

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DO RISCO DE EUTROFIZAÇÃO NO RESERVATÓRIO ACARAPE DO MEIO NO ESTADO DO CEARÁ

Juliana Alencar Firmo de Araújo¹; Raquel Jucá de Moraes Sales² & Raimundo Oliveira de Souza³

RESUMO – Esta pesquisa tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia para calcular o risco de eutrofização em um reservatório, com base na Teoria *Fuzzy*, e nos mecanismos utilizados para determinação do Índice de Estado Trófico Modificado (IET_M). Para isso, foram utilizados dados de um reservatório do Estado do Ceará, especialmente nos anos de 2001 a 2006. Estes dados foram obtidos através da Companhia de Gerenciamento de Recursos Hídricos – COGERH. Para calcular o risco de eutrofização foram utilizadas funções de pertinência do Índice de Estado Trófico Modificado, transformadas de acordo com as regras dos Números *Fuzzy*. Os resultados demonstraram que o uso da Teoria dos Conjuntos *Fuzzy* pode ser uma ferramenta importante para o cálculo do risco de eutrofização em reservatórios e trazer um pouco de ajuda na Gestão dos Recursos Hídricos sobre os problemas de qualidade de água.

ABSTRACT - This research has as main subject the development of a methodology to calculate the risk of eutrophication in a reservoir, based on *Fuzzy* Theory and in the mechanisms used for the determination of the Modified Trophic State Index. To do so, it was used data from a reservoir, in the State of Ceará, especially in years 2001 through 2006. These data were obtained through the Company of Water Resources Management – COGERH. To calculate the risk it was used membership functions of the Modified Trophic State Index, which were transformed according to the rules of *Fuzzy* Numbers. The results have shown that the use of the *Fuzzy* Set Theory could be important in order to calculate the risk of eutrophication for reservoirs and introduce some help in the Water Resource Management concerning the water quality problems.

Palavras-Chave: Eutrofização; Índice de Estado Trófico Modificado; Risco *Fuzzy*.

-
- 1) Doutoranda em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará e bolsista do CAPES. Campos do Pici, CEP- 60445-760. Bloco 713. Fortaleza – Ceará. e-mail: [judiaraujo@yahoo.com.br](mailto:juliaraujo@yahoo.com.br);
 - 2) Doutoranda em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará e bolsista do CNPq. Campos do Pici, CEP- 60445-760. Bloco 713. Fortaleza – Ceará. e-mail: raqueljuca@gmail.com;
 - 3) Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Campus do Pici, Centro de Tecnologia, Bloco 713, Fortaleza – Ceará, Brasil, CEP 60445-760, Fone: (85) 3366.9771, e-mail: rsouza@ufc.br.

1 INTRODUÇÃO

Os reservatórios do Estado do Ceará, especificamente os localizados nos domínios das bacias metropolitanas, além de sofrerem os impactos causados pela própria natureza do regime climático, caracterizado pela irregularidade das precipitações no tempo e no espaço, alto poder evaporante e altas taxas de insolação durante a maior parte do ano, contribuindo decisivamente para o processo de salinização gradual, vêm sofrendo com os impactos resultantes das diversas atividades desenvolvidas ao longo de suas bacias hidrográficas, além daqueles decorrentes do uso e ocupação do solo destas áreas sem planejamento prévio (FREIRE, 2000).

A caracterização do estado trófico é quantificada por meio de variáveis que se relacionam diretamente com o processo de eutrofização, em geral “clorofila-a” (admitida como uma medida da biomassa de algas), as espécies algáceas presentes, a transparência das águas e as concentrações de nutrientes e oxigênio dissolvido (HAYDÉE, 1995). O Índice de Estado Trófico utiliza-se exatamente de algumas variáveis determinadas através de equações.

