

GERENCIAMENTO INTEGRADO DE QUANTIDADE E QUALIDADE DA ÁGUA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAPUCAÍ-MIRIM/GRANDE: APLICAÇÃO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Frederico Fábio Mauad¹ & Liliane Lazzari Albertin¹

Resumo - É indiscutível a importância da disponibilidade hídrica, tanto quantitativa como qualitativa, no desenvolvimento adequado de uma região. Não só o déficit desse recurso como também o seu excesso são igualmente problemáticos e devem ser vistos de uma maneira mais realista e séria. Portanto, são necessárias ações eficientes referentes ao planejamento e gestão dos recursos hídricos, a fim de garantir a disponibilidade de água, visando à proteção, à recuperação e à conservação deste recurso. Neste estudo, busca-se avaliar os conflitos gerados no aproveitamento de usos múltiplos da água e a situação qualitativa dos recursos hídricos em um sistema sujeito ao despejo de poluentes. A região em estudo é a Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande – SP, uma região muito irrigada, onde as atividades no setor primário são bem desenvolvidas e, no secundário, as indústrias de couro e alimentar apresentam expansão, contribuindo com significativa carga poluidora. O modelo matemático MIKE BASIN 2000, que associa técnicas de simulação, otimização e modelagem em rede de fluxo será utilizado na avaliação de diversos cenários: atual, com a implantação de três novas pequenas centrais hidrelétricas, redução na emissão da carga poluente e projeção para o futuro.

Abstract - It's unquestionable the importance of the water availability, both quantitative and qualitative, in the appropriate development of a region. Not only the deficit of this resource as its excess are equally problematic and must be seen in a more realistic and serious way. Therefore, efficient actions regarding the water resources's planning and management are necessary, to guarantee the availability of water, aiming the protection, recovery and conservation of this resource. In this work has the aim of analyzing the conflicts generated in the multipurpose reservoir system and the qualitative situation of the water. The region of this study is the Sapucaí-Mirim/Grade River Basin, state of São Paulo. The mathematical model MIKE BASIN 2000, which

¹ Departamento de Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São Carlense 400, CEP 13560-970, São Carlos – SP, Fone: (16) 273-9552, E-mails: mauadffm@sc.usp.br, lilianelazzari@hotmail.com

associates simulation techniques, optimization and network flow modeling was utilized in the evaluation of several settings.

Palavras-chave - planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, modelos de qualidade da água, simulação computacional, Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande

INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos desempenham papel fundamental no desenvolvimento de qualquer sociedade. A crescente expansão demográfica e industrial observada nas últimas décadas tem intensificado os usos dos recursos hídricos tanto no que se refere ao aumento da quantidade demandada para determinada utilização, quanto no que se refere à variedade desses usos.

Com o crescimento da demanda dos recursos hídricos, começam a surgir conflitos entre os diversos usos e usuários. A água passa a ser escassa, precisando ser vista como bem econômico. Essa escassez também pode decorrer devido aos aspectos qualitativos, quando a poluição afeta de tal forma a qualidade da água que os valores excedem os padrões admissíveis para determinados usos. Atender à demanda de água em quantidade e qualidade adequadas é considerado um dos maiores desafios do novo milênio.

O estudo dos aspectos quantitativos e qualitativos dos recursos hídricos não pode ser dissociado. A interpretação de dados de qualidade da água não proporciona conclusões significativas a menos que baseada na variabilidade espacial e temporal do regime hidrológico. A variação no espaço e no tempo da disponibilidade, como da demanda, leva a necessidade de estudos de planejamento e gestão de recursos hídricos.

Uso de modelos computacionais para planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos

Os avanços na tecnologia da computação, aliados ao aumento de complexidade nos problemas de gerenciamento de recursos hídricos, têm estimulado a prática de modelos matemáticos e simuladores computacionais como ferramentas para auxiliar nas tomadas de decisão. A escolha do método depende das características do sistema que está sendo considerado, avaliação de dados e principalmente das restrições e objetivos especificados. As restrições típicas incluem equações de continuidade, capacidade de armazenamento mínimo e máximo, quantidade de água liberada, limitações técnicas de equipamentos e obrigações legais e institucionais.

Na década de 1960, o processamento de dados foi a principal aplicação de computadores no gerenciamento de recursos hídricos. Como exemplo tem-se o processamento de dados hidrológicos.

Mais tarde, com a complexidade dos problemas de armazenamento dos reservatórios e problemas hidráulicos, a técnica da computação começou a ser utilizada para solucionar e simular modelos hidrológicos para determinação de vazões superficiais e otimização de usinas hidrelétricas (VOTRUBA et al., 1988). Atualmente os métodos mais utilizados são modelos de simulação e otimização.

A simulação é considerada a técnica mais flexível utilizada em recursos hídricos, sendo essa umas das suas principais vantagens, pois permite que todas as características de um sistema sejam representadas por uma descrição matemática. Ainda como vantagens das técnicas de simulação, está a possibilidade de ser aplicável a sistemas complexos e aceitar quaisquer equações de restrição. Apresenta como desvantagem o fato de não permitir aos usuários restringir o espaço decisório e, sendo assim, a solução de problemas é alcançada através do processo de tentativa e erro. A simulação não permite determinar a política ótima de operação; a solução ótima é encontrada iterativamente, processando diversas simulações alternativas e comparando seus desempenhos.

Otimização é o conjunto de técnicas algorítmicas e de programação usadas para buscar o valor ótimo de funções matemáticas. A tarefa da otimização é minimizar ou maximizar a função objetivo, que se pretende otimizar, encontrando soluções para as variáveis de decisão. Por categoria os métodos de otimização se dividem em: programação linear, programação não linear (irrestritos ou não) e programação dinâmica. Apresenta como principal desvantagem as simplificações necessárias na representação dos sistemas, o que pode afetar de forma significativa a solução encontrada.

OBJETIVO

A meta principal deste trabalho é realizar um balanço hidrológico através do modelo computacional MIKE BASIN 2000 para auxiliar a análise do conflito de usos múltiplos da água nos aspectos quantitativos e qualitativos, utilizando um caso de estudo real junto à Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande – SP. Deseja-se avaliar a melhor estratégia de alocação da água para abastecimento urbano e industrial, geração de energia, irrigação e aquíicultura ao longo de todo o curso do rio Sapucaí-Mirim, principal constituinte da bacia. Além disto será definida a situação qualitativa deste rio, as principais fontes poluidoras, o quanto poluem e possíveis iniciativas que poderão ser tomadas para não ser violado o padrão admissível da qualidade da água. Uma dessas iniciativas pode ser a determinação de um nível mínimo de tratamento das águas residuárias e industriais. Deseja-se também analisar e verificar a capacidade do modelo escolhido na representação e simulação dos sistemas hídricos.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Modelos de otimização e simulação

