

## MODELAGEM MATEMÁTICA DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO DA UHE SANTO ANTÔNIO

*Jonatas Costa Moreira<sup>1\*</sup> & Amanda Morais<sup>2</sup> & Maria Clara Rodrigues Xavier<sup>3</sup> & Renato Dell'Erba Ortega<sup>4</sup> & Carolina Fiorillo Mariani<sup>5</sup>*

**Resumo** – O presente trabalho descreve a metodologia utilizada e apresenta alguns resultados do prognóstico da qualidade da água do rio Madeira durante o enchimento do reservatório da UHE Santo Antônio. As simulações de qualidade da água foram realizadas com os modelos CE-QUAL-W2, para o corpo do reservatório, e QUAL2-Kw, para o trecho de jusante.

**Palavras-Chave** – Modelagem, Qualidade da Água.

### WATER QUALITY MODELING OF SANTO ANTÔNIO'S RESERVOIR

**Abstract** – This paper describes the methodology and presents some results of the prediction of water quality of the Madeira River during the filling of HPP Santo Antônio's reservoir. The water quality simulations were performed with the model CE-QUAL-W2, to the body of the reservoir, and QUAL2-Kw for the stretch downstream.

**Keywords** – Modeling, Water Quality.

### INTRODUÇÃO

A Usina Hidrelétrica (UHE) Santo Antônio possui 3150,4 MW de potência instalada, e está localizada no rio Madeira, 7 km a montante da cidade de Porto Velho, Rondônia. As obras iniciaram em 2008, com a Licença de Instalação (LI), emitida para a Santo Antônio Energia, concessionária responsável pela implantação, operação e comercialização da energia gerada na usina. Em setembro de 2011, com a Licença de Operação (LO), foi iniciado o enchimento do reservatório, finalizado em janeiro de 2012. Em março de 2012, a primeira das 44 turbinas entrou em operação comercial, sendo que até o final 2013 estão previstas 28 turbinas em funcionamento.

O objetivo deste trabalho é descrever a metodologia utilizada para a realização do prognóstico da qualidade da água do reservatório da UHE Santo Antônio e do trecho do rio Madeira a jusante do mesmo, até a cidade de Humaitá, por intermédio de modelagem matemática [HICON/SAE (2011)], objetivando otimizar a supressão de vegetação e minimizar os impactos do enchimento do reservatório sobre a qualidade da água.

A utilização destas ferramentas possibilitou a identificação de condições críticas e a adoção de medidas para mitigar tais condições durante o enchimento do reservatório. Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Monitoramento Limnológico da UHE Santo Antônio.

<sup>1</sup> Hicon Engenharia, [jonatas@hicon.com.br](mailto:jonatas@hicon.com.br).

<sup>2</sup> Hicon Engenharia, [amanda@hicon.com.br](mailto:amanda@hicon.com.br).

<sup>3</sup> Hicon Engenharia, [clara@hicon.com.br](mailto:clara@hicon.com.br).

<sup>4</sup> Odebrecht Infraestrutura, [renatoortega@odebrecht.com](mailto:renatoortega@odebrecht.com).

<sup>5</sup> Santo Antônio Energia, [carolinamariani@santoantonioenergia.com.br](mailto:carolinamariani@santoantonioenergia.com.br).

## METODOLOGIA

As simulações de qualidade da água no reservatório da UHE Santo Antônio foram realizadas com o modelo bidimensional CE-QUAL-W2, desenvolvido pela Waterways Experiment Station, do U.S. Army Corps of Engineers [Cole and Buchak (1995); Cole and Wells (2006)].

Para a modelagem do trecho do rio Madeira situado a jusante da barragem da UHE Santo Antônio até a cidade de Humaitá, foi empregado o modelo unidimensional QUAL2-Kw [Chapra and Pelletier (2008)]. As cargas aplicadas ao segmento de montante (barragem) do modelo unidimensional foram obtidas das simulações do modelo bidimensional, levando em consideração a posição do descarregador e a qualidade da água nas camadas adjacentes ao mesmo.

