



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GIA/YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO - XI

GRUPO DE ESTUDO DE IMPACTOS AMBIENTAIS – GIA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA DINÂMICA DE NUTRIENTES NO PROCESSO DE EUTROFIZAÇÃO DO
RESERVATÓRIO DA UHE FOZ DO AREIA**

Paulo Sérgio Pereira(*)

Bruno Victor Veiga

Maurício Dziedzic

Nicole Machuca Brassac

COPEL GET

**RDR CONSULTORES
ASSOCIADOS**

**UNIVERSIDADE
POSITIVO**

LACTEC

RESUMO

O objetivo deste trabalho é a avaliação da influência da dinâmica de nutrientes no processo de eutrofização do reservatório da UHE Foz do Areia. Os principais impactos associados a esta situação são a restrição de uso do reservatório pela comunidade de entorno e o potencial de toxicidade das cianobactérias presentes neste processo. Essa avaliação teve como ferramenta um conjunto de modelos computacionais (FLUX e BATHTUB) para avaliação e predição de condições futuras do reservatório submetido ao eventual manejo de uso e ocupação das bacias hidrográficas de seus principais rios afluentes.

PALAVRAS-CHAVE

Reservatório, Modelo, Eutrofização, Nutrientes.

1.0 - INTRODUÇÃO

Desde abril de 2005, o reservatório de Foz do Areia (UHE Governador Bento Munhoz da Rocha Netto) vem sendo monitorado para avaliação da qualidade de suas águas. Parâmetros físicos, químicos e biológicos são avaliados trimestralmente, sendo cada quatro conjuntos de amostragem considerado um ciclo de monitoramento. Nos últimos ciclos, o reservatório da UHE Foz do Areia tem registrado elevadas densidades de cianobactérias. A ocorrência mais preocupante foi registrada nos meses de outubro de 2006, janeiro e abril de 2007 (BRASSAC *et al.*, 2008).

Além de causar fortes alterações na qualidade da água, eventos de floração causam um odor extremamente desagradável que interfere nas atividades de trabalhadores da usina e usuários do entorno do reservatório. Outra preocupação está relacionada à uma eventual produção de cianotoxinas durante estas ocorrências. Em janeiro último, o reservatório foi interditado para seus demais usos, com exceção da geração de energia, ou seja, considerado impróprio para a pesca, lazer e dessedentação de animais.

2.0 - JUSTIFICATIVA

Este trabalho se inclui nas diversas ações desenvolvidas pela COPEL para entender processos relacionados à ocorrência de florações de cianobactérias no reservatório da UHE Foz do Areia, a partir dos dados de cinco ciclos consecutivos de monitoramento e bem como no registro de florações ocorridas durante os mesmos.

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 fórmulas matemáticas teóricas e empíricas. O avanço da tecnologia na área de informática tem propiciado uma maior aproximação da representação do modelo com o ecossistema.

(*) Rua José Izidoro Biazzetto, 158 – Bloco A – Mossunguê – CEP 81200240 – Curitiba – PR – paulo.pereira@copel.com

Dentre as principais vantagens de implantar um modelo computacional, destaca-se o fato de se poder entender os reflexos sobre as florações quando são alteradas as fontes de nutrientes que chegam ao reservatório a partir dos seus afluentes.

De acordo com Walker (1996), a base da modelagem de um ecossistema aquático é relacionar os sintomas de eutrofização com cargas externas de nutrientes, hidrologia e a morfologia de um reservatório, usando relações estatísticas. Quando aplicado 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.

Uma modelagem computacional, adequadamente utilizada, pode atender de forma rápida avaliações das causas e dos efeitos da deterioração ambiental de um determinado ecossistema aquático.

3.0 - BASE TEÓRICA

3.1 Histórico e características principais do objeto do estudo

A Usina Hidrelétrica objeto deste estudo é chamada oficialmente de Governador Bento Munhoz da Rocha Netto. O nome original dessa usina é Foz do Areia e nesse estudo será chamada de UHE Foz do Areia (Figura 1). Este empreendimento está localizado no Rio Iguaçu, 240 km a sudoeste de Curitiba, na divisa dos municípios de Pinhão e Bituruna, 5 km a jusante da foz do Rio Areia.



