

ANÁLISE DE RISCO PARA CONCESSÃO DE OUTORGA EM RIOS, SUJEITOS A LANÇAMENTOS DE EFLUENTES - UMA ABORDAGEM FUZZY

Sílvia Helena Lima dos Santos¹; Patrícia Freire Chagas²; Raquel Jucá de Moraes Sales³; Juliana Alencar Firmo de Araújo⁴; Rejane Félix Pereira⁵; Maria Patrícia Sales Castro⁶; Francisca Valdenusa Almeida Silva⁷; Leila Ivete Teixeira Monteiro⁸; Tomás Adão Gonçalves⁹ & Gabriel Yves de Melo Raulino¹⁰

Resumo – Este trabalho desenvolveu uma metodologia, com base na aplicação da teoria *fuzzy*, em modelos de transporte de poluentes, para estudar o risco *fuzzy* de contaminação, na concessão de outorga de lançamentos de efluentes em rios. Para isso, as equações diferenciais do modelo de transporte são transformadas em equações diferenciais *fuzzys*, de modo que o campo de concentrações representado pelo modelo matemático. Para a solução do modelo matemático foi usado o método das diferenças finitas, com esquema implícito para o equacionamento das equações das diferenças. Para a realização das simulações foi desenvolvido um programa computacional, em linguagem FORTRAN que deu suporte na obtenção dos resultados para os mais diversos cenários propostos. Os resultados mostraram que a teoria *fuzzy* pode se tornar uma alternativa segura no auxílio do controle de poluição dos rios em geral, fornecendo, assim, fundamentos para a gestão dos recursos hídricos.

Palavras-Chave – Concessão de Outorga; Teoria Fuzzy; Lançamentos de Efluentes.

¹ Doutora em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. Professora adjunta da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB). E-mail: silvia.santos@unilab.edu.br

² Doutora, pesquisadora do Departamento de Saneamento da Companhia de Saneamento do Rio Grande do Norte. E-mail: pfchagas@yahoo.com

³ Doutora em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. Professora auxiliar da Universidade de Fortaleza (UNIFOR). E-mail: raqueljuca@gmail.com

⁴ Doutora em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. Professora do Centro Universitário UNICHRISTUS. E-mail: judiaraujo@yahoo.com.br

⁵ Engenheira Civil, Doutora em Eng. Civil - Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. Professor Adjunto, IEDS, UNILAB. Campus dos Palmares, +55(85)3373-1593. CEP: 62785-000. Acarape – Ceará, E-mail: rejanefp@gmail.com

⁶ Doutoranda em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) – UFC – E-mail: patricia.sales@gmail.com

⁷ Graduanda, UNILAB, rodovia CE 060 - km 51- Acarape, CE, Tel (85) 3332.6101, E-mail: valdenusaalmeida@yahoo.com.br

⁸ Graduanda, UNILAB, rodovia CE 060 - km 51- Acarape, CE, Tel (85) 3332.6101, E-mail: monteiro.leila01@gmail.com.

⁹ Graduando, UNILAB, rodovia CE 060 - km 51- Acarape, CE, Tel (85) 3332.6101, E-mail: zebex13@gmail.com

¹⁰ Graduando, UNILAB, rodovia CE 060 - km 51- Acarape, CE, Tel (85) 3332.6101, E-mail: gabrielyves@hotmail.com

RISK ANALYSES FOR GRANTS CONCESSION IN RIVERS, SUBJECT TO EFFLUENT RELEASE - A FUZZY APPROACH

Abstract – This research developed a methodology, based on application of fuzzy theory in the pollutant transport models, to study the *fuzzy* risk of contamination, in awarding grants for discharge of effluents into rivers. In such way, the differential equations of the transport model are transformed into fuzzy differential equations, so that, the field of concentrations, represented by the mathematical model is transformed into fields of concentration membership functions. For the accomplishment of the simulations a computational program, in FORTRAN language, was developed, that gave support in the obtaining of the results for the most several proposed sceneries. The results have shown that the *fuzzy* theory can become a safe alternative to help control pollution of rivers in general, providing, in such way, subsidies for resources management.

Keywords – Grant concession; Fuzzy Theory; Effluents Releases.