Para o corpo do reservatório foram simulados os seguintes parâmetros: *Temperatura da Água* (*Tag, graus celsius*); *Idade da Água* (*Age, dias*); *Sólidos Suspensos* (*SST, mg/L*); *Oxigênio Dissolvido* (*OD, mg/L*); *Demanda Bioquímica de Oxigênio* (*DBO, mg/L*); *Nitrogênio Amoniacal* (*NH3, mg/L*); *Nitrato* (*NO3, mg/L*) e *Ortofosfato* (*PO4, mg/L*).

Para o trecho de jusante foram simulados os mesmos parâmetros acima, com exceção da Idade da Água.

## DESCRIÇÃO DO RESERVATÓRIO

O reservatório da UHE Santo Antônio possui, em seu nível d'água máximo normal na El. 70,50m, uma área de 354,43 km<sup>2</sup> e apresenta um volume acumulado de aproximadamente 2.275 hm<sup>3</sup>. Tomando-se como base sua vazão média de longo termo (QMLT) de 19.384 m<sup>3</sup>/s, avalia-se um tempo de residência médio teórico de valor reduzido, da ordem de apenas um dia. Durante os seis meses mais secos, com vazão média de 9.748 m<sup>3</sup>/s, este tempo de residência alcança apenas dois dias em média. Já durante os seis meses mais úmidos, com vazão média de 29.030 m<sup>3</sup>/s, o tempo de residência da água no reservatório é, em média, inferior a um dia.

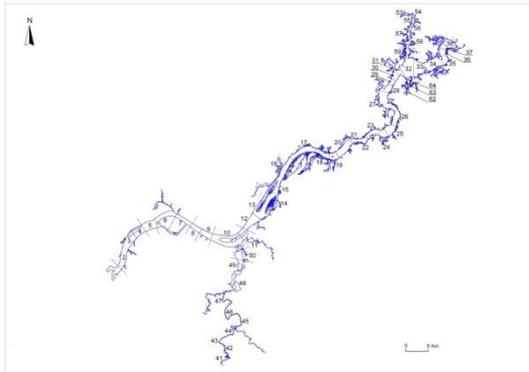
Nos problemas de qualidade da água em reservatórios de profundidades crescentes e sem grandes variações nas distâncias entre as margens, é viável estudar com rigor apenas os processos que têm orientação longitudinal e de profundidade, visto que os gradientes hidráulicos mais importantes se desenvolvem nessas direções. Desta forma, os modelos bidimensionais da categoria dos Modelos Lateralmente Homogêneos têm larga utilização nestes casos.

No caso específico do reservatório da UHE Santo Antônio as características morfométricas do corpo principal têm grandezas muito superiores às dos braços tributários. Além disto, por ser estreita, essa região é marcada por regimes de fluxo ditados pelas vazões afluentes do rio Madeira e os processos que ocorrem na dimensão longitudinal são dominantes sobre aqueles que ocorrem nas demais direções. Por este motivo, o emprego de um modelo bidimensional lateralmente homogêneo, como o CE-QUAL-W2, é mais indicado para representar os processos hidrodinâmicos no corpo do reservatório.

Já no estirão do rio Madeira a jusante da barragem, os processos que ocorrem na direção vertical apresentam menor importância, justificando o emprego, neste trecho, de um modelo unidimensional, como o QUAL2-kw, empregado nos estudos.

Na Figura 1, abaixo, pode-se observar a área do reservatório com a segmentação utilizada para o modelo bidimensional, na área do reservatório, e a discretização adotada para o modelo unidimensional, no trecho de jusante.

**Área do Reservatório da UHE Santo Antônio**



**Trecho a Jusante até a cidade de Humaitá**

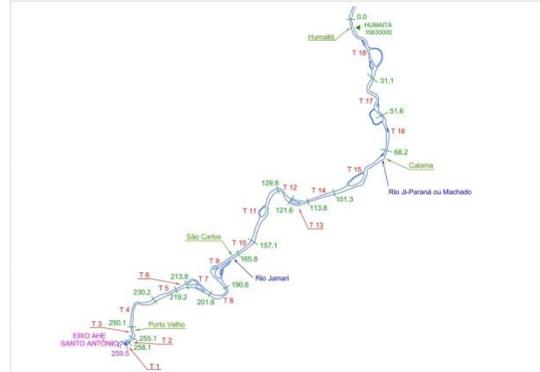


Figura 1 – Área do Reservatório da UHE Santo Antônio, com segmentação adotada na Modelagem Bidimensional e Trecho à Jusante, desde o eixo da UHE Santo Antônio até a cidade de Humaitá.

