

MODELAGEM MATEMÁTICA DE RESERVATÓRIOS ARTIFICIAIS COMO FERRAMENTA PARA O LICENCIAMENTO AMBIENTAL

Nocko, H. R.^{1} & Gobbi, M. F.² & Cunha, C. L. N.³*

Resumo – O artigo trata de um estudo de caso da utilização da modelagem matemática ambiental como ferramenta útil ao licenciamento ambiental de um reservatório artificial de água - Reservatório Louriçal, da UHE Simplício-Queda Única, no rio Paraíba do Sul, região sudeste do Brasil. O modelo utilizado foi o SisBAHIA, tendo sido simulados a hidrodinâmica e a qualidade da água. Esse rio apresenta concentrações relativamente altas de fósforo total. Tais concentrações, em ambiente lântico, podem levar à eutrofização do reservatório. As simulações foram utilizadas para basear tomadas de decisão sobre as melhores maneiras de atenuar e prevenir esse tipo de processo. Foram propostas mudanças morfológicas na tentativa de diminuir tempos de residência e melhorar a circulação em locais onde estagnações foram identificadas. Ainda que não tenha sido possível calibrar os modelos, pelo fato do corpo d'água modelado ainda não existir, os resultados foram analisados com comparações entre cenários, tanto de condições hidrológicas quanto morfológicas. Ao final foi possível escolher a alternativa que mostrou os melhores resultados em termos de qualidade da água. Essa alternativa prevê a construção de dois diques que separam as águas de dois braços do reservatório, formados nos córregos Areia e Louriçal.

Palavras-Chave – Modelagem da Qualidade da água de reservatório, usina hidrelétrica, licenciamento ambiental.

MATEMATICAL MODELLING OF RESERVOIR AS A TOOL FOR ENVIRONMENTAL LICENSING

Abstract – This article shows the case study of the environmental mathematical modeling utilization as a useful tool for the environmental evaluation licensing process of a reservoir - Reservoir Louriçal, part of the hydroelectric power plant Simplício-Queda Única, located on the river Paraíba do Sul, southeast of Brazil. SisBAHIA model has been used for simulation of hydrodynamical process and the water quality. This river has relatively high concentrations of total phosphorus, which in lentic environment can lead to eutrofication of reservoir. The results have been used to base decisions about the best ways to relieve and prevent this type of processes that affect water quality. Morphological changes were proposed in an attempt to reduce residence time and improve circulation in areas where stagnation were identified. Although it has not been possible to calibrate the models, because the reservoir does not exist, the results were analyzed with comparisons between morphological and hydrological scenarios. So it was possible to choose the alternative that produced the best results in terms of water quality and eutrophication risk. This best scenario provides the construction of two dams separating the waters of two areas of the reservoir, formed in the Areia and Louriçal streams.

Keywords – Reservoir water quality modelling, hydroelectric power plant, environmental licensing.

INTRODUÇÃO

As modelagens matemáticas, sejam elas de que tipo forem, têm se popularizado muito, tanto devido à atual grande capacidade computacional dos computadores pessoais, quanto à

¹ Envex Engenharia e Consultoria, PPGMNE/UFPR, hel-nocko@ufpr.br.

² Departamento de Engenharia Ambiental/UFPR, gobbi@ufpr.br.

³ Departamento de Engenharia Ambiental/UFPR, cynara@ufpr.br.

*Rua Dr. Jorge Meyer Filho, 93, CEP 80210-190, Curitiba/PR.

popularização do ensino nos cursos de graduação e à crescente utilização dessas ferramentas, gerando um ciclo virtuoso. Este artigo trata de um estudo de caso da utilidade da modelagem matemática de corpos d'água, para fins de prognóstico ambiental, como uma ferramenta a ser utilizada no licenciamento ambiental de reservatórios de água artificiais para geração de energia. Não há aqui pretensão de se discutir as minúcias dos modelos, características específicas e a formulação matemática dos mesmos, ainda que elas sejam apresentadas. Pretende-se, sim, entender a capacidade dessas ferramentas em responder perguntas de forma antecipada, por exemplo, antes da implantação de um reservatório, prevendo possíveis impactos ambientais e possibilitando estudar maneiras de preveni-los, eliminá-los ou simplesmente diminuí-los.

