

# ESTUDO DO TRANSPORTE DE POLUENTES EM RIOS NATURAIS COM O USO DA TEORIA FUZZY

*Sílvia Helena Lima dos Santos<sup>1</sup> & Raquel Jucá de Moraes Sales<sup>2</sup> & Raimundo Oliveira de Souza<sup>3</sup>*

**RESUMO** --- O presente artigo utilizou uma metodologia que combinou a teoria fuzzy com a teoria do transporte de massa, para determinar os aspectos fuzzys, na concessão de outorga de lançamentos de efluentes. O modelo consiste em resolver a Equação da Difusão Advectiva, em uma dimensão, na sua forma fuzzy. Assim, foi possível determinar as funções marginais de segurança para as concentrações em cada seção do rio, para diferentes tempos. Os resultados mostram que esta metodologia pode ser uma importante ferramenta para o estudo de concessão de outorga de lançamentos de efluentes e também como suporte para a melhor Gestão dos Recursos Hídricos.

**Palavras-chave:** Teoria Fuzzy, Concessão de Outorga, Transporte de Massa

## STUDY OF TRANSPORT OF POLLUTANTS IN NATURAL RIVERS WITH THE USE OF FUZZY THEORY

**ABSTRACT** --- This article used a methodology that combined fuzzy theory with the theory of mass transportation, to determine aspects Fuzzys, in awarding grants for effluent discharges. The model consists of solving the advective diffusion equation in one dimension, in its fuzzy. Thus, it was possible to determine the functions of security for marginal concentrations in each section of the river, for different times. The results show that this methodology can be an important tool for the study grant award of effluent discharges and also as support for the better management of water resources.

**Keywords:** Fuzzy Theory, awarding grants, Mass Transport.

---

<sup>1</sup> Doutora em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará e Bolsista do CNPQ. Campos do Pici, CEP- 60445-760. Bloco 713. Fortaleza – Ceará. E-mail: silviahlsantos@hotmail.com

<sup>2</sup> Doutoranda em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará e Bolsista do CNPQ. Campos do Pici, CEP- 60445-760. Bloco 713. Fortaleza – Ceará. E-mail: raqueljuca@gmail.com

<sup>3</sup> Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Campus do Pici, Centro de Tecnologia, Bloco 713, Fortaleza – Ceará, Brasil, CEP 60445-760, Fone: (85) 3366. 9771, E-mail: rsouza@ufc.br

## 1. INTRODUÇÃO

A qualidade dos mananciais está sendo alterada de modo significativo por diversas atividades humanas incluindo as industriais, agropecuárias, dentre outras. Essas intervenções podem causar deterioração qualitativa dos corpos de água e comprometer seus usos atuais e futuros. A Poluição pode ser resultante de fontes pontuais ou difusas. As primeiras podem ser representadas pelos lançamentos de efluentes, sendo mais facilmente controladas por se concentrarem em um único ponto. As últimas, advindas do escoamento superficial em áreas urbanas e rurais, distribuídas ao longo dos corpos de água receptores.

Para disciplinar os usos dos corpos aquáticos, inclusive no que diz respeito à assimilação de efluentes, surgiram leis especificamente para recursos hídricos. Neste contexto, a Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída no Brasil pela Lei Federal 9.433, de 08 de janeiro de 1997, é uma importante ferramenta legal para o gerenciamento da água, pela qual é sugerida a utilização de modelos matemáticos e computacionais no suporte à decisão entre alternativas de gestão ou de uso dos recursos hídricos

De acordo com esta lei um dos principais instrumentos de gestão para redução e controle da poluição desses recursos é a outorga para diluição de efluentes que, apesar de estar legalmente instituída, ainda não foi devidamente implantada em nível nacional. Para garantir que isto ocorra é necessário definir critérios de outorga, organizar e manter uma base de dados de qualidade da água bem como desenvolver ferramentas adequadas para uma análise integrada dos aspectos de quantidade e qualidade da água (NAHON, 2006).

