

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO DIFUSO DE DBO E OD PARA O ESTUDO DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO GAVIÃO, FORTALEZA/CE

Ingrid Fernandes de Oliveira Alencar¹; Camila Santiago Martins Bernardini²; Juliana Alencar Firmo de Araújo³; Maria Patrícia Sales Castro⁴; Silvia Helena Lima dos Santos⁵; Patricia Freire Chagas⁶; Karina Oliveira Chaves⁷; Raimundo Oliveira de Souza⁸; Raquel Jucá de Moraes Sales⁹

Resumo – Os recursos hídricos são fundamentais para a sobrevivência humana e para o desenvolvimento de atividades antrópicas, sendo de suma importância a busca por ferramentas que auxiliem seus usos e sua preservação. A modelagem matemática pode fornecer um resultado bem próximo da realidade, porém necessita de grandes séries de dados para que o modelo seja calibrado de maneira eficiente. Com isso, a Teoria *Fuzzy* está sendo amplamente utilizada uma vez que não necessita de muitos dados para fornecer resultados satisfatórios. Neste estudo, foi aplicado um modelo de qualidade de água no Açude Gavião, que abastece Fortaleza, empregando a teoria dos números difusos para analisar DBO e OD. Para a obtenção dos resultados, foi desenvolvido um programa computacional que permitiu a realização das simulações. Pelos resultados, observou-se que em períodos chuvosos maior será a concentração de oxigênio presente na água e, por conseguinte, menores serão as concentrações de DBO no reservatório, ocorrendo o inverso em períodos de estiagem. Constatou-se também a aplicabilidade da Teoria *Fuzzy* no cálculo dos parâmetros DBO e OD, uma vez que os dados têm valores mais prováveis e menos prováveis de ocorrência, sendo de grande valor científico e passível de fornecer resultados adequados.

Palavras-Chave – Teoria *Fuzzy*. DBO. OD.

DEVELOPMENT OF A DIFFUSED BOD AND DO MODEL FOR THE WATER QUALITY STUDY OF THE GAVIÃO, FORTALEZA / CE

Abstract – Water resources are fundamental for human survival and for the development of anthropic activities, being of utmost importance the search for tools that may help their use and their preservation. Mathematical modeling can provide a result that is very close to reality, but requires large data series for the model to be efficiently calibrated. With this, the Fuzzy Theory is being widely used since it does not require much data to provide satisfactory results. In this study, a water quality model was applied in the Gavião Dam, which supplies Fortaleza, using the diffuse number theory to analyze BOD and DO. In order to obtain the results, a computational program was developed that allowed the simulations to be performed. From the results, it was observed that in the rainy season

¹ Bolsista de Iniciação Científica da Universidade de Fortaleza (UNIFOR). E-mail: ingrid.foa@hotmail.com.

² Doutoranda em Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará. E-mail: milabernardini@yahoo.com.br.

³ Doutora em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. Professora do Centro Universitário UNICHRISTUS e professora da Universidade de Fortaleza (UNIFOR). E-mail: judiaraujo@yahoo.com.br.

⁴ Doutoranda em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. E-mail: patricia.sales@gmail.com.

⁵ Doutora em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. Professora adjunta da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB). E-mail: silvia.santos@unilab.edu.br.

⁶ Doutora em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. E-mail: pfchagas@yahoo.com.

⁷ Doutoranda em Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará. Professora do Instituto Federal de Educação Ciência Tecnologia (IFCE). E-mail: karina.oliveira@ifce.edu.br.

⁸ Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo. Professor titular da Universidade Federal do Ceará. E-mail: rsouza@ufc.br.

⁹ Doutora em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. Professora auxiliar da Universidade de Fortaleza (UNIFOR). E-mail: raqueljuca@gmail.com.

the concentration of oxygen present in the water will be higher and, consequently, the lower the concentrations of BOD in the reservoir, the reverse occurring during periods of drought. It was also verified the applicability of the Fuzzy Theory in the calculation of the parameters BOD and DO, since the data present more probable and less probable values of occurrence, being of great scientific value and likely to provide adequate results.