O estudo de caso a ser mostrado neste trabalho é a modelagem do reservatório Lourical do Complexo Energético de Simplício (AHE Simplício - Queda Única, composta por cinco reservatórios). Os estudos de modelagem foram solicitados pelo órgão licenciador - IBAMA, para o licenciamento ambiental da usina. É apresentado aqui um estudo da utilidade da modelagem matemática ambiental no licenciamento ambiental do reservatório Lourical. Foram utilizadas as modelagens da hidrodinâmica, da qualidade da água e do transporte lagrangeano de partículas, todas utilizando o SisBAHIA®. A modelagem foi utilizada para prevenção e quantificação de impactos ambientais, bem como ferramenta importante para mostrar alternativas para a atenuação desses impactos.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A modelagem de corpos hídricos é uma atividade já relativamente antiga. Em termos de qualidade da água, segundo Cox (2003), a Royal Commission usou pela primeira vez o conceito de balanço de massa da qualidade da água em 1912 para determinar um limite seguro para descarte de efluentes em rios com uma taxa fixa de diluição. A aplicação foi feita com o intuito de assegurar uma diluição suficiente do efluente para minimizar o impacto às concentrações de oxigênio dissolvido (OD) do corpo receptor, mas não levou em conta a dinâmica e reações cinéticas e acabou sendo bastante restrita. Em 1925, Streeter e Phelps deduziram as equações clássicas para simular OD e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) em rios. Essas equações tem sido base para muitos modelos de qualidade da água que têm sido desenvolvidos no mundo desde aquela época.

Ainda que a atividade já seja antiga, seu maior desenvolvimento ganhou grande qualidade apenas nas últimas décadas, com evolução da capacidade de processamento matemático pelos computadores, que possibilitaram a resolução mais precisa de sistemas mais complexos.

Os modelos são muito úteis para uma grande diversidade de fins, principalmente para a tomada de decisão. Jacobs (apud LIU et al., 2008) apontaram que para uma informação científica ser útil em um processo de tomada de decisão ela tem que ser: 1) Relevante para responder a questão política específica; 2) "Legível" e compreensível para os tomadores de decisão; 3) Aceitável em termos de acurácia e confiabilidade; 4) Compatível e utilizável no contexto da tomada da decisão; e 5) Fornecida em tempo hábil.

Graças a essa grande utilidade, os modelos têm sido aplicados para fins de prognóstico ambiental. Para reservatórios, diversas aplicações são encontradas na literatura. Alguns exemplos são citados a seguir.

Hocking e Patterson (1994) utilizaram uma versão adaptada do modelo DYRESM para estudar o movimento de traçadores e tempo de residência de um reservatório australiano. Wu e Xu (2011) estudaram a capacidade do EFDC em prever booms de algas em um reservatório na China. Resultados satisfatórios, mesmo com as vazões de entrada constantes e sem o vento. Recomendam que a taxa de produção algal seja dinâmica. Lindim et al. (2010) utilizaram a modelagem para

entender as variações espaciais e temporais de um reservatório do oeste europeu em resposta à afluência de nutrientes para basear a gestão do reservatório.

Soyupak et al. (1997) desenvolveram um modelo hidrodinâmico e um modelo de qualidade da água e aplicaram ao *Keban Dam Reservoir* na Turquia. Foram testadas quatro estratégias de controle de nutrientes, para a prevenção contra a eutrofização:

1. Controle do fósforo total dentro da bacia do principal afluente;
2. Implantação de tratamento terciário nas ETE da província próxima ao reservatório;
3. Construção de defletores nos segmentos eutróficos;
4. Construção de pequenas barragens a montante do reservatório no principal rio afluente ao reservatório.

