

Risco de eutrofização em reservatórios de regiões semiáridas com uso da teoria dos conjuntos difusos

Juliana Alencar Firmo de Araújo, Raquel Jucá de Moraes Sales,
Raimundo Oliveira de Souza

RESUMO: Esta pesquisa tem como principal objetivo desenvolver uma metodologia para calcular o risco de eutrofização em um reservatório, baseado na teoria dos conjuntos difusos e nos mecanismos usados para a determinação do índice de estado trófico modificado. Para tal, foram usados os dados de um reservatório no estado de Ceará, Brasil, obtidos nos anos de 2001 a 2006. Estes dados foram cedidos pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos - COGERH. Para o cálculo do risco, o índice de estado trófico modificado (IET_M) foi transformado em funções de pertinências, com base na teoria dos conjuntos difusos. Os resultados mostraram que o uso da teoria dos conjuntos difusos pode ser uma ferramenta importante para calcular o risco de eutrofização para reservatórios e, com isso, fornecer subsídios aos gestores dos recursos hídricos, na formulação de políticas públicas para o planejamento dos recursos hídricos, no que diz respeito à qualidade de água em reservatórios.

PALAVRAS-CHAVE: Eutrofização, índice de estado trófico modificado, teoria dos conjuntos difusos.

ABSTRACT: This research has as main subject the development of a methodology to calculate the risk of eutrophication in a reservoir, based on *fuzzy* set theory and the mechanisms used for the determination of the modified trophic state index (TSI_M). Thereunto, it was used data from a reservoir, in the state of Ceará, Brazil, 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, transformed according to the rules of *fuzzy* numbers. The results have shown that the use of the *fuzzy* set theory could be important tool in order to calculate the risk of eutrophication for reservoirs and bring some help in the water resource management concerning with water quality problems.

KEYWORDS: Eutrophication, modified trophic state index, fuzzy set theory.

INTRODUÇÃO

A necessidade de armazenamento de água em reservatórios artificiais se intensificou devido ao crescimento populacional e as transformações climáticas que vem ocorrendo em escala global. Por outro lado, diferentes de rios, os reservatórios estão sujeitos a diversos processos físicos, químicos e biológicos, que causam severas transformações nos aspectos da qualidade da água dos mesmos.

Um dos mais importantes fenômenos que se desenvolve nos reservatórios, e que é determinante na sua qualidade de água é a eutrofização. Sua formação é decorrente de um processo natural que ocorre em todos lagos e reservatórios, ou através da presença de

uma intervenção humana, aumentando o fluxo de nutrientes para o corpo hídrico, acelerando, assim, este processo. Sua característica principal é o crescimento exagerado de organismos aquáticos autotróficos, particularmente algas planctônicas e ervas aquáticas.

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 (IET) 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).

TABELA 1
Critérios de Estado Trófico para o Índice de Carlson

IET	Estado Trófico
< 20	Ultra-oligotrófico - corpo hídrico de baixa produtividade e de alta transparência.
21 - 40	Oligotrófico - corpos hídricos de baixa produtividade em que não ocorrem interferências indesejáveis sobre os usos da água.
41 - 50	Mesotrófico - corpos hídricos com produtividade intermediária, com possíveis implicações sobre a qualidade da água, mas em níveis aceitáveis na maioria dos casos.
51 - 60	Eutrófico - corpos hídricos com alta produtividade em relação às condições naturais, de baixa transparência, em geral afetados por atividades antrópicas, em que ocorrem alterações indesejáveis na qualidade da água e interferências nos seus múltiplos usos.
> 61	Hipereutrófico - corpos hídricos afetados significativamente pelas elevadas concentrações de matéria orgânica e nutrientes, com comprometimento acentuado nos seus usos podendo, inclusive, estarem associados a episódios de floração de algas e de mortandade de peixes, e causar consequências indesejáveis sobre as atividades pecuárias nas regiões ribeirinhas.

Fonte: TOLEDO et al. (1984).