A modelagem de um processo físico, presente em um sistema hídrico qualquer não se constitui uma tarefa simples tendo em vista que em corpos d'água naturais ocorrem fenômenos de transferência de massa, energia e quantidade de movimento, que fazem com que estas concentrações não sejam uniformes e dependam fortemente da hidrodinâmica destes corpos d'água. Outro fator que deve ser levado em conta na modelagem destes processos são as incertezas que podem estar 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 e a técnica apropriada para lidar com o problema constitui-se nos fundamentos da análise de risco.

Uma metodologia que está sendo utilizada nos estudos das incertezas e na Análise de Risco é a Teoria Fuzzy. Esta teoria, desenvolvida nos anos 60, vem se tornando uma ferramenta útil para a análise desta classe de problema, por não depender de um banco de dados tão completo. 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 poluente precisam ser "fuzzificadas". Isto quer dizer, em outras palavras, que essas equações diferenciais têm que ser transformadas em novas equações diferenciais com características "fuzzy".

Desta forma, este estudo desenvolveu uma metodologia que combinou a Teoria Fuzzy com os Processos de Transporte de Poluente em um rio natural, e a Legislação Brasileira, para estudar o Risco Fuzzy de contaminação de rios naturais, na concessão de outorga para lançamentos de efluentes.

## 2. OUTORGA PARA LANÇAMENTO DE EFLUENTES

A Lei 9.433, de 8.1.1997, define, em seu Art. 12, inciso III, que o lançamento em corpo de água de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos, tratados ou não, com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final, como um uso da água estão sujeitos a outorga. Embora constitua um dos principais instrumentos para redução e controle da poluição de recursos hídricos, a outorga para

diluição de efluentes em corpos de água, apesar de legalmente instituída, apresenta inúmeras dificuldades que podem retardar sua regulamentação. Segundo Azevedo et al (2003), a emissão da outorga para este fim está atrelada, entre outros fatores, à definição de critérios de que subsidiem a tomada de decisão e ao desenvolvimento de ferramentas adequadas para análise integrada dos aspectos de quantidade e qualidade da água, conforme preconizado no artigo 3º da Lei Federal 9.433/97, que estabelece a Política Nacional de Recursos Hídricos. Cruz (2001) enfatiza, ainda, a necessidade do estabelecimento de tais critérios, com vistas a otimizar a distribuição da água disponível pelo poder outorgante, sem desconsiderar as particularidades locais e regionais.

A outorga para diluição de efluentes baseia-se no princípio de permitir uma descarga em um curso de água com uma carga máxima de poluentes de maneira que, após sua diluição na vazão mínima fixada como referência, a qualidade da água no corpo receptor permaneça satisfatória, conforme seus objetivos de qualidade estabelecidos pela classe de uso (CRUZ, 2001).

Apesar de reconhecido como um dos principais instrumentos para redução e controle da poluição de recursos hídricos, no Brasil há poucas experiências relacionadas à implantação da outorga para tal finalidade (ROQUES, 2006). Existe a ausência de um dispositivo legal que estabeleça claramente os critérios de outorga para fins de diluição de efluentes mesmo dentre os estados que já a emitem.

A outorga tem um caráter diferente do licenciamento ambiental dos lançamentos de efluentes. Em primeiro lugar, a outorga tem a função de alocar, especificamente para este fim, a vazão que o licenciamento supõe existir no ponto de lançamento do efluente para a disposição dos poluentes lançados. A outorga de lançamento de efluentes é o instrumento que permite que a situação imaginada no licenciamento se realize. Em segundo lugar, a outorga deve se preocupar com os poluentes de maior impacto em termos de uso da água, isto é, aqueles que necessitam mais água para seu decaimento ou diluição e, portanto, exigem uma alocação maior de água, enquanto que o licenciamento tem de se preocupar com todos os poluentes que impactam os usos designados.