## DESCRIÇÃO DO CENÁRIO DE ENCHIMENTO SIMULADO

Durante os estudos realizados, e buscando minimizar os impactos do enchimento do reservatório sobre a qualidade da água do rio Madeira, foram simulados diversos cenários de enchimento, variando-se o ritmo de elevação do nível d'água, a quantidade de vegetação de floresta a ser removida, o tratamento a ser dado aos resíduos de desmatamento e a data de início da operação. O último cenário simulado, de que trata o presente trabalho, designado Cenário 4F, considerou as seguintes premissas:

- Enchimento gradual do reservatório, de agosto a novembro, após a retirada de vegetação de floresta e capoeira, de acordo com as ASVs (Autorização para Supressão de Vegetação) emitidas pelo IBAMA.
- Manutenção da vegetação nas áreas de preservação de Ictiofauna e de Agricultura e Pastagem.
- Remoção de toda a vegetação de floresta e capoeira existente na área a ser alagada ao longo do rio Jaci-Paraná, exceto nas áreas correspondentes à RESEX Jaci-Paraná, com enterrio dos resíduos de desmatamento na área do alto Jaci-Paraná e admitindo a digestão prévia dos resíduos da área do baixo Jaci-Paraná durante a cheia anterior ao enchimento.
- Consideração da carga devido à rebrota das áreas desmatadas com maior antecedência.
- Consideração da carga devido ao resíduo do desmatamento, nas áreas desmatadas junto ao corpo do rio Madeira, com exceção das ilhas Liverpool e São Patrício e da área do Igarapé Ceará.

## DADOS UTILIZADOS

### Modelo Bidimensional (CE-QUAL-W2)

Para a representação espacial no modelo, o reservatório foi dividido em 4 trechos, correspondentes à porção principal do reservatório sobre a calha do rio Madeira e aos braços laterais mais importantes: rio Jaci-Paraná e igarapés Jatuarana e Teotônio.

O reservatório foi dividido longitudinalmente em segmentos (Figura 1), sendo cada segmento dividido em camadas verticais, desde o fundo até o nível d'água. Foram obtidos 57 segmentos e 23 camadas com 2 metros de altura, cobrindo a faixa entre as elevações 24,00 m e 70,50 m.

Para cada segmento, foram calculadas as áreas inundadas para cada curva de nível.

Foi considerado o enchimento em um período de afluências médias, tendo sido escolhidos os anos de 2008 e 2009, sendo as vazões afluentes diárias obtidas a partir da estação fluviométrica Porto Velho (15400000). As vazões defluentes diárias foram calculadas em função da regra operativa adotada durante o enchimento, com manutenção de uma vazão mínima para jusante de  $3.293 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Q_{7,10}$ ).

Os dados climatológicos foram obtidos da estação climatológica do INMET, situada na cidade de Porto Velho. Buscando utilizar dados consistentes entre si, foram utilizados os dados climatológicos diários relativos aos anos de 2009 e 2010.

As séries diárias dos parâmetros de qualidade da água foram obtidas a partir dos dados de monitoramento resultantes das campanhas referentes ao *Plano de Trabalho para Monitoramento Limnológico e de Macrófitas Aquáticas da UHE Santo Antônio* [ECOLOGY BRASIL (2010)].

Os dados referentes às características das áreas de vegetação a serem alagadas foram obtidos a partir dos Estudos de Inventário Florestal para Requerimento da ASV [CEPEMAR (2010)].

A determinação das quantidades de carbono oxidável presentes na área do reservatório foi realizada utilizando-se os dados constantes nos *Estudos de Viabilidade do AHE Santo Antônio* [PCE/FURNAS/ODEBRECHT (2005)] e baseando-se nas metodologias empregadas para os reservatórios da UHE Samuel [Cardenas (1982)] e da UHE Porto Primavera [CESP (1994)].

### **Modelo Unidimensional (Qual2-Kw)**

Para a representação no modelo unidimensional, o estirão do rio Madeira a jusante da barragem foi dividido em 18 trechos, até a cidade de Humaitá (Figura 1).