O valor do índice de Carlson pode ser calculado separadamente para cada uma das variáveis independente, ou média aritmética dos três índices. Em corpos d'água limitados pelo fósforo ou que possuem alta turbidez mineral, os valores do índice serão diferentes para cada variável. Os critérios para o estado trófico, segundo o índice, são apresentados na tabela 1.

Outra análise realizada refere-se ao cálculo do índice de estado trófico 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 (tabela 2)

TABELA 2
Classificação do estado trófico segundo o índice de Carlson modificado

Critério	Estado Trófico
$IET \leq 44$	Oligotrófico
$44 < IET \leq 54$	Mesotrófico
$54 < IET \leq 74$	Eutrófico
$IET > 74$	Hipereutrófico

Fonte: CETESB (2002).

Esta versão do índice de estado trófico tem-se mostrado mais adequada para a determinação do estado trófico em lagos de clima predominantemente tropical, segundo Tundisi et al. (1995), Calijuri (1988) e Ceballos (1995).

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 dos conjuntos difusos, 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).

A teoria dos conjuntos difusos consiste em caracterizar e quantificar a incerteza e imprecisão nos dados e relações funcionais (ZADEH, 1965; ZIMMERMANN, 1985). Com base nesta teoria, os números reais são substituídos por conjuntos difusos, formados por funções de pertinência, em torno de um valor central, os quais admitem operações aritméticas próprias (ROSS, 1995), análogas às utilizadas com números reais. Uma operação ou um conjunto

de operações aritméticas, pela teoria dos conjuntos difusos, deve ser precedida da transformação dos números envolvidos em conjuntos difusos, o que pode ser chamado de *fuzzificação*.

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia, fundamentada em uma combinação entre as formulações dos índices de estado trófico modificado () e a teoria dos conjuntos difusos, para determinar o risco de eutrofização no reservatório Acarape do Meio, no estado do Ceará. A metodologia proposta permite que haja uma transformação desses índices em funções de pertinência e, com isso, uma avaliação do risco de eutrofização possa ser realizada.

Os resultados mostraram que esta metodologia, bem aplicada, pode ser uma alternativa concreta na avaliação dos campos de risco, para diferentes regiões de um reservatório, e para diferentes tempos, permitindo, assim, um controle mais apropriado nas gestões dos recursos hídricos.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia parte da *fuzzificação* das equações dos índices de estado trófico tanto para o fósforo total como para ortofosfato solúvel e clorofila-a. Portanto, o processo metodológico é apresentado com base nos cálculos do IET_M porém com operações da aritmética dos números difusos.

Caracterização do Açude Acarape do Meio

O açude Acarape do Meio, objeto deste estudo, faz parte da bacia hidrográfica do rio Pacoti com área de drenagem de $210,96 \text{ km}^2$. Localizado no município de Redenção e fazendo parte do sistema da bacia metropolitana. A capacidade da barragem é $31.500.000,00 \text{ m}^3$ e a vazão regularizada é de $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$. A cota do sangradouro é de $130,02 \text{ m}$ e a largura de $60,00 \text{ m}$. A tomada d'água é do tipo galeria e o seu comprimento é de $45,00 \text{ m}$ (COGERH, 2011).

O açude Acarape do Meio não é mais fonte para o abastecimento d'água tratada do sistema integrado de abastecimento d'água da região metropolitana de Fortaleza, mas este reservatório atendeu esta região até início dos anos 70.

O sistema de produção do Acarape atende o 1º distrito industrial com água bruta (vazão da ordem de $76,0 \text{ L/s}$), garante o suprimento das estações de tratamento de água (ETAs) de Guaiúba, Pacatuba, Maranguape, Redenção, Acarape, Barreira, do distrito de Antônio Diogo e da perenização do vale entre

os municípios de Redenção e Acarape (CAGECE, 2011). Quando este açude está com a capacidade de acumulação comprometida, o açude Gavião fica responsável por este abastecimento (FREIRE, 2000).

Obtenção de dados e localização dos pontos de coleta

Os dados foram obtidos a partir do estudo desenvolvido por Ribeiro (2007), onde com a ajuda da COGERH foram realizadas algumas campanhas nos anos de 2001 e 2002.