Segundo Bach e Jensen (1994), a única maneira de fazer a previsão de qualidade da água de um sistema inexistente é aplicar um modelo com o qual acredita-se que possa-se descrever os fatores mais importantes para a determinação da qualidade da água. Foi exatamente essa a maneira adotada e aqui descrita para prever a qualidade da água de um caso real de um conjunto de reservatórios que compõem um empreendimento de geração de energia hidrelétrica.

METODOLOGIA

O modelo (ou conjunto de modelos) SisBAHIA® é o resultado de quase 25 anos de pesquisas da Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ, com resultados que demonstram sua alta qualidade, em diversos estudos onde foi necessário um amplo conhecimento da dinâmica física do meio ambiente, sendo utilizado como uma ferramenta imprescindível para diagnósticos e prognósticos qualitativos e quantitativos de fenômenos naturais e ações antrópicas potencialmente impactantes.

No SisBAHIA® as equações resolvidas são, basicamente, as equações de Navier-Stokes (para a hidrodinâmica), com pressão hidrostática para o campo de pressão e, para o caso deste estudo, promediadas na vertical. Para resolver essas EDP, que, segundo Rosman (1989) não têm solução analítica devido à complexidade da geometria, são utilizados os métodos numéricos das diferenças finitas (discretização temporal) e dos elementos finitos (discretização espacial). Dessa forma, o domínio é discretizado a fim de reduzir o problema físico contínuo a um problema discreto e as equações passam a ser avaliadas em cada ponto de uma malha computacional que é utilizada para representar a região que se pretende estudar. Segundo Cunha et al. (2001) o SisBAHIA® utiliza elementos finitos na discretização espacial e diferenças finitas na discretização temporal. A discretização vertical da coluna de água usa diferenças finitas com transformação sigma, de sorte que a discretização completa do domínio resulta em uma pilha de malhas de elementos finitos, uma para cada nível Z da transformação sigma (ROSMAN, 2011). Atenção espacial deve ser dada à técnica numérica utilizada e à discretização das tensões turbulentas, parametrizadas segundo as técnicas de filtragem derivadas da técnica conhecida como Simulação de Grandes Vórtices (LES, Large Eddy Simulation) (CUNHA et al., 2001).

Em reservatórios a fio d'água com profundidades locais relativamente pequenas não são esperadas estratificações verticais e a velocidade das correntes pode ser bem representada por meio de variáveis médias na vertical. Nestes casos as equações governantes de conservação de quantidade de movimento e massa são promediadas na dimensão vertical, reduzindo a dimensão do problema. Segundo Cunha et al. (2001), além da quase homogeneidade da coluna d'água, a validade de tal simplificação baseia-se também no fato de as escalas horizontais serem pelo menos duas ordens de grandeza maiores que as verticais e do escoamento de interesse ser predominantemente horizontal.

O Modelo de Qualidade de Água e Eutrofização (MQA) do SisBAHIA® tem a mesma base numérica do Modelo Euleriano de Transporte Advectivo-Difusivo (MTEADR) integrado na vertical, para escalares passivos e não-conservativos.

Escalares não-conservativos, que representam à maioria das substâncias existentes na água, sofrem modificação de concentração através de processos físicos, biológicos e químicos, chamados de reações cinéticas. Eles são definidos para cada substância, sendo, portanto o diferencial deste modelo. O entendimento e a formulação destes processos são fundamentais para a construção do modelo de qualidade de água (ROSMAN, 2011). Como as reações cinéticas modeladas variam fortemente com a temperatura e salinidade, o modelo foi construído considerando os seguintes 11 escalares: amônia, nitrato, fósforo inorgânico, zooplâncton, DBO, OD, Nitrogênio orgânico total, fósforo orgânico, clorofila, temperatura e salinidade.

O modelo que foi utilizado no presente trabalho é do ano de 2009, podendo ter discordâncias com versões mais atuais. Aqui são apresentadas as principais equações do modelo. Para maiores detalhes, pode-se consultar Rosman (2011) e Franz (2010).