Figura 1: UHE Foz do Areia
Fonte: COPEL (2008b)

A UHE Foz do Areia teve suas obras iniciadas em 1975. A barragem é de enrocamento com face de concreto, sendo a primeira com esta característica construída no Brasil e, à sua época, a maior do mundo no gênero. A construção da barragem iniciou-se em fevereiro de 1977, sendo concluída em dezembro de 1979. Atualmente opera com quatro unidades geradoras de 419 MW de potência efetiva cada uma, totalizando 1676 MW de potência efetiva.

A área de estudo compreende o reservatório da UHE Foz do Areia, situado no Médio Iguaçu, no sudoeste do estado do Paraná. O rio Iguaçu nasce nas imediações de Curitiba e é um dos principais afluentes do rio Paraná, apresentando grande potencial energético. O reservatório da UHE Foz do Areia é o primeiro de uma cascata de cinco usinas hidrelétricas (Foz do Areia, Segredo, Salto Santiago, Salto Osório e Salto Caxias). Com a formação do reservatório da UHE Foz do Areia foram atingidas áreas dos municípios de Pinhão, sede da usina, Cruz Machado, Bituruna, Porto Vitória e União da Vitória (Figura 2).

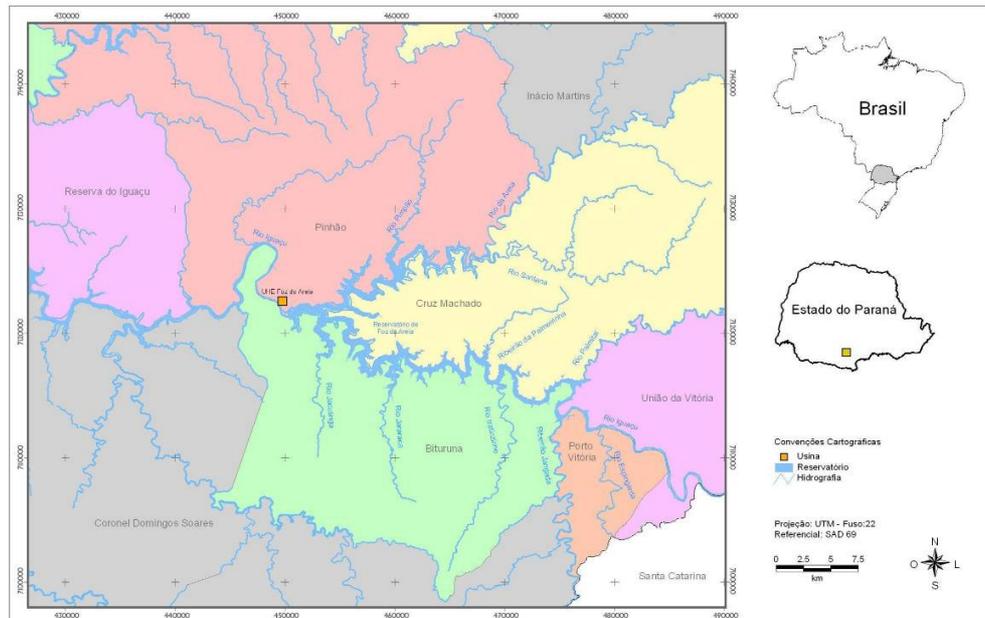


Figura 2: Localização da UHE Foz do Areia
Fonte: BRASSAC *et al.*, 2008

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 146,5 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 soleira da tomada de água está na cota 678 m, aproximadamente. Desta forma o reservatório caracteriza-se como de regularização com variações de nível consideráveis.