A figura 1 mostra a distribuição dos pontos no reservatório.

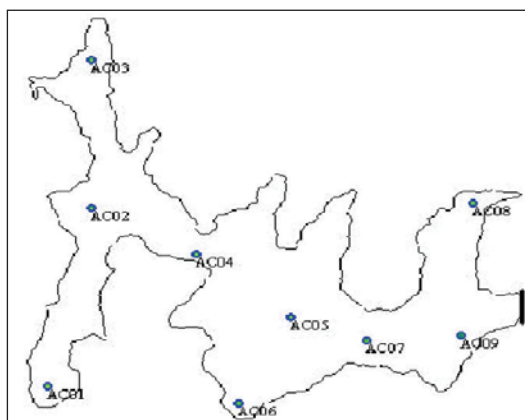







Figura 1. Localização das coordenadas dos pontos de coleta do açude Acarape do Meio.
Fonte: COGERH, 2011.

Para monitoramento da qualidade da água do reservatório pela COGERH, foram selecionados 9 pontos georeferenciados, que são monitorados periodicamente por técnicos especializados. Foram escolhidos os seguintes pontos de monitoramento no reservatório:

-  Ponto 1 – Entrada que vem de Genipapo;
-  Ponto 2 – Eixo do rio Pacoti e entrada que vem da cidade de Pacoti;
-  Ponto 3 – Entrada que vem do município de Palmácia;
-  Ponto 4 – Próximo ao ponto 5;
-  Ponto 5 – Eixo do rio Pacoti;

- ☒ Ponto 6 – Próximo à margem direita do reservatório;
- ☒ Ponto 7 – Entre os pontos 5 e 9;
- ☒ Ponto 8 – Vertedouro;
- ☒ Ponto 9 – Próximo à derivação da adutora que abastece o distrito industrial de Maracanaú.

É importante ressaltar que os pontos 1, 2 e 3 representam locais receptores d'água no reservatório em estudo. Em outras palavras, são as principais entradas que alimentam o reservatório ao longo do ano. Os pontos 2 e 3 recebem contribuições de zonas urbanas, enquanto o ponto 1 recebe contribuições de zonas rurais. O ponto 8 está localizado próximo ao vertedouro do açude. Já o ponto 9 é um ponto situado nas proximidades da barragem.

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 $IET_M(OS)$. Em seguida, foi calculada a média deste índice (IET_M).

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

Teoria dos conjuntos difusos

A teoria dos conjuntos difusos 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).

Conjuntos difusos (*fuzzy*) 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.

Nos últimos anos, os métodos *fuzzy* demonstraram ser adequados para lidar com incerteza e subjetividade nas questões ambientais.

Técnicas baseadas na teoria dos conjuntos difusos 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).

O conceito central da teoria dos conjuntos difusos 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 (ZADEH, 1965).

De acordo com os conceitos *fuzzy*, os dados foram trabalhados e *fuzzificados* com uma base de 20% para cada lado, onde a concentração central representa aquela com maior grau de pertinência de acordo com a Figura 2.

Desta forma este resultado fornece um campo de funções de pertinência para cada substância medida e para cada ponto do reservatório considerado.

Fuzzificação dos índices de estado trófico modificado

O trabalho visa fazer uma *fuzzificação* dos parâmetros medidos, e executar as equações 1, 2, 3 e 4 mediante o uso das operações aritméticas difusas, 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:

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

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

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

Onde:

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

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

\widehat{CL}_A = Função de pertinência para concentração de clorofila-a;

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

A média deste índice (\widehat{IET}_M) é dada pela seguinte equação:

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

Essas funções são representadas de acordo com a Figura 3.

Cálculo do risco

Risco é a probabilidade ou possibilidade de ocorrência de eventos, fatos ou resultados indesejáveis. Por outro lado, os eventos desejáveis ou benéficos conduzem à noção de garantia ou confiabilidade.