Os parâmetros hidráulicos de cada trecho foram obtidos a partir de seções topobatimétricas compiladas no Relatório *Estudos de Modelagem Hidrossedimentológica Unidimensional do Rio Madeira*, [PCE/HICON (2010)]. Empregando-se o modelo HEC-RAS foram estabelecidas as necessárias relações entre vazão, profundidade e velocidade para cada trecho modelado.

Os dados de vazão e de qualidade da água na entrada do trecho de jusante foram obtidos a partir das defluências do modelo bidimensional, resultantes do modelo bidimensional, com exceção do parâmetro Oxigênio Dissolvido, para o qual foi considerado o processo de reaeração promovido pelos dispositivos de descarga, conforme metodologia de Butts and Evans (1983). Na aplicação dessa metodologia foram empregados parâmetros conservadores, tendo sido os resultados validados com base em observações realizadas durante o enchimento do reservatório da UHE Serra do Facão, no rio São Marcos, registradas no relatório *Estudos de Modelagem da Qualidade da Água do Futuro Reservatório da UHE Batalha e do Trecho à Jusante* [FURNAS/HICON (2011)].

## **RESULTADOS DA MODELAGEM**

### **Trecho do reservatório – Modelo Bidimensional (CE-QUAL-W2)**

Dentre os diversos constituintes simulados, optou-se pela apresentação, no presente trabalho, dos resultados de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Oxigênio Dissolvido (OD), por serem os parâmetros mais afetados pelo afogamento da biomassa durante o enchimento.

As saídas de modelos bidimensionais de qualidade da água fornecem enorme quantidade de números e tabelas, que demandam muito tempo para serem digeridos. Por este motivo, busca-se expressar os resultados de forma gráfica, reduzindo o tempo de análise e facilitando as conclusões.

No presente trabalho, os resultados do modelo bidimensional para o corpo do reservatório estão apresentados através de gráficos indicando a evolução do valor médio no compartimento (VMC), calculado pela ponderação das concentrações pelos volumes das células da malha computacional, a cada instante. O VMC representa um valor médio de concentração que aplicado a todo o volume do compartimento reproduz, num dado instante, a concentração do constituinte que

seria obtida distribuindo-se a carga total por todas as células da malha. Complementa a apresentação dos resultados uma figura de dinâmica unidimensional longitudinal (DUL), que mostra a evolução cronológica de um determinado parâmetro ao longo de todo o estirão estudado.

Os resultados apresentados na Figura 2 mostraram que no corpo principal (rio Madeira), a partir do fim do enchimento do reservatório (linha tracejada amarela), haverá uma rápida incorporação de biomassa, cuja decomposição promoverá o aumento da DBO, com valores máximos em torno 1,5 mg/L, valor bem inferior ao limite máximo preconizado pela Resolução CONAMA N° 357/2005, que é de 5,0 mg/L, para rios classe 2. No gráfico longitudinal (à direita), que mostra a distribuição das concentrações de DBO ao longo do corpo principal do reservatório para o dia mais crítico da simulação, observa-se que as maiores concentrações deste parâmetro ficarão restritas às camadas mais profundas, principalmente na região mais próxima à barragem.

Na evolução cronológica de OD (gráficos inferiores) pode-se observar que, durante a acumulação de água no reservatório, haverá uma depleção nas concentrações médias deste parâmetro, com valores mínimos em torno de 5,5 mg/L, que se encontra em conformidade com a Resolução CONAMA N° 357/2005, cujo limite mínimo é de 5,0 mg/L. O gráfico longitudinal das concentrações de OD para o dia mais crítico da simulação mostra que as menores concentrações deste parâmetro ficarão restritas às camadas mais profundas, padrão típico para reservatórios.

