

# Modelagem computacional como ferramenta de gerenciamento dos recursos hídricos: uma alternativa para abordagem de problemas de usos múltiplos

*Computational modeling as a tool for water resources management: an alternative approach to problems of multiple uses*

Haydda Manolla Chaves da Hora\*

José Henriques da Silva Tavares\*\*

Gabriel Lima de Souza\*\*\*

Jader Lugon Jr.\*\*\*\*

Maria Inês Paes Ferreira\*\*\*\*\*

## Resumo

Hoje no Brasil, ainda há muitos casos de incompatibilidade entre uso da água e disponibilidade hídrica. Em razão do aumento da variedade e dos volumes necessários, originou-se o conceito de usos múltiplos, conforme afirmam Pinheiro et al. (2007). O uso de um mesmo recurso para finalidades diferentes com diversas restrições (qualitativas e quantitativas) gera conflitos. Com o objetivo de minimizar tais conflitos, este trabalho foi aplicado a casos particulares das Regiões Hidrográficas VI e VIII, do Estado do Rio de Janeiro, usando modelagem computacional (baseada no *software* MOHID – Water Modeling System) como ferramenta para o gerenciamento dos recursos hídricos.

**Palavras-chave:** Modelagem computacional. Recursos hídricos. Usos múltiplos.

## Abstract

Today in Brazil there are many cases of incompatibility regarding use of water and its availability. Due to the increase in required variety and volume, the concept of multiple uses was created, as stated by Pinheiro et al. (2007). The use of the same resource

\* Instituto Federal Fluminense/Câmpus Macaé – Graduanda em Engenharia de Controle e Automação e Bolsista de Iniciação Científica CNPq/PIBIC.

\*\* Instituto Federal Fluminense/Câmpus Macaé – Mestrando do Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental e PETROBRAS Bacia de Campos, Macaé/RJ, Brasil.

\*\*\* Instituto Federal Fluminense/Câmpus Macaé – Mestrando do Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental e PETROBRAS Bacia de Campos, Macaé/RJ, Brasil.

\*\*\*\* Instituto Federal Fluminense/Câmpus Macaé – Professor/Pesquisador do Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental e especialista do CENTRO DE TECNOLOGIA SENAI RJ Ambiental – CTS-A, Rio de Janeiro/RJ, Brasil. E-mail: [jljunior@if.edu.br](mailto:jljunior@if.edu.br).

\*\*\*\*\* Instituto Federal Fluminense. Câmpus Macaé/NUPERN – Professora/Pesquisadora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal Fluminense.

to satisfy different needs with several restrictions (qualitative and quantitative) creates conflicts. Aiming to minimize these conflicts, this work was applied to the particular cases of Hydrographic Regions VI and VIII of Rio de Janeiro State, using computational modeling techniques (based on MOHID software – Water Modeling System) as a tool for water resources management.

**Key words:** Computational modeling. Water resources. Multiple uses.

## Introdução

Nos dias atuais, as pressões sobre o meio ambiente vêm se intensificando a cada dia e trazem ameaças e degradação ao ambiente cênico e às diversas formas de vida. Essa situação tem levantado discussões nos campos científico, político, social e econômico do Brasil e do mundo. Toda essa preocupação com a água, seja com a sua disponibilidade seja com sua degradação, sinaliza que ações de caráter urgente deverão ser tomadas com o objetivo da preservação, conservação e recuperação desse importante recurso, fundamental para a própria sobrevivência do homem.

Apesar dos múltiplos e essenciais usos das águas, sua inadequada gestão pode propiciar a redução de disponibilidade hídrica ou mesmo a escassez. Nesse sentido há carência de estudos regionais que possam subsidiar planos diretores de recursos hídricos de importantes mananciais existentes no estado do Rio de Janeiro, com vistas a garantir o equilíbrio entre as disponibilidades e as demandas futuras dos recursos hídricos (em quantidade e qualidade). Configurado tal cenário, o presente estudo utiliza modelagem<sup>1</sup> computacional (MOHID - Water Modelling System) como ferramenta para gerar prognósticos aplicáveis ao estudo de conflitos de uso da água.

No primeiro caso, o modelo será adaptado para simulações na Bacia Hidrográfica do Rio Macaé, Região Hidrográfica VIII (RIO DE JANEIRO, 2006), de seu estuário à região de Severina, onde se localizam as principais captações industriais (abastecimento de plataformas de produção e exploração de petróleo *offshore* da Bacia de Campos e de água de resfriamento para Termoeletricas) e de abastecimento público.

No segundo caso, o modelo será aplicado na Bacia Hidrográfica do Rio São João, Região Hidrográfica VI (RIO DE JANEIRO, 2006), para simulações de intrusão salina e dispersão de outros efluentes no estuário do rio São João, responsável pelo abastecimento da agropecuária no município de Casimiro de Abreu.

---

<sup>1</sup> Modelagem de software é a atividade de construir modelos que expliquem as características ou o comportamento de um software ou de um sistema de software. Na construção do software os modelos podem ser usados na identificação das características e funcionalidades que o software deverá prover (análise de requisitos), e no planejamento de sua construção. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Modelagem>.

### O Rio Macaé

A primeira região do estudo (baixo curso do rio Macaé) está localizada no litoral norte-fluminense e, exatamente por ser o baixo curso, sofre o impacto de toda a bacia hidrográfica. Dentre as diversas possibilidades de uso dos seus recursos ambientais, destacam-se o abastecimento público e industrial; a irrigação; a dessedentação de animais; a manutenção da biodiversidade; a pesca; a navegação; e os aproveitamentos hidroelétricos em duas Usinas Hidroelétricas (UHES), situadas na sub-bacia do rio São Pedro (UHE-Macabu e UHE de Glicério), esta última, atualmente desativada. No baixo curso do rio Macaé estão instaladas duas usinas termelétricas, a Usina Termelétrica (UTE) Norte Fluminense e a UTE Mário Lago, a qual foi recentemente incorporada ao patrimônio da PETROBRAS (MATOS, 2008).

