



Ciência e Natura

ISSN: 0100-8307

cienciaenaturarevista@gmail.com

Universidade Federal de Santa Maria
Brasil

Lugon Jr, Jader; Thauan Ribeiro Costa, Victor; Gomes Watts Rodrigues, Pedro Paulo
Avaliação do Impacto de Pequena Central Hidrelétrica na Qualidade de Água do Rio
Itabapoana Através de um Modelo Computacional
Ciência e Natura, vol. 38, núm. 1, enero-abril, 2016, pp. 95-105
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=467546196008>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica
Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

Avaliação do Impacto de Pequena Central Hidrelétrica na Qualidade de Água do Rio Itabapoana Através de um Modelo Computacional

Assessment of the Impact of a Small Hydroelectric Power Plant over the Water Quality of the Itabapoana River through a Computational Model

Jader Lugon Jr ¹, Victor Thauan Ribeiro Costa ² e Pedro Paulo Gomes Watts Rodrigues³

^{1,2} Instituto Federal Fluminense, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, RJ, Brasil
jlugonjr@gmail.com; victorthauan@yahoo.com.br

³ Departamento de Modelagem Computacional, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, RJ, Brasil
pedropaulowatts@gmail.com

Resumo

Este trabalho apresenta os resultados gerados por modelos hidrodinâmico e de qualidade de água, aplicados a um trecho do Rio Itabapoana, localizado no noroeste do estado do Rio de Janeiro, com o objetivo de avaliar as consequências ambientais da implantação de uma Pequena Central Hidroelétrica (PCH). Os modelos foram calibrados comparando-se os dados simulados e observados, para uma condição específica, considerando tanto as variáveis hidrodinâmicas quanto as utilizadas no modelo de qualidade de água. Uma vez calibrados, os modelos simularam diferentes cenários, com ênfase principalmente naqueles que foram gerados sob regime de baixa vazão, por representarem situação mais crítica do ponto de vista ambiental. Os resultados mostraram que, para essas condições, alguns parâmetros de qualidade de água, notadamente a concentração de oxigênio dissolvido, poderiam ser afetados pela alteração no regime de escoamento, causada pela retirada de água para alimentação das turbinas da usina.

Palavras-chave: Impacto Ambiental. Qualidade da água. Licenciamento ambiental. Modelagem Ambiental. Rio Itabapoana, MOHID.

Abstract

This work presents the results of hydrodynamic and transport, which were applied to a stretch of Itabapoana River, located in the northwest of Rio de Janeiro State, in order to assess the environmental consequences of the implantation of a Small Hydroelectric Plant. The models were calibrated by comparing simulated and observed data, for a giving condition, regarding both hydrodynamic and water quality variables. Once calibrated, the models simulated different scenarios, with a special emphasis to those generated under low flow regime, which are environmentally more critics. The results showed that, for these conditions, some water quality parameters, markedly the Dissolved Oxygen concentration, would be affected by the change in flow regime, caused by the withdrawal of water to power the turbines of the hydroelectric plant.

Keywords: Environmental Impact. Water Qualit. Environmental Permit. Environmental Modeling. Itabapoana River. MOHID

1 Introdução

Modelos matemáticos e computacionais podem ser convenientes ferramentas de avaliação de impacto de atividades humanas na qualidade de água de corpos hídricos. Neste trabalho são apresentados os resultados de modelos construídos para simular o comportamento de alguns parâmetros de qualidade de água, diante de intervenções previstas na implantação de Pequena Central Hidrelétrica (PCH), a ser construída às margens do Rio Itabapoana, que drena extensa área rural no noroeste do estado do Rio de Janeiro. A bacia do Itabapoana tem área aproximada de 4.720 km², e o rio, em si, é o divisor natural dos estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. Atendendo recomendação do IBAMA, os parâmetros a serem avaliados seriam as concentrações de nitrato, amônia, ortofosfato, clorofila, demanda bioquímica de oxigênio, oxigênio dissolvido (OD) e coliformes fecais termotolerantes (CFT). Neste trabalho são discutidos, no entanto, resultados de simulações envolvendo somente concentrações de amônia, clorofila e oxigênio dissolvido, que em conjunto caracterizam-se por serem os indicadores mais sensíveis a processos de eutrofização, impacto ambiental recorrente em represamento de águas.

A interpretação dos resultados de simulações da qualidade da água na condição natural do corpo hídrico e após as obras tem por objetivo contribuir para tomada de decisão quanto à futura implantação. O relatório ainda está em análise pelo IBAMA para licenciamento do empreendimento.

Com o objetivo de permitir o melhor entendimento do leitor sobre o objetivo do estudo realizado, na Fig. 1 está representado o arranjo geral da PCH, com o canal de adução, a casa de força e o limite da área diretamente afetada.