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 dos conjuntos difusos, 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: , onde 64 representa o valor do parâmetro com maior grau de pertinência. Assim, nós temos duas categorias de funções de pertinência definidos por:

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

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

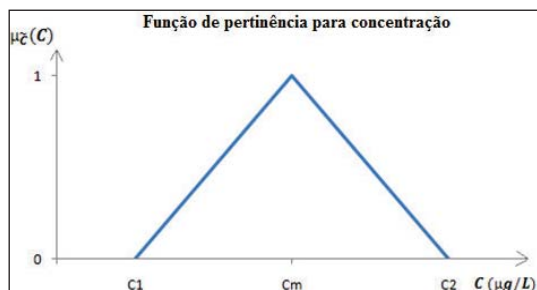


Figura 2. Função de pertinência para concentração.

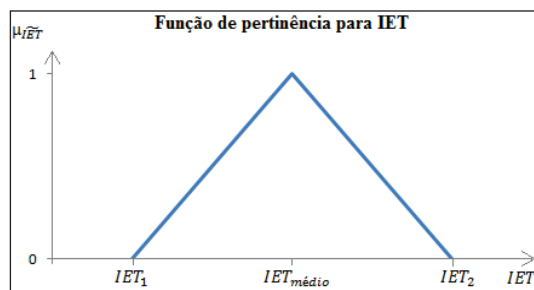


Figura 3. Função de pertinência para IET.

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:

$$\tilde{M} = \tilde{R} - \tilde{L} \quad (9)$$

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 $\tilde{M} \geq 0$ RF = 0 e GF = 1

≅ Se $\tilde{M} < 0$ 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 dos conjuntos difusos, o risco e a garantia são definidos por Ganoulis (1994), que apresentou de forma prática estes recursos com uso de funções de pertinência triangulares para uma aplicação no estudo de risco de poluição.

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

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

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.

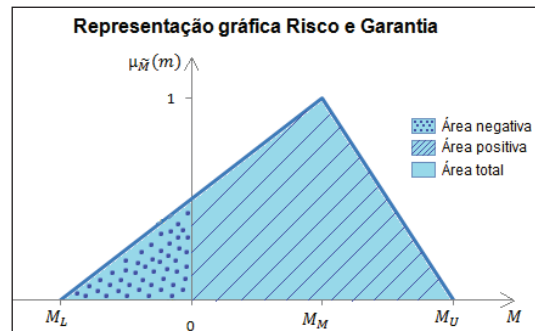


Figura 4. Representação gráfica do risco e da garantia.

ANÁLISE DOS 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.

Uma análise da Figura 5 permite mostrar que, nessa época do ano, o reservatório tem um risco alto de ser eutrofizado em quase toda a sua extensão, sendo que, nas proximidades da barragem, próximo aos pontos 7, 8 e 9 a situação é mais crítica, causando consideráveis preocupações.

Na Figura 6, os resultados mostram que o risco de eutrofização é baixo. As possíveis causas para este estado é que no mês de agosto representa um período onde os reservatórios estão com bastante

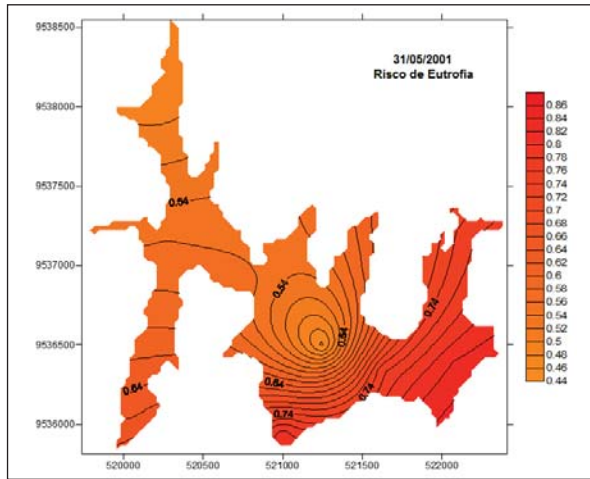


Figura 5. Distribuição do risco de eutrofia para o reservatório Acarape do Meio, no mês de maio de 2001.