Quanto à situação da qualidade dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Macaé, estudos relevantes foram realizados e sistematizados, em linguagem de fácil compreensão, através de um índice de qualidade de água (IQA), por Pinheiro (2008). Os estudos mostram que, apesar de os valores do IQA expressarem uma boa qualidade de água do rio Macaé, a contaminação por esgoto doméstico é a principal fonte de poluição na bacia, impedindo os diversos usos múltiplos. Foi verificado inclusive o potencial de transmissão de doenças do corpo hídrico ao se identificar o *E. coli*, um indicador de contaminação fecal, como parâmetro crítico na bacia. Outro aspecto observado foi que a qualidade da água é fortemente influenciada pelo escoamento superficial das bacias de drenagem e suas fontes difusas de poluição, por apresentar durante os períodos chuvosos suas piores condições e nos períodos de estiagem ter boa qualidade (PINHEIRO, 2008).

Além dos aproveitamentos hidrelétricos, a área também pode ser caracterizada pelo uso dominante da pecuária bovina e cultivo de arroz e feijão. No final da década de 70, o extinto Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS) realizou obras de retificação e alargamento no canal do rio Macaé, no baixo curso da bacia, com a finalidade de diminuir as áreas alagadas, objetivando minimizar os altos índices de malária e para possibilitar a prática agropecuária (BENASSULY, 2009).

### O Rio São João

A segunda região de estudo é o Estuário do Rio São João, também situado no litoral do Norte Fluminense, porém na Região Hidrográfica VI. Dados do Consórcio Intermunicipal para Gestão Ambiental das Bacias da Região dos Lagos, do Rio São João e Zona Costeira, também conhecido como “Consórcio Intermunicipal Lagos São João (CILSJ)” informam que o rio São João, que já possuiu um curso contínuo e sinuoso com aproximadamente 133 km, atualmente se desenvolve por cerca de 120 km. Essa alteração foi devida à atuação do extinto DNOS que, no período de 1950 até 1985, realizou “grandes” obras, que compreenderam a retificação e canalização dos

principais rios, tributários, bem como a drenagem de brejos e a construção da represa de Juturnaíba, nascida da, até então, Lagoa de Juturnaíba, corpo hídrico ao qual o rio São João se ligava, sendo este último um escoadouro do primeiro, através de um canal natural chamado Revólver (ou Sangradouro), isto a cerca de 63 km da nascente (CILSJ, 2010).

A jusante da barragem de Juturnaíba tem início o baixo curso do rio São João, cujo leito natural se estende por 65 km até a foz. Todavia, com os canais artificiais construídos pelo DNOS, as águas agora percorrem 38,5 km, sendo 25 km em canal reto e 13,5 no leito natural, entre o Morro de São João e a foz. Terminando sua jornada, o São João lança-se no oceano através de uma barra com cerca de 150 m de largura (CILSJ, 2010).

O aproveitamento e os usos das águas da bacia em questão variam ao longo de seu curso, sendo os principais o abastecimento público e a irrigação. Relativamente ao uso para abastecimento, o rio São João é estratégico não somente para os municípios da bacia, mas também para toda a Região dos Lagos, dado o abastecimento (total ou parcial) de pelo menos dez municípios, sendo vital para a economia, a saúde e o turismo. Para a irrigação, destacam-se os municípios de Silva Jardim, Rio Bonito, Casimiro de Abreu, Araruama e Cabo Frio, sendo as captações (sem outorga) destinadas, geralmente, ao cultivo de oleaginosas, cítricos e cana-de-açúcar, em alguns pontos (CILSJ, 2010).

## **Materiais e métodos**

Os materiais utilizados foram os necessários à obtenção de dados e seu processamento: Modelo computacional – MOHID (*freeware*<sup>2</sup>); Mapas e Imagens de satélite; GPS (GARMIN/eTrex Vista); condutivímetro (Thermo Fisher Scientific Inc./3-Star) e ecobatímetro (Valpesca/Sonar Portátil Fish Finder).

Relativamente ao método, empregou-se a modelagem matemática, cujo objetivo fundamental é a representação, com o devido rigor matemático, dos fenômenos da natureza, prescrevendo comportamentos possíveis, dentro de uma determinada condição de contorno (SOUZA, 2008).

### *Modelagem*

A legislação ambiental brasileira estabelece o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos como um dos instrumentos para a gestão das águas (BRASIL, 1997). Para que esta gestão se dê adequadamente, o gerenciamento dos recursos envolve necessariamente práticas de monitoramento e diagnóstico ambiental. Em se tratando particularmente de recursos hídricos, é crescente a utilização de modelos de variada

<sup>2</sup>Freeware: é qualquer programa de computador cuja utilização não implica o pagamento de licenças de uso ou royalties. Disponível em: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Software\\_gratuito](http://pt.wikipedia.org/wiki/Software_gratuito).

complexidade, que sirvam ao propósito de auxiliar nas decisões que envolvam o manejo desses recursos. Modelos matemáticos e computacionais se enquadram nessa categoria de ferramenta. Ainda que sejam abstrações e simplificações dos sistemas reais simulados, tais modelos, se adequadamente calibrados e validados, são extremamente úteis, principalmente pela capacidade de gerar diferentes cenários e de manipular uma grande quantidade de variáveis.