A técnica da otimização é muito difundida na literatura para modelar sistemas de reservatórios. HALL et al. (1968) foram os pioneiros a usar programação dinâmica para um único reservatório destinado à geração de energia elétrica. A programação linear foi inicialmente aplicada no problema de planejamento de uma bacia hidrográfica em 1962 (YEH, 1985) e, recentemente, YEN & CHEN (2001) testaram diferentes estratégias de alocação de água através de uma otimização multiobjetivo. Muitos pesquisadores testaram a flexibilidade da simulação e o poder exploratório da otimização, combinando as duas ferramentas (DANDY et al., 1997; SINHA et al., 1999; ALI & SHUI, 2001; RAO et al., 2001). Mais de um método de otimização foi utilizado por BECKER & YEH (1974), e ainda encontra-se métodos não tradicionais, como as redes neurais artificiais (NEELAKANTAN & PUNDARIKANTHAN, 1999), programação baseada na lógica fuzzy (JAIRAJ & VEDULA, 2000), algoritmos genéticos (REIS & AKUTSU, 2002) e técnicas como *simulated annealing* (SA) e *ant colony algorithms* (ACAs).

O mais antigo modelo de simulação, segundo YEH (1985), associado aos recursos hídricos, é o estudo feito pelos Engenheiros das Forças Armadas Americanas em 1953 que consistia em estudar a operação de seis reservatórios no Rio Missouri. Estudo similar foi feito por EMERGY & MEEK (1960).

LEVY & BAECHER (1999) desenvolveram o NileSim, simulador da bacia do rio Nilo. Tendo como benefício rapidez, interface gráfica e facilidade no uso, este software pode ser operado por pessoas não técnicas que participam do planejamento de uma bacia hidrográfica. O usuário pode obter gráficos de demanda por tempo, alocação de água dos maiores canais, descarga anual e volume dos reservatórios no ano em estudo.

No sudeste dos Estados Unidos da América, RITSCHARD et al. (1999) propuseram o modelo de simulação HADCM2 (“Hadley Centre Global Climate Model”) para analisar o impacto das precipitações futuras e a crescente demanda de água para agricultura causada pelo aumento na produção de milho, soja e trigo nesta região.

MAUAD (2000) realizou um estudo em Alqueva, Portugal, utilizando o simulador IRAS. Os resultados da simulação computacional forneceram a resiliência, confiabilidade e vulnerabilidade do sistema para os diversos usos da água. BRANDÃO & RODRIGUES (2000) utilizaram o mesmo simulador para caracterizar usos futuros da água à jusante do rio Guadiana que atenda às condições hidrológicas e os períodos de seca, de forma que sejam compatíveis com a sustentabilidade ecológica do rio. PEIXOTO (2002) aplicou o Modelo IRAS para a Bacia do Rio Sapucaí-Mirim/Grande no Estado de São Paulo, Brasil.

O software Hydro foi usado no Paquistão por TATE & FARQUARSON (2000) de forma a atender oferta e demanda de água no que cabe à geração de energia e irrigação. Este modelo foi aplicado em um único reservatório e, a partir de série histórica de vazão e curvas de regra operacionais, foi capaz de estimar o retorno econômico e vida útil do reservatório de Tarbela, no rio Indus.

A partir de uma versão modificada do modelo hidrológico MIKE SHE e de dados meteorológicos, topográficos, tipos de solo e de vegetação, ANDERSEN et al. (2001) aplicaram o simulador, num espaço de tempo de 4 anos, para uma área de 16 km² que após rigorosos testes de calibração e validação foram conduzidos para os 375000 km² da bacia do rio Senegal.

MIKE BASIN 2000, desenvolvido pelo “Danish Hydraulic Institute” (DHI) da Dinamarca, tem como sua potencialidade poder ser executado para análises hidrológicas extensas para sistemas independentes de abastecimento de água, irrigação, produção de energia elétrica e também para sistemas de usos múltiplos. DYRBAK (2000) realizou um estudo da operação de reservatórios na Polônia utilizando este modelo. LIMA (2002) também utilizou o MIKE BASIN 2000 na Bacia do Rio Atibaia em São Paulo, Brasil.

Modelos de qualidade da água

A primeira tarefa da engenharia ambiental foi quantificar as respostas físicas, químicas e biológicas que o meio ambiente dava para as alterações impostas pelo homem na água. Estimulados pela necessidade de controle da poluição que ameaçava a saúde da população norte-americana, foram iniciados estudos em 1920 no rio Ohio para mensurar as fontes de poluição deste rio e os impactos causados na água usada para abastecimento urbano. Deste estudo foi herdada a primeira aplicação da modelagem matemática que caracterizou o balanço do oxigênio dissolvido nos rios, a equação de Streeter-Phelps (ORLOB, 1992).

Esta equação se tornou conhecida e foi o motivo de preocupação de muitos pesquisadores que queriam cada vez mais aprender a partir dos dados de campo e laboratoriais. Porém, ela não conseguia descrever muitos dos complexos sistemas aquáticos reais, o que só foi possível com o surgimento dos computadores após a II Guerra Mundial.

Chega-se na década de 60, que trouxe um aumento do interesse público no que se refere ao declínio dos aspectos qualitativos da água. A pressão pública se manifestou na imposição de controles e financiamento de projetos para prevenção e remediação da poluição. Começaram os investimentos em técnicas de computação e análise de sistemas e um dos primeiros modelos computacionais que surgiram para gerenciamento da qualidade dos recursos hídricos é o que foi criado por THOMANN (1963), denominado “Delaware Estuary Comprehensive Study” (DECS). O pesquisador foi auxiliado pela Administração Federal de Controle da Poluição das Águas dos

Estados Unidos, atual Agência de Proteção Ambiental (“U. S. Environmental Protection Agency” – EPA) progenitora do conhecido software QUAL 2E. DECS era uma extensão da equação de Streeter-Phelps, pois considerava mais de uma fonte pontual de poluição e avaliava estratégias alternativas para controle da poluição, no caso, media os impactos causados pela falta de oxigênio dissolvido. Foi uma revolução.

A partir de 1970, o simples modelo de Streeter-Phelps começou a aparecer em uma variedade de formas computadorizadas. DOSAG foi produzido em 1970 pela “Texas Water Development Board” (TWDB) resolvendo sistemas de rios principais e tributários com coeficientes de velocidade variáveis. Foi seguido pelo QUAL I, criado no mesmo ano também pela TWDB. Em adição na relação OD-DBO, simulava troca de energia na interface ar-água, permitindo o ajuste da temperatura nas constantes de velocidade. Uma versão melhorada, QUAL II, foi desenvolvida pela EPA em 1973 e incluía a capacidade de simular sistemas de rios mais complexos, fluxos estacionários e não estacionários e avaliava os impactos que as cargas de nutrientes causavam no ecossistema aquático (ORLOB, 1984).

