



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
DOUTORADO EM ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS

**APLICAÇÃO DA TEORIA FUZZY EM MODELOS DE TRANSPORTE
DE MASSA PARA O CÁLCULO DO RISCO NA CONCESSÃO DE
OUTORGA PARA LANÇAMENTO DE EFLUENTES EM RIOS**

SÍLVIA HELENA LIMA DOS SANTOS

FORTALEZA – CEARÁ
2012

SÍLVIA HELENA LIMA DOS SANTOS

**APLICAÇÃO DA TEORIA FUZZY EM MODELOS DE
TRANSPORTE DE MASSA PARA O CÁLCULO DO RISCO
NA CONCESSÃO DE OUTORGA PARA LANÇAMENTO DE
EFLUENTES EM RIOS**

Tese submetida à coordenação do Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, área de concentração em Recursos Hídricos, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor.

Área de Concentração: Recursos Hídricos

ORIENTADOR: Prof. Raimundo Oliveira de Souza,
Dr.

FORTALEZA – CEARÁ

2012

**APLICAÇÃO DA TEORIA FUZZY EM MODELOS DE TRANSPORTE DE MASSA
PARA O CÁLCULO DO RISCO NA CONCESSÃO DE OUTORGA PARA
LANÇAMENTO DE EFLUENTES EM RIOS**

Esta tese foi apresentada como parte integrante dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil, na área de concentração de Recursos Hídricos, outorgado pela Universidade Federal do Ceará, a qual encontrar-se-á a disposição dos interessados na Biblioteca Central da referida Universidade.

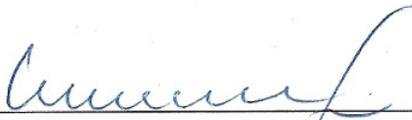
A citação de qualquer trecho desta Tese é permitida, desde que seja feita de acordo com as normas da ética científica.



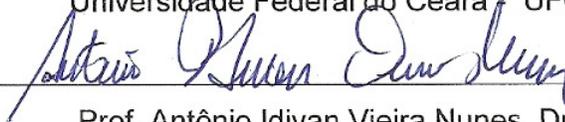
Sílvia Helena Lima dos Santos

Tese aprovada em 30/03/2012

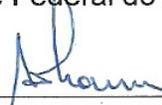
Banca Examinadora:



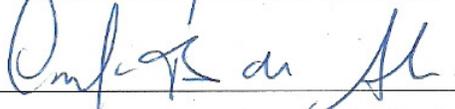
Prof. Raimundo Oliveira de Souza, Dr. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará - UFC



Prof. Antônio Idivan Vieira Nunes, Dr.
Universidade Federal do Ceará - UFC



Prof. Antônio Clécio Fontelles Thomaz, Dr.
Universidade Estadual do Ceará - UECE



Prof.ª Carla Freitas de Andrade, Dr.ª.
Universidade Federal do Ceará - UFC



Prof.ª Vanda Tereza Costa Malveira, Dr.ª.
Universidade de Fortaleza - UNIFOR

Ao meu marido, Sérgio Santos, e aos meus
queridos filhos Davi e Levi.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela incontáveis dádivas e por me guiar em todos os momentos da vida.

Aos meus amados pais, Raimundo e Benedita, por serem o alicerce da minha vida, pelo incentivo e conselhos de vida que sempre me deram.

Aos meus queridos irmãos, Ana Paula, Ana Cristina, Francisco José, Edson Dantas e Argeu, pela torcida e pela alegria que demonstram em cada uma de minhas conquistas.

Ao meu marido, Sérgio Santos, pelo amor, ajuda e por ser o grande incentivador dos meus estudos.

Ao meu orientador, Dr. Raimundo Oliveira de Souza por sua excelente orientação, ensinamentos, dedicação e amizade.

À Universidade Federal do Ceará, em especial ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa.

À coordenação do Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e a todos seus professores.

Aos professores: Dr. Antônio Idivan Vieira Nunes; Dr^a. Ada Amélia Sanders Lopes; Dr^a. Carla Freitas de Andrade e Dr^a. Marisete Dantas de Aquino pelas valiosas sugestões e contribuições no exame de qualificação.

Aos professores: Dr. Antônio Clécio Fontelles Thomas; Dr. Antônio Idivan Vieira Nunes; Dr^a. Carla Freitas de Andrade e Dr^a. Vanda Tereza Costa Malveira pela disposição em participar da banca examinadora.

Às amigas de pesquisa, Ada e Vanessa, por suas demonstrações de amizade e companheirismo.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, e em especial a: Umbelina, Júnior, Shirley e Erivelton.

Aos amigos, Cláudio Damasceno, Mauro, Edson Pessoa e Andréa Cysne pelos momentos agradáveis de estudo no decorrer de algumas disciplinas.

À coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior CAPES, pela bolsa de pesquisa.

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 seja transformado em campos de funções de pertinências de concentrações. O estudo se utiliza de parâmetros definidos na lei para estabelecer a classe do rio e, assim, calcular, para cada tipo de lançamento, o risco de contaminação e a capacidade de assimilação do mesmo. 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.

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. The study makes use of parameters defined in the law to establish the class of the river, so that, it calculates, for each type of release, the risk and its assimilative capacity of the river to receive effluents. For the solution of the mathematical model the finite difference method was used, with implicit scheme on order to get the difference equation. 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.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxo de massa em um volume de controle (Fischer, 1979).	31
Figura 2.2 – Lançamentos difuso e pontual em um rio.....	35
Figura 2.3 – Exemplos de funções de pertinência.....	41
Figura 2.4 – Conjunto fuzzy convexo.	43
Figura 2.5 – Conjunto fuzzy não convexo.	43
Figura 2.6 – Princípio da Extensão (Pedrycz, 1998).	45
Figura 2.7 - Número fuzzy triangular.....	48
Figura 2.8 – Adição de dois números fuzzy triangulares \tilde{A} e \tilde{B}	49
Figura 2.9 – Subtração de dois números fuzzy triangulares \tilde{A} e \tilde{B}	49
Figura 3.1 – Representação de uma função de pertinência para a função marginal de segurança.	57
Figura 3.2 – Esquema implícito para solução da equação da difusão advectiva: Fonte: (CHAGAS, 2005).....	58
Figura 3.3 – Fluxograma completo do programa.....	63
Figura 4.1 – Comportamento da concentração com a distância em tempos diferentes.....	66
Figura 4.2 – Comportamento das funções de pertinência para as concentrações em tempos diferentes, seção 11.	67
Figura 4.3 – Comportamento da função marginal de segurança para as concentrações em tempos diferentes, em uma seção 10 km da origem.....	68
Figura 4.4 – Comportamento das funções de pertinência para as concentrações no tempo de 4 horas, em diferentes seções.	69

Figura 4.5 – Comportamento da função marginal de segurança para as concentrações no tempo de 4 horas, em diferentes seções.	70
Figura 4.6 – Comportamento do risco com a distância em diferentes tempos.	70
Figura 4.7 – Comportamento da garantia com a distância em diferentes tempos....	71
Figura 4.8 – Comportamento do risco e da garantia com o tempo.....	72
Figura 4.9 – Perfil de concentração com a distância para diferentes tempos $C=50\text{mg/L}$	73
Figura 4.10 – Função marginal de segurança para diferentes seções no tempo de 4 horas. $C=50\text{mg/L}$	73
Figura 4.11 – Comportamento do risco com a distância para diferentes tempos. $C=50\text{mg/L}$	74
Figura 4.12 – Comportamento do risco e da garantia ao longo do tempo. $C=50\text{mg/L}$	75
Figura 4.13 – Perfil de concentração em 4 horas para diferentes lançamentos.	76
Figura 4.14 – Comportamento da função marginal para diferentes lançamentos a 10 km em 4 horas.....	77
Figura 4.15 – Comportamento do risco com a distância para diferentes lançamentos em 2 horas.	77
Figura 4.16 – Comportamento do risco com o tempo para diferentes lançamentos.	78
Figura 4.17 – Função marginal de segurança para $C=150\text{mg/L}$, em $t=2$ horas, 10 km para diferentes classes.	79
Figura 4.18 – Função marginal de segurança para $C=150\text{mg/L}$, em 8 horas, 10 km para diferentes classes.	79
Figura 4.19 – Comportamento do risco com a distância para $C=150\text{ mg/L}$, no tempo de 8 horas para diferentes classes.....	80
Figura 4.20 – Comportamento do risco com o tempo para $C=150\text{mg/L}$ para diferentes classes.....	81

Figura 4.21 – Perfil de concentração, vazão $5 \text{ m}^3/\text{s}$, para diferentes tempos.....	81
Figura 4.22 – Perfil de concentração, vazão $10 \text{ m}^3/\text{s}$, para diferentes tempos.....	82
Figura 4.23 – Perfil de concentração, vazão $20 \text{ m}^3/\text{s}$, para diferentes tempos.....	83
Figura 4.24 – Comportamento do perfil de concentração para diferentes vazões....	83
Figura 4.25 – Comportamento da função marginal de segurança, para o tempo de 8 horas em diferentes seções e vazão $10 \text{ m}^3/\text{s}$	84
Figura 4.26 – Comportamento da função marginal de segurança, em 8h e 5km, para diferentes vazões.	85
Figura 4.27 – Comportamento da função marginal de segurança a 5km para diferentes horas e diferentes classes.....	85
Figura 4.28 – Comportamento do risco com a distância para diferentes horas e uma vazão de $5 \text{ m}^3/\text{s}$	86
Figura 4.29 – Comportamento do risco com a distância para diferentes horas e uma vazão de $10 \text{ m}^3/\text{s}$	87
Figura 4.30 – Comportamento do risco com a distância para diferentes horas e uma vazão de $20 \text{ m}^3/\text{s}$	88
Figura 4.31 – Comportamento do risco e da garantia para diferentes vazões a 10 km do ponto de lançamento em 20 horas e $C=200 \text{ mg/L}$	88
Figura 4.32 – Distribuição da concentração para um lançamento de uma carga difusa ao longo do canal para uma substância conservativa.	89
Figura 4.33 – Funções de pertinência para diferentes tempos na seção a 5 km da origem.	90
Figura 4.34 – Função marginal de segurança para diferentes seções em $t=6\text{h}$	90
Figura 4.35 – Comportamento do risco com a distância em diferentes tempos.	91
Figura 4.36 – Comportamento da garantia com a distância em diferentes tempos..	92

Figura 4.37 – Comportamento do risco e da garantia ao longo do tempo para um lançamento de uma carga difusa ao longo do canal para uma substância conservativa.92

Figura 4.38 – Comportamento do risco e da garantia do Rio Windy para diferentes vazões a 5 km do ponto de lançamento em $t = 6$ horas.93

Figura 4.39 – Comportamento do risco e da garantia do Rio Windy para diferentes concentrações a 10 km do ponto de lançamento em $t = 6$ horas.94

Figura 4.40 – Comportamento do risco do Rio Sabine para diferentes concentrações a 10 km do ponto de lançamento em $t = 10$ horas.....95

LISTA DE SÍMBOLOS

A - Área de seção transversal - $[L^2]$

a(h) - Nível de pertinência h para a representação de um número *fuzzy*

\tilde{A} - Representação *fuzzy* para a área transversal - $[L^2]$

b(h) - Nível de pertinência h para uma representação *fuzzy*

c - Concentração de uma substância em um campo turbulento - $[M/L^3]$

\bar{c} - Média temporal da concentração em um campo turbulento - $[M/L^3]$

c' - Flutuação da concentração em um campo turbulento - $[M/L^3]$

C(x,y,z,t) - Representação matemática de um campo de concentração - $[M/L^3]$

C - Concentração de uma substância poluente - $[M/L^3]$

c(h) - Nível de pertinência h para uma representação *fuzzy*

\tilde{C} - Representação *fuzzy* para a concentração da substância poluente - $[M/L^3]$

dt - Diferencial em relação ao tempo - [T]

dx - Diferencial em relação ao eixo dos x - [L]

dy - Diferencial em relação ao eixo dos y - [L]

dz - Diferencial em relação ao eixo dos z - [L]

D - Coeficiente de difusão molecular - $[L^2/T]$

E - Coeficiente de dispersão longitudinal - $[L^2/T]$

\tilde{E} - Representação *fuzzy* para o coeficiente de dispersão longitudinal - $[L^2/T]$

E_x - Componente do coeficiente da difusão turbulenta na direção x - $[L^2/T]$

E_y - Componente do coeficiente da difusão turbulenta na direção y - $[L^2/T]$

E_z - Componente do coeficiente da difusão turbulenta na direção z - $[L^2/T]$

K - Coeficiente de Decaimento para uma substância poluente - $[T^{-1}]$

\tilde{K} - Representação *fuzzy* para o decaimento da substancia poluente - $[T^{-1}]$

L - Concentração de demanda bioquímica de oxigênio - $[M/L^3]$

\tilde{L} - Representação *fuzzy* para a concentração de DBO - $[M/L^3]$

L(C) - Fonte ou sumidouro de um lançamento de substância poluente em um rio - $[M/L^3]$

M – Massa - $[M]$

\tilde{M} - Representação *fuzzy* para a margem de segurança em um sistema hídrico - $[M]$

n - Coeficiente de rugosidade de Manning para rios naturais

n_l, n_u - Valores do domínio com menor nível de pertinência para o coeficiente de rugosidade

n_m - Valor do domínio com maior nível de pertinência para o coeficiente de rugosidade

\tilde{n} - Representação *fuzzy* para o coeficiente de rugosidade do Manning

R_e - Função de Confiabilidade para um sistema qualquer

R_f - Função Risco de falha para um sistema qualquer

Q – Vazão - $[L^3/T]$

Q_0 - Condição inicial para a vazão em um canal - $[L^3/T]$

\tilde{Q}_0 - Representação *fuzzy* da vazão para a condição inicial - $[L^3/T]$

\tilde{Q} - Função de pertinência para a vazão - $[L^3/T]$

q - Vazão lateral por unidade de largura - $[L^3/T/L]$

\tilde{q} - Representação *fuzzy* para o influxo lateral - $[L^3/T/L]$

\bar{q} - Fluxo de massa por unidade de área - $[M/T/L^2]$

S_D - Lançamento difuso de uma substância poluente – $[M/L^3]$

S_m - Valor do domínio com maior nível de pertinência para a declividade de fundo –
[L/L]

\tilde{S}_D - Representação *fuzzy* para o lançamento difuso de concentração - [M/L³]

S_0 - Declividade do fundo do canal – [L/L]

S_{0x} - Declividade do fundo do canal na direção longitudinal – [L/L]

S_{0y} - Declividade do fundo do canal na direção transversal – [L/L]

\tilde{S}_0 - Representação *fuzzy* para a declividade de fundo – [L/L]

t – Tempo - [T]

T – Temperatura - [°K]

$T(x,y,z,t)$ - Representação matemática de um campo de temperatura - [°K]

u - Componente da velocidade na direção x - [L/T]

\tilde{u} - Representação *fuzzy* da velocidade longitudinal - [L/T]

\bar{u} - Média temporal da componente do campo turbulento na direção x - [L/T]

u' - Flutuação da componente do campo turbulento na direção x - [L/T]

U - Velocidade média do escoamento na direção longitudinal - [L/T]

v - Componente da velocidade na direção y - [L/T]

\bar{v} - Média temporal da componente do campo turbulento na direção y - [L/T]

v' - Flutuação da componente do campo turbulento na direção y

\vec{V} - Vetor Velocidade de um fluido - [L/T]

$\vec{V}(x,y,z,t)$ - Representação matemática de um campo de velocidade - [L/T]

∇ - Volume de Controle - [L³]

w - Componente da velocidade na direção z - [L/T]

\bar{w} - Média temporal da componente do campo turbulento na direção z - [L/T]

w' - Flutuação da componente do campo turbulento na direção z - [L/T]

x - Distância longitudinal ao longo do canal - [L/T]

y - Profundidade de canal - [L]

$\frac{\partial}{\partial t}$ - Derivada parcial em relação a t - [T⁻¹]

$\frac{\partial}{\partial x}$ - Derivação parcial em relação a x - [L⁻¹]

$\frac{\partial}{\partial y}$ - Derivada parcial em relação a y - [L⁻¹]

$\frac{\partial}{\partial z}$ - Derivada parcial com relação a z - [L⁻¹]

$\vec{\nabla}$ - Operador Diferencial Vetorial - [L⁻¹]

Δt - Incremento no tempo para a solução numérica - [T]

Δx - Incremento em no espaço para a solução numérica - [L]

$\tilde{\mu}_x$ - Representação de uma função de pertinência

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivos da Pesquisa	19
1.2 Organização do Trabalho	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 Instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos	21
2.1.1 Outorga de direito do uso da água.....	22
2.1.2 Outorga para Lançamentos de Efluentes.....	24
2.2 Transporte de massa	27
2.2.1 Lei de Fick.....	29
2.2.2 Princípio de Conservação das Massas	30
2.2.3. Equação da difusão advectiva	31
2.3 Teoria Fuzzy	37
2.3.1 Conceitos	37
2.3.2 Conjuntos Fuzzy	39
2.3.3 Operações Com Conjuntos Fuzzy	45
2.3.4 Números Fuzzy	47
2.3.5 Riscos e incertezas	50
2.3.6 Risco e Confiabilidade Fuzzy	52
3. METODOLOGIA	54
3.1. Formulação do Modelo Matemático.....	54
3.2 Risco e Confiabilidade Fuzzy.....	56
3.3 Esquema Numérico para a Solução do Modelo de Transporte	58
3.4 Programa Computacional	62
3.5 Aplicação do modelo a Rios Americanos	64
4. RESULTADOS.....	66
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	97
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100

1. 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).

Para disciplinar os usos dos corpos aquáticos, inclusive no que diz respeito à assimilação de efluentes, surgiram leis especificamente para recursos hídricos, pois embora já houvesse legislações ambientais que contemplassem essa área, as medidas tomadas eram insuficientes para evitar a poluição dos corpos aquáticos e assegurar disponibilidade hídrica para os usuários, com padrões de qualidade para seus respectivos usos.

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.

Um dos principais instrumentos de gestão para redução e controle da poluição desses recursos 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.

Outra metodologia que está começando a ser usada nos estudos das incertezas e na análise de risco em recursos hídricos 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 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.

1.1 Objetivos da Pesquisa

- **Geral**

Desenvolver estudos, com base na teoria *fuzzy*, combinado com a teoria de transporte de massa e a legislação brasileira, para estudar o risco *fuzzy* de contaminação de rios naturais, na concessão de outorga para lançamentos de efluentes.

- **Específicos**

- ✓ Desenvolvimento de um modelo que permita a combinação da teoria de transporte de poluentes e da teoria *fuzzy* para estudar funções de pertinências em sistemas de rios naturais, sujeitos a lançamentos de efluentes;
- ✓ Aplicação deste modelo matemático para o cálculo do risco *fuzzy* destes sistemas hídricos, quando sujeitos a lançamentos de efluentes;
- ✓ Desenvolvimento de um programa computacional que permita a realização de simulações para vários cenários propostos;
- ✓ Analisar a teoria proposta para alguns rios e verificar a eficiência da metodologia proposta;

1.2 Organização do Trabalho

Este documento foi organizado em seis capítulos:

- Capítulo 1 - Descreve a introdução do trabalho, seus objetivos e mostra como o mesmo foi organizado.
- Capítulo 2 - Apresenta a fundamentação teórica do trabalho, onde são encontrados os princípios da modelagem de qualidade de água e seus avanços nas diversas aplicações da engenharia ambiental. Também está descrito neste capítulo a teoria do transporte de massa, a teoria *fuzzy* e a teoria de análise de risco que são usadas para quantificar os riscos de impactos ambientais, após o lançamento de uma carga poluente.
- Capítulo 3 – Mostra a metodologia onde se encontram as fases a serem seguidas no desenvolvimento do programa computacional, em linguagem Fortran, para solucionar o conjunto de equações diferenciais existentes nas diversas etapas da pesquisa. Neste capítulo foram apresentados os passos necessários à quantificação do risco, bem como os diversos cenários de aplicação deste modelo.
- Capítulo 4 - Apresenta uma análise dos resultados obtidos para as mais diversas simulações, apresentando discussões para os diferentes cenários de simulações, mostrando alguns campos de concentração e terminando nas questões pertinentes à análise de risco.
- Capítulo 5 - Apresenta as conclusões desta pesquisa e faz algumas recomendações sobre estudos futuros.
- Capítulo 6 - Apresenta a bibliografia dos principais trabalhos consultados para a realização desta pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei Federal 9.433, de 8 de janeiro de 1997, tem em um de seus objetivos assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos. Esta lei, em seu art.5º, definiu teoricamente seis instrumentos envolvidos na gestão dos recursos hídricos com a finalidade de promover a oferta de água em qualidade e quantidade aos usuários, assim como assegurar este acesso às futuras gerações.

Os instrumentos são os meios através dos quais serão atingidos os objetivos da PNRH. Assim, é necessário que haja cautela por parte dos gestores de recursos hídricos no intuito de que seja evitada a supervalorização de qualquer dos instrumentos em detrimento dos demais (BEZERRA, 2008).

São os seguintes os instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, previstos no art. 5º da Lei 9.433/97: os planos de recursos hídricos; o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água; a outorga e a cobrança pelo uso da água; e o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos.

Os Planos de Recursos Hídricos visam orientar e viabilizar a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e o gerenciamento dos recursos hídricos. Este plano articula, compatibiliza, orienta e estabelece limites aos diversos planos setoriais de usos dos recursos hídricos, tendo em vista a racionalização da apropriação deste recurso e o equacionamento dos potenciais conflitos de uso, intersetoriais, e dos setores usuários com o ambiente (LANNA, 1999). São elaborados por bacia hidrográfica, por estado e para o país; são planos de longo prazo, com horizonte de planejamento compatível com o período de implantação de seus programas e projetos.

O enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes visa assegurar às águas qualidade compatíveis com os usos mais exigentes a que foram destinadas e diminuir os custos de combate à poluição das águas, mediante ações preventivas permanentes (MELO, 2006).

Como observa Kelman (1997), o enquadramento dos corpos d'água em classes de uso permite fazer a ligação entre a gestão de quantidade da água e a gestão de qualidade da água.

A classificação das águas é o reconhecimento da diferença e multiplicidade de usos desse recurso. Os usos pretendidos serão discutidos e apontados nos planos de recursos hídricos (MACHADO *et al.*, 2003).

O enquadramento é definido pela resolução do CONAMA 357/2005 e tem como princípio norteador o estabelecimento de meta de qualidade de água a ser alcançada ou mantida em um segmento de um corpo hídrico, de acordo com seus usos preponderantes pretendidos, ao longo do tempo.

De acordo com Rodrigues (2005), a outorga de direito de uso de recursos hídricos tem como objetivos assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água, associado a uma garantia.