O modelo foi desenvolvido no simulador MOHID (disponível no endereço www.mohid.com), que é uma plataforma de

simulação hidrodinâmica e transporte de constituintes em suspensão e solução, sendo de livre acesso, com a possibilidade, inclusive, de alteração de seu código fonte. Entre as principais aplicações desse simulador estão os trabalhos desenvolvidos nos estuários do Minho, Lima, Douro, Mondego, Tejo, Sado, Mira, Arade e Guadiana e nas lagoas costeiras Ria de Aveiro e Ria Formosa (INAG, 2001; Martins et al., 2000). O modelo foi igualmente implementado na maioria das lagoas da Galícia como Ría de Vigo (Taboada et al., 1998; Montero et al., 1999), Ría de Pontevedra (Taboada et al., 2000; Villarreal et al., 2000), além de outras lagoas (Pérez Villar et al., 1999). Além das regiões costeiras da Península Ibérica, alguns estuários em outras regiões já foram modelados fazendo-se uso do MOHID, como o Western Scheldt (Holanda), Gironde (França), esses através de modelos desenvolvidos por Cancino e Neves (1999), o estuário de Carlingford, Irlanda, através de modelo desenvolvido por Leitão (1997), assim como alguns estuários localizados na costa brasileira, tais como o do rio Macaé/RJ (Lima, 2012). Os resultados apresentados por esses modelos mostraram bastante consistência com dados observados, em que pese a complexidade dos ambientes simulados.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi a implementação de modelos hidrodinâmico e de transporte a serem aplicados em um trecho do Rio Itabapoana, com o intuito de subsidiar a avaliação de possíveis impactos ambientais decorrentes da implantação da PCH. Dessa forma, pretendeu-se testar uma plataforma de simulação que, embora já consagrada para aplicações em áreas costeiras, até o presente teve pouca utilização em corpos hídricos situados em regiões montanhosas, que usualmente apresentam geometria e escoamento bastante complexos, características que sempre representam complicadores na modelagem.

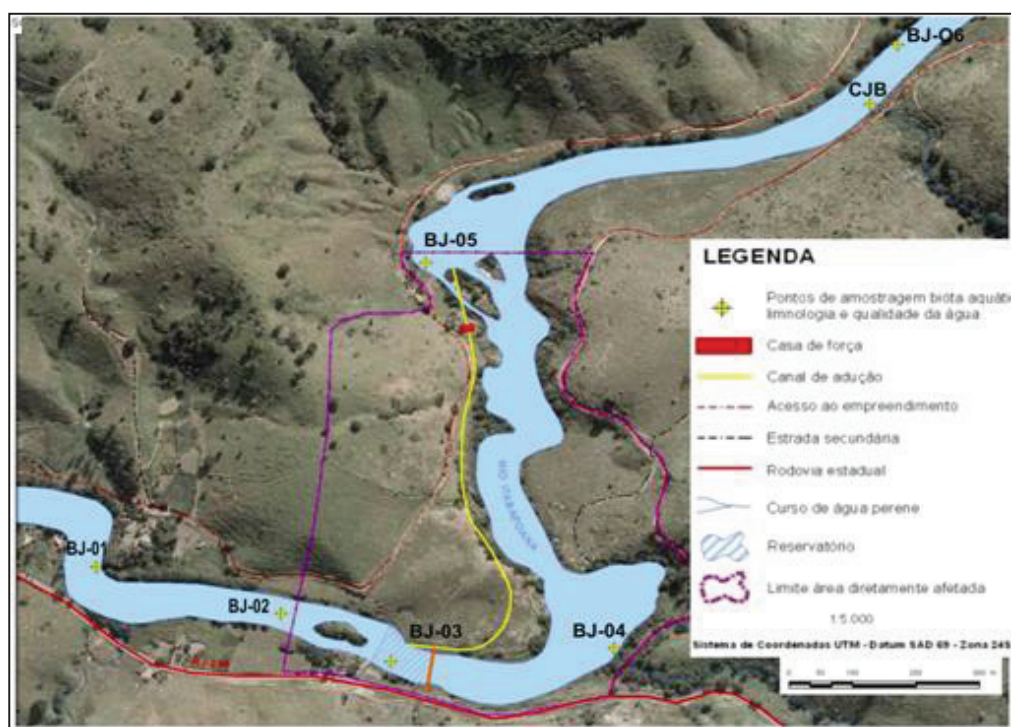


Fig. 1 - Representação do arranjo geral da PCH Bom Jesus (adaptado pelos autores)