Pela complexidade da análise técnica dos impactos causados pelos diversos poluentes nos corpos receptores, bem como da respectiva análise da outorga, agora vista como instrumento de gestão integrada, é de todo recomendável que o processo de outorga de lançamento de efluentes se inicie de forma simples, mas eficiente. É prudente a adoção inicial de poucos parâmetros de qualidade da água nas análises de pedidos de outorga para lançamento de efluentes.

A outorga de lançamento de efluentes, ao ser adotada para aqueles poluentes que representam os maiores impactos na bacia, deve estar integrada ao processo de enquadramento dos corpos de água, utilizando as mesmas prioridades de controle de poluição indicadas no processo de enquadramento, e estabelecendo, a partir daí, os parâmetros outorgáveis.

### **3. TEORIA DO TRANSPORTE DE MASSA**

Segundo Fisher 1979, a teoria do transporte de poluentes tem como base fundamental a combinação da lei de Fick com a Teoria da conservação das massas. Através desta combinação é possível fazer uma análise detalhada do comportamento de uma massa poluente em um campo de escoamento mono, bi ou tridimensional e também avaliar os três processos pertinentes ao movimento da massa poluente no corpo hídrico.

O primeiro processo, conhecido como difusão molecular, descreve o espalhamento da massa poluente causado pelo movimento molecular presente no sistema. O segundo trata da teoria advectiva que corresponde ao espalhamento da massa poluente através do movimento advectivo.

E finalmente, o terceiro que trata da difusão turbulenta. Este processo é controlado pelo coeficiente de difusão turbulenta que depende diretamente da energia de turbulência contida no

campo de velocidade. Assim, quanto maior a turbulência, maior será o espalhamento (CHAGAS, 2005).

Deste modo, tomando como base um volume de controle, e fazendo a combinação das teorias citadas acima é possível chegar a equação geral da difusão advectiva, que leva em conta todos os processos combinados no transporte de massa.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = D \left[ \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right] \quad (1)$$

Onde:

$C$  : representa a concentração média em cada seção:  $[ML^{-3}]$ ;

$U$  : representa a velocidade média em cada seção do rio:  $[LT^{-1}]$ ;

$D$  : representa o coeficiente de difusão turbulenta.

Considerando o caso de substâncias não conservativas e levando em conta a aplicação em apenas uma dimensão tem-se a seguinte equação:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) - kC \quad (2)$$

Onde  $K$  é o coeficiente de decaimento da substância  $[T^{-1}]$ .

#### 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).

Podemos modelar com a teoria fuzzy, diversas situações em que os dados envolvidos têm um certo "grau" de incerteza ou imprecisão, ou a classificação de seus atributos não se resume em sim ou não, mas existe a possibilidade de: mais ou menos; talvez; um pouco mais; um pouco menos.

O fato da teoria fuzzy dar esta flexibilidade de modelagem permite ao homem desenvolver algoritmos semelhantes ao pensamento humano. 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).

Foi em 1965, pensando em atribuir significados a termos lingüísticos de cunho qualitativo, subjetivo, como "perto", "longe", "alto", "aproximadamente", que o matemático Lofti Zadeh, introduziu o conceito de conjuntos fuzzy (difusos). Através de tais conjuntos, seria possível

armazenar dados não precisos em computadores, gerar respostas baseadas em informações vagas ou ambíguas, em processos análogos ao do raciocínio humano. Nesta lógica, são utilizados modelos matemáticos para mapear variáveis subjetivas, como frio, agradável e quente, para valores concretos que podem ser manipulados matematicamente. (SANTOS, 2008).

