problemas hidrodinâmicos que envolvem a propagação de ondas ao longo do comprimento em canais naturais são resolvidos por meio das equações de Saint – Venant. (ANDRADE, 2006).

Lal (2005) afirmou que estudos mostram que os modelos de ondas difusas podem ser usados com sucesso para simular uma variedade de condições naturais de escoamento. Uma aproximação de onda difusa foi aplicada à área de inundação e vazão em um sistema de canais em *loop*. (Luo, 2007).

Muitas técnicas foram desenvolvidas para quantificar riscos em vários problemas hidrodinâmicos. Essas técnicas são chamadas *data-driven*. Entre as teorias importantes disponíveis, podemos destacar a teoria probabilística (por exemplo, Frieser, 2004, Kolen et al., 2013) e a Teoria dos Conjuntos *Fuzzy* (por exemplo, Hundecha et al., 2001, Ozelkan e Duckstein, 2001, Chang et al., Chagas, 2005).

### FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

#### 2.1 – Onda difusa

A modelagem hidrodinâmica unidimensional, para escoamentos não permanentes em canais abertos, é normalmente baseada na solução numérica das bem conhecidas equações de Saint-Venant (PORTO, 2006). As duas equações, continuidade (1) e momentum (2), podem ser escritas da seguinte forma (CUNGE, HOLLY & VERWEY, 1980):

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

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



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

onde  $Q$  = vazão ( $m^3/s$ );  $A$  = Área de seção transversal ( $m^2$ );  $y$  = profundidade ( $m$ );  $x$  = distância ( $m$ );  $t$  = tempo ( $s$ );  $S_f$  = Declividade da linha de energia ( $m/m$ ) and  $S_0$  = Declividade do fundo do canal ( $m/m$ )

De acordo com Cunge *et.al.* (1980) quando negligenciados os termos de inercia ( aceleração local e convectiva), Se os termos de inercia na equação de Saint-Venant são desprezíveis, a equação será convertida em equação da onda difusiva, dada pela equação (3):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C \frac{\partial Q}{\partial x} = D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \dots\dots\dots(3)$$

onde  $C$  é interpretada como a celeridade da onda cinemática, dada por  $C = dQ/dA$  ( $ms^{-1}$ ) e  $D$  é o coeficiente difusivo dado por  $D = Q/2BS_0$ , ( $m^2s^{-1}$ ).

**2.2 – Aplicação da lógica Fuzzy para a Onda Difusiva**

Em qualquer aplicação prática, em indústrias, etc, medição de tensão, corrente, temperatura, etc, pode haver um erro negligenciável. Isso causa imprecisão nos dados. Essa imprecisão pode ser representada pelas funções de pertinência. Assim a “fuzzificação” é realizada. (SIVANANDAM, SUMATHI & DEEPA, 2007). Através da “fuzzificação” é possível converter as equação do Modelo de Onda Difusa determinístico em equações de um Modelo *Fuzzy* de Onda Difusa

$$\frac{\partial \tilde{A}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{Q}}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots(4)$$

$$\frac{\partial \tilde{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \left( \frac{\tilde{Q}^2}{\tilde{A}} \right)}{\partial x} + g\tilde{A} \frac{\partial \tilde{y}}{\partial x} + g\tilde{A}(\tilde{S}_f - \tilde{S}_0) = 0 \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{\partial \tilde{Q}}{\partial t} + \tilde{C} \frac{\partial \tilde{Q}}{\partial x} = \tilde{D} \frac{\partial^2 \tilde{Q}}{\partial x^2} \dots\dots\dots(6)$$

onde  $\tilde{A}$  = função de pertinência para a área transversal do rio;  $\tilde{Q}$  = função de pertinência para vazão;  $\tilde{S}_f$  = função de pertinência para declividade da linha de energia;  $\tilde{S}_0$  = função de pertinência para declividade do fundo do canal;  $\tilde{C}$  = função de pertinência para celeridade;  $\tilde{D}$  = função de pertinência para o coeficiente difusivo;  $\tilde{y}$  = função de pertinência para a profundidade.

**2.3 – Discretização**

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

Para o cálculo da equação da onda difusiva *fuzzy* foi utilizado o Método das Diferenças Finitas Implícitas. Mais especificamente, o Método de Crank-Nicolson, pelo fato deste método dispor de um tipo de discretização que garante a estabilidade numérica no processo de solução (Anderson *et. al.*, 1984).