Com algumas modificações, ficou disponível o modelo de qualidade da água que vêm sendo muito utilizado, o QUAL 2E, que simula 15 índices de qualidade, dentre eles: oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, temperatura, algas e clorofila-a, nitrogênio total, amônia, nitrito, nitrato, fósforo total, fósforo dissolvido e coliformes. Ainda, permite avaliar o impacto causado pelo despejo de águas residuárias e industriais (DROLC & KONCAN, 1999; NING et al., 2001).

No campo da otimização, o primeiro trabalho foi o proposto por DEININGER (1965), que utilizou a programação linear estruturada através de várias aproximações de equações diferenciais no perfil do oxigênio dissolvido dos rios. DYSART (1969) utilizou a programação dinâmica para problemas também com OD. A programação não linear foi utilizada por HWANG (1973) para incorporar as variedades sazonais encontradas no leito do rio, quando o parâmetro analisado era ainda OD.

Os austríacos JOLMA et al. (1997) fizeram uma ferramenta computacional de suporte à decisão chamada StreamPlan (“Spreadsheet Tool for River Environmental Assessment Management and Planning”). Esta ferramenta foi feita para analisar políticas alternativas de gerenciamento da qualidade da água e é organizada por quatro modelos básicos: (1) modelo de simulação do fluxo do rio e qualidade de sua água, que nada mais é do que um modelo hidráulico e de balanço de massa. O modelo qualitativo é uma extensão da equação de Streeter-Phelps e considera concentrações de OD, DBO, nitrogênio amoniacal, nitrato e fósforo total. (2) modelo econômico usado para identificar custo de investimento, operação e manutenção. (3) modelo de sistemas de tratamento de águas residuárias. (4) modelo de otimização que, pela programação linear, minimiza os custos sujeitos às seguintes restrições: nível mínimo de tratamento das águas

residuárias, concentrações permitidas dos parâmetros qualitativos e quantidade permitida de emissão de poluentes.

A combinação da alta carga poluente, baixa descarga e alto tempo de residência resultam na degradação biológica do rio, principalmente à sua jusante. DEMUYNCK et al. (1997) analisaram variáveis de qualidade da água que causam toxidez, como OD e amônia, através de dois simuladores, ambos modelos numéricos dinâmicos: Salmon-Q, modelo hidrodinâmico e de qualidade de água; e DESIM, modelo hidrológico e de transporte de poluentes, cuja avaliação foi o impacto causado pela descarga dos principais rios tributários. A calibração e validação dos modelos foram feitas a partir de dados de séries históricas de vazão e medidas de concentração de OD e amônia, em três pontos distintos ao longo do rio e num período de 4 anos (1990 a 1994).

Quando é tratado o problema da qualidade da água em sistemas de rios de uma bacia hidrográfica, depara-se com o conflito de quem é responsável por manter a qualidade da água deste sistema (agências controladoras de poluição, por exemplo) e de quem polui o corpo da água (indústrias, por exemplo). Para solucionar este problema, SASIKUMAR & MUJUMDAR (1998) propuseram um modelo de otimização denominado “Fuzzy waste-load allocation model” (FWLAM) que, através de suas formulações, maximiza o nível mínimo de satisfação da qualidade do sistema tanto das agências controladoras quanto dos poluidores, propondo um padrão de qualidade para as águas despejadas nos rios. Através de um sistema de rios hipotético, foram inseridos na lógica fuzzy (variáveis incertas) os padrões de qualidade de água exigidos pelas agências controladoras em conflito com os poluidores. Com um modelo matemático qualitativo, que leva em suas formulações distribuição espaciais e temporais de poluentes, medidos através de concentrações de OD, foi previsto qual deveria ser a concentração máxima de DBO que as indústrias poderiam despejar e o custo total mínimo para elas efetuarem o tratamento caso esta concentração não fosse atingida.

SPANOU & CHEN (2000) desenvolveram um software baseado no método de objeto orientado para ajudar no controle das fontes pontuais de poluição em sistemas de rios. O modelo é capaz de representar a bacia hidrográfica através de uma rede de arcos e nós; quantificar a poluição do rio (em termos de OD, DBO, nitrogênio total e amoniacal) e seu fluxo; avaliar políticas de controle da poluição. A simulação da qualidade da água inicia no primeiro nó e procede com o balanço de massa rio abaixo, até que seja encontrado um local que recebe descarga de efluentes violando o padrão admissível da qualidade da água.

Alguns modelos que avaliam os impactos dos usos múltiplos dos recursos hídricos nos aspectos quantitativos possuem extensões capazes de analisar o perfil qualitativo do corpo d’água. DAÍ e LABADIE (2001) utilizaram uma extensão do modelo MODSIM que analisa aspectos qualitativos, o MODSIMQ, trabalhando iterativamente com o QUAL 2E. Através de um algoritmo

de programação não-linear e levando em consideração mecanismos de transporte unidirecionais como advecção e dispersão, o modelo mostrou-se eficiente como um apoio à decisão para soluções de problemas prioritários, como demanda de água para irrigação, sem afetar aspectos políticos, quantitativos e qualitativos da água da bacia. Outro exemplo é o MIKE BASIN (JORGENSEN, 2002).

O aumento do consumo de água para geração de energia e irrigação acabou acarretando diminuição na população de uma determinada espécie de peixe na bacia do rio Klamath, Califórnia, devido à deterioração qualitativa da água. Utilizando modelos de simulação, um quantitativo (MODSIM), modelo de rede de fluxo, e outro qualitativo (HEQ-5Q), CAMPBELL et al. (2001) avaliaram algumas estratégias operacionais para reduzir este problema, através de mudanças na alocação da, de forma que a temperatura e o OD estivessem numa faixa razoável para que não houvesse mortalidade dos peixes. HEQ-5Q tem a capacidade de fornecer, através da simulação, dados diários da qualidade da água com variações espaciais e temporais, requerendo para isto apenas dados de descargas médias diárias de poluentes, vazões e meteorológicos.

Pelo dizer de EISELE et al. (2001), o modelo “Non Point Source Model” (NPSM) que utiliza uma combinação da linguagem Fortran com a interface gráfica do Sistema de Informação Geográfica (SIG), foi capaz de simular o transporte de nitrogênio em uma bacia hidrográfica da Alemanha, mostrando que a concentração de nitrato no leito do rio é controlada pela entrada de nitrogênio no volume de controle, dinâmica da água e reações ocorridas no meio.

O crescimento excessivo do fitoplâncton não é restrito apenas à localização, mas a uma combinação de fatores ambientais (temperatura, profundidade, luz e nutrientes). Para evitar esta proliferação, alterações devem ser feitas no corpo da água; um exemplo comum é adicionar sulfato de cobre. LEWIS et al. (2002) validou o simulador “Phytoplankton Responses to Environmental Change” (PROTECH), a partir de 1 ano de dados meteorológicos em um reservatório australiano destinado a abastecimento urbano, para diagnosticar a resposta do crescimento de comunidades fitoplanctônicas a partir de mudanças feitas na água (adição de sulfato de cobre e agitação).

BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAPUCAÍ-MIRIM/GRANDE

A Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande, localizada no extremo norte do Estado de São Paulo (Figura 1), compreende uma área de 9166,86 km², da qual faz parte 22 municípios totalizando uma população de 620533 habitantes. Dentre eles, 82,13% é composto de população urbana.

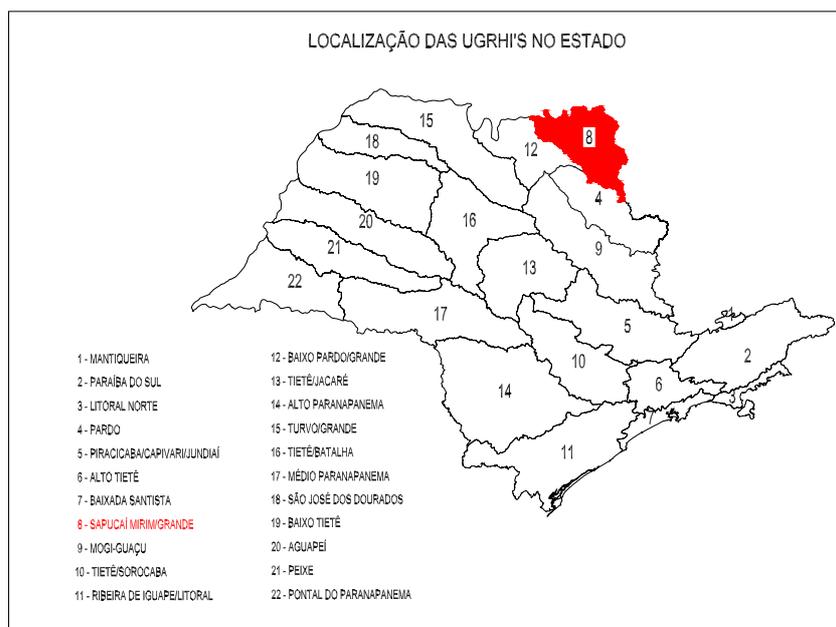


Figura 1: Localização da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande no Estado de São Paulo

Fonte: Relatório Zero do Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande (2000)

Após percorrer 337 km, totalmente na província geológica das Cuestas Basálticas, o rio Sapucaí-Mirim desemboca no rio Grande, drenando muitos solos férteis, com predomínio de terra roxa. O clima predominante é o tropical úmido com estiagem no inverno, cujo total de chuva no período seco é inferior a 30 mm. A pluviosidade média anual atinge 1500 a 2000 mm. Como na maior parte do Estado, o período chuvoso ocorre de outubro a março, recebendo cerca de 80% das chuvas anuais. O período mais seco vai de abril a setembro, com o trimestre mais seco entre junho e agosto, onde ocorrem cerca de 5% das chuvas.

Os principais ramos industriais são: madeira, borracha, couro e peles, vestuário, calçado e artefatos, bebidas e alimentos. As cidades que mais se destacam são Franca que ocupa a 2^a posição no Estado de São Paulo na produção de couros, peles e calçados, e 7^a posição na produção de borracha; e São Joaquim da Barra que garante a 4^a posição na produção de bebidas. Do total, 44% das indústrias presentes na região são curtumes, muito deles sem tratamento de seus resíduos.

O uso do solo predominante é agrícola, ocupando 52,1% do total de áreas da bacia. Destacam-se as culturas de café (Franca, Restinga, Patrocínio Paulista, Itirapuã, Santo Antônio da Alegria, Batatais); do milho (Guará, Ipuã, Guaíra, São Joaquim da Barra, Patrocínio Paulista e outros); de soja (Ipuã, Guaíra, São Joaquim da Barra, Guará, Nuporanga); do algodão, cultivado em sistema de rotação com soja e milho nos municípios acima citados; do arroz (Batatais, São José da Bela Vista, Santo Antônio da Alegria e Guaíra); e da cana-de-açúcar, distribuída em todos os municípios da região, com destaque para Pedregulho, Franca e Cristais Paulista.

METODOLOGIA

Usos e demanda dos recursos hídricos

- Abastecimento urbano e industrial

A demanda mensal média para o abastecimento público totaliza 2,077 m³/s. Destes, 1,498 m³/s são oriundos de captação superficial. Para o uso industrial, foram identificadas 7 captações superficiais totalizando 0,1695 m³/s.

- Irrigação

A partir do final da década de 70 foram difundidos vários programas de fomento à agricultura irrigada, tanto pelo governo Estadual como Federal, para incentivar a prática da irrigação através da venda de equipamentos produzidos pela indústria nacional ao produtor rural. A área da Bacia foi beneficiada e a partir de 1970 iniciou o processo de ser, hoje em dia, uma das maiores áreas agrícolas do Estado de São Paulo.

A carência de dados é um problema sério na região. De um total de 3822,09 km² de áreas agrícolas, 202,56 km² são irrigadas. De acordo com o Relatório Zero do Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande (2000), apenas dados de outorga foram obtidos, sendo de 14 usuários consumindo em média 0,026 m³/s. E, contradizendo, o Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (2000-2003) registra um consumo de 9,86 m³/s.

Constata-se que a disponibilidade de informações é ineficiente, sendo possível inferir uma demanda real significativamente maior do que a cadastrada. Devido a este motivo serão quantificadas as demandas reais através de visitas a produtores rurais, estudo do uso do solo, tipos e características das culturas, períodos de irrigação. Este objetivo será alcançado através de visitas locais e preenchimentos de formulários que serão previamente preparados.

- Geração de energia elétrica

Estudos desenvolvidos desde o início do século XX no rio Sapucaí-Mirim conduziram à construção das pequenas centrais hidrelétricas (PCH) de Dourados e São Joaquim, de propriedade da CPFL, ambas consideradas de fio d'água. Em 1998, foi outorgada a CPFL a autorização para continuação dos estudos dos aproveitamentos do referido rio. Após análises, a CPFL considerou viável a implantação de mais três usinas que estão em projeto básico: PCH Palmeiras, PCH Anhangüera, PCH Retiro, cuja construção e operação deverá se realizar no início de 2004.

O objetivo de conectar novas usinas ao sistema já existente é não só gerar melhorias nos níveis atuais de suprimento energético da região, como também aumentar a geração da CPFL e diversificar os usos da água.

Os dados principais das 5 PCH's são mostrados na TABELA 1.