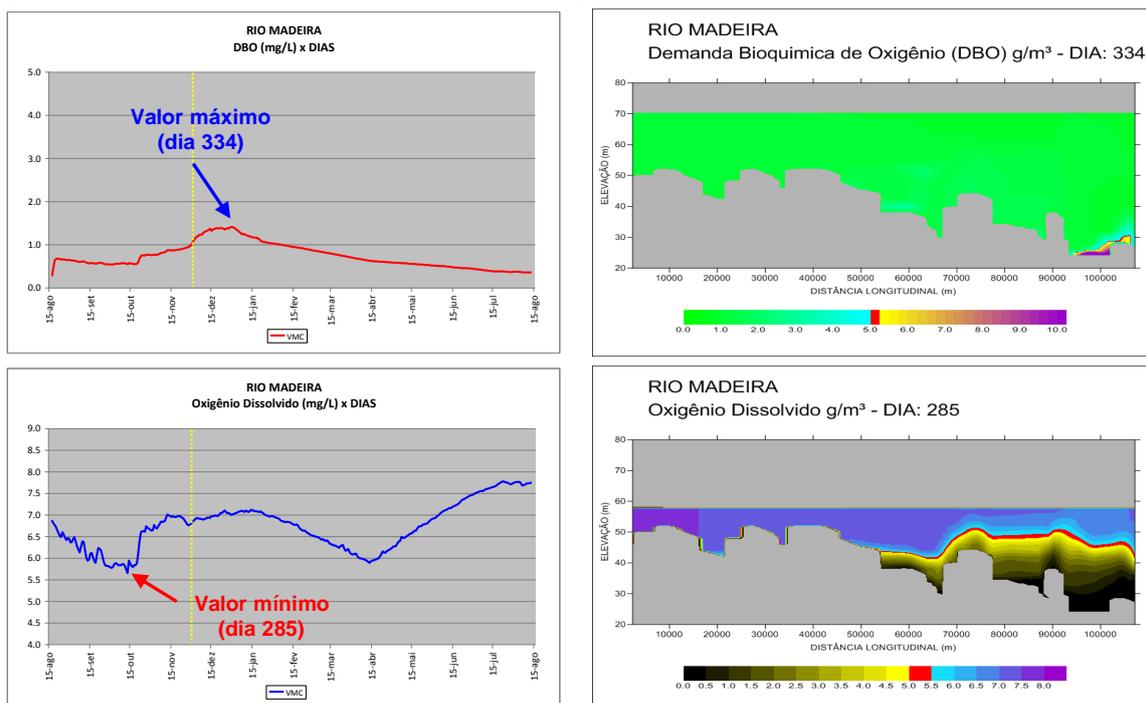


Figura 2 – Resultados dos VMCs de DBO e OD para o rio Madeira (corpo principal).

Os resultados do rio Jaci-Paraná são apresentados na Figura 3. Pode-se observar um aumento gradativo das concentrações de DBO, próximo ao fim do enchimento (linha tracejada amarela), com valores de VMC em torno de 3,0 mg/L. O gráfico longitudinal da distribuição das concentrações de DBO ao longo do rio Jaci-Paraná, para o dia mais crítico de simulação, mostra concentrações deste parâmetro variando entre 1,0 mg/L, no trecho mais à montante, e 4,5 mg/L, no trecho mais à jusante.

No gráfico temporal de OD pode-se observar que as concentrações deste parâmetro começarão a diminuir próximo ao fim do enchimento, atingindo 5,5 mg/L. Após este período ocorrerão aumentos e diminuições sucessivas, até atingir o VMC mínimo de 5,2 mg/L, este último

sem relação direta com o enchimento do reservatório. No gráfico longitudinal que mostra a distribuição das concentrações de OD para o dia mais crítico da simulação, ao longo do rio Jaci-Paraná, pode-se observar que as concentrações deste parâmetro situam-se entre 4,5 e 5,0 mg/L no trecho mais à jusante do rio, e entre 5,5 mg/L e 6,5 mg/L, no trecho mais à montante. Em alguns trechos do rio Jaci-Paraná, os valores de OD situaram-se abaixo do limite mínimo preconizado pela Resolução CONAMA N° 357/2005. Ressalta-se, contudo, que valores próximos a 4,5 mg/L já foram registrados neste rio, durante o monitoramento limnológico realizado na época de águas altas.