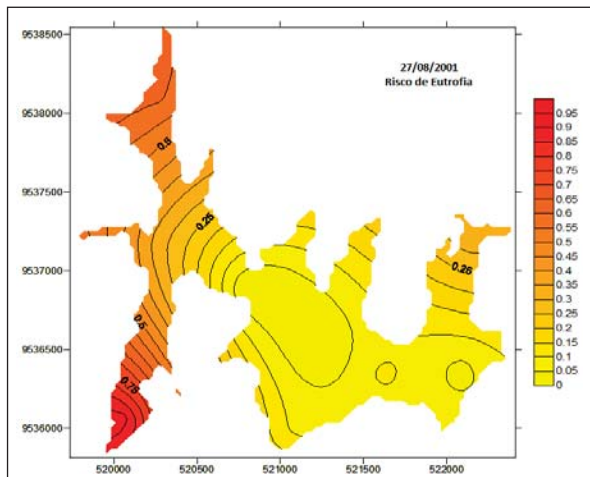


Figura 6. Distribuição do risco de eutrofia para o reservatório Acarape do Meio, no mês de agosto de 2001.

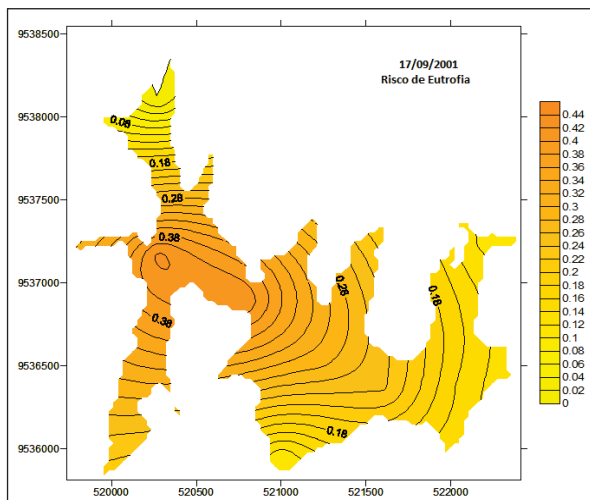


Figura 7. Distribuição do risco de eutrofia para o reservatório Acarape do Meio, no mês de setembro de 2001.

água armazenada, proveniente da estação chuvosa. É importante notar que, por exemplo, nas proximidades dos pontos 5, 7, 8 e 9, onde há um acúmulo maior de água, o risco de eutrofização é menor. Entretanto, nos pontos 1, 2 e 3, que representam as entradas no reservatório, o risco de eutrofização atingiu em torno de 90%, o que mostra uma entrada considerável de nutrientes provenientes dos efluentes das cidades a montante do reservatório.

Uma análise da Figura 7 mostra que o risco de eutrofização começa a aumentar neste período, atingindo 44% nas proximidades do ponto 2. Isso é explicado pelo fato que o processo de evaporação e do uso de água do reservatório se intensifica a partir desse mês de setembro, fazendo com que seu volume armazenado caia aumentando assim as concentrações de nutrientes. Esse resultado mostra a capacidade da metodologia proposta, onde é possível determinar o estado trófico de um reservatório em forma de análise de risco.

Na Figura 8, observa-se que o risco de eutrofização aumentou nas proximidades da barragem, o que permite concluir que o estado trófico deste reservatório tem uma dinâmica própria que depende da estação do ano e do aporte de nutrientes no reservatório. Por exemplo, de acordo com a figura,

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. Isso implica dizer que, como o ponto 3 é uma entrada, está havendo, nesse mês, um aporte maior de nutrientes proveniente dos efluentes que se encontram a montante do reservatório. De acordo com este período esse aporte é causado pelo aumento das vazões em decorrência dos primeiros eventos chuvosos na bacia.