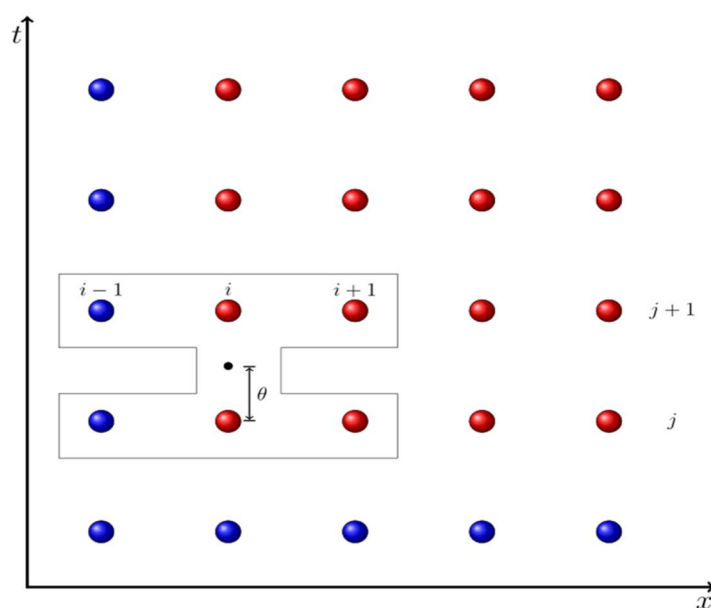


Figura 1 – Malha de discretização Método das Diferenças Implícitas - Método Crank-Nicolson

De acordo com a Figura 1, os pontos em vermelhos são os valores desconhecidos e os pontos em azuis são os valores conhecidos. As linhas são representadas pelo índice *i* e as colunas representadas pelo índice *j*. De acordo Gomes (2006) as derivadas *fuzzy* discretizadas no tempo e no espaço são dadas:

$$\frac{\partial \tilde{Q}}{\partial t} \approx \frac{\tilde{Q}[i, j+1] - \tilde{Q}[i, j]}{\Delta t} \dots\dots\dots(7)$$

$$\frac{\partial \tilde{Q}}{\partial x} \approx \frac{1}{2} \left[ \frac{\tilde{Q}[i+1, j+1] - \tilde{Q}[i-1, j+1]}{2\Delta x} + \frac{\tilde{Q}[i+1, j] - \tilde{Q}[i-1, j]}{2\Delta x} \right] \dots\dots\dots(8)$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{Q}}{\partial x^2} \approx \frac{1}{2} \left[ \frac{\tilde{Q}[i+1, j+1] - 2\tilde{Q}[i, j+1] + \tilde{Q}[i-1, j+1]}{\Delta x^2} + \dots \right] \\ \dots + \left[ \frac{\tilde{Q}[i+1, j] - 2\tilde{Q}[i, j] + \tilde{Q}[i-1, j]}{\Delta x^2} \right] = 0 \dots\dots\dots(9)$$



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

Com o intuito, de resolver as equações diferenciais envolvidas no modelo matemático de propagação da onda difusiva, foi desenvolvido um programa computacional em linguagem FORTRAN 90. Assim, sendo possível calcular as variáveis pertinentes ao controle de escoamento de um fluido em um rio.

Para cada declividade do leito foi realizada uma simulação onde se variou o número de Manning,  $n$ , com o intuito de estudar o comportamento do campo de escoamento, ou seja, onde esta variabilidade afeta os parâmetros hidráulicos como vazão e profundidade do mesmo.

Para cada simulação foi considerado como dados de entrada: um canal natural de seção retangular, comprimento igual a 50 km, largura de 50 m, número de Manning ( $n$ ) de 0,1, 0,05 e 0,01 para uma vazão inicial uniforme ( $Q_0$ ) de 50m<sup>3</sup>/s. A variação temporal da vazão é expressa pela função senoidal (CHAPRA 1997):

$$\tilde{Q} = \tilde{Q}_0 \left( 1 + k \cdot \text{sen} \frac{t}{T} \right), \text{ para } 0 \leq t \leq T \dots\dots\dots(10)$$

$$\tilde{Q} = \tilde{Q}_0, \text{ para } t \geq T \dots\dots\dots(11)$$

**RESULTADOS**

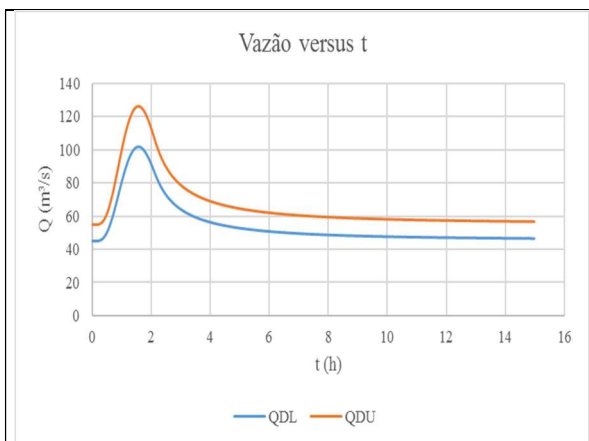


Figura 1 – Vazão *Fuzzy* para  $\alpha$ -cut=0,5,  $S_0=0,00005$ ,  $n=0,1$ , seção 10 km

