

Uso de modelagem computacional aplicada à gestão sanitário-ambiental: uma proposta de adaptação da plataforma MOHID Water para corpos lênticos aplicada à lagoa Imboacica, Macaé-RJ

The use of computational modeling applied to health and environmental management: a proposal to adapt the MOHID Water platform for lentic bodies applied to Imboacica Lagoon, Macaé, RJ, Brazil

Cássius Marcelo Dutra Pessanha*

Jader Lugon Jr.**

Maria Inês Paes Ferreira***

Paulo Rogério Nogueira de Souza****

Hayda Manolla Chaves da Hora*****

Resumo

A modelagem computacional tem se mostrado uma importante ferramenta para a gestão e o monitoramento de recursos ambientais, especialmente dos corpos hídricos. Neste trabalho é discutida a viabilidade da aplicação do sistema MOHID para modelar corpos hídricos lênticos, a partir do caso da lagoa Imboacica, um ecossistema aquático costeiro, que historicamente vem passando por processos de degradação, seja pela ocupação irregular de sua Faixa Marginal de Proteção, seja pelo despejo de efluentes sem tratamento em suas águas. Para isso, são descritos conceitos sobre a área de estudo e sobre modelo e modelagem matemática. Com a simulação que será produzida, espera-se contribuir para o gerenciamento deste recurso hídrico.

Palavras-chave: Lagoa Imboacica. Modelagem computacional. MOHID.

* Mestrando em Engenharia Ambiental pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, IF Fluminense, Brasil. Especialista em Educação Ambiental pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Comercial, Senac, Brasil. Biólogo pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Brasil. Técnico em operação na Petrobras SA. E-mail: cassiusmarcelo@ymail.com.

** Professor do Programa de pós-graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, IF Fluminense, *campus* Macaé, Brasil. Doutor em Modelagem Computacional pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Brasil. Engenheiro Mecânico e Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Federal Fluminense, UFF, Brasil. E-mail: jljunior@firjan.org.br.

*** Professora do Programa de pós-graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, IF Fluminense, *campus* Macaé, Brasil. Doutora em Ciência e Tecnologia de Polímeros pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Brasil. Engenheira Química pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Brasil. E-mail: ines_paes@yahoo.com.br.

**** Professor do Programa de pós-graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, IF Fluminense, *campus* Macaé, Brasil. Doutor em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Brasil. Químico Industrial e Licenciado em Química pela Universidade Federal Fluminense, UFF, Brasil. E-mail: paulorog@uol.com.br.

***** Graduada em Engenharia de Controle e Automação pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, IF Fluminense, *campus* Macaé, Brasil. E-mail: chaves.hayda@gmail.com.

Abstract

Computational modeling has proven to be an important tool for environmental resources management and monitoring, especially for water bodies. This paper discusses the feasibility of implementing MOHID in modeling of lentic water bodies, applying as case study Imboacica Lagoon, an aquatic coastal ecosystem historically degraded both due to irregular occupation of its protected marginal areas and to the dumping of untreated sewage into its waters. Thus, concepts about the study area, mathematical model and mathematical modeling are described. The simulation to be produced is expected to contribute to water resources management.

Key words: Imboacica Lagoon. Computational modeling. MOHID.

Introdução

A ocupação histórica das zonas costeiras brasileiras pode ser considerada um dos principais motivadores de conflitos entre preservação e desenvolvimento, trazendo como consequência um aumento no consumo e na degradação dos sistemas naturais, com destaque para os recursos hídricos, responsáveis pelo fornecimento de uma série de serviços ambientais (MONTENEGRO JR., 2004).

As lagoas costeiras estão inseridas neste contexto, sendo consideradas um dos ecossistemas mais produtivos da biosfera, possuindo taxas de produtividade biológica variando de 200 a 400 mgC/m²/ano (KNOPPERS, 1994 apud ESTEVES, 1998a). Devido a essa elevada produtividade, no decorrer da história, populações humanas têm se instalado às margens das mesmas, utilizando-as como fonte de alimento, água, lazer e receptora de efluentes (ESTEVES, 1998a). Apesar de todo o marco legal, o quadro de degradação das águas nas áreas urbanas do Estado (assim como do país) é preocupante (FERREIRA et al., 2008). Na lagoa Imboacica a situação é similar. Segundo Esteves (1998b), as lagoas costeiras do Estado do Rio de Janeiro vêm sendo alvo de inúmeras formas de degradação das condições naturais, dentre elas: lançamento de efluentes domésticos e/ou industriais, aterros nas margens; assoreamento da bacia; retirada de areia e depósitos calcários; degradação da vegetação terrestre no entorno da lagoa costeira ou ao longo de seus tributários; introdução de espécies de peixes exóticos e edificações nas margens.

Dentre os principais impactos do crescimento desordenado estão o volume de efluentes gerados pela indústria, comércio e população. Em geral, a implantação de infraestrutura adequada de saneamento não acompanha o aumento populacional, recaindo sobre os ambientes naturais as consequências desse descarte. O impacto

mais relevante, tanto para os usos da água quanto para a preservação de comunidades aquáticas, consiste no processo de eutrofização, caracterizado pelo aumento dos nutrientes, como nitrogênio e fósforo, considerados limitantes ao ecossistema lagunar, trazendo como consequência a proliferação de algas, modificando a dinâmica das comunidades e os parâmetros de qualidade da água (VON SPERLING, 1996). Neste cenário, os modelos matemáticos se apresentam como importantes ferramentas na estimativa de degradação de ambientes aquáticos (CUNHA; FERREIRA, 2006). Por meio de simulações, podem-se avaliar os valores máximos dos parâmetros críticos e alertar aos tomadores de decisão sobre possíveis distúrbios ecossistêmicos e riscos à saúde humana. Entender como um dado corpo hídrico reage à entrada de efluentes possibilita o direcionamento de medidas mais apropriadas em curto prazo, como alerta à população e interrupção de abastecimento ou, para longo prazo, como instalação de rede coletora de esgoto e estações de tratamento.

No presente artigo, é realizada uma breve descrição sobre o processo de modelagem matemática (ou computacional) na área ambiental, com ênfase na gestão de recursos hídricos, com o emprego da plataforma computacional MOHID. Discute-se a viabilidade da aplicação do modelo (originalmente desenvolvido para corpos hídricos lóticos) a uma laguna costeira, a lagoa Imboacica, situada em zona urbana e que vem sendo degradada pelo lançamento de esgotos.

Modelos Matemáticos

Modelos consistem em representações que, de forma simplificada, são criadas com intuito de facilitar o entendimento da realidade (RENNÓ, 2003). Podem, portanto, ser entendidos como uma visão abstrata do mundo real, objetivando a compreensão dos fenômenos que o regem. Para isto é necessário que um dado modelo exiba a descrição das características essenciais do mundo real, de forma que o seu comportamento reflita quase ou totalmente aquele do sistema modelado.

Angelini (1999) classifica os modelos da seguinte forma:

- a) Modelos icônicos (imagens, ícones): reproduzem a aparência do objeto a ser modelado, fornecendo uma descrição apenas qualitativa, porém que sintetiza o todo. Exemplo: maquetes, mapas, diagramas de blocos, entre outros.
- b) Modelos analógicos: simulam uma situação real. Possuem grau de abstração média e são usados principalmente em engenharia. Exemplo: pequenos modelos de avião postos à prova em túneis de vento.
- c) Modelos matemáticos: o grau de abstração é máximo e representam princípios que (supostamente) regem a realidade (ANGELINI, 1999).

