

ANÁLISE DE CONFLITOS DE USOS MÚLTIPLOS DA ÁGUA AUXILIADA POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL: BACIA DO RIO SAPUCAÍ-MIRIM/ GRANDE NO ESTADO DE SÃO PAULO

Frederico Fábio Mauad¹ & Antonio de Pádua Scott Alves Ferreira²

Resumo - Na mesma proporção que fontes de água potável são reduzidas, a competição por elas tem aumentado, consequência imediata da expansão de áreas urbanas e de novas demandas agro-industriais. Os conflitos gerados por esta competição tendem a comprometer o desenvolvimento sustentável e o progresso de uma forma geral, uma vez que resultam em perda de eficácia para vultuosos investimentos públicos e privados e em prejuízos para os usuários menos estruturados. Considerando os fatos acima, o objeto deste trabalho é o estabelecimento de cenários de alocação das disponibilidades hídricas entre usuários de água da Bacia do Sapucaí-Mirim/Grande, visando determinar a convivência harmoniosa das várias finalidades de uso provenientes do mesmo recurso hídrico. Tal meta poderá ser alcançada através da análise dos indicadores de desempenho – confiabilidade, vulnerabilidade e resiliência – do sistema os quais serão obtidos com o auxílio do modelo de simulação IRAS (*Interactive River Aquifer Simulation*).

Abstract - In the same proportion that fresh water sources are been reduced, competition for it has grown, immediate consequence of urban areas expansion and new agrindustrial demands. Conflicts generated by this competition tend to affect the sustainable development and the progress as well, once this competitiveness situation means efficacy loss to large amounts of public and privy investments, and also injuries to less structured users. Considering above facts, the goal of this paperwork is to establish water availability allocation scenarios between Sapucaí-Mirim/Grande basin's users, aiming to settle a balanced distribution of the several use finalities came from the

¹Prof. Dr. do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Endereço: Avenida Trabalhador Saocarlense, 400, São Carlos-SP, CEP: 13560-970

Fone: (16) 273-9525

e-mail: mauadffm@sc.usp.br

² Mestrando pelo Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Endereço: Avenida Trabalhador Saocarlense, 400, São Carlos, CEP: 13560-970

Fone: (16) 273-9525

e-mail: paduascott@terra.com.br

same water resource. Such goal can be reached through system performance indicators analysis – liability, vulnerability and resilience – which will be estimated through IRAS simulation model aid.

Palavras-chave - usos múltiplos da água, simulação computacional, IRAS, recursos hídricos

ASPECTOS GERAIS

Essencial à vida, a água constitui elemento necessário para quase todas as atividades humanas, sendo, ainda, componente de paisagem e do meio ambiente. Trata-se de bem precioso, de valor inestimável, que deve ser, a qualquer custo, conservado e protegido (SETTI et al, 2001). Em significativas extensões territoriais brasileiras, a escassez de água, por insuficiência de chuvas e/ou pela sua distribuição irregular no tempo, tem sido fator de inibição do desenvolvimento e do bem-estar. O acesso à água e a sua racional utilização continuam a ser objetivos e desafios em várias regiões do país. Mesmo nas regiões mais desenvolvidas, o descontrolado aproveitamento das águas, paralelamente à industrialização, urbanização e agricultura intensiva, está desencadeando crescentes conflitos de interesse. O uso das águas para geração de energia, abastecimento público, diluição de efluentes, irrigação, navegação, manutenção do ambiente sustentável e outros vem enfrentando entraves ponderáveis, seja na operação de estruturas hidráulicas já existentes, seja na implementação de planos setoriais incompatíveis entre si.

A água distribui-se de modo irregular, no tempo e no espaço, em função das condições geográficas, climáticas e meteorológicas. Embora seja um recurso renovável, a água deve ser considerada um recurso finito e de ocorrência aleatória. Pode ser considerada um recurso móvel pois, ao percorrer as fases do ciclo hidrológico, ela escoia pela superfície e pelos aquíferos. Por muitos anos o Brasil conviveu com a impressão de que suas fontes hidrológicas eram inesgotáveis isto porque o ciclo hidrológico propicia a elevação da água das cotas mais baixas para as maiores altitudes. Como trata-se de um ciclo, adquire caráter renovável. COIMBRA et al (1999) explicam que a natureza finita da fonte renovável “recurso hídrico” contém um aspecto crítico, que deve ser analisado sob a ótica do crescimento populacional. São poucos os outros recursos essenciais à vida, que estão restritos por limites de disponibilidade tão definidos quanto os recursos hídricos.