Acerca dos recursos hídricos, especificamente quando se trata de rios, o comportamento de substâncias em seu interior pode ser estimado através de modelos matemáticos que podem ser estocásticos ou determinísticos. Os modelos estocásticos consistem em tratamento estatístico de dados de modo que se possa definir, por exemplo, tendências sazonais da concentração de poluentes. Já os modelos determinísticos possibilitam descrever a hidrodinâmica e o transporte de solutos ou suspensões dentro do sistema.

Idealmente falando, tais modelos apresentam-se como as ferramentas mais adequadas de diagnóstico e prognóstico de ambientes fluviais, pois, uma vez calibrados, diversos cenários podem ser gerados, bastando-se que para isso sejam modificadas as entradas fornecidas ao modelo. Tais modelos obedecem a uma sequência hierárquica de construção e calibração. Inicialmente deve ser construído um modelo hidrodinâmico (MHD), que resolva a distribuição espaço-temporal de velocidades, elevação de nível d'água e vazão. A esse modelo é sobreposto um modelo de transporte de substância conservativa (MTSC), sobre o qual é desenvolvido um modelo de transporte do constituinte (MTSNC) em estudo.

O grau de empiricismo de tais modelos também cresce obedecendo à mesma sequência. Sendo assim, os MHDs fundamentam-se em equações bem estabelecidas pela Mecânica dos Fluidos, a partir das quais algumas simplificações são assumidas. Os MTSCs são expressos por uma equação em que a principal incerteza está na definição do coeficiente de dispersão, enquanto que nos MTSNCs, muita incerteza envolve também a dependência funcional das reações que representam remoção ou produção da substância em meio fluvial. Essas duas últimas categorias de modelos são genericamente denominadas de Modelos de Qualidade de Água (MQA).

O conjunto de equações que compõem o modelo determinístico via de regra é resolvido numericamente, gerando o que se chama de simulação numérica. A ideia básica da simulação numérica é o processo de discretização, que reduz o problema físico, contínuo e com um infinito número de variáveis, para um problema discreto, com um número finito de variáveis, de modo que possa ser computacionalmente resolvido. A formulação matemática utilizada na simulação do transporte de substâncias em estuários<sup>3</sup> e rios normalmente contempla a variação temporal.

<sup>3</sup>Um estuário é a parte de um rio que se encontra em contato com o mar. Disponível em: <http://www.google.com.br/#hl=ptBR&biw=1362&bih=583&q=estu%C3%A1rio+%E2%80%A2f&aqi=&aql=&oq=&fp=b73bcf2cfadf9063>.

No que tange ao espaço, tal formulação pode ser tri, bi ou unidimensional, em função das características físicas e morfológicas do sistema.

O escoamento estuarino é essencialmente tridimensional, em função da estratificação que eventualmente se forma na coluna d'água, com a água doce (menos densa) escoando sobre a água salina (mais densa). Entretanto, estuários submetidos a uma amplitude de maré suficientemente grande (mais do que 4 metros) e com vazão do principal aporte fluvial suficientemente pequena, podem ter sua hidrodinâmica convenientemente simulada pelo sistema de equações que se denomina "Equações de Águas Rasas (EAR)" Dyer (1997); Miranda et al. (2002); Rosman (1989), que resolvem as variáveis do escoamento assumindo que essas pouco variam na direção vertical. Estas equações (1 a 3) são:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (\text{eq. 1})$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + gh \frac{\partial h}{\partial x} - f_0 v = -gh \frac{\partial b}{\partial x} + D_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + F \quad (\text{eq. 2})$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} + gh \frac{\partial h}{\partial y} + f_0 u = -gh \frac{\partial b}{\partial y} + D_y \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + F \quad (\text{eq. 3})$$

Onde:  $h$  é a superfície livre,  $u$  e  $v$  são respectivamente as componentes longitudinal e transversal da velocidade,  $D_x$  e  $D_y$  são os coeficientes de dispersão turbulenta e  $F$  o termo fonte/sumidouro, que pode incluir parametrizações da força de atrito e o arrasto promovido pelo vento na superfície do estuário.

Considerando somente fontes e sumidouros devido ao atrito do fundo, pode-se parametrizar a tensão  $T$  conforme apresentado na equação 4:

$$T = \frac{\rho g u (u^2 + v^2)}{C_h^2} \quad (\text{eq. 4})$$

<sup>3</sup> Um estuário é a parte de um rio que se encontra em contato com o mar. Disponível em: <http://www.google.com.br/#hl=ptBR&biw=1362&bih=583&q=estu%C3%A1rio+%26amp;q1=f&q2=l&q3=q&fp=b73bcf2cfadf9063>.

O transporte de soluto e constituintes em suspensão podem ser descritos pela versão 2D-horizontal da equação de advecção-difusão (equação 5), expressa por:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(uc)}{\partial x} + \frac{\partial(vc)}{\partial y} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + R \quad (\text{eq. 5})$$

Onde:  $c$  é a concentração de soluto ou constituintes em suspensão,  $D_x$  e  $D_y$  são os coeficientes de dispersão turbulenta e  $R$  reúne todas as reações internas e aportes externos que possam alterar a concentração do constituinte que é simulado. Diversas soluções numéricas têm sido propostas para resolver esse conjunto de 4 equações e 4 incógnitas ( $h, u, v$  e  $c$ ).

O simulador MOHID resolve essas equações pelo Método dos Volumes Finitos Versteeg and Malalasekera (1995), malhas estruturadas, utilizando o esquema UPWIND para termos advectivos, diferenças centradas para os termos difusivos e Crank-Nicholson no tempo.

