



DESENVOLVIMENTO DE UM ESTUDO PARA CONCESSÃO DE OUTORGA DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES EM RIOS NATURAIS COM BASE NO MODELO DE STREETER-PHELPS.

Juliana Alencar Firmo de Araújo¹; Raquel Jucá de Moraes Sales²; Eveline Vale de Andrade Lima³; Vanessa Ueta Gomes⁴ & Raimundo Oliveira de Souza⁵.

RESUMO – Este trabalho trata do desenvolvimento de uma metodologia com base no modelo matemático de Streeter-Phelps para analisar as relações pertinentes entre a vazão de um rio natural e sua capacidade de receber cargas poluentes, em função de um enquadramento de qualidade de suas águas previsto para cada tipo de uso. Considerando as características do modelo foi utilizado como referência para análise as concentrações de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) presente nos efluentes, bem como as concentrações de Oxigênio Dissolvido (OD) presente nas águas do rio em estudo, e os coliformes fecais. Os resultados mostram que em regiões semiáridas, como é o caso do Nordeste Brasileiro, para alcançar as condições ideais para rios de classe especial há necessidade de um tratamento prévio ao lançamento, de modo que impactos severos venham ser evitados.

ABSTRACT – This present work aimed at developing a methodology based on Streeter-Phelps model to analyze the pertinent relationships between the flow of a natural river and its capacity of receiving pollutant loads, according to a framework of quality of its waters provided for each use type. Considering the technical features of the model, this analysis used the Biochemical Demand of Oxygen (BDO) concentrations in the effluents, as well as the Dissolved Oxygen (DO) concentrations and the fecal coliforms in the studied rivers. The results show that to reach the ideal conditions for special class rivers in the semiarid areas, as Brazilian Northeast, there is a necessity of a previous treatment of the release so that severe impacts can be avoided.

Palavras-Chave – Concessão de outorga; Modelo Streeter-Phelps; Depuração de Rios.

-
- 1 Doutoranda em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará e bolsista da CAPES. Campus do Pici, CEP- 60445-760, Bloco 713, Fortaleza – Ceará, Brasil, e-mail: [judiaraujo@yahoo.com.br](mailto:juliaraujo@yahoo.com.br);
 - 2 Doutora em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará e bolsista PNPd-CAPES. Campus do Pici, CEP- 60445-760, Bloco 713, Fortaleza – Ceará, Brasil, e-mail: raqueljuca@gmail.com;
 - 3 Mestre em Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará. Campus do Pici, CEP- 60445-760, Bloco 713, Fortaleza – Ceará, Brasil.
 - 4 Doutora em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará. Campus do Pici, CEP- 60445-760, Bloco 713, Fortaleza – Ceará, Brasil, e-mail: vanessa_ueta@yahoo.com.br;
 - 5 Professor PhD - 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 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As questões relacionadas com os recursos hídricos acompanham a evolução científica e tecnológica desde os primórdios das civilizações. Naquela época a grande preocupação se limitava à condição de conseguir água disponível nas residências. Com o passar do tempo e com o aumento das populações começaram a surgir novos desafios. Era necessário planejar e buscar novos mananciais. Assim, surgiu a gestão dos recursos hídricos.

Com a explosão demográfica associada com uma forte degradação ambiental, em especial dos corpos hídricos, os gestores, técnicos e políticos começaram a pensar em uma legislação capaz de estabelecer um controle mais amplo do uso desses recursos, tanto do ponto de vista de quantidade como qualidade. Com isso, surgiram os instrumentos de gestão, um conjunto de regras a nível nacional e estadual, que permite estabelecer normas de disciplinamento para esses usos.

Dentre os vários instrumentos de gestão, a concessão de outorga para lançamentos de efluentes representa um dos mais importantes meios de controle de qualidade hidroambiental. Atualmente, estudos envolvendo técnicas de lançamentos de efluentes, tanto para rios como para reservatórios, têm tido um desenvolvimento promissor, tentando garantir aos gestores uma maior segurança em suas decisões.

Para entender melhor o que é outorga vale lembrar sua definição, um ato administrativo pelo qual o poder público (outorgante) permite ao outorgado o direito do uso de um recurso hídrico por um prazo determinado, nos termos e condições explícitas no respectivo ato administrativo. Na expedição deste ato há uma necessidade explícita do poder público de conhecer *a priori* as reais condições e potencialidade de cada corpo hídrico de receber uma determinada carga, ou se destinar para determinado uso por um período de tempo, sem sofrer danos ou impactos que venha a comprometer sua qualidade ambiental.