Keywords – Teoria *Fuzzy*. BOD. DO.

INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural de inquestionável importância para a sobrevivência dos seres vivos. É considerada renovável uma vez que se recompõe em quantidade, por meio principalmente das precipitações, além de sua capacidade em absorver poluentes. Segundo Pereira (2010), esse processo ocorre por meio do ciclo hidrológico e a água se conserva quase constante em cada bacia hidrográfica.

Com o aumento desenfreado da população nos grandes centros urbanos, houve também o aumento na demanda por água e a intensificação da contaminação dos corpos hídricos, evidenciando a necessidade do uso racional da água. Frente a essa realidade, fica evidenciado que o decréscimo da quantidade disponível dos recursos hídricos ocorre principalmente por motivo do consumo irresponsável e pela poluição dos meios aquáticos; Cândido e Santos (2000) advertem que há, a cada dia, uma crescente diminuição da quantidade de água potável disponível.

Os reservatórios se tornaram uma das principais formas de captação e abastecimento de água para os centros urbanos uma vez que conseguem armazenar grandes volumes; porém, Prado (2004), discorre que com a construção dessas obras de barramento, há um acréscimo na capacidade de armazenamento de materiais orgânicos e inorgânicos provenientes da bacia de captação, originários de fontes pontuais ou difusas, que intensificam o processo de eutrofização. A autora complementa que, em reservatórios, ocorre uma intervenção direta no funcionamento do sistema hidrológico pela própria construção dos mesmos, além do impacto indireto da atividade humana sobre os recursos hídricos, agravando o problema da degradação da água, uma vez que os rios possuem uma capacidade natural de depuração ao longo de seu curso, capacidade que é reduzida com sua barragem para a formação de um reservatório.

Mesmo com esses agravantes, diante da seca no Nordeste brasileiro, os açudes ainda são muito utilizados para abastecimento de água. Analisando mais especificamente, os reservatórios do estado do Ceará, de acordo com Freire (2000), sofrem com os impactos causados pelo regime climático semiárido característico da região, em que há irregularidade das precipitações, elevadas taxas de evaporação e de insolação durante a maior parte do ano, que contribui decisivamente para o processo de salinização gradual dos mesmos. O autor complementa que os reservatórios sofrem impactos negativos por consequência de diversas atividades desenvolvidas ao longo das bacias hidrográficas e do uso e ocupação do solo destas áreas sem planejamento prévio.

Buscando analisar e preservar os recursos hídricos, os modelos matemáticos têm sido amplamente utilizados para estudos relacionados à qualidade. Autores como Collischonn *et al.* (2011) e Fleck *et al.* (2013) reconhecem que a modelagem matemática pode prover o entendimento de processos em reservatórios, simplificando interações e fornecendo uma descrição matemática bem próxima da realidade, a partir da inclusão dos principais fenômenos de interesse. Porém, na maioria dos modelos matemáticos, cada parâmetro de estudo necessita de grandes séries de dados monitorados, para que o modelo seja calibrado de maneira eficiente e retrate a realidade do meio estudado. Assim, a Teoria *Fuzzy* consegue solucionar esses entraves devido à lógica *fuzzy* facilitar a análise dos resultados sem que haja a necessidade de extensos bancos de dados.

Com base nessas informações, este estudo analisou dados médios observados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará - COGERGH entre os anos 2000 e 2016, com enfoque nos parâmetros de concentração de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e o Oxigênio Dissolvido (OD) para a avaliação da qualidade da água do Açude Gavião, pertencente à bacia metropolitana de Fortaleza, utilizando a teoria dos números difusos.

Estudos como este poderão auxiliar na tomada de decisão de profissionais que atuam nas áreas de saneamento ambiental e recursos hídricos, bem como viabilizar estudos de implantação de novos projetos e melhorias relacionadas ao custo/benefício no tratamento da qualidade da água.