A cobrança está condicionada aos usos sujeitos à outorga e objetiva reconhecer a água como um bem econômico, incentivar a racionalização do uso da água e obter recursos financeiros para atendimento das metas estabelecidas nos Planos de Recursos Hídricos. De acordo com Porto (2002), a lei federal prevê a cobrança pelo uso da água levando em conta o volume utilizado, quer para lançamentos, quer para captações.

Finalmente, o Sistema de Informações de Recursos Hídricos tem como objetivo coletar, tratar e armazenar informações sobre recursos hídricos. Funciona como uma base dinâmica de informações para o sistema de gestão de recursos hídricos.

2.1.1 Outorga de direito do uso da água

Conforme mencionado anteriormente, a Lei n.º 9.433/97 estabeleceu como um de seus instrumentos (Art. 5º, III) a outorga de direito de uso dos recursos hídricos, que constitui o elemento central de controle dos recursos hídricos e indutor do ordenamento dos usos.

A ANA – Agência Nacional de Águas – define outorga como o ato administrativo mediante o qual o poder público outorgante (União, Estado ou Distrito

Federal) faculta ao outorgado (requerente) o direito de uso de recurso hídrico, por prazo determinado, nos termos e nas condições expressas no respectivo ato administrativo (ANA, 2011).

A outorga, considerada um instrumento de comando e controle, está condicionada às prioridades de uso estabelecidas nos planos de bacias e deve respeitar a classe em que o corpo de água estiver enquadrado e a manutenção das condições adequadas ao transporte aquaviário, quando couber (art.13, da Lei nº 9.433/97).

De acordo com Lanna (2000), a função da outorga será ratear a água disponível entre as demandas existentes ou potenciais de modo que os melhores resultados sejam gerados para a sociedade.

Deste modo, conforme o art.12, da Lei nº 9.433/97 os usos da água sujeitos à outorga pelo Poder Público são:

- ✓ Derivação ou captação de parcela da água existente em um corpo de água para consumo final, inclusive abastecimento público, ou insumo de processo produtivo;
- ✓ Extração de água de aquífero subterrâneo para consumo final ou insumo de processo produtivo;
- ✓ Lançamentos 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;
- ✓ Aproveitamento dos potenciais hidrelétricos;
- ✓ Outros usos que alterem o regime, a quantidade ou a qualidade da água existente em um corpo de água.

Por outro lado, de acordo com o parágrafo 1º, art. 12, da referida lei, independem de outorga: o uso de recursos hídricos para a satisfação das necessidades de pequenos núcleos populacionais, distribuídos no meio rural e as derivações, captações, lançamentos e as acumulações de volumes de água considerados insignificantes.

Os critérios específicos de vazões e acumulações de volumes de água consideradas insignificantes devem ser estabelecidos nos planos de recursos

hídricos, devidamente aprovados pelos respectivos comitês de bacia hidrográfica ou, na inexistência destes, pelo órgão outorgante competente.

De forma geral, a outorga é concedida após avaliações quanto à compatibilidade entre demandas e a disponibilidade hídrica do corpo de água, assim como pelas finalidades do uso e os impactos causados nos recursos hídricos.

Nos rios do domínio da União, a Agência Nacional de Águas (ANA), detém a competência legal para conceder a outorga de direito de uso aos usuários. Nos rios do domínio dos Estados, os órgãos gestores de recursos hídricos estaduais são competentes para outorgar o uso de suas águas.

2.1.2 Outorga para Lançamentos de Efluentes

A Resolução do CONAMA n° 357, de 17 de março de 2005, representa um grande avanço na área de gestão de recursos hídricos, já que a mesma consegue promover no plano legal a conciliação dos instrumentos de gestão, principalmente, no que diz respeito ao enquadramento, a metas, a objetivos e ao lançamento de efluentes. Esta resolução estabelece os padrões de qualidade de água dos corpos receptores e de lançamentos de efluentes. Por meio desta resolução, as águas do território nacional são classificadas em: doces, salobras e salinas e também em treze classes de qualidade.

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 está devidamente implantada em nível nacional. Para isso, será 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. Essa é uma área ainda pouco explorada cuja discussão e investigação devem ser incentivadas (AZEVEDO *et al.*, 2003).

A outorga para assimilação de efluentes, conforme consta na Lei Federal N° 9.433/97, tem como base permitir que após a descarga de poluentes em um curso de água, depois de ocorridos todos os processos de dispersão, a qualidade da água neste manancial permaneça satisfatória, conforme seus objetivos de qualidade estabelecidos pela classe de uso (CRUZ, 2001).

Quando um usuário lança um efluente num curso d'água, na realidade, está se “apropriando” de certa vazão de água para diluir (ou transportar) os poluentes contidos nesse efluente. Obviamente, alguns poluentes não poderão ser lançados nos cursos d'água, pois o próprio enquadramento previsto o proíbe. O valor dessa “quantidade a ser apropriada” é função de fatores tais como:

- ✓ Vazão de lançamento dos efluentes;
- ✓ Concentração de cada um dos poluentes presentes na vazão de lançamento;
- ✓ Vazão crítica do curso receptor (definida pelo órgão gestor pertinente);
- ✓ Concentração existente do poluente no curso d'água;
- ✓ Concentração máxima permissível do poluente no curso d'água, definido pela classe adotada para o corpo hídrico;
- ✓ Características conservativas ou não conservativas do poluente.

Para que os processos de outorga e cobrança pelo uso da água sejam geridos em quantidade e qualidade, existe a necessidade de se considerar de forma articulada o enquadramento em classes de uso preponderante, o regime de vazões e a capacidade de autodepuração do corpo hídrico, tudo isto diante do cenário real da bacia hidrográfica.

Logo, existe a necessidade de se trabalhar com um modelo de qualidade da água que possibilite a entrada de dados de qualidade e quantidade da água, assim como, existe, também, a necessidade de se trabalhar com um modelo de outorga e cobrança pelo uso da água (RODRIGUES, 2005).

Dessa forma, para que a outorga para lançamento seja viável e também, de fato, contribua para a gestão da qualidade da água, é preciso que se estabeleça que a concentração limite, correspondente à classe enquadramento, seja uma meta a ser alcançada dentro de algum tempo (SUDERSHA, 2002).

Com relação aos parâmetros que devem ser analisados na avaliação da outorga para lançamento de efluentes, Porto (2002) apud Neves (2005) estabelece que devam ser considerados os poluentes que representem impactos mais significativos na bacia, ou seja, aqueles que utilizam maior quantidade de água para o decaimento ou a diluição.

Assim, de acordo com Neves, (2005), a avaliação do pleito de outorga deve se concentrar nos poluentes de maior impacto, enquanto que o licenciamento tem de se preocupar com todos os poluentes que impactam os usos designados. Do mesmo modo, cabe à outorga garantir a disponibilidade hídrica que o licenciamento supõe haver na bacia para transportar os poluentes lançados (ROQUES, 2006).

Segundo Johnsson *et al.*, (2003), o parâmetro DBO, além de ser representativo de esgotos domésticos, é também um dos elementos mais presentes nos diferentes tipos de efluentes industriais.

Define-se Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) como sendo a quantidade necessária de oxigênio para metabolização da matéria orgânica biodegradável existente no meio aquático (CHAPRA, 1997).

Embora o conceito de DBO não sirva como única medida para avaliar o impacto em um rio através do despejo de poluentes, possibilita uma avaliação bem significativa do estado da qualidade da água de um determinado meio, pois é uma medida direta do potencial consumo de oxigênio dissolvido (OD) neste meio.

Von Sperling (1996) descreve que a matéria orgânica presente nos corpos de água é uma característica de primordial importância, sendo a causadora do principal problema decorrente da poluição das águas: o consumo de oxigênio dissolvido pelos microorganismos responsáveis pela estabilização da mesma, de origem predominantemente orgânica.

O oxigênio dissolvido na água é um dos indicadores mais usados para avaliar a qualidade do corpo hídrico. Para Braga *et al.* (2004), o conhecimento da DBO do esgoto como um todo, já é um indicativo suficiente para determinar o impacto do despejo desse material na concentração de oxigênio dissolvido no corpo de água receptor.

Os padrões de qualidade de água de corpos receptores e de lançamentos de efluentes são apresentados pela resolução CONAMA 357/2005. Os valores permissíveis da classe no corpo receptor, enfatizando os parâmetros de DBO e OD, são destacados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Parâmetros DBO e OD permissíveis segundo a Resolução CONAMA 357/2005.

Parâmetro	Doços				Salinas			Salobras					
	Esp.	1	2	3	4	Esp.	1	2	3	Esp.	1	2	3
DBO (mg O ₂ / L)	-	< 3	< 5	< 10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OD (mg O ₂ / L)	-	> 6	> 5	> 4	> 2	-	> 6	> 5	> 4	-	> 5	> 4	> 3

2.2 Transporte de massa

Segundo Fischer (1979), a teoria do transporte de poluentes tem como base fundamental a combinação da Lei de Fick com a teoria de conservação das massas. Através desta combinação é possível fazer uma análise 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:

- **Difusão molecular**

O transporte de uma espécie química em um corpo hídrico, por meio de difusão molecular, é resultado dos movimentos aleatórios de suas moléculas da região de maior para a de menor concentração. Este processo é finalizado quando uma condição de equilíbrio é estabelecida, resultando na completa uniformização da concentração no meio (LOPES, 2009).

Descreve o espalhamento da massa poluente causado, exclusivamente, pelo movimento molecular presente no sistema. Esta análise é feita através da clássica equação da difusão, uma equação diferencial parcial de 2ª ordem.

De acordo com Welty *et al.*, (2001), a difusão molecular é o transporte de massa determinada pela *Lei de Fick* que descreve o fluxo unidimensional de massa, onde a taxa de transporte na direção X é dada por:

$$\bar{q} = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.1)$$

Onde:

\bar{q} representa o fluxo de massa por unidade de área [$MT^{-1}L^{-2}$];

D representa o coeficiente de difusão molecular [L^2T^{-1}];

C representa a concentração da amostra [ML^{-3}]

- **Advecção**

O segundo processo trata da teoria advectiva que corresponde ao espalhamento da massa poluente através do movimento do campo advectivo. Isto significa dizer que é o campo de velocidade associado ao fluido o responsável pelo espalhamento advectivo da massa.

- **Difusão Turbulenta**

A difusão é definida como turbulenta quando as grandezas que as caracterizam como, por exemplo, a velocidade, concentração e a pressão apresentam valores instantâneos com o comportamento aleatório em forma de pulsos (BIRD *et al.*, 2001).

A difusão turbulenta atua em escalas maiores e ocorre pelo movimento aleatório do fluido (CHAPRA, 1997). Neste caso, o espalhamento ocorre devido à energia contida no campo turbulento. Esse processo é controlado pelo coeficiente de difusão turbulenta que depende diretamente da energia de turbulência contida no campo de velocidade. Desta forma, quanto maior for a turbulência, maior será este coeficiente e, em consequência, maior será o processo de espalhamento.

A combinação destes três processos, mencionados anteriormente, numa análise do comportamento da concentração recebe o nome de dispersão. Ou seja, a dispersão de poluentes representa o efeito combinado da difusão molecular, da difusão advectiva, e da difusão turbulenta.

2.2.1 Lei de Fick

A lei de Fick é uma analogia da lei de Fourier para o processo de transferência de calor. Segundo Fourier, o fluxo de calor que é transferido de um ponto $A(x_a, y_a, z_a)$ para um ponto $B(x_b, y_b, z_b)$ é proporcional ao gradiente de temperatura entre os pontos A e B. Matematicamente, esta lei pode ser representada através da equação:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -K \vec{\nabla} T \quad (2.2)$$

Onde:

$T(x, y, z, t)$ representa o campo de Temperatura;

K representa um coeficiente de proporcionalidade;

$\vec{\nabla}$ representa o operador diferencial "Nabla" definido por:

$$\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \quad (2.3)$$

Onde:

x, y, z representam as coordenadas do espaço tridimensional;

$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ representam os vetores unitários nas direções $x, y, e z$.

Desta forma, a lei de Fick para um processo de transferência de massa é dada, considerando um processo advectivo, causado por um campo de velocidade, por:

$$\vec{q} = \vec{V}C + (-D\vec{\nabla}C) \quad (2.4)$$

Onde:

\vec{q} representa o vetor fluxo de massa por unidade de área;

$C(x, y, z, t)$ representa o campo de concentração da substância ;

$\vec{V}(x, y, z, t)$ representa o campo de velocidade do meio fluido; e

D representa o coeficiente de Difusão Molecular.

O primeiro termo do segundo membro da equação (2.4) representa o fluxo advectivo causado pelo campo de velocidade. Já o segundo, representa o fluxo difusivo causado pelo movimento molecular da massa poluente.

É importante notar que a equação, que representa a lei de Fick, afirma que o fluxo de massa que atravessa uma seção qualquer é proporcional ao gradiente de concentração. Sendo assim, fica estabelecido que existe um fluxo de massa na direção da maior variação de concentração. Conseqüentemente, a equação acima descreve o espalhamento da matéria, no espaço e no tempo, sempre que houver variação ou gradiente espacial de concentração.

2.2.2 Princípio de Conservação das Massas

Para expressar o princípio da conservação das massas em forma matemática, considere um volume de controle dV com uma superfície dA . Admitindo que a massa em estudo é uma função $f(x,y,z,t)$, a massa total contida no volume de controle é dada por:

$$\iiint C(x, y, z, t) dV \quad (2.5)$$

Se o fluxo de massa, por unidade de área, é dado por $\vec{q}(x,y,z,t)$, o princípio da conservação das massas estabelece (FISCHER, 1979):

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{VC} C(x, y, z, t) dV + \iint_{SC} \vec{q}(x, y, z, t) \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2.6)$$

Onde $d\vec{A}$ representa um vetor da área elementar, perpendicular à superfície de controle.

Aplicando o Teorema de Green, para diferenciação de vetores, pode-se transformar a Equação (2.5) na forma diferencial da equação do balanço de massa:

$$\iiint_{VC} \left(\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{q} \right) dV = 0 \quad (2.7)$$

Como o volume de controle (Figura 2.1) é escolhido arbitrariamente, tem-se a forma diferencial da equação do balanço de massa:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{q} = 0 \quad (2.8)$$

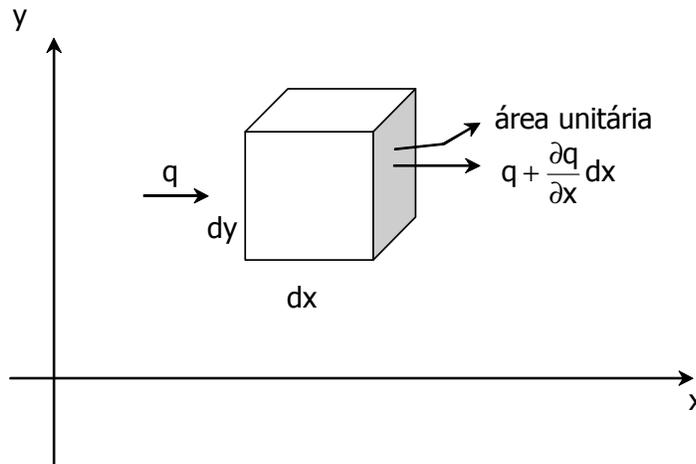


Figura 2.1 – Fluxo de massa em um volume de controle (Fischer, 1979).

2.2.3. Equação da difusão advectiva

Combinando a Equação (2.7) com a equação que descreve a lei de Fick, descrita anteriormente, tem-se a clássica equação da difusão advectiva, em três dimensões, definida por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{V}C) = \vec{\nabla} \cdot (D\vec{\nabla}C) \quad (2.9)$$

Considerando ainda que, pelo princípio da continuidade, para um volume fluido, $\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0$, a Equação (2.9) pode ser simplificada para:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla}C = D\nabla^2C \quad (2.10)$$

Esta equação ainda pode ser apresentada na forma:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (2.11)$$

Onde u , v , w são as componentes do vetor que descreve o campo de velocidade $\vec{V}_{(x,y,z,t)}$.

A equação acima é conhecida com o nome de Equação da Difusão Advectiva, e é largamente aplicada em qualquer análise que procure avaliar o comportamento de um campo de concentração $C(x, y, z, t)$, em um meio qualquer (CHUNG *et al.*, 1993). Esta é uma equação diferencial parcial de segunda ordem e tem, como principal característica, o fato de ser uma equação linear, o que facilita sua manipulação analítica.

• Efeito da turbulência

Na aplicação da Equação (2.11), para os estudos da concentração, há certa dificuldade relacionada com a instantaneidade das funções transientes contidas nos processos de transporte. As principais funções que merecem destaque são a velocidade e a concentração. Essas grandezas, presentes na Equação (2.11), representam seus valores instantâneos, fato este que complica a análise generalizada do modelo, tendo em vista a presença, no campo de velocidade, de um movimento turbulento. Este movimento, presente em todos os meios fluidos, incorpora componentes aleatórias na velocidade média e torna este campo extremamente complexo para suas análises.

Atualmente, muitos são os estudos que tentam apresentar uma formulação adequada para a modelagem dos movimentos turbulentos. Considerando os fortes aspectos estatísticos presentes nestes movimentos fluidos, uma grande variedade de teorias estatísticas tem sido apresentada e proposta. Entretanto, este campo de estudo, continua aberto.

Segundo James (1993), para se apresentar uma formulação mais adequada da Equação (2.11), onde se incorporam os aspectos turbulentos do escoamento, as funções velocidade e concentração podem ser formuladas:

$$u = \bar{u} + u' \quad ; \quad v = \bar{v} + v' \quad ; \quad w = \bar{w} + w' \quad (2.12)$$

$$c = \bar{c} + c' \quad (2.13)$$

Onde:

u, v, w , representam os valores instantâneos do vetor velocidade nas direções x, y, z ;

$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$, representam os valores médios, no tempo, das componentes do vetor velocidade;

u', v', w' representam os valores aleatórios das componentes da velocidade, causada pelo efeito turbulento em relação às suas velocidades médias;

c representa o valor instantâneo da concentração;

\bar{c} representa a média temporal da concentração;

c' representa a componente aleatória da concentração causada pelo efeito turbulento, em relação à concentração média.

As grandezas $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{c}$ são definidas como sendo a média temporal das componentes das velocidades e da concentração. Suas formulações matemáticas têm a forma:

$$\bar{f} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f dt \quad (2.14)$$

Onde T é o tempo considerado para a medida da grandeza f .

Colocando essas formulações na equação da continuidade e considerando o fato de que $\nabla \cdot \vec{V} = 0$, encontra-se para a equação do transporte de massa:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial x}(\overline{u'c'}) - \frac{\partial}{\partial y}(\overline{v'c'}) - \frac{\partial}{\partial z}(\overline{w'c'}) \quad (2.15)$$

Os produtos do tipo $\overline{u'c'}$ representam a taxa de convecção de massa causada pelas flutuações turbulentas e, através da comparação com a lei de Fick para difusão molecular, esses produtos podem ser representados por uma expressão equivalente a um modelo difusivo, só que, nestas condições, causados pela presença da energia turbulenta do escoamento. Assim:

$$\overline{u'c'} = -E_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \quad (2.16)$$

$$\overline{v'c'} = -E_y \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \quad (2.17)$$

$$\overline{w'c'} = -E_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \quad (2.18)$$

Onde, E_x , E_y , E_z representam os coeficientes de difusão turbulenta nas direções x, y e z.

A formulação final para avaliar o campo de concentração que escoa em regime turbulento, omitindo-se as barras das funções médias, pode ser apresentada na forma:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(E_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + L(C) + S_D$$

A Equação (2.19), que é conhecida como a equação geral da difusão advectiva, leva em consideração todos os processos combinados no transporte de massa. No início do processo, predomina a difusão molecular espalhando as moléculas do constituinte mesmo que o meio apresente velocidade média nula. Finalmente, a difusão turbulenta e a advecção determinam a completa mistura do poluente.

O termo S_D representa uma fonte distribuída que contribui ao longo do corpo hídrico. Neste caso, se W for a carga poluente por unidade de comprimento e por unidade de tempo, o fluxo de concentração difusa S_D pode ser definido como sendo W/A . O termo $L(C)$ representa uma fonte ou um sumidouro de massa no meio aquático (Figura 2.2).

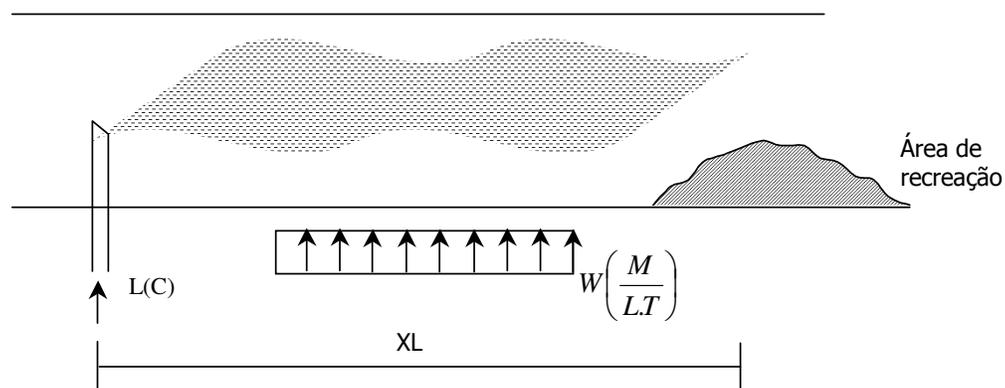


Figura 2.2 – Lançamentos difuso e pontual em um rio.

Normalmente, a função $L(C)$ é considerada como sendo uma fonte positiva, ou seja, uma fonte de lançamento de matéria no processo de avaliação. Este é o caso, por exemplo, de um crescimento populacional, em uma colônia de bactéria. Sua expressão matemática tem a forma:

$$L(C) = KC \quad (2.20)$$

Onde K representa a taxa de crescimento populacional.

No caso de $L(C)$ representar um sumidouro, ou um decaimento qualquer, que ocorre, normalmente, com substâncias não conservativas, a formulação matemática assume a forma:

$$L(C) = -KC \quad (2.21)$$

Onde K , neste caso, representa a taxa de decaimento de primeira ordem.

Algumas considerações devem ser feitas quando se compara o coeficiente de difusão molecular D e os coeficientes de difusão turbulenta, E_x , E_y , E_z . Para se ter uma ideia da ordem de grandeza desses dois coeficientes, basta notar o quanto se esperaria para adoçar uma xícara de café, sem qualquer intervenção humana, após o lançamento de uma pedra de açúcar na xícara. Neste caso, o processo de homogeneização da mistura se dá, exclusivamente, por difusão molecular, razão pela qual o processo é muito demorado. Para que o processo seja acelerado provoca-se um movimento na mistura, introduzindo feitos turbulentos na mesma. Isto acelera, consideravelmente, o processo de homogeneização da mistura.

