

Avaliação da Influência do Fósforo e do Nitrogênio no Processo de Eutrofização de Grandes Reservatórios Estudo de Caso: Usina Hidrelétrica Foz do Areia

Paulo Sérgio Pereira¹; Bruno Victor Veiga², Maurício Dziedzic³

paulo.pereira@copel.com, bvVEIGA@rdr.sdr.br, dziedzic@up.edu.br

Recebido: 26/07/10 - revisado: 18/09/11 - aceito: 28/03/13

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é a avaliação da influência dos nutrientes fósforo e nitrogênio no processo de eutrofização do reservatório da Usina Hidrelétrica Foz do Areia. Os principais impactos associados à eutrofização são a restrição de uso do reservatório pela comunidade da região e o potencial de toxicidade das cianobactérias presentes neste processo. Essa avaliação foi feita com um conjunto de modelos computacionais de simulação da qualidade da água. Primeiramente foi avaliada a contribuição dos principais rios afluentes a este reservatório com o auxílio do modelo computacional FLUX. Com esses resultados, utilizou-se o modelo BATHTUB, que avalia o balanço de nutrientes em regime permanente e permite a segmentação espacial do reservatório, utilizando os conceitos de transporte advectivo, difusivo e de sedimentação de nutrientes. Sendo um modelo de mistura completa, não necessita grande capacidade de processamento computacional. Além disso, necessita de um número reduzido de parâmetros para avaliação de diagnóstico ou previsão de condições de eutrofização. Desta forma, foi avaliado o grau de eutrofização na situação atual e simulado um cenário com restrição de cargas. Os resultados foram satisfatórios, tendo-se obtido boa concordância entre valores observados e valores modelados, demonstrando que o reservatório se encontra em estado eutrofizado, e que o fósforo é o nutriente que limita o crescimento das cianobactérias.

Palavras-Chave: Eutrofização, Modelos computacionais, Qualidade da água, Fósforo, Nitrogênio, Reservatório.

INTRODUÇÃO

A eutrofização cultural, causada pela inclusão excessiva de nutrientes nos ecossistemas aquáticos, especialmente o fósforo e o nitrogênio, resultantes da atividade humana, é um fenômeno complexo e o principal problema encontrado na maioria das águas superficiais. É um dos mais visíveis impactos negativos resultantes das alterações humanas na biosfera (ESTEVEZ, 1998; SMITH e SCHINDLER, 2009).

Dentre as consequências deste processo, a mais grave é a floração de cianobactérias. Além de esteticamente desagradável causa problemas de odor e sabor que se tornam mais críticos quanto mais eutrofizado se apresenta um corpo de água (DODDS, 2002). Também chamadas de cianofíceas

ou algas azuis, indicam consideráveis concentrações de matéria orgânica na água. Outra grave consequência é a produção de diferentes tipos de toxinas (TUNDISI e TUNDISI, 2008).

Um dos casos mais graves e conhecidos no Brasil ocorreu em 1996, na cidade de Caruaru, estado de Pernambuco, onde foram vitimadas mais de 50 pessoas sob tratamento por meio de hemodiálise, na qual foi utilizada água contaminada com microcistina (SANCHES et al., 2007).

Silvicultura, drenagem urbana e esgoto podem ser importantes em diferentes situações, porém, tipicamente, a agricultura domina as fontes difusas de fósforo e nitrogênio. Corpos de água com uma longa situação de eutrofização e grandes acumulações de nutrientes têm menor resiliência e respondem mais lentamente à redução de cargas (WETZEL, 2001; MAINTONE e PARR, 2002).

Sistemas computacionais têm sido utilizados ao longo das últimas décadas para a modelagem de ecossistemas com o objetivo de representar suas interações com o meio através de relações teóricas e empíricas. De um modo geral, um modelo pode ser entendido como uma simplificação da realidade ou de um aspecto da realidade que seja de interesse do

¹ Copel – Companhia Paranaense de Energia

² RDR Consultores Associados

³ Programa de Pós-Graduação em Gestão Ambiental, Universidade Positivo

pesquisador e permita reconstruir essa realidade, prever um comportamento, uma transformação ou uma evolução (CHRISTOFOLETTI, 1999).

O avanço da tecnologia na área de informática tem propiciado uma maior aproximação da representação do modelo com o ecossistema. A base da modelagem de um ecossistema aquático é relacionar os sintomas de eutrofização com cargas externas de nutrientes, hidrologia e morfologia de um reservatório usando relações físicas, químicas, biológicas e estatísticas. Quando aplicados a reservatórios existentes, os modelos possibilitam o estabelecimento de uma estrutura para interpretar os dados de monitoramento de qualidade da água e prever os efeitos de futuras alterações em cargas de nutrientes externos (WALKER, 1999).

Estudos de eutrofização de reservatórios de grande porte ainda são escassos no Brasil. Nos últimos anos o reservatório da Usina Hidrelétrica Bento Munhoz da Rocha Neto, mais conhecida como UHE Foz do Areia, tem apresentado um alto grau de eutrofização.

Esse é o maior empreendimento de geração de energia elétrica da Copel, sendo a primeira de uma série de cinco usinas hidrelétricas em cascata no rio Iguaçu. É o único que apresenta essa situação nesse rio, cuja ocorrência mais preocupante foi registrada nos meses de outubro de 2006 a abril de 2007.