METODOLOGIA

Como auxílio metodológico, foi aplicado o modelo difuso de qualidade de água em reservatórios, desenvolvido nesta pesquisa, para analisar a DBO e o OD do açude Gavião.

O modelo foi fundamentado a partir das equações do balanço hidrológico e das equações de transporte de massa em reservatório. Uma vez definido o modelo, fez-se a transformação de suas equações para a sua forma *fuzzy*. Em outras palavras, foi estabelecido o modelo em sua forma “fuzzificada”, em que se permite avaliar o comportamento das diferentes variáveis de controle, como funções de pertinência, em que se tem um intervalo fechado e limitado, com limites inferiores e superiores conhecidos, porém, com informações de distribuição desconhecidas. Para encontrar as soluções do modelo, desenvolveu-se um programa computacional, em linguagem FORTRAN, que permite a realização das simulações.

1. Caracterização da região

O reservatório estudado foi o Açude Gavião, localizado no município de Pacatuba, Ceará, sendo o responsável pelo abastecimento de água tratada da capital Fortaleza e da região metropolitana por estar a montante da Estação de Tratamento de Água – ETA Gavião, e é originado com o barramento do Rio Cocó.

O principal sistema produtor, que abastece os municípios de Fortaleza, Caucaia, Maracanaú, e Eusébio, é o sistema integrado Gavião, cuja fonte hídrica é o conjunto de reservatórios Pacajus, Pacoti, Riachão e Gavião, integrados em série.

Segundo os dados da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos – COGERH, de 2017, o Açude Gavião possui:

- 32,9 hm³ de capacidade de armazenamento;
- 97 Km² de área da bacia hidrográfica;
- 0,62m³/s de vazão regularizada.

2. Formulação do modelo

Nesta pesquisa, serão considerados como variáveis de controle, em conformidade com o modelo de qualidade de água em reservatórios, as concentrações de DBO e de OD. Sendo assim, de acordo com os princípios já explicados, essas equações são dadas, matematicamente, da seguinte maneira:

2.1 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

$$\frac{dL}{dt} + \frac{L(Q_e + Q_t + Q_w + PA_s - E_v A_s + \forall K_r)}{\forall} = \frac{Q_e L_e + Q_t L_t + Q_w L_w + PA_s L_p + L_d \forall}{\forall} \quad (1)$$

L = Concentração de DBO [mg/L]; Q_e = Vazão de entrada [m³/s]; Q_t = Vazão do tributário [m³/s]; Q_w = Vazão do efluente [m³/s]; P = Taxa de precipitação [mm]; A_s = Área de superfície [m²]; E_v = Taxa de evaporação [mm];

K_r = Coeficiente de decaimento [dia^{-1}]; V = Volume [m^3]; L_e = Concentração de DBO na entrada [mg/L]; L_t = Concentração de DBO no tributário [mg/L]; L_w = Concentração de DBO no efluente [mg/L]; L_p = Concentração de DBO na precipitação [mg/L]; L_d = Concentração de DBO em uma fonte difusa [mg/L].

2.2 Oxigênio Dissolvido (OD)

$$\frac{dC}{dt} + \frac{C(Q_e + Q_t + Q_w + PA_s - E_v A_s + K_a A_s)}{V} = \frac{Q_e C_e + Q_t C_t + Q_w C_w + PA_s C_p + K_a A_s C_s - E_v A_s C_v - V K_d L}{V} \quad (2)$$

C = Concentração de OD [mg/L]; K_a = Coeficiente de reoxigenação [dia^{-1}]; C_e = Concentração de OD na entrada [mg/L]; C_t = Concentração de OD no tributário [mg/L]; C_w = Concentração de OD no efluente [mg/L]; C_p = Concentração de OD na precipitação [mg/L]; C_s = Concentração de OD saturado [mg/L]; C_v = Concentração de OD na evaporação [mg/L]; K_d = Coeficiente de degradação [dia^{-1}].