Para Saldanha (2007), essas representações do real podem ser solucionadas de

duas formas: por meio de modelos físicos ou de modelos matemáticos.

Os primeiros geralmente reproduzem, em escala reduzida, modelos conceituais de fenômenos de interesse, denominados protótipos. Talvez a maior vantagem em sua utilização seja a facilidade de compreensão do fenômeno pelos mais leigos. Como desvantagem, os modelos físicos costumam ser mais lentos e custosos se comparados aos numéricos, sendo, por isso, utilizados somente em condições muito especiais (AMARAL, 2003). Além disso, eles nem sempre propiciam resultados analíticos, necessitando, então, de métodos numéricos para serem solucionados.

Os modelos numéricos representam um sistema por meio da solução de equações (FALCONER, 1992 apud SALDANHA, 2007). Todavia, como essas fórmulas matemáticas raramente possuem solução analítica, elas são solucionadas através de técnicas numéricas, nas quais o domínio contínuo é substituído por um domínio discreto, resultando assim em equações algébricas, cujas soluções podem ser obtidas através do uso de algoritmos computacionais.

Modelos numéricos consistem em traduções dos modelos matemáticos adaptados para diferentes métodos de cálculo. Dentre exemplos desses métodos incluem-se: diferenças finitas, elementos finitos, volumes finitos e elementos de contorno. A princípio, qualquer modelo matemático pode ser resolvido através de um modelo numérico, e deve-se garantir que a perda de informação na conversão de um modelo para outro seja relativamente pequena (SALDANHA, 2007). Dentre as ressalvas na utilização de modelos numéricos, a mesma autora destaca a necessidade de alto nível de conhecimento técnico, a escolha de um esquema de solução adequado e a utilização por pessoas habilitadas.

Em contrapartida, esses modelos normalmente são baratos, bem ajustados a condições distintas, fornecedores de informações sobre toda a área modelada e facilitadores da confecção de saídas gráficas.

Contudo, Amaral (2003) frisa o seguinte:

...enquanto houver fenômenos de interesses mal compreendidos, haverá modelos conceituais empíricos ou semi-empíricos e, conseqüentemente, modelos matemáticos falhos. Nestes casos, embora seja possível fazer modelos numéricos, estes terão em si as falhas do modelo matemático e a alternativa dos modelos físicos permanecerá necessária e muito importante (AMARAL, 2003).

De acordo com Sodré (2007), um modelo matemático é formado por um conjunto de equações que representam, quantitativamente, as hipóteses que foram usadas na construção do modelo, baseadas em um sistema real. Essas fórmulas são resolvidas em função de alguns valores conhecidos ou previstos pelo sistema real e são usualmente testadas através da comparação entre os dados conhecidos ou previstos e as medidas realizadas no mundo real.

Os modelos normalmente possuem em seu bojo parâmetros e variáveis, sendo que os primeiros normalmente mantêm seu valor inalterado durante todo o processo estudado, podendo variar, entretanto, com o espaço. Já as variáveis podem mudar de valor enquanto o modelo estiver sendo executado (RENNÓ; SOARES, 2000).

As equações de um modelo não possibilitam explicação científica dos fenômenos modelados, mas simplesmente interpretam as hipóteses de um ponto de vista quantitativo, dando-nos a condição de deduzir consequências e apontar-nos onde estão os detalhes que deverão ser aceitos ou recusados (SODRÉ, 2007).

Segundo Angelini (1999), os modelos matemáticos podem variar de acordo com as características apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1: Características de modelos matemáticos

Finalidade	uso para pesquisa	e/ou	uso para manejo
Variabilidade	Estocástico	e/ou	determinístico
Concepção	Reducionista	e/ou	holístico
Tempo	Estático	e/ou	dinâmico
Parâmetros	Fixos	e/ou	variáveis
Função	Linear	e/ou	não-linear
Solução de equações	Analítica	e/ou	métodos numéricos

Rennó (2003) ressalta que os modelos são comumente classificados, dentre outras formas, de acordo com as seguintes características:

Variáveis utilizadas na modelagem

- **Estocástico** - quando pelo menos uma das variáveis envolvidas tem comportamento aleatório, ou
- **Determinístico** - os conceitos de probabilidade não são considerados durante elaboração de um modelo.

Tipo de relações entre essas variáveis

- **Empíricos** - quando utilizam relações baseadas em observações, ou
- **Baseados em processos** - procuram descrever todos os processos que envolvem determinado fenômeno estudado.

Forma de representação dos dados

- **Discretos** - A escolha do intervalo de tempo (passo) no qual o modelo será executado depende basicamente do fenômeno estudado, da disponibilidade de dados e da precisão desejada nos resultados, ou
- **Contínuos** - variam continuamente no tempo.

Existência ou não de relações espaciais

- **Pontuais** (concentrados ou agregados) - todas as variáveis de entrada e de saída são representativas de toda área estudada, ou
- **Distribuídos** - consideram a variabilidade espacial encontrada nas diversas variáveis do modelo.

Existência de dependência temporal

- **Estáticos** - com um conjunto de dados de entrada, produz-se um resultado oriundo da solução das equações do modelo em um único passo, ou
- **Dinâmicos** - utilizam o resultado de uma iteração como entrada para uma próxima iteração.

No que se refere à escala de tempo, segundo o mesmo autor, um modelo pode ser detalhado, voltado a pequenos intervalos de espaço e tempo, ou ser mais simples e genérico, simulando o comportamento de regiões inteiras e/ou períodos de tempo mais longos (décadas, séculos).

É importante lembrar que durante a escolha de um determinado tipo de modelo seja considerada a aplicação desejada, assim como os dados básicos disponíveis, pois um mesmo processo pode ser representado de diferentes maneiras (STEYAERT, 1993).

Modelos matemáticos têm sido utilizados em campos distintos da atividade humana (SODRÉ, 2007), o que parece ser uma tendência promissora. Como exemplos de aplicações, podem ser citadas as áreas da Química, Física, Matemática, Biologia, Psicologia, Comunicação, Economia, Demografia, Astronomia, Engenharia, dentre outras (NAVAL et al., 2002; BARROS, 2007; RUTZ; HIRAKAWA, 2008; SIMONASSI; PEDROSO, 2009; JOLY; PINTO, 2010).

Modelagem Matemática ou Computacional

Modelagem pode ser definida simplesmente como o ato de modelar, de representar algo. Logo, pode-se dizer que a modelagem matemática, ou modelagem computacional, consiste numa forma de simular fenômenos reais por meio de fórmulas matemáticas. Outras diferentes definições são utilizadas. Segundo Iritani (1998) apud Bonganha et al.(2007):

A modelagem matemática consiste na representação matemática do que acontece na natureza a partir de um modelo conceitual, idealizado com base no levantamento e interpretação de dados e observações do sistema real, tendo como objetivo uma melhor compreensão do sistema atual, possibilitando prever situações futuras, algumas vezes passadas, porém sempre buscando direcionar ações de decisão (IRITANI, 1998 apud BONGANHA et al., 2007).

Souza (2006) conceitua-a como uma tradução da formulação física do fenômeno/processo que se deseja modelar - fundamentada em leis universais ou empíricas - em uma formulação matemática. Lima (2010) define o processo de modelagem como a produção de representações da estrutura e/ou funcionamento de um sistema com o intuito de melhor compreender a realidade observada. Amaral (2003) enfatiza que o modelo matemático é primordial para a modelagem:

A modelagem matemática consiste na tradução para a linguagem matemática do modelo conceptual do fenômeno de interesse. Quanto melhor e mais completo o modelo conceptual, mais complexo é o modelo matemático e conseqüentemente maior é a dificuldade para se obter uma solução geral. Por esta razão, o modelo matemático é a grande encruzilhada do processo de modelagem... (AMARAL, 2003).