Assim, procurou-se, neste trabalho, avaliar a influência das cargas de nitrogênio e fósforo no estado trófico do reservatório da UHE Foz do Areia com o auxílio dos programas computacionais FLUX e BATHTUB (WALKER, 1999).

O primeiro fornece a estimativa de cargas afluentes ao reservatório a partir de históricos de parâmetros de qualidade de água e vazões.

O modelo BATHTUB considera o balanço de nutrientes em regime permanente e permite a segmentação espacial do reservatório utilizando os conceitos de transporte advectivo, difusivo e de sedimentação de nutrientes.

Dentre os estudos mais recentes no âmbito mundial, Nadim et al. (2007), utilizaram o BATHTUB para a avaliação do estado trófico de reservatórios nos Estados Unidos. Os resultados deste estudo indicaram que o BATHTUB pode ser usado para a previsão de fósforo e nitrogênio com uma razoável precisão.

Por ser um modelo de mistura completa, não necessita grande capacidade de processamento computacional. Além disso, necessita de um número reduzido de parâmetros para avaliação de diagnóstico ou previsão de condições de eutrofização.

A disponibilidade de dados de qualidade de água levantados em campanhas anteriores e atuais, realizadas pela COPEL, para os afluentes principais propicia uma boa oportunidade de utilizar modelos computacionais.

Os modelos são usualmente classificados de acordo com a sua complexidade, características do corpo de água e dos parâmetros de qualidade de água que o modelo pode prever. Quanto mais complexo o modelo, mais difícil e dispendiosa é a sua aplicação (WORLD BANK GROUP, 1998).

A carência de levantamento de parâmetros de qualidade de água de rios e reservatórios no Brasil orienta à utilização de modelos de qualidade de água que exijam um número menor de dados de entrada.

ÁREA DE ESTUDO

A UHE Foz do Areia (Figura 1) está localizada na porção média do Rio Iguaçu, a 240 km de Curitiba, no sudoeste do estado do Paraná, na divisa dos municípios de Pinhão e Bituruna, 5 km a jusante da foz do rio Areia. O principal afluente do reservatório da UHE Foz do Areia é o rio Iguaçu. O rio Iguaçu se encontra encaixado em um vale profundo com largura pequena, que varia de 80m a 150m, e os taludes das margens são bastante íngremes. O reservatório da UHE Foz do Areia, objeto deste estudo, é o primeiro de uma cascata de cinco usinas hidrelétricas (Foz do Areia, Segredo, Salto Santiago, Salto Osório e Salto Caxias). No local do barramento, a área de drenagem do rio Iguaçu é de 29.800 km² e a área formada pelo reservatório da usina compreende 143,5 km², sendo que seu enchimento se deu no ano de 1980. O reservatório opera na cota máxima de 742,0 m. Nesta cota de operação, o reservatório apresenta volume total acumulado de aproximadamente 6 bilhões de m³, volume útil de 3,8 bilhões de m³, profundidade máxima de 160 m e profundidade média de 40 m. A vazão média afluente é de 640 m³.s⁻¹ e o tempo de residência, é de 105 dias. (COPEL, 2010).

INFORMAÇÕES SOBRE QUALIDADE DA ÁGUA

A Copel produz, desde 2003, relatórios anuais da qualidade das águas superficiais do Rio Iguaçu na região da UHE Foz do Areia (LACTEC, 2003 a 2009) os quais apresentam resultados analíticos e um diagnóstico limnológico com base em variáveis físicas, químicas e microbiológicas de quatro cam-

panhas trimestrais realizadas entre abril e janeiro. Para o monitoramento trimestral da qualidade de água foram definidas quatro estações de amostragem. A estação chamada E1 está localizada a montante do reservatório. A estação E2 está localizada na entrada do reservatório. A estação E3 está localizada próximo à barragem. A estação E4 está localizada imediatamente a jusante da barragem. A partir de 2008 a Copel introduziu uma nova estação de amostragem no reservatório (E5) com o objetivo de avaliar a influência do braço do rio Areia nas condições de eutrofização do reservatório bem como estações de amostragem em seus afluentes principais.

Estas estações são mostradas na Figura 2.



Figura 1 – Localização da UHE Foz do Areia.

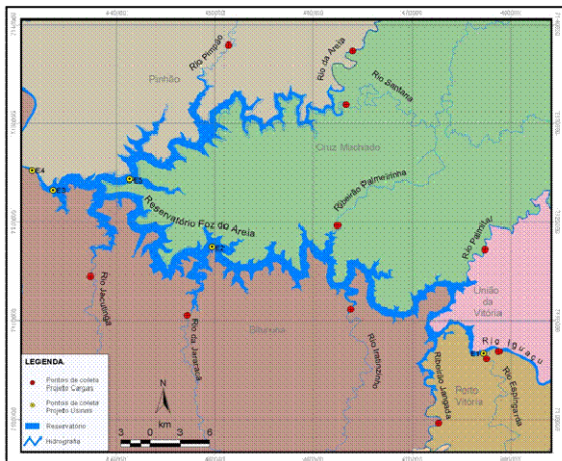


Figura 2 – Estações de monitoramento de quantidade e qualidade da água

Para ecossistemas lânticos, características das estações E2 e E3, os limites da Resolução CONAMA 357/05 (CONAMA, 2008) foram ultrapassa-

dos em várias campanhas realizadas, especialmente em períodos de estiagem, como aconteceu no final de 2003 e meados de 2006. Para as estações E1 e E4 o ambiente é lótico e, portanto, a concentração limite é de 0,05 mg.L⁻¹. Para a estação logo a montante do reservatório foi ultrapassado o limite em todas as campanhas realizadas desde julho de 2003.