2.3 Déficit de Oxigênio Dissolvido (Déficit de OD)

O déficit de oxigênio no reservatório é calculado pela diferença entre o oxigênio saturado presente no reservatório e o déficit de oxigênio. Assim, tem-se:

$$D = C_s - C \quad (3)$$

D = Déficit de oxigênio [mg/L]; C_s = Saturação do Oxigênio Dissolvido [mg/l]; C = Oxigênio dissolvido [mg/L].

A concentração de saturação do Oxigênio Dissolvido (C_s) é calculada a partir da seguinte expressão matemática, Equação 3, Thomann (1989), em que T é a temperatura em Kelvin.

$$C_s = \exp(z) \quad (4)$$

$$z = -139,34411 + \frac{1,575701 \cdot 10^5}{T} - \frac{6,642308 \cdot 10^7}{T^2} + \frac{1,2438 \cdot 10^{10}}{T^3} - \frac{8,621949 \cdot 10^{11}}{T^4} \quad (5)$$

3. Solução do modelo

3.1 Demanda Bioquímica de Oxigênio

$$L = \frac{Q_e L_e + Q_t L_t + Q_w L_w + PA_s L_p + L_d V}{Q_e + Q_t + Q_w + PA_s - E_v A_s + V K_r} \quad (6)$$

3.2 Oxigênio Dissolvido

$$C = \frac{Q_e C_e + Q_t C_t + Q_w C_w + PA_s C_p + K_a A_s C_s - E_v A_s C_v - V K_d L}{Q_e + Q_t + Q_w + PA_s - E_v A_s + K_a A_s} \quad (7)$$

4. Fuzzificação do modelo

Para que um dado quantitativo se transforme em um conjunto *fuzzy*, é necessário estabelecer um intervalo fechado, com limites inferiores e superiores conhecidos. No caso do modelo de qualidade de água em reservatório, cada parâmetro do modelo deverá ser transformado em uma função de pertinência, com intervalos de confiança bem definidos, para que o modelo tenha características *fuzzy*. Para que a variável de controle se torne uma variável *fuzzy*, devem ser “fuzzificados” todos os parâmetros dessa variável, sendo assim, para cada variável de controle.

4.1 Demanda Bioquímica de Oxigênio

$$\tilde{L} = \frac{\overline{Q_e L_e} + \overline{Q_t L_t} + \overline{Q_w L_w} + \overline{P A_s L_p} + \overline{L_d \tilde{V}}}{\overline{Q_e} + \overline{Q_t} + \overline{Q_w} + \overline{P A_s} - \overline{E_v A_s} + \overline{\tilde{V} K_r}} \quad (8)$$

4.2 Oxigênio Dissolvido

$$\tilde{c} = \frac{\overline{Q_e C_e} + \overline{Q_t C_t} + \overline{Q_w C_w} + \overline{P A_s C_p} + \overline{K_a A_s C_s} - \overline{E_v A_s C_v} - \overline{\tilde{V} K_d L}}{\overline{Q_e} + \overline{Q_t} + \overline{Q_w} + \overline{P A_s} - \overline{E_v A_s} + \overline{K_a A_s}} \quad (9)$$

4.3 Déficit de Oxigênio Dissolvido

$$\tilde{D} = \tilde{C}_s - \tilde{c} \quad (10)$$

5. Composição das funções de pertinência

Neste estudo, utilizou-se a distribuição *fuzzy* triangular, em que foram estimados os valores mínimo, médio e máximo de cada parâmetro “fuzzificado”, conforme o fator de variância estabelecido em outras literaturas, como Sales (2014) e Santos (2012). Cada função de pertinência é calculada de maneira que seus extremos, valores mínimo, médio e máximo, sejam estabelecidos de forma arbitrária, ou obedecendo a alguma lógica de desvio padrão.