Já Biembengut (2003) apud Neto (2005), vai mais além, pois, neste caso, a modelagem não é vista apenas como uma atividade meramente racional:

Modelagem matemática é o processo que precede a obtenção do modelo. Esse modelo pode ser considerado um processo artístico, pois, para se elaborar um modelo, além do conhecimento matemático, o modelador precisa ter uma dose significativa de intuição e criatividade para interpretar o contexto, saber discernir que conteúdo matemático melhor se adapta e também ter senso lúdico para jogar com as variáveis envolvidas (BIEMBENGUT, 2003 apud NETO, 2005).

O uso da modelagem possibilita a previsão, através de análises, do comportamento futuro do sistema em estudo. Através do fornecimento de dados de entrada e verificação dos dados de saída no modelo, é possível analisar as propriedades e comportamento do sistema de uma maneira prática (BRATLEY et al., 1987 apud LIMA et al., 2010). Este processo de execução de um modelo matemático-computacional na representação de um sistema é conhecido como simulação (MARIA, 1997).

Atualmente a modelagem e a simulação de sistemas têm sido aplicadas de variadas formas no campo científico, na busca de um melhor entendimento do objeto de estudo e maior compreensão da realidade observada. Lima (2010) exemplifica alguns usos como: estudos de análise ambiental nas proximidades de um rio, ou referentes ao formato da asa de um avião, ou a um sistema econômico, uma cultura agrícola, um estudo populacional, um estudo físico, e até mesmo a um sistema matemático.

O mesmo autor destaca a importância de se utilizar, na construção de um modelo, uma abordagem e uma equipe de trabalho multidisciplinar, envolvendo estudiosos de distintas áreas do conhecimento. Isso estimula um comum entendimento entre todas as pessoas envolvidas, sendo a modelagem específica o suficiente para facilitar a representação do conhecimento que cada um tem a respeito do sistema, e geral o suficiente para não limitar a representação do modelo a um domínio de aplicação específico. Sendo assim, a linguagem a ser utilizada na construção de um modelo torna-se relevante para o êxito de um projeto de modelagem desenvolvido por profissionais de formações acadêmicas variadas.

A simulação de modelos é feita a partir de plataformas computacionais, que consistem em *softwares* onde os mesmos são inseridos. Sendo assim, uma plataforma

computacional pode ser vista como um sistema de modelação operacional, ou seja, como uma infraestrutura de modelos acoplados, um conjunto de informações de entrada, como batimetrias a condições iniciais, e uma rede de monitorização automática (inclusive remota), tudo integrado em um modelo operacional, de forma que os resultados e informações obtidas se apresentem de forma inteligível para os usuários finais (FERNANDES, 2005).

Apesar do esforço por parte dos modeladores em criar simulações cada vez mais próximas da realidade, sabe-se que os processos naturais são muito mais complexos que os modelos, pois envolvem diferentes escalas de tempo e espaço, além de serem influenciados por diversos parâmetros, nem sempre miscíveis. A modelagem pode propiciar um entendimento qualitativo de um processo particular, mas, por outro lado, uma compreensão global sobre a dinâmica de um ambiente pode ser reduzida. A partir do mesmo raciocínio, a utilização de equações matemáticas detalhadas visando expressar processos físicos complexos pode se tornar inviável, o que exigiria, neste caso, o uso de fórmulas mais simples (STEYAERT, 1993; HARTE, 2001).

Essa inviabilidade pode ocorrer, inclusive, devido a limitações computacionais, pois nem sempre é possível representar escalas detalhadas de forma explícita no modelo. Em certos casos, essas equações podem ser vistas como um conjunto de hipóteses que interligam entradas e saídas do sistema.

Modelagem de sistemas ambientais aplicada à gestão de recursos hídricos

Na área de meio ambiente, a modelagem computacional vem apresentando diversas aplicações, desde previsões sobre impactos a ecossistemas até interações ecológicas entre seres vivos. O estudo de modelos desses fenômenos, de natureza complexa, vem ganhando destaque na literatura (BONGANHA et al., 2007). A aplicação desses instrumentos exige a utilização de técnicas e ferramentas de modelagem e simulação para representar e facilitar tanto a compreensão sobre seu funcionamento como a tomada de decisão sobre sistemas ambientais (SALDANHA, 2007).

No que se refere exclusivamente à gestão de recursos hídricos, a utilização de modelos matemáticos demonstra significativa importância perante a complexidade e a diversidade de corpos d'água existentes. De acordo com Amaral (2003), esses modelos incluem aplicações como quantificação dos processos do ciclo hidrológico, análise da qualidade das águas em rios, reservatórios e nos aquíferos subterrâneos, processos hidráulicos do escoamento em rios, mares e subsolo e modelos ambientais e meteorológicos. Outros exemplos de produtos da modelagem computacional voltados à gestão e ao monitoramento aquático são dados por Fernandes (2005): (i) Evolução de derrames de petróleo; (ii) Procura e resgate; (iii) Potenciais florações algáceas; (iv) Transporte e dispersão de partículas e distribuição de massas de água (ovas e

larvas de peixes, contaminantes, matéria suspensa, águas dos rios); (v) Transporte de nutrientes e de material em suspensão; (vi) Padrões de transporte e diluição de descargas potencialmente poluidoras; (vii) Eutrofização (nutrientes e oxigênio); (viii) Produção primária (surgimento/magnitude/distribuição de diatomáceas e flagelados); (ix) Produção e atualização de longas séries temporais do clima de meios aquáticos, e variabilidade de ecossistemas (especialmente em relação aos níveis tróficos mais baixos); (x) Clima “costeiro” (correntes, turbulência, temperatura, salinidade, ondas, vento, temperatura do ar); (xi) Demonstração do estado potencial de climas costeiros, ou regionais, assim como do estado e da variabilidade ecossistêmica, frente a hipotéticos cenários climáticos futuros, e; (xii) Quantificação dos efeitos de diferentes cenários de gestão nos ambientes costeiros (nomeadamente ao nível de produção primária, eutrofização, e transporte de nutrientes).

Entretanto, é importante considerar que o desenvolvimento da modelagem matemática de sistemas de recursos hídricos foi possível apenas a partir da década de 1960, quando teve início o advento dos computadores. Até então eram utilizados somente modelos físicos ou analógicos, ou ainda métodos gráficos. A expansão da informática possibilitou, portanto, uma revolução nas técnicas matemáticas descritivas (simulação) e normativas ou prescritivas (otimização) (AMARAL, 2003). Sendo assim, o uso desses modelos nos dias atuais destaca-se como uma alternativa interessante, pois os altos custos referentes ao levantamento de dados ambientais fazem com que estes últimos sejam, em geral, escassos. Nesse contexto, os modelos, se bem calibrados, capazes de reproduzir valores nos pontos onde se fazem medições, podem ser usados como ferramentas complementares e integradoras na avaliação, monitoramento e gerenciamento de sistemas aquáticos (SALDANHA, 2007).