Este trabalho apresenta uma metodologia com base no modelo matemático de Streeter-Phelps, permitindo o cálculo da vazão de diluição para vários cenários de lançamentos de efluentes mantendo um rio natural dentro dos padrões de qualidade estabelecidos pela legislação existente. O estudo considerou como substâncias-padrão para análise: a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), o oxigênio dissolvido (OD), e os coliformes fecais.

Os resultados mostram que a metodologia proposta pode ser uma alternativa consistente para uma primeira análise dos gestores dos recursos hídricos em um processo de concessão de outorga de lançamento de efluente em rios naturais.

2 - METODOLOGIA

O sistema de apoio à análise de solicitação de outorga de lançamento de efluente com matéria orgânica se baseia no cálculo da vazão apropriada para diluição de efluentes, ou seja, na vazão necessária para diluir o efluente mantendo o padrão de qualidade do corpo receptor na classe de enquadramento.

Para alcançar os objetivos do estudo aplicou-se em um rio a equação de Streeter Phelps, capaz de simular a capacidade de diluição do mesmo para diferentes lançamentos de efluentes. Como parâmetros de avaliação da capacidade de depuração do rio foram utilizados importantes indicadores de poluição hídrica: DBO, OD, e a presença de coliformes fecais. Foi usada como referência a classificação dos rios segundo a Resolução CONAMA 357 de 17 de março de 2005.

2.1 - Demanda Bioquímica de Oxigênio *versus* Tempo (DBO x t)

Primeiramente, verificou-se o comportamento da DBO que tem como unidade mgO_2/L . O modelo analisa matematicamente como o consumo de oxigênio progride com o tempo.

Pela integração da taxa de remoção de DBO temos:

$$L = L_o e^{-k_d t} \quad (1)$$

$$\frac{L}{L_o} = e^{-k_d t} \quad (2)$$

Neste trabalho foi adotado:

$$\partial(n) = \frac{L}{L_o} = e^{-k_d t} \quad (3)$$

Onde:

L – Concentração de DBO (mg/L);

t – Tempo (d);

k_d – Coeficiente de remoção de DBO efetiva no rio (d^{-1});

L_o – Concentração da DBO ao final da estabilização, ou DBO remanescente em $t = 0$ (mg/L).

Vale ressaltar que L_o é a demanda última, ou a DBO remanescente no ato da mistura em $t = 0$ dia, ou a DBO exercida para $t = \infty$, ou seja, a quantidade de oxigênio necessário para estabilizar toda a matéria orgânica.

2.2 - Oxigênio Dissolvido *versus* Tempo ($OD \times t$)

No segundo momento foi analisado o comportamento da concentração do OD com o passar do tempo.

$$C_t = C_s - \left\{ \left(\frac{k_d L_o}{k_2 - k_d} \right) (e^{-k_d t} - e^{-k_2 t}) + (C_s - C_o) e^{-k_2 t} \right\} \quad (4)$$

$$C_s = 14,652 - 4,1022 \times 10^{-1} T + 7,9910 \times 10^{-3} T^2 - 7,7774 \times 10^{-5} T^3 \quad (5)$$

$$L_o = \frac{Q_r C_r + Q_{ef} C_{ef}}{Q_r + Q_{ef}} \quad (6)$$

Onde:

C_t – Concentração de OD em um determinado instante (mg/L);

C_s – Concentração de saturação do gás na massa líquida do rio quando em equilíbrio (mg/L);

k_2 – Coeficiente de reaeração (d^{-1});

C_o – Concentração inicial de OD, logo após a mistura (mg/L);

T – Temperatura da água do rio ($^{\circ}C$);

Q_r – Vazão do rio (m^3/s);

C_r – Concentração do constituinte no rio, logo a montante do ponto de mistura (mg/L);

Q_{ef} – Vazão do efluente (m^3/s).

C_{ef} – Concentração do constituinte no efluente, logo a montante do ponto de mistura (mg/L);

2.3 - Coliformes fecais *versus* Tempo

O terceiro passo foi analisar o comportamento da concentração dos coliformes fecais e seus impactos no manancial em um determinado intervalo de tempo. O efluente foi simulado com presença de coliformes fecais sendo lançado diretamente no rio, advindo de esgotos domésticos, sem tratamento algum deste resíduo líquido.