3.2 Eutrofização e Cianobactérias

Eutrofização é considerado como um fenômeno complexo que pode ser definido pelo aumento da concentração de nutrientes, especialmente o fósforo e o nitrogênio, nos ecossistemas aquáticos, que tem como consequência o aumento da sua produtividade. Como decorrência deste processo, o ecossistema aquático passa da condição oligotrófico e mesotrófico para eutrófico ou hipereutrófico (ESTEVES, 1998). Uma das consequências do processo de eutrofização é a ocorrência de florações de microalgas ou o crescimento massivo de macrófitas aquáticas.

O estado trófico de um reservatório é comumente descrito de acordo com a seguinte classificação (EPA, 2008):

- Oligotrófico – limpo, baixa produtividade;
- Mesotrófico – produtividade intermediária;
- Eutrófico – rico em nutrientes e produção de plantas aquáticas; e
- Hipereutrófico – extrema produtividade.

Outros autores, tais como Tundisi (2008) e Chapra (1997) citam o carbono como nutriente estimulador porém, na maior parte das situações, não é considerado como fator limitante para o crescimento do fitoplâncton.

O fósforo é essencial para toda a forma de vida. Entre outras funções ele tem um importante papel nos sistemas genéticos e no estoque e transferência de energia nas células. A sua disponibilidade a partir de fontes naturais é restrita devido aos seguintes fatores: não é abundante na crosta terrestre, não existe na forma gasosa, o fósforo tende a se depositar no sedimento (CHAPRA, 1997).

O nitrogênio é um dos elementos mais importantes no metabolismo dos sistemas aquáticos (ESTEVES, 1998). As principais fontes de nitrogênio são nitrato, nitrito, amônio e compostos nitrogenados dissolvidos. Nitrato inorgânico é altamente solúvel e abundante em águas que recebem altas concentrações de nitrogênio e resultantes de esgoto domésticos ou de atividades agrícolas (TUNDISI, 2008).

Os fatores naturais que contribuem para o aumento progressivo e lento da carga de nitrogênio e fósforo estão relacionados com os efeitos do vento, erosão por chuvas e adição de material biológico (TUNDISI, 2008). Os fatores artificiais que resultam na liberação desses nutrientes são o aumento da população, as atividades industriais, a utilização de fertilizantes químicos na agricultura e a utilização de produtos detergentes contendo compostos fosfatados (ESTEVES, 1998). Segundo Veiga (2001), o lançamento de nutrientes está muito relacionado ao processo de fertilização dos solos para plantio, bem como ao uso descontrolado de pesticidas.

Ainda segundo Tundisi (2008), a taxa e o tempo de progressão da eutrofização de um lago, mantendo-se uma carga constante de nutrientes dependem do seu estado trófico inicial, da sua profundidade média, morfometria e do tempo de residência que é a relação entre o volume do reservatório e a vazão dele afluente.

O enriquecimento por nutrientes das águas interiores resultam no aumento dos organismos aquáticos como o fitoplâncton e, especialmente, as cianobactérias. Cianobactérias são bactérias com a aparência de microalgas sendo chamadas popularmente de algas verde-azuladas ou cianofícias. Estão presentes nos mais diferentes sistemas aquáticos e terrestres, frequentemente, criando alimento para outros seres (TUKSAMATO & TAKAHASHI, 2007)

As cianobactérias se desenvolvem mais adequadamente em ecossistemas de água doce, pois a maioria das espécies apresenta melhor desenvolvimento em águas que apresentam pH entre 6 a 9, temperaturas entre 15° C e 30° C e com alta concentração de nutrientes especialmente nitrogênio e fósforo (CALIJURI *et al.*, 2006).

Todas as cianobactérias apresentam potencial de produzir toxinas, sendo estas classificadas como dermatoxinas, neurotoxinas e hepatotoxinas. Alguns pesquisadores argumentam que a produção de cianotoxinas serve como proteção de seus predadores primários, os componentes do zooplâncton. Outros sugerem que a produção de toxinas está relacionada às condições de crescimento ou competição de recursos. O fato é que a causa dessa produção não é bem conhecida no meio científico.