A Figura 9 mostra que o estado trófico melhorou no mês de agosto de 2002, onde o risco de eutrofização caiu para um intervalo entre 18% e 45%. Isso é explicado pela capacidade de diluição do reservatório nesse mês, onde ele possui normalmente o seu volume máximo e começa a diminuir o aporte de nutrientes. A Figura 10 mostra que o risco de eutrofização caiu para os padrões normais, entre 0% e 24%, ou seja, o reservatório estava, nesta época, em bom estado.

A Figura 11 mostra uma situação bastante comprometida para as águas deste reservatório estudado. Como pode ser observado, o risco de eutrofização no mês de novembro de 2002 é bastante alto em toda a extensão do reservatório. Seus valores variam em todos os pontos observados e calculados acima de 44%, o que representa uma situação crítica para os padrões de qualidade de água.

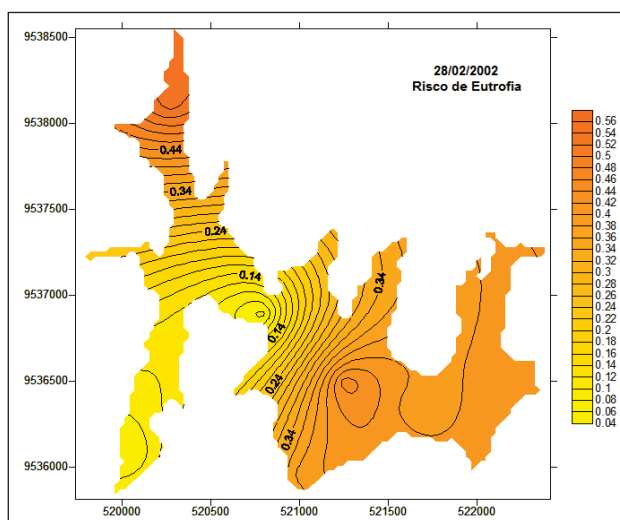


Figura 8. Distribuição do risco de eutrofia para o reservatório Acarape do Meio em fevereiro de 2002.

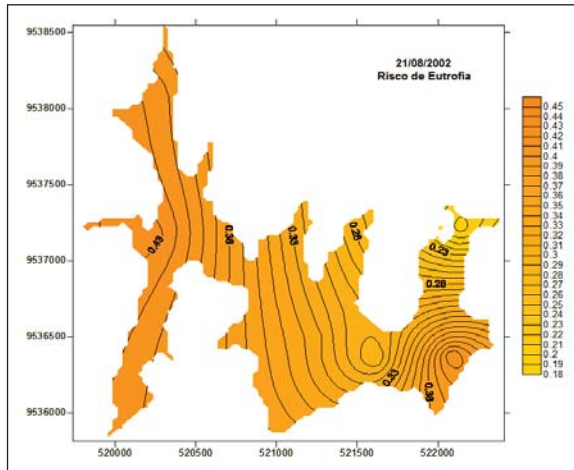


Figura 9. Distribuição do risco de eutrofia para o reservatório Acarape do Meio, no mês de agosto de 2002.

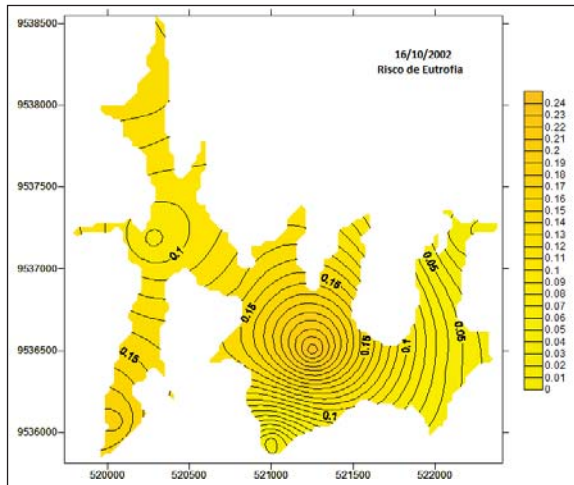


Figura 10. Distribuição do risco de eutrofia para o reservatório Acarape do Meio, no mês de outubro de 2002.