#### *O simulador*

Devido à capacidade de solução do sistema de “Equações de Águas Rasas”, os dados obtidos foram tratados e empregados na alimentação do simulador (*software*), de distribuição gratuita, MOHID Water, modelo tridimensional desenvolvido, pelo grupo de investigação de tecnologias marinhas (MARETEC) do Instituto Superior Técnico e pela Hidromod, Portugal.

O MOHID Water (“MOHID Sistema de Modelagem Água”) é um conjunto de programas de pré e pós processos de entrada e saída de dados, necessários para os diferentes programas numéricos. Os programas de pré e pós-processos são: MOHID GIS (sistema de informação geográfica que manipula dados das variáveis de tempo e espaço requeridos ou produzidos por um programa numérico do MOHID); MOHID GUI (interface gráfica para manipular a estrutura de organização dos arquivos de todos os arquivos que são necessários para criar uma simulação numérica do MOHID); MOHID Post (interface gráfica que exhibe dados armazenados em arquivos HDF como animações na tela); MOHID Time Series Editor (interface gráfica que permite a visualização de modo rápido dos dados de séries temporais requeridos ou produzidos por programas numéricos do MOHID (MARETEC, 2010).

Quando consistentes, “[...], tais modelos reduzem tempo, custo e risco de análises de impactos que estejam sendo avaliados sobre os corpos hídricos. [...] Idealmente, apresentam-se como os instrumentos mais adequados de diagnóstico e prognóstico de ambientes aquáticos, pois, uma vez calibrados, diversos cenários podem ser gerados, bastando-se que para isso sejam modificados os dados de entrada e saída do modelo (LUGON JUNIOR e RODRIGUES, 2008; LUGON JUNIOR et al., 2008)

Ao se optar por trabalhar com o MOHID Water, o que se deseja é simular variações específicas no ambiente de um corpo hídrico. Para tanto, é preciso, primeiramente, definir este corpo hídrico digitalmente, para que, em seguida, o modelo possa ser acrescido dos dados relativos aos parâmetros desejados, que são coletados no campo, isto é, o modelo é calibrado e só então está apto a efetuar as alterações de cenários que forem desejadas. Neste contexto, o primeiro módulo a ser usado é o MOHID GIS, cujo produto final é o terreno digital, base sobre a qual serão realizadas as referidas alterações de cenários.

No MOHID GIS, faz-se a inserção da imagem de satélite, georreferenciada, que mostre com clareza o espaço físico a ser representado. Após o tratamento da imagem (realizado através do estabelecimento dos limites dos corpos dos rios, isto é, estabelecimento das condições de contorno do problema, representados aqui por espaços de terra) e inserção dos dados de batimetria, igualmente georreferenciados, obtém-se a representação digitalizada dos objetos reais em estudo, isto é, obtém-se o terreno digital onde se encontra cada corpo hídrico.

#### *A abordagem do problema*

O uso da modelagem computacional como ferramenta destinada à solução de problemas causados por usos múltiplos pode ser baseada no fato de que “[...] por meio dessas simulações, é possível avaliar situações críticas, tanto de operações industriais quanto ambientais e tomar decisões antecipadas sobre as mesmas [...]”, isto é, “[...] sabendo como o sistema irá responder aos diversos fatores, é possível direcionar ações ambientalmente mais apropriadas.” (RODRIGUES; LUGON; TAVARES, 2007).

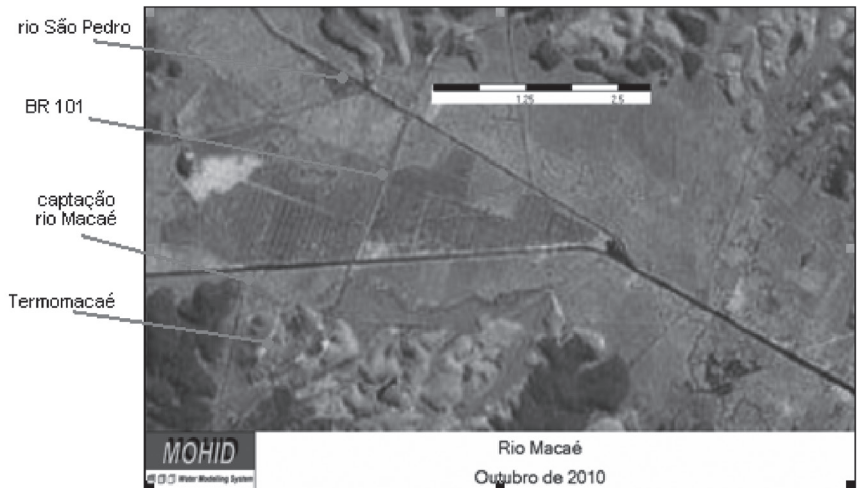
Neste sentido expõe-se a construção da representação digital de cada um dos terrenos físicos de interesse, sendo o estabelecimento do terreno digital a elaboração de suporte a ser utilizado em simulações futuras, baseadas em critérios e, por conseguinte, em parâmetros aplicáveis a casos particulares, como por exemplo na solução de problemas, relativos aos múltiplos usos da água, como os que ocorrem na captação de água, para o rio Macaé, e à intrusão salina, no rio São João.

#### *O estudo aplicado ao Rio Macaé (disponibilidade hídrica)*

No baixo curso do rio Macaé, foram detectados conflitos ocasionados em razão da disponibilidade quantitativa de água, devido à baixa na quantidade de água disponível para captação, destinada a atividades industriais (Petróleo Brasileiro S/A (PETROBRAS) e Usinas Termoeletricas) e a abastecimento público (Companhia Estadual de Águas e Esgotos - CEDAE), na região de confluência dos rios Macaé e São Pedro, como se ilustra na Figura 1.

