

APLICAÇÃO DA TEORIA FUZZY PARA CALCULAR RISCO DE CONTAMINAÇÃO CAUSADO POR LANÇAMENTOS OCEÂNICOS DE RESÍDUOS LÍQUIDOS NA REGIÃO LITORÂNEA DO PECÉM – ESTADO DO CEARÁ, BRASIL.

Chagas¹; Patrícia, Souza²; Raimundo.

¹ Estudante de Doutorado no Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, área de concentração em Recursos Hídricos, do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental Centro de Tecnologia – UFC Campus do Pici, P. O. Box 6018, 60451 - 970, Fortaleza, Ceará

Fone: +55 85 288-9771 Email: pfchagas@yahoo.com

² Professor Titular do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental Centro de Tecnologia Campus do Pici, P. O. Box 6018, 60451 – 970, Fortaleza, Ceará

Fone: +55 85 288 9771; Fax: +55 85 288 9627 Email: rsouza@ufc.br

RESUMO

O lançamento de grandes quantidades de resíduos líquidos na região costeira do Pecém, Nordeste do Brasil, levanta questões relacionadas com os impactos ambientais causado pela presença desta estrutura de lançamento, considerando que esta região representa uma importante área de recreação no estado do Ceará. Esta pesquisa emprega a Teoria Fuzzy para avaliar o risco de contaminação na região praiana, causada por uma possível instalação de um emissário submarino naquela região. O estudo simula a presença desta estrutura de lançamento, considerando diferentes comprimento de difusores, e calcula a concentração de coliformes nas proximidades da linha de costa, através da metodologia de Brooks. Finalmente, avalia, a partir dos resultados encontrados, o risco usando uma função de desempenho para T_{90} . Os resultados mostraram que a Teoria Fuzzy representa uma ótima alternativa para a determinação do risco de contaminação em ambientes aquáticos, como o usado nesta pesquisa.

ABSTRACT

The releasing of large quantity of wastewater in the region of Pecem, Northeast of Brazil, raises questions concerning with the environmental impact caused by that process, considering that, it is an intensity recreational area in the State of Ceara. This research uses the Fuzzy Set Theory to evaluate the risk of contamination, in that recreational beach, caused by a possible outfall structure in that region. The studying simulates the presence of this wastewater disposal structure, for different diffuser length, calculates the wastewater concentration close to the coastline, using the Brooks' methodology, and calculates the engineering risk, using a defined Membership Function for the T_{90} . The results have shown that the Fuzzy Set Theory is a very good way to predict Risk of Contamination in that environmental system.

Palavras-Chave: análise de risco; qualidade de água; risco em sistemas costeiro.

1. INTRODUÇÃO

A presença de uma estrutura portuária na região do Pecém, no estado do Ceará, Nordeste do Brasil, deve trazer para a região um considerável acréscimo populacional, além de uma forte tendência de desenvolvimento. Entretanto, com este porto, aquela região pode se tornar mais vulnerável no que diz respeito a problemas ambientais, principalmente, causados por lançamentos de concentrações de esgoto naquela região costeira. Este fato apresenta um grande incômodo, considerando que aquela região é uma área recreativa com uma incidência muito grande de turista. Este cenário trás a necessidade de se estudar soluções de modo a reduzir os impactos causados por esta obra de engenharia.

Por outro lado, a solução para esta classe de problema, geralmente se apresenta com uma forte presença de incertezas. Essas incertezas são incorporadas no processo de solução através de diferentes fontes. Base de dados, aproximações de soluções numéricas, são algumas fontes que podem produzir incertezas na solução final do problema. Desta forma, estas incertezas precisam ser estudadas, entendidas e quantificadas, de forma que uma melhor interpretação dos resultados possa ser desenvolvida.

Neste contexto, a análise de risco se apresenta como uma opção muito positiva nas questões de quantificação e gerenciamento do risco. Segundo Ganoulis (1994), a análise de risco permite o desenvolvimento de uma metodologia capaz de garantir uma melhor segurança nos projetos de engenharia. Ainda, segundo Ganoulis (1994), a avaliação do risco de poluição hídrica é uma importante ferramenta para quantificar incertezas, bem como para avaliar suas conseqüências nos recursos hídricos.

Este estudo tem como principal objetivo o emprego da Teoria Fuzzy para avaliar o risco de contaminação causado por lançamento de esgotos domésticos e industriais em uma região litorânea. O estudo se baseia em uma metodologia para calcular o risco, através de funções de desempenho para T_{90} . Os resultados mostram que a Teoria Fuzzy representa uma ótima metodologia para determinar risco de contaminação hídrica, em um ambiente costeiros.