Pela integração da taxa de remoção bacteriana temos:

$$C = C_i e^{-k_b t} \quad (7)$$

$$\frac{C}{C_i} = e^{-k_b t} \quad (8)$$

Neste trabalho foi adotado:

$$\partial'(n) = \frac{C}{C_i} = e^{-k_b t} \quad (9)$$

Onde:

C – Número de coliformes em um determinado tempo ($NMP/100mL$);

C_i – Número de coliformes no ponto inicial, logo após a mistura ($NMP/100mL$);

k_b – Coeficiente de decaimento bacteriano (d^{-1});

t – Tempo (d).

2.4 - Resistência versus Tempo (ϕ x t)

Foi realizada uma análise da resistência do rio representada por ϕ . Quando a resistência for negativa ($\phi < 0$) significa que o sistema falha e não há possibilidade da concessão de outorga.

Observa-se que:

$$\phi = \frac{C_t - C_{perm}}{C_{perm}} \quad (10)$$

Onde:

C_{perm} – Concentração de OD permissível (mg/L).

3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Aplicando-se o modelo clássico de OD de Streeter-Phelps e o modelo de coliformes fecais em cursos d'água foram verificados resultados relevantes sobre os aspectos de poluição das águas quanto à concessão ou não de outorgas de lançamento de efluentes, como também a necessidade ou não do incremento de tratamento dos efluentes.

No instante $t = 0$ dia, a DBO remanescente é total, já que esta se encontra no ponto de lançamento enquanto a DBO exercida (oxigênio consumido) é zero, pois ainda não se iniciou a estabilização da matéria orgânica. Com o passar do tempo, esses valores vão se invertendo, a DBO remanescente vai diminuindo até desaparecer por completo a medida que a matéria orgânica vai se decompondo, e a DBO exercida vai aumentando a medida em que o consumo de oxigênio crescendo, até chegar a seu valor máximo. A DBO exercida é conhecida como demanda última, já que esta representa o consumo total de oxigênio necessário para a estabilização de toda a matéria orgânica.

Os gráficos analisados neste trabalho representam a DBO remanescente cuja cinética de reação é representada por uma reação de primeira ordem.

Primeiramente, verificou-se o comportamento da DBO. O modelo analisou matematicamente como o consumo de oxigênio progredia com o tempo. Adotou-se $k_d = 0,5 d^{-1}$ (base e, $20^\circ C$) como valor para rio raso e recebendo esgoto bruto concentrado.

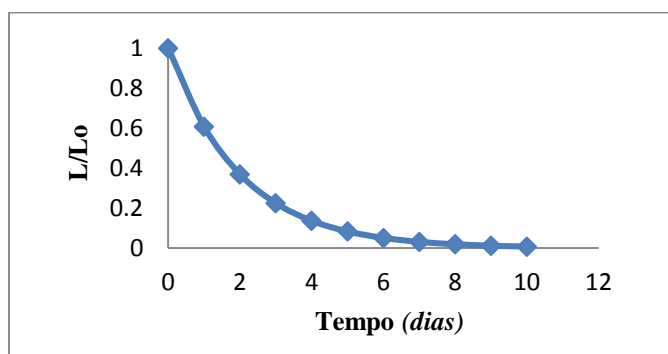


Figura 1. Variação da concentração da DBO com o tempo.

Como mostra a figura 1, com o passar do tempo o OD é consumido para a estabilização da matéria orgânica. Logo, após certo tempo, a DBO vai sendo reduzida pela decomposição diminuindo a taxa de reação em decorrência da menor concentração de matéria orgânica. Este resultado mostra a relação da DBO com o tempo de detenção hidráulica no rio.

A figura 2 mostra a variação da concentração de OD em função do tempo decorrente do lançamento anteriormente definido.

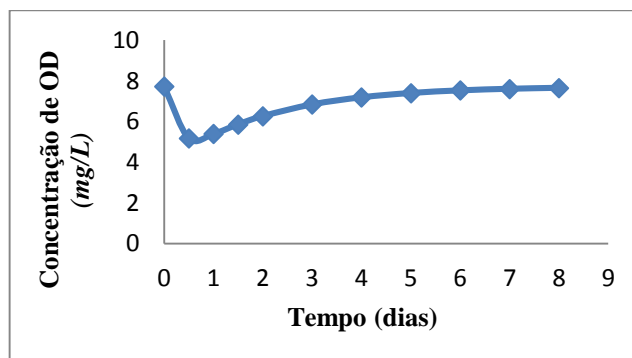


Figura 2. Variação da concentração do OD com o tempo.