INTRODUÇÃO

Um dos principais instrumentos de gestão para redução e controle da poluição dos recursos hídricos é a outorga para lançamentos de efluentes que, apesar de estar legalmente instituída, ainda não foi devidamente implantada em nível nacional. Para isso, é necessário definir critérios de outorga, organizar e manter uma base de dados de qualidade da água e desenvolver ferramentas adequadas para análise integrada dos aspectos de quantidade e qualidade da água.

Como todo sistema natural, os sistemas hídricos são complexos e seu entendimento envolve a interação entre diversos ramos da ciência, tais como hidrologia, hidráulica e transporte de massa. Deste modo, a modelagem de um processo físico, presente em um sistema hídrico qualquer não se constitui uma tarefa simples.

Outro aspecto que deve ser levado em conta nesta modelagem são as incertezas presentes. Estas estão relacionadas com os dados, com as medições dos parâmetros, com os métodos de análises e até mesmo com as aproximações das soluções. Desta forma, a análise de incertezas tem um papel fundamental na gestão de recursos hídricos bem como a técnica apropriada para lidar com o problema constitui-se nos fundamentos da análise de risco.

Dentre as importantes teorias disponíveis para se quantificar riscos podem-se destacar a teoria probabilística e a teoria *fuzzy*. A primeira, que é bem conhecida no meio científico, é a que trata da aplicação da teoria das probabilidades nos modelos determinísticos. Esta metodologia, bem desenvolvida nos dias presentes, necessita para um completo sucesso de sua aplicação, um banco de dados consistente. Com isso, em regiões em que não há uma tradição em bancos de dados históricos, o sucesso desta metodologia fica comprometido.

A grande dificuldade, com relação à aplicação da teoria *fuzzy* nos problemas ambientais reside no fato de que as equações diferenciais que governam os processos de transporte da massa de poluentes precisam ser “fuzzificadas”. Isto quer dizer, em outras palavras, que essas equações diferenciais têm que ser transformadas em novas equações diferenciais com características “fuzzy”. Evidentemente que esta transformação ainda se encontra em fase de desenvolvimento em sua estrutura matemática.

Este trabalho desenvolveu uma metodologia que combinou a teoria *fuzzy* com os processos de transporte de poluentes e a legislação brasileira, para estudar o risco *fuzzy* de contaminação de rios naturais, na concessão de outorga para lançamentos de efluentes. O estudo prevê o desenvolvimento de um programa computacional que permita a solução numérica da equação diferencial *fuzzy* de transporte de massa e, assim, permita que se desenvolvam algumas simulações para os mais diversos cenários de lançamentos.

METODOLOGIA

Formulação do Modelo Matemático

A solução do modelo matemático proposto, em uma forma *fuzzy*, representa um grande desafio. Como se sabe, a equação da difusão advectiva é uma equação diferencial parcial, cuja solução analítica só é possível para condições de contorno e condições iniciais simples. Para os casos mais comuns presentes no meio ambiente, há a necessidade de uma solução numérica, nos processos de solução do modelo.

De qualquer maneira, este modelo terá que ser resolvido para que haja sucesso na avaliação do risco e da confiabilidade ambiental neste corpo hídrico.

A formulação do modelo matemático consiste em tomar como base um volume de controle, e combinar as teorias acima citadas, de modo que seja possível se chegar à equação geral da difusão advectiva, definida pela equação diferencial abaixo (JAMES, 1993):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (AE \frac{\partial C}{\partial x}) \pm KC + S_D \quad (1)$$

Em que os termos são representados por:

C : concentração média em cada seção: [ML^{-3}]; U : velocidade média em cada seção do rio: [LT^{-1}]; A : área da seção transversal: [L^2]; E : coeficiente de dispersão longitudinal: [L^2T^{-1}]; KC : coeficiente de decaimento da substância: [T^{-1}]; S_D : lançamento de cargas difusas ao longo do canal: [ML^{-3}/L].

As condições de contorno são:

$$C(0,t)=C(t) \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial x}(L,t) = 0 \quad (3)$$

As condições iniciais são:

$$C(x,0)=C(x) \quad (4)$$

Teoria Fuzzy

Segundo Saavedra (2003), a lógica convencional trata as informações de modo binário, classificando-as como verdadeiras ou falsas. Talvez a definição desses dois estados da informação, em alguns casos, seja suficiente, porém, muitas experiências humanas necessitam de uma

manipulação mais abrangente do que o simples tratamento de falso ou verdadeiro, sim ou não, certo ou errado.