3.3 Monitoramento de Qualidade da Água do reservatório da UHE Foz do Areia

O relatório anual da qualidade das águas superficiais do Rio Iguaçu na região da UHE Foz do Areia (BRASSAC *et al.*, 2008) apresentou resultados analíticos e um diagnóstico limnológico do automonitoramento do reservatório com base em variáveis físicas, químicas e biológicas de quatro campanhas trimestrais realizadas entre abril de 2007 e janeiro de 2008. Para o monitoramento trimestral da qualidade de água foram definidas quatro estações de amostragem, coincidentes com as de monitoramentos anteriores a fim de se estabelecer uma série histórica de dados. A estação chamada E1 está localizada a montante do reservatório. A estação E2 está localizada na porção inicial do reservatório. A estação E3 está localizada no reservatório, nas proximidades da barragem. E a estação E4 está localizada imediatamente a jusante da casa de força da UHE. Estas estações foram mostradas na Figura 3.

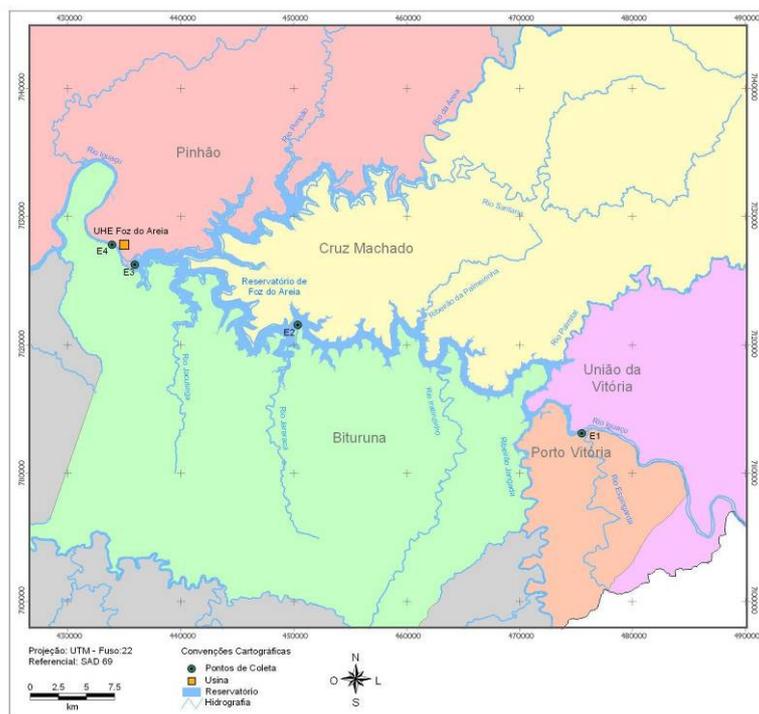


Figura 3: Estações de Amostragem
Fonte: BRASSAC *et al.*, 2008

Segundo a Portaria Surhema nº 20/1992, os rios pertencentes à Bacia do Iguaçu, estão enquadrados na Classe 2. No entanto, a responsabilidade de enquadramento do rio Iguaçu, por ser um rio transfronteiriço, é da ANA (Agência Nacional de Águas), sendo que até o momento, o mesmo não está enquadrado. Desta forma, aplica-se aqui o Capítulo VI, Artigo 42, da Resolução CONAMA 357/05, que diz que "enquanto não aprovados os respectivos enquadramentos, as águas doces serão consideradas Classe 2, as salinas e salobras Classe 1, exceto se as condições de qualidade atuais forem melhores, o que determinará a aplicação da classe mais rigorosa

correspondente". Desta forma, para critérios de estabelecimento e comparação com limites da legislação, o rio Iguazu foi considerado de Classe 2.