ESTUDO DE CASO

O intuito das modelagens apresentadas nesta dissertação não é de prever booms de algas, mas prever o possível surgimento de alguns fatores que possam levar a esses fenômenos. Tais fatores, no presente artigo, são: altas concentrações de nutrientes, baixas velocidades da água e altos tempos de residência, além da avaliação do índice de estado trófico (IET).

O AHE Simplício - Queda Única, estudo de caso em questão, está localizado no rio Paraíba do Sul, na divisa dos estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais, englobando os municípios de Três Rios (RJ), Sapucaia (RJ), Chiador (MG) e Além Paraíba (MG). A potência instalada de Simplício é de 328,5 Megawatts (MW), gerando 202,2 MW firmes. A obra é composta por uma barragem e duas casas de força - Anta e Simplício. Além disso, há um vertedouro e uma série de canais, túneis, diques e 5 reservatórios entre as duas casas de força, otimizando a queda natural ao longo do rio.

A Figura 1 a seguir mostra a localização da AHE Simplício. O reservatório de Louriçal, o terceiro da sequência, foi utilizado como estudo de caso para esse artigo.

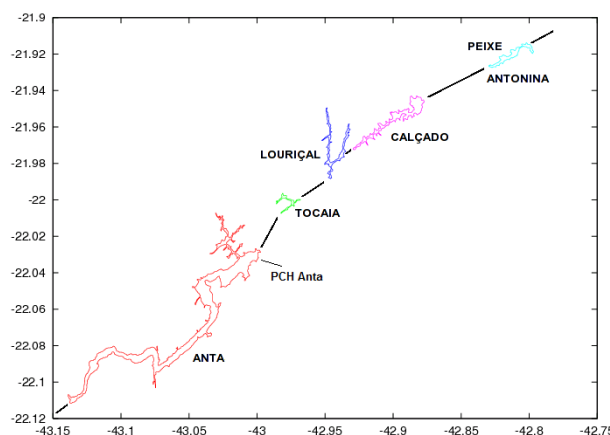


Figura 1 – AHE Simplício com seus cinco reservatórios, sendo Louriçal o terceiro

As vazões de entrada variam de 56, 5 m³/s na estiagem a 340 m³/s como vazão máxima turbinada (VMT) advinda do primeiro reservatório. A Tabela 1 mostra as condições iniciais e de contorno de qualidade da água utilizados.

Tabela 1 – Condições iniciais e de contorno de qualidade da água

	Corpo Principal	Córregos	Condição Inicial
Temperatura (°C)	22,00	18,58	20,00

	Corpo Principal	Córregos	Condição Inicial
DBO (mg/L)	2,00	2,00	0,00
OD (mg/L)	4,35	7,09	10,00
Nitrato (mg/L)	0,40	0,10	0,00
Amônia (mg/L)	0,06	0,01	0,00
Fósforo orgânico (mg/L)	0,045	0,015	0,00
Fósforo inorgânico (mg/L)	0,015	0,005	0,00
Clorofila a (mg/L)	4,00	0,00	1,17

A Figura 2 mostra a morfologia do reservatório de Louriçal na primeira fase de estudos. É possível também observar o módulo das velocidades para todo o reservatório para o cenário de VMT (esquerda) e para o período de estiagem (direita). Nessa fase, a morfologia do reservatório previa um túnel ligando os dois braços principais do reservatório. Percebe-se que antes de passar pelo túnel que divide o reservatório, a região mais intensa apresenta velocidades máximas da ordem de 0,55 m/s. O túnel central e o de saída são os locais com as maiores velocidades, de 1,5 e 1,7 m/s respectivamente. O fluxo gerado pela descarga de 2,0 m³/s, máxima vazão apresentada pelos tributários, gerou máximas velocidades da ordem de 0,09 m/s na entrada dos braços, de 0,015 m/s na porção mais central e inferior e voltou a gerar velocidades mais altas (0,1 m/s) na junção dos braços com a entrada do túnel central e do túnel de saída.