Na estação E4, por sua vez, o limite da legislação foi ultrapassado apenas uma vez. Esta situação mostra a influência do reservatório na depleção das concentrações de nutrientes a jusante do barramento, o que certamente contribui para a não ocorrência de eutrofização no restante dos aproveitamentos da cascata do Iguaçu a jusante da UHE Foz do Areia.

Altas concentrações de cianobactérias potencialmente tóxicas foram detectadas nas amostras analisadas durante o monitoramento do fitoplâncton no reservatório da UHE Foz do Areia, principalmente em três campanhas (abril/07, out/06 e jan/07). Estes valores estão muito acima dos limites da resolução CONAMA 357/05 para corpos de água classe 2, ou seja 50.000 cel.mL⁻¹. (Figura 3).

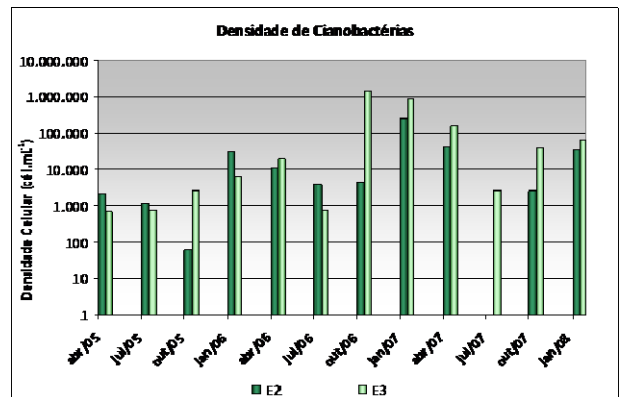


Figura 3 – Densidade de cianobactérias nas estações E2 e E3 (abr/2005 a jan/2008)

METODOLOGIA

Princípios de modelagem

A floração de cianobactérias é um problema que vem se repetindo há vários anos no reservatório da UHE Foz do Areia. Neste sentido, os modelos de qualidade de água são ferramentas importantes de apoio para avaliação dos gestores sobre as causas desse problema.

A seleção de uma ferramenta de modelagem correta é uma das mais importantes fases de

planejamento. A seleção do modelo deveria ser determinada através dos objetivos, dos dados disponíveis, dos prazos e fundos financeiros disponíveis, ao invés de modelos indicados ou preferidos por pesquisadores (VOINOV e GADDIS, 2008).

Os modelos matemáticos são uma representação da realidade mais simplificada para teste. Cada modelo pode ser representado, genericamente pela equação 1 (CHAPRA, 1997).

$$c = f(W, \text{física, química, biológica}) \quad (1)$$

De acordo com a equação 1, a relação causa-efeito entre carga (W) e concentração (c) depende das características físicas, químicas e biológicas do corpo receptor.

A escolha de um modelo matemático para a representação da qualidade de da água de rios ou reservatórios depende das características do sistema, da precisão desejada, dos dados disponíveis e da disponibilidade de metodologia (TUCCI, 2005).

Os modelos computacionais são freqüentemente caracterizados como empíricos, fundamentados em base estatística ou avaliação de dados, ou mecanísticos, fundamentados estritamente em teorias científicas. A maioria dos modelos combina elementos com as duas características (RECKHOW e CHAPRA, 1999).

Modelos empíricos de eutrofização podem ser genericamente divididos em duas categorias. A primeira categoria é fundamentada em cargas de fósforo e correlação de estado trófico. No segundo caso, os modelos normalmente relacionam dois parâmetros tróficos, como fósforo e clorofila-a.

O princípio básico para formular um modelo mecanístico de qualidade da água é o balanço de massa, cabendo lembrar que a representação contínua de um fluido é necessária para que sejam aplicáveis as equações da mecânica dos fluidos clássica (BERNOIT, 2007). A equação 2 representa o balanço de massa em um sistema.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(cu)}{\partial x} + \frac{\partial(cv)}{\partial y} + \frac{\partial(cw)}{\partial z} = s \quad (2)$$

Onde:

- u,v, w são as velocidades nas direções x, y e z, respectivamente (L.T⁻¹);
- c é a concentração (M.L⁻³).
- s é a fonte de de massa por unidade de volume e tempo (M.L⁻³.T⁻¹)

Considerando um sistema unidimensional com velocidade constante e, coeficiente de reação (k) de 1ª ordem, a Equação 2 se reduz à Equação 3.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = -kc \quad (3)$$

Em uma condição real, há mistura ao longo do comprimento do corpo de água devido aos gradientes de velocidade (THOMANN e MUELLER, 1987). A dispersão ocorre pela variação da velocidade no espaço e pode ser representada pela Equação (4), de Adveccção-Dispersão.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - kc \quad (4)$$

Onde:

- D é o coeficiente de dispersão (L².T⁻¹).

Programas computacionais escolhidos

O limitado número de parâmetros de qualidade da água monitorados no reservatório da UHE Foz do Areia e principalmente em seus afluentes orientou a utilização de modelos de qualidade da água que exijam um número menor de dados de entrada.

Para a definição das condições principais para elaboração deste estudo foram levantadas as principais características do reservatório e da bacia de drenagem bem como utilizadas as informações relacionadas à gestão de qualidade da água do reservatório da UHE Foz do Areia.