2 Metodologia empregada

A implementação dos modelos aqui apresentados obedeceu à sequência usual necessária para tal propósito. Fazendo-se uso das informações topo-batimétricas disponíveis, inicialmente foi construído um modelo digital de terreno da área de interesse na condição natural e considerando já a construção da PCH, conforme mostrado na Figura 2. Os levantamentos topobatimétricos foram realizados a partir de uma estação posicionada nas margens do rio, fazendo-se visadas e registros sobre o prisma topográfico, devidamente posicionado no alinhamento. Quando a profundidade do rio foi superior a 3,50 m, as medições dos pontos foram feitas sobre o prisma na lâmina d'água, sendo que a medida da profundidade foi feita com uma corda com um peso em sua extremidade, estando acoplada a uma trena. No total foram levantadas 6 seções topobatimétricas. Já o perfilamento do rio foi conduzido observando-se o levantamento dos pontos de interesse, tais como, início e final das corredeiras, e ao longo do remanso

identificado no trecho de estudo. Esse levantamento foi executado com estação total, tomadas as observações sobre os prismas refletores, que foram posicionados em alturas diversas e distintas, de forma a ser obtido o maior número de pontos e uma boa visibilidade entre a estação e o receptor. A interpolação para gerar o MDT foi executada pela ferramenta MOHID GIS.

Neste estudo foi adotada uma versão 2-D horizontal da plataforma MOHID, capaz de simular, de forma integrada na vertical, as variáveis de interesse, as quais foram as componentes horizontais de velocidade e nível d'água para o Modelo Hidrodinâmico e a concentração de constituintes dissolvidos e em suspensão para o Modelo de Qualidade de Água (MQA).

O MQA do MOHID contempla aportes de rios e descargas antropogênicas, as trocas com o sedimento de fundo e com a atmosfera, sedimentação de material particulado e fontes e sorvedouros internos, esses modelados por reações específicas, simulando a evolução de até 24 propriedades da água, fazendo uso da abordagem euleriana.

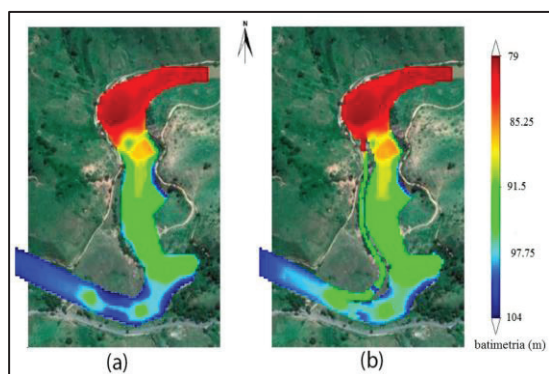


Figura 2 - Distribuição topo-batimétrica da região simulada no estado natural (a) e após a construção da PCH (b). A escala refere-se à distância (metros) do nível de referência

2.1 Definição dos cenários de interesse

Na definição dos cenários de interesse, foi fundamental estudar a série de vazões registradas no trecho da PCH Bom Jesus, no período entre 1949 e 1956, que foi disponibilizada pelo empreendedor a partir de pesquisa na ANA, cujo resumo é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Vazões características no aproveitamento do Rio Itabapoana no trecho da PCH Bom Jesus (m^3s^{-1})

Média de Longo Termo	41,76
Média Mensal Máxima	250,26
Média Mensal Mínima	3,87
Média Período Crítico*	33,39
Permanência 95% - ($Q_{95\%}$)	13,97

*Período de junho de 1949 a novembro de 1956

A seguir, com objetivo de definir os cenários de interesse para a operação da PCH, estudaram-se as vazões médias mensais fazendo uma correlação com a UHE Rosal, localizada a montante no próprio Rio Itabapoana, nas proximidades da área onde se pretende implantar a PCH. Vale destacar que as médias adotadas neste presente estudo são resultantes de regularização promovida pela própria UHE Rosal. Os resultados são apresentados na Tabela 2, com informações mensais das vazões turbinada e sanitária.

Com base nos dados das Tabelas 1 e 2 e informações fornecidas pelo empreendedor sobre a obra, decidiu-se simular os seguintes cenários:

- 1) situação natural para calibração, vazão de $13 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, condições sob as quais foram realizadas as medições de qualidade de água no campo;
- 2) situação natural, vazão média mensal mínima de $3,87 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (vide Tab. 1);
- 3) após a obra, vazão média histórica de $42,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, vazão turbinada de $33,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e sanitária no Trecho de Vazão Reduzida (TVR) de $8,88 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (baseada na UHE Rosal a montante- vide Tab. 2);
- 4) após a obra, vazão de operação de $13 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (vide Tab. 1), vazão turbinada de $10,4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e sanitária no TVR de $2,6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (vide Tab. 2);
- 5) após a obra, vazão média mensal mínima de $3,87 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, sendo totalmente descarregada no TVR.