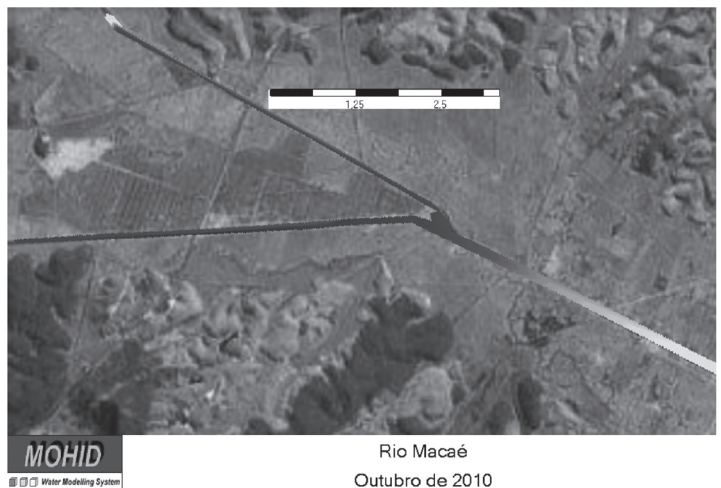
Tal baixa poderia ser justificada, pela retificação do baixo curso do rio Macaé, que teria sido capaz de eliminar importantes meandros, acarretando uma maior velocidade e um menor tempo de residência da água do rio.



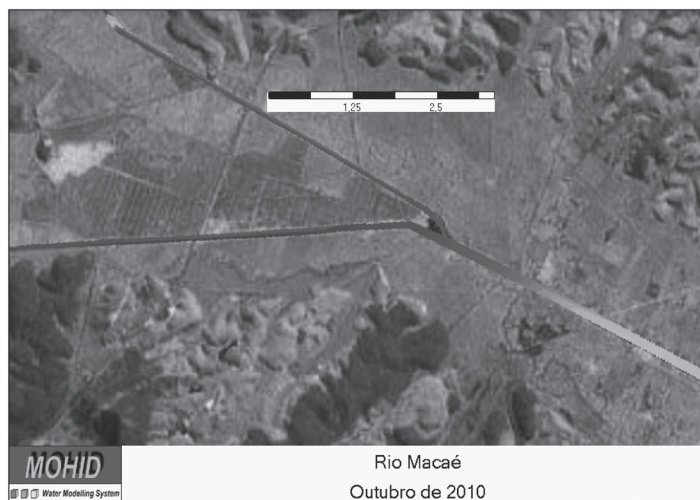


**Figura 1:** Vista da área de estudo onde estão localizadas as captações de água da CEDAE, PETROBRAS e Usinas termoeletricas  
Fonte: Elaboração própria, 2010

Será simulada a recomposição florestal da área da junção dos rios São Pedro e Macaé a fim de se observar o comportamento hidrológico (velocidade, vazão e batimetria) do rio Macaé a montante desta junção, isto é, digitalmente, será reconstituído o curso natural do rio, de modo que se possa observar seu comportamento, nas condições atuais (Figura 2) e nas condições originais (Figura 3).



**Figura 2:** Área de estudo contemplando a simulação da situação hidrológica atual  
Fonte: Elaboração própria, 2010



**Figura 3:** Área de estudo contemplando a simulação da situação hidrológica proposta  
Fonte: Elaboração própria, 2010

Com relação ao levantamento de dados para o abastecimento desse modelo, serão utilizados dados pluviométricos da Fazenda Oratório – Macaé-RJ (HINGEL et al., 2009). O tratamento estatístico será efetuado com base nos dados de 1995 a 2005 fornecidos pela PETROBRAS, considerando a estação com maior período de seca, ou seja, coletados no inverno, estação do ano que exibe os menores níveis de pluviosidade. Os dados tratados serão inseridos no modelo, que atualmente encontra-se em fase de calibração.

#### *O estudo aplicado ao Rio São João (avaliação da qualidade)*

O rio São João, ao longo de seu curso, apresenta usos diversos, que por vezes encontram-se conflitantes. Existem captações para irrigação de lavouras, dessedentação animal, e consumo humano bem como despejo de efluentes e pesca profissional. As captações, segundo CILSJ (2010) são realizadas informalmente, isto é, não possuem outorga. Para além disso, é desconhecida a qualidade da água retirada, para as finalidades supracitadas, bem como a qualidade do pescado retirado dali, devido à inexistência de monitoramento permanente desse corpo hídrico, dado que, ao longo dos anos, apesar de 3 estações já terem sido instaladas no rio São João, atualmente nenhuma se encontra em operação (ANA, 2010).