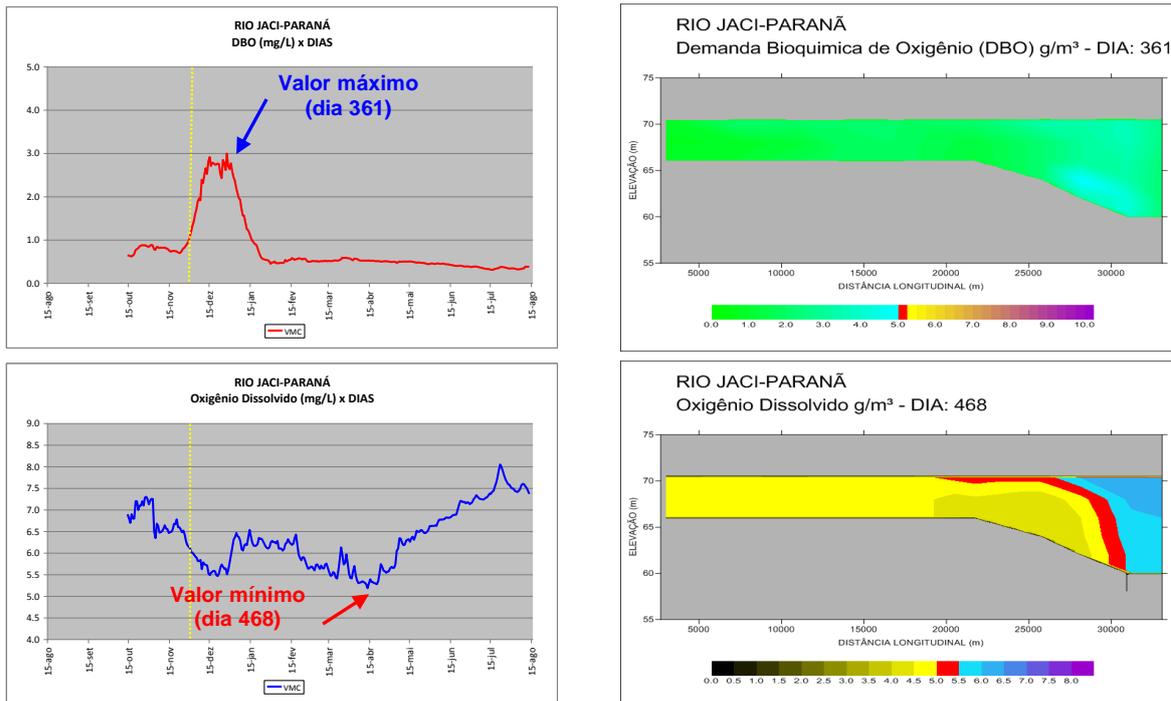


Figura 3 – Resultados dos VMCs de DBO e OD para o rio Jaci-Paraná.

Na Figura 4, a seguir, pode-se observar o comportamento longitudinal das concentrações de DBO e de OD no rio Madeira (corpo principal do reservatório), ao longo do tempo. Nessa figura, o fluxo orienta-se para cima, desde as cabeceiras (segmento 1) até a barragem (segmento 38). Nota-se que ocorre apenas uma ligeira alteração nos valores de DBO, que ficam em torno de 2,5 mg/L, durante 1 mês, aproximadamente, quando os efeitos da biomassa incorporada cessam completamente (a partir de fevereiro). Para o OD, pode-se observar que o período mais crítico da simulação ocorre durante o enchimento do reservatório e atinge aproximadamente 1/3 do mesmo, no trecho mais a jusante. Contudo, os valores mínimos situam-se em torno de 4,0 mg/L.

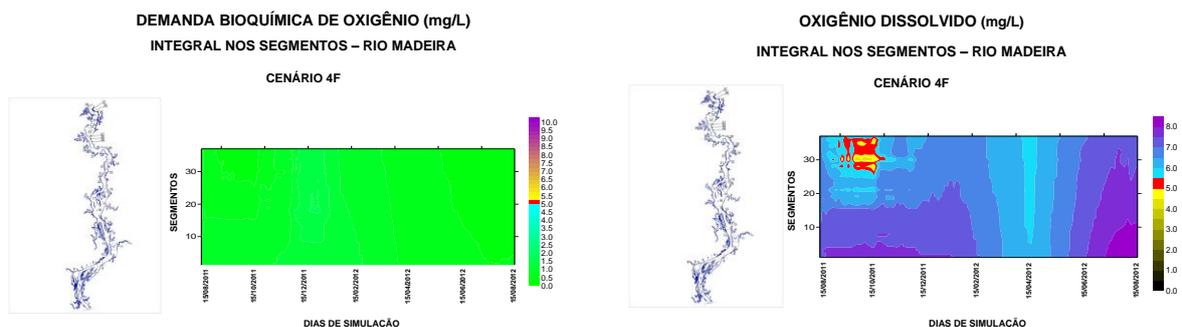


Figura 4 – Análise global unidimensional (DUL) para os parâmetros DBO e OD para o rio Madeira (corpo principal).