O modelo computacional FLUX foi concebido para o cálculo de cargas de nutrientes e outros parâmetros de qualidade da água. Os dados de entrada necessários são as concentrações dos parâmetros de qualidade da água, suas correspondentes vazões instantâneas ou médias diárias e o registro completo de vazões do período pretendido.

De maneira geral, a estimativa de cargas afluentes em um corpo de água pode ser feita pela Equação 5.

$$W = Q.c \quad (5)$$

Onde:

- W é a carga de nutrientes (M.T⁻¹);
- Q é a vazão volumétrica (L³.T⁻¹);
- c é a concentração (M.L⁻³).

O FLUX apresenta seis métodos para o cálculo de cargas de parâmetros de qualidade da água.

- a. Carga direta média;
- b. Concentrações ponderadas pela vazão (Taxa estimativa);
- c. Taxa estimativa modificada;
- d. Método de regressão de 1ª ordem;
- e. Método de regressão de 2ª ordem;
- f. Método de regressão aplicada a vazões individuais diárias.

É recomendada a escolha do método que gerar o menor Coeficiente de Variação Amostral - CV. O CV representa o quociente entre o desvio padrão e os valores médios da amostra. Valores menores que 0,1 produzem uma boa estimativa, sendo aceitáveis valores entre 0,1 e 0,2, especialmente para afluentes com menores vazões (VEIGA, 2001).

O modelo computacional BATHTUB é recomendado, entre outros modelos de regime permanente, para a avaliação ou previsão do grau de eutrofização de reservatórios. Este modelo permite a segmentação do reservatório (EPA, 1997).

O programa formula balanço hidráulico e dos nutrientes fósforo e nitrogênio para cada segmento, definido como um elemento computacional. O sistema resolve dois conjuntos simultâneos de equações, um para as condições hidráulicas e outro para as concentrações. Essa análise é realizada para o regime permanente com base em transporte advectivo, difusivo e de sedimentação de nutrientes. As relações de balanço de massa são definidas como um sistema não linear de equações que são resolvidas iterativamente pelo Método de Newton (NADIM et al., 2007).

Dentre as várias opções de modelos oferecidos pelo BATHTUB, foram escolhidos os mostrados na tabela 1. O modelo para concentração de fósforo escolhido, Fósforo Disponível com taxa de decaimento constante de 2ª. ordem, é utilizado como padrão do programa. Este modelo apresentou uma maior proximidade com os valores históricos dos períodos escolhidos.

Dentre os vários modelos para concentração de nitrogênio foi escolhido o modelo de decaimento de 1ª. ordem de deposição. Da mesma forma este modelo apresentou uma maior proximidade com os valores históricos dos períodos escolhidos.

Os modelos de profundidade Secchi e Clorofila escolhidos estão relacionados diretamente com a concentração de fósforo e não dependem de outras variáveis que poderiam ser obtidas somente a

partir de cálculos aproximados ou dados bibliográficos.

O modelo de transporte difuso desenvolvido com base na equação de dispersão de Fischer et al (1979) foi escolhido porque é o mais completo entre todos os apresentados.

A escolha dos modelos citados permitiu que os valores das variáveis de ajuste não necessitassem de alteração. Ou seja, os valores de calibração unitários foram mantidos.

Tabela 1-Equações escolhidas do BATHTUB

Parâmetro	Modelo	Equação
Fósforo Total	2ª. ordem, fósforo disponível	$Sed_p = CP \cdot B_1 \cdot P^2$
Nitrogênio	1ª. ordem, Total com deposição	$Sed_n = CN \cdot B_1 \cdot N$
Corofila-a	P, exponencial, Jones e Bachman	$B = CB \cdot 0,081 \cdot P^{1,46}$
Secchi	Secchi, Fósforo Total	$S = CS \cdot 17,8 \cdot P^{-0,76}$
Transporte	Equação de	$E = \frac{\text{Max}(D - D_n, 0) \cdot A_c}{L}$
Difusivo	Dispersão de Fischer et al. (1979)	$D = CD \cdot 100 \cdot W^2 \cdot Z^{-0,84} \cdot \text{Max}$ $D_n = \frac{U \cdot L}{2}$

PREPARAÇÃO DE DADOS DE ENTRADA PARA A MODELAGEM

Com a utilização do programa FLUX foram determinadas as concentrações médias nos principais rios afluentes e as respectivas cargas de nutrientes afluentes ao reservatório.

Os dados de entrada são as concentrações de fósforo e nitrogênio, as vazões associadas médias ou instantâneas (quando existentes) e os registros históricos de vazão.

Como é típico da realidade brasileira, existe uma quantidade pequena de registros de qualidade da água, os quais, quando existem, muitas vezes não estão associados a uma vazão. No presente estudo, o maior número de registros de dados de qualidade da água é do rio Iguaçu e de seus afluentes Jangada e Palmital. Para os demais, as coletas foram iniciadas

em 2008 através de campanhas de amostragens da Copel.

As maiores concentrações de fósforo e nitrogênio calculadas através do FLUX foram de 115,18 mg. m⁻³ e 2.131,95 mg. m⁻³, respectivamente, ambas para o rio Iguaçu, na entrada do reservatório. As cargas de fósforo e nitrogênio provenientes do rio Iguaçu correspondem a 86% e 84%, respectivamente, do aporte total ao reservatório.