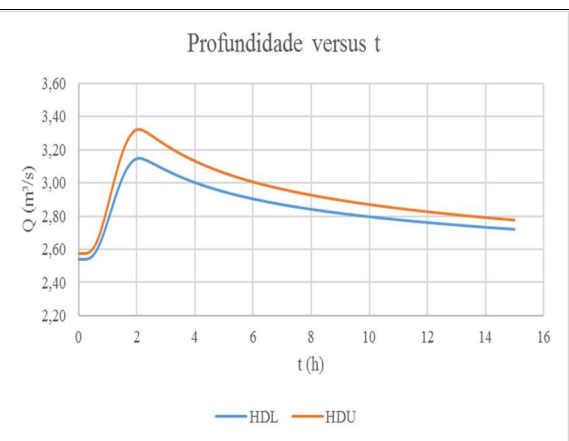


Figura 2 – Profundidade *Fuzzy* para  $\alpha$ -cut=0,5,  $S_0=0,00005$ ,  $n=0,1$ , seção 10 km

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

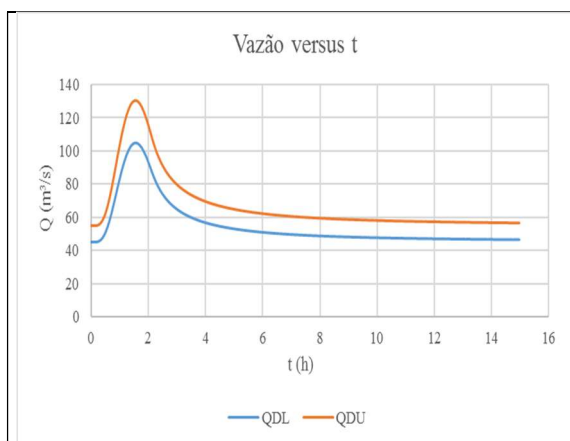


Figura 3 – Vazão *Fuzzy* para  $\alpha$ -cut=0,5,  
 $S_0=0,00005$ ,  $n=0,05$ , seção 10 km

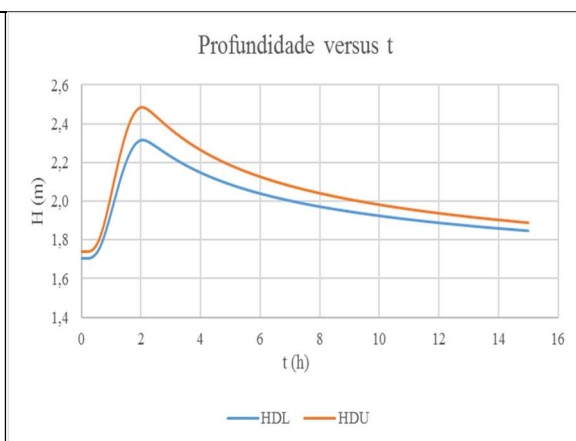


Figura 4 – Profundidade *Fuzzy* para  $\alpha$ -cut=0,5,  
 $S_0=0,00005$ ,  $n=0,05$ , seção 10 km

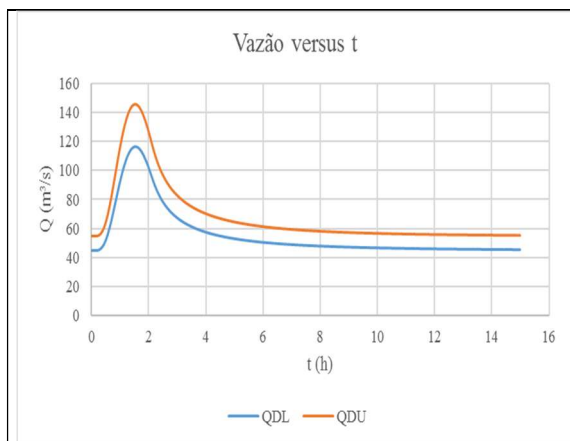


Figura 5 – Vazão *Fuzzy* para  $\alpha$ -cut=0,5,  
 $S_0=0,00005$ ,  $n=0,01$ , seção 10 km