Em situações de abundância a água pode ser tratada como um bem livre, sem valor econômico. Entretanto o crescimento dos mercados competidores e o surgimento de novas economias industrializadas incrementam a demanda para o suprimento de água gerando conflitos entre usos e usuários de água. Neste caso esta fonte passa ser escassa; então a água deve ser gerida como bem econômico ou matéria-prima, pois é recurso essencial tanto para agricultura, produção

energética, abastecimento industrial e doméstico, navegação, aquicultura, recreação, entre outras, devendo-lhe ser atribuído o valor justo. Assim a disponibilidade desta commodity torna-se fator limitante do crescimento e do desenvolvimento econômico.

SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No processo de escolha da alternativa ótima, em planejamento e gestão de recursos hídricos, várias técnicas foram desenvolvidas, sendo as mais conhecidas: a programação linear; a programação dinâmica; e a simulação computacional. O número de variações existentes na literatura é bastante amplo. Uma extensa revisão do estado da arte dos diversos modelos desenvolvidos e aprimorados para solucionar problemas de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos é apresentada por YEH (1985), na qual discute-se os principais modelos de otimização – programação linear, programação não-linear e programação dinâmica – e simulação.

Invariavelmente todas estas técnicas oferecem o potencial de gerar soluções para problemas complexos, respeitando as condições de contorno impostas pela realidade física dos sistemas analisados, ou por condicionantes de ordem legal, econômica, ambiental ou social de cada situação particular(AZEVEDO et al. 1997).

Modelos de Simulação

AZEVEDO et al (1997) indicam que a utilização de computadores para a análise de sistemas de recursos hídricos iniciou-se na década de 1960 através da simulação. Os mesmos autores afirmam que a simulação matemática é a técnica mais flexível e amplamente utilizada no setor.

Mass et al., 1962 *apud* AZEVEDO et al. (1997) explicam a simulação como sendo uma técnica de modelagem utilizada para aproximar o comportamento de um sistema no computador, representando todas as características do sistema em grande parte por descrições algébricas ou matemáticas. Para BRAGA (1987) a simulação é a técnica mais largamente utilizada na prática, e apesar de não ser otimizante, proporciona meios para o tratamento detalhado do comportamento de sistemas.

Na visão de YEH (1985) um modelo de simulação fornece resposta do sistema para certas entradas, que incluem regras de decisão, de modo que permita ao tomador de decisões examinar as conseqüências de vários cenários de um sistema já existente ou de um novo sistema sem na realidade construí-lo.

É comum o emprego de modelos de simulação no planejamento e gerenciamento de recursos hídricos. O HEC-5 (HEC 1979) foi desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Corps (HEC) para controle de cheias e armazenamento de água. O modelo de simulação estocástica foi utilizado na concepção de políticas de operação conjunta realizadas por Kuo & Young (1985) para os

reservatórios de Shimen e Feitui. A Delft Hydraulics (1991) desenvolveu o modelo de simulação RIBSIM para analisar o planejamento de longo prazo entre demanda e suprimento em Taiwan. Um modelo de simulação para redes de fluxo foi formulado por Chow (1995) para o gerenciamento de recursos hídricos no divisor de águas entre Tsenwen e Kaoping ao sul de Taiwan (HSU & CHENG, 2002).

A flexibilidade é a sua maior vantagem, permitindo basicamente que qualquer sistema seja representado matematicamente através de modelos para computador. SANTO *et al* (2001) estimaram vazões de água em diversos compartimentos da bacia do Igarapé Pedra Preta, no Amapá, através de simulações utilizando um modelo hidrológico simplificado, onde foram considerados apenas os principais aspectos físicos.

O departamento de recursos naturais e conservação do estado de Montana desenvolveu um modelo hidrológico para auxiliar na análise dos efeitos provocados pela alocação de água para usos consuntivos e afluência a montante da bacia do rio Missouri. O modelo, programado em linguagem FORTRAN, utilizou o balanço de massas para calcular a vazões mensais, operação de reservatórios, produção de energia hidrelétrica, capacidade de irrigação e usos para abastecimento urbano para um período base de 59 anos. Os resultados foram utilizados por um grupo local de especialistas em planejamento de recursos para avaliar os impactos potenciais referentes aos aspectos quantitativos e distribuição de água, direitos de outorga, qualidade da água, alterações no leito dos rios, vida selvagem, recreação, produção de energia e economia. O modelo mostrou-se uma importante ferramenta e sua simulação formulou as bases hidrológicas para o relatório de impacto ambiental trazido a público (DOLAN & DELUCA, 1993).

A técnica permite também que os problemas sejam analisados com o nível de detalhamento necessário aos objetivos do analista, embora a complexidade para o desenvolvimento e aplicação de tais modelos seja diretamente proporcional ao nível de detalhe que se espera obter. TATE & FARQUHARSON (2001) em seu artigo descreveram a simulação de um sistema composto pelo armazenamento de Tarbela, com a hidrelétrica de Ghazi Barotha a jusante e o plano de construção da barragem de Basha a montante. A utilização do software HYDRO trouxe ao estudo uma abordagem inovadora que permitiu avaliar a relação entre suprimento e demanda na bacia do rio Indus para uma série de cenários que envolveu estruturas em operação e em fase de projeto considerando diferentes horizontes de tempo.