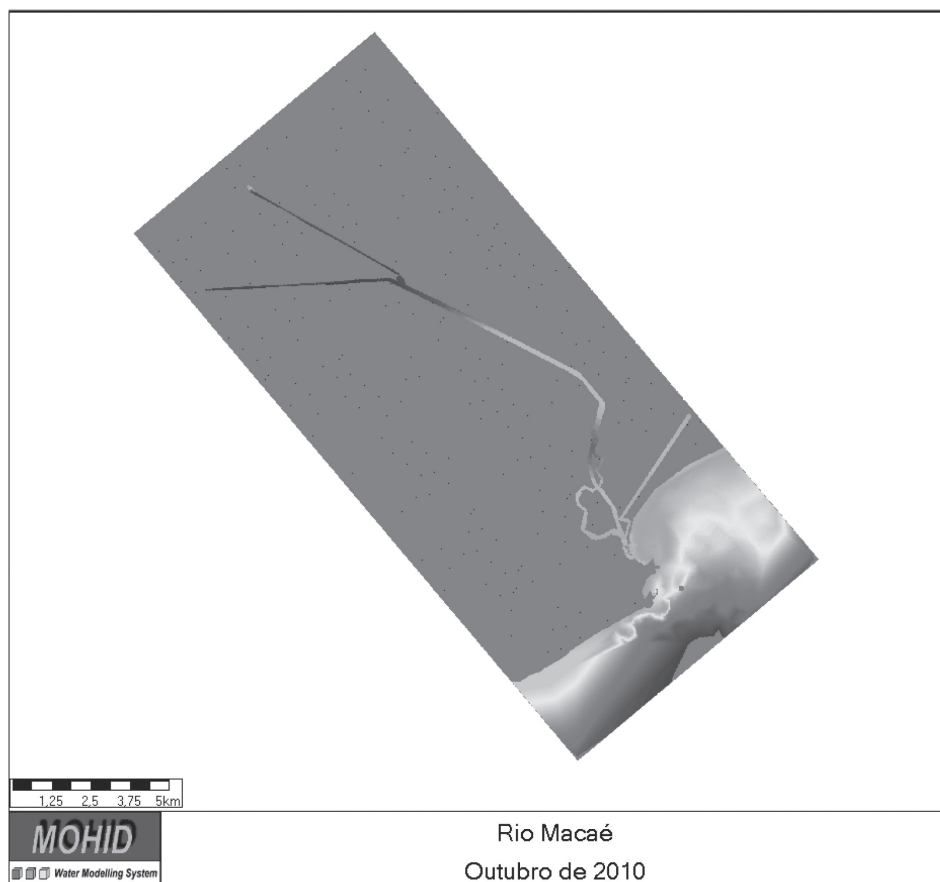
A busca pela integridade quali-quantitativa da bacia do rio São João se justifica pelos seus usos, como abastecimento humano (represa de Juturnaíba) e dessedentação de animais, irrigação, pesca e lazer. No entanto, a ausência de monitoramento contribuiu para o declínio da qualidade da água na Bacia e, por conseguinte, causa graves implicações nos usos da mesma. Desde 2001, a comunidade de pescadores artesanais da região, representada pela Associação Livre de Aquicultores da Bacia do Rio São João – ALA, tenta implantar ações sustentáveis relacionadas à geração de renda, voltada, por ora, para os pescadores artesanais, de Barra de São João, Casimiro de Abreu, RJ, as quais tiveram insucesso associado a problemas de degradação ambiental. Na oportunidade, em projeto experimental na foz do rio São João, foi constatada, no momento da colheita, a mortandade da cultura de bivalves. Os bivalves são seres filtradores (ODUM, 2004), e podem ser considerados como bioindicadores, para poluição hídrica. O fato de eles terem morrido durante o ciclo de desenvolvimento é um indicador de que a área sofreu ou tem sofrido impactos relevantes, de origem antrópica ou não.

Mediante o quadro supracitado, serão simulados fenômenos de intrusão da cunha salina no Estuário do rio São João de maneira que se possa ou confirmar ou excluir a possibilidade deste fenômeno na cultura de bivalves. Para tanto, serão realizadas medições *in situ* de batimetria, para fins de calibração de seu modelo, que por ora encontra-se em construção. Terminadas essas etapas, os modelos estarão efetivamente aptos a realizar simulações, a partir das quais, será possível estabelecer cenários ambientais passíveis de uso no gerenciamento e estudo dos recursos hídricos.

## **Resultados**

Os resultados obtidos até o momento são os terrenos digitais necessários às simulações para os rios São João e Macaé.

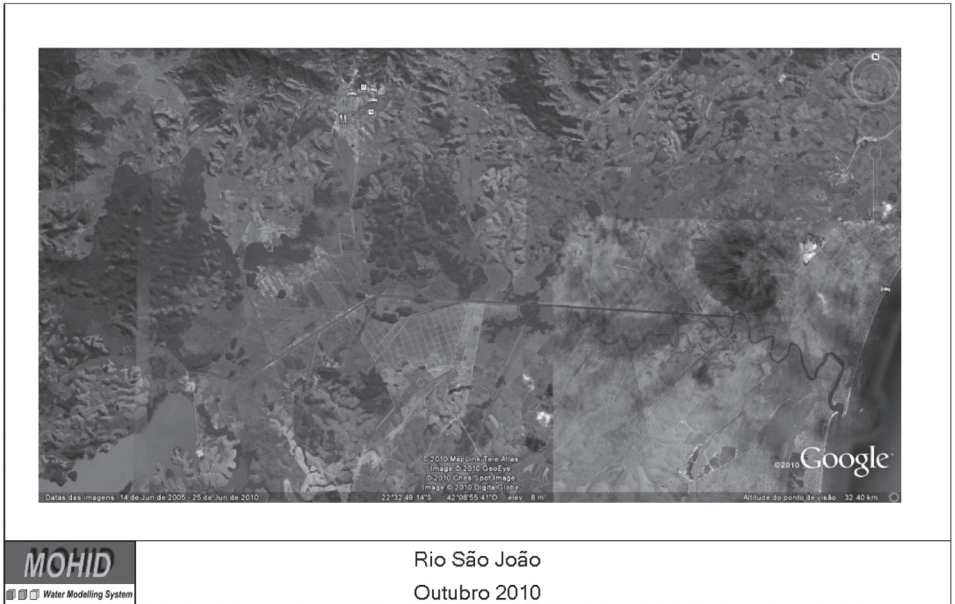
Para o rio Macaé, neste trabalho, o domínio modelado possui uma extensão de cerca de 20 km, desde a cabeceira até a região externa do estuário, na costa. Foi adotada uma discretização espacial de 40 m, com base em células quadradas. Os dados de batimetria da região da costa foram tomados a partir da carta náutica editada pela Marinha do Brasil em 1974, enquanto a batimetria da região superior foi obtida a partir de Amaral (2003). A Figura 4 consiste na representação digital do terreno modelado do rio Macaé ilustrando a discretização com a variação de cores representando a batimetria da área de estudo (em cinza podemos observar a malha discretizada do solo).