Esta simples análise permite concluir que o coeficiente de difusão turbulenta possui uma ordem de grandeza bem maior do que o coeficiente de difusão molecular. Desta forma, a dispersão provocada em um campo de escoamento turbulento é bem mais rápida do que em um campo de escoamento laminar, onde somente ocorre dispersão causada por difusão advectiva e difusão molecular. Nos problemas hidroambientais, este fato permite concluir que em rios com velocidades altas e com um turbilhonamento mais latente, o processo de

autodepuração é mais presente do que em rios com baixa velocidade, ou com águas calmas.

Como pode ser observado, o processo da dispersão é constituído de várias etapas, sendo cada uma delas dependente de parâmetros de natureza diversificada. Parâmetros de natureza hidrológica, hidráulica, fatores determinantes do escoamento, têm influência significativa na capacidade de dispersão de poluentes em um corpo d'água. Tipos de lançamento, se pontual ou difuso, se proveniente de sistemas urbanos ou de setores industriais, se proveniente de áreas irrigadas, com alto teor de agrotóxicos também afetam o processo dispersivo.

Diante do exposto percebe-se a complexidade da modelagem do transporte de poluentes em sistemas hídricos. Entretanto, muito tem sido feito na busca de se encontrar um melhor entendimento da equação geral da dispersão e suas aplicações no campo da Engenharia Hidroambiental.

2.3 Teoria Fuzzy

2.3.1 Conceitos

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).

Foi em 1965, pensando em atribuir significados a termos linguísticos 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.

A lógica *fuzzy* ou nebulosa é baseada no uso de aproximações, ao contrário da exatidão, com que se está naturalmente acostumado a trabalhar. O princípio fundamental da teoria *fuzzy*, princípio da dualidade, estabelece que dois eventos opostos possam coexistir, isto é, um elemento pode pertencer, com um certo grau, a um conjunto e, em um outro grau, a um outro conjunto. Nota-se isso em vários casos na natureza e na vida cotidiana, principalmente quando se tratam de conceitos abstratos como beleza, conforto, etc... Por exemplo, uma pessoa pode achar que está calor, enquanto outra, no mesmo ambiente, acha que está frio.

Os conjuntos *fuzzy* podem ser encarados como uma extensão da teoria clássica dos conjuntos (conjuntos *crisp*), cujos valores variam no intervalo entre 0 (zero) e 1 (um). Ou seja, uma regra pode ter resultados 100% falsos e 100% verdadeiros, ou um resultado entre esse intervalo, por exemplo: 60% verdadeiro.

No sistema lógico convencional, chamado também de *crisp*, quando se deseja classificar uma casa de grande ou pequena, usa-se regras simplórias – se ela tem até 100 m² é pequena. Se tem mais que 100 m², é grande. Mas e se ela tiver 99 m²? É pequena?

Já na lógica *fuzzy*, não se pode tratar uma variável como tendo apenas um estado atual, mas sim com “n” estados, cada um com um grau de associação. Por exemplo, não se afirma que uma casa é grande, mas sim que ela é 0,8 grande, 0,2 média e 0,0 pequena. Isto faz com que sejam definidos conjuntos em que um dado valor pode ser enquadrado.

Com a lógica difusa, a pergunta muda: não se trata mais de saber se uma pessoa é maior de idade, mas o quanto essa pessoa pertence ao conjunto dos maiores de idade. Assim, basta definir a função matemática que vai descrever o conjunto difuso dos adultos e aplicar a idade atual do indivíduo à equação para saber o quão adulto ele é.

Muitas vezes, quando se define um conjunto, encontram-se dificuldades em classificar elementos de sua fronteira, pois esses podem seguir algumas características do conjunto, mas não exatamente todas. Se um veículo ultrapassa o limite de velocidade de uma rodovia, pode receber uma multa. Se o limite é fixado,

por exemplo, em 70 km/h, então quem ultrapassá-lo por apenas um quilômetro horário, 71 km/h, deve ser multado? Mesmo que haja uma margem de segurança, pela lógica aristotélica, o limite (com ou sem margem) divide os motoristas em dois conjuntos: o dos infratores e o dos respeitadores da lei. Mas quem ultrapassa o limite por "pouco" deve ser considerado pertencente ao mesmo conjunto que quem, por exemplo, foi pego a uma velocidade equivalente ao dobro do limite?

A Lógica Nebulosa permite que se resolvam alguns paradoxos tradicionais da matemática e da lógica aristotélica. Como as variáveis podem assumir valores contínuos, as soluções para alguns paradoxos clássicos podem ser encontradas admitindo-se, para cada alternativa da solução, um valor *fuzzificado*, ou seja, um grau de verdade, que não precisa, necessariamente, ser zero ou um (SANTOS, 2008).

Bogardi e Duckstein (2002) aplicaram os conceitos da teoria *fuzzy*, para gerenciar o risco de enchentes, em sistemas com alto grau de incertezas. Neste caso, foram identificados quatro elementos fundamentais para modelar o problema: 1) exposição do sistema, L; 2) a resistência do sistema, C; 3) falha no sistema, L>C e 4) consequência da falha. Ao final do estudo, identificou-se a ação preferencial para evitar consequências indesejáveis tanto do ponto de vista econômico, como ecológico.

2.3.2 Conjuntos Fuzzy

Na teoria tradicional dos conjuntos, um conjunto A pertencente a um universo de discurso X pode ser representado por uma função característica $A(x), x \in X$, isto é:

$$A(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \in X \\ 0, & \text{se } x \notin X \end{cases} \quad (2.22)$$

A estrutura acima é aplicada para conjuntos com limites bem definidos, pois para qualquer objeto que pertença ao universo X é possível determinar com exatidão se o mesmo pertence ou não ao conjunto A. Assim, segundo Chagas

(2005), nos conjuntos clássicos existe uma distinção rígida entre os elementos que pertencem ou não a um conjunto. O conceito fundamental dos conjuntos *fuzzy* é suavizar esta restrição, pois esta teoria possibilita a existência de um grau de pertinência para cada elemento de um determinado conjunto.

A pertinência de um elemento em um determinado conjunto ocorre de modo gradativo. Segundo Zimmermann (1991), nos casos extremos o grau de pertinência é 0, caso ele não pertença ao conjunto ou o grau de pertinência é 1, caso em que o elemento pertença 100 % ao conjunto. Desta forma, um conjunto *fuzzy* surge a partir da expansão de um conjunto tradicional, passando a incorporar incertezas (LIMA, 2002).

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:

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) \mid x \in X; \mu_{\tilde{A}}(x) \in [0, 1]\} \quad (2.23)$$

Onde:

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

Existem vários tipos de funções de pertinência parametrizadas como, por exemplo: triangular, trapezoidal, exponencial, gaussiana. As funções mais utilizadas são as trapezoidais e as triangulares.

- Funções Trapezoidais

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m] \\ 1, & \text{se } x \in [m, n] \\ \frac{b-x}{b-n}, & \text{se } x \in [n, b] \\ 0, & \text{se } x > b \end{cases} \quad (2.24)$$

- Funções Triangulares

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m] \\ \frac{b-x}{b-m}, & \text{se } x \in [m, b] \\ 0, & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (2.25)$$

A Figura 2.3 mostra exemplos de funções de pertinência trapezoidal (a) e triangular (b).

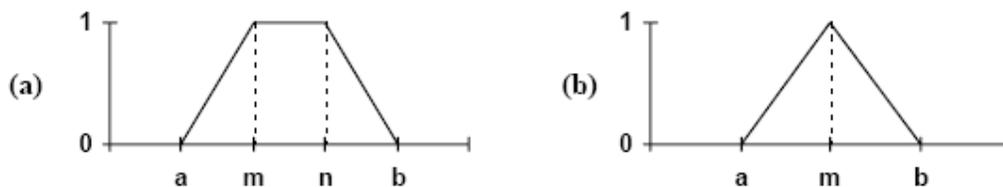


Figura 2.3 - Exemplos de funções de pertinência.

Embora a função de pertinência seja o ponto central da teoria dos conjuntos *fuzzy*, existem outros conceitos básicos que também são importantes para compreensão desta teoria. Entre estes conceitos podem ser mencionados: suporte, supremo, normalização, convexidade, cardinalidade, fuzzificação, defuzzificação e o princípio da extensão.

Suporte

O suporte de um conjunto *fuzzy* \tilde{A} representado por $\text{Supp}(\tilde{A})$, é definido como o conjunto nítido que contém todos os elementos do universo X , que pertencem à \tilde{A} com grau de pertinência diferente de zero, ou seja:

$$\text{Supp}(\tilde{A}) = \{x \in X / \mu_{\tilde{A}}(x) > 0\} \quad (2.26)$$

Supremo

O supremo de \tilde{A} denotado por $\sup \mu_{\tilde{A}}(x)$ é o maior grau de pertinência obtido nesse conjunto por um de seus elementos. Trata-se, portanto, de sua altura $h(\tilde{A})$. Portanto:

$$h(\tilde{A}) = \sup_{x \in X} \tilde{A}(x) \quad (2.27)$$

Quando a altura $h(\tilde{A}) = 1$, o conjunto *fuzzy* \tilde{A} é normal e caso $h(\tilde{A}) < 1$ \tilde{A} é dito subnormal.

Normalização

Caso um conjunto *fuzzy* seja não vazio e subnormal, pode-se torná-lo normal por meio da divisão dos graus de pertinência de cada elemento pelo maior grau de pertinência encontrado no conjunto, ou seja:

$$\mu'_{\tilde{A}}(x) = \mu_{\tilde{A}}(x) / \sup \mu_{\tilde{A}}(x) \quad (2.28)$$

Convexidade

Um conjunto *fuzzy* \tilde{A} é convexo se para $\forall x_1, x_2 \in X \lambda \in [0,1]$ ocorre:

$$\mu_{\tilde{A}}(\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2) \geq \min(\mu_{\tilde{A}}(x_1), \mu_{\tilde{A}}(x_2)) \quad (2.29)$$

O conjunto representado na Figura 2.4 é convexo enquanto que o da Figura 2.5 é não convexo.

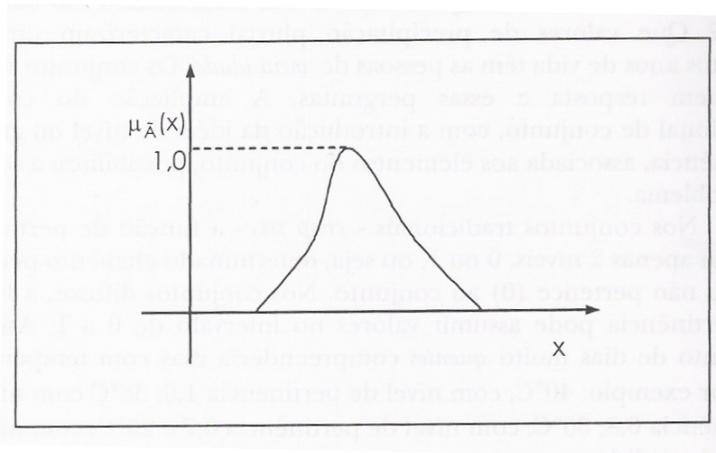


Figura 2.4 - Conjunto fuzzy convexo.

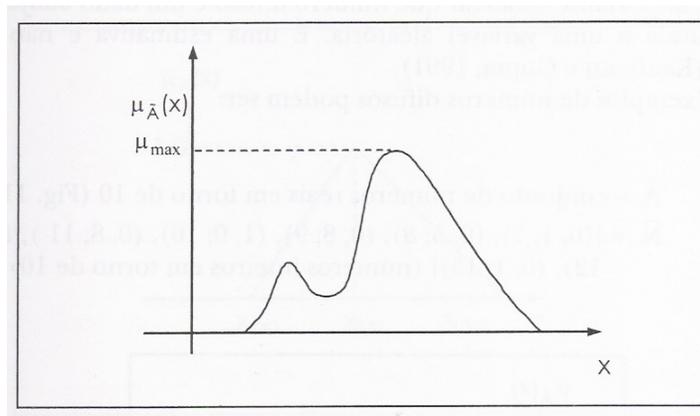


Figura 2.5 - Conjunto fuzzy não convexo.

Cardinalidade

A cardinalidade de um conjunto *fuzzy* \tilde{A} , definido no universo X finito, é o somatório dos graus de pertinência de todos os elementos de X em \tilde{A} , conforme equação abaixo:

$$|\tilde{A}| = \sum_{x \in X} \mu_{\tilde{A}}(x) \quad (2.30)$$

Fuzzificação

A fuzzificação acontece quando um conjunto *fuzzy* \tilde{A} é obtido pelo “alargamento” *fuzzy* de um conjunto nítido, isto é, um conjunto nítido é convertido em um conjunto *fuzzy* apropriado, para expressar medidas de incertezas.

Defuzzificação

A idéia principal dos métodos de defuzzificação é obter um valor a partir de um conjunto *fuzzy*, de acordo com algumas características especificadas. Este processo é bastante utilizado nos sistemas *fuzzy* de um modo geral, pois seu objetivo é fazer interface com os modelos nítidos do mundo real, associando a cada conjunto *fuzzy*, um elemento que o represente.

Princípio da Extensão

O princípio da extensão ocupa um papel fundamental na teoria dos conjuntos *fuzzy*, visto que através dele é possível definir várias operações com esses conjuntos. Sejam X e Y dois conjuntos, \tilde{A} um conjunto *fuzzy* em X e f um mapeamento de X para Y , ou seja:

$$f : X \rightarrow Y$$

O princípio da extensão estabelece que a imagem de \tilde{A} sob este mapeamento é um conjunto *fuzzy* $\tilde{B} = f(\tilde{A})$ em Y , tal que para cada $y \in Y$ ocorre:

$$\tilde{B}(y) = \sup \mu_{\tilde{A}}(x) \quad (2.31)$$

Onde: $x \in X$ e $y = f(x)$, conforme Figura 2.6.

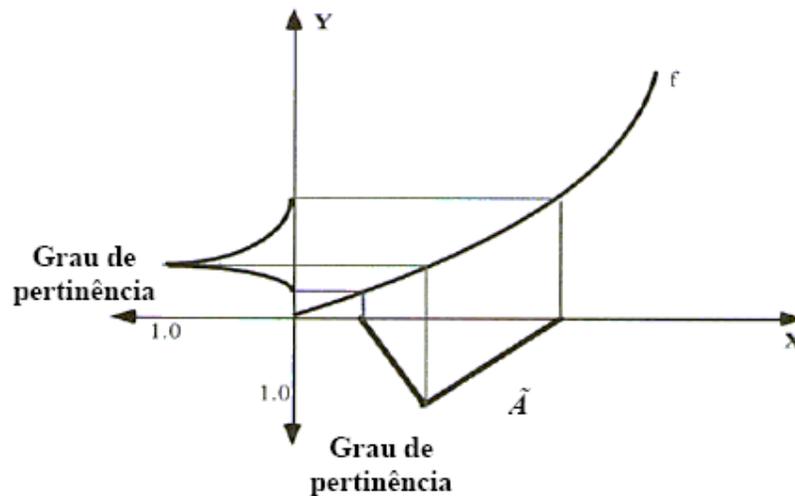


Figura 2.6 - Princípio da Extensão (Pedrycz, 1998).

2.3.3 Operações Com Conjuntos Fuzzy

A teoria dos conjuntos *fuzzy* é uma extensão da teoria dos conjuntos tradicionais. Assim, as principais operações clássicas de igualdade, união, intersecção e complemento foram estendidos para o domínio dos conjuntos *fuzzy*. Desta forma, sendo \tilde{A} e \tilde{B} dois conjuntos *fuzzy*, as seguintes operações podem ocorrer:

Igualdade

Dois conjuntos *fuzzy* \tilde{A} e \tilde{B} são iguais quando seus valores de pertinência são idênticos, ou seja:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \mu_{\tilde{B}}(x), \forall x \in X \quad (2.32)$$

União

A união *fuzzy* dos conjuntos *fuzzy* \tilde{A} e \tilde{B} , definida por $\tilde{A} \cup \tilde{B}$, provoca o surgimento de outro conjunto *fuzzy*, cuja função de pertinência é formada pelos máximos das funções de pertinência dos conjuntos \tilde{A} e \tilde{B} representando-se desta forma:

$$\tilde{A} \cup \tilde{B}(x) = \max(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)) \quad (2.33)$$

Intersecção

A intersecção *fuzzy* dos conjuntos *fuzzy* \tilde{A} e \tilde{B} , definida por $\tilde{A} \cap \tilde{B}$ também provoca o surgimento de outro conjunto *fuzzy*, porém sua função de pertinência é formada pelos mínimos das funções de \tilde{A} e \tilde{B} .

$$\tilde{A} \cap \tilde{B}(x) = \min(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)) \quad (2.34)$$

Complemento

O complemento \bar{A} de um conjunto *fuzzy* \tilde{A} é obtido pela aplicação da seguinte função de pertinência:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x), \forall x \in X \quad (2.35)$$

Dados os conjuntos *fuzzy* \tilde{A} , \tilde{B} e \tilde{C} os operadores min, max e o de complemento, possuem as seguintes propriedades:

1. Comutatividade:

$$\tilde{A} \cap \tilde{B} = \tilde{B} \cap \tilde{A} \text{ e } \tilde{A} \cup \tilde{B} = \tilde{B} \cup \tilde{A}$$

2. Associatividade:

$$\tilde{A} \cap (\tilde{B} \cap \tilde{C}) = (\tilde{A} \cap \tilde{B}) \cap \tilde{C} \text{ e } \tilde{A} \cup (\tilde{B} \cup \tilde{C}) = (\tilde{A} \cup \tilde{B}) \cup \tilde{C}$$

3. Idempotência:

$$\tilde{A} \cap \tilde{A} = \tilde{A} \text{ e } \tilde{A} \cup \tilde{A} = \tilde{A}$$

4. Distributividade:

$$\tilde{A} \cap (\tilde{B} \cup \tilde{C}) = (\tilde{A} \cap \tilde{B}) \cup (\tilde{A} \cap \tilde{C}) \text{ e}$$

$$\tilde{A} \cup (\tilde{B} \cap \tilde{C}) = (\tilde{A} \cup \tilde{B}) \cap (\tilde{A} \cup \tilde{C})$$

5. Condições de Limites:

$$\tilde{A} \cap X = \tilde{A} \text{ e } \tilde{A} \cup X = \tilde{A}$$

$$\tilde{A} \cap \emptyset = \tilde{A} \text{ e } \tilde{A} \cup \emptyset = \tilde{A}$$

6. Absorção:

$$\tilde{A} \cap (\tilde{A} \cup \tilde{B}) = \tilde{A} \text{ e } \tilde{A} \cup (\tilde{A} \cap \tilde{B}) = \tilde{A}$$

7. Lei de Morgan:

$$\sim (\tilde{A} \cap \tilde{B}) = \sim \tilde{A} \cup \sim \tilde{B} \text{ e } \sim (\tilde{A} \cup \tilde{B}) = \sim \tilde{A} \cap \sim \tilde{B}$$

8. Involução:

$$\sim (\sim (\tilde{A})) = \tilde{A}$$

Os dois únicos axiomas da teoria clássica dos conjuntos, que não são satisfeitos nos conjuntos *fuzzy*, são a Lei da Contradição e a Lei dos Meios Excluídos, $\tilde{A} \cap \sim \tilde{A} \neq \emptyset$ e $\tilde{A} \cup \sim \tilde{A} \neq X$, respectivamente, o que pode ser observado via os operadores min e max.

2.3.4 Números Fuzzy

Segundo Kaufman e Gupta (1991 apud Vieira, 2005) um número *fuzzy* é um dado subjetivo e não equivale a uma variável aleatória, trata-se de uma estimativa e não de uma medida. Assim, um número *fuzzy* é tido formalmente, como um conjunto *fuzzy* convexo e normal definido no conjunto dos números reais \mathbb{R} , tal que sua função de pertinência tem a forma:

$$\mu_{\tilde{A}} : R \rightarrow [0,1] \quad (2.36)$$

Quando a função de pertinência $\mu_{\tilde{A}}(x)$ assume forma triangular o número *fuzzy* correspondente é chamado Número Fuzzy Triangular (TFN), ao qual se pode associar situações que se caracterizam através de três valores: um valor mínimo, um valor máximo e um valor mais provável (VIEIRA, 2005).

A Figura 2.7 representa esquematicamente um número *fuzzy* triangular $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$ onde ao valor a_2 se atribui pertinência 1, ou seja, existe grande possibilidade de ocorrer a_2 e aos valores menores que a_1 e maiores que a_3 são atribuídos pertinência zero, ou seja, não existe possibilidade de ocorrer estes valores. Aos valores intermediários entre $[a_1, a_2]$ e $[a_2, a_3]$ são atribuídos pertinências entre 0 e 1.

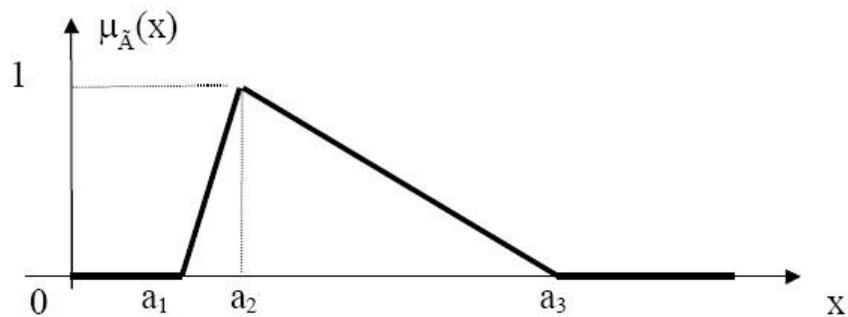


Figura 2.7 - Número fuzzy triangular.

Ainda de acordo com Kaufmann e Gupta (1988), as operações algébricas de adição, subtração e multiplicação por um escalar, que envolvem os números *fuzzy* triangulares geram como resultado também um número *fuzzy* triangular. Essas operações são ditas como lineares. Já outras operações, tais como multiplicação e divisão entre números *fuzzy* triangulares, não necessariamente geram um número *fuzzy* triangular. Seu cálculo é obtido através de operações de intervalos de confiança de números *fuzzy* triangulares e requerem uma atenção especial para que a divergência gerada nestas operações não atrapalhe o resultado final esperado.

Desta forma, dados $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$ e $\tilde{B} = (b_1, b_2, b_3)$, dois números *fuzzy* triangulares, as seguintes operações aritméticas são definidas:

- Adição

$$\tilde{A} + \tilde{B} = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3) \quad (2.37)$$

A representação gráfica desta operação é mostrada na Figura 2.8.