Aplicando a teoria fuzzy na equação 2 ela assume a seguinte forma:

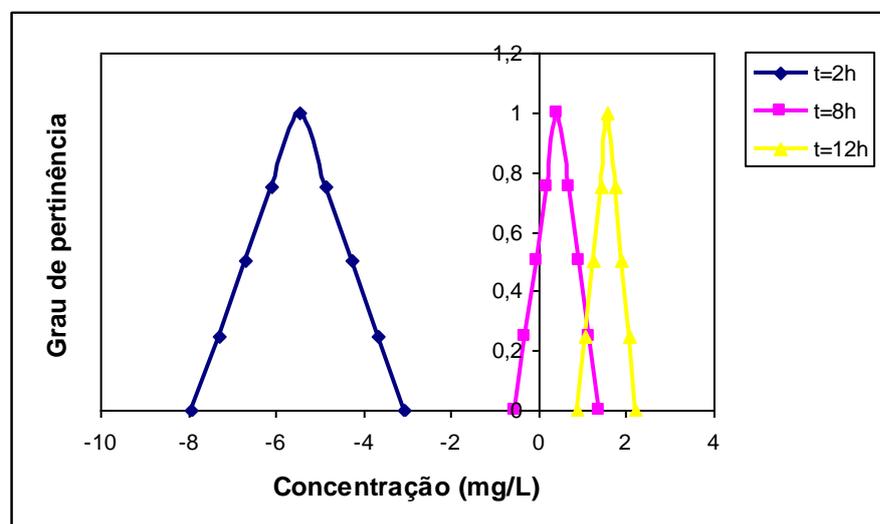
$$\frac{\partial \tilde{C}}{\partial t} + \tilde{U} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (\tilde{D}_x \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x}) - \tilde{k} \tilde{C} \quad (3)$$

Onde:

~ representa funções de pertinências para os parâmetros e para a variável de controle.

## 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

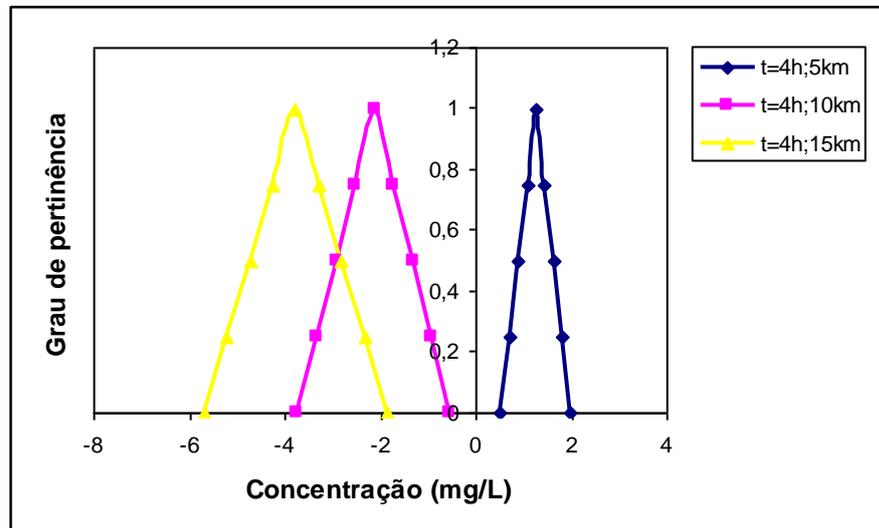
Após o desenvolvimento do programa computacional, onde foram estruturadas várias sub-rotinas, dispostas sequencialmente com vistas a obtenção de alguns resultados, Considerou-se um rio com declividade, na sua forma fuzzy, definida por [0,0000375; 0,00005; 0,0000625], coeficiente de rugosidade de Manning, 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. Para esta simulação, adotou-se um lançamento instantâneo de 100mg/L, e uma substância conservativa, derramada em uma seção 10 Km da origem.



**FIGURA 1** – Comportamento da função marginal de segurança para as concentrações em tempos diferentes, em uma seção a 10 km da origem.