TABELA 1: Dados das PCH's instaladas e em fase de implantação do rio Sapucaí-Mirim

	<i>Dourados</i>	<i>São Joaquim</i>	<i>Palmeiras</i>	<i>Anhangüera</i>	<i>Retiro</i>
N. A. Montante (m)	587,34	582,65	556,00	540,50	523,00
N. A. Jusante (m)	557,26	554,80	542,73	523,10	509,82
Área do reservatório (km ²)	2,70	0,93	2,67	2,00	3,13
Potência instalada (MW)	10,75	8,00	13,60	18,50	14,40

Fonte: Relatório Final do Projeto Básico (2001)

- Aqüicultura

A utilização de cursos d'água para atividades de aqüicultura constitui uso não consuntivo, porém pode alterar a qualidade da água captada, uma vez que são lançados complementos alimentares para as criações. Os municípios que apresentam maior número de propriedades com atividades de aqüicultura são Franca e Pedregulho. A vazão superficial captada para este uso é de 0,079 m³/s.

Fontes de poluição

Foram identificados 57 pontos de lançamentos de efluentes domésticos de uso público, resultando em carga orgânica potencial total de 29715 kg DBO₅/dia. Verifica-se que 31 pontos de lançamento possuem tratamento prévio, correspondendo a 54% do total. Somente o município de Franca gera 45,6% da carga orgânica potencial de toda a bacia. Embora a Estação de Tratamento de Esgoto de Franca tenha tratado em 2001 a totalidade dos 97% dos esgotos coletados, a carga remanescente da mesma ainda representa uma fonte expressiva de poluição para o Ribeirão dos Bagres, além dos efluentes industriais.

De um total de 53 indústrias registradas, 44% tratam-se de curtumes, que são os maiores contribuintes da poluição. Essas indústrias produzem um total de 122379 t DBO₅/ano de cargas orgânicas potenciais, sendo reduzidas para 919 t DBO₅/ano de cargas orgânicas remanescentes, com eficiência do tratamento de 99,2%.

Cenários Estudados

Serão estudados e simulados três cenários, a saber:

1- Situação atual: duas pequenas centrais hidrelétricas em operação, PCH de Dourados PCH de São Joaquim, dados cadastrados de demanda de água para os diversos usos (abastecimento urbano e industrial, irrigação, geração de energia, aqüicultura), emissão de efluentes urbano e industrial como descrito anteriormente.

2- Primeiro cenário planejado: cinco pequenas centrais hidrelétricas em operação, PCH de Dourados, PCH de São Joaquim, PCH de Palmeiras, PCH de Anhangüera e PCH de Retiro, dados de demanda cadastrados, emissão de efluente urbano considerando tratamento do esgoto nos locais que ainda não o tem, redução na emissão de efluentes industriais (redução de 25%, 50% e 75%).

3- Segundo cenário planejado: cinco pequenas centrais hidrelétricas em operação, PCH de Dourados, PCH de São Joaquim, PCH de Palmeiras, PCH de Anhangüera e PCH de Retiro, dados de demanda projetados até o ano de 2020, emissão de efluentes urbano considerando tratamento do esgoto nos locais que ainda não o tem, redução na emissão de efluentes industriais. As cargas poluidoras de origem domésticas e industriais também serão projetadas para o ano de 2020, através da estimativa do crescimento populacional e industrial.

Dados fluviométricos e de qualidade da água

A disponibilidade de água será obtida a partir dos dados dos postos fluviométricos (Tabela 2) que foram operados no rio.

TABELA 2: Relação dos postos fluviométricos

<i>Posto</i>	<i>Nome</i>	<i>Rio</i>	<i>Ano</i>
1	Santo Antônio da Alegria	Rio Ribeirão do Pinheirinho	1960 até 1999
2	Usina Dourados	Rio Sapucaí-Mirim	1937 até 1977
3	Pioneiros	Rio Sapucaí-Mirim	1944 até 1970
4	Fazenda São Domingos	Rio Sapucaí-Mirim	1938 até 1978

Fonte: Bando de dados DAEE

Os dados para simulação da qualidade da água serão obtidos junto à Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB nos pontos de monitoramento do local. Esta empresa possui três pontos oficiais de amostragem e analisa, com frequência bimestral, 33 parâmetros físicos, químicos e microbiológicos. Um dos pontos situa-se no Ribeirão dos Bagres, corpo de água pertencente à Classe 4, e, Segundo o Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo (2001), este rio pode ser considerado como a principal contribuição de poluentes para o rio Sapucaí-Mirim, pois recebe os lançamentos de parte dos esgotos domésticos “in natura” do município de Franca, além dos efluentes das indústrias de curtumes da região. Os outros pontos localizam-se no rio Sapucaí-Mirim, que se enquadra como corpo d’água Classe 2.

A Figura 2 mostra a localização das usinas hidrelétricas, dos pontos de amostragem e dos postos fluviométricos.

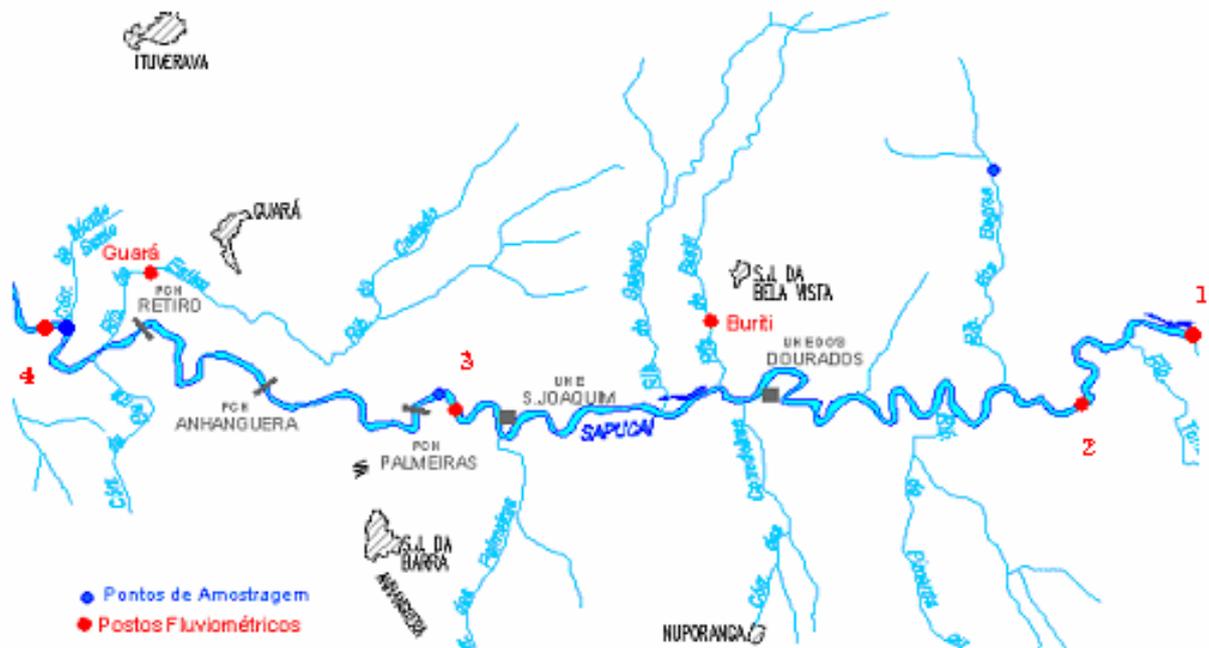


Figura 2: Localização das PCH's, pontos de amostragem e postos fluviométricos no rio Sapucaí-Mirim
 Fonte: Relatório Final do Projeto Básico (2001)

Geração de séries sintéticas

A tomada de decisão em sistemas hídricos é dificultada pela estocasticidade dos acontecimentos futuros. Como tentativa de minimizar as incertezas busca-se quantificar a disponibilidade hídrica atual e no futuro. Pode-se utilizar duas alternativas, uma é adotar a série hidrológica observada, outra é desenvolver modelos estocásticos de simulação de séries hidrológicas, gerando assim diversas séries chamadas de sintética e então simular o sistema hídrico para essas séries sintéticas.