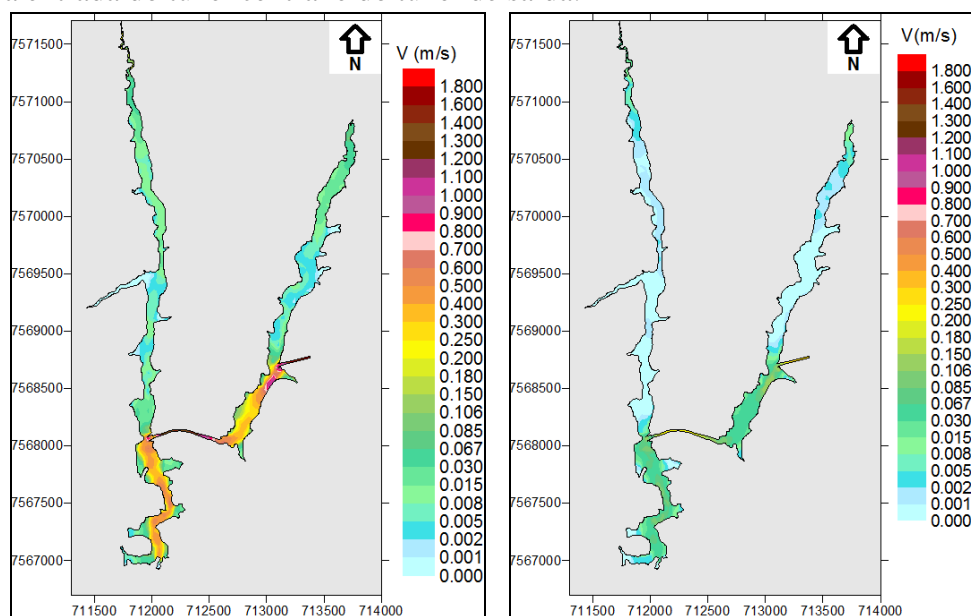


Figura 2 – Morfologia inicial do reservatório Louriçal e módulos das velocidades para os cenários VMT (esquerda) e de estiagem (direita)

Um detalhe para a região de saída do córrego Areia, antes de chegar ao túnel, é mostrado na Figura 3. A esquerda é mostrado o cenário VMT e a direita o cenário de estiagem. Na entrada do braço esquerdo do reservatório ao túnel percebe-se um aumento das velocidades de fluxo. Nesse local, ainda no braço, percebe-se a formação de dois vórtices girando em sentidos contrários, no cenário VMT. Esses vórtices são importantes por um lado para a manutenção de velocidades razoáveis dentro do reservatório. Porém, por outro lado, são responsáveis também pelo aumento do tempo de residência da água nesse local, o que pode ser prejudicial à qualidade da água. No cenário de estiagem, percebe-se que existem duas regiões de recirculações na saída do braço direito do reservatório. A recirculação mais ao norte é apenas parcial, pois não há uma inversão total de direção do fluxo. Esse é um fato relevante, pois essa forma de circulação hidrodinâmica é capaz de manter a água em movimento, ainda que com baixa velocidade e sem restringir sua passagem rumo

ao canal principal do reservatório. O vórtice formado na região próxima ao túnel central apresenta-se mais bem definido e intenso, com velocidades máximas em torno de 0,07 m/s. Logo abaixo percebe-se a quebra do padrão de recirculação, devido ao encontro de duas linhas de corrente com sentidos opostos, resultando em fluxos em diversas direções.