Problemas de alocação de água podem envolver restrições econômicas, ambientais e hidrológicas complicadas e objetivas de gerenciamento conflitantes. As complicações são particularmente causadas pelos diferentes comportamentos de água subterrânea e superficial e a interação entre estes componentes e gerenciamento deles. BELAINEH *et al.* (1999) apresentaram um modelo de simulação/otimização (S/O) que integra regras de decisão linear de reservatório,

simulações detalhadas de fluxos do sistema rio/aquífero, uso consuntivo de água superficial e subterrânea, e distribuição por canais de derivação para usuários de água. Tal modelo testou as hipóteses que melhoram a representação de interações escoamento superficial/aquífero (sw/a) dentro de um modelo S/O de um sistema de distribuição/ reservatório/ aquífero/ rio.

Modelos de simulação analisam os resultados a partir de vários cenários estipulados. É inerentemente um processo de tentativa e erro onde uma solução ótima não é totalmente assegurada. As maiores vantagens atribuídas aos modelos de simulação correspondem à facilidade de operação e requisitos mínimos de tempo e armazenagem de dados em computador. Em contrapartida, modelos de otimização minimizam ou maximizam uma dada função objetivo sujeitas à imposição de um conjunto de restrições (HSU & CHENG, 2002).

Atualmente, os avanços na tecnologia da computação, aliados ao aumento de complexidade nos problemas de gerenciamento de recursos hídricos, têm estimulado a prática maior de modelos matemáticos como ferramentas para auxiliar as tomadas de decisão. Aparentemente, o que é necessário é uma reunião integrada de modelos, dados e rotinas de interpretação, que processa eficientemente dados de entrada e expõe os resultados em formato fácil de ser interpretado (BRAGA et al., 1998).

Segundo LABADIE *et al* (1992) encontra-se disponível uma ampla variedade de modelos matemáticos capazes de estimar o intercâmbio entre objetivos conflitantes. Com o propósito de fornecer orientação, na escolha do melhor método, para lidar com os desafios inerentes à operação de sistemas de múltiplos reservatórios, com características não lineares, dinâmica, estocástica e de larga escala, os autores realizaram trabalhos no sistema de reservatórios do rio Han, na Coreia, enfocando quatro objetivos principais de projeto: abastecimento de água, produção anual de energia hidrelétrica, geração de energia firme e minimização do risco de violação dos requisitos mínimos para suprimento de água.

Para planejamento de bacia hidrográfica, existem modelos atuais, principalmente os hidrológicos, que estão disponíveis. Os modelos hidrológicos podem simular os efeitos de sistemas de processos hidrológicos tais como infiltração, escoamento, fluxo de água subterrânea, interceptação, evapotranspiração e armazenamento, e eles computam balanços de massa completos (TUCCI, 1987).

BRANDÃO & RODRIGUES (2000) utilizaram o IRAS (Interactive River-Aquifer Simulation) para caracterizar a vulnerabilidade dos recursos hídricos na fronteira entre Portugal e Espanha, a jusante do rio Guadiana. Caracterizou-se três objetivos principais: fornecer parâmetros para tornar os futuros usos de água compatíveis com a sustentabilidade da vazão ecológica no rio Guadiana; testar o desempenho de armazenagem do reservatório de Alqueva para seis cenários

futuros e auxiliar na verificação das ações negociadas entre Portugal e Espanha para o convênio de uso conjunto e sustentável da água.

Outra aplicação do IRAS se deve a MAUAD (2000) que apresentou os resultados da simulação computacional para o aproveitamento de fins múltiplos de Alqueva, Portugal. O sistema simulado inclui os rios Guadiana e Ardila, a barragem de Alqueva e o açude de Pedrogão. Utilizou-se o modelo para a determinação da resiliência, confiabilidade e vulnerabilidade do sistema considerando os diversos usos da água.

PEIXOTO (2002) em seu estudo realizado na bacia hidrográfica do rio Sapucaí-Mirim/Grande, também utilizou-se dos recursos do Interactive River-Aquifer Simulation (IRAS) afim de analisar os conflitos gerados no aproveitamento de usos múltiplos de água na bacia em questão, levando em consideração o cenário atual e o futuro associado à implementação de três pequenas centrais hidrelétricas (PCHs).