Conforme destaca a mesma autora, para que um modelo numérico aplicado a recursos hídricos (hidrodinâmico) seja adotado, são empregados os seguintes passos:

- **Implementação do modelo com as características da região em estudo.** Exemplos: dados geométricos da região que será modelada, marés, velocidades, propriedades físicas do fluido, batimetria;
- **Calibração e validação do modelo** – a calibração consiste na comparação entre os valores medidos em campo e os computados. Se o resultado for coerente e aderente, ou seja, se forem semelhantes, o modelo está calibrado. Caso contrário, é feito um ajuste dos parâmetros e avaliada a confiabilidade do modelo;
- **Aplicação do modelo** – nesta etapa o modelo é reproduzido de acordo com o estudo desejado.

O Sistema MOHID

O MOHID consiste em um sistema de modelagem numérica tridimensional, desenvolvido pelo Instituto Superior Técnico (IST) no Centro de Estudos MARETEC

(*Marine and Environmental Technology Research Center*) da Universidade Técnica de Lisboa (UTL), Portugal, em cooperação com a empresa Hidromod Ltda.

Ele foi criado na década de 1980, e vem sendo aprimorado desde então. Atualmente se apresenta como um dos mais elaborados entre os sistemas existentes deste tipo, devido sua programação robusta e confiável (FERNANDES, 2005).

Ele tem sido usado em diversas áreas de pesquisa, possibilitando a simulação de processos físicos, químicos e biológicos. De acordo com Ceará (2010), essa complexidade de processos pode ser executada em qualquer número de dimensões (1D, 2D, 3D). Além disso, ele é gratuito e considerado de alta confiabilidade, uma vez que existem diferentes trabalhos de modelagem realizados com o MOHID, nos quais sua calibração e validação são corroboradas (MARTINHO, 2010).

O MOHID é programado em ANSI Fortran 95, o que garante sua independência diante do sistema operacional com o qual se pretende executar o modelo (Windows, Linux, Unix, etc.), além de uma fácil implantação do código em qualquer ambiente (PRECIOSO, 2010). Segundo Souza (2010), essa programação é orientada por objetos, o que possibilita uma modelagem de diferentes processos físicos e biogeoquímicos, como também de diferentes sistemas (marinho, estuarino e de bacias hidrográficas).

O sistema é formado por mais de 40 módulos com capacidade para simular a hidrodinâmica, os fenômenos de dispersão (abordagens lagrangiana e euleriana), a qualidade da água e o transporte de sedimentos (coesivos e não coesivos), além de um módulo de sistema de informações geográficas (SIG), que possibilita a criação da malha computacional na qual são aplicadas as simulações. Cada módulo é responsável por gerenciar um tipo de informação, podendo ser entendido como um modelo específico (MOHID, 2011a).

A comunicação entre os diferentes módulos ocorre numa base de cliente/servidor garantindo assim o encapsulamento da informação de cada um deles (DUFFY, 1995 apud FERNANDES, 2005).

A possibilidade de correr os vários módulos que compõem o sistema MOHID com passos de tempo diferentes permite que o usuário obtenha resultados num intervalo de tempo reduzido. Todo o modelo se utiliza da alocação dinâmica da memória, sendo desta forma mais versátil, e podendo ser utilizado para qualquer tipo de simulação sempre o mesmo executável do programa. Além disso, também se pode utilizar uma metodologia de “modelos encaixados”, na qual o número de modelos encaixados definidos pelo usuário é ilimitado. Na verdade, essa escolha está limitada à capacidade de cálculo disponível (FERNANDES, 2005).

O sistema MOHID é composto de quatro grandes grupos: (i) *Mohid Water*, (ii) *Mohid Land*, (iii) *Mohid River Network* e (iv) *Mohid Soil*. O primeiro é responsável pela modelagem dos processos hidrodinâmicos, simulação de fenômenos de dispersão, propagação de ondas, transporte de sedimentos, qualidade da água/processos

biogeoquímicos na coluna d'água e trocas com o fundo. O segundo consiste em um modelo de bacia, o terceiro permite a simulação de redes hidrográficas, e o quarto simula o fluxo de água através de meios porosos (FERNANDES, 2005; BRAUNSCHWEIG; FERNANDES, 2010).

Os processos de pré e pós-processamento no sistema MOHID são executados em programas distintos, conforme figura abaixo (Figura 1).

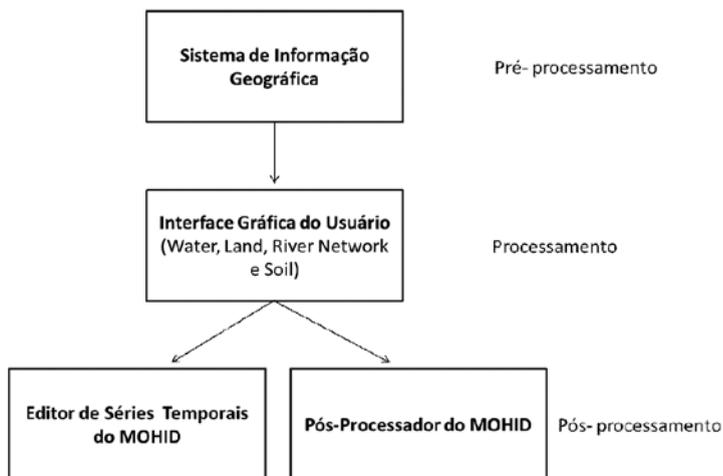


Figura 1: Esquema dos programas do MOHID

Fonte: Adaptado de Martinho (2010) e Braunschweig e Fernandes (2010)

No que se refere à fase de processamento, para a modelagem de dispersão de poluentes em corpos lânticos, é utilizado o programa MOHID Water. Este pode ser dividido em quatro grandes classes, das quais as duas primeiras geram as propriedades do escoamento não turbulentas (velocidade, elevação, viscosidade turbulenta, fluxos de água) e turbulentas (viscosidades, difusividades, energia cinética turbulenta, comprimentos de mistura, etc.). As duas classes restantes estão envolvidas com as propriedades da água (salinidade, temperatura, densidade, amônia, sedimentos coesivos). As três primeiras classes (ou seja, as relacionadas ao escoamento turbulento, não turbulento, e uma referente às propriedades da água) calculam a evolução das propriedades através de um referencial euleriano e a discretização das equações é feita pelo método de volumes finitos (FERNANDES, 2005).

Geralmente, sistemas hidrodinâmicos são simulados por meio de fórmulas numéricas. Com a utilização do MOHID é possível resolver as equações primitivas que formulam o escoamento tridimensional incompressível. As Equações de *momentum* para as velocidades médias horizontais, na forma Cartesiana, são mostradas abaixo:

$$\partial_t u = -\partial_x(uu) - \partial_y(uv) - \partial_z(uw) + fv - \frac{1}{\rho_0} \partial_x p + \partial_x((v_H + v)\partial_x u) + \partial_y((v_H + v)\partial_y u) + \partial_z((v_t + v)\partial_z u) \quad (1)$$

$$\partial_t v = -\partial_x(vu) - \partial_y(vv) - \partial_z(vw) + f'u - \frac{1}{\rho_0} \partial_y p + \partial_z((v_H + v)\partial_x v) + \partial_y((v_H + v)\partial_y v) + \partial_z((v_t + v)\partial_z v) \quad (2)$$

Onde:

u , v e w são as componentes do vetor velocidade nas direções x , y e z , respectivamente;

f é o parâmetro de Coriolis;

V_H e V_t são as viscosidades turbulentas nos sentidos horizontal e vertical, respectivamente;

V é a viscosidade cinemática molecular (igual a $1,3 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$); e p é a pressão.