O modelo computacional BATHTUB permite a segmentação do reservatório em vários trechos. Para avaliação dos índices tróficos, o reservatório foi dividido em nove segmentos. O braço do rio Iguaçu foi dividido em quatro segmentos, ENT_IGUAÇU, PALMEIRINHA, JARARACA e SAÍDA_IGUAÇU. O braço do rio Areia foi dividido em três segmentos, ENT_AREIA, PIMPÃO e SAÍDA_AREIA. Após a junção destes ramos, foram colocados dois outros segmentos até a barragem, JUNÇÃO e BARRAGEM (Figura 4).

A metodologia para a escolha da segmentação levou em conta a localização de afluentes principais, homogeneidade nas dimensões dos segmentos e homogeneidade na distribuição dos pontos de amostragem de qualidade da água. Com exceção do segmento SAÍDA_IGUAÇU, todos os demais têm a entrada de um afluente importante, o que permite a identificação da influência deste sobre as modificações da qualidade da água.

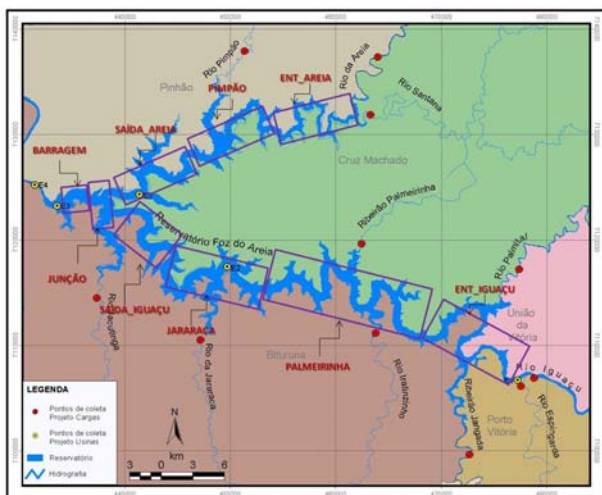


Figura 4 – Segmentação do reservatório da UHE Foz do Areia

Para este estudo foram escolhidos dois níveis do reservatório. Na sua cota média de operação ao longo dos anos, 730,00 m em relação ao nível do mar, e na cota média de operação no ano mais crítico de floração de algas, 720,00 m, ocorrida em 2006.

Valores históricos de concentrações dos nutrientes fósforo e nitrogênio, clorofila-a e profundidade Secchi, obtidos de campanhas regulares de amostragem de água realizadas pela COPEL, foram inseridos no modelo. Esses valores são importantes para verificar a aderência dos resultados do modelo aos valores medidos. Foram usadas duas abordagens iniciais.

De acordo com WALKER (1999), o cálculo deve refletir a situação do período a ser analisado. Portanto, decidiu-se pela utilização dos parâmetros de qualidade da água da campanha de 2006-2007 (abr/06 a jan/07) e 2008-2009 (abril/08 a jan/09). Conforme já mencionado, o primeiro período corresponde à situação mais crítica de floração de algas no reservatório da UHE Foz do Areia. O segundo período, além de incluir as primeiras coletas relativas ao ponto E5 localizado no braço do reservatório do rio Areia, apresentou os níveis médios muito próximos à média histórica.

O modelo BATHTUB permite a adição de outras cargas no modelo além daquelas provenientes de pontos medidos que representam cargas pontuais. Desta forma, cargas difusas e atmosféricas foram inseridas no modelo.

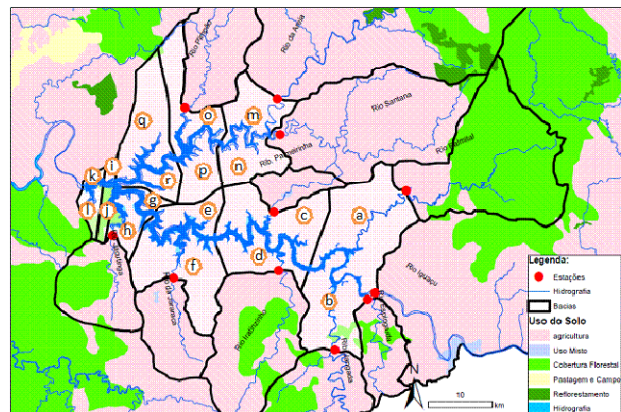


Figura 5 – Áreas circunvizinhas para cálculo de cargas difusas ao reservatório da UHE Foz do Areia

Para tanto, foram determinadas as áreas circunvizinhas ao reservatório não contempladas na área de drenagem de cada um dos afluentes já inseridos no modelo. Os usos de solo, típicos destas áreas, foram determinados e se constituem de florestas, agricultura e uso misto (pequenos povoados ou propriedades rurais). A região não inclui nenhuma área de campo ou de pastagem significativa. Essas regiões foram divididas de acordo com a segmentação adotada para o reservatório (Figura 5).

Para os valores de cargas atmosféricas de nutrientes foram utilizadas as médias sugeridas por Thomann e Mueller (1987), de 46 kg.km⁻².ano⁻¹ e 881 kg.km⁻².ano⁻¹, para fósforo e nitrogênio, respectivamente.