2. ASPECTOS DA DISPERSÃO

O principal elemento que deve ser considerado nos estudos dos lançamentos de águas residuárias em regiões costeiras são os difusores. Essa estrutura hidráulica, de extrema importância nos emissários submarinos, é responsável pela intensidade da diluição inicial que deve

ocorrer nos oceanos, de modo que possa haver uma certa segurança no sistema ambiental em questão.

Para calcular os difusores, deve-se ter em mente que o objetivo principal deste sistema é de produzir uma diluição inicial nas concentrações de lançamento. Desta forma, é importante saber que esta diluição inicial depende da vazão de lançamento, do comprimento dos difusores, da profundidade em que o lançamento está ocorrendo, das propriedades físicas locais, tais como velocidade, estratificação térmica e de densidade, salinidade, além de outros fatores. Logo, uma equação que represente esta relação pode ser escrita na forma,

$$L = f(Q_e, C_i, H, u, p', \frac{\partial P}{\partial Z}, S) \quad (1)$$

onde,

L = Comprimento dos difusores;
 Q_e = Vazão de lançamento do efluente;
 C_i = Concentração do efluente;
 H = Profundidade do ponto de lançamento;
 p' = Relação entre densidade da água e do efluente;
 dp/dz = Gradiente de densidade;
 S = Diluição inicial; e
 u = Componente das correntes oceânicas locais

Como o objetivo principal da pesquisa diz respeito ao estudo das condições de lançamento de águas residuárias em regiões costeiras, para se ter aceitáveis concentrações em zonas recreacionais daquela região, é importante que seja verificada todas as formas de diluição, durante o processo de dispersão. Essas diluições são divididas em três categorias.

- Diluição Física – é aquela que ocorre através do processo de transporte de massa poluente no ambiente aquático. Essa diluição é dividida em duas partes. A primeira é chamada de diluição inicial e é depende do comprimento do difusor. A segunda é chamada de diluição horizontal e pode ser calculada através da formulação,

$$\frac{C_t}{C_o} = \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{1.5}{(1 + 8E_0 t / L^2)^3 - 1} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

onde,

C_t é a máxima concentração de poluente, após transcorrido um tempo t do lançamento, em org/100ml;
 C₀ é a concentração máxima resultante da diluição inicial, em org/100ml;
 E₀ é o coeficiente de difusão [cm²/s];
 t é o tempo [s]; e
 erf(x) = função erro definida por

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx \quad (3)$$

Para calcular o comprimento do difusor é fundamental definir a diluição inicial. Desta maneira, o comprimento do difusor pode ser calculado através de,

$$L = \frac{C_i^3 Q_e N^3}{8g'^2} \quad (4)$$

onde,

Q_e é a vazão do efluente [m³/s];

N é um fator que depende do gradiente de densidade e é definido por;

$$N = \sqrt{-\frac{g'}{\rho}} \sqrt{\frac{\partial P}{\partial z}} \quad (5)$$

g' é definido pela relação $g(\Delta\rho_d / \rho)$, em m/s²;

ρ_d é a densidade do efluente;

ρ é a densidade da água;

g é a gravidade; e

dp/dz é o gradiente de densidade.

Os parâmetros N e g' são calculados diretamente dos dados existentes da região costeira em estudo. Considerando os dados disponíveis para esta pesquisa, os valores de N, g', e Δρ_d/ρ foram avaliados e encontrados respectivamente, 0,0296 s⁻¹, 0,265 m/s², e 0,027. Com esses resultados é possível estabelecer o valor da diluição inicial considerando diferentes comprimentos para os difusores.

- Diluição devido ao decaimento bacteriológico – outro importante fator de diluição, relacionado com os lançamentos oceânicos, é o decaimento bacteriológico. A maioria das vezes este decaimento é considerado de primeira ordem, definido através da equação,

$$C_d = C_0 e^{-kt} \quad (6)$$

onde,

C_d = concentração bacteriológica no tempo t, em org/100ml;

C₀ = concentração de bactéria no final da diluição inicial, em org/100ml;

k = constante de decaimento bacteriológico, em h⁻¹; e

t = tempo, em horas

É importante notar que k é estimado considerando o tempo necessário para que haja uma redução no número de bactéria equivalente a 90% do valor inicial. Nesta pesquisa, considerando as condições oceânicas do Nordeste do Brasil, o valor de t₉₀ será considerado igual a 2 h⁻¹ que representa um valor compatível para aquela região. Desta forma, a equação (6), de ser escrita na forma,

$$D_z = e^{-2.3 \frac{t}{T_{90}}} \quad (7)$$

onde D_z representa a diluição devido ao decaimento bacteriológico.