Observa-se nas equações acima que a evolução temporal das velocidades (termo do lado esquerdo) é igual ao balanço de transporte advectivo (três primeiros termos do lado direito), à força de Coriolis (quarto termo), ao gradiente de pressão (próximos três termos) e à difusão turbulenta (últimos três termos).

A velocidade vertical é calculada a partir da equação de continuidade incompressível (equação de balanço de massa):

$$\partial_x u + \partial_y v + \partial_z w = 0 \quad (3)$$

Já o transporte devido aos fluxos advectivo e difusivo, para uma dada propriedade A , é resolvido pela seguinte equação:

$$\partial_t A = -\partial_x(uA) - \partial_y(vA) - \partial_z(wA) + \partial_x(v'_H \partial_x A) + \partial_y(v'_H \partial_y A) + \partial_z((v'_t + v'_A) \partial_z A) \quad (4)$$

Onde:

V'_H e V'_t são os coeficientes de difusividade horizontal e vertical;

v'_A é o coeficiente de difusividade molecular.

Com a plataforma computacional MOHID é possível resolver essas e outras equações pelo método dos volumes finitos – MVF (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995). Mais detalhes sobre formulação e equações podem ser vistos em MOHID Description (2011).

Aplicações do MOHID a corpos lânticos

O MOHID tem sido amplamente utilizado na modelagem de sistemas aquáticos lânticos (MOHID, 2011b). Entretanto, existem alguns trabalhos voltados também para o estudo de corpos lânticos. Santos et al. (2004) implementaram um modelo hidrodinâmico na Lagoa de Óbidos, Portugal, uma laguna costeira que, assim como a lagoa Imboacica, sofre intervenções antrópicas. Nesse estudo, buscou-se compreender a hidrodinâmica e os problemas relacionados à qualidade da água da lagoa. Já Saraiva (2005) aplicou um modelo na Ria do Aveiro, outra lagoa costeira, também em Portugal, com o intuito de entender a dinâmica ecológica do corpo hídrico, com destaque para o crescimento de macroalgas bentônicas.

No Brasil também existem estudos de modelagem computacional de ambientes lânticos por meio do MOHID. Lemos e Bernardes (2009) realizaram uma modelagem hidrodinâmica do estuário da Lagoa dos Patos/RS. Também com foco na hidrodinâmica, Godoy (2009) utilizou o MOHID, em um trabalho que é parte de um projeto executado por pesquisadores da Universidade Federal de Santa Catarina na Lagoa da Conceição, desde 2004, em uma linha de pesquisa de estudo da circulação e dispersão de poluentes em ambientes estuarinos e costeiros do litoral de Santa Catarina. Além disso, Precioso (2010) estudou o comportamento de parâmetros ambientais, com o auxílio da mesma plataforma computacional, na Lagoa do Vigário, corpo d'água altamente impactado, principalmente pelo despejo de efluentes, situado em área urbana do município de Campos dos Goytacazes/RJ.

Área de Estudo

Considerando a gestão dos recursos hídricos no espaço fluminense, o estado foi dividido em 10 Regiões Hidrográficas (RHs), com o intuito de possibilitar o gerenciamento descentralizado e democrático dos recursos hídricos (RIO DE JANEIRO, 2006): (i) Baía de Ilha Grande; (ii) Guandu; (iii) Médio Paraíba do Sul; (iv) Piabanha; (v) Baía de Guanabara; (vi) Lagos e rio São João; (vii) Rios Dois Rios; (viii) Macaé e das Ostras (na qual está inserida a lagoa Imboacica); (ix) Baixo Paraíba do Sul; e (x) Itabapoana.

A lagoa Imboacica é uma laguna costeira localizada entre os municípios de Macaé e Rio das Ostras (Figura 2), na Região Hidrográfica VIII do Estado do Rio de Janeiro (RIO DE JANEIRO, 2006), sob as coordenadas geográficas 22° 30' S; 42° 00' O. Possui uma área de 3,26 km², com profundidade máxima de 2,1 m, volume de 3.56 x 10⁶ m³, e uma bacia de drenagem de 50 km². O clima regional é o tropical úmido, cujas temperaturas médias anuais variam entre 18 °C e 27 °C. A umidade relativa do ar média é de 83%, e a pluviosidade média anual é de 1.300 mm, sendo bem definidas as estações seca e chuvosa (DOS SANTOS et al., 2006). A lagoa é alimentada pelo rio Imboacica, que

nasce a 12,9 km acima e a 120 m de altura. Esse rio teve parte de seus trechos médio e final (sendo este mais próximo à lagoa) retelinizados, na década de 1960, pelo antigo Departamento Nacional de Obras e Saneamento (DNOS) (BARRETO, 2009).

Por estar localizada próxima à costa, pode ser considerada um ecossistema com certa complexidade. Além de ser abastecida por um rio de mesmo nome, a lagoa também recebe influência marinha, tendo apenas uma barra de areia separando-a do mar. A biota local é significativa, constituída por animais, como peixes (SÁNCHEZ-BOTERO et al., 2009) e moluscos (FIGUEIREDO-BARROS et al., 2006), organismos planctônicos (SANTANGELO et al., 2007), bactérias (FARJALLA et al., 2006), e abundantemente colonizada por macrófitas aquáticas, das quais se destacam *Typha domingensis*, *Eleocharis mutata*, *Eleocharis fistulosa*, *Eichhornia crassipes* e *Juncus sp* (PALMA-SILVA, 1999 apud FARJALLA et al., 2006; BARRETO, 2009; BOZELLI et al., 2009).

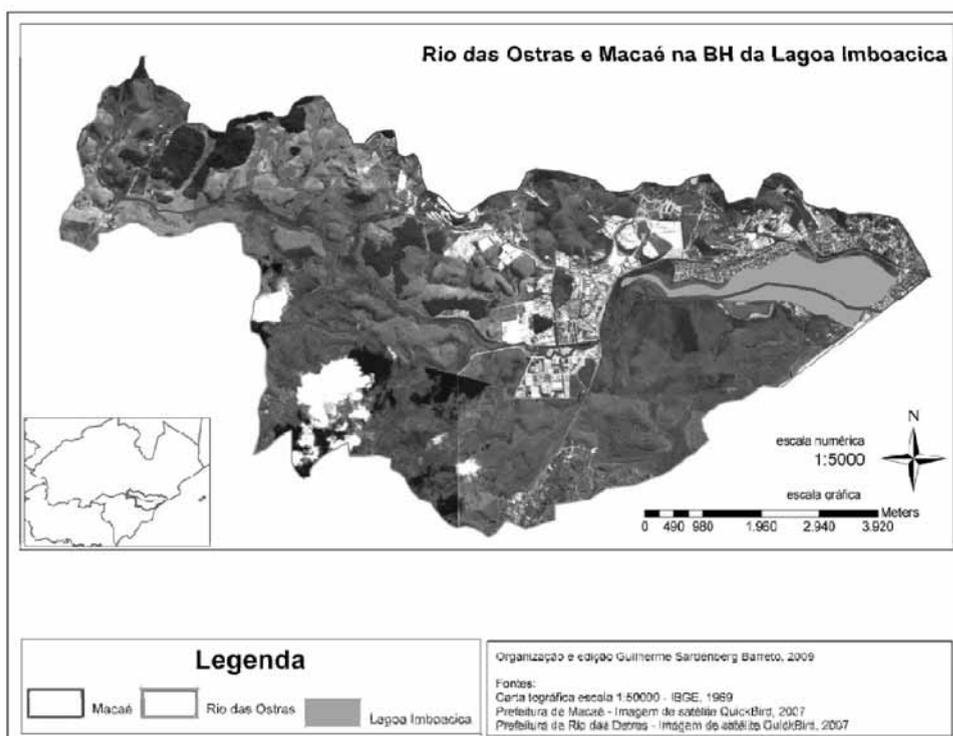


Figura 2: Bacia Hidrográfica da lagoa Imboacica com o limite administrativo entre os municípios de Macaé e Rio das Ostras

Fonte: Barreto (2009)

Esses vegetais têm um papel importante na ciclagem de nutrientes em lagoas costeiras (DOS SANTOS et al., 2006).