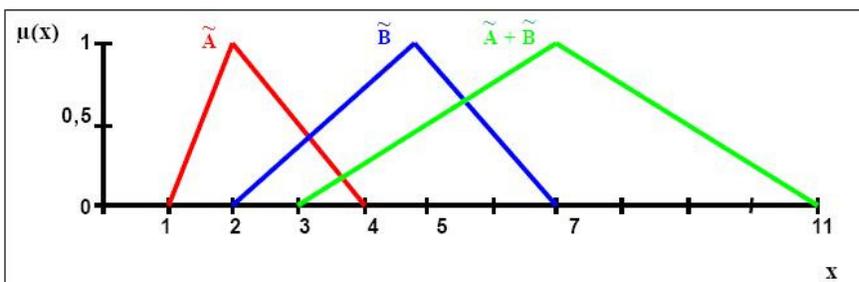


Figura 2.8 - Adição de dois números fuzzy triangulares \tilde{A} e \tilde{B} .

- Subtração

$$\tilde{A} - \tilde{B} = (a_1 - b_3, a_2 - b_2, a_3 - b_1) \quad (2.38)$$

A Figura 2.9 mostra a representação gráfica desta operação.

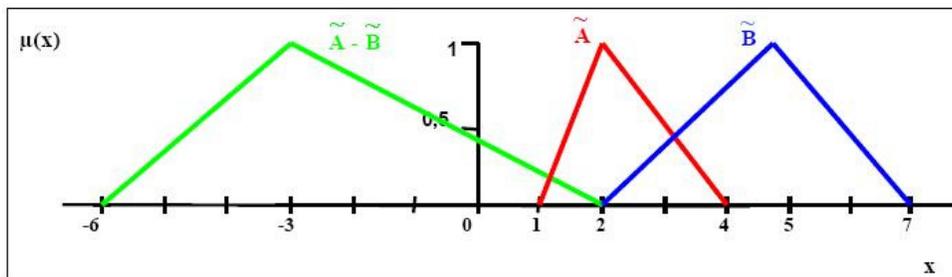


Figura 2.9 - Subtração de dois números fuzzy triangulares \tilde{A} e \tilde{B} .

Embora a multiplicação e a divisão de números *fuzzy* triangulares, não apresente como resultado um número *fuzzy* triangular, pode-se fazer a seguinte aproximação:

- Multiplicação

$$\tilde{A} * \tilde{B} = [\min(a_1 * b_1, a_1 * b_3, a_3 * b_1, a_3 * b_3), a_2 * b_2, \max(a_1 * b_1, a_1 * b_3, a_3 * b_1, a_3 * b_3)] \quad (2.39)$$

- Divisão

$$\tilde{A} / \tilde{B} = [\min(\frac{a_1}{b_1}, \frac{a_1}{b_3}, \frac{a_3}{b_1}, \frac{a_3}{b_3}), \frac{a_2}{b_2}, \max(\frac{a_1}{b_1}, \frac{a_1}{b_3}, \frac{a_3}{b_1}, \frac{a_3}{b_3})] \quad (2.40)$$

2.3.5 Riscos e incertezas

Um dos fatores que podem complicar uma tomada de decisão racional é a incerteza. A maior parte das decisões, sobretudo as mais importantes, é tomada com base em algum tipo de previsão, o que, por si só, já coloca o fator incerteza no processo de decisão. Mesmo que o problema não exija alguma previsão, outro fator complicador, é a insuficiência de informações (ANDRADE, 2000).

Dessa forma, torna-se importante fazer uma avaliação do grau de incerteza existente em uma tomada de decisão, ou seja, procurar uma estimativa do risco envolvido. De acordo com Yen (1988), o planejamento, o projeto e a operação de sistemas de recursos hídricos e ambientais estão sujeitos inevitavelmente às incertezas, relacionadas aos seguintes aspectos: geofísicos; variabilidade da demanda; operacionais; medições; inabilidade do modelo de simulação ou do método de projeto entre outros.

Embora, na maioria das vezes, as palavras “risco” e “incerteza” assumam significados distintos, em muitos casos, aparecem como sinônimos. Desta forma, é oportuno salientar as controvérsias existentes entre risco e incerteza, bem como o

modo de diferenciá-los. Segundo Raftery (1994), o risco tem atributos quantificáveis, enquanto a incerteza não os tem. Ao risco sempre estaria associado uma determinada função de probabilidades enquanto a incerteza não permitiria essa associação.

Ganoulis *et al.*, (1991) definem os passos para se aplicar a teoria de risco nos problemas de poluição hídrica. Quando se fala em avaliação de risco, no campo da engenharia ambiental, há necessidade de se definir um conjunto de etapas que compõem todo o processo de quantificação dos mesmos. Primeiramente, há a necessidade de se identificar o risco e seu grau de periculosidade.

Em seguida, devem-se avaliar as variáveis básicas referentes ao agente agressor e a capacidade receptora do sistema. Nesta etapa, a análise deve centrar seus objetivos nesses dois elementos fundamentais, uma vez que é a partir dessas duas variáveis que se processará a quantificação do risco.

Bogardi e Duckstein (2002) aplicaram os conceitos da teoria fuzzy, para gerenciar o risco de enchentes, em sistemas com alto grau de incertezas. Neste caso, foram identificados quatro elementos fundamentais para modelar o problema:

- Exposição do sistema, L;
- Resistência do sistema, C;
- Falha no sistema, $L > C$;
- Conseqüência da falha.

Ao final do estudo, identificou-se a ação preferencial para evitar consequências indesejáveis tanto do ponto de vista econômico, como ecológico.

Em recursos hídricos e em engenharia ambiental, o principal problema de avaliação do risco e da confiabilidade é que os parâmetros físicos e os dados de entrada do sistema, em razão da natural variabilidade no espaço e no tempo, mostram desvios aleatórios (ANDRADE, 2006).

A esta aleatoriedade natural, devem ser acrescentadas várias outras incertezas, devido à escassez de informação, relacionada com os dados de entrada, como, por exemplo, os valores dos parâmetros, e também à imperfeição do modelo.

Conclui-se, portanto, que os dados de saída não são determinísticos, pois eles também mostram variações aleatórias. Para procedimentos tratando com aleatoriedade e incertezas, a análise de risco fornece uma estrutura teórica geral,

com base na análise de incerteza, na avaliação de risco e na decisão sob condições de risco.

2.3.6 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:

$$\tilde{M} = \tilde{R} - \tilde{L} \quad (2.41)$$

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

$$\tilde{M}(h) = \tilde{R}(h) - \tilde{L}(h) \quad (2.42)$$

Onde:

$$\tilde{R}(h) = [\tilde{R}_1(h), \tilde{R}_2(h)] \quad (2.43)$$

$$\tilde{L}(h) = [\tilde{L}_1(h), \tilde{L}_2(h)] \quad (2.44)$$

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*:

$$R_c = \frac{\int_{z>0} \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_z \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad (2.45)$$

➤ índice de falha, ou risco *fuzzy*:

$$R_f = \frac{\int_{z<0} \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_z \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad (2.46)$$

Onde:

$\mu_{\tilde{M}}$: representa a função de pertinência

m: representa um número real associado à função de pertinência marginal de segurança.

3. METODOLOGIA

Este estudo pretende fazer uso de uma metodologia, com base na teoria *fuzzy*, combinado com a teoria de transporte de massa e a Legislação Brasileira, para estudar o risco *fuzzy* de contaminação de rios naturais, na concessão de outorga para lançamentos de efluentes. Para alcançar esse objetivo, há a necessidade de se desenvolver um modelo matemático que combine a teoria de transporte de poluentes com a teoria *fuzzy*, de modo que se estabeleça um cenário para se determinar o risco de concessão de outorga.

Neste trabalho isto será alcançado mediante a *fuzzificação* da equação diferencial de transporte difusivo advectivo. Deste modo, o que se buscará neste trabalho é desenvolver um estudo que permita conhecer melhor as equações diferenciais *fuzzy*, notadamente a equação da difusão advectiva *fuzzificada*.

3.1. 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:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(AE \frac{\partial C}{\partial x} \right) \pm KC + S_D \quad (3.1)$$

Onde 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:

$$C(0,t)=C(t) \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial x}(L,t) = 0 \quad (3.3)$$

As condições iniciais são:

$$C(x,0)=C(x) \quad (3.4)$$

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.

$$\frac{\partial \tilde{C}}{\partial t} + \tilde{u} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} = \frac{1}{\tilde{A}} \frac{\partial}{\partial x} \left(\tilde{E} \tilde{A} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} \right) \pm \tilde{K} \tilde{C} + \tilde{S}_D \quad (3.5)$$

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 3.5 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.

3.2 Risco e Confiabilidade Fuzzy

De acordo com Ganoulis (1994), se um evento, ou realização de um processo, 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:

$$\tilde{M} = \tilde{R} - \tilde{L} \quad (3.6)$$

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

$$\tilde{M}(h) = \tilde{R}(h) - \tilde{L}(h) \quad (3.7)$$

Onde:

$$\tilde{R}(h) = [\tilde{R}_1(h), \tilde{R}_2(h)] \quad (3.8)$$

$$\tilde{L}(h) = [\tilde{L}_1(h), \tilde{L}_2(h)] \quad (3.9)$$

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

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

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

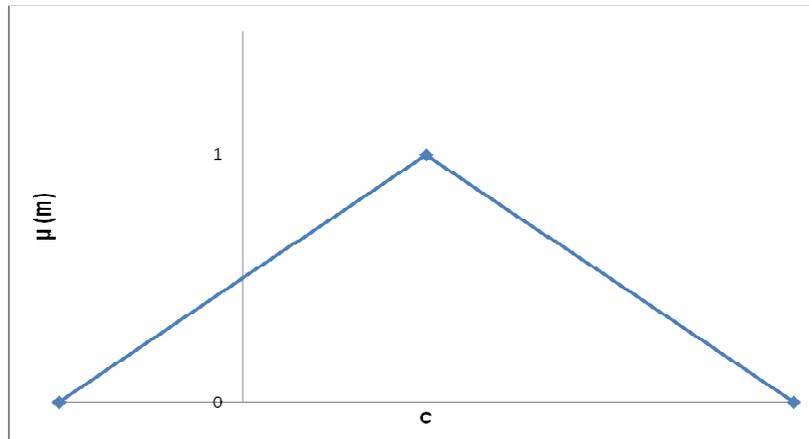


Figura 3.1 – Representação de uma função de pertinência para a função marginal de segurança.

Para 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 da seguinte forma:

➤ Índice de confiabilidade, ou garantia fuzzy:

$$R_c = \frac{\int_{z>0} \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_z \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad (3.10)$$

➤ Índice de falha, ou risco fuzzy:

$$R_f = \frac{\int_{z<0} \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_z \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad (3.11)$$

Onde:

$\mu_{\bar{M}}$: representa a função de pertinência;

m: representa um número real associado à função marginal de segurança.

3.3 Esquema Numérico para a Solução do Modelo de Transporte

Considerando que a equação da difusão advectiva, na sua forma *fuzzy* não tem solução analítica simples, optou-se por um método numérico para sua solução. Assim, tendo em vista a sua simplicidade, o esquema numérico baseado no Método das Diferenças Finitas foi utilizado para resolver a equação de transporte. Para este trabalho, utilizou-se o esquema semi-implícito de Crank-Nicolson, que garante estabilidade numérica no processo de solução (ANDERSON *et al.*, 1984).

O esquema para determinar a concentração tem como termos conhecido os valores da função nos pontos $(i-1, j)$, (i, j) e $(i+1, j)$ e, como termos desconhecidos os valores nos pontos $(i-1, j+1)$, $(i, j+1)$, $(i+1, j+1)$, como mostra a Figura 3.2.

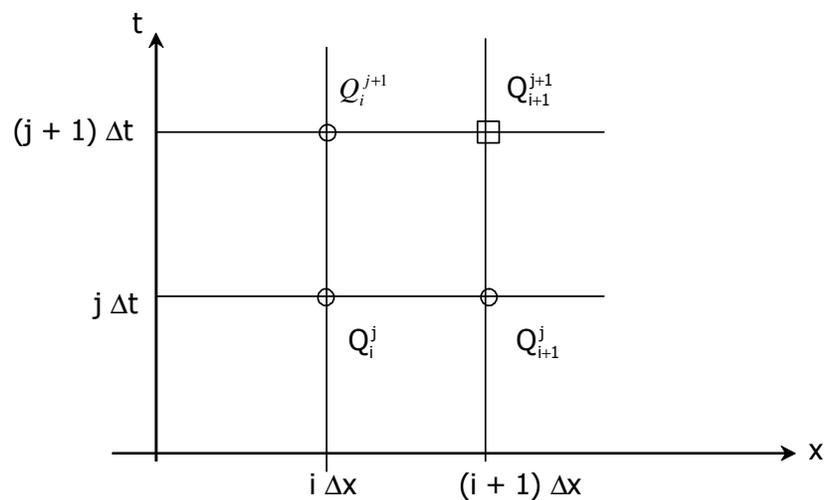


Figura 3.2 – Esquema implícito para solução da equação da difusão advectiva:
Fonte: (CHAGAS, 2005)

Desta forma, fazendo a discretização da Equação (3.5) seguindo um processo semi-implícito, a derivada parcial de C com relação à t é aproximada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{C_i^{j+1} - C_i^j}{\Delta t} \quad (3.12)$$

A derivada parcial de C com relação à x é aproximada por:

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{2} \left[\frac{C_{i+1}^{j+1} - C_{i-1}^{j+1}}{2\Delta x} + \frac{C_{i+1}^j - C_{i-1}^j}{2\Delta x} \right] \quad (3.13)$$

O termo $\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ é aproximado pela expressão

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{1}{2} \left[\frac{C_{i+1}^{j+1} - 2C_i^{j+1} + C_{i-1}^{j+1}}{\Delta x^2} + \frac{C_{i+1}^j - 2C_i^j + C_{i-1}^j}{\Delta x^2} \right] \quad (3.14)$$

O termo KC fica:

$$KC = KC_i^j$$

Após a substituição das derivadas parciais pelos termos aproximados na Equação (3.5), tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{C_i^{j+1} - C_i^j}{\Delta t} + \psi_i^{j+1} \frac{1}{2} \left[\frac{C_{i+1}^{j+1} - C_{i-1}^{j+1}}{2\Delta x} + \frac{C_{i+1}^j - C_{i-1}^j}{2\Delta x} \right] = \\ \frac{E_i^{j+1}}{2} \left[\frac{C_{i+1}^{j+1} - 2C_i^{j+1} + C_{i-1}^{j+1}}{\Delta x^2} + \frac{C_{i+1}^j - 2C_i^j + C_{i-1}^j}{\Delta x^2} \right] - KC_i^j + S_D \end{aligned} \quad (3.15)$$

Organizando a equação tem-se:

$$\begin{aligned}
& C_i^{j+1} - C_i^j + \psi_i^{j+1} \frac{\Delta t}{4\Delta x} [C_{i+1}^{j+1} - C_{i-1}^{j+1} + C_{i+1}^j - C_{i-1}^j] = \\
& E_i^{j+1} \frac{\Delta t}{2\Delta x^2} [C_{i+1}^{j+1} - 2C_i^{j+1} + C_{i-1}^{j+1} + C_{i+1}^j - 2C_i^j + C_{i-1}^j] - \Delta t S_D - \Delta t K C_i^j
\end{aligned} \tag{3.16}$$

Agora fazendo $\gamma = \psi_i^{j+1} \frac{\Delta t}{4\Delta x}$ e $\phi = E_i^{j+1} \frac{\Delta t}{2\Delta x^2}$, obtém-se (CHAGAS, 2005):

$$\begin{aligned}
& C_i^{j+1} + \gamma(C_{i+1}^{j+1} - C_{i-1}^{j+1}) - \phi(C_{i+1}^{j+1} - 2C_i^{j+1} + C_{i-1}^{j+1}) = \\
& C_i^j - \gamma(C_{i+1}^j - C_{i-1}^j) + \phi(C_{i+1}^j - 2C_i^j + C_{i-1}^j) - \Delta t K C_i^j + \Delta t S_D
\end{aligned} \tag{3.17}$$

Organizando os termos com o mesmo índice das concentrações, tem-se:

$$\begin{aligned}
& (-\gamma - \phi)C_{i-1}^{j+1} + (1 + 2\phi)C_i^{j+1} + (\gamma - \phi)C_{i+1}^{j+1} = \\
& (\gamma + \phi)C_{i-1}^j + (1 - 2\phi - \Delta t K)C_i^j + (-\gamma + \phi)C_{i+1}^j + \Delta t S_D
\end{aligned} \tag{3.18}$$

Finalmente, substituindo os coeficientes das concentrações por parâmetros *fuzzys*, a Equação (3.18) transforma-se na equação matricial *fuzzy* abaixo:

$$\tilde{A}(\alpha)\tilde{C}_{i-1}^{j+1}(\alpha) + \tilde{B}(\alpha)\tilde{C}_i^{j+1}(\alpha) + \tilde{D}(\alpha)\tilde{C}_{i+1}^{j+1}(\alpha) = \tilde{F}_i^j(\alpha) \tag{3.19}$$

Onde: A, B, D são os coeficientes “fuzzys” da matriz [M], \tilde{F}_i^j é o vetor com todas as informações conhecidas, e $\tilde{C}(\alpha)$ é o vetor solução do modelo para cada ponto do domínio e para cada tempo considerado.

De forma mais compacta tem-se:

$$[\tilde{\varphi}(\alpha)][\tilde{C}(\alpha)] = [\tilde{F}(\alpha)] \tag{3.20}$$

Onde: α é o nível de pertinência considerado.

A solução da equação matricial *fuzzy*, Equação (3.20), fornece os valores das concentrações em forma de funções de pertinência.

Os parâmetros fuzzificados nesta equação são: a velocidade, o coeficiente de dispersão longitudinal e o coeficiente de decaimento. Neste caso, a fuzzificação destes parâmetros obedece à formulação proposta por Chagas (2005), conforme as equações abaixo:

$$\mu_k = \frac{k - k_L}{k_m - k_L}, \text{ para } k_L \leq k \leq k_m \quad (3.21)$$

$$\mu_k = \frac{k - k_u}{k_m - k_u}, \text{ para } k_m \leq k \leq k_u \quad (3.22)$$

Onde: $k_L = 0,75k_m$ e $k_u = 1,25k_m$

Com a solução do modelo proposto, pode-se determinar o risco de falha e a confiabilidade através das equações (3.10) e (3.11), tomando para a resistência os valores de concentrações definidos pela resolução CONAMA 357/2005, conforme a tabela abaixo:

Tabela 3.1: Parâmetros DBO e OD permissíveis segundo a Resolução CONAMA 357/2005.

Parâmetro	Doces				Salinas				Salobras				
	Esp.	1	2	3	4	Esp.	1	2	3	Esp.	1	2	3
DBO (mg O ₂ /L)	-	< 3	< 5	< 10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OD (mg O ₂ /L)	-	> 6	> 5	> 4	> 2	-	> 6	> 5	> 4	-	> 5	> 4	> 3

3.4 Programa Computacional

Para esta pesquisa, foi desenvolvido um programa computacional com a finalidade de resolver as equações diferenciais que compõe o modelo matemático. Este programa, escrito em linguagem FORTRAN, permite calcular os campos de concentração, em forma de funções de pertinências, bem como permite calcular as funções marginais de segurança ao longo de todo o trecho do rio que está sendo considerado. Finalmente, o programa permite que sejam calculados os campos de risco e da garantia, para cada seção do canal, e para cada intervalo de tempo. Sua estrutura consiste de várias sub-rotinas, todas com funções bem definidas.

A primeira sub-rotina é responsável pela leitura dos dados de entrada. Ela permite que sejam lidos todos os dados de entrada do programa, que compõem as condições iniciais, condições de contorno, os dados geométricos do canal e também os parâmetros que definem a declividade e a rugosidade do canal.

Em seguida, desenvolveu-se uma sub-rotina para a “fuzzificação” dos parâmetros e transformação desses em funções de pertinências. Assim, o coeficiente de dispersão longitudinal, a velocidade e o coeficiente de decaimento foram fuzzificados para serem usados nas demais rotinas do programa.

Posteriormente, foi criada uma sub-rotina para determinar o campo de concentração em todos os pontos da superfície do rio, para diferentes tempos. Esta sub-rotina calcula, com a ajuda de uma sub-rotina que inverte uma matriz tri diagonal, as funções de pertinências da concentração, definida pelas leis que definem a equação diferencial (3.6), de modo que o risco e a garantia possam ser calculados a partir desses resultados.

Para completar a fase de cálculo, desenvolveu-se uma nova sub-rotina com o objetivo de avaliar o risco de contaminação para cada cenário simulado. Esta sub-rotina permite que sejam avaliadas as integrais definidas pelas Equações (3.10) e (3.11), onde o risco e a confiabilidade são definidos.

Finalmente, foi desenvolvida uma última sub-rotina que tem por finalidade produzir as impressões necessárias para as devidas análises dos resultados. Com a mesma é possível imprimir os campos de concentração, o campo de risco, o campo de confiabilidade e funções marginais de segurança, tanto no tempo como no espaço, ao longo do trecho do rio que está sendo controlado. A Figura (3.3) mostra um fluxograma com os principais elementos do programa.

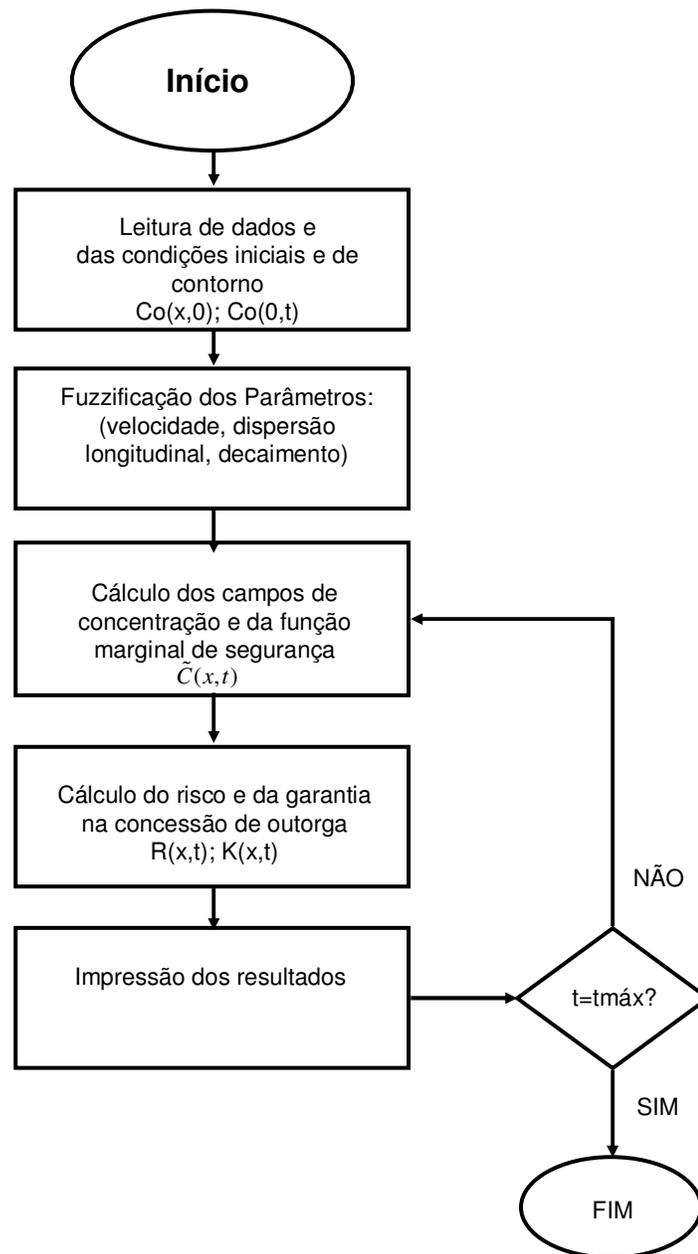


Figura 3.3 – Fluxograma completo do programa.