Observa-se que no ponto de lançamento em $t = 0 dia$, a concentração de OD é igual a $8 mg/L$, sendo máximo, uma vez que o sistema aquático até então não havia sido perturbado. Com o passar do tempo há um consumo deste oxigênio devido à decomposição da matéria orgânica presente no esgoto lançado no sistema chegando a seu ponto crítico em $0,5 dia$, cujo valor é mínimo e igual a 5

mg/L. Após este tempo, as concentrações de OD voltam a se elevar ainda no primeiro dia retomando seu valor inicial próximo ao oitavo dia. Este resultado de OD em 0,5 *dia* é fundamental para análise da concessão de outorga.

O terceiro passo foi analisar o comportamento da concentração dos coliformes fecais e seus impactos no manancial cujo efluente foi simulado com presença de coliformes. Neste caso, o lançamento ocorreu diretamente no rio advindo de esgotos domésticos sem tratamento algum deste resíduo líquido. Adotou-se nesta pesquisa $k_b = 1,0 d^{-1}$ baseado em estudos realizados por Arceivala, 1981; U.S.EPA, 1985; Thomann e Mueller, 1987.

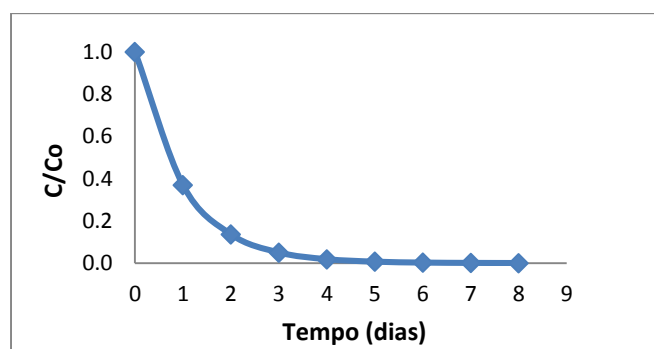


Figura 3. Concentração de coliformes fecais com o tempo.

A figura 3 mostra o perfil de coliformes fecais ao longo do tempo. Percebe-se que em $t = 0$ *dia*, a concentração de coliformes fecais é máxima, já que tal instante é imediatamente após o lançamento. Entretanto, com o passar do tempo essa concentração diminui em decorrência de vários fatores, entre eles as condições ambientais, pois fora do intestino humano esses coliformes não conseguem se desenvolver normalmente nem se reproduzir. Outros fatores como luz solar, sedimentação e temperatura da água desfavorecem o seu desenvolvimento, assim como fatores biológicos e físico-químicos como pH, toxicidade, falta de nutrientes, predação, entre outros.

Logo, a concessão da outorga deve ser analisada no ato da mistura, onde sua concentração é crítica. Essa concentração crítica não implica necessariamente em contaminação das águas. Entretanto, sua presença é fator fundamental para um alerta que o efluente pode conter agentes transmissores de doenças. Assim, o entendimento do enquadramento de usos preponderantes dos recursos hídricos é muito importante, pois águas destinadas a balneabilidade, abastecimento de água e irrigação não podem receber esgotos domésticos, suscetíveis a presença de agentes transmissores de doenças.

Outra simulação foi realizada para verificar o comportamento da vazão de diluição para diferentes classes do rio em função das concentrações de lançamento. É importante verificar como se comporta a vazão de diluição de um rio à medida que se aumenta a concentração de lançamento.

Inicialmente foi analisado o comportamento para a DBO. A concentração da DBO no efluente foi variada como mostra a figura 4. Fixou-se novamente $t = 0$ dia, resultando em $L/L_0 = 1$, e foi considerado $C_r = 0,5 \text{ mg/L}$; $Q_{ef} = 2 \text{ m}^3/\text{s}$ e $k_b = 0,5 \text{ d}^{-1}$.