Modelos de Simulação/Otimização

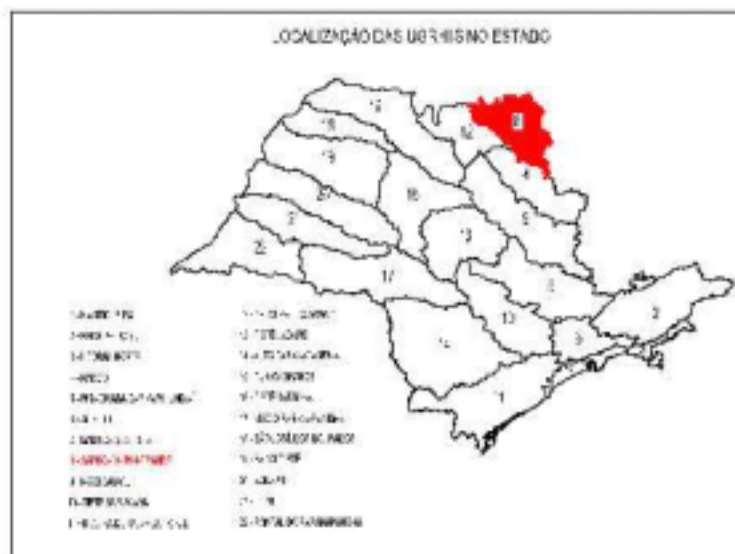
Problemas de alocação de água podem envolver restrições econômicas, ambientais e hidrológicas complicadas e objetivas de gerenciamento conflitantes. As complicações são particularmente causadas pelos diferentes comportamentos de água subterrânea e superficial e a interação entre estes componentes e gerenciamento deles. BELAINEH et al. (1999) apresentaram um modelo de simulação/otimização (S/O) que integra regras de decisão linear de reservatório, simulações detalhadas de fluxos do sistema rio/aquífero, uso consuntivo de água superficial e subterrânea, e distribuição por canais de derivação para usuários de água. Tal modelo testou as hipóteses que melhoram a representação de interações escoamento superficial/aquífero (sw/a) dentro de um modelo S/O de um sistema de distribuição/ reservatório/ aquífero/ rio.

LIMA (2002) analisou os conflitos gerados pelos diversos usos de água na bacia hidrográfica do Rio Piracicaba. O estudo focou a racionalização do volume de água usado nas atividades captadoras. Para tanto Lima utilizou o modelo Mike Basin 2000 no qual realizou simulações computacionais para diversos cenários com o objetivo de integrar e otimizar os múltiplos usos de água na bacia citada. A otimização foi realizada através da integração do modelo com a função Solver do Excel. O Solver do foi usado para achar o “ótimo”, possibilitando: análise de sensibilidade, otimização, avaliação de múltiplos cenários e comparação gráfica.

CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

A Bacia Hidrográfica do Sapucaí-Mirim/Grande foi definida como a Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI 08) pela Lei n. 9.034/94, de 27/12/94. A UGRHI

Sapucaí-Mirim/Grande possui como bacias limítrofes as UGRHI's do Pardo e Baixo Pardo/Grande (FIGURA 1).



Fonte: Relatório Zero (IPT), 1999.

Figura 1 – Localização das UGRHI'S no Estado de São Paulo

A Bacia é considerada interestadual, pois limita-se ao norte com o Estado de Minas Gerais, pelo rio Grande, o qual recebe contribuição de importantes afluentes, tais como: ribeirões Rifaina, da Ponte Alta e Buriti. As cabeceiras do rio Sapucaí-Mirim, assim como alguns afluentes do rio Canoas também nascem no Estado de Minas Gerais. Portanto, considerando todas as bacias que contribuem para esta UGRHI, direta (rios Sapucaí-Mirim e Canoas) ou indiretamente (afluentes do rio Grande) soma-se uma área de 5.787,62 km². Esta informação é importante pois se houver necessidade de caracterizar os impactos no rio Grande, terão que ser consideradas as alterações e intervenções realizadas nas bacias/sub-bacias do Estado de Minas Gerais.

A Bacia do Sapucaí-Mirim/Grande possui área total de 9.166,86 km². Deste total, 9.016,26 km² correspondem às terras emersas, enquanto o restante (150,60 km²) às áreas cobertas pelas águas dos reservatórios do rio Grande.

Vinte e quatro municípios integram a UGRHI Sapucaí-Mirim/Grande: Aramina, Batatais, Buritizal, Cristais Paulista, Franca, Guaíra, Guará, Igarapava, Ipuã, Itirapuã, Ituverava, Jeriquara, Miguelópolis, Nuporanga, Patrocínio Paulista, Pedregulho, Restinga, Ribeirão Corrente, Rifaina, Santo Antônio da Alegria, São Joaquim da Barra e São José da Bela Vista (com sede na bacia) e os municípios de Altinópolis e Orlândia, com suas respectivas sedes na UGRHI 04 – Bacia do Pardo/Grande (FIGURA 2).



Fonte: Relatório Zero (IPT), 1999.

Figura 2 – Municípios paulistas com área na UGRHI Sapucaí-Mirim/Grande.