Tabela 2 - Vazões médias mensais (m^3s^{-1}) - UHE Rosal (fonte: operador, base histórica de 1931 a 2007)

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Media
Histórica	81,0	60,2	56,6	46,1	32,6	25,7	22,4	18,6	18,6	25,0	47,9	72,9	42,3
Turbinada	51,3	44,7	44,4	41,3	30,0	23,1	19,8	16,0	16,0	22,3	40,3	52,0	33,4
Sanitária	29,7	15,5	12,2	4,8	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	7,7	7,7	20,9	8,88

2.2 Estratégia usada nas simulações

Na implementação do Modelo Hidrodinâmico, foram consideradas duas condições de fronteira. Nas fronteiras a montante e a jusante do empreendimento foram especificadas, respectivamente, a vazão do próprio rio e o nível de água, ambos obedecendo à curva chave. Tais condições foram alteradas em função dos cenários que se pretendia simular, adotando-se as vazões de interesse. A condição inicial informada ao modelo hidrodinâmico foi a profundidade definida no levantamento topo-batimétrico. Com o intuito de evitar que a condição inicial influenciasse os resultados simulados, foi imposto ao modelo que “rodasse” por um período de tempo determinado, equivalente ao tempo de residência da água na região simulada. Tal lapso de tempo variou em função da vazão informada ao modelo, sendo que na estimativa do tempo de residência foram adotadas simplificações na geometria do domínio físico simulado (basicamente, seções uniformes ao longo do escoamento), resultando em cerca de 22 minutos para a vazão de $42,3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (vide Tabela 2) e 235 minutos para a vazão de $3,87 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente, as vazões históricas média e mínima.

Na implementação do MQA, para cada constituinte simulado (por exemplo OD) foram adotadas igualmente duas condições de fronteira. Na fronteira situada a montante de onde deveria se instalar o empreendimento foi especificada a concentração determinada em campo, enquanto que na fronteira a jusante foi especificado um gradiente nulo, que em síntese propicia que a concentração nesse ponto seja definida pelo transporte e reações aos quais o constituinte simulado esteja sujeito a montante. A condição inicial adotada foi de concentração nula para toda a região estudada e para todos os constituintes simulados, tendo sido usada a mesma estratégia aplicada no Modelo Hidrodinâmico, ou seja, as simulações só passaram a ser consideradas após a completa renovação da água no domínio físico modelado, que se deu após transcorrer o tempo de residência (conforme explicado acima).

O MQA assumiu, ainda, algumas hipóteses simplificadoras, em função das peculiaridades da região simulada. Assim, a troca de constituintes entre o sedimento e a coluna d'água foi desconsiderada nesse modelo. Isso se justifica tanto pelas

características granulométricas do sedimento de fundo (baixo teor de matéria orgânica) quanto pelos campos de velocidade gerados no Modelo Hidrodinâmico, que indicaram taxa desprezível de deposição de sedimento coesivo, isso mesmo para o cenário de vazão sanitária. Além disso, adotou-se como “fonte” *in situ* de oxigênio a decorrente da fotossíntese, bem como a reaeração mecânica. Por fim, cabe destacar que aportes pontuais e difusos na região simulada também foram desprezados no modelo matemático implementado.

O MOHID faz uso do Método dos Volumes Finitos (Chippadaet al., 1998) na discretização das equações que compõem tanto os modelos de transporte quanto hidrodinâmico. Nesse método, a forma discreta das equações é aplicada macroscopicamente em um volume de controle. O procedimento adotado no simulador é tal que permite a resolução das equações de forma independente da geometria de cada volume de controle. Como os volumes podem variar no curso dos cálculos, a geometria é atualizada a cada passo de tempo em que as variáveis físicas são computadas. Além disso, as coordenadas espaciais são igualmente independentes, de modo que qualquer geometria pode ser escolhida para cada uma das dimensões. Coordenadas cartesianas e curvilíneas podem ser utilizadas no plano horizontal, enquanto que uma coordenada vertical genérica com diferentes sub-domínios pode ser utilizada no plano vertical.

Já com relação à discretização temporal, ela é implementada no simulador através do algoritmo semi-implícito ADI (Alternate Direction Implicit), introduzido por Peaceman e Racford em 1955 (Fletcher, 1991). Uma completa descrição dos modelos e métodos de discretização utilizados no MOHID pode ser encontrada em MARETEC (2012).

3 Calibração dos modelos

Uma premissa básica que sempre deve ser considerada na modelagem matemática é a de que os modelos nunca podem gerar resultados melhores do que os dados que lhes são fornecidos como “entradas”. Para simulações da qualidade de água de um dado corpo d’água, variáveis hidráulicas (vazão e nível d’água) e a concentração das substâncias simuladas, a serem determinadas nos limites do domínio simulado, devem ser prescritas. Ainda, de preferência tais dados devem ser informados através de séries temporais, se o interesse é na variação dinâmica e transiente dos processos que estejam ocorrendo na coluna d’água. Essas informações são críticas não somente para a implementação dos modelos, mas para sua calibração e validação. Neste estudo, a base de dados disponível para implementação e calibração dos modelos construídos esteve restrita a levantamentos pontuais em dois cenários específicos, representativos, respectivamente, de vazão de cheia e estio. Tanto as simulações quanto a calibração dos modelos aqui discutidos restringem-se à situação de estio, por se caracterizar em cenário mais crítico do ponto de vista ambiental. Por fim, deve-se ressaltar que os modelos matemáticos aqui implementados são resolvidos numericamente, ou seja, geram a distribuição espaço-temporal de propriedades de interesse para regiões discretas, sendo arbitrariamente representativas de uma pequena área da lâmina d’água, que define o nível de resolução do próprio modelo. A resolução adotada nas simulações aqui apresentadas foi de 9 m² (3m x 3m).