É neste contexto que a lógica *fuzzy* (difusa) se torna uma ferramenta apropriada para tratar informações vagas e incertas, em geral descritas em uma linguagem natural (LIMA, 2002).

Um fator eminente dessa teoria é a sua capacidade de capturar conceitos intuitivos, além de considerar aspectos psicológicos utilizados pelos seres humanos em seu raciocínio usual, evitando que sua representação seja engessada por modelos tradicionais (OLIVEIRA, 1999).

De acordo com Ganoulis *et al.*, (1994), o conceito central da teoria dos números *fuzzy* baseia-se na existência de uma função de pertinência para representar numericamente o grau através do qual determinado elemento pertence a um conjunto. Assim, conforme Zadeh (1965), um conjunto *fuzzy* é caracterizado por uma função de pertinência que irá mapear os elementos de um determinado domínio para um número real pertencente ao intervalo $[0,1]$.

Normalmente, uma função de pertinência está na forma $\tilde{A}: X \rightarrow [0,1]$. Assim sendo, qualquer função assim representada pode ser associada a um conjunto *fuzzy*, dependendo dos conceitos e das propriedades que se deseja representar, considerando-se, ainda, o contexto no qual o conjunto está inserido. Um conjunto *fuzzy* é um conjunto de pares ordenados onde o primeiro elemento é $x \in X$ e o segundo é a função de pertinência $\mu_{\tilde{A}}(x)$ que mapeia x no intervalo $[0,1]$. Assim, a representação de um conjunto *fuzzy* é matematicamente definida por:

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) \mid x \in X; \mu_{\tilde{A}}(x) \in [0,1]\} \quad (5)$$

Onde:

$\mu_{\tilde{A}}(x)$ é o grau de pertinência de x no conjunto \tilde{A}

Risco e Confiabilidade Fuzzy

De acordo com Ganoulis (1994), se um evento, ou realização de um risco, é descrito por meio da lógica *fuzzy*, então a confiabilidade deste evento pode ser calculada como um número *fuzzy*. Considera-se que o sistema tem uma resistência \tilde{R} e uma carga \tilde{L} , ambas representadas por números *fuzzy*. Uma medida de confiabilidade, ou uma margem de segurança que também caracteriza o desempenho do sistema, pode ser definida pela diferença entre a carga e a resistência. Esta diferença também é um número *fuzzy*, dado por:

$$\tilde{M} = \tilde{R} - \tilde{L} \quad (6)$$

Tem-se para cada função um intervalo de nível h :

$$\tilde{M}(h) = \tilde{R}(h) - \tilde{L}(h) \quad (7)$$

Onde:

$$\tilde{R}(h) = [\tilde{R}_1(h), \tilde{R}_2(h)] \quad (8)$$

$$\tilde{L}(h) = [\tilde{L}_1(h), \tilde{L}_2(h)] \quad (9)$$

A medida marginal de segurança \tilde{M} tem as condições possíveis:

Falha: $\tilde{M}(h) < 0$

Confiabilidade: $\tilde{M}(h) \geq 0$

Segundo Chagas (2005), os índices *fuzzy* de confiabilidade e de falha são funcionais e dependem de várias funções como variáveis independentes que podem ser definidas como:

➤ índice de confiabilidade, ou garantia *fuzzy*:

$$R_c = \frac{\int_{Z>0} \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_Z \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad (10)$$

➤ índice de falha, ou risco *fuzzy*:

$$R_f = \frac{\int_{Z<0} \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_Z \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad (11)$$

Onde: $\mu_{\tilde{M}}$: representa a função de pertinência; m: representa um número real associado à função de pertinência marginal de segurança.

Esse conjunto de equações precisam ser fuzzificadas. Isto se faz transformando os parâmetros de entrada da equação (3.1) em funções de pertinências, onde todos os parâmetros se transformam em um conjunto de números com diferentes graus de pertinências, como foi definido previamente. Aplicando a teoria *fuzzy* na Equação (3.1), a mesma pode ser “fuzzificada” e transformada na seguinte formulação.

$$\frac{\partial \tilde{C}}{\partial t} + \tilde{u} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} = \frac{1}{\tilde{A}} \frac{\partial}{\partial x} \left(\tilde{E} \tilde{A} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} \right) \pm \tilde{K} \tilde{C} + \tilde{S}_D \quad (12)$$

Onde:

\tilde{A} : função de pertinência para a área transversal; \tilde{C} : função de pertinência para a concentração; \tilde{u} : função de pertinência para o campo de velocidade longitudinal; \tilde{E} : função de pertinência para o coeficiente de dispersão longitudinal; $\tilde{K} \tilde{C}$: função de pertinência para o decaimento; \tilde{S}_D : função de pertinência para o lançamento difuso.