3.5 Aplicação do modelo a Rios Americanos

Para as simulações dos diversos cenários foi proposto um canal retangular de largura 20 m, com comprimento correspondente ao campo de observação de 50 km. Com relação à aplicação deste modelo, utilizaram-se os dados de dois rios dos Estados Unidos para se fazer uma avaliação do risco de contaminação considerando diferentes padrões hidrológicos e de transporte.

Rio Sabine

O rio Sabine tem aproximadamente 900 km de comprimento e corta os Estados do Texas a Louisiana, desaguando no Golfo do México. Este rio drena uma área de 24.900 km². Essa é uma área de chuva abundante. Como esta bacia é de grande atividade na área de petróleo por ser o Texas um importante produtor, este Rio é de grande importância para a região. Os principais dados do rio Sabine, obtidos de Chapra, 1997, são:

Profundidade: 3,4 metros

Vazão: 254,6 m³/s

Dispersão: 493 m²/s

Largura: 116 m

Declividade: 0,00013

Velocidade: 0,61 m/s

Rugosidade: 0,0420

Rio Windy/Big Horn

Rio Windy é o nome dado a um braço superior do rio Big Horn, situado no Wyoming. Seu comprimento é de 300 km. Já o rio Big Horn, considerado o principal tributário da parte superior do rio Missouri, tem aproximadamente 1080 km de comprimento e situa-se no oeste dos Estados Unidos. Esses dois rios formam o rio Windy/Big Horn. Os principais dados desses rios, segundo Chapra (1997), são:

Profundidade: 1,63 metros

Vazão: 144,1 m³/s

Dispersão: 101 m²/s

Largura: 64 m

Velocidade: 1,22 m/s

Rugosidade: 0,0420

Declividade: 0,00013

4. RESULTADOS

Após o desenvolvimento do programa computacional, onde foram estruturadas várias sub-rotinas, dispostas sequencialmente com vistas a obtenção de alguns resultados, um conjunto de simulações foi realizada. 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 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.

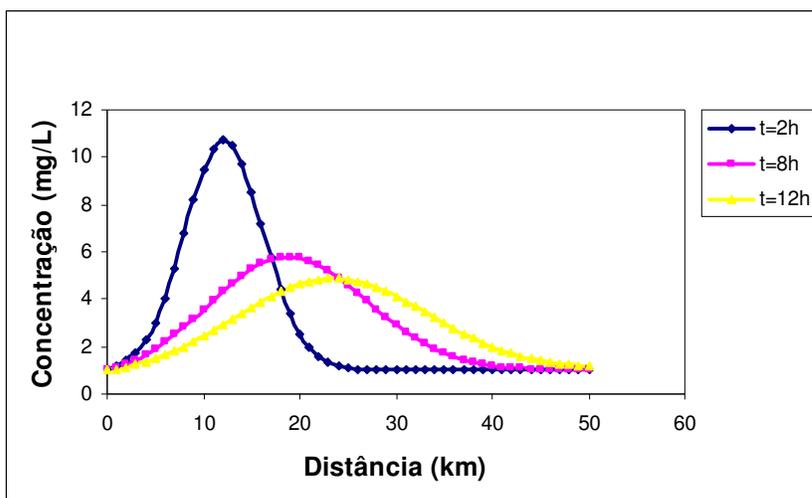


Figura 4.1 – Comportamento da concentração com a distância em tempos diferentes.

A Figura 4.1 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.

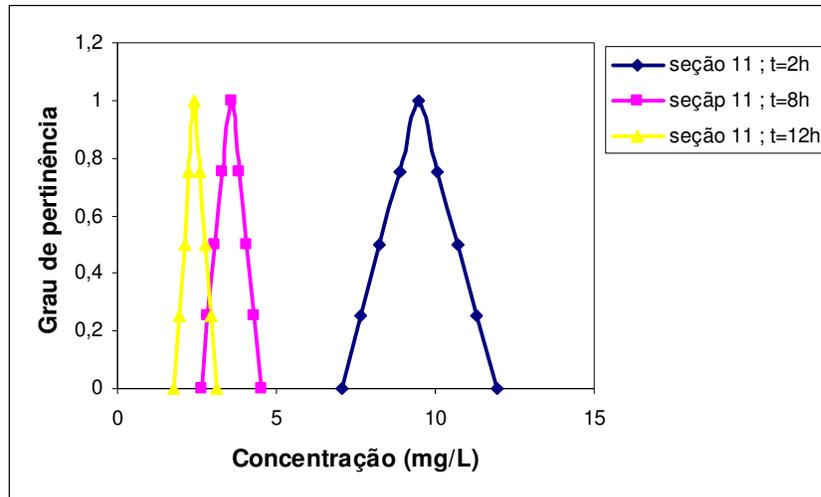


Figura 4.2 – Comportamento das funções de pertinência para as concentrações em tempos diferentes, seção 11.

A Figura 4.2 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.

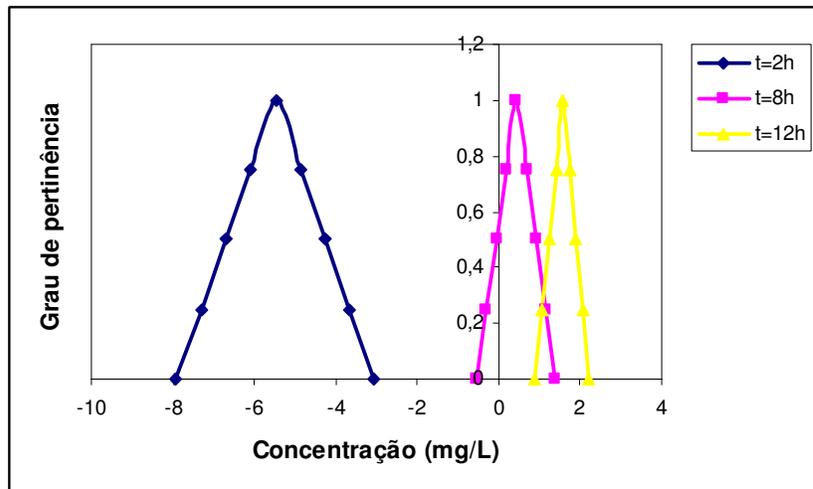


Figura 4.3 – Comportamento da função marginal de segurança para as concentrações em tempos diferentes, em uma seção 10 km da origem.

A Figura 4.3 mostra o comportamento da função marginal de segurança, calculada nos tempo 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 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, tanto com o tempo, como no espaço.

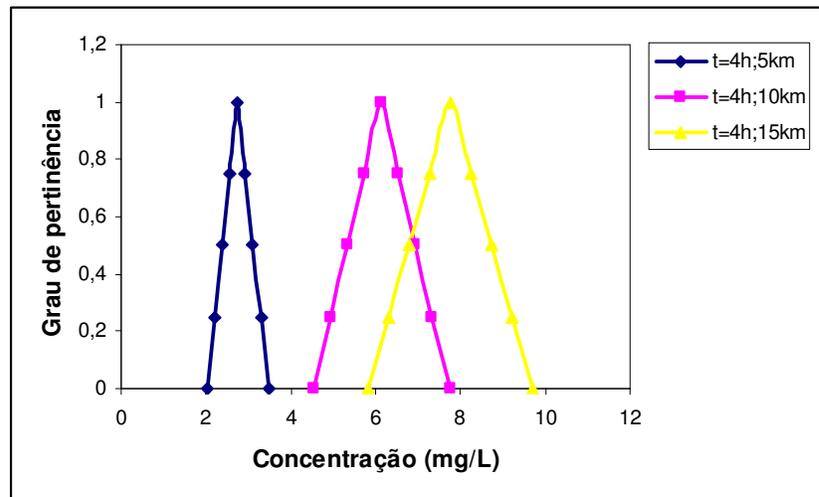


Figura 4.4 – Comportamento das funções de pertinência para as concentrações no tempo de 4 horas, em diferentes seções.

A Figura 4.4 mostra as funções de pertinências da concentração, em diferentes seções, para um tempo de 4 horas. O objetivo é ver como o campo de concentração pode ser controlado ao longo do rio. Os resultados mostram que para este tempo, os números *fuzzys* para a concentração se encontravam nos intervalos [2; 3,5], aproximadamente, na seção 5 km, [4,2; 8], na seção 10 km e [6; 10] na seção 15 km. Isto implica dizer que, a figura mostra que, neste tempo considerado, a nuvem poluente encontra-se passando pela seção de 15 km e deixando a seção de 5 km. Este resultado está de acordo com o perfil de concentração apresentado na Figura 4.1.

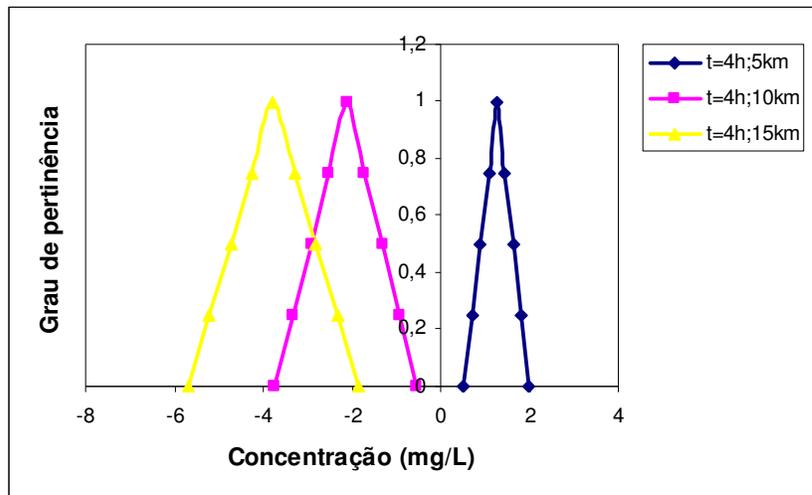


Figura 4.5 – Comportamento da função marginal de segurança para as concentrações no tempo de 4 horas, em diferentes seções.

A Figura 4.5 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. Os resultados apresentados para o risco e para a garantia mostram esta afirmação.

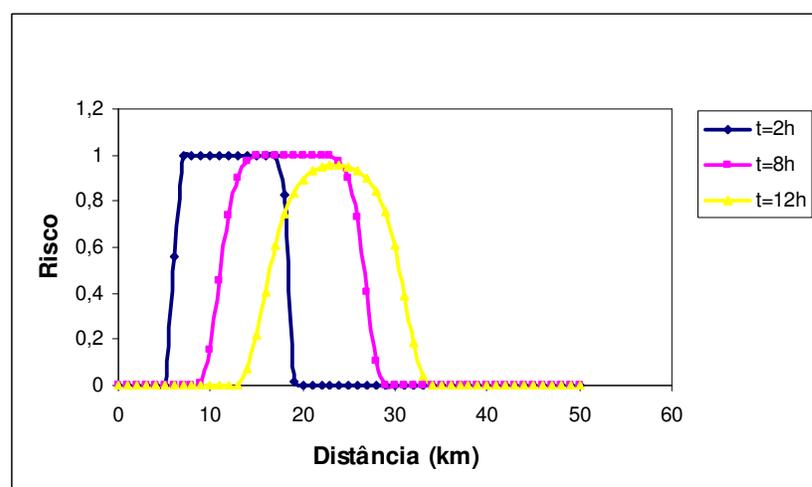


Figura 4.6 – Comportamento do risco com a distância em diferentes tempos.

As Figuras 4.6 e 4.7 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.

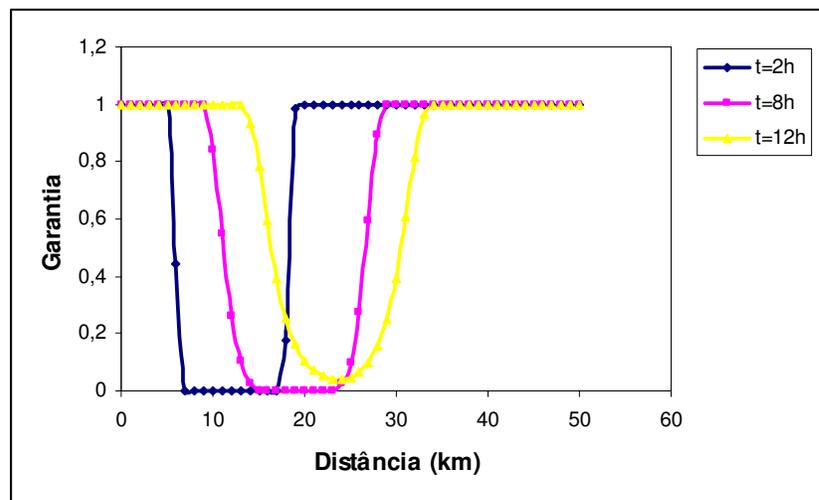


Figura 4.7 – Comportamento da garantia com a distância em diferentes tempos.

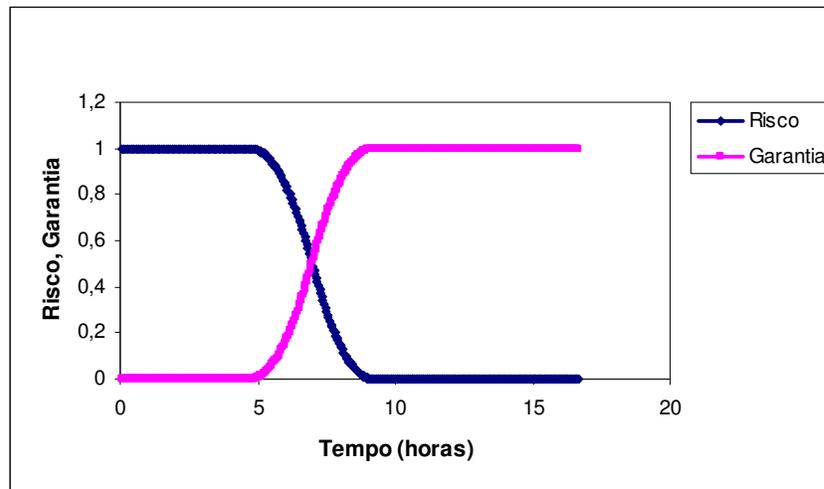


Figura 4.8 – Comportamento do risco e da garantia com o tempo.

A Figura 4.8 mostra os comportamentos do risco e da garantia em uma seção a 10 km da origem em função do tempo. Através da figura fica claro que o risco começa alto porque foi neste ponto que foi feito o lançamento. Assim, durante as 5 primeiras horas o risco é bem alto, mostrando que, para esta intensidade de lançamento, o risco de contaminação do rio é 100%. Depois, com o processo de diluição e o processo advectivo em curso, o risco vai caindo até chegar à zero, após 10 horas da ocorrência do lançamento. Como pode ser observado, por esta simulação, é possível dizer que o risco ambiental em rios naturais é algo muito dinâmico, variando de um valor bem alto, para valores baixos, o que permite dizer que há lançamentos que pode trazer significativos impactos à saúde ambiental dos corpos hídricos. Mas, os resultados mostram que estes impactos são transitórios, tendo em vista o poder de autodepuração dos sistemas hídricos.

Nas figuras seguintes, estão apresentados os resultados para um lançamento pontual e instantâneo de uma substância não conservativa. A substância escolhida é a DBO que representa um importante parâmetro de controle da qualidade de água. A intensidade deste lançamento é de 50mg/L. Neste caso, os dados são idênticos aos apresentados nas primeiras simulações, mas com uma taxa de decaimento, em forma de números *fuzzy* definido por [0,00000375; 0,00000578; 0,00000625], na unidade de T^{-1} . A resistência foi considerada para o caso de um rio de classe dois com a função de pertinência definida por [3; 4; 5] mg/L. As Figuras 4.9 até 4.12 mostram os resultados desta simulação.

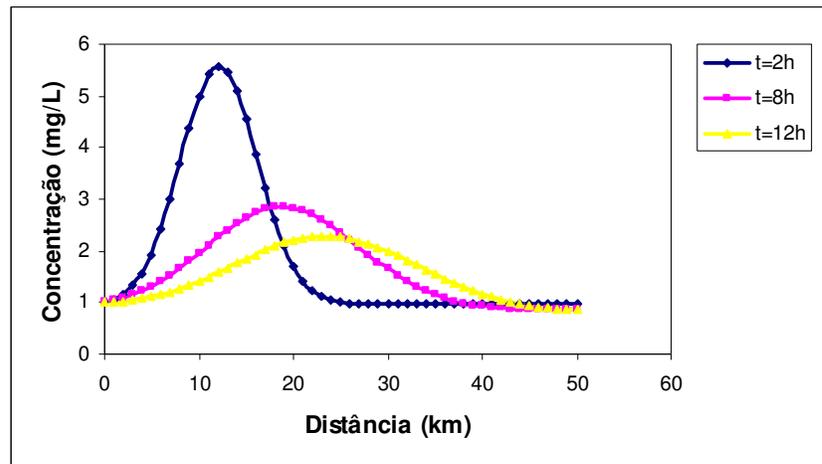


Figura 4.9 – Perfil de concentração com a distância para diferentes tempos $C=50\text{mg/L}$.

A Figura 4.9 mostra o comportamento dos perfis de concentração para os tempos de 2 horas, 8 horas e 12 horas. Como era de se esperar, os picos de concentração encontrados são bem menores do que aqueles encontrados anteriormente, mostrando que, para esta intensidade de lançamento, certamente o risco vai se dissipar com mais rapidez do que no caso anterior onde o lançamento era de 100mg/L .

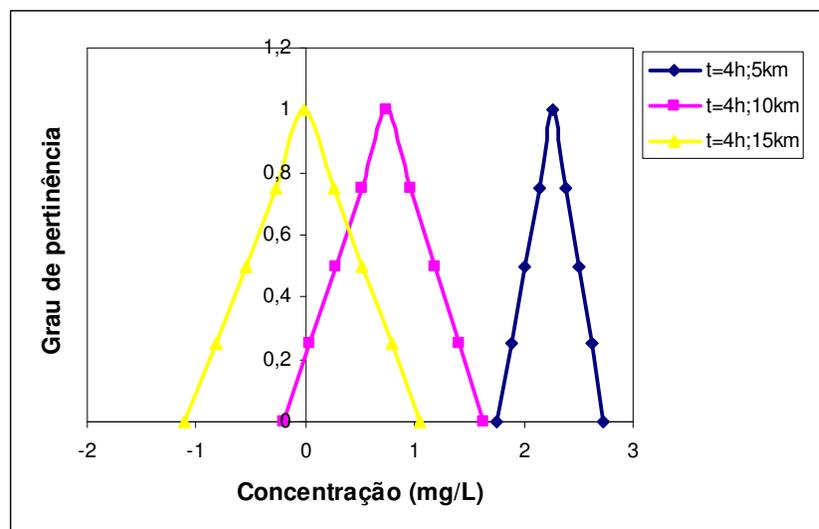


Figura 4.10 – Função marginal de segurança para diferentes seções no tempo de 4 horas. $C=50\text{mg/L}$.

A Figura 4.10 mostra a função marginal de segurança para este lançamento tomadas nos mesmos tempos, 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. Isto é verificado com a apresentação dos resultados para o risco, que se encontra na figura 4.11.

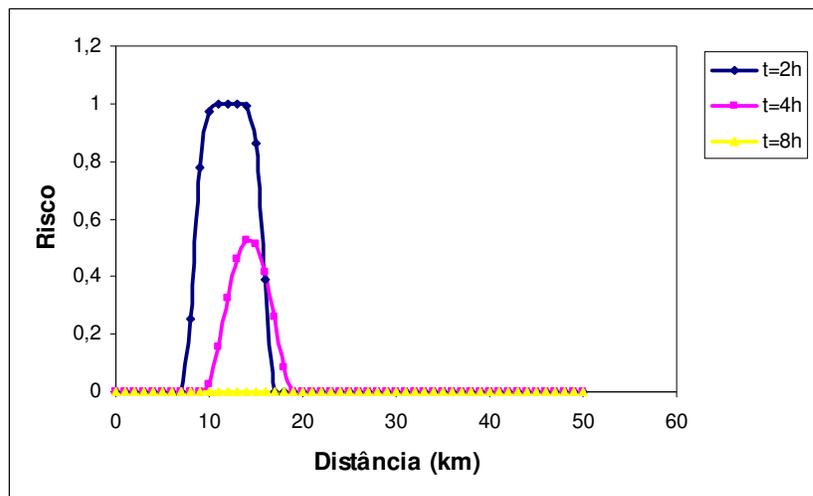


Figura 4.11 – Comportamento do risco com a distância para diferentes tempos. $C=50\text{mg/L}$.

A Figura 4.11 mostra os resultados do risco para esta simulação. Como foi dito anteriormente, a função risco é alto nas proximidades do ponto de lançamento, para o tempo de 2 horas, mas cai rapidamente, para o tempo de 8 horas e torna-se zero para o tempo de 12 horas. Este resultado mostra que para substâncias conservativas, os impactos causados por este tipo de lançamento têm um tempo de residência bem reduzido. Isto não quer dizer que seja possível tornar este tipo de lançamento mais ou menos tolerável por parte do poder público. Como se sabe, 4 ou 5 horas são suficientes para causar grandes impactos na vida biológica dos rios. Assim, o melhor que se faz é estabelecer critérios seguros para a concessão de outorga de lançamentos em rios naturais.