O IET de Carlson, pela sua simplicidade e objetividade, tem sido um dos mais largamente usados para classificação de lagos e reservatórios, embora tenha sido desenvolvido com base em dados de lagos e reservatórios de clima temperado. Este índice tem como variáveis a “clorofila-a”, a visibilidade do disco de *Secchi* e o fósforo (TOLEDO et al., 1984; DUARTE et al., 1997).

Esse artigo tem como objetivo estudar os aspectos de qualidade de água no Reservatório Acarape do Meio, pertencente à Bacia Metropolitana de Fortaleza, mediante a aplicação da Teoria *Fuzzy*, tentando identificar as tendências de seu estado trófico, mediante a *fuzzificação* do índice de estado trófico modificado proposto pela Companhia de Tecnologia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB).

2 METODOLOGIA

Neste trabalho uma metodologia foi desenvolvida, baseada na combinação entre as formulações dos Índices de Estado Trófico Modificado e a Teoria dos Conjuntos *Fuzzy*, para determinar o risco de eutrofização no reservatório Acarape do Meio. A metodologia proposta permite transformar esses índices em funções de pertinência e, com isso, é possível que uma avaliação do risco de eutrofização seja realizada.

2.1 Caracterização do reservatório

O açude Acarape do Meio, objeto deste estudo, faz parte da bacia hidrográfica do Rio Pacoti com área de drenagem de 210,96 km². Localizado no município de Redenção e fazendo parte do

Sistema da Bacia Metropolitana. A capacidade da barragem é 31.500.000,00 m^3 e a vazão regularizada é de 0,15 m^3/s . A cota do sangradouro é de 130,02 m e a largura de 60,00 m . A tomada d'água é do tipo galeria e o seu comprimento é de 45,00 m (COGERH, 2011).

Para monitoramento da qualidade da água do reservatório pela COGERH, foram selecionados nove pontos georeferenciados, que são monitorados periodicamente por técnicos especializados.

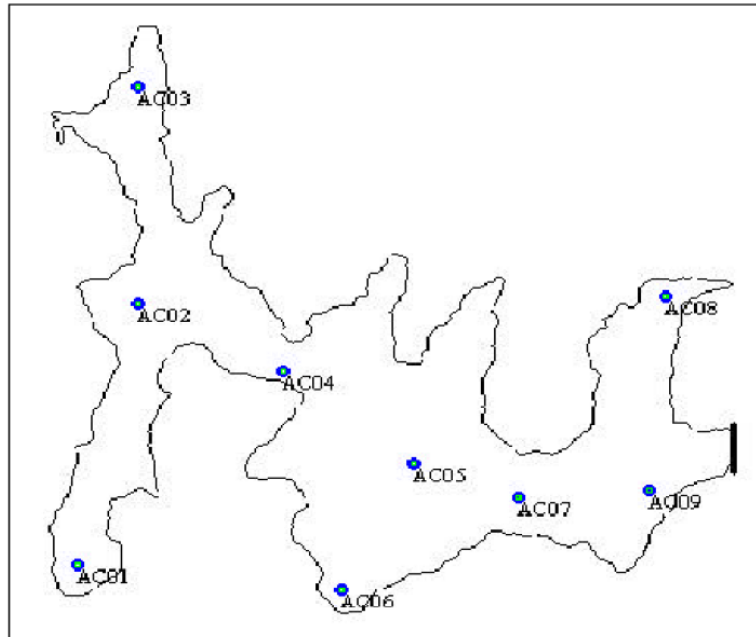


Figura 1 - Localização das coordenadas dos pontos de coleta do açude Acarape do Meio.
Fonte: COGERH, 2011.