AVALIAÇÃO DO ESTUDO TRÓFICO DO RESERVATÓRIO

Considerando as premissas anteriormente adotadas, o reservatório da UHE Foz do Areia foi modelado para os dois períodos distintos, 2006-2007 e 2008-2009. Os dados de entrada utilizados, para ambos os períodos, referentes às concentrações de cargas difusas e pontuais foram os mesmos. Não foram consideradas as sazonalidades ou outros fatores que pudessem influenciar as concentrações.

Considerou-se bastante adequada a utilização dos resultados do FLUX, indistintamente, para as duas situações. A falta de campanhas sistemáticas de qualidade da água não permite o desperdício de dados históricos valiosos para um melhor entendimento da situação. Não há um número de amostras suficientes para representar uma possível tendência de alteração dos períodos. Esta decisão foi também fundamentada no fato que não há, historicamente, uma distinção clara entre períodos úmidos e secos no rio Iguaçu.

O conceito de nutriente limitante está relacionado com o desenvolvimento de biomassa pelas plantas aquáticas que não pode prosseguir na falta de um ou mais nutrientes, fósforo e nitrogênio, principalmente (TUNDISI e TUNDISI, 2008).

A relação citada por NADIM et al. (2007), entre fósforo total e nitrogênio total, é usada para a definição do nutriente limitante é:

$$\frac{(N_{total}-150)}{P_{total}}$$

Caso essa relação seja inferior a 12, o nutriente limitante é considerado o nitrogênio. Caso seja superior, o fósforo é considerado limitante. Nos dois períodos considerados, a relação resultou superior a 12 e o fósforo foi considerado nutriente limitante.

Levando isto em consideração, os primeiros resultados para a concentração de fósforo para o período de 2006-2007 demonstram que, com exceção do segmento denominado SAÍDA_AREIA, todos os demais segmentos estão acima do limite de fósforo total, de 30 mg.m⁻³, estabelecido pela resolução CONAMA 357/05 para corpos de água em ambiente lântico classe 2. De acordo com a classificação de

THOMANN e MUELLER (2007), todos os segmentos poderiam ser enquadrados como eutrofizados.

Em relação ao período de 2008-2009 os segmentos PIMPÃO, SAÍDA_AREIA e BARRAGEM estariam dentro dos limites da resolução CONAMA 357/05. Na classificação de THOMANN e MUELLER (2007), somente o segmento SAÍDA_AREIA poderia ser considerado mesotrófico. As Figuras 6 e 7 mostram esses resultados.

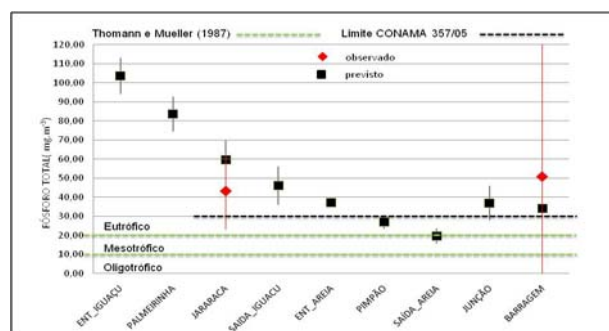


Figura 6 – Resultados para concentração de Fósforo Total - período 2006-2007

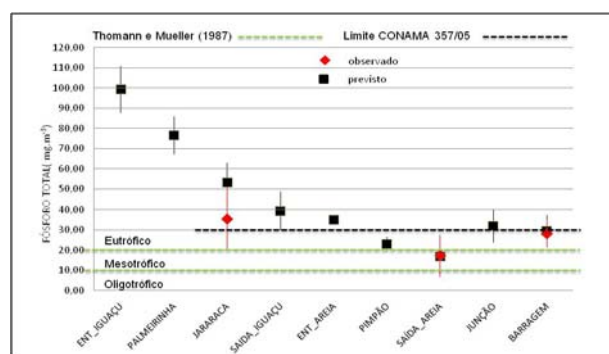


Figura 7 – Resultados para concentração de Fósforo Total - período 2007-2008

RESTRICÇÃO DE CARGAS

Droic e Konzan (2002) utilizaram a avaliação de cenários para o estabelecimento de estratégias preventivas para o gerenciamento de recursos hídricos. Essa avaliação revelou que o controle de cargas difusas e pontuais é capaz de reduzir as concentrações de fósforo a níveis muito inferiores aos observados na época do estudo. Os resultados anteriores demonstram que o fósforo é o nutriente limitante, e, portanto, propicia as condições favoráveis à eutrofização do reservatório.

Estabelecida esta condição, foi selecionado um cenário com o objetivo de avaliar a influência da restrição de cargas de fósforo e o seu impacto no estado trófico do reservatório. De forma a representar a média histórica das condições do reservatório esta avaliação foi feita para o período de 2008-2009.

Os resultados obtidos do BATHTUB mostraram que as cargas difusas provenientes de áreas circunvizinhas ao reservatório representam cerca de 6,4% do total. Apesar de pouco significativas em relação à carga total, as cargas provenientes da área difusa são, excluindo o rio Iguaçu, superiores às de qualquer outro afluente do reservatório, comparando-as individualmente. Quase a totalidade dessa área é de uso agrícola. Portanto, é viável estabelecer uma condição mais favorável dos níveis de concentração de fósforo.

A segunda consideração para este cenário envolve a redução da concentração de fósforo para o rio Iguaçu, na entrada do reservatório, de 115,18 para 77,65 mg.m^{-3} .