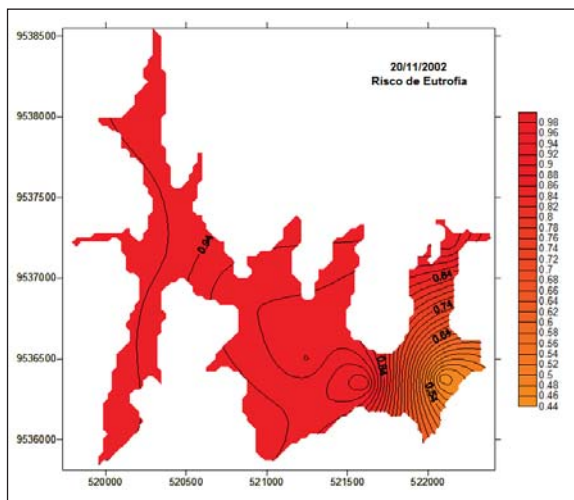


Figura 11. Distribuição do risco de eutrofia para o reservatório Acarape do Meio em novembro de 2002.

CONCLUSÕES

Uma metodologia que combina a formulação do cálculo do índice do estado trófico modificado e teoria dos conjuntos difusos pode ser usada para determinar o risco de eutrofização em reservatórios para armazenar água. Neste estudo, dados do reservatório Acarape do Meio foram usados para esta análise. Os resultados mostraram que a metodologia proposta, com base na teoria dos conjuntos difusos, aplicada nos cálculos do índice de estado trófico modificado (IET_M), mostrou-se eficiente na determinação do risco de eutrofização para os diversos pontos de coleta do reservatório Acarape do Meio.

Os resultados mostraram que o risco varia de ponto para ponto dentro 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 nas direções longitudinal como 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. Isto foi verificado no mês de maio de 2006 onde o risco de eutrofização ficou em média de 90% em toda a extensão do reservatório;

Finalmente, os resultados mostraram que o reservatório Acarape do Meio recebe muitas concentrações de nutrientes provenientes de tributários que se encontram a montante do mesmo. Este fato é explicado considerando que a montante deste reservatório podem ser encontradas algumas cidades, como é o exemplo de Pacoti, que lançam seus efluentes diretamente neste rio, causando, assim, um aumento considerável no aporte de nutrientes para o reservatório.

Referências

- CAGECE – COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO CEARÁ. Abastecimento Integrado de Água da Região Metropolitana de Fortaleza. Disponível em: http://www.cagece.com.br/abastecimento_agua_RMF.asp. Acesso em: 16/02/2011.
- CALIJURI, M. C. **Respostas fisioecológicas da comunidade fitoplanctônica e fatores ecológicos em ecossistemas com diferentes estágios de eutrofização**. Tese de doutorado. Departamento de Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 292 p., 1988.
- CARLSON, R. E. A Trophic State Index for Lakes. *Limnology and Oceanography*. v.22 (2), p.361-369, 1977.
- CEBALLOS, B. S. O. **Utilização de indicadores microbiológicos na tipologia de ecossistemas aquáticos do trópico semi-árido**. Tese de Doutorado. Instituto de Ciências Biomédicas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 192 p., 1995.
- 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.
- COGERH - COMPANHIA DE GERENCIAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS. Disponível em: www.cogerh.com.br. Acesso em: 02/02/2011.
- 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 Trófico 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.
- RIBEIRO, I. V. A. S. **Estudo do estado trófico do reservatório Acarape do Meio mediante a determinação de indicadores de qualidade de água**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.
- ROSS, Timothy J. **Fuzzy Logic with engineering applications**. Mc Graw Hill , USA, 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.

TUNDISI, J. G. & TUNDISI-MATSUMURA, T. The Lobo-Broa Ecosystem Research. In: Liminology in Brazil, Brazilian Academy of Sciences, p.219-244, 1995.

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.

Juliana Alencar Firmo de Araújo 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.

Raquel Jucá de Moraes Sales 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.

Raimundo Oliveira de Souza 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.