2.2 Indicadores de qualidade

Para se estabelecer os critérios de qualidade foram usados os IET's para fósforo total, ortofosfato solúvel e clorofila-a para região semiárida, desenvolvidos por Toledo et al. (1984), que propuseram uma modificação do IET de Carlson (1977), incluindo ainda uma expressão para o ortofosfato solúvel. As equações utilizadas de 1 a 3 exprimem o Índice do Estado Trófico de Carlson Modificado (IET_M):

$$IET_M(PT) = 10 * \left[6 - \left(\frac{\ln \frac{80,32}{PT}}{\ln 2} \right) \right] \quad (1)$$

$$IET_M(CL_A) = 10 * \left[6 - \left(\frac{2,04 - 0,695 \ln CL_A}{\ln 2} \right) \right] \quad (2)$$

$$IET_M(OS) = 10 * \left[6 - \left(\frac{\ln \frac{21,67}{OS}}{\ln 2} \right) \right] \quad (3)$$

Onde:

PT = Concentrações de Fósforo Total;

CL_A = Concentrações de Clorofila-a;

OS = Concentrações de Ortofosfato Solúvel.

Foram utilizados os três índices: $IET_M (PT)$, $IET_M (CL_A)$ e $IET_M (OS)$ para o cálculo do Índice de Estado Trófico Médio (IET_M).

$$IET_M = \frac{IET_M (PT) + IET_M (CL_A) + IET_M (OS)}{3} \quad (4)$$

2.3 Teoria Fuzzy

Nos últimos anos, os métodos *fuzzy* demonstraram ser adequados para lidar com incerteza e subjetividade nas questões ambientais. A lógica *fuzzy* pode lidar com dados altamente variável, linguístico, vago e incerto ou de conhecimento e, portanto, tem a capacidade de permitir um fluxo de informações lógico, confiável e transparente de recolha de dados para uso de dados em aplicações ambientais. Tem sido utilizada para avaliar a qualidade da água através do desenvolvimento de um índice de qualidade da água com base no raciocínio *fuzzy* (DUQUE et al., 2006).

Técnicas baseadas na Teoria *Fuzzy* podem fornecer um meio para medir a intensidade de ultrapassar os limites regulamentados com a ajuda de funções de pertinência de vários níveis de qualidade da água. Ela tem sido aplicada extensivamente na classificação da qualidade da água dos recursos hídricos (CHANG et al., 2001).

A Teoria dos Conjuntos *Fuzzy* (ZADEH, 1965; ZIMMERMANN, 1985) é um método matemático usado para caracterizar e quantificar a incerteza e imprecisão nos dados e relações funcionais. Conjuntos difusos são especialmente úteis quando o número de dados não é suficiente para caracterizar a incerteza por meio de medidas padrão estatística envolvendo a estimativa de frequências.

De acordo com Ganoulis (1994) o conceito central da teoria dos conjuntos *fuzzy* é a função de pertinência que representa numericamente o grau em que um elemento pertence a um conjunto. Se um elemento pertence a um conjunto *fuzzy* em algum grau, o valor da sua função de pertinência pode ser qualquer número entre 0 e 1. Quando a função de pertinência de um elemento pode ter os valores 0 ou 1, apenas, a teoria dos conjuntos se reduz à teoria clássica dos conjuntos.

2.4 Aplicação da Teoria Fuzzy no Índice de Estado Trófico Modificado

O trabalho visa fazer uma *fuzzificação* das equações 1, 2, 3 e 4 de modo que sejam incorporadas neste modelo as incertezas provenientes de medidas de observações de campo, deformidades das amostras de água em laboratório, entre outras. Para tal, as equações do IET_M se transformaram em:

$$\widetilde{IET}_M(PT) = 10 * \left[6 - \left(\frac{\ln \frac{80,32}{\widetilde{PT}}}{\ln 2} \right) \right] \quad (5)$$

$$\widetilde{IET}_M(CL_A) = 10 * \left[6 - \left(\frac{2,04 - 0,695 \ln \widetilde{CL}_A}{\ln 2} \right) \right] \quad (6)$$

$$\widetilde{IET}_M(OS) = 10 * \left[6 - \left(\frac{\ln \frac{21,67}{\widetilde{OS}}}{\ln 2} \right) \right] \quad (7)$$

Onde:

$\widetilde{IET}_M$ = Função de pertinência do IET_M ;

$\widetilde{PT}$ = Função de pertinência para concentração de fósforo total;

$\widetilde{CL_A}$ = Função de pertinência para concentração de clorofila-a;

$\widetilde{OS}$ = Função de pertinência para concentração de ortofosfato solúvel.