Esta concentração é resultante de cálculos realizados com o FLUX para a estação de Irienópolis (65255000) localizada cerca de 20 km a montante da entrada do reservatório.

Considera-se esta diferença anômala resultante, talvez, de cargas difusas de criação de suínos na região rural do município ou revolvimento do leito do rio pelas atividades de extração de areia.

Conforme pode ser visto na Figura 8, o braço do rio Areia é influenciado pela redução da carga difusa. Seis segmentos atenderiam os limites de concentração da resolução CONAMA 357/05: SAÍDA_IGUAÇU, ENT_AREIA, PIMPÃO, SAÍDA_AREIA, JUNÇÃO e BARRAGEM. Os segmentos PIMPÃO, e SAÍDA_AREIA seriam considerados mesotróficos, assim como o segmento BARRAGEM dentro do seu limite de desvio padrão.

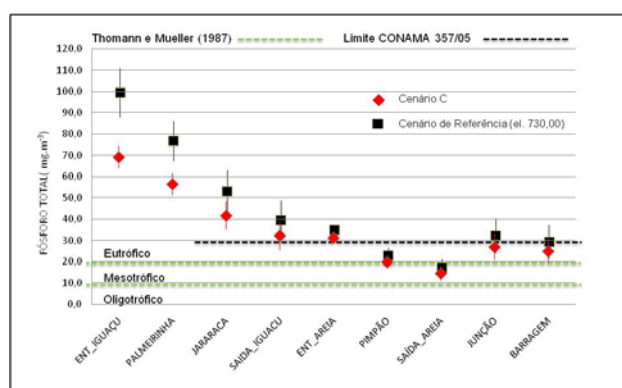


Figura 8 – Fósforo total – redução concentração rio Iguaçu e cargas difusas.

Este cenário apresenta grandes reduções nas concentrações de fósforo para todos os segmentos. As reduções, em relação ao cenário de referência, vão desde 10 %, para o segmento ENT_AREIA, até 30%, para o segmento ENT_IGUAÇU.

CONCLUSÕES

A qualidade de água de um reservatório reflete os usos e ocupações da bacia hidrográfica. As avaliações se concentram, portanto, na identificação das fontes e quantidades de nutrientes afluentes ao reservatório. A identificação e caracterização dessas fontes são críticas para o sucesso do desenvolvimento e implantação de planos e controles de cargas de nutrientes (EPA, 2008).

Uma vez que essas condições adversas causam impactos econômicos, estéticos e nas condições de recreação em lagos ou reservatórios, os gestores devem ter meios para avaliar as condições atuais e prever as condições futuras (WALKER, 1985).

Com a utilização do programa FLUX foi demonstrada a importância de uma adequada definição dos aportes de nutrientes do reservatório. O estabelecimento de campanhas rotineiras de análise de parâmetros de qualidade de água é fundamental para se aumentar a precisão dos resultados, pois, conforme comentado por SMITH et al.(1999), modelos de cargas exibem um alto grau de variação em suas previsões.

O modelo BATHTUB representa os cálculos de balanço de nutrientes com as características de regime permanente e propicia a segmentação espacial do reservatório utilizando os conceitos de transporte advectivo, difuso e de sedimentação de nutrientes.

Por ser um modelo de mistura completa, não necessita grande capacidade de processamento para fornecimento dos resultados. Além disso, necessita de um número reduzido de parâmetros para avaliação de diagnóstico ou previsão de condições de eutrofização.

Finalmente, cabe destacar que, se por um lado a eutrofização do reservatório da UHE Foz do Areia é um problema grave do ponto de vista ambiental e causa um impacto significativo no seu uso pelas comunidades circunvizinhas, por outro, retém parte da carga de nutrientes que poderiam causar episódios de floração de cianobactérias, ainda não detectados em reservatórios localizados a jusante.