Nas tabelas abaixo estão resumidas algumas características da UGRHI Sapucaí-Mirim/Grande:

Tabela 1 – População

População	2000	2010
Urbana	579.958	703.543
Rural	40.575	32.093
Total	620.533	735.636

Fonte: Adaptado de Relatório Zero (IPT)

TABELA 2 – Demandas Hídricas (m³/s)

Usos	Demanda	
	1990	2010
Urbano	1,8	1,8
Industrial	0,3	0,3
Irrigação	8,8	17,4
Total	10,9	19,5

Fonte: Peixoto, 2002

Tabela 3 – Demanda/Disponibilidade Hídrica Superficial

Demanda total (m ³ /s)		Disponibilidade (m ³ /s)		(Dem.total/Q _{ref})x100 (%)	
1990	2010	Q _{7,10}	Q _{ref}	1990	2010
10,9	19,5	28,0	35,0	31,1	55,7

Fonte: Peixoto, 2002

Tabela 4 – Disponibilidade Hídrica Subterrânea (m³/h)

Aquífero	Vazão Potencial
Serra Geral	5 a 50

Fonte: PERH-1994/95

Duas características marcantes explicam a escolha desta bacia como objeto de estudo. Primeira: a região destaca-se como grande produtora agrícola do norte de São Paulo possuindo a maior demanda por irrigação de todo o estado. A segunda característica corresponde aos aproveitamentos hidrelétricos. Estão instaladas na região as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's) de Dourados (10,75 MW) e São Joaquim (8,00 MW), localizadas nos municípios de São José da Bela Vista e São Joaquim da Barra, respectivamente. A Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), empresa concessionária que administra as usinas na região, possui em projeto básico a instalação de três novos aproveitamentos: PCH Palmeiras (13,60 MW), PCH Anhangüera (18,50 MW) e PCH Retiro (14,40 MW) localizados entre os municípios de São Joaquim da Barra e Guará.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

O estudo em questão baseia-se em: a) dados secundários, obtidos a partir de levantamentos bibliográficos, documentais e revisão da literatura, e b) dados primários, obtidos por meio de pesquisa quantitativa, realizando medições de vazão em postos fluviométricos preestabelecidos, e também dados levantados por meio de questionário e entrevistas direcionados aos maiores irrigantes cadastrados junto ao Comitê de Bacia Hidrográfica (CBH), Coordenadoria de Assistência Técnica Integral (CATI), secretarias municipais de agricultura, sindicatos rurais e outros órgãos correlatos, como no caso da quantificação de água destinada à irrigação.

Os resultados do dados coletados – atuais – serão comparados com as séries históricas, e seus valores incorporados na geração de série sintética.

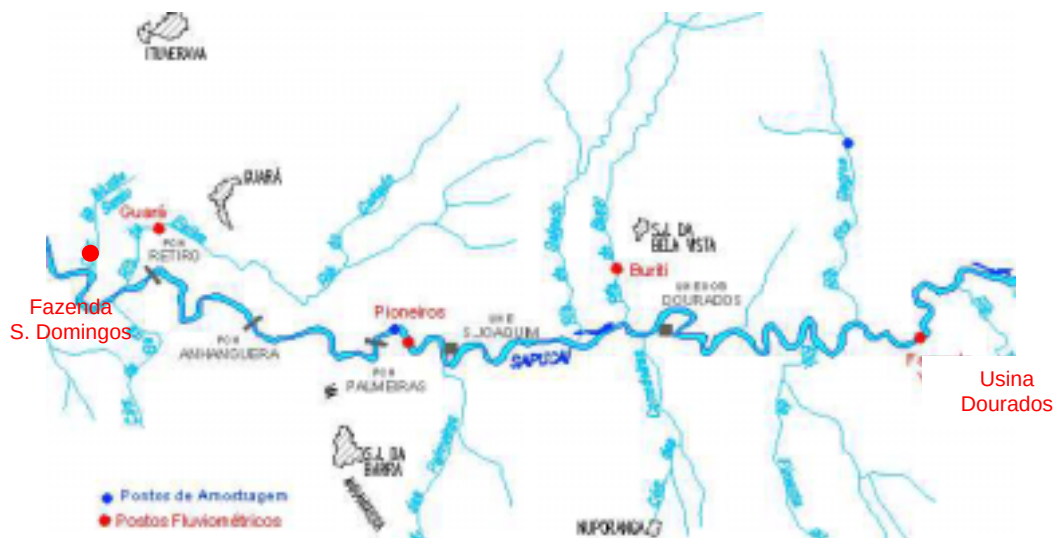
Os dados obtidos compõem as bases dos itens subseqüentes:

- Dados de afluência e consumos;
- Estudos prévios do mercado: previsão de demanda atual e de demanda futura;
- Estudos da bacia hidrográfica em estudo: mapeamento da bacia, regimes fluviométrico e pluviométrico;
- Estudos das Usinas Hidrelétricas: Cotas mínimas e máximas dos reservatórios, volume útil, área inundada e potência instalada;
- Estudos da área irrigada: período de irrigação, métodos de irrigação predominante, tipos de cultura da região, etc.