Para ecossistemas lênticos, característica das estações E2 e E3, o limite da legislação CONAMA 357/05 para o fósforo total é de 0,03 mg/L, e o mesmo foi ultrapassado nos meses de abril/07, na estação E3 (0,04 mg/L) e em outubro/06 e janeiro/07, na estação E2, com concentrações de 0,06 mg/L e 0,05 mg/L, respectivamente. Para as estações E1 e E4, classificadas como corpos de água tributários de ambientes lênticos, o limite da legislação, 0,05 mg/L, foi ultrapassado na estação de montante, em todos os meses amostrados, chegando a concentrações de 0,11 mg/L, em janeiro/08 (Figura 4).

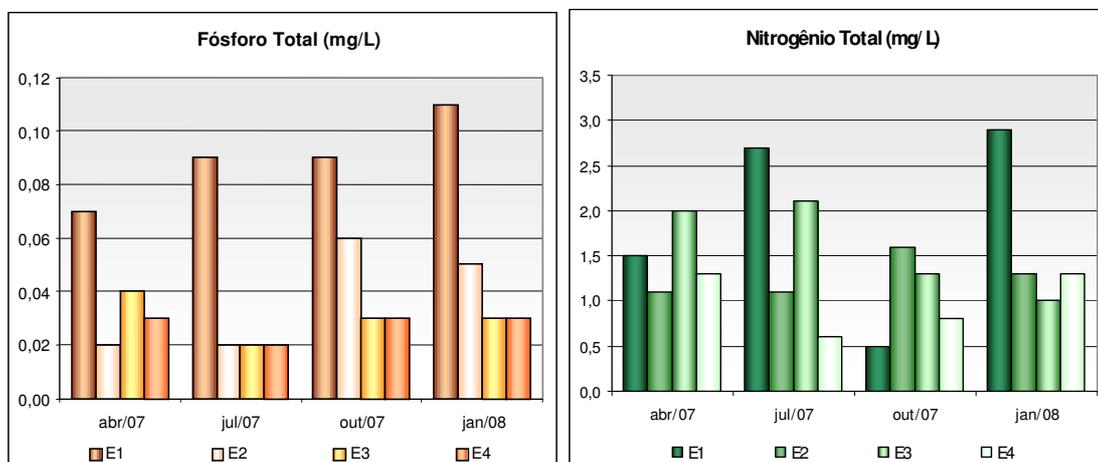


Figura 4: Concentração de Fósforo e Nitrogênio Total

Fonte: BRASSAC *et al.*, 2008

Conforme Figura 5, em relação ao nitrogênio valores mais elevados foram registrados somente na estação de montante, nos meses de julho/07 e janeiro/08, onde as concentrações registradas foram de 2,7 mg/L e 2,9 mg/L respectivamente.

De acordo com os indicadores mostrados na Tabela 1 (THOMANN & MUELLER, 1987), esse reservatório estaria classificado como eutrofizado pela sua concentração de fósforo. Os valores de clorofila-a medidos no mesmo período corroboram esta classificação.

Tabela 1: Indicadores de Eutrofização

Variável	Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico
Fósforo Total (mg/m ³)	< 10	10 – 20	> 20
Clorofila (mg/m ³)	< 4	4 – 10	> 10
Profundidade Secchi (m)	> 4	2 – 4	< 2
Oxigênio do hipolímnio (% de saturação)	> 80	10 – 80	< 10

Fonte: Thomann e Mueller, (1987)

Cianobactérias potencialmente tóxicas foram detectadas nas amostras analisadas durante o monitoramento do fitoplâncton no reservatório da UHE de Foz do Areia durante o ciclo 2007/2008. No reservatório de Foz do Areia foram registradas populações de cianobactérias com densidades celulares elevadas durante os ciclos de amostragem do programa de monitoramento do fitoplâncton iniciado em abr/05, até a presente data. A ocorrência mais preocupante foi registrada nos meses de out/06, jan/07 e abr/07. Estes valores estão muito acima dos limites da resolução CONAMA 357/05 para corpos d'água classe 2 (50.000 cel/mL) (Figura 6).