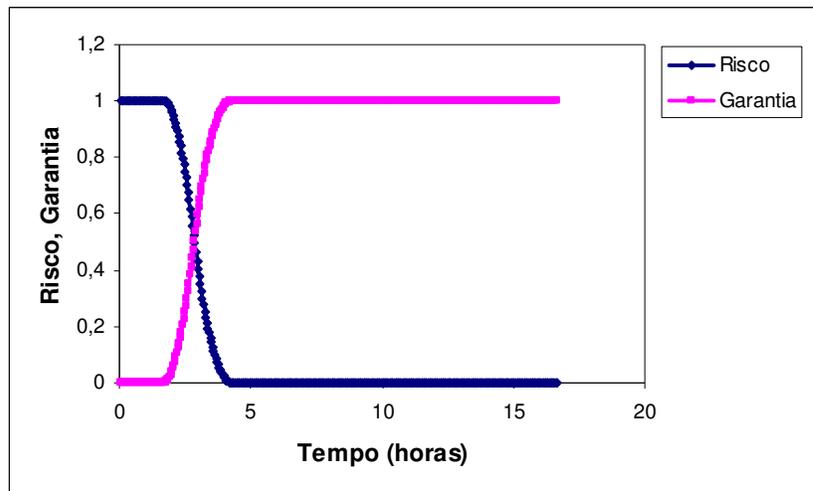


Figura 4.12 – Comportamento do risco e da garantia ao longo do tempo. $C=50\text{mg/L}$.

A Figura 4.12 mostra os comportamentos do risco e da garantia em função do tempo, em uma seção situada a 10 km da origem. Como foi dito antes, os resultados mostram que o risco cai rapidamente com o tempo. Neste caso, em 5 horas o risco caiu para zero e a garantia subiu para 100%. Este efeito é causado, primeiro pelo fato do lançamento ter uma concentração de 50mg/L e em segundo lugar, pela presença do decaimento da DBO que faz com que as concentrações caiam rapidamente, diferentemente das substâncias conservativas.

As figuras seguintes mostram os resultados de simulações para diferentes lançamentos. O objetivo é de verificar como se comporta o risco para diferentes lançamentos. As Figuras 4.13 até 4.16 mostram os resultados destas simulações.

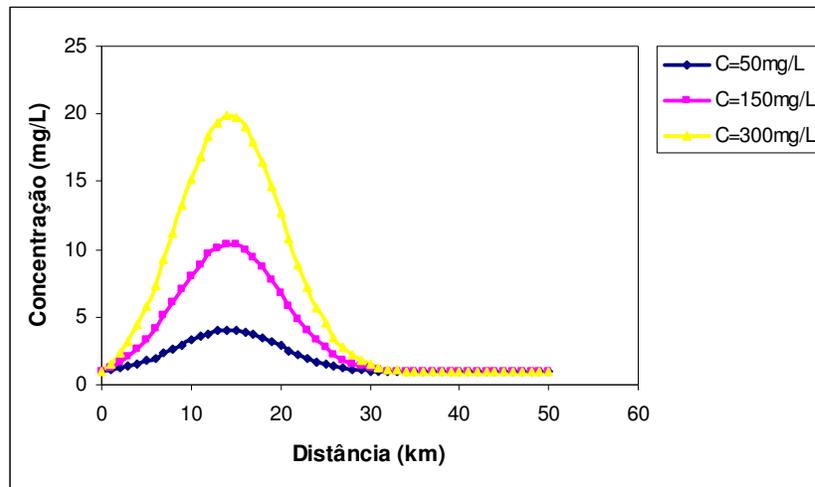


Figura 4.13 – Perfil de concentração em 4 horas para diferentes lançamentos.

A Figura 4.13 mostra os perfis de concentração, com maior grau de pertinência, para diferentes lançamentos, tomados em um tempo de 4 horas. Como pode ser observado, para um lançamento de 300mg/L de DBO, o pico de concentração é muito alto, o que faz com que o risco de falha do sistema seja máximo. Outro fato importante é que os picos ocorrem na mesma seção, fato este que mostra que diferentes lançamentos não induzem em diferente comportamento advectivo para as nuvens poluentes. Este resultado está de acordo com a equação geral da difusão advectiva que mostra que a translação da nuvem poluente independe de sua intensidade.

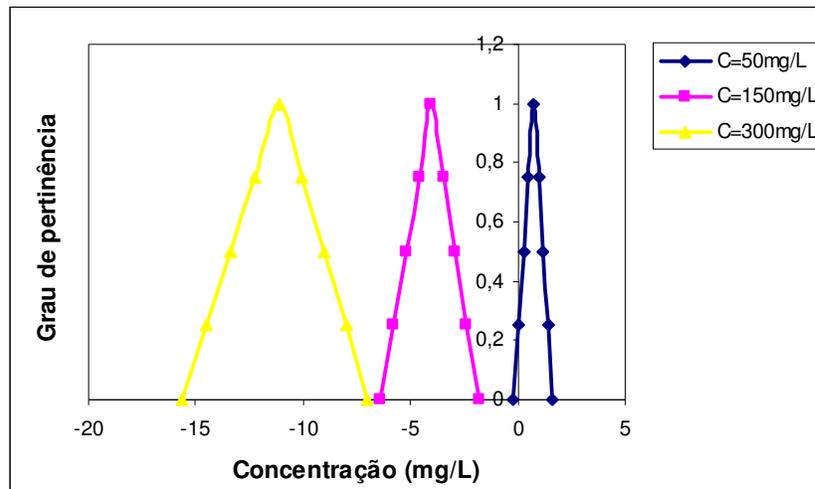


Figura 4.14 – Comportamento da função marginal para diferentes lançamentos a 10 km em 4 horas

A Figura 4.14 mostra a disposição das funções marginais de segurança, para o mesmo tempo e para diferentes lançamentos. Os resultados mostram, como esperado que, quanto maior a intensidade das concentrações de lançamentos, mais para a esquerda ficará a função marginal de segurança. Desta forma, maior será o risco calculado e menor será a garantia, mostrando assim, que a função marginal de segurança desempenha um importante papel nesta metodologia proposta para o cálculo do risco de falha em um processo de concessão de outorga.

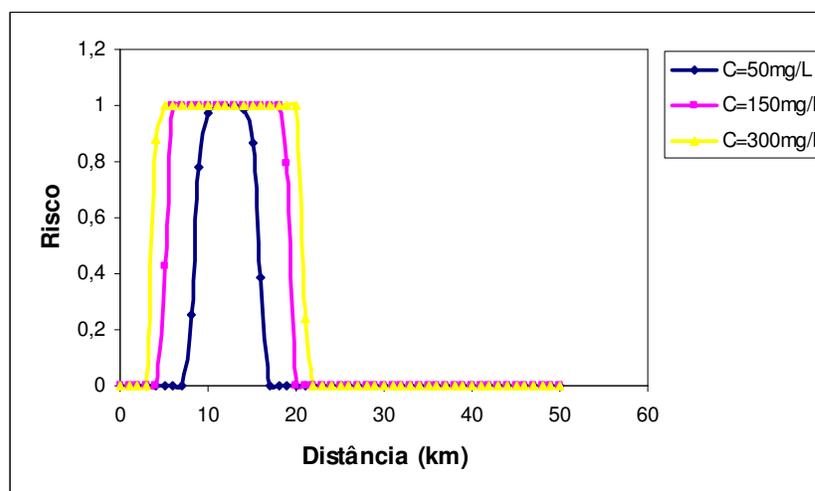


Figura 4.15 – Comportamento do risco com a distância para diferentes lançamentos em 2 horas.

A Figura 4.15 mostra o comportamento do risco para estes diferentes lançamentos. Como pode ser observado, para o maior lançamento o risco se comporta, em um significativo trecho do rio, com máximo valor. Já para o menor lançamento, esta função tende a cair rapidamente, ficando próxima de um, somente, nas vizinhanças do ponto de lançamento.

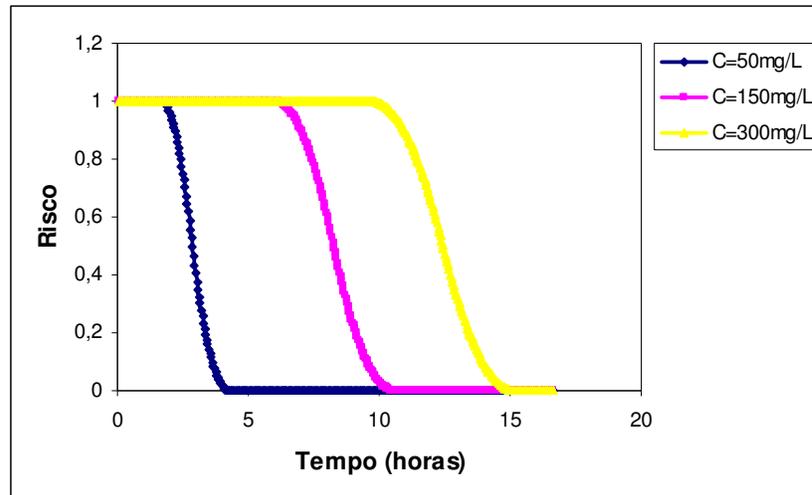


Figura 4.16 – Comportamento do risco com o tempo para diferentes lançamentos.

A Figura 4.16 mostra o comportamento destes riscos para a simulação acima analisada. Como pode ser observado, há uma clara dependência desta função com a intensidade do lançamento. Por exemplo, para um lançamento de 300 mg/L de DBO, a seção a 10 km da origem terá um risco máximo com duração de 12 horas, aproximadamente. Somente a partir deste tempo é que o risco começa a cair tornando o rio, novamente, saudável após 14 horas. Este resultado permite concluir que para a concessão de outorga há a necessidade de se fazer um estudo criterioso de concentração de lançamento juntamente com a capacidade de autodepuração do rio, relacionado com sua vazão e seu coeficiente dispersão longitudinal. Sem este tipo de análise, pode-se cometer alguns erros de avaliação neste processo de concessão.

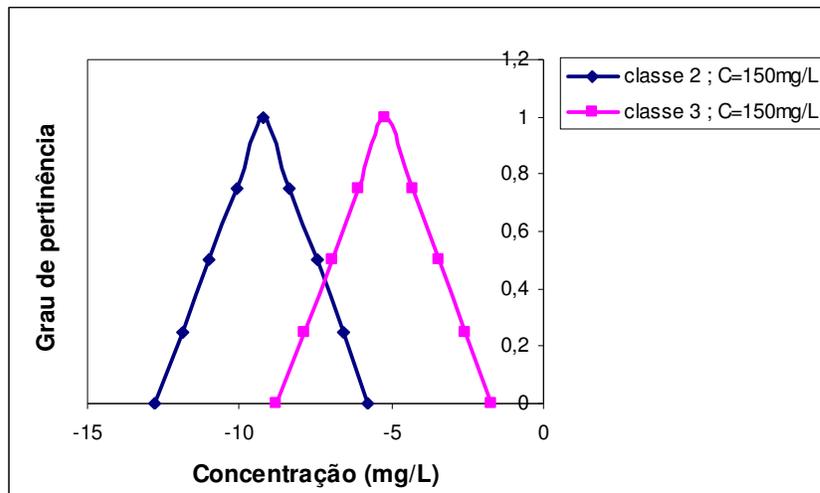


Figura 4.17– Função marginal de segurança para $C=150\text{mg/L}$, em $t=2$ horas, 10 km para diferentes classes.

A Figura 4.17 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 definidas 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.

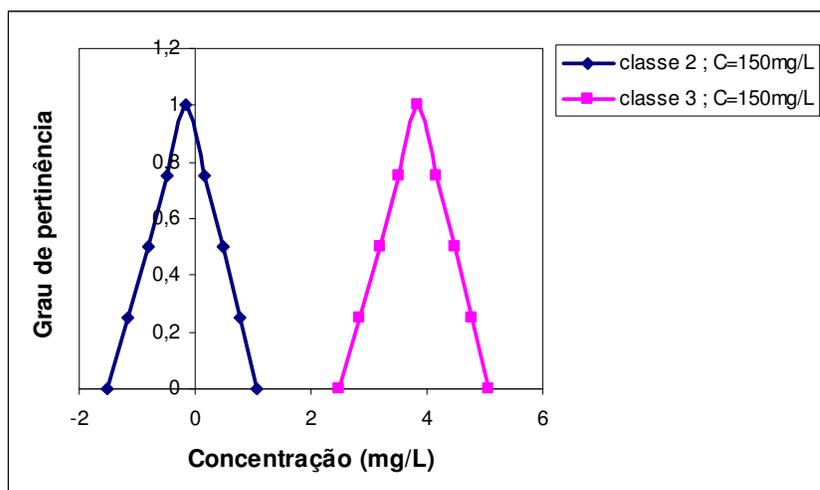


Figura 4.18 – Função marginal de segurança para $C=150\text{mg/L}$, em 8 horas, 10 km para diferentes classes.

A Figura 4.18 mostra a função marginal de segurança para um tempo de 8 horas. Como pode ser visto, houve um deslocamento dessas funções para a direita do eixo, mostrando, assim, uma tendência a redução do risco de falha para este lançamento. Este resultado serve para mostrar a importância da função marginal de segurança no cálculo do risco e da garantia.

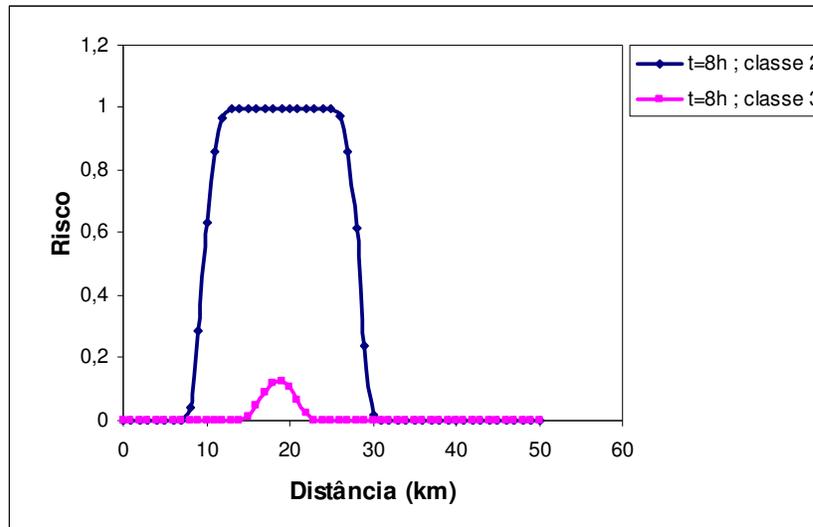


Figura 4.19 – Comportamento do risco com a distância para $C=150$ mg/L, no tempo de 8 horas para diferentes classes.

Como foi previsto anteriormente, a Figura 4.19 mostra as funções risco de falha, em 8 horas, para as classes dois e três. Neste caso, fica claro que para um rio de classe três, para um lançamento de 150 mg/L, o risco de falha, para este rio considerado, é muito baixo, tendo seu pico máximo abaixo de 20%. Isto mostra a importância deste estudo nos instrumentos de gestão dos recursos hídricos, notadamente, na concessão de outorga de lançamentos. Fica claro a necessidade de estudo e definições de parâmetros que garantam uma melhor sustentabilidade nos corpos hídricos.

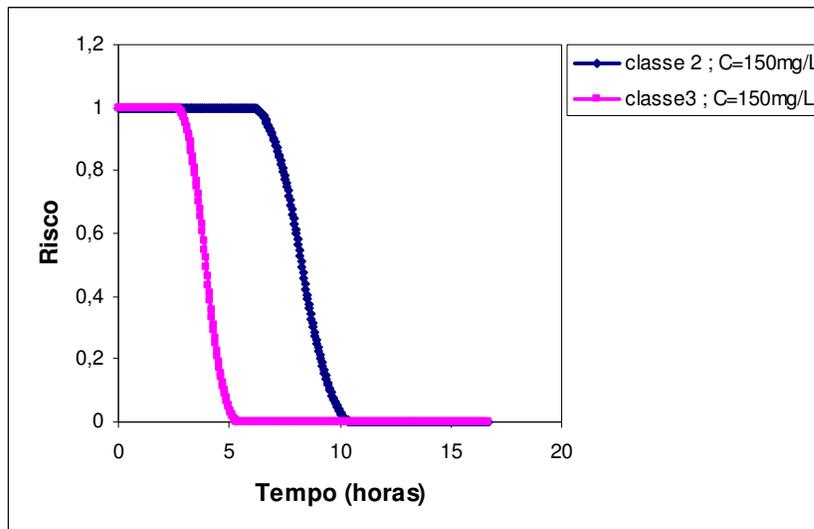


Figura 4.20 – Comportamento do risco com o tempo para $C=150$ mg/L para diferentes classes.

A Figura 4.20 mostra os gráficos do risco para diferentes classes de uso, com o tempo. Este resultado confirma o que foi dito anteriormente. Rios com maior restrição de uso se tornam mais vulneráveis para lançamentos de efluentes.

As Figuras 4.21 até 4.24 mostram os resultados de uma simulação onde foram alteradas as vazões. O objetivo é de verificar o comportamento do risco para diferentes vazões do rio, sujeito ao mesmo lançamento. Neste caso, foi lançado na origem, de forma constante, uma concentração de efluente de 100 mg/L de DBO. As vazões consideradas foram de 5, 10, 20, 30 e 40 m^3/s .

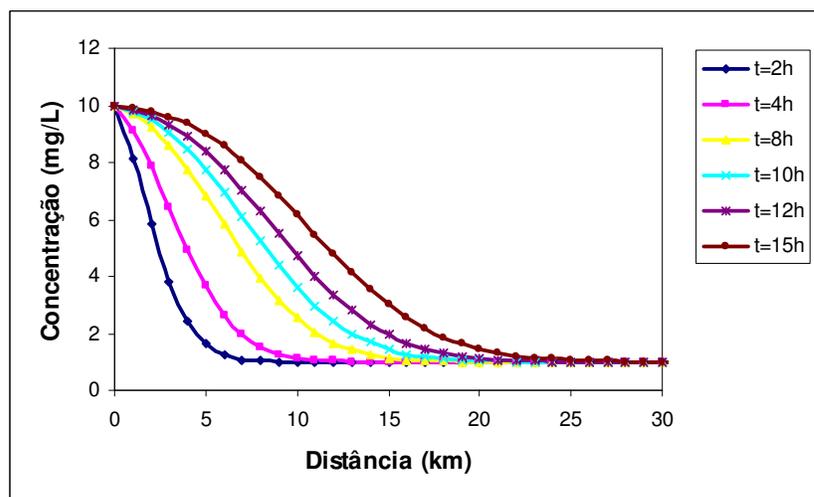


Figura 4.21 – Perfil de concentração, vazão 5 m^3/s , para diferentes tempos.

As Figuras 4.21 á 4.23 mostram os resultados das simulações para vazões de 5, 10 e 20 m³/s respectivamente. Como se observa, as figuras mostram os perfis de concentração para maior grau de pertinência para diferentes tempos. Os resultados mostram que quanto maior o tempo, maior é o processo de contaminação do corpo hídrico, fazendo com que as concentrações aumentem de forma gradual até atingir um ponto de equilíbrio que corresponde ao nível de diluição inicial do sistema receptor. Por exemplo, para uma vazão de 5 m³/s a vazão de diluição é de, aproximadamente, 10 mg/L. Assim, o rio deverá ter esta concentração se propagando rio abaixo até atingir, em média, este valor.

Já para uma vazão de 20 m³/s, a concentração de diluição é de, aproximadamente, 3,5 mg/L. Este resultado é bem significativo pois mostra que quanto maior é a vazão maior é a capacidade de diluição do corpo hídrico. É evidente que este resultado não apresenta nenhuma novidade do ponto de vista de inovação. Entretanto, este resultado serve para mostrar a capacidade desta metodologia na determinação do risco de falha para sistemas receptores de efluentes sob a ótica da concessão de outorga.

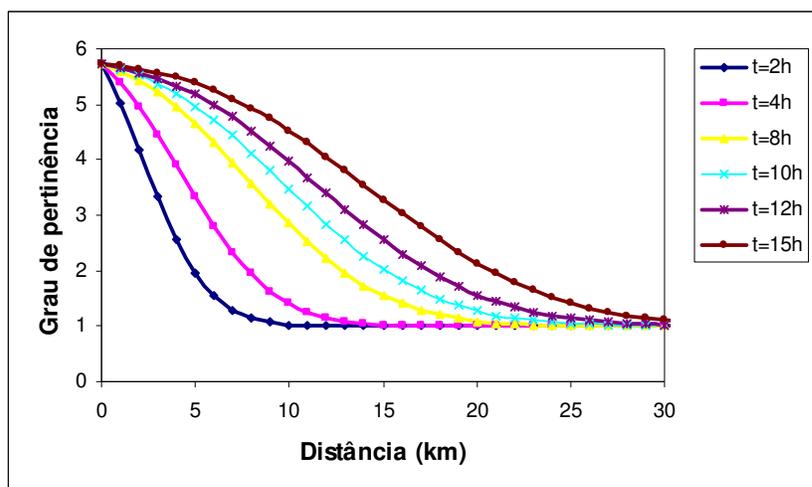


Figura 4.22 – Perfil de concentração, vazão 10 m³/s, para diferentes tempos.

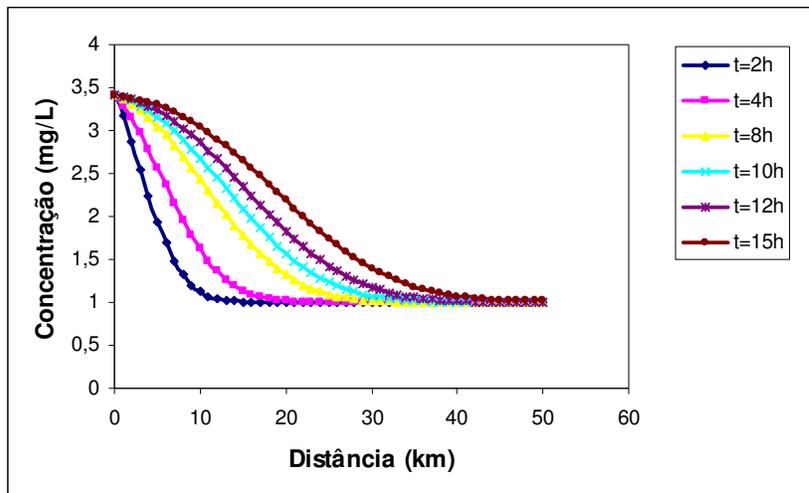


Figura 4.23 – Perfil de concentração, vazão $20 \text{ m}^3/\text{s}$, para diferentes tempos.