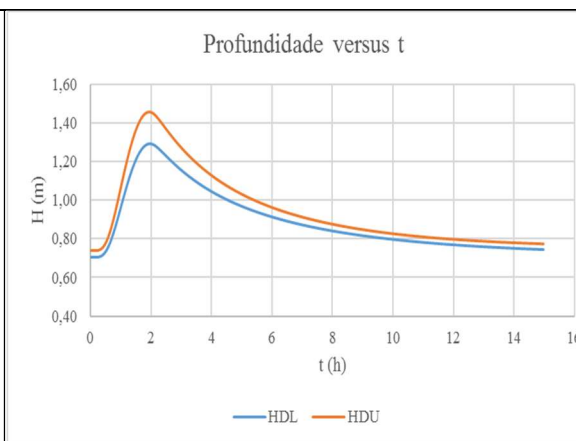


Figura 6 – Profundidade *Fuzzy* para  $\alpha$ -cut=0,5,  
 $S_0=0,00005$ ,  $n=0,01$ , seção 10 km

Nas figuras 1 a 6 mostram as regiões de incertezas representadas pela distancia entre os limites inferior e superior. Comparando os resultados é observado o amortecimento da propagação ao longo do curso do rio. Isto é devido ao termo difusivo contido na equação da onda difusiva.

Nas Figuras 2, 4 e 6 mostram que quanto maior o valor do número de manning maior será o valor da profundidade, aumentando os riscos de enchentes.



## XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados permitiram estabelecer que é forte influência da relação dos parâmetros hidráulicos em relação ao número de Manning  $n$ . O software desenvolvido permitiu avaliar a forma *Fuzzy* do comportamento da propagação da onda difusa em aspectos de vazão, área de corte transversal, velocidade e profundidade ao longo do canal para diferentes intervalos de tempo de observação e seções diferentes, para este estudo foi enfatizado os parâmetros vazão e profundidade. Os resultados permitiram concluir que a aplicação da Teoria *Fuzzy* nos sistemas hidrodinâmicos na avaliação da incerteza é uma alternativa viável para a determinação do risco de inundação e assim ser mais uma ferramenta de apoio nos programas de Gestão de Recursos Hídricos.

### REFERÊNCIAS

- a) ANDERSON, D. A.; TANNEHILL, J. C.; PLETCHER, R. H. (1984) *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*. Hemisphere Publishing Corporation, 3, pp.63-65.
- 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) CHAGAS, P. F. (2005), *Perspectivas da aplicação da teoria fuzzy para o cálculo de risco em sistemas hidrodinâmicos*. Ph.D. These, Universidade Federal do Ceará.
- d) CHANG, L., CHANG, F. J., TSAI, Y. H. (2005), Fuzzy exemplar-based inference system for flood forecasting, *Water Resources Research*, 41.
- e) CHAPRA, S.C. (1997), *Surface Water-Quality Modeling*, McGraw-Hill, New York, N.Y.
- f) CUNGE, J. A., HOLLY, F., VERWEY, A. (1980), *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. Pitman Publishing Ltd.
- g) FRIESER, B. (2004), *Probabilistic evacuation decision model for river floods in the netherlands*. Master's thesis, Delft University of Technology, Hydraulic Engineering, Faculty of Civil Engineering and Geosciences.
- 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.



## XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

- i) LAL, A. M. W. (2005), *Performance Comparisons of Overland Flow Algorithms*, South Florida Water Management District, Office of Modeling, ‘Regional Simulation Model (RSM)’, Theory Manual, May 16, West Palm Beach, Florida 33-40.
- j) LUO, Q. (2007), A distributed surface flow model for watersheds with large water bodies and channel loops. *Journal of Hydrology* 337, 172–186.
- k) HUNDECHA, Y., BARDOSSY, A., THEISEN, H. (2001), Development of a fuzzy logicbased rainfall-runoff model. *Hydrology Science Journal* 46 (3), 363-376.
- l) KOLEN, B., KOK, M., HELSLOOT, I., MAASKANT, B. (2013), Evacuaaid a probabilistic model to determine the expected loss of life for different mass evacuation strategies during flood threats. *Risk Analysis* 7, 33.
- m) Ozelkan, E. C., Duckstein, L., (2001). Fuzzy conceptual rainfall-runoff models. *Journal Hydrology* 253, 41-68.
- n) PORTO, R. M. (2006), *Hidráulica Básica*. Publicação EESC – USP, 4<sup>o</sup> ed., p. 473, 2006.
- o) SIVANANDAM, S. N., SUMATHI, S., DEEPA, S. N. (2007), *Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB*, New York: Springer, p. 76.