REFERÊNCIAS

- BERNOIT, C. R. Environmental Fluid Mechanics. Hanover. John Wiley, 2007.
- CHAPRA, S. C. Surface water-quality modeling. New York: McGraw-Hill, 1997.
- COPEL. Usina Bento Munhoz da Rocha Netto. Disponível em: <<http://www.copel.com>>. Acesso em: 15/07/2010.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA n. 357, de 17 de março de 2005. Publicada no DOU n. 53, de 18 de março de 2005, Seção 1, páginas 58-63. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 23/11/ 2008.
- CHRISTOFOLETTI, A. Modelagem de sistemas ambientais. São Paulo: Edgard Blucher, 1999.
- DODDS, W.K. Freshwater Ecology Concepts and Environmental Applications. San Diego: Academic Press, 2002.
- DROLC, A.; KONCAN, J.Z. Estimation of sources of total phosphorus in a river basin and assessment of alternatives for river pollution reduction. Environment International. Londres: Elsevier, v. 28, p. 393–400, 2002.
- ESTEVES, F. A. Fundamentos de limnologia. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.
- FISCHER, H. B. ; et al Mixing in Inland and Coastal Waters. San Diego: Academic Press, 1979.
- LACTEC. Relatório anual do automonitoramento trimestral da qualidade das águas superficiais do Rio Iguaçu na região da Usina Hidrelétrica Foz do Areia (PR). Curitiba: Copel, 2003.
- _____. Relatório anual do automonitoramento trimestral da qualidade das águas superficiais do Rio Iguaçu na região da Usina Hidrelétrica Foz do Areia (PR). Curitiba: Copel, 2004.
- _____. Relatório anual do automonitoramento trimestral da qualidade das águas superficiais do Rio Iguaçu na região da Usina Hidrelétrica Foz do Areia (PR). Curitiba: Copel, 2005.
- _____. Relatório anual do automonitoramento trimestral da qualidade das águas superficiais do Rio Iguaçu na região da Usina Hidrelétrica Foz do Areia (PR). Curitiba: Copel, 2006.
- _____. Relatório anual do automonitoramento trimestral da qualidade das águas superficiais do Rio Iguaçu na região da Usina Hidrelétrica Foz do Areia (PR). Curitiba: Copel, 2007.
- _____. Relatório anual do automonitoramento trimestral da qualidade das águas superficiais do Rio Iguaçu na região da Usina Hidrelétrica Foz do Areia (PR). Curitiba: Copel, 2008.
- _____. Relatório anual do automonitoramento trimestral da qualidade das águas superficiais do Rio Iguaçu na região da Usina Hidrelétrica Foz do Areia (PR). Curitiba: Copel, 2009.
- NADIM, F. et al. Application of a steady-state nutrient model and inferences for load reduction strategy in two public water supply reservoirs in eastern Connecticut. Lake and Reservoir Management. Flórida: Taylor e Francis, v. 23, p. 264-278, 2007.
- RECKHOW, K.H., CHAPRA, S.C. Modeling excessive nutrient loading in the environment. Environmental Pollution. Londres: Elsevier, n. 100, p.197-207, 1999.
- SANCHES, S. M. VIEIRA, E.M. PRADO, E. L. BENETTI, F. TAKAYANAGUI, A. M. M. Estudo da presença da toxina microcistina-LR em água utilizada em clínica de hemodiálise e validação de um método analítico. Eclat. Quím. São Paulo: UNESP, v. 32, n. 4, 2007.
- SMITH, V.H.; TILMAN, G.D.; NEKOLA, J.C. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater. Environmental Pollution. Londres: Elsevier, n. 100, p. 179–196, 1999.
- SMITH, V. H., SCHINDLER, D. W. Eutrophication science: where do we go from here? Trends in Ecology and Evolution. Londres: Elsevier, v. 24, n. 4, p. 201-207, 2009.
- THOMANN, R. V.; MUELLER, J. A. Principles of surface water quality modeling and control. New York: Harper & Row, 1987.
- TUCCI, C. E. M. Modelos hidrológicos. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005.
- TUNDISI, J. J.; TUNDISI, T. M. Limnologia. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Compendium of tools for watershed assessment and TDML development. Washington, D.C.: EPA, 1997. Disponível em: < <http://nepis.epa.gov> >. Acesso em: 22 nov. 2008.

_____. Handbook for Developing Watershed Plans to Restore and Protect Our Waters. Washington, D.C.: EPA, 2008. Disponível em: < <http://nepis.epa.gov> >. Acesso em: 15 jul. 2009.

VEIGA, B. V. Modelagem computacional do processo de eutrofização e aplicação de um modelo de balanço de nutrientes a reservatórios da Região Metropolitana de Curitiba. Curitiba, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica), Universidade Federal do Paraná.

VEIGA, B. V e DZIEDZIC, M. Estimating nutrient loads in the Passaúna reservoir with FLUX. Water International. n. 35, p. 210-222, 2010.

VOINOV, A. , GADDIS, E.J. B. Lessons for successful participatory watershed modeling: A perspective from modeling practitioners. Ecological Modelling. Londres: Elsevier, n. 216, p. 197-207, 2008.

WALKER, W. W. Simplified procedures for eutrophication assessment and prediction: user manual. U.S. Army Corps Engineers, Waterways Experiment Station, Instruction Report W-96-2, 1999.

WALKER, W. W. Empirical methods for predicting eutrophication in impoundments – Report 3 – phase II: Model Refinements. U.S. Army Corps Engineers, Technical Report E -81-9, 1985.

WORLD BANK GROUP. Pollution Prevention and Abatement Handbook 1998 Toward Cleaner Production. Washington, DC: 1999.

Evaluation Of The Influence Of Phosphorus And Nitrogen In The Eutrophication Process Of Large Reservoirs. Case Study: Foz Do Areia Hydroelectric Power Plant

ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate the influence of nutrients phosphorus and nitrogen in the eutrophication process of the Foz do Areia Hydroelectric Power

Plant. The main impacts associated with eutrophication are the restriction regarding the use of the reservoir by the community in the region and the potential toxicity of the cyanobacteria present in this process. This evaluation was done with a set of computer models to simulate water quality. First the contribution of the main rivers flowing into this reservoir was evaluated, with the help of the FLUX computer model. With these results the BATHTUB model was used which evaluates the nutrient balance in a permanent regime and allows the spatial segmentation of the reservoir, using the concepts of advective and diffuse transport and nutrient sedimentation. Since it is a model of a complete mixture, it does not require much computer processing capacity. In addition a smaller number of parameters are needed to evaluate a diagnosis or forecast of eutrophication conditions. Thus, the degree of eutrophication in the current situation was evaluated, and a scenario with restricted loads was simulated. The results were satisfactory, and a good concordance was obtained between the observed values and the modeled values, demonstrating that the reservoir is in an eutrophized state and that phosphorus is the nutrient that limits the growth of cyanobacteriae.

Key-words: *Eutrophication, Computer Models, Water Quality, Phosphorus, Nitrogen, Reservoir.*