A Equação 12 precisa ser resolvida para se obter o campo de concentração, em sua forma de funções de pertinências que permitiram a determinação do risco e da garantia em todos os pontos do domínio definido no estudo e em todos os intervalos de tempo considerados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o desenvolvimento do programa computacional, onde foram estruturadas várias sub-rotinas, dispostas sequencialmente com vistas à obtenção de alguns resultados, um conjunto de simulações foram realizadas. Inicialmente, foi considerado um rio com declividade, na sua forma *fuzzy*, definida por [0,0000375; 0,00005; 0,0000625], coeficiente de rugosidade de Manning, também em sua forma *fuzzy*, definida por [0,0375; 0,05; 0,0675], largura do canal de 20 metros e vazão de 20 metros cúbicos por segundo. A concentração inicial do poluente foi considerado de 1 mg/L. Nesta primeira simulação foi considerado um lançamento instantâneo de 100mg/L, e uma substância conservativa, com derramamento em uma seção a 10 Km da origem. O objetivo desta simulação é, apenas, para verificar o comportamento do programa computacional com relação a uma situação conhecida na literatura, onde a solução analítica pode ser comprovada.

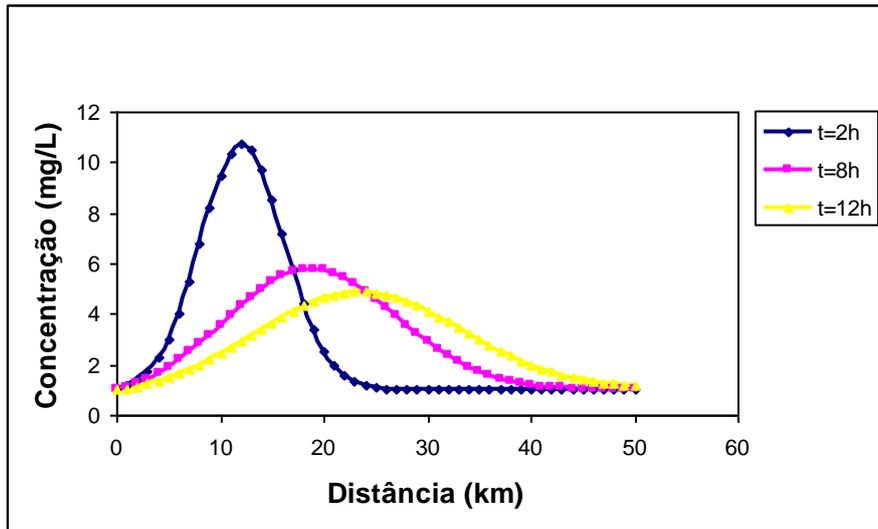


Figura 1 – Comportamento da concentração com a distância em tempos diferentes.

A Figura 1 mostra os resultados desta simulação para os tempos de 2 horas, 8 horas, e 12 horas, considerando a concentração de maior grau de pertinência. Pela figura, podem-se ver os efeitos combinados da dispersão, fazendo com que haja um espalhamento na nuvem poluente, e advecção, onde há uma translação do centro de gravidade da nuvem poluente, causada pelo movimento das águas do rio em questão.