O Modelo Hidrodinâmico desenvolvido foi calibrado ajustando-se o coeficiente de Manning, comparando-se as profundidades medidas em campo e os valores simulados, os quais apresentaram satisfatória concordância, com a ressalva de que tal comparação esteve restrita ao cenário de estio.

O MQA foi calibrado comparando-se a distribuição espacial das concentrações simuladas com aquelas determinadas em campo para os parâmetros de interesse, sendo que os pontos de amostragem utilizados nesse levantamento são mostrados na Figura 1. Para efeito de comparação, foram considerados os dados de campo determinados nas estações BJ-04 e BJ-05, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Concentrações (mg l^{-1}) simuladas e determinadas em campo dos parâmetros na estação BJ-04 (Vide Fig. 1)

	Medidas (mg l^{-1})	Simuladas (mg l^{-1})
nitrato	0,2	0,2
amônia	0,01	0,01
clorofila	2	1,99
OD	4,8	4,2

Os parâmetros utilizados na calibração do Modelo de Qualidade de Água foram alguns dos coeficientes presentes nas formulações que parametrizam as reações químicas que envolvem as transformações do nitrogênio, bem como o consumo e produção de oxigênio.

Na calibração do MQA teve-se particular preocupação com a concentração de OD, isso porque, além de ser uma das mais importantes variáveis de indicação de qualidade de água, sua concentração controla importantes processos biogeoquímicos, como a mineralização de matéria orgânica, a nitrificação (transformação de amônia em nitrato) e até a adsorção de fósforo em partículas sedimentares, reações e processos esses todos incluídos na modelagem aqui adotada.

Essencialmente, a calibração da concentração de OD foi feita ajustando-se a expressão que parametriza o mecanismo de reaeração causado pelo turbilhonamento da

água, processo esse muito sensível às alterações de profundidade e velocidade de deslocamento da água.

4 Resultados

Uma vez verificada a consistência do modelo hidrodinâmico e do MQA para situações médias, foram geradas simulações de cenários de interesse, que não puderam, no entanto, ser confrontados com observações de campo, por conta da inexistência de dados levantados sob tais condições.

As simulações geradas pelos modelos contemplaram cenários que consideraram a existência ou não da barragem prevista no empreendimento. Nessas simulações foram adotadas vazões de $13 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para efeito de calibração e de $3,87 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, vazão considerada crítica em relação à qualidade da água.

4.1 Cenários antes da construção da barragem

Nas Figuras 3(a) e 4(a) são apresentadas, respectivamente, as distribuições espaciais das concentrações de OD e amônia, considerando vazão de $13 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e assumindo-se o rio em sua situação original, sem a construção da barragem. As Figuras 3(b) e 4(b) apresentam os resultados obtidos nas simulações de OD e amônia, adotando-se a vazão sanitária de $3,87 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Essas figuras apresentam a distribuição espacial dos parâmetros após o modelo atingir a estacionariedade. Deve-se dizer que a hipótese de estacionariedade em um curso natural pode ser aceitável se aportes pontuais (descargas) e difusos (via runoff) forem desprezados, como aqui esta sendo assumido.

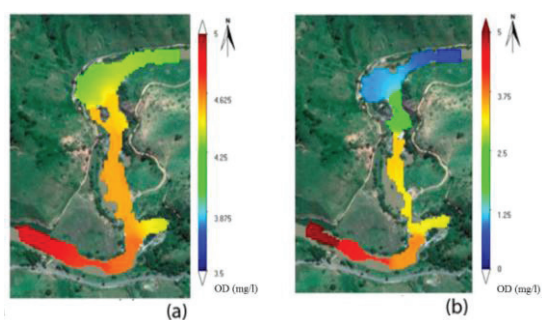


Figura 3 - Resultado da distribuição espacial em regime estacionário no estado natural para simulação de OD(mg l⁻¹) considerando a vazão de 13 m³ s⁻¹ (a) e de 3,87 m³ s⁻¹ (b)