3. TEORIA DE RISCO

Uma definição para risco não é uma tarefa de fácil alcance. A razão para este fato está relacionada com o alto grau de confusão que envolve os aspectos deste objeto de estudo. Em geral, risco poderia ser definido tanto do ponto de vista qualitativo, como do ponto de vista quantitativo. É importante observar que o aspecto qualitativo do risco traz uma idéia sobre fracasso ou sucesso de algum evento definido. Desta forma, risco aparece diretamente relacionado com perigo e proteção, onde perigo é definido como uma fonte de danos. Assim, é possível dizer que risco pode ser definido através da de uma relação simbólica, na forma:

$$risk = R(h, s) \quad (8)$$

onde, h quer dizer perigo e s quer dizer proteção. Por exemplo, definindo um nível de segurança, quanto maior for o perigo, maior será o risco. Por outro lado, para um determinado perigo, quanto maior for a proteção, menor será o risco. Porém, deve estar claro que a relação (8) só estabelece a idéia do comportamento da função R(h,s), não permitindo estabelecer qualquer quantificação de Risco.

O processo de quantificação de risco envolve a busca de respostas para as seguintes perguntas básicas.

- Que pode acontecer?
- Com que frequência fracassos são esperados?
- Qual é a consequência provável?

Como coloca Ganoulis, (1994), a pesquisa para responder as primeiras duas perguntas envolve o estabelecimento dos processos de análise de incertezas dos sistemas. Por exemplo, a resposta para a primeira pergunta é determinada escrevendo cenários que descrevem o que poderia dar errado e de que maneira isto poderia acontecer. Para conseguir respostas para a segunda pergunta é importante introduzir aspecto de incertezas no método de análise. Isto pode ser alcançado considerando todas as variáveis do problema como sendo variáveis estocásticas. Assim, a resposta para estas perguntas pode ser investigada por algum método estocástico disponível.

De fato há dois métodos que podem ser usados para quantificar risco. O primeiro é o Método Probabilístico, onde todo o conjunto de variáveis do problema está definido como variáveis aleatórias. O outro é o Método dos Números Difusos, onde todo o conjunto de variáveis é considerado como um conjunto de números difusos. Nesta pesquisa era usado o método dos números difusos.

Para formular a teoria da análise de risco é importante definir um cenário que pode ser considerado como uma referência. Para tal, suponha que a capacidade C_0 de qualquer de sistema resistir a qualquer carga externa E_0 poderia ser definido como um conjunto difuso. Em outras palavras, o par (C_0, E_0) poderia ser considerada como um par de números difusos. Isto significa que toda a incerteza da que entra em consequências da avaliação de (C_0, E_0) é quantificada através de métodos dos números difusos.

Desta forma, a técnica para calcular o risco de falha de qualquer sistema ambiental poderia ser feita pela

aplicação da teoria dos números difusos em torno do par dos números difusos (C_0, E_0) .

4. ANÁLISE DE RISCO ATRAVÉS DA TEORIA DOS CONJUNTOS DIFUSOS

A Teoria dos Conjuntos Difusos é um método matemático usado para caracterizar e quantificar incertezas e imprecisões em relações funcionais. Essa teoria é muito importante em situações onde os dados não são suficientes para uma completa análise das incertezas, como ocorre com estudos realizados através dos métodos estatísticos para estimativas de frequências, Ganoulis, (1994). O ponto central desta teoria esta relacionada com a definição de uma função de desempenho que representa, numericamente, o grau através do qual um elemento se relaciona a um conjunto qualquer.

A função de desempenho pode ser representada através de uma par de equações, definida dentro de algum intervalo. Por exemplo a função de desempenho de um conjunto difuso pode ser descrito, matematicamente, por duas funções L e R definidas por

$$\mu_x(x) = L\left(\frac{x_m - x}{x_1}\right) \quad x < x_m; \quad x_1 > 0 \quad (9)$$

$$\mu_x(x) = R\left(\frac{x - x_m}{x_1}\right) \quad x > x_m; \quad x_2 > 0 \quad (10)$$

onde x_m é o valor de x que faz $\mu_x(x)=1$.

A principal característica da função de desempenho é que o seu campo de existência está definido no intervalo $[0,1]$. Outro fato importante desta função é que ela representa, dentro deste intervalo, o grau de confiança que um número x deveria ter para um particular número difuso. Assim, de uma forma geral, pode-se concluir que números difusos são equivalentes as variáveis aleatórias, onde a função membro corresponde a função densidade de probabilidade. Com isso, é possível definir e quantificar Risco pela equação;

$$risk = \frac{\int_{x_1}^x \mu_x(x) dx}{\int_{x_1}^{x_2} \mu_x(x) dx} \quad (11)$$

onde o limite x representa um valor padrão suportável, do ponto de vista ambiental, definido pela legislação brasileira.