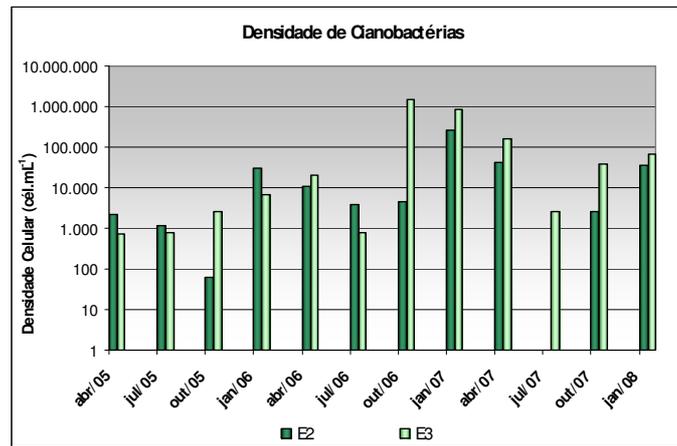


Figura 5: Densidade de Células, em escala logarítmica.

Em março de 2008, a COPEL iniciou um projeto de monitoramento de cargas afluentes ao reservatório de Foz do Areia, a fim de determinar as principais fontes de fósforo total, nitrogênio total e DBO, ao reservatório a partir de seus tributários na região: rios Palmeirinha, Areia, Santana, Pimpão, Jangada, Jacutinga, Jararaca, Espingarda, Iratinzinho e Palmital, além do próprio rio Iguaçú.

3.4 Modelos Computacionais

De acordo com Chapra (1997) os modelos matemáticos são uma representação da realidade mais simplificada para teste. Cada modelo pode ser representado, genericamente como:

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

De acordo com essa equação 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 da água de rios ou reservatórios depende das características do sistema, da precisão desejada, dos dados disponíveis e da disponibilidade de metodologia (TUCCI, 2005).

O princípio básico para formular um modelo de qualidade de água é o balanço de massa. Para um sistema completamente misturado, a acumulação de um parâmetro de qualidade de água por período finito de tempo é igual à massa desse que entra desse parâmetro mais a massa adicionada menos a massa que deixa esse segmento menos sua massa perdida (EPA, 1997). Para os resultados obtidos nesse trabalho foram utilizados os modelos FLUX e BATHTUB.

O Modelo FLUX (WALKER, 1996) sintetiza as cargas afluentes de um conjunto de amostras e análises da qualidade da água e o hidrograma de vazões médias diárias para o período em que se está avaliando o comportamento trófico. As concentrações das variáveis de qualidade da água são confrontadas com as suas vazões instantâneas no momento da amostragem, estabelecendo-se uma relação matemática entre elas. O modelo busca o melhor ajuste estatístico para a estimativa das cargas médias anuais e concentrações, quando se projeta essa relação sobre o hidrograma.

O modelo computacional empírico BATHTUB (WALKER, 1996) é citado no *Compendium of Tools for Watershed and TMDL Development* (EPA, 1997) como recomendado, entre outros modelos de regime permanente, para a avaliação ou predição do grau de eutrofização de reservatórios. O modelo BATHTUB permite ao usuário a segmentação do reservatório em um subconjunto de reservatórios prismáticos definidos pela área, comprimento e profundidade média em que são simulados o balanço de nutrientes e modelos de eutrofização são aplicados para avaliação de advecção, dispersão e sedimentação de nutrientes.

Embora seja um modelo "0-dimensional" a sua segmentação permite uma compreensão espacial do comportamento das variáveis de qualidade da água que interferem no desenvolvimento da eutrofização. As campanhas de coleta de amostras de qualidade da água no reservatório são utilizadas para calibrar os modelos empíricos (WALKER, 1996).

4.0 - RESULTADOS

A simulação apresentada integra um conjunto estudos desenvolvidos para a compreensão dos elementos responsáveis pelas alterações na qualidade da água e populações de algas no reservatório de Foz do Areia. Dadas as condições operacionais da UHE Foz do Areia são necessárias diversas simulações compondo cenários que projetem o comportamento atual e futuro do lago.