Na Figura 5, a seguir (fluxo orientado para cima, desde as cabeceiras até o rio Madeira), pode-se observar o comportamento das concentrações de DBO e de OD no rio Jaci-Paraná. Para a DBO, notam-se nuances semelhantes ao rio Madeira, mas com valores mais acentuados no trecho de jusante, em torno de 4,5 mg/L. Neste braço, os efeitos da incorporação da biomassa cessam no início de fevereiro, aproximadamente. Para o OD, observa-se num primeiro momento, em meados de dezembro, concentrações de OD um pouco abaixo de 5,0 mg/L no trecho de jusante. Mais tarde, no mês de abril, ocorrem concentrações de OD em torno de 4,5 mg/L, agora na porção superior (aproximadamente  $\frac{3}{4}$  do trecho, de montante para jusante).

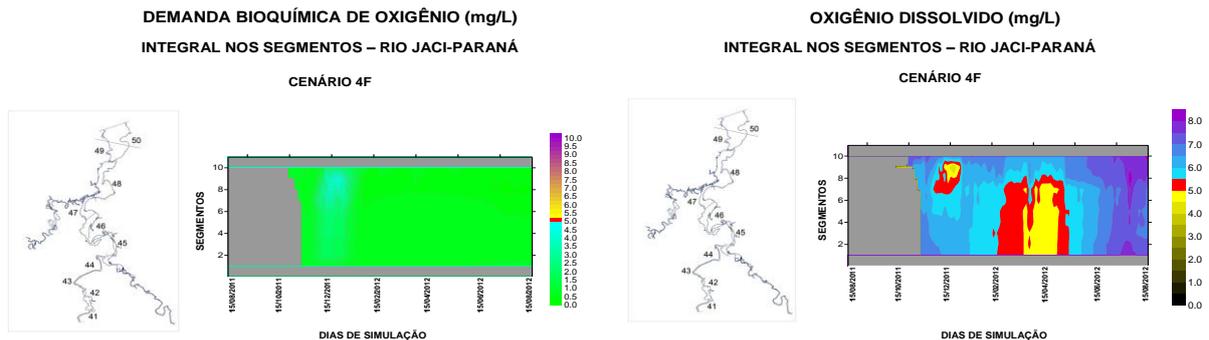


Figura 5 – Análise Global unidimensional (DUL) para os parâmetros DBO e OD para o rio Jaci-Paraná.

### Trecho de Jusante – Modelo Unidimensional (Qual2-Kw)

Os resultados para o trecho de jusante, que se estende desde o eixo da UHE Santo Antônio até a cidade de Humaitá, são mostrados na Figura 6, a seguir. Nesta Figura, onde o fluxo se orienta para baixo, desde a barragem até Humaitá, é possível avaliar a qualidade da água ao longo do tempo, através de escala de cores associada às concentrações dos parâmetros DBO e OD.

Pode-se observar que as concentrações de DBO atingem os maiores valores, próximos a 6,0 mg/L, apenas nas imediações da barragem e em curto período de tempo. Concentrações próximas a 5,0 mg/L ocorrem logo após o enchimento, num trecho de 25 km, a partir do eixo da barragem.

As concentrações de OD, elevadas junto à barragem devido à reaeração local, sofrem depleção ao longo de todo o trecho, em um período aproximado de 15 dias, devido à digestão da matéria orgânica (DBO) descarregada logo após o fim do enchimento do reservatório. As concentrações mínimas atingem 3,5 mg/L nas imediações da cidade de Humaitá (fim do trecho modelado). Em meados de dezembro, as concentrações de OD começam a se recuperar gradativamente, retornando para patamares próximos a 7,0 mg/L.