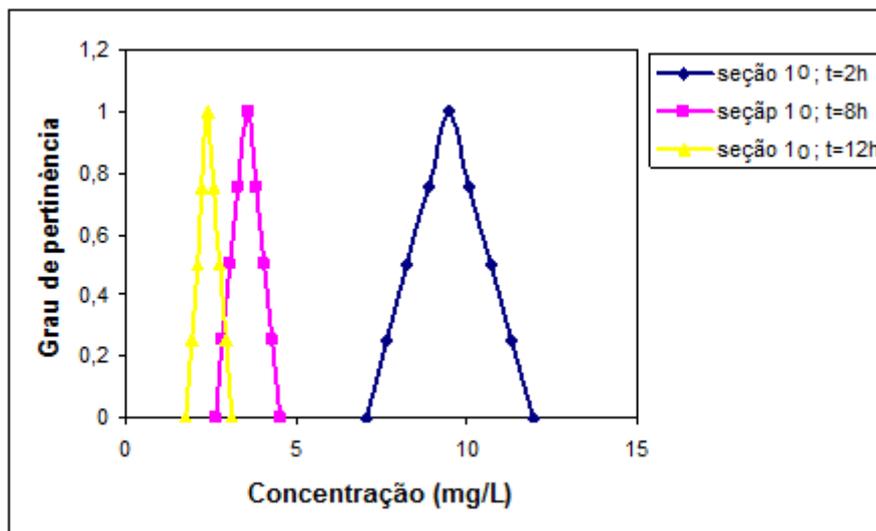


Figura 2 – Comportamento das funções de pertinência para as concentrações em tempos diferentes, seção 10.

A Figura 2 mostra os resultados obtidos para as funções de pertinências das concentrações em uma seção 10 km da origem. Como podem ser observadas, essas funções se deslocam de acordo com a passagem da nuvem poluente em cada seção e para diferentes tempos. Por exemplo, para um tempo de 2 horas, pode-se ver que a função tem sua concentração com maior grau de pertinência próximo de 10mg/L. Entretanto, na mesma seção, em 8 horas, o valor de maior grau de pertinência ocorre para um valor próximo de 4 mg/L. Já para um tempo de 12 horas, a concentração com maior

grau de pertinência é, aproximadamente, igual 2,1 mg/L. Este resultado é muito importante pois mostra a dinâmica concentração da nuvem poluente, no processo de diluição do rio.

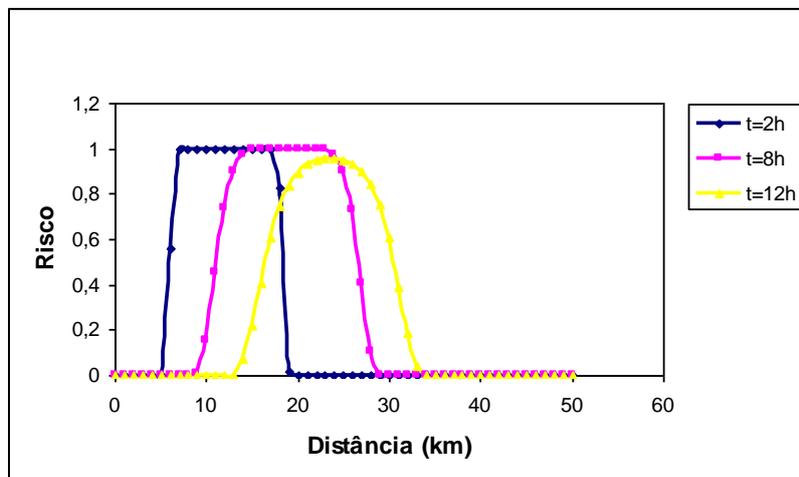


Figura 3 – Comportamento do risco com a distância em diferentes tempos.

As Figuras 3 e 4 mostram o risco e a garantia para os mesmos tempos anteriores. Como podem ser observados através das figuras, os funcionais do risco e da garantia se comportam segundo o comportamento das concentrações presentes no rio. Como o exemplo simulado trata de um lançamento instantâneo e pontual, os gráficos do risco apresentam um pico próximo do ponto de lançamento que sai do valor zero e vai até o valor 1, voltando para zero novamente nas regiões que não foram atingidas pelo efeito do lançamento. Com isso, fica claro que a metodologia proposta pode servir como uma ferramenta apropriada para a determinação do risco de contaminação em sistemas hídricos, sujeitos a lançamentos de efluentes, concessionados por sistemas de outorgas. É importante notar ainda que essas funções têm comportamento inverso com relação às suas variações. Enquanto o risco aumenta em um sistema hídrico, a garantia diminui e assim sucessivamente.