Métodos

A escolha dos postos fluviométricos baseou-se em dois quesitos: localização e consistência

dos dados. O posto Fazenda São Domingos encontra-se próximo à desembocadura do Sapucaí-mirim no Rio Grande, o posto Usina Dourados a montante dos aproveitamentos de Dourados e São Joaquim, já existentes, e o Posto Pioneiros situa-se a montante das PCH's Palmeiras, Anhangüera e Retiro, a serem implantadas, como mostra a figura 5. Dados obtidos no Sistema de Informações para Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo e Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE - mostram séries observadas de 40, 30 e 26 anos para os postos Fazenda São Domingos, Usina Dourados e Pioneiros respectivamente, todos com excelente correlação entre os dados.



Fonte: Adaptado do Relatório Final do Projeto Básico (2001)

Figura 3: Localização dos postos fluviométricos e pontos de amostragem.

Foi instalado no posto Usina Dourados um linígrafo de bóia e no posto Pioneiros uma régua linimétrica (ver figuras abaixo). As medições de vazão e batimetria estão sendo feitas durante o período de 1 ano.



Fonte: Trabalho de campo

Figura 4 – Margens da seção transversal do posto Usina Dourados



Fonte: Trabalho de campo

Figura 5 – Régua limimétrica instalada em Usina Dourados

As séries sintéticas de vazões, usadas como dado de entrada do modelo, serão geradas através da utilização do Modelo Multivariado Autoregressivo de 1ª ordem. Para geração do Modelo Multivariado Autoregressivo de ordem 1 serão utilizados os postos fluviométricos citados anteriormente.

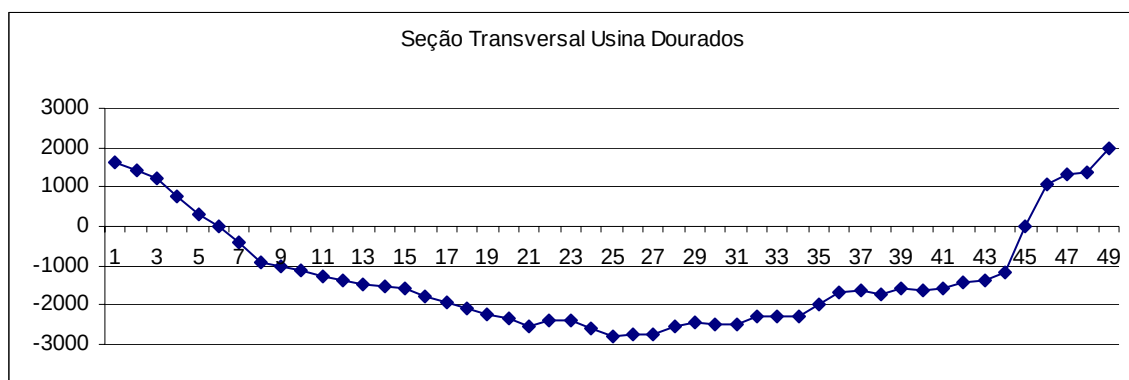


Figura 6 – Seção transversal do posto Usina Dourados

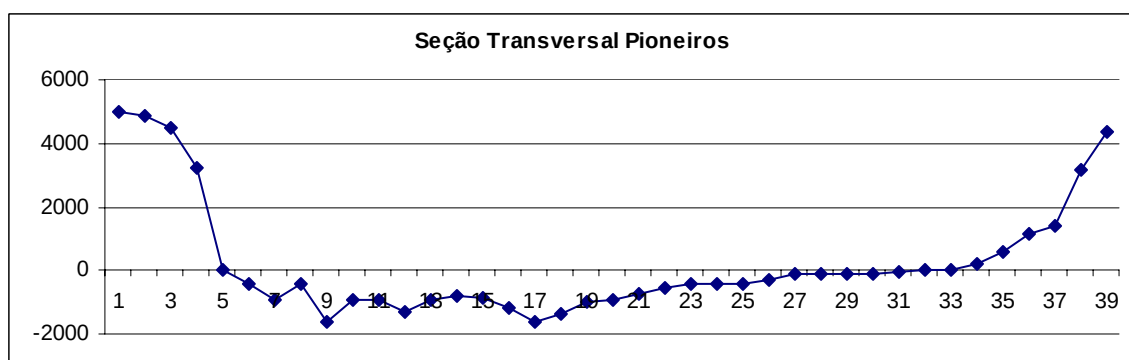


Figura 7 – Seção transversal do posto Pioneiros

Utilizando-se os dados reais do aproveitamento da região em estudo, é possível gerar vários cenários de alocação das disponibilidades hídricas através da simulação computacional. No modelo utilizado realizar-se-á o balanço hídrico e a determinação dos parâmetros de resiliência, confiabilidade e vulnerabilidade do sistema a ser estudado visando determinar o uso harmonioso da água.