A média deste Índice ($\widetilde{IET}_M$) é dada pela seguinte equação:

$$\widetilde{IET}_M = \frac{\widetilde{IET}_M(PT) + \widetilde{IET}_M(CL_A) + \widetilde{IET}_M(OS)}{3} \quad (8)$$

Essas funções são representadas de acordo com a Figura 3:

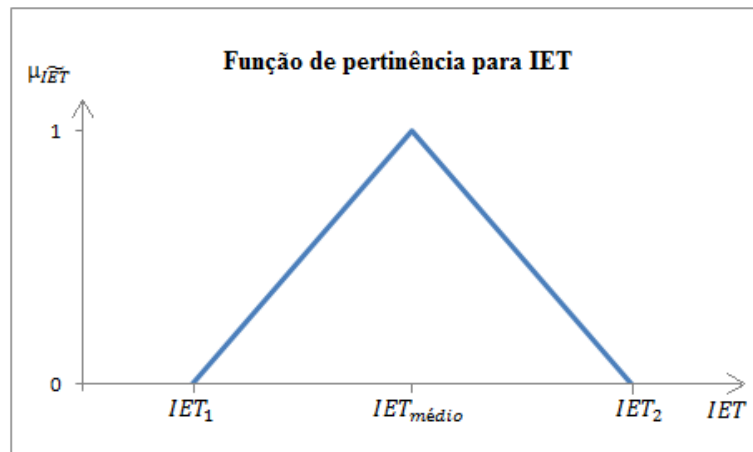


Figura 2 - Função de pertinência para IET.

2.5 Cálculo do risco

Para o cálculo do risco a metodologia *Fuzzy* prevê uma relação entre a carga poluente e uma resistência que nada mais é do que os limites estabelecidos em norma. Esses limites normalmente estabelecem as condições de qualidade do corpo hídrico. É importante observar que esta comparação é feita, na Teoria *Fuzzy*, em forma de funções de pertinência.

Se um evento, ou a realização de um perigo é descrito por meio da lógica *fuzzy*, então a confiabilidade desse evento pode ser calculado como um número *fuzzy*. Considere agora 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 do sistema ($\tilde{M}$) pode ser definida pela diferença entre a carga e resistência (SHRESTA et al., 1990). No presente estudo, a carga poluente representa as concentrações medidas no reservatório que foram *fuzzificadas*. Já a resistência representa os limites dos diferentes estágios de eutrofização do corpo hídrico. Por exemplo, no estado eutrófico a função de pertinência é representada por: [55; 64; 74], onde 64 representa o valor do parâmetro com maior grau de pertinência. Assim, nós temos duas categorias de funções de pertinência definidos por:

$$\tilde{L} = [L_L, L_M, L_U]$$

$$\tilde{R} = [R_L, R_M, R_U]$$

Onde:

$\tilde{L}$ = Função de pertinência para a carga de concentração medida;

L_L = Limite inferior da carga com grau de pertinência 0 (zero);

L_M = Valor da carga com grau de pertinência 1 (um);

L_U = Limite superior da carga com grau de pertinência 0 (zero);

$\tilde{R}$ = Função de pertinência para a resistência estabelecida por norma;

R_L = Limite inferior da resistência com grau de pertinência 0 (zero);

R_M = Valor da resistência com grau de pertinência 1 (um);

R_U = Limite superior da resistência com grau de pertinência 0 (zero).

Uma vez calculadas essas duas funções de pertinência, define-se a função marginal de segurança ($\tilde{M}$) como:

$$\tilde{M} = \tilde{R} - \tilde{L} \tag{9}$$

Como deve ser observado $\tilde{M}$ que é resultado de uma operação entre funções de pertinência também é uma função de pertinência.