Foram distribuídos três segmentos no braço que vem do rio Iguaçu e dois no que vem do rio Areia. Após a junção destes ramos, foram colocados 2 outros segmentos. Cada segmento tem a entrada de um afluente importante o que permite a identificação da influência dele sobre as modificações da qualidade da água.

Com a calibração dos modelos, foram obtidas as relações entre os valores observados e previstos, possibilitando o desenvolvimento de estratégias para o controle da eutrofização. As Figura 7 e 8 mostram os resultados para o Fósforo Total e Nitrogênio Total para os diversos segmentos.

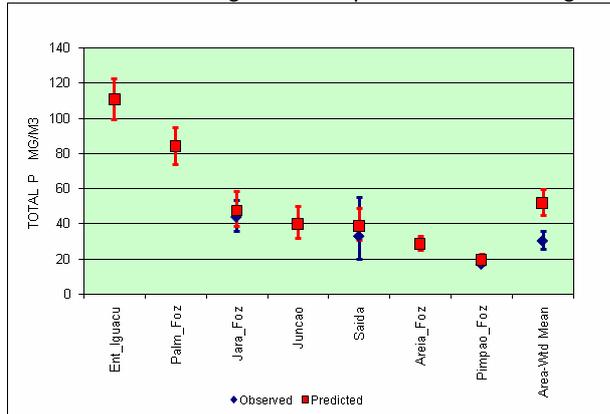


Figura 6 – Resultados para Fósforo Total

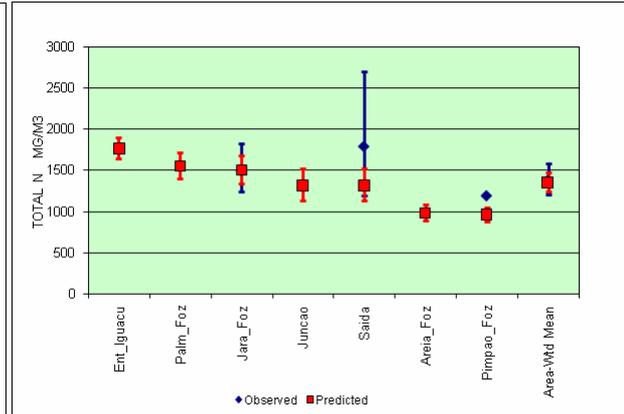


Figura 7 – Resultados para o Nitrogênio Total

As Figuras 9 e 10 mostram o comportamento da profundidade Secchi e da concentração de Clorofila obtidas para os segmentos.