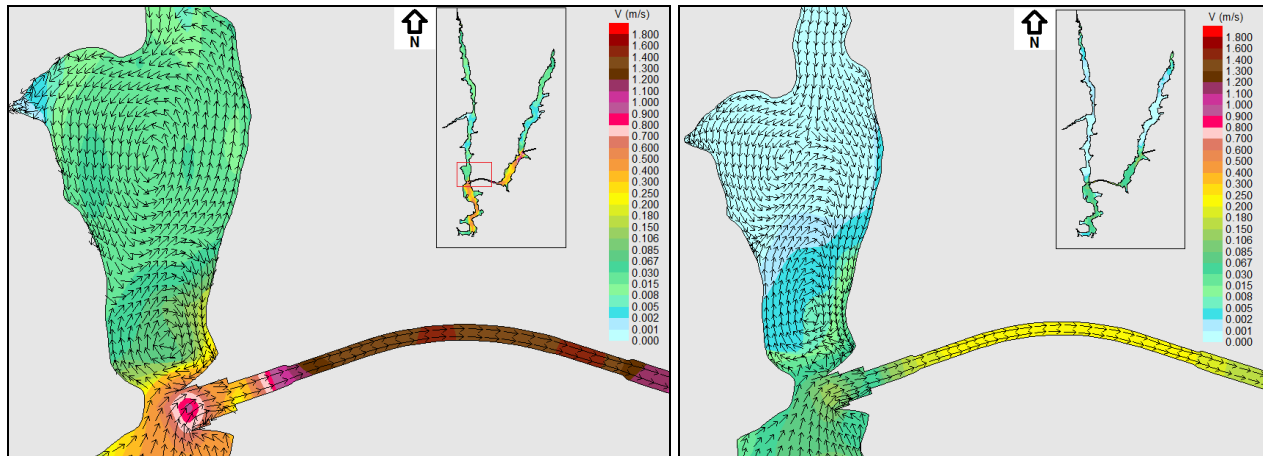


Figura 3 – Campo de velocidades - Detalhe da área próxima ao túnel. VMT (esquerda) e estíagem (direita)

A modelagem da qualidade da água mostrou resultados de fósforo total preocupantes (Figura 4, VMT a esquerda e estíagem a direita). As concentrações que chegam ao reservatório são relativamente altas. Ao encontrar um ambiente lântico, as condições para eutrofização se tornam mais evidentes. Ou seja, com as baixas velocidades, recirculações que aumentam o tempo de residência e altas concentrações de fósforo, há condições muito favoráveis à eutrofização. Sendo assim, decidiu-se por alterar a morfologia do reservatório, acrescentando diques galgáveis (ou pequenas barragens a fio d'água) na porção próxima ao túnel dos braços formados pelos córregos Areia e Louriçal.

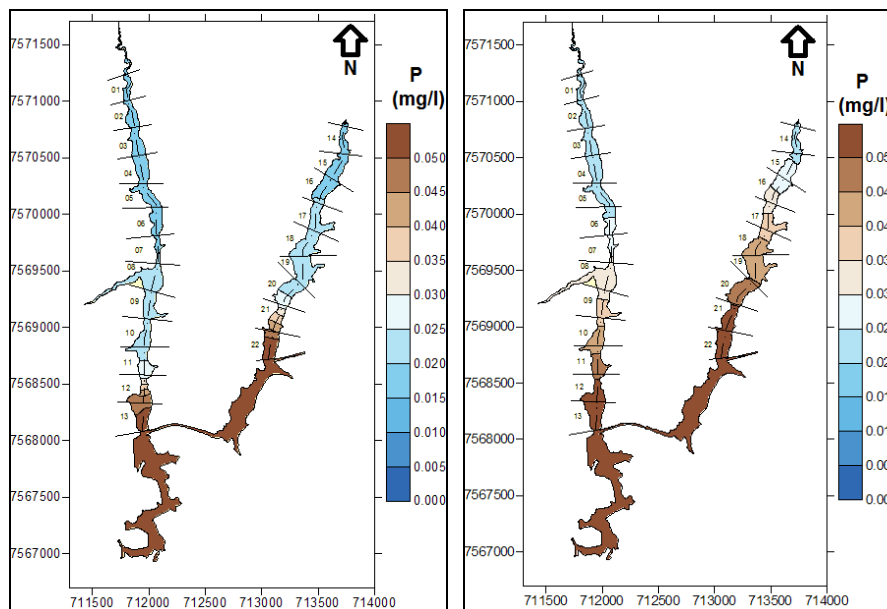


Figura 4 – Concentrações de fósforo total - VMT (esquerda) e estíagem (direita)