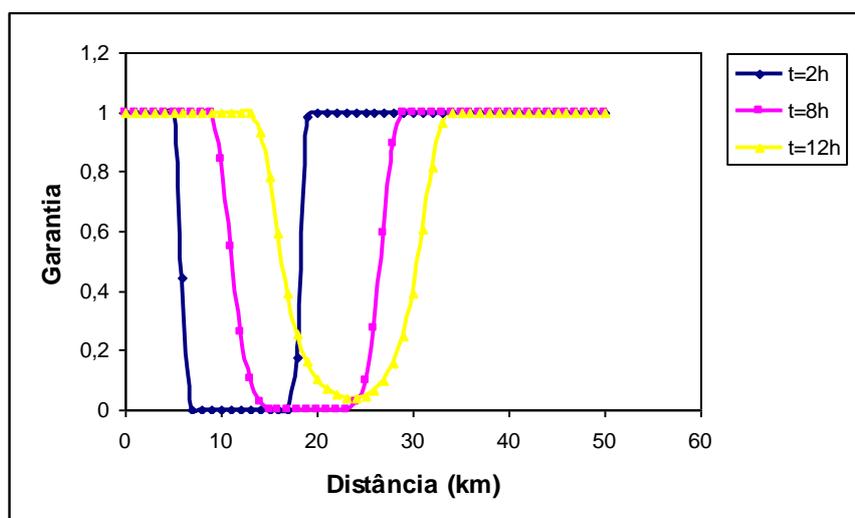


Figura 4 – Comportamento da garantia com a distância em diferentes tempos.

CONCLUSÕES

Após a aplicação do modelo proposto em um rio natural sujeito a lançamentos de efluentes, uma análise foi realizada com vistas à concessão de outorga de lançamentos. A aplicação da formulação fuzzy na Equação de Balanço de Massa mostrou-se eficiente no cálculo do risco e da garantia, os quais representam medidas de controle para o sistema hídrico em questão. Com isso, a análise dos resultados permitiu chegar às seguintes conclusões:

- Os resultados mostraram que o risco de falha para um determinado rio, que recebe lançamentos de efluentes, proveniente de concessões de outorga, depende do tipo de lançamento, bem como da concentração dos efluentes que estão sendo lançados. Por exemplo, as simulações mostraram que, para lançamentos instantâneos e pontuais, o campo de risco que se estabelece é mais intenso na região do lançamento e nos primeiros tempos. Depois de algum tempo, com o desenvolvimento dos processos de dispersão e decaimento, este campo de risco diminui, o que permite concluir que um rio pode estar poluído nos primeiros instantes de um determinado lançamento, mas pode se recuperar através de um processo de autodepuração;
- Outro aspecto que foi observado nos resultados, diz respeito ao comportamento do risco para diferentes valores de concentrações de lançamento. Os resultados mostraram que quanto maior for a concentração do efluente, maior será o risco e menor será a confiabilidade do sistema permanecer dentro dos padrões determinados pela legislação. Este resultado, comprovado das experiências e observações, mostra a importância desta metodologia nas questões pertinentes à quantificação dos riscos para concessão de outorga de lançamento;
- Finalmente, o estudo mostrou que a metodologia proposta pode se tornar em uma alternativa concreta no controle de lançamentos de efluentes em rios naturais, oriundos de concessão de outorga e, assim, permitir uma melhor eficiência nos processos da Gestão dos Recursos Hídricos.

REFERÊNCIAS

- CHAGAS, P. F. *Perspectivas da aplicação da teoria fuzzy para o cálculo de risco em sistemas hidrodinâmicos*. 2005. 140f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.
- GANOULIS, J.G. *Engineering risk analysis of water pollution: Probabilities and fuzzy, set*, VCH Publishers Inc, Weinheim, New York; Basel, Cambridge, Tokyo, 1994.
- JAMES, A. *An Introduction to WATER QUALITY MODELLING*. 2nd Edition. By John Wiley & Sons Ltd, 1993, 311p.
- LIMA, O. S. J. *Análise de pontos por função fuzzy*. 2002. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Software) – Universidade de Fortaleza, Fortaleza, 2002.
- OLIVEIRA, JR.; H, A., *Lógica Difusa: Aspectos Práticos e Aplicações*. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 1999, 192p.
- SAAVEDRA, O. R. *Introdução aos conjuntos difusos* – Notas de aula – Inteligência Artificial, Universidade Federal do Maranhão, 2003.
- ZADEH, L. A., *Fuzzy Sets – Information and Control*, vol. 8 (338-353), 1965.