Foram utilizados valores de desvio padrão de 20% em que, definido o valor médio do número de base, os extremos são calculados. Assim, para o valor mínimo, o cálculo é de 0,8 do valor médio estabelecido, e o valor máximo é de 1,2. Exemplificando, tem-se, para o parâmetro DBO remanescente, a função de pertinência correspondente, Tabela 1.

Tabela 1 – Função de pertinência correspondentes ao parâmetro DBO remanescente.

DBO remanescente em x= 0	$\mu_{L_0} = \frac{L_0 - L_{0L}}{L_{0m} - L_{0L}}, \text{ para } L_{0L} \leq L_0 \leq L_{0m}$	(11)
	$\mu_{L_0} = \frac{L_0 - L_{0u}}{L_{0m} - L_{0u}}, \text{ para } L_{0m} \leq L_0 \leq L_{0u}$	

6. Programa Computacional

O programa desenvolvido para esse estudo permite a avaliação das variáveis de controle, na forma de função de pertinência e a análise de cada parâmetro do sistema, mediante a metodologia *fuzzy*. Para que isto fosse possível, foram estabelecidas um conjunto de sub-rotinas com funções bem definidas.

7. Dados para as simulações

Para os primeiros resultados do estudo da qualidade da água do Açude Gavião, mediante o modelo difuso da DBO e do OD, foram utilizados para a simulação os dados médios observados entre os anos 2000 e 2016, fornecidos pela COGERH, que estão apresentados nas Tabelas 2 e 3.

Alguns dos parâmetros do modelo foram desconsiderados, uma vez que seus valores não são determinantes nos resultados das simulações.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados no modelo.

Parâmetros do Reservatório		
Parâmetro	Valor	Unidade
Vazão de entrada no reservatório	21.000	m ³ /mês

Vazão regularizada	20.000	m ³ /mês
Vazão do efluente	15.000	m ³ /mês
Taxa de evaporação	0,6	m/mês
Temperatura	27	°C
Concentração de DBO no efluente	5.000	g/m ³
Coefficiente de decaimento (K _r)	0,3	dia ⁻¹
Coefficiente de reoxigenação (K _a)	0,87	dia ⁻¹
Coefficiente de degradação (K _d)	0,2	dia ⁻¹

Tabela 3 – Valores médio anuais de volume e área superficial de janeiro a dezembro do Açude Gavião.

Mês	Volume (m ³ /mês)	Área de superfície (m ² /mês)
Janeiro	27.451,67	5.407.771
Fevereiro	27.248,35	5.389.014
Março	27.461,51	5.408.313
Abril	28.330,72	5.521.370
Mai	27.377,08	5.401.271
Junho	26.961,93	5.366.330
Julho	26.628,15	5.341.248
Agosto	26.768,79	5.351.816
Setembro	26.820,07	5.355.670
Outubro	27.193,25	5.386.181
Novembro	26.896,19	5.361.390
Dezembro	27.048,37	5.372.826

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das simulações feitas com o uso do programa computacional, desenvolvido para esta pesquisa, foram analisados os seguintes resultados: o comportamento das concentrações de DBO e OD do Açude Gavião ao longo do ano, Figura 1, o comportamento do OD na sua forma *fuzzy*, Figura 2, e a representação da concentração do OD como função de pertinência, Figura 3.

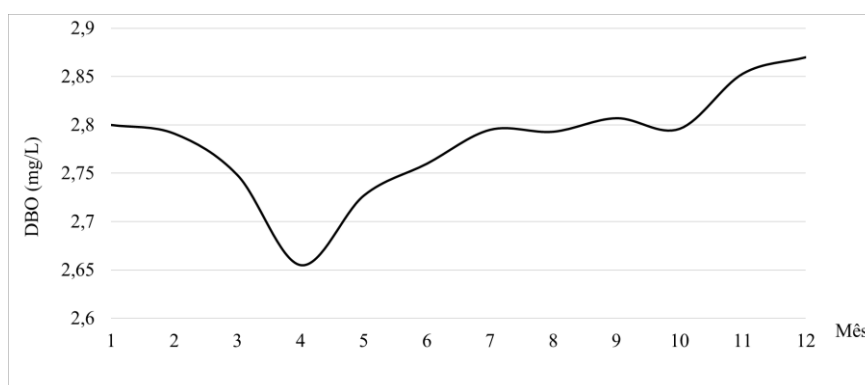


Figura 1 – Comportamento das concentrações de DBO ao longo do ano.