A Figura 5 mostra essa nova configuração do reservatório Louriçal, criando-se dois novos reservatórios com os córregos Areia e Louriçal. A Figura 6 mostra o campo de velocidades para o cenário de estíagem (o mais crítico) com o respectivo resultado para o fósforo total. O foco de maior interesse era na área a jusante do dique do córrego Areia. Percebe-se que apesar de haver

recirculações na área de interesse, não há concentrações de fósforo total advindas do corpo principal do reservatório invadindo a área dos córregos.

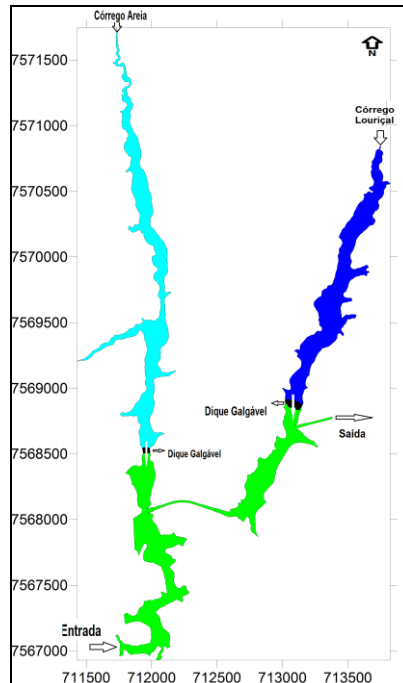


Figura 5 – Nova configuração morfológica do reservatório Louriçal

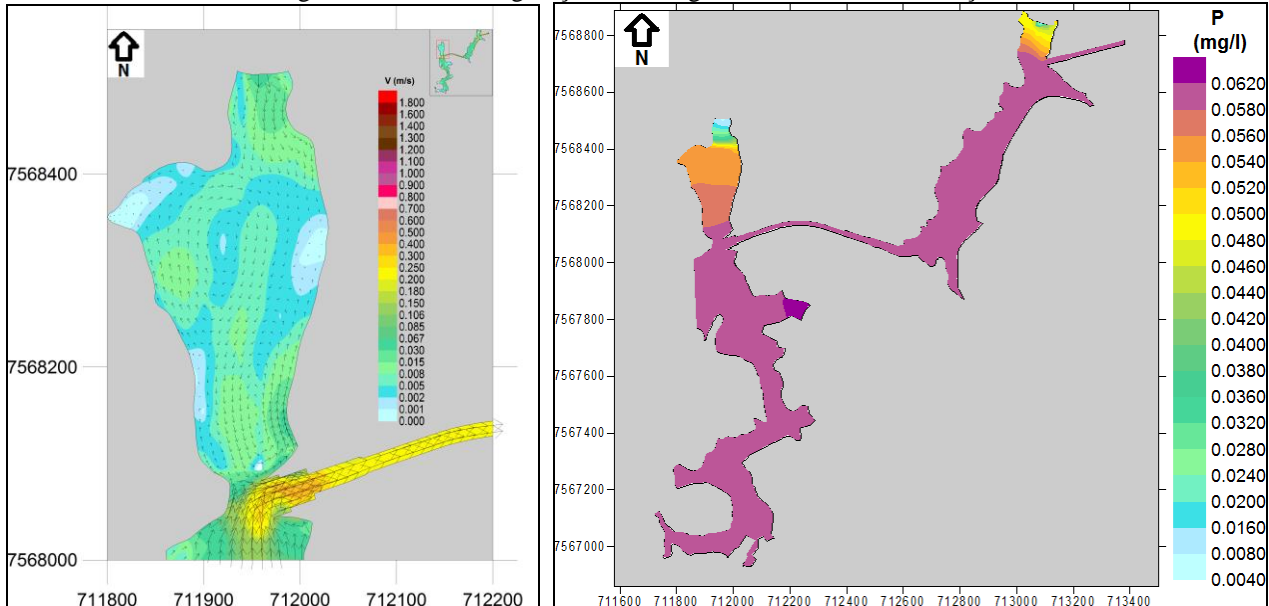


Figura 6 – Resultados da hidrodinâmica (estiagem) e de fósforo total (estiagem) para a nova configuração de Louriçal