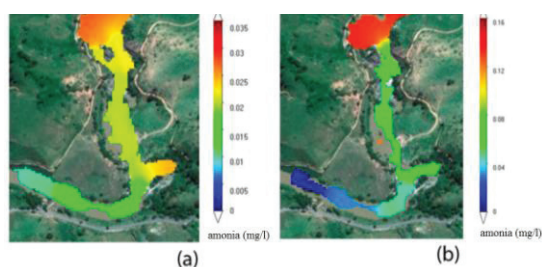


Figura 4 - Resultado da distribuição espacial em regime estacionário no estado natural para simulação de amônia (mg l⁻¹) considerando a vazão de 13 m³ s⁻¹ (a) e de 3,87 m³ s⁻¹ (b)

Para a vazão de 13 m³ s⁻¹, observa-se que o OD, espacialmente falando, apresenta faixa estreita de variação em sua concentração, situada entre os valores de 4,4 e 5 mg l⁻¹. Tal padrão se repetiu para quase todos os parâmetros, com exceção de amônia. Ressalte-se ainda que as concentrações verificadas a montante da região de interesse apresentam apenas ligeira variação em relação aos valores previstos para região a jusante. Tal comportamento também se verifica nos dados levantados em campo, para a maior parte dos parâmetros aqui avaliados. A justificativa para tal tendência está na hidrodinâmica que prevalece no meio, que resulta em um tempo de residência da água muito pequeno, de modo que nenhuma transformação relevante ocorre nos

constituintes químicos ao longo do trajeto compreendido entre a entrada e saída da região de estudo.

O comportamento atípico simulado para a amônia se justifica porque a concentração desse parâmetro informada ao modelo (aqui considerada como a determinada em campo), a montante da região de interesse, é relativamente pequena, de modo que qualquer mineralização que ocorra no interior dessa região (que resulte em produção de amônia) será percebida.

Ainda com relação ao OD, comparando a sua distribuição simulada para as vazões de 13 e 3,87 m³ s⁻¹ – Figuras 3(a) e 3(b), respectivamente - verifica-se nessa última um consumo muito maior (queda da concentração), o que se justifica, igualmente, pelo maior tempo de residência da água. De fato, a hidrodinâmica do meio, que em última análise condiciona o próprio tempo de residência, exerce papel fundamental na intensidade com que as reações de transformação química ocorrem na região de interesse. Para reforçar esse argumento, na Figura 5(a) é mostrada a distribuição do campo de velocidades simulado pelo modelo, para uma vazão de 13 m³ s⁻¹. Comparando-se essa distribuição de velocidades com as concentrações simuladas de OD, para as vazões de 13 m³ s⁻¹ e 3,87 m³ s⁻¹ (Figuras 3(a) e 3(b)), percebe-se nitidamente que os menores valores desse parâmetro ocorreriam justamente nas regiões de mais baixa energia (velocidade).

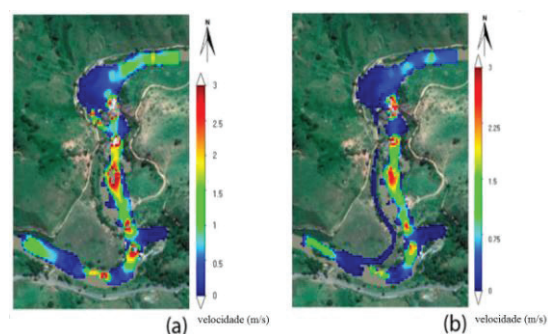


Figura 5 - Distribuição do módulo da velocidade (m s⁻¹) na região de interesse adotando-se vazão de 13 m³ s⁻¹ antes da obra(a) e após a obra (b)

4.2 Cenários após a construção da barragem

Após a avaliação dos cenários naturais, foram simulados outros que fornecessem a distribuição espaço-temporal dos parâmetros de interesse, considerando agora a construção da barragem prevista no empreendimento, bem como a subtração de parte da vazão do rio, feita através de um canal de adução (vide Figura 2(b)).

Os resultados discutidos no que segue se referem aos cenários de interesse definidos, correspondentes, respectivamente, à:

- vazão histórica média anual de $42,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (vazão turbinada de $33,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ com vazão sanitária de $8,88 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ passando pelo TVR);
- vazão mínima registrada na série histórica, de $3,87 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, que é a mais crítica em relação a qualidade da água e ao meio ambiente
- vazão operacional de $13 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (vazão turbinada de $10,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e vazão sanitária de $2,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ passando pelo TVR).

Nas Figuras 6(a) e 7(a) são apresentadas, respectivamente, as distribuições simuladas de oxigênio e amônia, assumindo-se vazão de $42,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. A simulação considerou que uma parte da vazão - $33,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ - seja desviada para a turbina e outra parte - $8,88 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ - passe pelo TVR. Já nas figuras 6(b) e 7(b) são apresentados os cenários para uma vazão do rio de $13 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, dos quais $10,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ são turbinados e outros $2,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ passam pelo TVR.