É importante notar que:

- Se $\tilde{M} \geq 0 \rightarrow RF = 0$ e $GF = 1$
- Se $\tilde{M} < 0 \rightarrow RF = 1$ e $GF = 0$

Onde:

RF = Risco *Fuzzy* que representa a possibilidade de falha do sistema;

GF = Garantia *Fuzzy* que representa a segurança do sistema não falhar.

De acordo com a Teoria *Fuzzy*, o risco e a garantia são definidos por:

$$RF = \frac{\int_{-\infty}^0 \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad (10)$$

$$GF = \frac{\int_0^{+\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad (11)$$

Onde:

$\tilde{M}$ = Função marginal de segurança;

m = Números *Fuzzy* da função marginal de segurança.

Graficamente, o risco representa a área negativa dividida pela área total e a garantia representa a razão entre a área positiva e a área total.

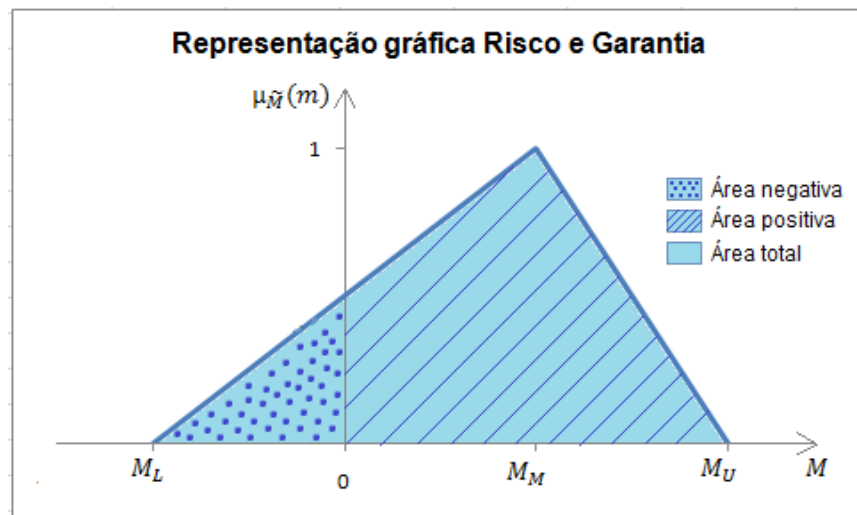


Figura 3 - Representação gráfica do risco e da garantia.

3 RESULTADOS

Neste estudo a simulação proposta permite determinar o estado trófico de um reservatório em função dos seus parâmetros de qualidade. Para tal, foram usados os dados de fósforo total, ortofosfato solúvel e clorofila-a obtidos no reservatório Acarape do Meio entre os anos de 2001 e 2002. O parâmetro tomado como base foi o Índice de Estado Trófico de Carlson Modificado desenvolvido pela CETESB. Os resultados abaixo foram calculados a partir de uma tabela no Microsoft Excel, onde cada concentração foi *fuzzificada* com um desvio de 20%, onde o valor médio representa o número *Fuzzy* com maior grau de pertinência.