5. APLICAÇÃO DA TEORIA PARA REGIÃO DE PECÉM

Esta teoria foi aplicada na região costeira do Pecém, onde foi instalada uma estrutura portuária, com previsão de implantação de um emissário submarino. A análise foi feita para diferentes difusores e diferentes distancias entre

o ponto de lançamento e a zona de recreação. A idéia era aplicar a teoria dos conjuntos difusos e calcular o risco de contaminação, onde as concentrações de coliformes fecais não alcançassem o valor padrão que é 1000 org/100ml.

Para alcançar estes objetivos, através de uma simulação matemática, foi aplicado um conjunto de dados, caracterizando a região em estudo. A descarga de efluente foi calculada em função da população esperada, e em função das atividades industriais para aquela região. Assim, a descarga foi calculada e usada com o valor de 2.857m³/s. A concentração dos resíduos lançados foi calculada em função do nível de atividades da região. O valor achado era 1.3E7 org/100ml.

Para calcular a taxa de decaimento bacteriológico foi usada uma função membro definida por;

$$T_{90} = \mu_{T_{90}} + 1 \quad 1 < T_{90} < 2 \quad (12)$$

$$T_{90} = -3\mu_{T_{90}} + 5 \quad 2 < T_{90} < 5 \quad (13)$$

onde T_{90} é a função membro. Esta função membro foi estimada dentro de intervalo compatível com os dados da região e de maneira a caracterizar aquela região oceânica.

Aplicando as equações (12) e (13) em uma equação de decaimento é possível achar a equação que representa as funções definidas no domínio dos conjuntos difusos, para a diluição causada pelo decaimento bacteriológico. Assim;

$$D = e^{\frac{8.625}{-3\mu_{T_{90}} + 5}} \quad 5.612 < D < 74.62 \quad (14)$$

$$D = e^{\frac{8.625}{\mu_{T_{90}} + 1}} \quad 74.62 < D < 5569 \quad (15)$$

Agora, aplicando este conjunto de equações na equação (11), é possível calcular o risco da concentração de coliformes fecais alcançar o valor da concentração padrão definido pela legislação brasileira.

Os resultados mostram que o Risco de contaminação na praia, fica maior com o comprimento de difusor. Nas simulações, para LD igual a 50m, 100m e 200m, os riscos calculados foram os seguintes: R(50) = .00033%; R(100) = .00048%; e R(200) = .0045%. Nestas condições, para uma mesma distancia de lançamento, pode-se concluir que o risco de contaminação será muito pequeno, não causando, portanto, qualquer perigo para os turistas que visitam aquela região.

6. CONCLUSÕES

Após análise dos resultados encontrados a partir da teoria fuzzy, pode-se concluir que: A pesquisa mostrou que, para as condições de estudo, não há qualquer risco de contaminação daquela área de recreação. Em outras palavras, não há perigo de que a concentração de coliformes chegue à praia com valores superiores a 1000 org/100ml, valor considerado como limite pela legislação brasileira.

As simulações mostraram que o risco de contaminação aumenta com o aumento do comprimento do difusor.

A pesquisa mostrou que teoria fuzzy mostrou-se ser uma ótima ferramenta na avaliação e determinação do risco.

Finalmente, os estudos mostraram que o comprimento do difusor se apresenta como um importante parâmetro no processo de dispersão em lançamentos oceânicos. Essa pesquisa vem confirmar pesquisas anteriores onde ficou claro que quanto maior for o comprimento do difusor, menor será a diluição horizontal e, em consequência, maior será a concentração neste domínio. Esta é a razão pela qual o risco cresce com o aumento do comprimento do difusor.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brooks, N. H., 1960, Diffusion of Sewage Effluent in an Ocean Current. Proceeding of First International Conference on Waste Disposal in the Marine Environment. University of California, Berkeley, Pergamon, NY.
- Thomann, R. V., 1972, System Analysis and Water Quality, Environmental Science Service, NY, NY.
- Metcalf, L., and Eddy, 1979, Wastewater Engineering, McGraw Hill, Book Company.
- Fischer, H. B., (1979) - "Mixing in Inland and Coastal Waters", Academic Inc., London.
- Ganoulis, J., 1994, "Engineering Risk Analysis of Water Pollution: Probabilities and Fuzzy Sets", VCH.
- Stakhiv, E, 1986, "Risk Analysis Considerations of Dam Safety, In Engineering Reliability and Risk in Water Resources". L. Duckstein and E. J. Plate, editors.
- Bagtzoglou, A. C., A. F. B. Tompson and D. E. Doudherty, 1991, Probabilistic Simulation for Reliable Solute Source Identification in Heterogeneous Porous Medium". In: Ganoulis (ed.), Water Resources Engineering Risk Assessment, NATO, ASI Series, Vol. 29, Heidelberg, Springer - Verlag.
- Bardossy, A., I. Bogardi and L. Duckstein, 1990, "Fuzzy Regression in Hydrology. Water Resource Res. 26(7).