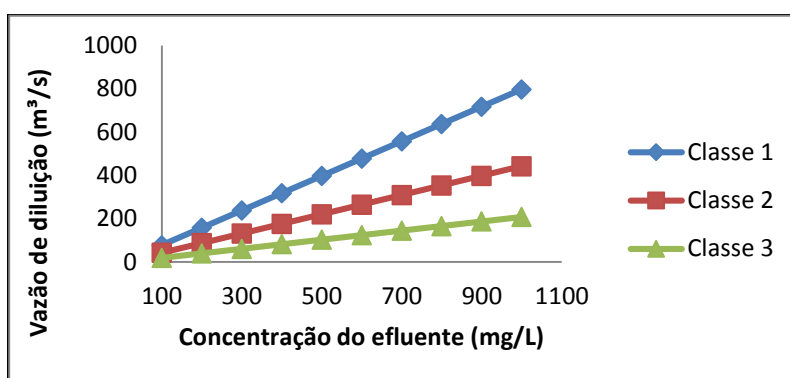


Figura 4. Variação da vazão de diluição em função da concentração do efluente.

Na figura 4 pode-se verificar que a vazão de diluição varia linearmente com a concentração do efluente. Para classes especiais, como a classe 1, há uma demanda maior por uma vazão no rio para que a diluição seja garantida. Este resultado mostra que rios com baixa vazão não devem ser usados para lançamentos de efluentes sem que o efluente passe por um severo processo de tratamento. Neste caso, percebe-se que quando há um aumento da concentração do constituinte no efluente, no caso DBO, o rio necessita de uma maior vazão de diluição a fim de que o curso d'água não sofra um impacto prejudicial a sua vida aquática. Por isso, a concessão de outorga exigirá uma menor concentração do constituinte no efluente, caso a vazão do manancial seja pequena. A classe 3 é menos restritiva, ou seja, segundo a resolução específica limita-se a DBO em 10 mg/L , logo a vazão de diluição tende a ser bem inferior do que a vazão de diluição necessária para atender a classe 1 que exige uma concentração mínima de 3 mg/L .

Em seguida foram realizadas algumas simulações para verificar o comportamento do parâmetro de resistência de um rio. Como foi mencionado anteriormente, este parâmetro tem um comportamento semelhante ao comportamento do OD definido no modelo de Streeter-Phelps, a diferença é que se ele ficar negativo indica que o lançamento de efluente, notadamente a DBO, está na capacidade do rio. Desta forma, é fácil identificar até onde pode ser concedida licença para outorga de lançamento. Neste

caso foi adotado: $C_r = 0,5 \text{ mg/L}$; $Q_r = 20 \text{ m}^3/\text{s}$; $C_{ef} = 300 \text{ mg/L}$; $Q_{ef} = 2 \text{ mg/L}$; $k_d = 0,5 \text{ d}^{-1}$; $k_2 = 4 \text{ d}^{-1}$; $T = 28 \text{ }^\circ\text{C}$; $C_o = C_s = 7,723489 \text{ mg/L}$ e $L_o = 27,72727 \text{ mg/L}$.

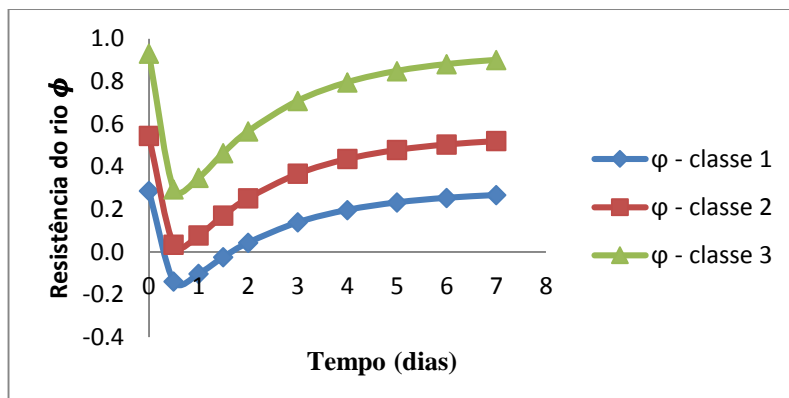


Figura 5. Valores do parâmetro ϕ para diferentes classes em função do tempo.

Na figura 5 percebe-se que para o lançamento realizado, os usos de classes 1 e 2 não são atendidos pela legislação em vigor. Considerando a vazão do rio, somente o rio de classe 3 poderia ser atendido. Assim, conclui-se que este parâmetro se apresenta como uma alternativa consistente para estudar possíveis concessões de outorga de lançamento.