O modelo de simulação a ser utilizado neste estudo é o IRAS – *Interactive River Aquifer Simulation*. O IRAS foi desenvolvido pela *Resources Planning Associates, INC.* e pela *University of Cornell, Ithaca, NY*, em 1994³, para auxiliar na avaliação de projetos alternativos e políticas operacionais de sistemas de recursos hídricos; a função principal do IRAS neste estudo é sua utilização como ferramenta para auxílio no planejamento e gestão dos recursos hídricos.

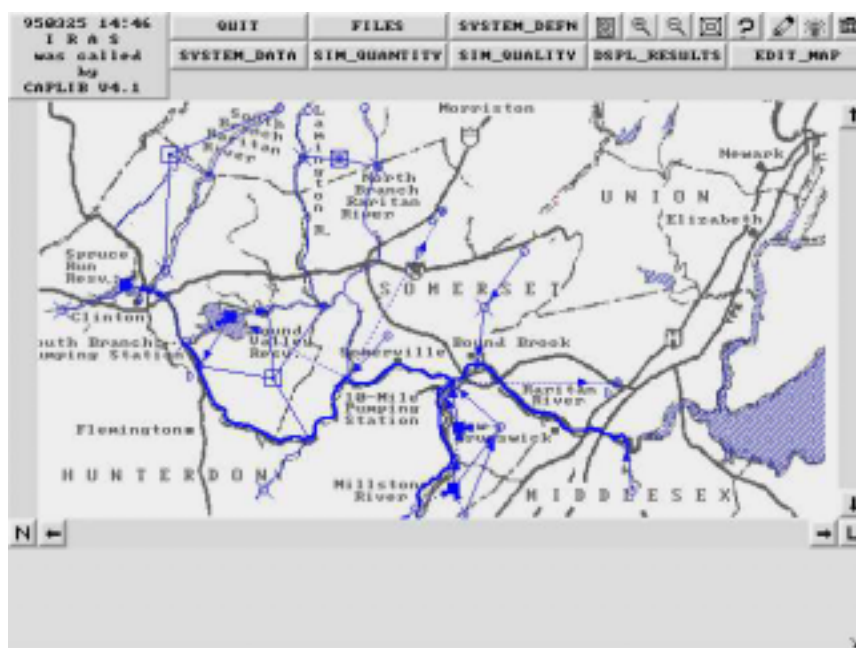
O programa de simulação computacional IRAS é um modelo relativamente simples. Sua simplicidade reduz a entrada de dados necessários para simulação assim como o que pode ser obtido dos resultados. É um modelo capaz de simular fluxos, volumes de armazenamento, concentrações de qualidade da água, geração de energia, e a energia produzida e consumida (estações de bombeamento) em vários locais sobre tempo e espaço. Embora o IRAS permita ao usuário trabalhar com qualidade, aquífero, lagos, etc., os aspectos relacionados à esses componentes não serão objetivo deste estudo proposto, este estudo visa a análise quantitativa dos recursos hídricos.

As potencialidades do modelo tornam-no atraente para as análises hidrológicas extensas de sistemas de abastecimento de água para o consumo humano, para irrigação, para produção de energia ou sistemas de usos múltiplos.

Os sistemas para serem simulados usando o IRAS devem ser representados por uma rede de nós e ligações conectados. Em cada nó ou ligação pode-se representar um componente do sistema. Os nós da rede podem representar locais de tomada de água, reservatórios, pontos de consumo de água, confluências, etc. Enquanto que as ligações representam a rede fluvial, canais ou condutas de desvio de água, etc.

A entrada de dados, a operação do modelo e a leitura e análise dos resultados é feita através de uma interface gráfica (ver figura 8). Essa interface usuário-gráfico do programa facilita a interação do usuário em entrar, editar e apresentar graficamente os dados, na operação do modelo, e na produção e visualização de vários esquemas em seqüência de tempo e análises estatísticas dos resultados da simulação.

³ Em 1998 pesquisadores da *Cornell University* desenvolveram nova versão do modelo IRAS com interface gráfica compatível com o sistema *Windows*, no entanto o programa ainda não encontra-se disponível para o público.



Fonte: IRAS – Interactive River-Aquifer Simulation (1994).

Figura 8 – Exibição de uma tela do IRAS contendo uma bacia hidrográfica e sua respectiva representação gráfica através de arcos e nós.

O modelo IRAS é de uso amplo em relação à definição de um amplo conjunto de funções e de valores, tais como as regras de operação de cada reservatório, os objetivos de volume armazenado e de descargas mínimas de cada reservatório, as funções de desvio de cada tomada de água, assim como os objetivos de fornecimento e as regras de prioridades de utilização das fontes de fornecimento de cada ponto de consumo.