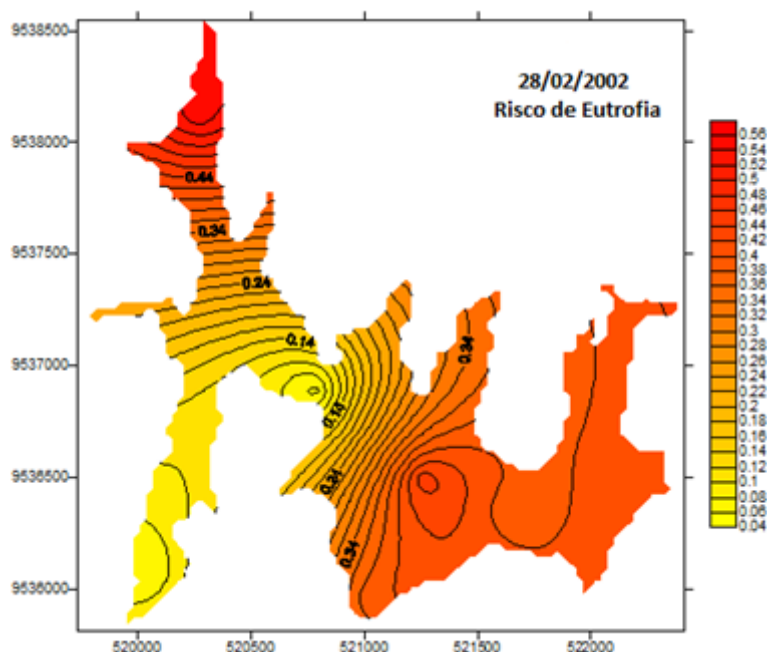


Figura 4 – Distribuição do risco de eutrofia para o reservatório Acarape do Meio, no mês de fevereiro de 2002.

No caso da Figura 4, os cálculos obtidos mostram que o risco de eutrofização aumentou mais nas proximidades da barragem, que permite concluir que o nível trófico de um reservatório tem uma dinâmica própria, que depende da época e da concentração de nutrientes no reservatório. Por exemplo, de acordo com a Figura 4, no ponto 3, o risco de eutrofização é maior que nos pontos 1 e 2 e, continua grande nos pontos 5, 6, 7, 8 e 9. Esta circunstância permite dizer que, em torno do ponto 3 temos uma entrada, o qual deve ser o ponto de grande contribuição de nutrientes proveniente do esgoto que vai para o reservatório. Além disso, neste período esta contribuição é causada pelo aumento dos fluxos devido aos primeiros eventos de chuva na bacia. Na Figura 4 observa-se que o resultado não impõe qualquer conclusão precipitada de que o sistema está com um elevado nível de eutrofização. A situação que os resultados mostram é que existe um risco, mas é importante lembrar que 50% de probabilidade de eutrofização não significa dizer que o sistema está eutrofizado.

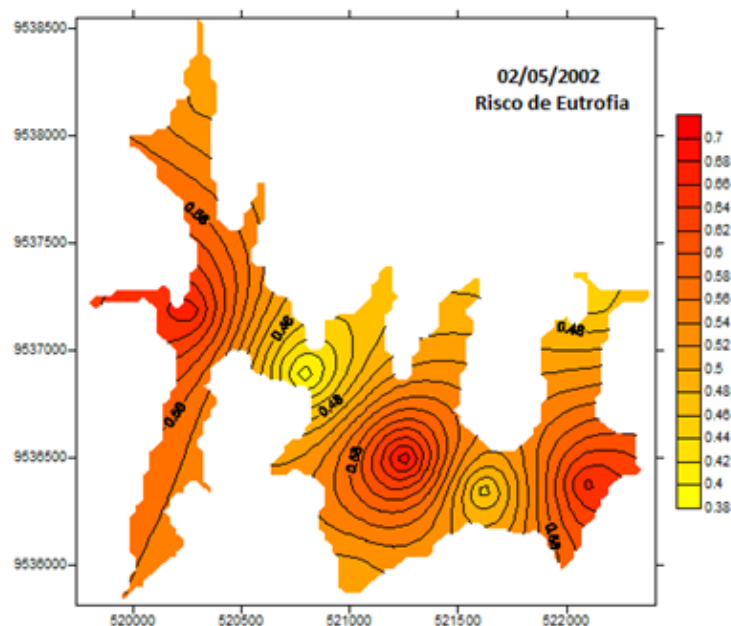


Figura 5 – Distribuição do risco de eutrofia para o reservatório Acarape do Meio, no mês de maio de 2002.