Pela Figura 1, observa-se que a DBO tem concentrações baixas ao longo do ano, sendo a maior delas em dezembro, com valores aproximados de 2,853 mg/L, e a menor, com valores aproximados de 2,65 mg/L. Observa-se, ainda, que as concentrações de DBO no Açude Gavião são menores entre os meses de março a agosto dos anos considerados, período chuvoso do estado do Ceará, inverso do que ocorre com o OD, Figura 2. Isto é explicado pelo fato de que, durante esses meses, há uma maior

entrada de água no reservatório causada pela estação chuvosa. Isto faz com que o efeito da diluição das concentrações de DBO seja mais intenso. Dessa forma, há uma melhora nas características tróficas do reservatório.

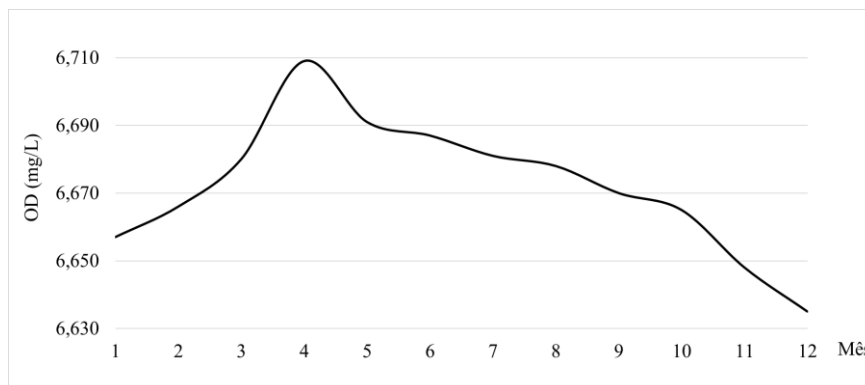


Figura 2 – Comportamento das concentrações de OD ao longo do ano.

Ao observar a Figura 2, pode-se ver que o maior valor médio de OD presente no reservatório é 6,71 mg/L, e o menor é, aproximadamente 6,40 mg/L. O oxigênio dissolvido é um parâmetro indispensável para os organismos vivos, especialmente os peixes, em que a maioria das espécies não resiste a concentrações inferiores a 4,0 mg/L de OD. Assim, uma redução de OD no reservatório pode interferir significativamente em suas condições ambientais.

O comportamento do OD pode ser visualizado na sua forma *fuzzy*, Figura 3, cujos valores com grau de pertinência zero são aqueles com menor possibilidade de ocorrência, enquanto que aqueles próximos ao grau de pertinência 1 têm maior possibilidade de ocorrência. Esses resultados ilustram a eficácia do programa computacional e suas possibilidades para o desenvolvimento de metodologias de índices de risco de falhas.