Esta lagoa vem passando por alterações na sua dinâmica natural devido à ação antrópica. Seu entorno é ocupado basicamente por empresas do setor petrolífero e edificações residenciais. Por conta disto, o corpo hídrico já sofreu aterramentos em suas margens e teve parte de sua Faixa Marginal de Proteção (FMP) ocupada, gerando assoreamento e diminuição da lâmina d'água (MAROTTA, 2004). Como consequência, não é incomum a ocorrência de períodos de enchentes, o que traz transtornos à população da região. Na Figura 2 é possível observar a ocupação no entorno do corpo hídrico (marcado pela cor azul), principalmente no município de Macaé (limitado pela cor roxa), mas também em Rio das Ostras (linha de cor laranja).

Uma significativa ocupação humana no entorno da lagoa teve início na década de 1970, porém aumentou expressivamente a partir da década de 1990, tendo como impacto o aumento da concentração de Nitrogênio Total e Fósforo Total na coluna d'água (BOZELLI et al., 2009), proveniente do despejo de esgotos domésticos e industriais sem tratamento. Esse enriquecimento de nutrientes favorece a eutrofização do local. Esse fenômeno, quando potencializado pela ação antrópica, gera distúrbios ecológicos como crescimento acelerado da população de algas e macrófitas aquáticas no espelho d'água, além da diminuição das taxas de oxigênio dissolvido, gerando mortalidade de peixes e afetando toda uma cadeia trófica (ESTEVES, 1998b).

A presença da macrófita taboa (*Typha domingensis*), tanto na lagoa quanto em sua área de influência, é predominante. Ela é considerada uma das espécies bioindicadoras de grande quantidade de nutrientes em corpos lênticos ou alagados, conhecidas por terem elevado poder de depuração e eficiência na redução da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) em águas poluídas (OLIVEIRA et al., 2000), expandindo-se em áreas próximas a despejos de esgotos (LOPES-FERREIRA, 1998).

A abertura artificial da barra de areia que separa a lagoa do mar é uma alternativa para amenizar a eutrofização, assim como o problema das cheias. Entretanto, pode gerar alterações profundas no metabolismo desse ecossistema, modificando a composição e estrutura das comunidades animais e vegetais, na medida em que possibilita a comunicação temporária entre o sistema aquático continental e o ambiente marinho adjacente. Além de alterações na biota, também ocorre o aumento da salinidade da laguna (FARIA et al., 1994; SANTANGELO et al., 2007).

Diante da problemática exposta, algumas instituições têm realizado ações de manejo desse ecossistema lagunar. Em agosto de 2011, foram concluídas as obras de reconstrução do Canal Extravasador e vertedouro da lagoa Imboacica (22° 25' S; 41° 49' O), promovida pelo Instituto Estadual do Ambiente (Inea). Seu principal objetivo é manter o volume hídrico em um patamar ideal, evitando enchentes nos arredores e conservando a biota local através da inibição da abertura artificial da barra de areia (Figura 3).



Figura 3: Vertedouro no canal extravasor da lagoa Imboacica
Fonte: elaborado pelo autor (agosto de 2011)

A Secretaria Municipal de Ambiente de Macaé vem analisando constantemente parâmetros ambientais da lagoa. No ano de 2010, foi inaugurada uma base operacional da mesma secretaria no bairro Mirante da Lagoa, com o intuito de facilitar o monitoramento da qualidade da água (Figura 4).

Vale destacar o trabalho de pesquisadores do NUPEM/UFRJ (Laboratório de Limnologia), em convênio com a PETROBRAS, através do Projeto “Estudos Ecológicos das Lagoas Costeiras do Norte Fluminense (ECOLagoas)”. Esse projeto foi criado em 1992 com o intuito de gerar conhecimentos científicos e subsídios para o manejo e preservação das lagoas costeiras regionais e repassá-los à população (ECOLAGOAS, 2009). Além disso, Barreto (2009) também avaliou outros diferentes parâmetros na Bacia Hidrográfica da Lagoa Imboacica, para obtenção do Índice de Qualidade das Águas (IQA), conforme apresentado no Quadro 2.



Figura 4: Sede da Associação de moradores do bairro Mirante da Lagoa, onde foi instalada uma base operacional da Secretaria Municipal de Ambiente de Macaé
Fonte: elaborado pelo autor (julho de 2011)

Quadro 2: Comparação entre os parâmetros analisados na lagoa Imboacica por Barreto (2009), para obtenção do Índice de Qualidade das Águas (IQA), e por pesquisadores do NUPEM/UFRJ (ECOLAGOAS. 2009)

Índice de Qualidade das Águas (IQA)	Projeto ECOLagoas
Coliformes Fecais (NPM/100 ml)	Coliformes Fecais (UFC/100 ml)
pH	pH
DBO (mg/L)	Coliformes Totais (UFC/100 ml)
Nitrogênio Total (mg/L NO ₃)	Nitrato ($\mu\text{mol/L}$)
Fósforo Total (mg/L PO ₄)	Fósforo Total ($\mu\text{mol/L}$)
Temperatura (°C)	Fósforo Dissolvido ($\mu\text{mol/L}$)
Turbidez (UNT)	Orto-fosfato ($\mu\text{mol/L}$)
Resíduo Total (mg/L)	Íon Amônio ($\mu\text{mol/L}$)
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	Oxigênio Dissolvido (mg/L)
	Profundidade (m)
	Transparência - Disco de Secchi (m)
	Salinidade (‰)
	Alcalinidade ($\mu\text{Eq/L}$)

Quanto ao tratamento do esgoto, a região do entorno da lagoa Imboacica ainda carece de mecanismos que possibilitem a total recuperação do corpo hídrico. Dois projetos estão em fase de implantação, segundo informações fornecidas pela Empresa Municipal de Saneamento (ESANE)¹ do município de Macaé:

- Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Mutum (22° 24' S; 41° 49' O) -Atenderá à região dos bairros Mirante da Lagoa, Jardim Guanabara e Mutum. Após construção de tronco coletor (proveniente do bairro Mirante da Lagoa) pela secretaria de obras, em parceria com o Inea, o empreendimento será entregue para operação à ESANE (Figura 5). A ETE terá a capacidade de efetuar tratamento terciário dos efluentes recolhidos.

- Estação elevatória² - Abrangerá a área entre os bairros Morada das Garças, Vivendas da Lagoa e Cavaleiros, cujo objetivo será bombear todo o esgoto gerado, com tratamento secundário, para o canal do Capote, que fica localizado próximo à Linha Verde, importante via automotiva que liga o bairro Aroeira à zona sul da cidade. Deste canal, os efluentes têm como destino o rio Macaé e, em sequência, o mar. Estima-se que esse projeto esteja concluído até o fim de 2011.