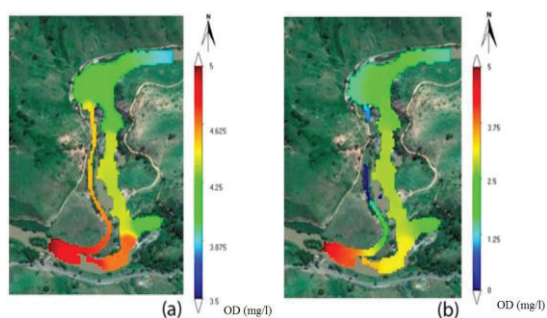


Figura 6 - Simulação da distribuição espacial em regime estacionário após a construção da PCH para OD (mg l^{-1}) na vazão de $42,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (a) e $13 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (b)

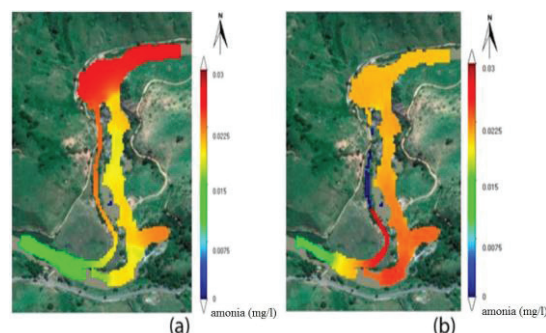


Figura 7 - Simulação da distribuição espacial em regime estacionário após a construção da PCH para amônia (mg l^{-1}) na vazão de $42,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (a) e $13 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (b)

Comparando-se o cenário que assumiu vazão operacional de $42,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ($33,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ turbinada e $8,88 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ passando pelo TVR) com aquele que não contemplava a construção da barragem (Figuras 3(a) e 4(a)), verifica-se que não ocorreria alteração significativa da qualidade da água durante a sua passagem pela região de interesse, isso porque a velocidade elevada não ofereceria tempo suficiente para que ocorressem transformações significativas dos parâmetros avaliados. Pode-se observar que a simulação desse cenário prevê que a concentração de OD seria reduzida de cerca de 5 mg l^{-1} para algo em torno de $3,8 \text{ mg l}^{-1}$. Essa pequena alteração da qualidade da água, que é compatível com os cenários anteriormente estudados, deve ser interpretada como uma consequência do represamento imposto pela barragem prevista no empreendimento, o que propiciaria (via aumento do tempo de residência) a intensificação de processos que consomem oxigênio, como a mineralização e nitrificação.

Por outro lado, assumindo-se vazão operacional de $13 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (sendo $10,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ turbinada e $2,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ passando pelo TVR), a concentração mínima de OD cairia de $3,75 \text{ mg l}^{-1}$ para $1,25 \text{ mg l}^{-1}$ ao final do trecho de interesse, conforme pode ser observado na Figura 6(b). Essa drástica queda na

concentração de OD deve ser atribuída também ao represamento da água, que seria ocasionado pela construção da barragem, que resultaria em um maior tempo de residência em dado trecho do rio.

4.3 Simulação com vazão de $3,87 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

Adotando-se uma vazão de $3,87 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, que, sendo insuficiente para a operação da turbina, seria totalmente desviada para o TVR, verifica-se que o modelo prevê que não haveria alteração significativa na concentração de amônia, se comparada com o cenário que não contempla as intervenções previstas no empreendimento.

Já com relação à concentração mínima de OD, essa cairia de $3,75 \text{ mg l}^{-1}$ para a completa anoxia ao final do trecho de interesse (simulação não mostrada), comportamento que encontra explicação nos argumentos já expostos.

Nas simulações geradas, tanto para as vazões de $13 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ quanto de $3,87 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, foi assumido que um sistema de comportas garantiria a menor lâmina d'água possível no reservatório que estaria sendo gerado com a construção da represa. Adotou-se essa hipótese por representar menor risco quanto à estratificação da coluna d'água, condição essa que eventualmente poderia favorecer ao processo de eutrofização, que estaria ocorrendo em resposta a uma menor renovação de água.

5 Conclusões e recomendações

O presente estudo permite concluir que o sistema MOHID tem capacidade para simular cenários de interesse ambiental em corpos hídricos situados em regiões montanhosas, mesmo apresentando geometria e escoamento bastante complexos.

Atendo-se ao cenário mais crítico estudado, correspondente ao de mais baixa vazão (aqui adotada de $3,87 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), as simulações geradas pelos modelos

matemáticos indicaram a ocorrência de alterações importantes na concentração de alguns parâmetros de interesse. Isso se verificou de forma mais crítica para OD e amônia, cujos resultados foram discutidos com mais detalhe neste trabalho. Além do fato de tal cenário ser de rara ocorrência, dentro da série de vazões levantadas pelo estudo, os modelos indicaram que a qualidade da água, em virtude da baixa vazão, já teria um certo grau de comprometimento, que eventualmente seria agravado pela intervenção prevista.