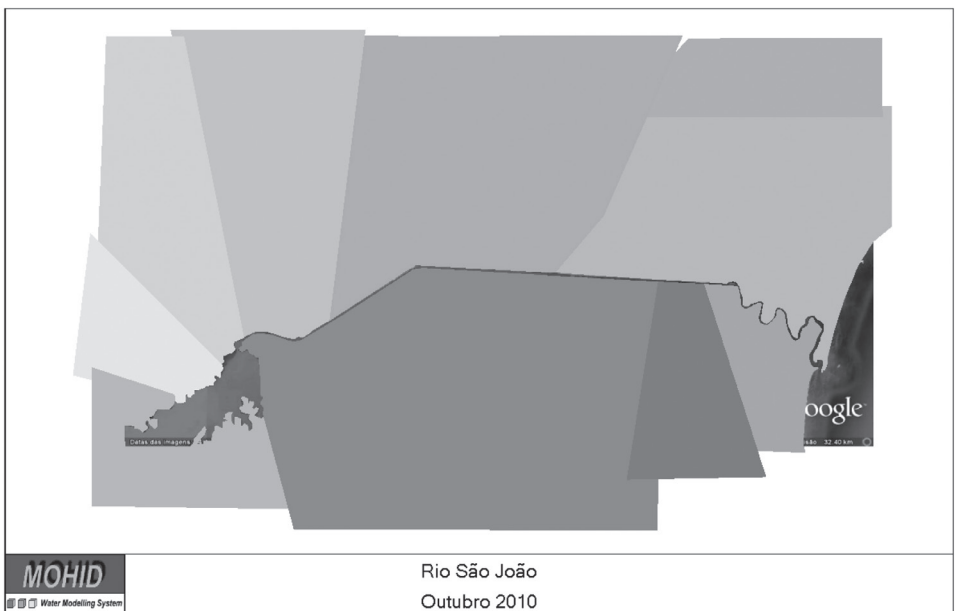
**Figura 4:** Terreno digital com discretização da região de estudo  
Fonte: Elaboração própria, 2010

Para o rio São João, o domínio modelado possui uma extensão de aproximadamente 65 km, desde a represa de Juturnaíba até a foz, onde se encontra o estuário. Será adotada uma discretização espacial de 10 m, com base em células quadradas. As campanhas para coleta de dados de batimetria encontram-se em curso, de modo que são apresentados somente resultados parciais da fase de concepção do modelo.

A Figura 5 mostra o domínio a ser discretizado e a Figura 6 mostra a delimitação do corpo hídrico, onde os polígonos representam áreas de terra.



**Figura 5:** Baixo curso do rio São João, região a ser discretizada  
Fonte: Elaboração própria, 2010



**Figura 6:** Estabelecimento de condições de contorno, delimitação do corpo hídrico  
Fonte: Elaboração própria, 2010

Observação: Dependendo dos objetivos da simulação, a área física a ser modelada poderá ser reduzida para melhorar o uso dos recursos computacionais.

## **Discussão**

Ao longo dos últimos 50 anos, o uso da modelagem matemática (abordada computacionalmente) tem sido cada vez mais difundido e tem servido a cada vez mais usos relacionados aos recursos hídricos, segundo Amaral (2003):

*A simulação matemática de sistemas de recursos hídricos apresentava grandes dificuldades de cálculo antes do advento dos computadores, o que impedia seu pleno desenvolvimento. As decisões apoiavam-se, então, em métodos gráficos ou em modelos físicos ou analógicos. A partir da década de 1960, o cenário dos computadores vem se modificando de forma acelerada, possibilitando a enorme evolução das técnicas matemáticas descritivas (simulação) e normativas ou prescritivas (otimização). Os modelos de simulação matemática, em recursos hídricos, têm hoje aplicação irrestrita em diversas áreas, como na quantificação dos processos do ciclo hidrológico, na análise da qualidade das águas em rios, reservatórios e nos aquíferos subterrâneos, nos processos hidráulicos do escoamento em rios, mares e subsolo e nos modelos ambientais e meteorológicos.*

Paralelamente ao desenvolvimento das técnicas de modelagem ambiental, a sociedade moderna ampliou a diversidade dos usos da água assim como intensificou a exploração da mesma. Sendo assim, “[...] com o aumento da variedade e a intensificação dos usos praticados, originaram-se os usos múltiplos, ou seja, aqueles que atendem às diversas demandas e não se restringem a um único uso”, neste sentido, “[...] o gerenciamento dos recursos hídricos caminha na direção de amenizar os conflitos de usos múltiplos, de modo a atender diferentes interesses e compatibilizar atividades econômicas, promoção do bem estar social e preservação do meio ambiente” (PINHEIRO et al., 2007).

Neste contexto e partindo do princípio que entre os principais problemas que afetam o gerenciamento dos recursos hídricos, no Brasil, estão aqueles causados pelos conflitos relativos aos usos múltiplos da água, a modelagem matemática pode ser um poderoso recurso, uma alternativa prática, rápida e barata no processo de solução dos conflitos dessa natureza, isto é, conflitos que podem ser ocasionados pelas formas de uso que comprometem a disponibilidade de água e por aquelas que degradam sua qualidade (GETIRANA, 2005 apud VARGAS; WERNECK; FERREIRA, 2008).