Um novo experimento foi realizado considerando $Q_r = 2 \text{ m}^3/\text{s}$, e $Q_{ef} = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Os novos resultados são bastantes críticos como mostra a figura 6. Neste caso, o rio falha para todas as classes usos. É importante notar que, como este parâmetro é função do OD, fica claro que as concentrações de OD ficam bem abaixo das concentrações permitidas, o que provoca um sério impacto para a vida aquática deste corpo hídrico.

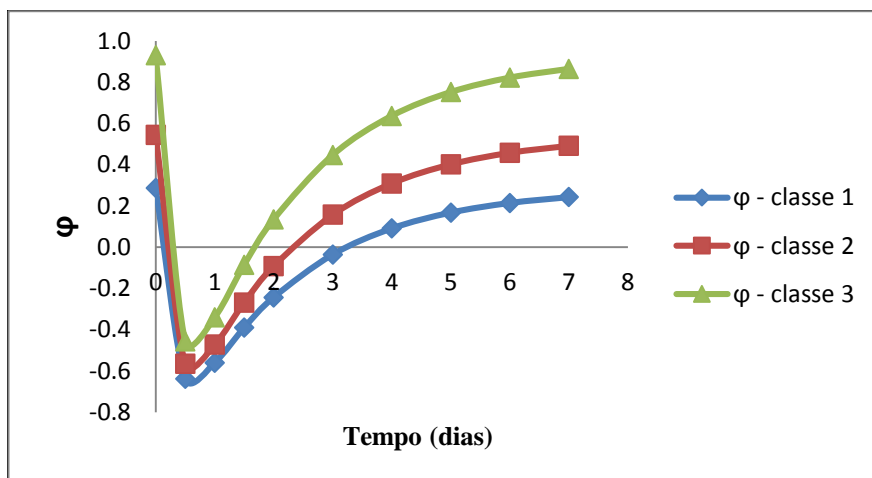


Figura 6. Valores do parâmetro ϕ para diferentes classes para uma vazão de $2 \text{ m}^3/\text{s}$.



4 - CONCLUSÕES

Após a realização de um conjunto de simulações, onde vários cenários foram testados, a análise dos resultados foi realizada com base na resolução CONAMA visando à concessão ou não de outorga para lançamentos de efluentes em rios naturais. Após análise dos resultados, concluiu-se que a metodologia proposta neste estudo mostrou-se efetiva e representa uma técnica consistente para análise da capacidade dos rios naturais receberem lançamentos efluentes dentro de um cenário simplificado dos processos hidráulico, hidrológico, além dos processos de transporte de massa.

Os resultados permitiram concluir que a vazão de diluição necessária para neutralizar um lançamento de efluente tem uma variação linear com as concentrações de lançamento, ou seja, existe uma relação de linearidade entre a concentração dos efluentes e a vazão necessária para manter o enquadramento do rio de acordo com o seu uso.

Quando a análise considerou as concentrações de OD no rio, o parâmetro adimensional de controle de resistência do rio se mostrou bem efetivo. Nas simulações apresentadas, onde a concentração de lançamento é compatível com os efluentes urbanos, foi verificado que em algum momento o sistema pode falhar para lançamentos com altas concentrações de DBO e as concentrações de OD ficar abaixo do valor permitido. Este resultado permite dizer que a concessão de outorga para o uso de lançamento deve ser analisado com muito critério.

AGRADECIMENTOS - Nossos agradecimentos à CAPES, CNPq e FUNCAP pelo suporte financeiro através de bolsa de estudo permitindo o desenvolvimento dessa pesquisa.

BIBLIOGRAFIA

- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Panorama da Qualidade das Águas Superficiais no Brasil*. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos, Brasília, 176p, 2005.
- CHAGAS, P. F. “*Perspectivas da aplicação da teoria fuzzy para o cálculo de risco em sistemas hidrodinâmicos*”. Tese defendida no Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para obtenção do título de doutor em recursos hídricos, 2005.
- CHAPRA, S. C. “*Surface Water-Quality Modeling*”. New York: McGraw-Hill, 1997, 844p.
- THOMANN, R. V.; MUELLER, J. A. “*Principles of Surface Water Quality Modelling and Control*”. Harper & Row, Publishers, New York, 1987.
- U.S.EPA. 1985. “*Technical support document for water quality-based toxics control*”. Office of Water, Washington, D.C.