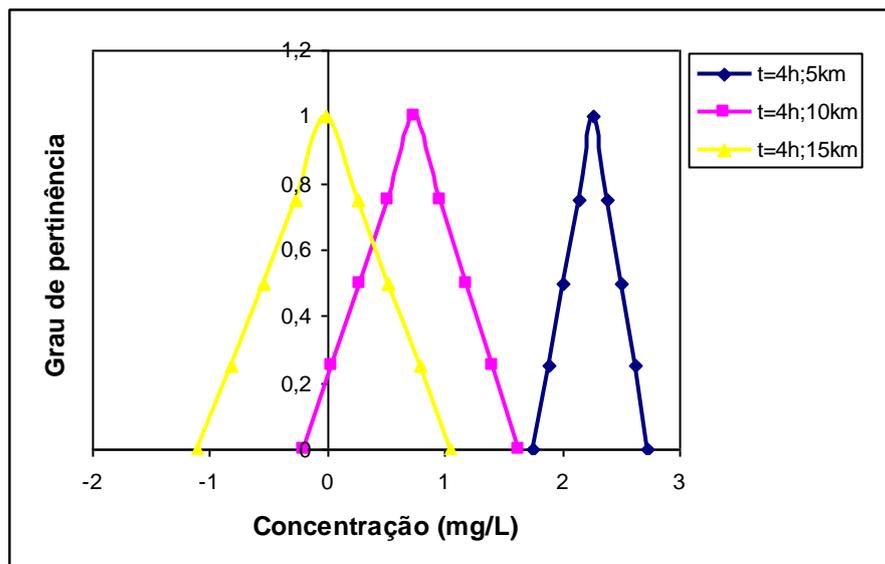
A Figura 1 mostra o comportamento da função marginal de segurança, calculada nos tempos de 2 horas, 8 horas e 12 horas, na seção 10 km da origem. Como pode ser observada, considerando a metodologia proposta, esta função é a responsável pelo cálculo do risco de falha em um sistema que recebe concessão de outorga para lançamento de efluentes. Neste caso, os resultados mostram que, para a seção considerada, o risco deve ser maior para a o tempo de 2 horas, considerando que,

neste tempo, a função de marginal de segurança se encontra mais para a esquerda do eixo de concentração. Assim, os resultados mostram que esta função se movimenta de acordo com a intensidade das concentrações de poluentes presentes ao longo do rio, fazendo com que o risco aumente ou diminua, no tempo e no espaço.



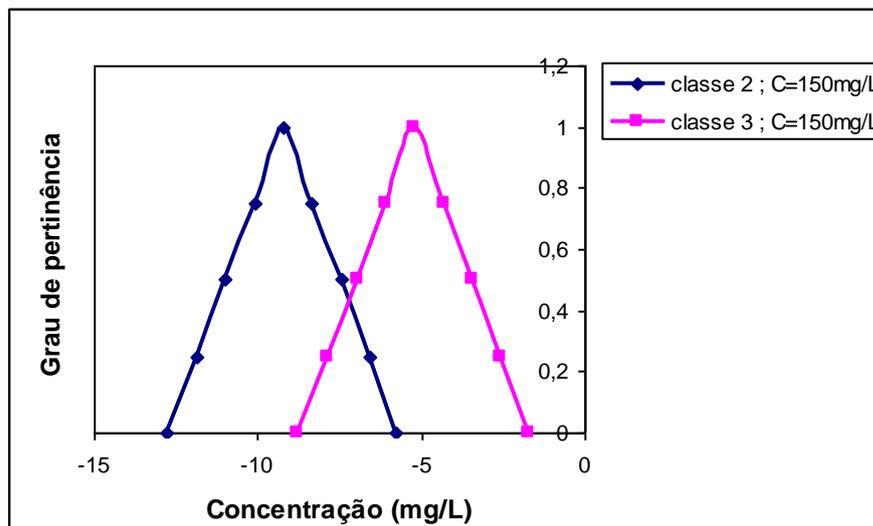
**FIGURA 2** – Comportamento da função marginal de segurança para as concentrações no tempo de 4 horas, em diferentes seções.