Os vários métodos para geração de séries sintéticas foram largamente difundidos nos anos 60 e tem sido utilizado em vários estudos, pois permitem testar a solução ótima obtida a partir da série histórica para diversos cenários hidrológicos equiprováveis.

De acordo com SALAS (1980) para se modelar séries temporais é preciso definir um modelo matemático que represente séries com propriedades semelhantes. Os modelos podem ser: Modelo Autoregressivo (AR), Modelo Autoregressivo Média Móvel (ARMA), Modelo Autoregressivo Integrado Média Móvel (ARIMA), Fraction Gaussian Noise (FGN), Broken Line (BL), Shifting Level (SL). Os modelos mais comumente utilizados são os modelos auto-regressivos.

Analisando fatores como as características dos processos físicos, hidrológicos e das séries temporais, serão geradas séries sintéticas através do modelo multivariado autoregressivo de primeira ordem AR(1). Um modelo é chamado autoregressivo quando admite que os valores atuais de um processo hidrológico dependem de valores passados e não de distúrbios aleatórios.

Em um modelo multivariado são analisadas as características estatísticas das séries, como: média, desvio padrão, coeficiente de assimetria, distribuição de probabilidade e estrutura de dependência no tempo, de forma individual e a estimativa da inter-relação entre as séries.

MATALAS (1967) foi o primeiro autor a propor a aplicação do modelo AR(1) em hidrologia e sua metodologia será seguida neste trabalho.

Os postos 2, 3 e 4 possuem 32 anos de dados de vazão em comum. A partir deles, será obtida uma correlação simples para complementar os dados do posto 1 e, assim, aplicar o modelo. A geração de séries sintéticas é muito importante, uma vez que irão quantificar a provável disponibilidade hídrica e serão dados de entrada do simulador.

Simulador computacional MIKE BASIN 2000

MIKE BASIN é uma ferramenta para gerenciamento dos recursos hídricos que, ao longo de toda uma bacia hidrográfica ou parte dela, se volta para os conflitos existentes entre a disponibilidade de água e a demanda para os diversos usuários. Em termos gerais, é uma representação matemática de uma bacia. Os rios principais e seus tributários são representados no modelo através de uma rede de arcos e nós.

O modelo aplica balanço de massa em toda rede de arcos e nós, o seu conceito matemático é baseado em soluções estacionárias para cada etapa de simulação. Ainda, ele é auxiliado pela interface gráfica do software ArcView GIS do sistema de informação geográfica, operando com base em uma rede de rio digitalizada gerada na tela do computador. Toda a informação relativa a configuração da rede de fluxo, local dos usuários de água, reservatórios, entradas e saídas de vazões de retorno, também é definida na tela.

Para realizar as simulações é necessário criar arquivos em um editor de séries históricas (TSedit). Os dados são mostrados em forma de tabelas e gráficos, como no exemplo mostrado na Figura 3. Os dados podem ser editados no Excel (Microsoft) e depois transferidos para o editor.

Dados adicionais incluem características dos reservatórios e suas respectivas regras de operação, além de dados pertinentes às demandas individuais para os diversos usos.

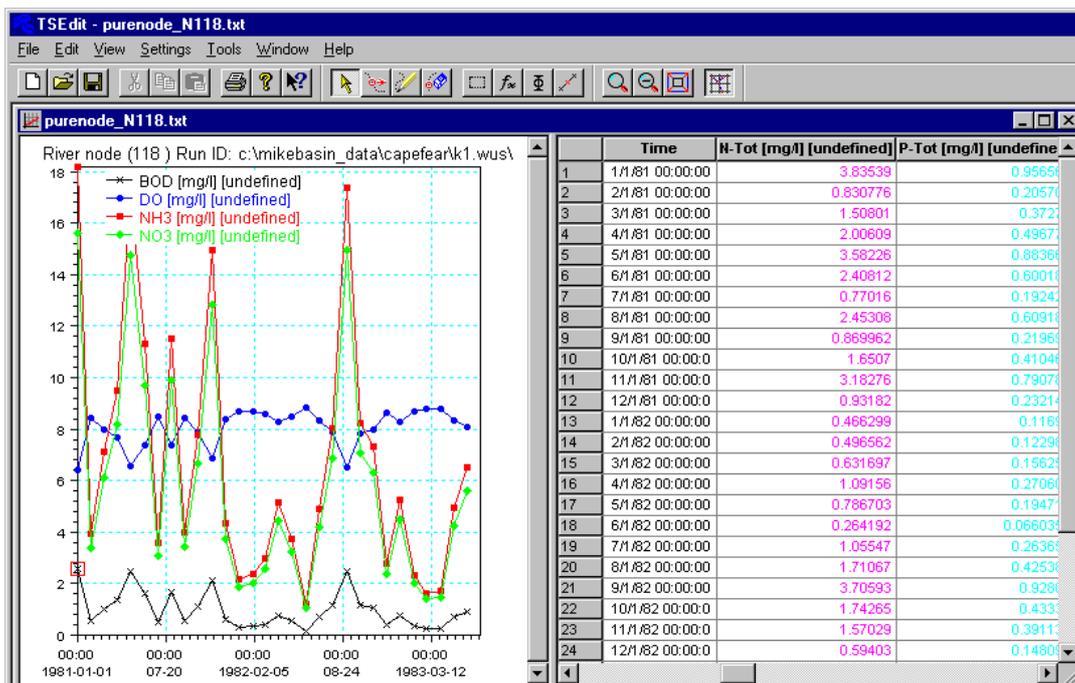


Figura 3: Exemplo do editor de séries históricas TSEdit

Fonte: Guide to Getting Started Tutorial (2000)

Desta forma, o modelo se mostra capaz de prever com relação ao tempo, a satisfação no atendimento dos diversos setores usuários da água, a confiabilidade, ou seja, a probabilidade média de se atender determinada demanda, a potência gerada nas usinas e os níveis de armazenamento dos reservatórios.