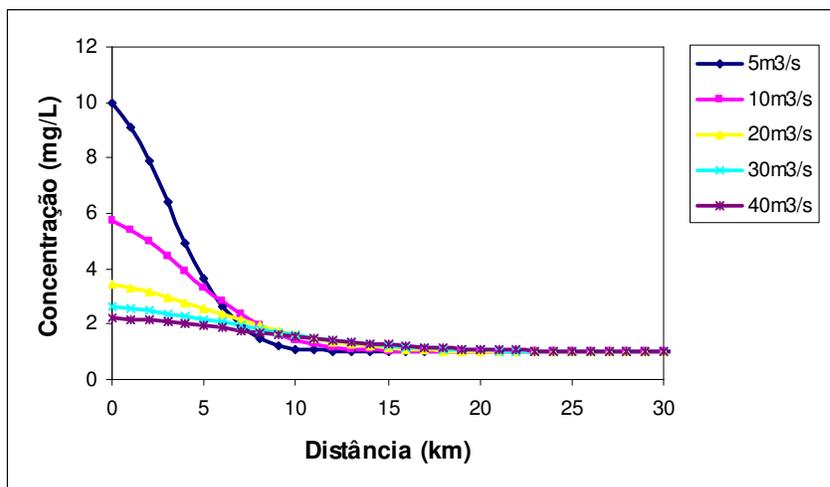


Figura 4.24 – Comportamento do perfil de concentração para diferentes vazões.

A Figura 4.24 mostra uma comparação para diferentes vazões. Neste caso, fica claro que as concentrações diluídas são maiores para menores vazões, mostrando assim, que os aspectos hidrológicos das bacias hidrográficas devem ser levados em consideração quando da análise de concessão de outorga para lançamentos de efluentes. Por exemplo, quando a vazão do rio é de $40 \text{ m}^3/\text{s}$, a vazão de diluição, com o maior grau de pertinência é de cerca de 2 mg/L , o que é um valor muito baixo para a capacidade receptora do canal.

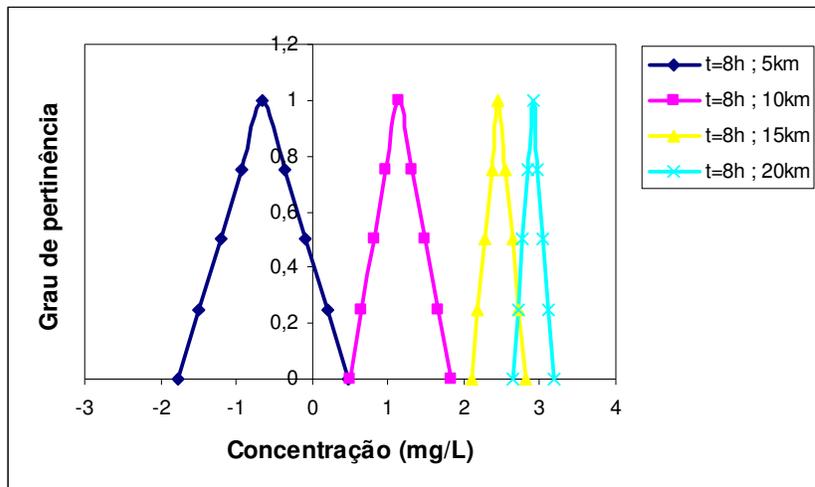


Figura 4.25 – Comportamento da função marginal de segurança, para o tempo de 8 horas em diferentes seções e vazão $10\text{m}^3/\text{s}$.

A Figura 4.25 mostra o comportamento da função marginal de segurança para diferentes seções, no tempo de 8 horas, para uma vazão de $10\text{m}^3/\text{s}$. De acordo com a figura, na seção 5 km, a função está mais para a esquerda do que nas demais seções. Isto quer dizer que a nuvem poluente está presente nas proximidades da seção de 5 km. Isto é de se esperar, considerando que, neste caso, o efluente foi lançado na origem. Desta forma, quanto mais próximo da origem está a seção considerada, mais para a esquerda estará a função marginal de segurança. Isto quer dizer que o risco será maior nesta seção do que nas outras.

Da mesma maneira, a Figura 4.26 mostra o comportamento da função marginal de segurança para diferentes vazões e para o tempo de 8 horas e a uma seção 5 km distante da origem. Os resultados, neste caso, mostram que quanto maior for a vazão, mais para a direita estará a função marginal de segurança e menor será o risco de falha. Neste caso, pode-se ver que, para uma vazão de $30\text{m}^3/\text{s}$, a função marginal de segurança situada na faixa positiva do eixo das concentrações e no ponto mais a direita. Já para uma vazão de $5\text{m}^3/\text{s}$, a função marginal está situada bem à esquerda, mostrando, assim, que o risco será bem maior do que no caso anterior.

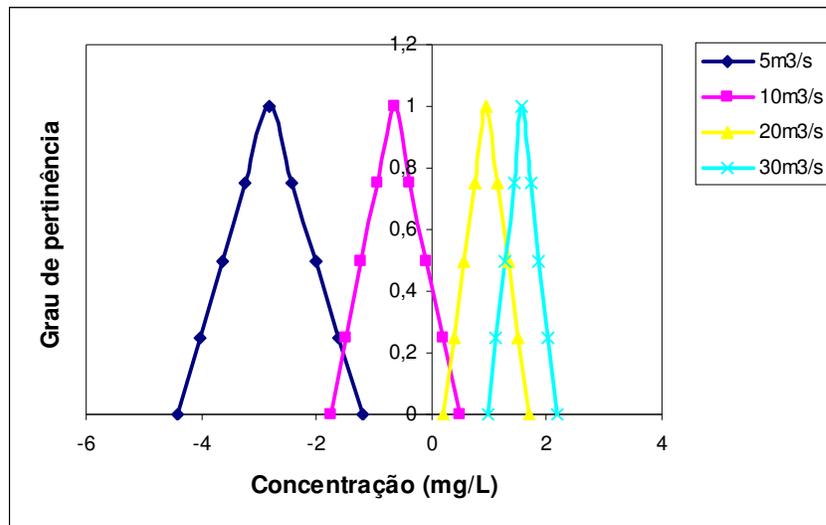


Figura 4.26 – Comportamento da função marginal de segurança, em 8h e 5 km, para diferentes vazões.

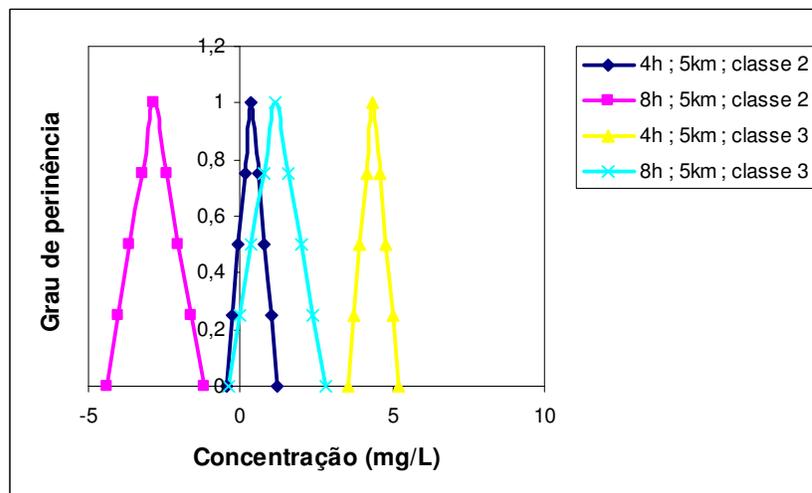


Figura 4.27 – Comportamento da função marginal de segurança a 5 km para diferentes horas e diferentes classes.

A Figura 4.27 mostra as funções marginais de segurança para diferentes tempos e para diferentes classes de uso dos rios. Os tempos foram considerados de 4 e 8 horas. Foram analisadas as classes 2 e 3. Este resultado mostra a dinâmica dessas funções de pertinências, no tempo e no espaço. Como pode ser observado, para um tempo de 8 horas, rio de classe dois fica mais crítico para o lançamento de efluentes com 150 mg/L de concentração. Neste caso, a referida função se desloca inteiramente para a esquerda, permitindo concluir que,

neste caso, o risco será bem maior do que nos demais casos representados na figura.

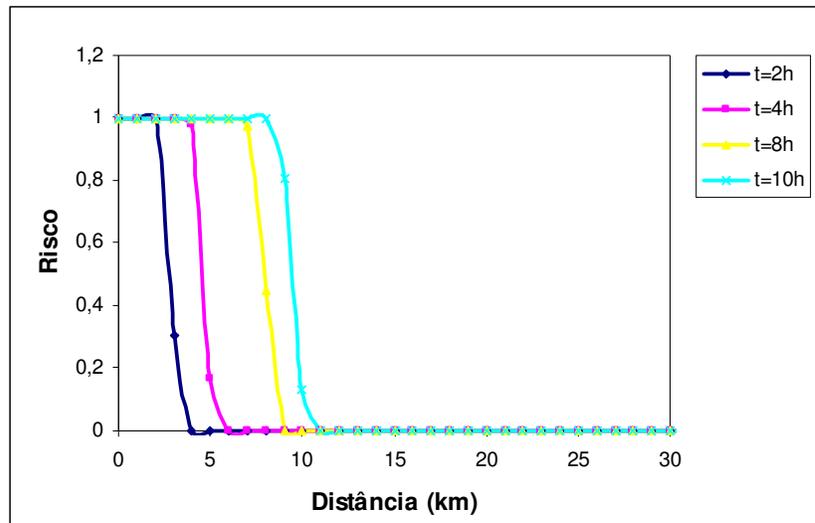


Figura 4.28 – Comportamento do risco com a distância para diferentes horas e uma vazão de $5 \text{ m}^3/\text{s}$.

A Figura 4.28 mostra os perfis de risco para este lançamento, considerando uma vazão de $5 \text{ m}^3/\text{s}$, para diferentes tempos. Os resultados estão de acordo com a análise anterior, onde foi dito que quanto maior for o tempo, maior será o risco em direção às seções rio abaixo. Neste caso considerado, tendo em vista a baixa vazão, o risco tende para ser máximo em toda a extensão do rio, à medida que o tempo passa.

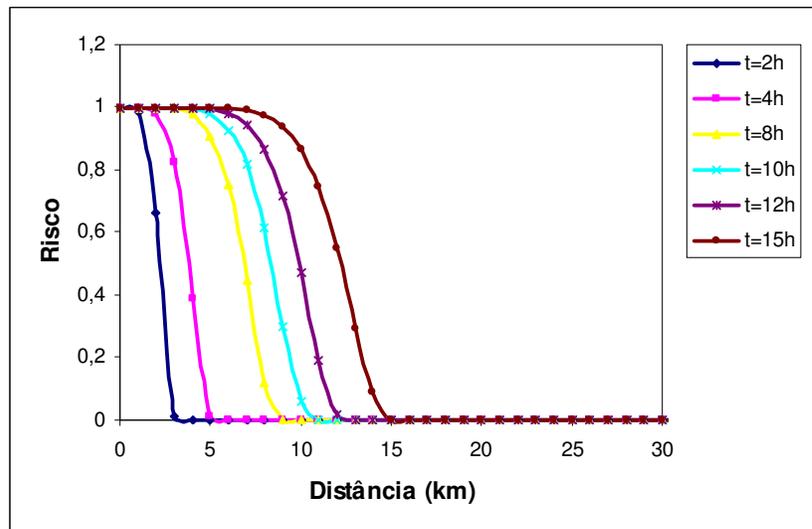


Figura 4.29 – Comportamento do risco com a distância para diferentes horas e uma vazão de $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

A Figura 4.29 mostra o mesmo gráfico para uma vazão de $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Neste caso, percebe-se que a evolução do risco é mais lenta em direção ao trecho do rio. Entretanto, é importante notar que à medida que a vazão aumenta, também aumenta a capacidade de depuração e, assim, diminui o risco de falha do sistema hídrico.

A Figura 4.30 mostra este resultado. Para uma vazão de $20 \text{ m}^3/\text{s}$ o risco cai rapidamente em direção ao seu valor mínimo. Este é um importante resultado, tendo em vista que, como foi dito anteriormente, um resultado claro de que as condições hidrológicas da bacia desempenham importante papel no processo de concessão de outorga para lançamento de efluentes.

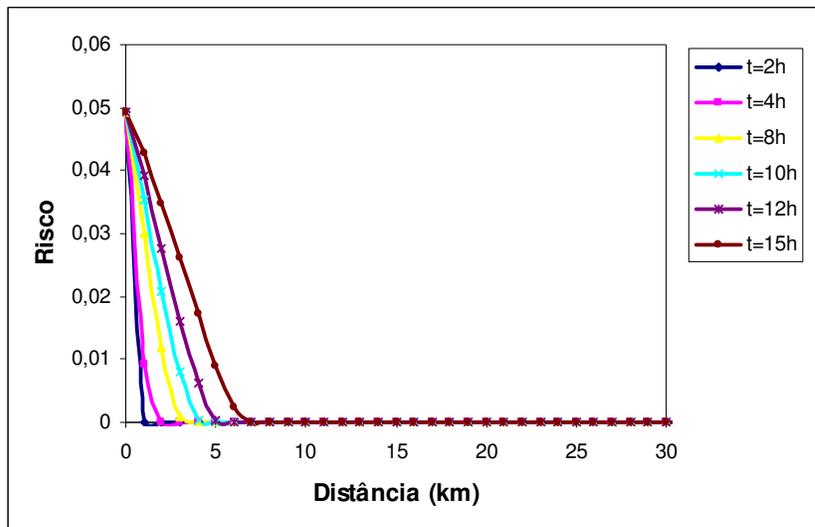


Figura 4.30 – Comportamento do risco com a distância para diferentes horas e uma vazão de 20 m³/s.

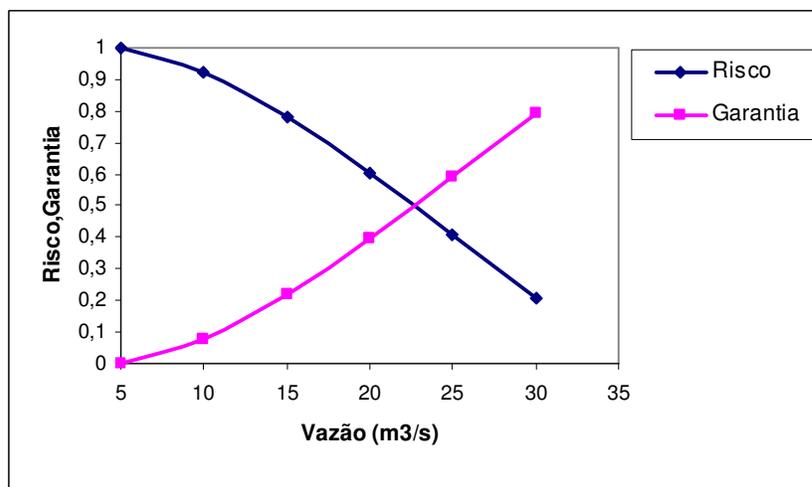


Figura 4.31 – Comportamento do risco e da garantia para diferentes vazões a 10 km do ponto de lançamento em 20 horas e C=200 mg/L

A Figura 4.31 mostra os comportamentos do risco e da garantia para diferentes vazões, para um lançamento de um efluentes com concentração de 200 mg/L. Os resultados mostram claramente que quando a vazão aumenta nos rios, para um mesmo lançamento, o risco cai enquanto que a garantia cresce na mesma proporção. Este resultado mostra que a concessão de outorga para lançamentos de efluentes precisa ser estudada de forma criteriosa, tendo em vista que diferentes parâmetros influenciam os impactos causados por tais lançamentos. Nas próximas figuras estão mostrados os resultados provenientes de simulações que

consideraram lançamentos difusos, ao longo do canal. A taxa de lançamento foi definido como sendo uma grandeza *fuzzy* com valores [0,000075; 0,0001;0,000175] medidos em mg/m/seg (CHAGAS,2005).

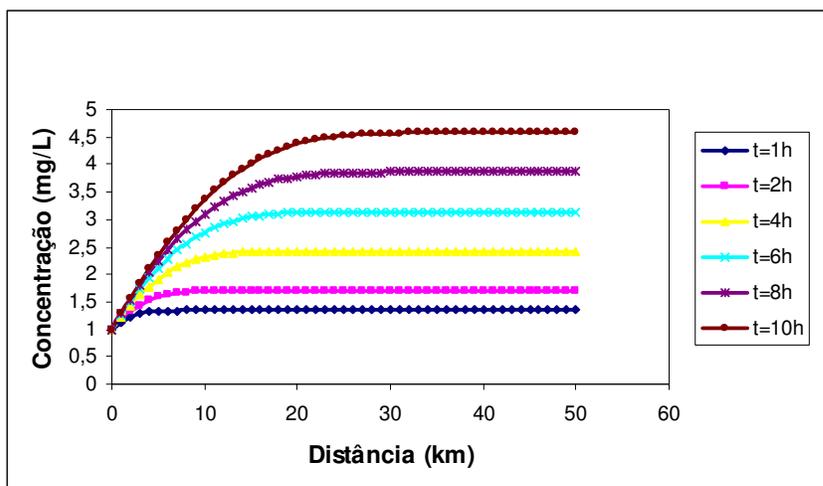


Figura 4.32 – Distribuição da concentração para um lançamento de uma carga difusa ao longo do canal para uma substância conservativa.

A Figura 4.32 mostra o perfil de concentração, para este tipo de lançamento, para diferentes tempos e para uma substância conservativa. Como podem ser observados, esses perfis são crescentes até atingir um ponto de estabilidade, onde o perfil se torna “quase horizontal”. Na verdade, o perfil de cargas difusas só é horizontal quando a substância é não conservativa. Neste caso, o modelo se aproxima de uma ordenada igual à S_D/K , onde S_D é a taxa de concentração difusa que é lançada, e K é o coeficiente de decaimento da substância considerada. Uma análise mais criteriosa pode mostrar que, para este tipo de lançamento, as regiões mais críticas são as mais distantes da origem, onde o risco de falha do sistema é maior.

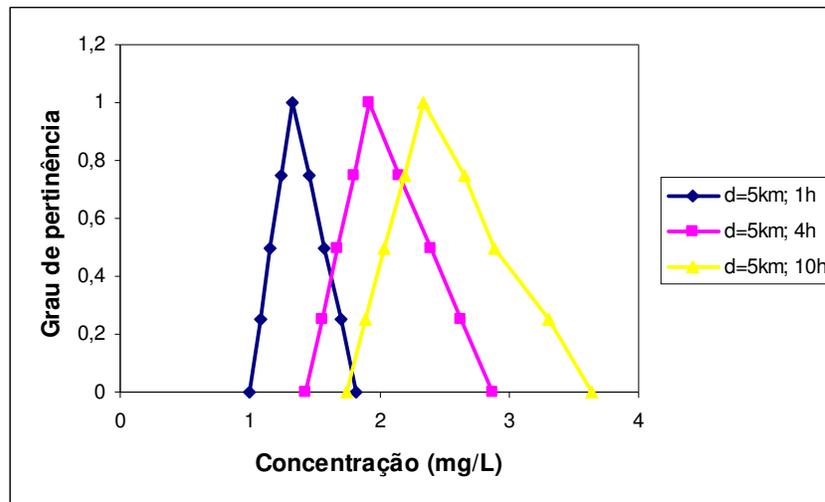


Figura 4.33 – Funções de pertinência para diferentes tempos na seção a 5 km da origem.

A Figura 4.33 mostra as funções de pertinências para a concentração da substância em uma seção distante 5 km da origem. Neste caso, pode ser observado que quanto maior o tempo de observação, maior é o número *fuzzy* correspondente na seção. Os resultados mostram que para um tempo de 10 horas o intervalo dos números *fuzzys* compreende [1,8; 3,5] mg/L, o que, certamente, vai provocar um deslocamento para a esquerda da função marginal de segurança e, em consequência, vai aumentar o risco de falha do sistema.

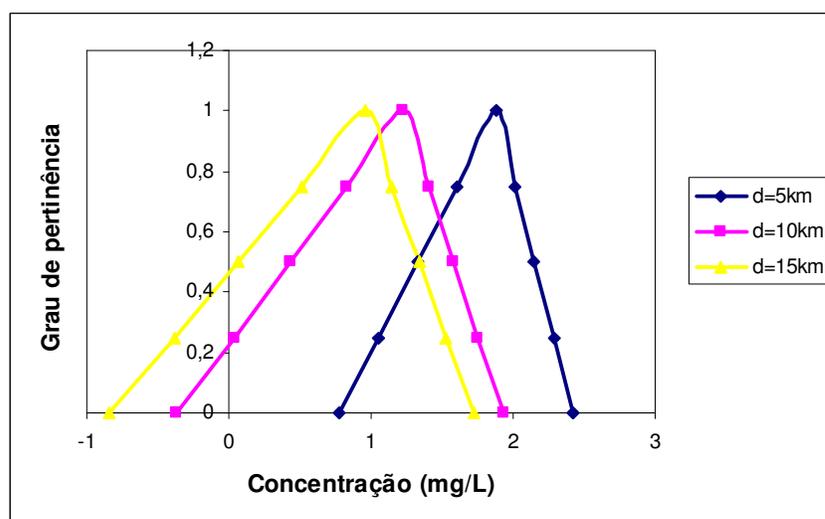


Figura 4.34 – Função marginal de segurança para diferentes seções em $t=6h$.

A Figura 4.34 comprova o que foi dito anteriormente com relação ao deslocamento das funções marginais de segurança, para maiores distancias da origem, para a esquerda. Como pode ser observado através da figura, para uma distancia de 15 km, a função de pertinência se encontra bem mais a esquerda do que a marginal de segurança na seção 5 km da origem, para o mesmo tempo. Este deslocamento faz com que o risco de falha aumente.

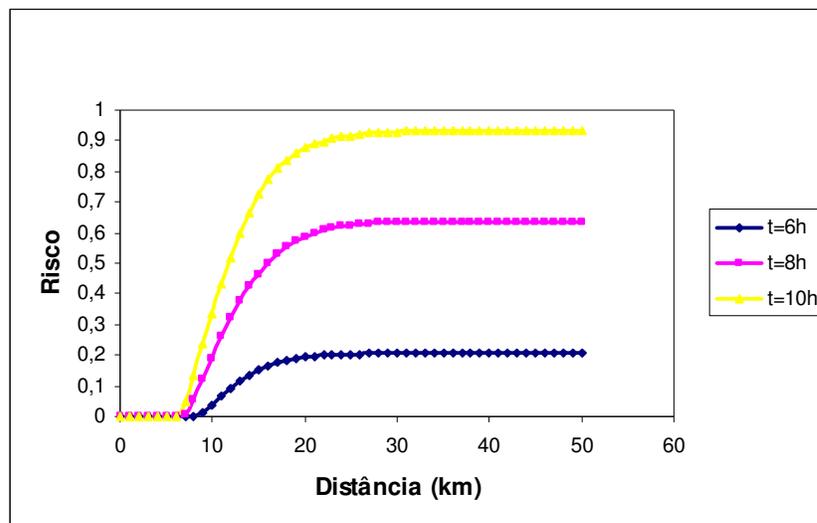


Figura 4.35 – Comportamento do risco com a distância em diferentes tempos.