Os resultados da Figura 5 permitem afirmar que neste ano de 2002, a qualidade das águas do reservatório era mais crítica que no ano anterior. Neste caso, o risco de eutrofização para algumas áreas atingiu um nível acima dos 70%. Este resultado é confirmado através da Figura 6, quando nas proximidades da barragem o risco chegou a 86%. Do ponto de vista ambiental, este é um nível muito crítico e que merece uma atenção especial. Neste caso, há uma necessidade de um controle ambiental mais rigoroso para o aporte de nutrientes para o reservatório.

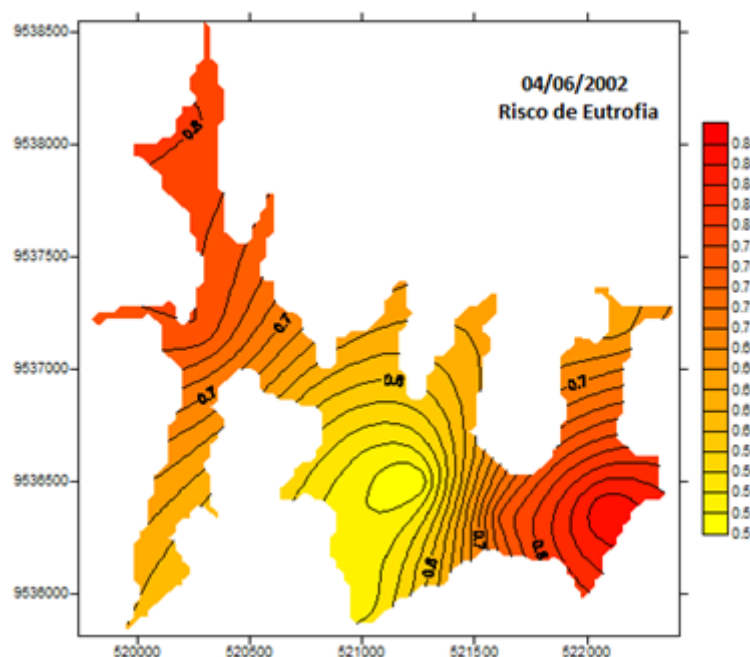


Figura 6 – Distribuição do risco de eutrofia para o reservatório Acarape do Meio, no mês de junho de 2002.

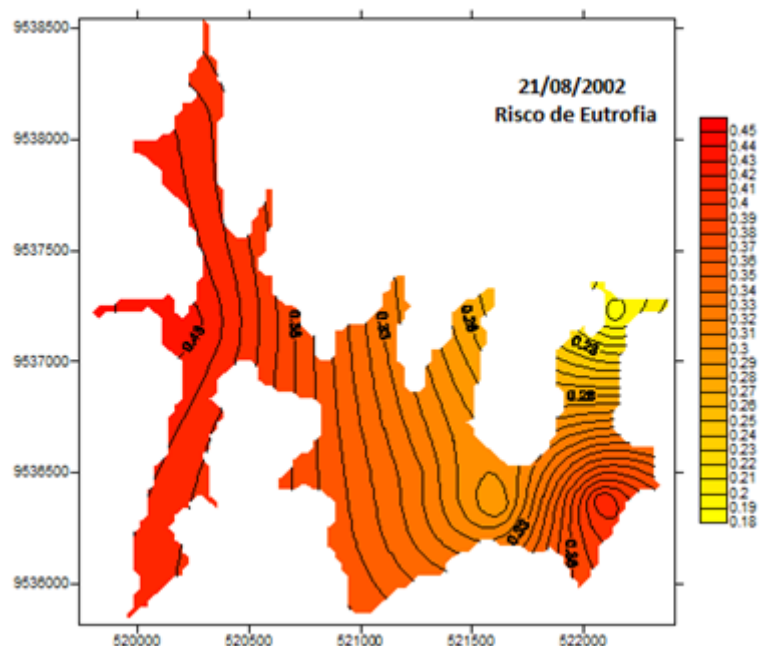


Figura 7 – Distribuição do risco de eutrofia para o reservatório Acarape do Meio, no mês de agosto de 2002.