Figura 5: ETE Mutum

Fonte: elaborado pelo autor (julho de 2011)

¹Dados fornecidos por Carlos Eduardo Hime Linhares, engenheiro civil e assessor técnico da presidência da empresa ESANE, e por Guilherme Sardenberg Barreto, biólogo e técnico de meio ambiente da mesma empresa.

² Conforme definição da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), uma Estação Elevatória de Esgoto Sanitário “é uma instalação que se destina ao transporte de esgoto do nível do poço de sucção das bombas ao nível de descarga na saída do recalque, acompanhando aproximadamente as variações da vazão afluente” (ABNT, 1992).

Apesar das iniciativas do poder público, existem ainda outros pontos onde o despejo de efluentes na lagoa ocorre sem controle. O principal deles talvez seja proveniente do bairro Novo Cavaleiros (22° 24' S; 41° 48' O), onde várias empresas do setor *offshore* estão instaladas. No local existe um canal coletor de águas pluviais, utilizado indevidamente para o descarte de efluentes (Figura 6). Além disso, é notório o descarte de esgotos na “foz” do rio Imboacica (22° 25' S; 41° 51' O), onde também estão localizadas empresas do ramo petrolífero (BARRETO, 2009; ECOLAGOAS, 2009), na divisa entre Macaé e Rio das Ostras. Não conformidades na base operacional *onshore* de apoio às atividades de produção de petróleo na Bacia de Campos foram estudadas por Valinhas (2009). É importante destacar que o esgotamento sanitário residencial na parte macaense que envolve a lagoa, assim como no município de Macaé como um todo, se dá predominantemente pelo sistema fossa-filtro-sumidouro.



Figura 6: Canal do bairro Novo Cavaleiros
Fonte: elaborado pelo autor (julho de 2011)

Considerações finais

A lagoa Imboacica é um recurso hídrico de vital importância para a Região Hidrográfica VIII do estado do Rio de Janeiro, com usos diversificados e conflitantes das águas como o lançamento de efluentes, a pesca e o uso recreativo, devido à sua beleza cênica. O despejo de efluentes sem tratamento, assim como outras ações antrópicas, tem acirrado esses conflitos, traduzindo-se em uma ameaça à sobrevivência da laguna.

Com o intuito de proteger esse ecossistema, há ações governamentais, cuja efetividade se mostra limitada perante a urgência da questão.

Diante deste contexto, o uso da modelagem computacional pode ser de fundamental relevância na compreensão do funcionamento do ecossistema lagunar e na projeção de situações futuras, considerando os impactos ambientais existentes. A simulação produzida por meio do sistema MOHID é uma ferramenta importante para uma melhor e mais eficiente gestão desse patrimônio natural.

Referências

ABNT. NBR 12208. Projeto de estações elevatórias de esgoto sanitário. 1992.

AMARAL, K. J. Estuário do Rio Macaé: Modelagem Computacional como ferramenta para o Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos. Rio de Janeiro, 2003.

ANGELINI, R. Ecossistemas e modelagem ecológica. In: POMPÊO, M.L.M. (Ed.) Perspectivas da Limnologia no Brasil. São Luís: Gráfica e Editora União, 1999. 198 p.

BARRETO, Guilherme Sardenberg. Mapeamento ambiental da bacia hidrográfica da lagoa Imboacica: subsídio para a construção de planos de bacia. 2009. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental modalidade profissional) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Macaé, 2009.

BARROS, Aline Mide Romano de. Modelos matemáticos de equações diferenciais ordinárias aplicadas à epidemiologia. Revista de Ciências Exatas e Tecnologia, v. 2, n. 2, 2007.

BONGANHA, Carlos André; GUIGUER Jr, Nilson; PEREIRA, Sueli Yoshinaga; OLIVEIRA, Luciana Camargo de; RIBEIRO, Maria Lúcia. Conceitos e fundamentos da modelagem matemática para gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos. [S.l]: Analytica, 2007.

BOZELLI, Reinaldo L. et al. Interactive effects of environmental variability and human

impacts on the long-term dynamics of an Amazonian floodplain lake and a South Atlantic coastal lagoon. Limnologica, v. 39, p. 306-313, 2009.

BRATLEY, P.; FOX, L. B.; SCHRAGE, E. L. A guide to Simulation. 2 ed. New York: Springer-Verlag, 1987.

BRAUNSCHWEIG, Frank; FERNANDES, Luis. MOHID: interfaces gráficas do usuário: manual do usuário. Campos dos Goytacazes (RJ): Essentia Editora, 2010. 76 p.

CEARÁ. Avaliação do uso potencial de áreas estuarinas a partir da identificação e caracterização do comportamento de variáveis hidro-climáticas, oceanográficas e ambientais: estudos de caso: rio Pirangi-CE. 2007. 219 f. Relatório Final - Universidade Estadual do Ceará, Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Secretaria da Ciência, Tecnologia e Educação Superior, Fortaleza, 2007.

COSTA, Joaquim Francisco da. Distribuição espacial e temporal do escoamento superficial em bacias hidrográficas. 2005. 157 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Universidade Federal de Mato Grosso, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Cuiabá, 2005.

CUNHA, Cynara de Lourdes da Nóbrega; FERREIRA, Aldo Pacheco. Modelagem matemática para avaliação dos efeitos de despejos orgânicos nas condições sanitárias de águas ambientais. Cad. Saúde Pública, Rio de Janeiro, v. 22, n. 8, p.1715-1725, 2006.

DOS SANTOS, Anderson M. et al. Effects of the sand bar breaching on *Typha domingensis* (PERS.) in a tropical coastal lagoon. Hydrobiologia, v. 556, p.61–68, 2006.

ESTEVES, F. A. Fundamentos de Limnologia. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. 601p.

ESTEVES, F. A. Lagoas costeiras: origem, funcionamento e possibilidades de manejo. In: Ecologia das Lagoas Costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé. Rio de Janeiro: NUPEM/UFRJ, 1998a.

FALCONER, R.A . Flow and water quality modeling in coastal and inland water. Journal of Hydraulic Reserch, v.30, n.4, p. 437-452, 1992.

FARIA, B. M.; SUZUKI, M. S.; ESTEVES, F. A. Alterações no metabolismo da lagoa Imboacica, Macaé, RJ, associadas à ocorrência de duas sucessivas aberturas artificiais de

barra. In: Congresso de Ecologia do Brasil. 2. Sociedade de Ecologia do Brasil. Londrina, PR, Resumos ... 406p.

FARJALLA, Vinícius. F. et al. Bacterial Growth and DOC Consumption in a Tropical Coastal Lagoon. Brazilian Journal of Biology, v. 66, n. 2A, p. 383-392, 2006.

FERNANDES, R. M. A. S. Modelação Operacional no Estuário do Tejo. 2005. Dissertação (Mestrado) - Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

FERREIRA, Maria Inês Paes et al. Questões relevantes na gestão de recursos hídricos no Brasil e no Estado do Rio de Janeiro. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, Campos dos Goytacazes: Essentia Editora, v. 2, n. 2, 2008. 294 p.

FIGUEIREDO-BARROS, Marcos P. et al. Life cycle, secondary production and nutrient stock in *Heleobia australis* (d'Orbigny 1835) (Gastropoda: Hydrobiidae) in a tropical coastal lagoon. Estuarine, Coastal and Shelf Science, v. 69, p. 87-95, 2006.