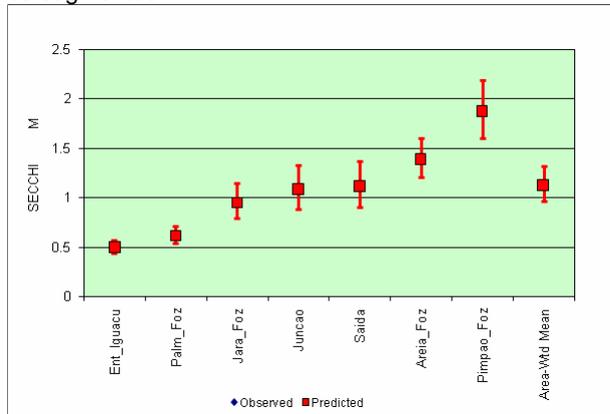


Figura 8 – Resultados para Profundidade Secchi

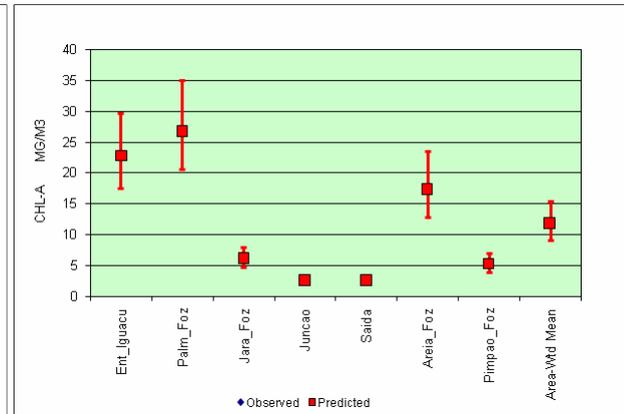


Figura 9 – Resultados para Clorofila

5.0 - CONCLUSÃO

O modelo implantado para o reservatório de Foz do Areia, usando o BATHTUB, apresenta-se como uma grande ferramenta de gestão e definidora de estratégias de ações que priorizem a melhoria da qualidade da água.

Uma conclusão imediata é a menor participação do ramo do rio Areia na elevação do nível de nutrientes e o aumento da população de algas, embora os níveis em ambas as entradas já conduzam à uma condição eutrófica, segundo os níveis de classificação tradicional.

A imposição de restrição às cargas afluentes traria, no modelo, um reflexo imediato na condição do reservatório e permitiria a verificação da condição futura em que este se estabilizará.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRASSAC, N.M.; DALLA-NORA, A.; MIRANDA, T.L.G. & LUDWIG, T.A.. Relatório anual do automonitoramento trimestral da qualidade das águas superficiais do Rio Iguaçu na região da Usina Hidrelétrica Foz do Areia (PR). Curitiba: LACTEC (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento), 2008. 45p.
- CALIJURI, M. C.; ALVES, M. S. A.; SANTOS, A. C. A. Cianobactérias e cianotoxinas em águas continentais. São Carlos: RIMA, 2006.
- 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: 23 nov. 2008.
- 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 nov. 2008.
- ESTEVES, F. A. Fundamentos de limnologia. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.
- SUPERINTENDÊNCIA DOS RECURSOS HÍDRICOS E MEIO AMBIENTE DO ESTADO DO PARANÁ. Portaria SUREHMA n. 020/92, de 12 de maio de 1992. Disponível em: <<http://www.pr.gov.br>>. Acesso em: 23 nov. 2008.
- THOMANN, R. V.; MUELLER, J. A. Principles of surface water quality modeling and control. New York: Harper & Row, 1987.
- TSUKAMOTO, Y. T.; TAKAHASHI, N. S. Cianobactérias+civilização=problemas. Revista Panorama da Aquicultura, p. 30, jul./ago. 2007.
- 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://www.epa.gov>>. Acesso em: 22 nov. 2008.
- _____. Technical guidance manual for developing total maximum daily loads. Washington, D.C.: EPA, 1997. Disponível em: <<http://www.epa.gov>>. Acesso em: 22 nov. 2008.
- 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.
- WALKER, W. W. Simplified procedures for eutrophication assessment and prediction: User manual. U.S. Corps Engineers, Waterways Experiment Station, Instruction Report W-96-2, Sept. 1996.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

- Paulo Sérgio Pereira, Engenheiro Civil pela UFPR, Mestrando em Gestão Ambiental da Universidade Positivo, Gerente da Divisão de Estudos Ambientais da Companhia Paranaense de Energia – COPEL.
- Bruno Victor Veiga, Engenheiro Civil pela UnB e Mestre em Engenharia Hidráulica e Ambiental pela UFPR, Sócio Administrador da RDR Consultores Associados, Professor do Curso de Engenharia Civil da Universidade Positivo.
- Maurício Dziedzic, Engenheiro Civil pela UFPR, Mestre em Engenharia Hidráulica e Ambiental pela UFPR e PhD pela Universidade de Toronto, Coordenador do Curso de Mestrado em Gestão Ambiental da Universidade Positivo.
- Nicole Machuca Brassac, Bióloga e Mestre em Botânica pela UFPR, Pesquisadora da Divisão de Meio Ambiente Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, Professor Adjunto do Núcleo de Ciências Biológicas e da Saúde da Universidade Positivo.