Segundo LIMA (2000), que utilizou o MIKE BASIN para analisar os conflitos atuais e futuros decorrentes dos usos múltiplos da água na bacia do rio Atibaia no Estado de São Paulo, este modelo matemático mostrou-se extremamente versátil, de fácil operação, permitindo uma boa representação do sistema em estudo.

A simulação da qualidade da água é feita com um módulo, denominado WQ, que deve ser incluído no MIKE BASIN original. Com este módulo, o modelo pode simular transporte e degradação das principais substâncias que afetam a qualidade de rios e reservatórios: nitrogênio total, fósforo total, DBO, DQO, OD e coliformes fecais.

As equações que descrevem os processos são baseadas em balanço de massa. No que cabe ao transporte, somente é considerado a advecção. DQO, fósforo total e nitrogênio total são considerados separadamente, através da equação de decaimento de primeira ordem. Reações ocorridas no corpo d'água são também incluídas. As equações são resolvidas numericamente pelo método de Runge-Kutta de 5ª ordem.

Os índices de qualidade são inseridos no modelo através de séries temporais para calibração dos parâmetros. Como resposta, o modelo dará uma previsão da qualidade do rio no tempo

considerado e a redução da carga poluente que deverá ser lançada no rio para garantir o seu padrão qualitativo.

RESULTADOS ESPERADOS

A Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande é uma região promissora, porém poucos estudos foram feitos em sua área até o presente momento. Há necessidade de dados mais confiáveis, que serão obtidos no presente estudo. Deseja-se quantificar a demanda real de água para abastecimento urbano e industrial, geração de energia, irrigação e aquicultura e o grau de poluição conferido na água por estes usos.

Espera-se obter, com o auxílio da simulação computacional, para cada cenário estudado:

- A satisfação no atendimento dos diversos setores usuários da água.
- A confiabilidade, ou seja, a probabilidade média de se atender determinada demanda.
- A melhor estratégia de alocação do recurso hídrico.
- Perfil qualitativo que se encontra atualmente o rio Sapucaí-Mirim.
- Impactos causados pelo despejo de efluentes.
- Avaliar a melhora da qualidade da água com a redução da carga poluidora gerada pelas indústrias e tratamento de esgoto dos municípios que ainda não o tem.
- Avaliar a qualidade da água do rio Sapucaí-Mirim no futuro, considerando o crescimento populacional e a industrialização.

O trabalho está em andamento e o término previsto é em meados do segundo semestre deste ano.

CONCLUSÃO E DISCUSSÃO

O trabalho proposto é interessante uma vez que irá quantificar a verdadeira demanda de água para os diversos setores usuários e verificar a carga poluidora despejada no rio e em que local. Estes são alguns dados reais que a região ainda não possui. Cabe ressaltar que nenhum trabalho de campo com análises qualitativas e quantitativas foram realizados nos últimos anos, o que demonstra sua necessidade.

A utilização da simulação computacional é considerada uma das melhores alternativas para o planejamento e gestão dos recursos hídricos e está sendo muito utilizada atualmente. O usuário deve ter bom senso ao usar o simulador e este estudo poderá testar a capacidade do modelo escolhido.

O método computacional aqui descrito não é determinante de políticas operacionais rígidas, visto que não engloba diversas variáveis sociais, econômicas e ambientais. No entanto, pode ser utilizado como uma importante ferramenta auxiliar nos processos decisórios. Espera-se definir iniciativas que autoridades locais poderão tomar para garantir a sustentabilidade do principal rio da

região, de forma que possam ser atendidas as necessidades de água do local em quantidade e qualidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALI, M. D. H.; SHUI, L. T. (2001). Optimal Allocation of Monthly Water Withdrawals in Reservoir Systems. *Water Resources Management*, v. 15, n. 5, p. 323-341, October.
- ANDERSEN, J.; REFSGAARD, J. C.; JENSEN, K. H. (2001). Distributed Hydrological Modelling of the Senegal River Basin – Model Construction and Validation. *Journal of Hydrology*, v. 247, n. 3-4, p. 200-214, 2 July.
- BECKER, L.; YEH, W. W-G. (1974). Optimization of Real Time Operation of a Multiple-Reservoir System. *Water Resources Research*, v. 10, n. 6, p. 1107-1112, December.
- BRANDÃO, C.; RODRIGUES, R. (2000). Hydrological Simulation of the International Catchment of Guadiana River. *Physics and Chemistry of the Earth – Part B*, v. 25, n. 3, p. 329-339, January.
- CAMPBELL, S. G.; HANNA, R. B.; FLUG, M.; SCOTT, J. F. (2001). Modeling Klamath River System Operations for Quantity and Quality. *Journal of Water resources Planning and Management*, v. 127, n. 5, p. 284-294, Sept/Oct.
- DAI, T.; LABADIE, J. W. (2001). River Basin Network Model for Integrated Water Quantity/Quality Management. *Journal of Water resources Planning and Management*, v. 127, n. 5, p. 295-305, Sept/Oct.
- DANDY, G. C.; CONNARTY, M. C.; LOUCKS, D. P. (1997). Comparison of Methods for Yield Assessment of Multiple Reservoir Systems. *Journal of Water resources Planning and Management*, v. 123, n. 6, p. 350-358, Nov./Dec.
- DEININGER, R. A. (1965). Water quality management: the planning of economically optimal pollution control systems. Ph. D thesis, Northwestern University.
- DEMUYNCK, C.; BAUWENS, W.; DE PAWU, N.; DOBBELAERE, I.; POELMAN, E. (1997). Evaluation of Pollution Reduction Scenarios in a River Basin: Application of Long Term Water Quality Simulations. *Water Science and Technology*, v. 35, n. 9, p. 65-75.
- DROLC, A.; KONCAN, J. Z. (1999). Calibration of QUAL2E Model for the Sava River (Slovenia). *Water Science and Technology*, v. 40, n. 10, p. 111-118.
- DYRBAK, L. (2000). Reservoir Operation Optimization. Dept. of Hydrodynamics and Water Resources, Technical University of Denmark, July 2000. <http://www.dhisoftware.com/mikebasin/News/DyrbakReport.htm>
- DYSART, B. C. (1969). The use of dynamic programming in regional water quality planning. In: 4th Annual AAPSE Workshop, 10-1 to 10-23.