A Figura 2 mostra as funções de marginais de segurança nestas seções para um tempo de 4 horas. É importante observar que, neste caso, esta função fica inteiramente no campo negativo nas seções de 10 e 15 km, e inteiramente no campo positivo na seção de 5 km. Isto implica dizer que os riscos calculados nas seções de 10 e 15 km, para este tempo de 4 horas, serão máximos, enquanto que na seção de 5 km será nulo.



**FIGURA 3** – Função marginal de segurança para diferentes seções no tempo de 4 horas. C=50mg/L.

A Figura 3 mostra a função marginal de segurança para este lançamento tendo por base os mesmos mas , em diferentes seções. Como pode ser observado, essas funções estão mais próximas do eixo central da figura, ou seja, da origem, mostrando assim, que o risco tende a mudar de comportamento bem mais rapidamente do que no caso anterior.



**FIGURA 4** – Função marginal de segurança para C=150mg/L, em t=2 horas, 10 km para diferentes classes.

A Figura 4 mostra a função marginal de segurança para um lançamento de 150mg/L, para um tempo de 2 horas e tomando com base as classes dois e três definidos pela Resolução CONAMA 357/2005. Como pode ser observada, para um rio de classe dois, a função marginal de segurança se encontra mais a esquerda do que a função marginal de segurança, para o rio de classe três. Isto implica dizer que para rios com maior restrição de uso, como são os rios de classe dois, a tendência é de que o risco seja maior. Este resultado confirma esta hipótese.

## 6. 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. Com isso, a análise dos resultados permitiu chegar às seguintes conclusões.

Como uso da Teoria Fuzzy em Modelos de Balanço de Massa é possível transformar esses modelos em Equações Diferenciais Fuzzys, para se obter funções de pertinência para as variáveis de controle. No caso do estudo em questão, a variável de controle é a concentração do poluente que é lançado em um corpo hídrico. Desta forma, a metodologia proposta determinou campos de concentrações, em sua forma fuzzy, que permite que se desenvolvam métodos de cálculo dos campos de risco e de garantia, em toda a extensão do corpo hídrico.

O estudo mostra que a metodologia proposta pode ser 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 de Gestão dos Recursos Hídricos.

## **7. BIBLIOGRAFIA**

AZEVEDO, L. G. T. et al. Sistemas de Suporte à Decisão para a Outorga de Direitos de Uso da Água no Brasil. In: AZEVEDO, L. G. T; MEJIA, A (Coord). Série Água Brasil. Brasília: Banco Mundial, 2003. 48p.

CHAGAS (2005). 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.

CRUZ, J. C. – Disponibilidade hídrica para outorga: avaliação de aspectos técnicos e conceituais. Porto Alegre, 2001. 189 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Departamento de Hidráulica e Saneamento. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

FISCHER, H. B. Mixing in Inland and Coastal Water, Academic Press, Inc, 1979.

LIMA, O. S. J., Análise de Pontos por Função Fuzzy, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Software, Universidade de Fortaleza, Fortaleza, 2002.

NAHON, I. M (2006). Sistema de Apoio a Análise de Outorga de Lançamento de Efluentes para a Variável Demanda Bioquímica de Oxigênio: Estudo de caso da Bacia do Alto Iguaçu. Dissertação apresentada como requisito parcial a obtenção do título de mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná.

OLIVEIRA JR., H. A., Lógica Difusa: Aspectos Práticos e Aplicações, Interciência, 1999.

ROQUES, T. V. P. (2006). “Aplicação de modelos computacionais na análise de outorga para diluição de efluentes em corpos de água – fontes pontuais e difusas”. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2006.

SAAVEDRA, O. R., Introdução aos Conjuntos Difusos – Notas de aula – Inteligência Artificial, Universidade Federal do Maranhão, 2003.

SANTOS, S. H. L. Aplicação da Teoria dos Números Difusos em um Modelo de Operação de Reservatório, para estudar o Comportamento Vazão Regularizada e do Rendimento., Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao CNPQ, pelo apoio à pesquisa.