CONCLUSÃO

A utilidade das modelagens matemáticas da qualidade da água e da hidrodinâmica foi apresentado neste artigo. Como não é possível calibrar esse tipo de modelo para um corpo d'água que ainda não existe, os resultados devem ser analisados com cuidado e, sempre que possível, feitas comparações entre cenários, para que as diferenças relativas ajudem a entender o comportamento do sistema.

É importante destacar também que o conhecimento técnico dos órgãos ambientais de licenciamento estão sendo melhorados ao longo dos anos. Esse fato é de fundamental importância para que os modelos passem realmente a fazer parte do rol de ferramentas exigidas e entendidas pelos licenciadores como úteis ao entendimento dos impactos ambientais de maneira qualitativa.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao PPGMNE e UFPR pela estrutura e oportunidades de estudo e à ELETROBRAS - FURNAS pelo financiamento destes trabalhos e por autorizar a utilização dos dados produzidos, especialmente na pessoa do Dr. Cassio Botelho Pereira Soares.

REFERÊNCIAS

- BACH, H. K.; JENSEN, J. K. Modelling of the water quality of a proposed impounded lake of a tidally influenced river. *Ecological Modelling*, v. 74, pp. 77–90, 1994.
- COX, B. A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers. *The Science of the Total Environment*, v. 314-316, pp. 335–377, 2003.
- CUNHA, C. L. da N.; ROSMAN, P. C. C.; MONTEIRO, T. C. N. Caracterização da circulação hidrodinâmica bidimensional da baía de sepetiba. In: *Anais do XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS e do V SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA*, 2001, Aracaju - SE. [S.l.]: Associação Brasileira de Recursos Hídricos -ABRH, 2001. pp. 151–151.
- FRANZ, G. A. S. Desenvolvimento, Aplicação e Análise do Modelo de Qualidade da Água e Eutrofização do SisBAHIA. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, 2010.
- HOCKING, G. C.; PATTERSON, J. C. Modelling tracer dispersal and residence time in a reservoir. *Ecological Modelling*, v. 74, pp. 63–75, 1994.
- LINDIM, C.; PINHO, J.; VIEIRA, J. Analysis of spatial and temporal pat-terns in a large reservoir using water quality and hydrodynamic modeling. *Ecological Modelling*, v. 222, Issue 14, pp. 2485–2494, 2011.
- LIU, Y.; GUPTA, H.; SPRINGER, E.; WAGENER, T. Linking science with environmental decision making: Experiences from an integrated modeling approach to supporting sustainable water resources management. *Environmental Modelling and Software*, v. 23, pp. 846–858, 2008.
- ROSMAN, P. C. C. Modelos de circulação em corpos d'Água rasos. In: RUI CARLOS VIEIRA DA SILVA. Métodos Numéricos em Recursos Hídricos. [S.l.]: ABRH, 1989.
- ROSMAN, P. C. C. Referência Técnica do SisBAHIA. Escola Politécnica e da Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica da COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.
- SOYUPAK, S.; MUKHALLALATI, L.; YEMİĞEN, D.; BAYAR, A.; YURTERI, C. Evaluation of eutrophication control strategies for the keban dam reservoir. *Ecological Modelling*, v. 97, pp. 99–110, 1997.
- WU, G.; XU, Z. Prediction of algal blooming using efdc model: Case study in the daoxiang lake. *Ecological Modelling*, v. 222, pp. 1245–1252, 2011.