- EISELE, M.; KIESE, R.; KRÄMER, A.; LEIBUNDGUT, C. (2001). Application of a Catchment Water Quality Model for Assessment and Prediction of Nitrogen Budgets. *Physics and Chemistry of the Earth – Part B*, v. 26, n. 7, p. 547-551, September.
- EMERGY, D. A.; MEEK, B. I. (1960). The simulation of complex river system. In: *Les Choix Economiques*. Editado por P. Rosenstiel and A. Ghouila-Houri, p.237-255, Dunod, Paris.
- Guide to Getting Started Tutorial. <http://dhi.dk/gishydro/mikebas/Mbasbody.htm> (acessado em 10/05/2002)
- HALL, W. A.; BUTCHER, W. S.; ESOGBUE, A. (1968). Optimization of the Operation of a Multiple-Purpose Reservoir by Dynamic Programming. *Water Resources Research*, v. 4, n. 3, p. 471-477, June.
- HWANG, C. L.; WILLIAMS, J. L.; SHOJALASHKARI, R.; FAN, L. T. (1973). Regional Water Quality Management by the Generalized Reduced Gradient Method. *Water Resources Bulletin*, v. 9, p. 1159-1180.
- JAIRAJ, P. G.; VEDULA, S. (2000). Multireservoir System Optimization Using Fuzzy Mathematical Programming. *Water Resources Management*, v. 14, n. 6, p. 457-472, December.
- JOLMA, A.; DE MARCHI, C.; SMITH, M.; PERERA, B. J. C.; SOMLYÓDY, L. (1997). StreamPlan: a Support System for Water Quality Management on a River Basin Scale. *Environmental Modelling & Software*, v. 12, n. 4, p. 275-284.
- JORGENSEN, B. S. (2002). A River Rehabilitation Study in Malaysia. Master's Thesis. Environment and Resources, Department of Hydrodynamics and Water Resources. Technical University of Denmark.
- LEVY, B. S.; BAECHER, G. B. (1999). NileSim: A Windows-Based Hydrologic Simulator of the Nile River Basin. *Journal of Water resources Planning and Management*, v. 125, n. 2, p. 100-106, March/April.
- LEWIS, D. M.; ELLIOTT, J. A.; LAMBERT, M. F.; REYNOLDS, C. S. (2002). The Simulation of an Australian Reservoir Using a Phytoplankton Community Model: PROTECH. *Ecological Modelling*, v. 150, n. 1-2, p. 107-116, 15 April.
- LIMA, G. (2002). Aplicação de simulação computacional na análise dos conflitos entre os usos múltiplos da água na bacia do Rio Atibaia no Estado de São Paulo. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- MATALAS, N. C. (1967). Mathematical Assessment of Synthetic Hydrology. *Water Resources Research*, v. 3, n. 4, p. 937-945.
- MAUAD, Frederico Fábio. (2000). Planejamento Integrado de Recursos Hidroenergéticos: O Confronto de Usos Múltiplos da Água no Aproveitamento Hidroelétrico de Alqueva em

- Portugal. 182 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.
- NEELAKANTAN, T. R.; PUNDARIKANTHAN, N. V. (1999). Hedging Rule Optimisation for Water Supply Reservoirs System. *Water Resources Management*, v. 13, n. 6, p. 409-426, December.
- NING, S. K.; CHANG, N.-B.; YANG, L.; CHEN, H. W.; HSU, H. Y. (2001). Assessing Pollution Prevention Program by QUAL 2E Simulation Analysis for the Kao-Ping River Basin, Taiwan. *Journal of Environmental Management*, v. 61, n. 1, p. 61-76. Jan.
- ORLOB, G. T., ed. (1984). *Mathematical Modeling of Water Quality: Streams, Lakes, and Reservoirs*. Wiley-Interscience, 518 p.
- ORLOB, G. T. (1992). Water-Quality Modeling for Decision Making. *Journal of Water resources Planning and Management*, v. 118, n. 3, p. 295-307, May/June.
- PEIXOTO, L. S. (2002). A utilização de simulação computacional no gerenciamento de usos múltiplos da água na Bacia do Sapucaí-Grande no Estado de São Paulo. 130p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS: primeiro plano do Estado de São Paulo, DAEE, 1990.
- RAO, Z.; MOORE, I. N.; O'CONNELL, P. E.; JAMIESON, D. G. (2001). An Interactive Management System for Operational Control of Kirazdere Reservoir (Turkey). *Water Resources Management*, v. 15, n. 4, p. 223-234, August.
- REIS, L. F. R.; AKUTSU, J. (2002). Estratégias Operacionais para Sistemas de Reservatórios Via Algoritmo Genético. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 7, n. 3.
- Relatório Final do Projeto Básico: Aproveitamento Hidrelétrico do Rio Sapucaí. (2001). v. 1 e 2. Desenvolvido pela Companhia Paulista de Força e Luz – CPFL e ENGEVIX Engenharia S/C LTDA.
- Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo (2000). Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB
- Relatório Zero do Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande (2000). Diagnóstico da situação atual dos Recursos Hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do Plano da Bacia Hidrográfica do Sapucaí-Mirim/Grande.
- RITSCHARD, R. L.; CRUISE, J. F.; HATCH, L. U. (1999). Spatial and Temporal Analysis of Agricultural Water Requirements in the Gulf Coast of the United States. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 35, n. 6, p. 1585-1596, December.
- SALAS, J. D.; DELLEUR, J. W.; YEVJEVICH, V.; LANE, W. L. (1980). *Applied Modelling of Hydrologic Times Series*. Littleton, Water Resources Publications.

- SASIKUMAR, K.; MUJUMDAR, P. P. (1998). Fuzzy Optimization Model for Water Quality Management of a River System. *Journal of Water resources Planning and Management*, v. 124, n. 2, p. 79-88, March/April.
- SHIM, K. C.; FONTANE, D. G.; LABADIE, J. W. (2002). Spatial Decision Support System for Integrated River Basin Flood Control. *Journal of Water resources Planning and Management*, v. 128, n. 3, p. 190-201, May/June.
- SINHA, A. K.; RAO, B. V.; LALL, U. (1999). Yield Model for Screening Multipurpose Reservoir Systems. *Journal of Water resources Planning and Management*, v. 125, n. 6, p. 325-332, Nov./Dec.
- SPANOU, M.; CHEN, D. (2000). An Object-oriented Tool for the Control of Point-Source Pollution in River Systems. *Environmental Modelling & Software*, v. 15, n. 1, p. 35-54.
- SOMLYÓDY, L. (1997). Use of Optimization Models in River Basin Water Quality Planning. *Water Science and Technology*, v. 36, n.5, p. 209-218.
- TATE, E. L.; FARQUHARSON, F. A. K. (2000). Simulating Reservoir Management Under the Threat of Sedimentation: The Case of Tarbela Dam on the River Indus. *Water Resources Management*, v. 14, n. 3, p. 191-208, June.
- THOMANN, R. V. (1963). Mathematical Model for Dissolved Oxygen. *Journal of Sanitary Engineering Division*, v. 89, n. 5, p. 1-30.
- VOTRUBA, L. et al. (1998). *Developments in Water Science. Analysis of Water Resource Systems*. Nova York. Elsevier Science Publishing Company, Inc.
- YEH, W. W-G. (1985). Reservoir Management and Operations Models: a State-of-the-Art Review. *Water Resources Research*, v. 21, n. 12, p. 1797-1818, December.
- YEN, J. H.; CHEN, C. Y. (2001). Allocation Strategy Analysis of Water Resources in South Taiwan. *Water Resources Management*, v. 15, n. 5, p. 283-297, October.