GODOY, Fabio Bertini. Modelagem hidrológica-hidrodinâmica da Lagoa da Conceição – SC. 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

HARTE, John. Consider a cylindrical cow: more adventures in environmental problem solving. Sausalito, California: University Science Books, 2001. 211 p.

IRITANI, M.A. Modelação matemática tridimensional para a proteção das captações de água subterrânea. 1998. 200 f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

JOLY, Marcel; PINTO, José Maurício. Modelagem matemática da evolução do fenótipo indutor de sincício na infecção HIV-1/AIDS. Rev. Bras. Epidemiol., v. 13, n. 2, 2010.

LEMONS, Adriano Gomes de; BERNARDES, Marcos Eduardo Cordeiro. Modelagem da hidrodinâmica da Lagoa dos Patos. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIFEI, 16., 2009, Itajubá/MG, 2009. Anais... Itajubá: 2009. 181 p.

LIMA, E. B.; RODRIGUES, P. P. W. G.; SILVA NETO, A. J.; MESA, M. I.; SANTIAGO, O. L.; LUGON JUNIOR, J. Redes Neurais na Obtenção dos Parâmetros de um Modelo

Computacional do Estuário do Macaé. In: CONGRESSO IBERO LATINO-AMERICANO DE MODELAGEM COMPUTACIONAL, 2010, Armação de Búzios/RJ.

LIMA, Tiago França Melo de. TerraME GIMS: uma interface gráfica para a descrição de modelos ambientais para a plataforma TerraME. 2010. 98 f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

LOPES-FERREIRA, C. Redução das concentrações de Nitrogênio e fósforo dos efluentes domésticos lançados na Lagoa Imboacica, através de uma região colonizada por macrófitas aquáticas. In: Ecologia das Lagoas Costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé. NUPEM/UFRJ. 1998. p. 375-389.

MARIA, ANU. Introduction to modeling and simulation. In: THE 1997 WINTER SIMULATION CONFERENCE. Piscataway, 1997. Proceedings... NJ: IEEE, 1997.

MAROTTA, H. Dragagem não precedida de planejamento urbano-ambiental (Lagoa Imboacica, Macaé, RJ): quando a tentativa de mitigação causa a degradação. Instituto de Geociências, Departamento de Geografia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

MARTINHO, Vivian. Estudo da dispersão de manchas de óleo na área de atuação do porto do Rio Grande – RS. 2010. 71 f. Trabalho (Conclusão de curso) – Laboratório de oceanografia costeira e estuarina, Programa de recursos humanos n° 27 – ANP/MME/MCT “Estudos Ambientais nas Áreas de Atuação do Petróleo” - Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2010.

MOHID Description. Lisboa: Downloads Manuals Mohid.

MOHID. Modelling Water Resources. Disponível em: <<http://www.mohid.com>>. Acesso em: 6 jul. 2011. 2011b.

MOHID. Sistema de Modelação. Disponível em: <<http://maretec.mohid.com/Estuarios/Inicio/Mohid2000.htm>>. Acesso em: 6 jul. 2011.

MONTENEGRO JR., Ignácio Ribeiro Pessoa. Turismo e urbanização: gestão de impactos no litoral de Aquiraz-CE. 2004. 259 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

NAVAL, Liliana Pena; FERREIRA E SILVA Carlos Danger; BONATTO, Gustavo; QUEIROZ,

Sérgio Carlos Bernardo. Aplicação de um modelo relacionado ao comportamento hidrodinâmico em um sistema de lagoas de estabilização em região tropical. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITÁRIA Y AMBIENTAL, 28, 2002, Cancun, México.

OLIVEIRA, Rubens Alves de; DENÍCULI, Wilson; ITABORAHY, Cláudio Ritti; CECON, Paulo Roberto. Redução da demanda bioquímica de oxigênio de águas residuárias da suinocultura com o emprego da macrófita aquática. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 4, n. 1, p. 81-86. 2000.

PALMA-SILVA, C. Ecologia de Macrófitas Aquáticas em uma lagoa costeira sujeita a impactos antrópicos (Lagoa Imboassica, Macaé, RJ). Ph.D (Dissertation) - PPGE-UFRJ, Rio de Janeiro, 1999.

PRECIOSO, Carlos Henrique de Oliveira. Caracterização ambiental de uma lagoa urbana utilizando a modelagem computacional (MOHID): O caso da lagoa do Vigário. 2010. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental - modalidade profissional) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2010.

RENNÓ, C. D. Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas. São José dos Campos: INPE, 2003. 158 p.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. D. Modelos hidrológicos para gestão ambiental. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000. 60 p.

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.

SALDANHA, Jeanne Cristine Schmidt. Análise da influência do rio Santa Maria da Vitória na baía de Vitória, através da modelagem computacional: Uma contribuição ao processo de enquadramento. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2007.

SÁNCHEZ-BOTERO, Jorge Ivan; Garcez, Danielle Sequeira; Caramaschi, Érica Pellegrini; Saad, Adriana Miguel. Indicators of influence of salinity in the resistance and resilience of fish community in a tropical coastal lagoon (southeastern Brasil). Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras, v. 38, n. 1, p. 171-195, 2009.

SANTANGELO, Jaime M. et al. Zooplankton responses to sandbar opening in a tropicaleutrophic coastal lagoon. Estuarine, Coastal and Shelf Science, v. 71, p. 657-668, 2007.

SANTOS, Madalena; SILVA, Adélio; LEITÃO, Paulo; COELHO, Henrique; NEVES, Ramiro. Aplicação de um modelo hidrodinâmico (MOHID) como ferramenta na avaliação da qualidade da lagoa de Óbidos. In: SEMINÁRIO SOBRE SISTEMAS LAGUNARES E COSTEIROS, 1., 2004.

SARAIVA, Ana Sofia de Carvalho. Modelação ecológica da Ria de Aveiro: o papel das macroalgas. 2005. 211 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia, Gestão e Modelação dos Recursos Marinhos) – Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa. 2005.

SIMONASSI, Lorismario; PEDROSO, Reginaldo. Para você não ter medo de números: O uso de modelo matemático da lei de igualação. Psicologia IESB, v. 2, p. 34-35, 2009.

SODRÉ, ULYSSES. Modelos matemáticos. Universidade Estadual de Londrina: Londrina, 2007.

SOUZA, Clenúbio Feitosa de Souza. Sistema integrado para tomada de decisão espacial em situações de derramamento de óleo do litoral norte do estado do RN. 2006. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de pós- graduação em geodinâmica e geofísica. Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2006.

SOUZA, Marina Pinto Guerra de. Simulação da dispersão de óleo na baía do Espírito Santo usando o modelo numérico MOHID-2D. 2010. 72 f. Trabalho (Conclusão de curso) em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2010.

STEYAERT, L.T. A Perspective on the State of Environmental Simulation Modeling. In: GOODCHILD, M.F.; PARKS, B.O.; STEYAERT, L.T. Environmental modeling with GIS. New York: Oxford University Press, 1993. Cap. 3, p. 16-30.

VALINHAS, Marcelo Macedo. Processo de licenciamento ambiental como acoplamento estrutural entre os sistemas de gestão ambiental pública e empresarial: acompanhamento dos impactos da operação da base do Parque de Tubos, Macaé – RJ. 2009. 202 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental modalidade profissional) – Instituto

Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Macaé, 2009.

VEERSTEG, H; MALALASEKERA, W. Computacional Fluids Dynamics: An Introduction to Finite Volume Method. Londres: Logman Group, 1995.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte: DESA: UFMG, 1996.