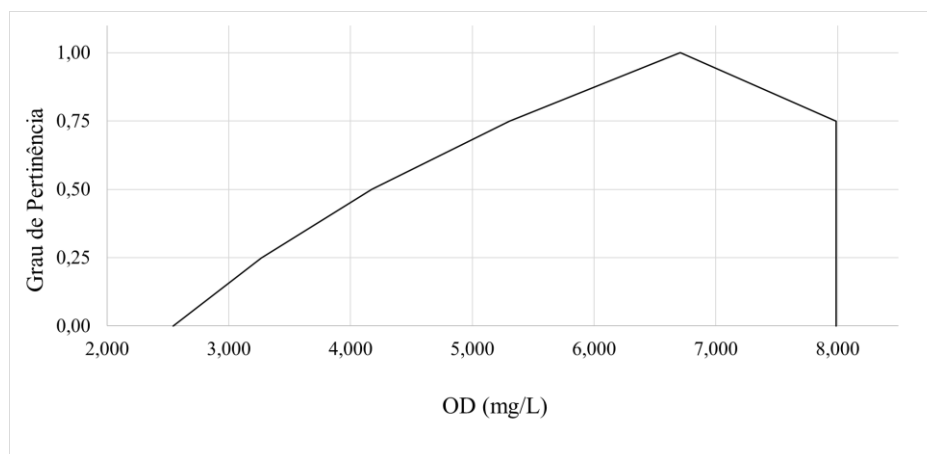


Figura 3 – Oxigênio Dissolvido, na sua forma *fuzzy*, no mês de abril.

CONCLUSÃO

Os resultados gerados a partir da aplicação do modelo de qualidade de água no Açude Gavião, reservatório que abastece a cidade de Fortaleza, aplicando-se a teoria dos números difusos, possibilitaram observar que, em períodos chuvosos, maior será a concentração de oxigênio presente na água e, por conseguinte, menores serão as concentrações de DBO, diferentemente do que ocorre em períodos de estiagem, uma vez que a DBO aumenta significativamente, comprometendo as concentrações de OD no reservatório.

Viu-se também que a Teoria *Fuzzy*, no cálculo dos parâmetros DBO e OD, é eficiente, principalmente em estudos em que há dificuldade de determinar os valores dos parâmetros envolvidos no sistema de forma precisa. Os dados do modelo, utilizando esta teoria, são inseridos em forma de nuvem, valores nebulosos, em que há valores mais prováveis e menos prováveis de ocorrência. Por esse motivo, utilizar esta lógica matemática como proposta de estabelecer um indicador ambiental facilitador de tomada de decisão é de grande valor científico, e, pelos resultados apresentados, viu-se que é possível serem feitas simulações com esses objetivos.

REFERÊNCIAS

CEARÁ. *Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos*. Disponível em: www.cogerh.com.br. Acesso em: 7 de abril de 2017.

CÂNDIDO, A.; SANTOS, S. H₂O: o símbolo da vida. *AbasteCE*, Fortaleza, v. 2, n. 6, p. 8-11, abr./jun. 2000.

COLLISCHONN, B.; PAIVA, R.C.D.; COLLISCHONN, W.; MEIRELLES, F.S.C.; SCHETTINI, E.B.C.; FAN, F.M. *Modelagem Hidrológica de Uma Bacia com Uso Intensivo de Água: Caso do Rio Quaraí-RS*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol.16, n.4, p. 119-133, 2011.

FLECK, L.; TAVARES, M.H.F.; EYNG, E. *Especificidades e importância de modelos matemáticos de qualidade da água*. Revista EIXO, Brasília, DF, vol. 2, n. 1, p. 106-119, 2013.

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.

PEREIRA, A.A. *Avaliação da qualidade da água: Proposta de um novo índice alicerçado na Lógica Fuzzy*. 171 p. Tese (Doutorado). Ciências da Saúde, Universidade de Brasília, Brasília. 2010.

PRADO, R.B. *Geotecnologias aplicadas à análise espaço-temporal do uso e cobertura da terra e qualidade da água do reservatório de Barra Bonita, SP, como suporte à gestão de recursos hídricos*. 172 p. Tese (Doutorado). Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2004.

SALES, R.J.M. *Aplicação da Lógica Fuzzy no modelo de Streeter-Phelps para analisar o risco de contaminação das águas de rios, considerando múltiplos processos e múltiplos lançamentos*. 117 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2014.

SANTOS, S.H.L. *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*. 104 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2012.

THOMANN R.V. *Bioaccumulation model of organic chemical distribution in aquatic food chains*, *Environ. Sci. Techno*. 1989.