## **Conclusão**

A modelagem computacional aplicada ao gerenciamento de recursos hídricos, realizada com auxílio do MOHID - Water Modelling System, é uma ferramenta adequada de apoio à decisão para gestores ambientais, uma vez que possibilita construir cenários de disponibilidade hídrica, de forma a minimizar conflitos futuros devidos aos usos múltiplos da água, tendo em vista que as respostas da modelagem às intervenções antrópicas podem ser simuladas, evitando assim a execução de ações que poderiam causar impactos negativos, com consequentes reduções quali e quantitativas dos recursos hídricos. No caso das bacias estudadas, nas Regiões Hidrográficas VI e VIII do Estado do Rio de Janeiro, o modelo contribuirá com a geração dos cenários de disponibilidade hídrica, necessários aos organismos de bacia regionais no estabelecimento de diretrizes de outorga e de intervenção a serem apontadas nos Planos de Bacia.

### Referências

ANA, Agência Nacional de Águas. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 05 set. 2010.

AMARAL, K. Estuário do rio Macaé: modelagem computacional como ferramenta pra gerenciamento integrado de recursos hídricos. 150 p. Dissertação (Mestrado) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

BENASSULY, C. C. L. Avaliação de redes de monitoramento de recursos hídricos: estudo aplicado às águas superficiais na bacia do rio Macaé, Campos dos Goytacazes, Dissertação (Mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Campos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, 2009. 99p.

BRASIL. Lei das Águas – Lei nº 9.433, 8 jan. 1997. Instui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e altera o art. 1º da Lei 8.001, 12 mar. 1990, que modificou a Lei nº 7.99, 28 dez. 1989. Brasília.

CARVALHO, V. M. Quantificação dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio do Meio, em Itajaí, SC: Avaliação da Vazão, Centro de Ensino Superior de Ciências. Universidade do Vale do Itajaí, 2006.

CILSJ, Consórcio Intermunicipal para Gestão Ambiental das Bacias da Região dos Lagos, Rio São João e Zona Costeira. Disponível em: <<http://www.lagossaojoao.org.br>>. Acesso: 15 out. 2010.

DYER, K. Estuaries. A Physical Introduction. New York: John Wiley & Sons, 1997.

HINGEL, R. L.; NASCIMENTO, F. J. B.; VILLAS BOAS, G. H.; MARÇAL, M.S. Análise temporal e espacial das variações: pluviométricas na bacia do rio Macaé: Contribuição na identificação de áreas suscetíveis à erosão. In: SBGFA. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 13., 2009, Universidade Federal de Viçosa, 2009.

LUGON JUNIOR, J. et al. Assessment of dispersion mechanisms in rivers by means of an inverse problem approach. Inverse Problems in Science and Engineering, v.16, n.8, p.967-979, 2008.

LUGON JUNIOR, J.; RODRIGUES, P. P. G. W. Hidrologia. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense. Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego. Campos dos Goytacazes, RJ: Essentia Editora, v. 2, n. 2, p. 93-106, jul./dez. 2008.

MARETEC, 2010. MOHID: Water Modelling System. Disponível em: <<http://maretec.mohid.com>>. Acesso: 10 jun. 2010.

MATOS, A. S. T. Gerenciamento hídrico ambiental em usinas termoeletricas: estudo de caso dos efluentes da UTE Mário Lago associado à qualidade de água no Rio Macaé. 230f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Campos, Campos dos Goytacazes, 2008.

MIRANDA, L. B., CASTRO, B.; KJERFVE, B. Princípios de Física Estuarina Oceanográfica. São Paulo: Editora Universidade de São Paulo, 2002.

ODUM, E. P. Fundamentos de Ecologia. 7. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbekian, 2004.

PINHEIRO, M. R. C.; BRANDÃO, F. P.; OLIVEIRA, V. P. S.; FERREIRA, M. I. P. Desafios da integração entre os usos múltiplos e a qualidade da água para a bacia hidrográfica do Rio Macaé. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, Centro Federal de Educação Tecnológica de Campos. Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego. Campos dos Goytacazes, RJ. Essentia Editora v. 1, n. 2, jul./dez. 2007.

PINHEIRO, M.R.C. Avaliação de usos preponderantes e qualidade da água como subsídios para os instrumentos de gestão dos recursos hídricos aplicada à bacia hidrográfica do



Rio Macaé. 151f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Campos, Campos dos Goytacazes, 2008.

PRZYBYSZ, L. C. B. A gestão de recursos hídricos sob a ótica do usuário de saneamento: estudo de caso da bacia do Alto Iguaçu. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

RIO DE JANEIRO. Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERHI). Resolução nº 18, de 08 de Novembro de 2006. Aprova a definição das Regiões Hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro, 2006.

ROSMAN, P. Modelos de Circulação em Corpos d'Água Rasos. In: VIEIRA DA SILVA, R.C. (Ed.). Numerical Methods in Water Resources. Rio de Janeiro: ABRH, 1989.

SOUZA, A. C. Z. de; PINHEIRO. C. A. M. Introdução à modelagem, simulação de sistemas dinâmicos. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 166p.

VARGAS, A. C. V.; WERNECK, B. R.; FERREIRA, M. I. P. Controle de cheias urbanas. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, Centro Federal de Educação Tecnológica de Campos. Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego. Campos dos Goytacazes, RJ. Essentia Editora, v. 2, n. 2, jul./dez. 2008.

VERSTEEG, H.; MALALASEKERA, W. Computational Fluid Dynamics: an Introduction to Finite Volume Method. London: Logman Group, 1995.