A Figura 7 mostra que o nível trófico do reservatório melhorou no mês de agosto de 2002, onde o risco de eutrofização caiu para um intervalo entre 18% e 45%. Isto é explicado pela capacidade de diluição do reservatório nesse mês, onde ele geralmente possui o seu volume máximo e começa a reduzir a contribuição de nutrientes.

4 CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que o risco varia interiormente de ponto para ponto do reservatório, e em diferentes estações do ano. Este resultado permite dizer que, a hipótese de que os reservatórios podem ser representados como sistemas concentrados só é adequada em uma primeira análise. Em uma verificação mais precisa, as águas dos reservatórios possuem gradientes de concentração tanto no sentido longitudinal quanto no sentido transversal, mesmo para uma análise bidimensional horizontal.

A pesquisa mostrou que o risco de eutrofização é dinâmico no tempo e no espaço. Ou seja, o processo de eutrofização pode se acentuar em um período e desacelerar em outro, fazendo com que as águas daquele corpo hídrico se recuperem rapidamente.

Os resultados mostraram que esta metodologia, bem desenvolvida, pode ser uma alternativa concreta na avaliação dos campos de risco para diferentes áreas de um reservatório, permitindo assim um controle mais adequado pelos gestores de Recursos Hídricos.

BIBLIOGRAFIA

- CARLSON, R. E. A Trophic State Index for Lakes. **Limnology and Oceanography**. v.22 (2), p.361-369, 1977.
- CHANG, N. B.; CHEN, H.; NING, S. **Identification of river water quality using the Fuzzy Synthetic Evaluation approach**, J. Environ Manag, 63: 293 – 305, 2001.
- DUARTE, M. A. C. et al. Utilização dos Índices do estado Trófico (IET) e de Qualidade de Água (IQA), na Caracterização Limnológica e Sanitária das Lagoas do Bonfim, Extremóz e Jiqui (RN) - Análise Preliminar; **Anais do IXX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental: resumo dos trabalhos técnicos**, Foz do Iguaçu, 1997.
- DUQUE, W. O.; HUGUET, N. E.; DOMINGO, J. L.; SCHUHMACHER, M. **Assessing water quality in rivers with fuzzy inference systems: A case study** 2006; 32: 733-42.
- FREIRE, R. H. F. **Aspectos limnológicos de três reservatórios que abastecem a região metropolitana de Fortaleza – açudes Pacajus, Pacoti e Gavião**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2000.
- GANOULIS, J. G. **Engineering risk analysis of water pollution: probabilities and fuzzy sets**. New York: VCH, 1994.
- HAYDÉE, T. O. **Aplicação de índices de Estado Tróficos e de Qualidade de Água na Avaliação da Qualidade Ambiental de um Reservatório Artificial (Reservatório de Barra Bonita, Estado de São Paulo, Brasil)**; AIDIS – ASSOCIAÇÃO INTERAMERICANA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1995.
- SHRESTA, B.P.; REDDY, K.R; DUCKSTEIN, L. Fuzzy reliability in hydraulics. In: **Proc. First Int. Symp. on Uncertainty Mod. and Analysis**, Univ. of Maryland, College Park, 1990.
- TOLEDO, A. P.; AGUDO, E. G.; TOLARICO, M.; CHINEZ, S.J., A Aplicação de Modelos Simplificados para a Avaliação do Processo de Eutrofização em Lagos e Reservatórios Tropicais; **Anais do XIX Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental – AIDIS**, Santiago do Chile, 1984.
- ZADEH, L.A. **Fuzzy sets**. *Inform. Contr.* 8: 338-353, 1965.
- ZIMMERMANN, H. J. **Fuzzy Set Theory and its Application**. Martinus Nijhoff, Dordrecht, 363 pp., 1985.

AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos ao CNPq e a Capes, pelo suporte financeiro através de bolsa de estudo que permitem que esta pesquisa se desenvolva.