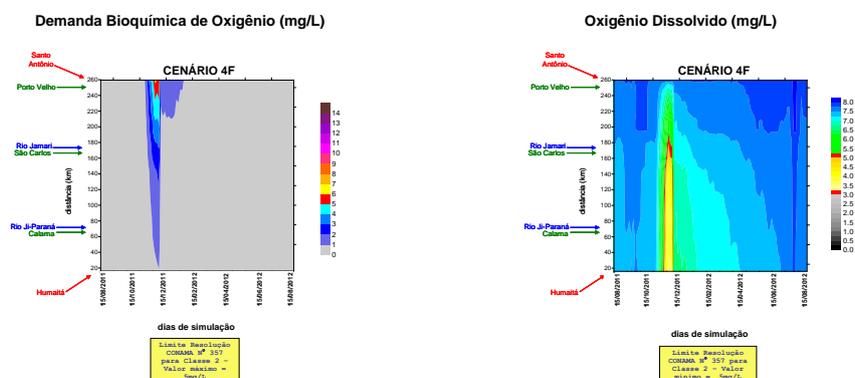


Figura 6 – Resultados da modelagem unidimensional para DBO e OD, em mg/L, no trecho à jusante da UHE Santo Antônio até a cidade de Humaitá.

## CONCLUSÕES

O processo de enchimento do reservatório da UHE Santo Antônio, no rio Madeira, e suas consequências sobre a qualidade da água dentro do reservatório e no estirão de jusante foi estudado com auxílio de modelos matemáticos que permitiram balizar decisões para melhor ajustar o Plano de Supressão de Vegetação. O tratamento gráfico dado aos resultados da modelagem proporcionou economia de tempo na análise dos resultados, mostrando como o processo de digestão evolui ao longo do tempo nos diversos compartimentos de interesse. O enchimento do reservatório foi bem sucedido, sem ocorrência ambiental ligada à ictiofauna. Esses resultados foram confrontados com os resultados do monitoramento, mostrando que a modelagem foi bem sucedida, assunto tratado em outro artigo apresentado nesse mesmo Simpósio.

## REFERÊNCIAS

- Butts, T. A. and Evans, R. L. (1983). Effects of Channel Dams on Dissolved Oxygen Concentrations in Northeastern Illinois Streams, Circular 132, State of Illinois, Dept. of Reg. and Educ., Illinois Water Survey, Urbana, IL.
- Cardenas, J.D.R. (1982). Estudos de Ecologia e Controle Ambiental na Região do Reservatório da UHE Samuel – Segmento Estimativa da Fitomassa do Convênio. ELN/MCT/CNPq/INPA.
- CEPEMAR (2010). Mapa da Vegetação a ser Suprimida - Escala 1:25.000 - Relatório de Inventário Florestal para Requerimento da ASV.
- CESP, CONSÓRCIO THEMAG-ENGEA-UMAH (1994). UHE Porto Primavera – EIA/RIMA. São Paulo.
- Chapra, S.C., Pelletier, G.J. (2008). QUAL2Kw: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 5.1: User Manual - Theory and Documentation. Environmental Assessment Program. Washington State Department of Ecology. Olympia, Washington.
- HICON/SAE (2011). Prognóstico da Qualidade da Água do Futuro Reservatório da UHE Santo Antônio no rio Madeira através de Modelagem Matemática (SAE-003/2011).
- Cole, T.M.; Wells, S.A. (2006). CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.5 – Instruction Report EL-06-11, U.S. Army Engineering and research Development Center – Vicksburg, MS.
- Cole, T.M.; Buchak, E.M. (1995). CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 2.0 – User Manual, U.S. Army Corps of Engineers – Waterways Experiment Station.
- ECOLOGY BRASIL (2010). Plano de Trabalho para Monitoramento Limnológico e de Macrófitas Aquáticas.
- FURNAS/HICON (2011). Estudos de Modelagem da Qualidade da Água do Futuro Reservatório da UHE Batalha e do Trecho à Jusante.
- LEME ENGENHARIA (2005). Diagnóstico do Uso da Terra e da Cobertura Vegetal das Áreas de Influência dos Aproveitamentos Hidrelétricos de Jirau e Santo Antônio. Belo Horizonte.
- PCE/FURNAS/ODEBRECHT (2005). Estudos de Viabilidade do AHE Santo Antônio.
- PCE/HICON (2010). Estudos de Modelagem Hidrossedimentológica Unidimensional do Rio Madeira.