As Figuras 4.35 e 4.36 mostram os perfis do risco e da garantia, em diferentes tempos, como função da distância. Este resultado comprova o que foi previsto na análise anterior. Como pode ser observado, a partir de 10 km, o risco sofre um incremento positivo na medida em que se afasta da origem. Na mesma escala, nota-se que a garantia sofre um incremento negativo, como estava prevista pela análise anterior. Este resultado mostra a eficiência da metodologia proposta, onde uma combinação dos princípios de transporte de massa, juntamente com a associação da teoria fuzzy, permite que medidas de controle para concessão de outorga possa ser mais bem avaliadas.

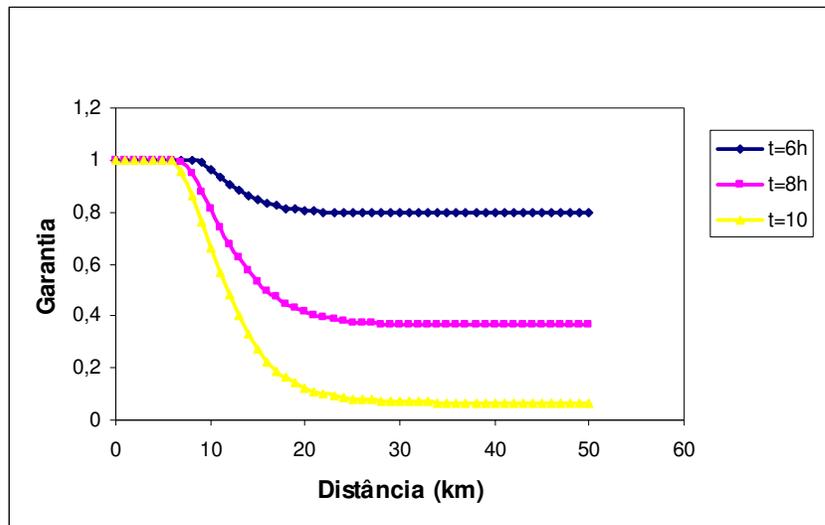


Figura 4.36 – Comportamento da garantia com a distância em diferentes tempos.

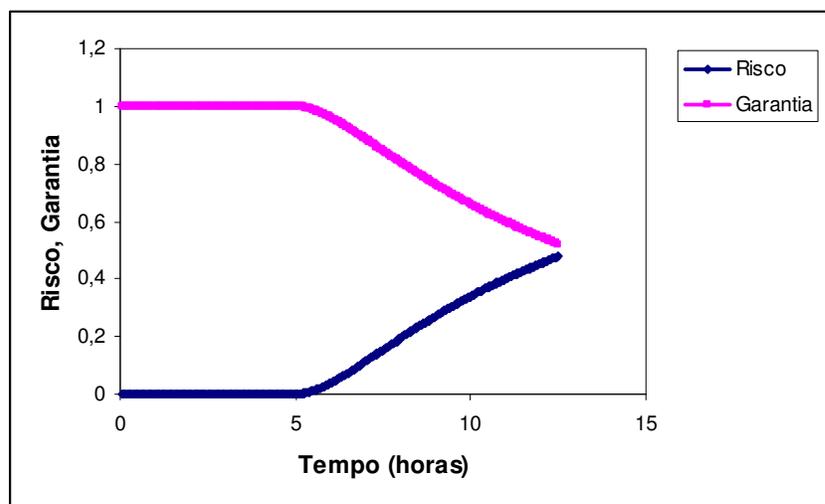


Figura 4.37 – Comportamento do risco e da garantia ao longo do tempo para um lançamento de uma carga difusa ao longo do canal para uma substância conservativa.

A Figura 4.37 compara as variações do risco e da garantia, como função do tempo, em uma seção a 10 km da origem. Este resultado mostra como esses funcionais se comportam em cada seção do canal, variando de acordo com o comportamento da nuvem poluente e suas concentrações. Desta forma, pode-se dizer que o risco e a garantia são dependentes diretos do comportamento do campo

de concentração que, por sua vez, representa uma resposta do corpo hídrico e sua capacidade de diluição, a um determinado lançamento.

Finalmente, esta metodologia foi aplicada para dois rios da América do Norte, para verificar a capacidade da mesma na previsão do risco de falha para diferentes lançamentos e diferentes vazões. O primeiro rio considerado foi o Rio Windy, um rio na região centro norte dos Estados Unidos, que se torna um tributário para o Rio Missouri. Os dados deste rio são: declividade 0,00135; coeficiente de rugosidade 0,042; coeficiente de dispersão longitudinal, $101 \text{ m}^2/\text{s}$. Todos esses dados foram transformados em números *fuzzys* com 25% para cada lado, onde estes valores representam os números com maiores graus de pertinências.

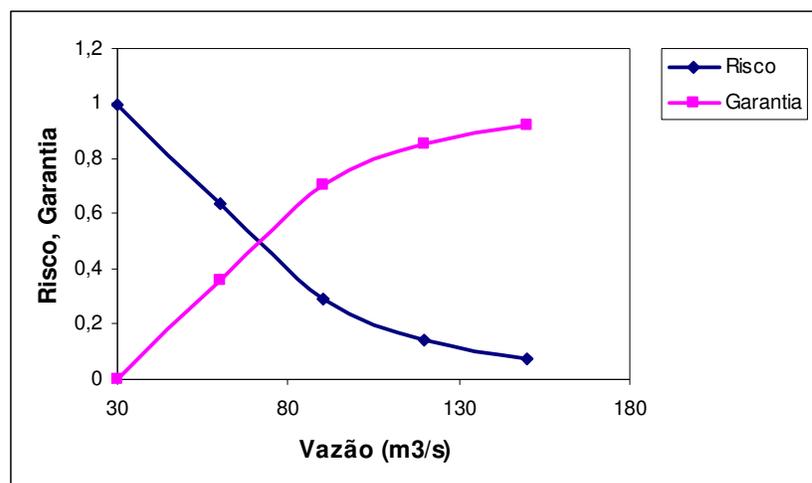


Figura 4.38 – Comportamento do risco e da garantia do Rio Windy para diferentes vazões a 5 km do ponto de lançamento em $t = 6$ horas.

A Figura 4.38 mostra os resultados do risco e da garantia para diferentes vazões, a partir de simulações realizadas com os dados do Rio Windy. Como pode ser observada, esta simulação mostra bem o comportamento do risco e da garantia, em uma situação real, onde se consideram várias vazões. A seção considerada é de 5 km da origem e o tempo de referência é de 6 horas. A concentração inicial é de 100 mg/L de DBO. Os resultados mostram que o risco tem um comportamento inversamente proporcional à vazão. Ou seja, à medida que a vazão aumenta, o risco vai diminuindo, enquanto a garantia vai aumentando.

Este resultado é importante, principalmente, se forem considerados os efeitos de estiagem e de períodos de cheias, na concessão de outorga para lançamentos de efluentes. Como pode ser observado, os resultados mostram que, nas estações chuvosas, a concessão de outorga para lançamentos exige menos atenção do que nas estações de estiagem. Neste caso, há necessidade de uma análise mais criteriosa nestas concessões.

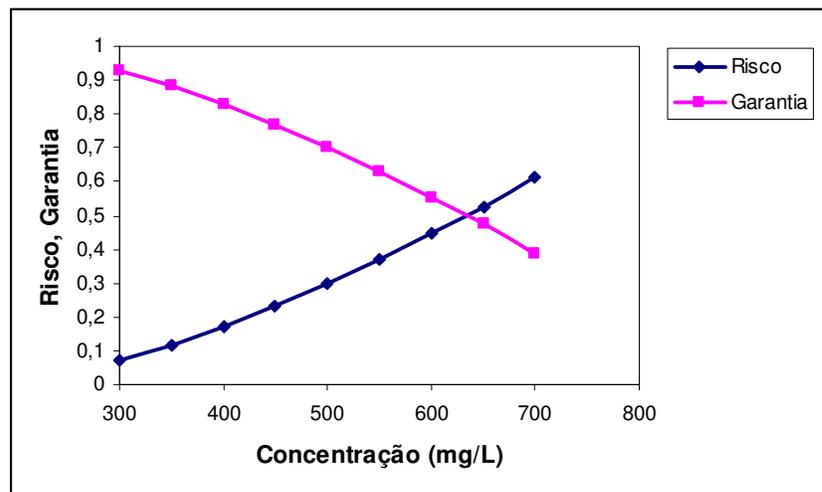


Figura 4.39 – Comportamento do risco e da garantia do Rio Windy para diferentes concentrações a 10 km do ponto de lançamento em $t = 6$ horas.

A Figura 4.39 mostra o comportamento do risco e da garantia em função da vazão de lançamento. Foram realizadas várias simulações com diferentes concentrações nos lançamentos. A vazão considerada foi de $140 \text{ m}^3/\text{s}$, que representa a vazão média do referido rio. Neste caso, a figura mostra que o risco aumenta com o aumento da concentração de lançamento. Isto é explicado pelo fato de que quanto maior for a concentração, mais difícil é o processo de diluição. Com isso, o campo de concentração tem seus valores quase sempre acima da resistência do rio, fazendo, assim, com que o risco aumente e a garantia diminua. Por exemplo, quando foram considerados uma concentração de lançamento de 500 mg/L , o risco de falha deste rio é de 40%, aproximadamente, que é um valor alto para os padrões da engenharia ambiental. Este resultado serve para mostrar que esta metodologia permite que várias situações possam ser analisadas de acordo com as necessidades dos gestores e controladores dos recursos hídricos.

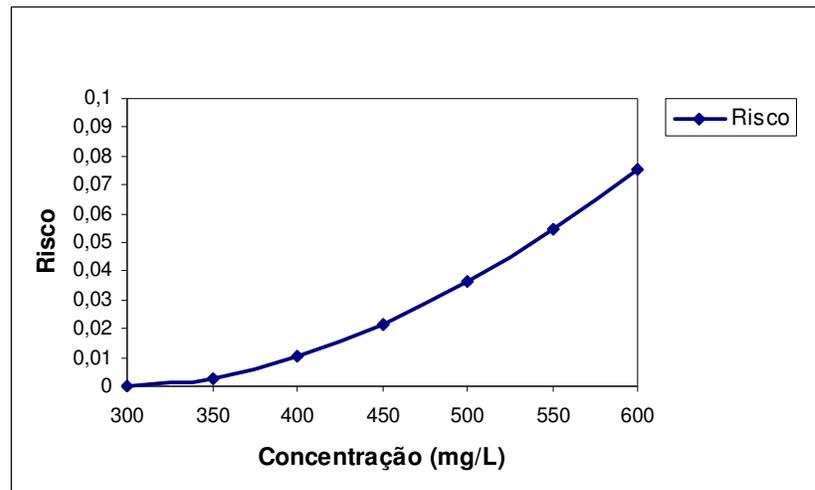


Figura 4.40 – Comportamento do risco do Rio Sabine para diferentes concentrações a 10 km do ponto de lançamento em $t = 10$ horas.

Esta metodologia também foi aplicada no Rio Sabine, um rio que se encontra na fronteira do Estado do Texas como a Luisiana e que tem seu estuário no Golfo do México. Este rio foi escolhido por ter consideráveis atividades de transporte de petróleo em sua bacia, o que se torna um alvo fácil para derramamentos.

Para esta simulação foram considerados os seguintes dados: declividade, 0,00013; coeficiente de rugosidade, 0,0420; coeficiente de dispersão longitudinal, 400 m^2/s . A largura deste rio é de 116 metros. A vazão considerada para esta pesquisa foi de 250 m^3/s , (CHAGAS, 2005).

A Figura 4.40 mostra o comportamento do funcional do risco para diferentes concentrações de lançamentos. Como pode ser observado, com uma alta vazão, o Rio Sabine se comporta muito bem como receptor de lançamentos. Seu poder de diluição é alto, tendo em vista que seu coeficiente de dispersão longitudinal é relativamente alto. Assim, os resultados mostraram que, mesmo para concentrações de DBO por volta de 600 mg/L, o risco de falha deste rio é bem pequeno. Por exemplo, para um lançamento de 500 mg/L, o risco é de, apenas, 4%, o que representa um risco muito baixo e aceitável. Este resultado é bem diferente daquele obtido pela aplicação desta metodologia no Rio Windy.

Como pode ser visto, a aplicação da Teoria Fuzzy em formulações relacionadas com o Transporte de Massa, pode se transformar em uma alternativa

viável na avaliação do risco de falha de sistemas hídricos, sujeitos a lançamentos de efluentes. A transformação das Equações Diferenciais que governam os processos de transporte, em Equações Diferenciais *Fuzzy*, é uma forma de se estudar soluções para esta classe de equações, onde o caráter *fuzzy* é dado às variáveis de controle.

Com isso, é possível encontrar soluções em forma de funções de pertinência para a concentração de agentes poluentes e, com isso, estabelecer um novo caminho para o estudo da Análise de Risco em Engenharia e, assim, trazer novas alternativas para os estudos da Gestão dos Recursos Hídricos.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

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:

- O uso da teoria *fuzzy* em modelos de balanço de massa, que permite transformar esses modelos em equações diferenciais *fuzzys*, quando tratado adequadamente permite que se obtenham Funções de Pertinências 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 permite que se determinem campos de concentração, 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;
- 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;
- Por outro lado, para lançamentos pontuais contínuos, as análises mostraram que o risco cresce com o tempo até atingir o valor desta função definido através da concentração de diluição. Assim, o risco tende a aumentar, em toda a extensão do canal, até se estabilizar no valor estabelecido no ponto de lançamento. Este valor só vem a cair se a vazão do rio aumentar. Neste caso,

à medida que a vazão aumenta, o risco diminui. Isto mostra a importância de se ter um conhecimento prévio da capacidade hidrológica das bacias as quais esses rios pertencem. Este resultado foi comprovado por Chagas, (2005);

- Os resultados mostraram que rios com baixa vazão são vulneráveis para receber lançamentos de efluentes, sem comprometer a qualidade de suas águas. Neste caso, foram verificados que rios com vazão menores do que 20 m³/s e com baixa capacidade de diluição, não devem receber efluentes sem um tratamento prévio. Ainda, verificou-se que para Rios da Região Nordeste Brasileiro, onde os mesmos possuem vazões variáveis ao longo do ano, precisam de um rígido controle na concessão de outorga de lançamentos. Neste caso, nos períodos de estiagem, é necessário a verificação da capacidade de cada corpo hídrico poder se auto depurar, sem causar qualquer incômodo à vida aquática do mesmo.
- 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;
- A versatilidade da metodologia proposta foi verificada, quando o modelo foi aplicado em dois rios dos Estados Unidos, cujos dados estavam disponíveis. Neste caso, os resultados mostraram que rios com maior capacidade de diluição, com maior vazão e com maior coeficiente de dispersão longitudinal, como é o caso do Rio Sabine, tem uma capacidade maior para receber lançamentos de efluentes. As simulações mostraram que, para este rio, o risco se comportou dentro de valores baixos, mesmos para lançamentos com grandes concentrações;

- 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.

Como sugestão para estudos futuros recomenda-se:

- Testar a metodologia proposta e sua eficiência na capacidade de previsão para rios sujeitos á concessão de outorga.
- Que a teoria *fuzzy* seja usada no modelo de Street-Pheps, onde o número de parâmetros é bem mais restrito, para ver como este modelo se comporta nos estudos de concessão de outorga. Esta sugestão pode ser uma alternativa mais simples, que permite que se tenha um controle, não tão rigoroso, mas ainda assim, eficiente das concessões de outorga para lançamentos de efluentes;
- Para um estudo mais complexo e completo, que seja usado o modelo de transporte de massa em 3D, onde um maior número de parâmetros possa ser usado como variáveis *fuzzys* para ver a capacidade desta metodologia em campos de estudo tridimensionais;
- Testar a teoria *fuzzy* em modelos de reservatórios para a determinação do risco de eutrofização em função das cargas poluentes.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA. Outorga de direito de uso de recursos hídricos: diretrizes e prioridades. Disponível em: www.ana.gov.br. Acesso em: 16 jun. 2011.

ANDERSON, D. A.; TANNEHILL, J. C.; PLETCHER, R. H. Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer. Hemisphere Publishing Corporation, 1984.

ANDRADE, E. L. Introdução à Pesquisa Operacional: Métodos e Modelos para Análise de Decisão, 2ª ed., LTC, Rio de Janeiro, 2000.

ANDRADE, C. F. *Estudo de Planícies de inundação através da análise dos parâmetros hidráulicos do canal principal e sua influência na avaliação do risco fuzzy de enchentes*. (2006). 213f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

AZEVEDO, L. G. T.; BALTAR, A. M.; RÉGO, M.; PORTO, R. L. L. *Sistemas de Suporte à Decisão para Outorga de Direitos de Uso da Água no Brasil*. Série Água Brasil 2. Banco Mundial, Brasília, 2003.

BEZERRA, A. M. *Avaliação da aplicação da outorga de direito dos usos dos recursos hídricos no estado do ceará*. 2008.134f Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E; LIGHTFOOT, E. N.; In: *Transport Phenomena*, John Wiley, New York, 2011.

BOGARDI, I e DUCKSTEIN, L. *The Fuzzy Logic paradigm of risk analysis*. In: Risk Based Decision making in water Resources X. Santa Barbara, California. New York, ASCE, 2002.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; BARROS, M. T. L. De; VERAS Jr., M. S.; PORTO, M. F. do A.; NUCCI, N. L. R.; JULIANO, N. M. de A.; EIGER, S. *Introdução à engenharia ambiental*. 2ª. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004, 305 p.

BRASIL. Resolução CONAMA n° 357, de 17 de março de 2005. Brasília, 2005.

CHAPRA, S. C. *Surface Water-Quality Modeling*. New York: McGraw-Hill, 1997, 844p.

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.

CHUNG, W.; ALDAMA, A. A.; SMITH, J. A. *On the Effects of Downstream Boundary Conditions on Diffusive Flood Routing*. *Advances in Water Resources*, v. 16, p. 259-275, 1993.

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

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

GANOULIS, J.G. *Engineering risk analysis of water pollution: Probabilities and fuzzy, set*, VCH Publishers Inc, Weinheim, New York; Basel, Cambridge, Tokyo, 1994.

GANOULIS, J.; DUCKSTEIN, L.; BOGARDI, I. *Risk Analysis of Water Quantity and Quality Problems: The Engineering Approach*. In: Ganoulis (Ed.), *Water Resources Engineering Risk Assessment*, Nato ASI Series, Serie G: Ecological Sciences, v. 29, 1991.

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*. 2011.116f Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

JAMES, A. *An Introduction to WATER QUALITY MODELLING*. 2nd Edition. By John Wiley & Sons Ltd, 1993, 311p.

JOHANSSON, R. M. F.; CAMPOS, J.D.; MAGALHÃES, P. C. *A construção do pacto em torno da cobrança pelo uso da água na Bacia do rio Paraíba do Sul*. In: anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH. Curitiba, 2003.

KAUFMANN, A.; GUPTA, M.M., *Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science*, Elsevier Science Publishers, United States, 1988.

KELMAN, J. *Gerenciamento de Recursos Hídricos: Outorga e Cobrança. In: Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Vitória – ES, 1997.

LANNA, A. E.; gestão dos Recursos Hídricos no contexto das políticas ambientais. In: MUÑOZ, Héctor Raúl (Coord.). *Interfaces da Gestão dos Recursos Hídricos: desafios da Lei de Águas*. 2ª. ed. Brasília: MMA/SRH, 2000.p.75-109.

LANNA, A. E. L. *Gestão das Águas*. Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999.

LIMA, O. S. J. *Análise de pontos por função fuzzy*. 2002. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Software) – Universidade de Fortaleza, Fortaleza, 2002.

LOPES, A. A. S., *Desenvolvimento de uma metodologia, com base na teoria fuzzy, aplicada a modelos da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e oxigênio dissolvido (OD), para calcular o risco de degradação ambiental em rios naturais*. 2009. 140f Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Universidade federal do ceará, Fortaleza, 2009.

MACHADO, E. S.; PORTO, M.; RAMON, N. e FEIL, A. V. *Um avanço na gestão da qualidade da água: a outorga de lançamento de efluentes*. In anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH. Curitiba, 2003.

MELO, M. C. *Avaliação e proposição de critérios de outorga para lançamentos de efluentes em corpos d'água*. 2006. 120f Dissertação (mestrado em engenharia), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

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.

NEVES, M. M.; *Potencial da metodologia TMDL como mecanismo de enquadramento de corpos de água*. 2005. 256 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

OLIVEIRA, JR.; H, A., *Lógica Difusa: Aspectos Práticos e Aplicações*. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 1999, 192p.

PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F., *An Introduction to Fuzzy Sets – Analysis and Design*, The MIT Press, 1998.

PORTO, M.F.A. *Sistemas de Gestão da Qualidade das Águas: uma proposta para o caso brasileiro*. 2002. Tese (Livre Docência em Engenharia Ambiental) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.

RAFTERY, J. (1994), *Risk Analysis in Project Management*, E & FN SPON, London, U.K.

RODRIGUES, R. B. *Sistema de suporte à decisão proposto para a gestão quali – quantitativa dos processos de outorga e cobrança pelo uso da água* 2005. 155f Tese (Doutorado em Engenharia Civil) escola politécnica, Universidade de São Paulo, 2005.

ROQUES, T. V. P. *Aplicação de modelos computacionais na análise de outorga para diluição de efluentes em corpos de água – fontes pontuais e difusas*. 2006. 201f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – 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 da vazão regularizada e do rendimento*. 2008. 75f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

SUDERHSA (Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). *Desenvolvimento e Implantação do Sistema de Declaração de Uso de Recursos Hídricos e de Automonitoramento e Elaboração do Manual de Outorga: Elaboração do Manual de Outorga*. Curitiba, 2002.

VIEIRA, V. P. P. B. *Análise de risco em recursos hídricos: fundamentos e aplicações*. Porto Alegre: ABRH, 2005.

VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 2 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 1996. 243 p.

WELTY, J.R.; WILSON, R. E.; WINKS, C. E., In: *Fundamental of momentum heat and mass transfer*, 4th edition, John Wiley & Sons, New York, 2001.

YEN, B. C. *Stochastic methods and reliability analysis in water resources*, Adv. Water Resources, vol. 11, 1988.

ZADEH, L. A., *Fuzzy Sets – Information and Control*, vol. 8 (338-353), 1965.

ZIMMERMANN, H. J., *Fuzzy Set Theory and Applications*, Kluwer Academic Publishers, Boston, U.S.A., 1991.