Por outro lado, na operação normal da PCH o modelo matemático permite prever que a redução da descarga do rio à vazão sanitária resultaria também em importantes alterações nos parâmetros avaliados, que ainda assim manteriam a qualidade da água do rio dentro dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/05 para águas doces de Classe 1, exceção feita à concentração de OD.

Deve-se destacar, ainda, que o trecho de rio que apresentaria maior deterioração da qualidade de água (porção mais a jusante do trecho de interesse) - Figuras 5 - 7(b) - teria esse impacto parcialmente atenuado pelo retorno das águas desviadas pelo canal de derivação previsto no empreendimento.

Por último, deve-se salientar que neste trabalho foram apresentados resultados de simulações que possam subsidiar o posicionamento das autoridades ambientais quanto ao impacto do empreendimento proposto. A confiabilidade do modelo foi aferida por comparação com dados de campo, a partir de amostragens pontuais e em instantes específicos, o que não é ideal para a avaliação de um modelo dinâmico e transiente, como o aqui construído. Portanto, para fins de uma utilização mais geral desse modelo, sugere-se como trabalho futuro a comparação do mesmo com séries temporais de parâmetros de qualidade de água, a serem determinados nos pontos de maior sensibilidade ambiental.

Agradecimentos

Os autores agradecem pelo apoio financeiro da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro FAPERJ.

Referências

- CANCINO, L.; NEVES, R. (1999). Hydrodynamic and sediment suspension modelling in estuarine systems. Part II: Application to the Western Scheldt and Gironde estuaries, *Journal of Marine Systems*, 22, pp.117-131.
- CHIPPADA, S., DAWSON, C., WHEELWE, M. (1998). Agodonov-type finite volume method for the system of shallow water equations, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 151(1), pp. 105-130.
- EPA. (1985). Rates, constants, and kinetics formulations in surface water quality modeling. 2nd. ed. United States Environmental Protection Agency, Report EPA/600/3-85/040.
- FLETCHER, C. A. J. (1991). *Computational Techniques for fluid dynamics*. 2nd ed. New York: Springer Verlag.
- LEITÃO, P. C. (1996). Modelo de Dispersão Lagrangeano Tridimensional. Tese (Mestrado) - Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- LIMA, E. B. (2012). Problemas Inversos Aplicados à Identificação de Parâmetros Hidrodinâmicos de um Modelo do Estuário do Rio Macaé. Tese (Doutorado em Modelagem Computacional), Universidade do Estado do Rio de Janeiro — UERJ/IPRJ, Nova Friburgo.
- MARETEC. (2012) Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. Descrição do MOHID. Editora Essentia. Campos.
- MIRANDA, R., BRAUSCHWEIG, F., LEITÃO, P., NEVES, R., MARTINS, F., SANTOS, A. (2000) Mohid 2000, A Costal integrated object oriented model. WIT Press.
- MONTERO, P., GÓMES-GESTERIRA, M., TABOADA, J. J., RUIZ-VILLARREAL, M., SANTOS, A. P., NEVES, R. J. J., PREGO, R., PÉREZ-VILLAR, V. (1999). On residual circulation of Vigo Ría using a 3D baroclinic model. *Boletín Instituto Español de Oceanografía*, 15 (1), pp. 31-38.
- PÉREZ-VILLAR, V. (1999). Ordenación Integral del Espacio Marítimo-Terrestre de Galicia: Modelización informática. Relatório do Grupo de Física Non Lineal, Consellería de Pesca, Marisqueo e Acuicultura. Xunta de Galicia.
- RODRIGUES, P.P.G.W., GONZALEZ, Y.M., SOUSA, E.P., MOURA NETO, F.D. (2012). Evaluation of dispersion parameters for River São Pedro, Brazil, by the simulated annealing method. *Inverse Problems in Science & Engineering*, 20, pp.1-18.
- TABOADA, J.J., PREGO, R., RUIZ-VILLARREAL, M., MONTERO, P., GÓMES-GESTEIRA, M., SANTOS, A., PÉREZ-VILLAR, V. (1998). Evaluation of the seasonal variations in the residual patterns in the Ría de Vigo (NW Spain) by means of a 3D baroclinic model. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 47, pp. 661-670.
- TABOADA, J.J., RUIZ-VILLARREAL, M., GÓMES, M., MONTERO, P., SANTOS, A. P., PÉREZ-VILLAR, V., PREGO, R. (2000). Estudio del transporte en la Ría de Pontevedra (NO España) mediante un modelo 3D: Resultados preliminares. In: Costa, A., Vale, C., Prego, R. (Eds). *Estudios de Biogeoquímica na zona costeira ibérica*.
- TABOADA, J.J. (1999) Aplicación de modelos numéricos a estudio de la hidrodinámica y del flujo de partículas en el Mar Mediterráneo, Dissertation (Ph. D.) Universidad de Santiago de Compostela, España.