IRAS está baseado em balanços de massa de quantidades de água e de cargas poluentes, considerando-se fenômenos como a evaporação, a infiltração, o crescimento ou decrescimento de cargas poluentes por transformações químicas e/ou biológicas.

Os elementos necessários para os estudos mais freqüentes, incluem valores de escoamento para as estações hidrométricas e valores de escoamento superficial ao longo das encostas da rede fluvial. Para cada reservatório é necessário definir a sua capacidade, a curva da área inundada e a curva de volume armazenado em função da cota do nível de água, a regra de operação do reservatório em função do volume armazenado, a curva de infiltração em função do volume armazenado e a taxa de evaporação em função da altura do ano. Para cada ponto de consumo, é necessário indicar os volumes de água a fornecer em cada intervalo de simulação, bem como as fontes de fornecimento de água e uma regra de prioridade de utilização dessas fontes. Para cada tomada de água, define-se uma função que estabeleça o escoamento a desviar em função do escoamento disponível. Para cada ligação da rede, pode ser necessário definir o comprimento do trecho do sistema que a ligação representa, a capacidade de escoamento do trecho em estudo,

funções de perda de água por evaporação e infiltração e parâmetros do modelo de propagação de ondas de cheia.

Para simular a produção de energia por geração ou consumo de energia para bombeamento, necessita-se fornecer a capacidade das turbinas ou das bombas, e as constantes de conversão para o cálculo da energia produzida ou utilizada.

O programa estima também uma função de probabilidade que indica a probabilidade de ocorrência de seqüências de falhas de fornecimento com várias durações, e uma função probabilidade de vulnerabilidade que indica a probabilidade de ocorrência de falhas de fornecimento de várias magnitudes. Tais funções são denominadas indicadores de desempenho:

- **Confiabilidade:** capacidade de um sistema desempenhar suas funções, sem falhas ou avarias, sob certas condições e dentro de um período determinado. No IRAS é calculada a partir do número de vezes simuladas que os objetivos foram satisfeitos.

$$\text{Confiabilidade} = 1 - \frac{n^{\circ} \text{ de valores simulados na zona insatisfatória}}{n^{\circ} \text{ de períodos simulados}}$$

- **Resiliência:** mede a capacidade de um sistema de recuperar-se rapidamente de uma falha e retornar à normalidade, dentro de um intervalo específico de tempo.

$$\text{Resiliência} = \frac{n^{\circ} \text{ de vezes que um valor na zona insatisfatória foi seguido de um valor na zona satisfatória}}{n^{\circ} \text{ de valores simulados na zona insatisfatória}}$$

- **Vulnerabilidade:** representa a magnitude de uma falha para um dado objetivo.

Sendo assim, o Modelo de Simulação Computacional IRAS apresenta possibilidade de ser utilizado como ferramenta com objetivo principal de se estudar quantitativamente os usos múltiplos e conflitantes (geração de energia elétrica, irrigação e abastecimento urbano e industrial) de modo a definir a resiliência, a confiabilidade e a vulnerabilidade do sistema, para definição da melhor regra de operação dos reservatórios envolvidos. O modelo permite ainda definir os níveis de garantia de abastecimento e satisfação do volume requerido para os diversos usos estudados.

RESULTADOS

A pesquisa compõe-se de duas fases: simulação e análise da situação atual, sem a instalação das três usinas hidrelétricas e, simulação e análise considerando a instalação das três hidrelétricas: Palmeiras, Anhangüera e Retiro.

Deverá ser utilizado o Programa de Simulação Computacional *IRAS (Interactive River-Aquifer Simulation)* para obtenção e apresentação de resultados. O modelo calcula os vários índices e funções com que os objetivos da operação do sistema foram satisfeitos. Os resultados do IRAS incluem os valores que cada variável simulada assume ao longo da simulação e podem ser visualizados através de uma listagem de valores ou através de gráficos. Definidos os níveis de fornecimento de água, volume armazenado, vazão escoada, energia produzida, espera-se obter os parâmetros de desempenho do sistema estudado caracterizados pelos índices de confiabilidade, vulnerabilidade e resiliência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO, L.G.T, PORTO, R.L. & FILHO, K. ZAHED. (1997). *Modelos de Simulação e de Rede de Fluxo*, Capítulo 4 in *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*, ABRH-EUFRGS.
- AZEVEDO, Luiz G.T.; PORTO, Rubem L.L.; PORTO, Mônica. (1998). Sistema de apoio à decisão para o gerenciamento integrado de quantidade e qualidade da água: metodologia e estudo de caso. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 3, n. 1, p. 21-51. Jan/Mar.
- BECKER, Leonard; YEH, W. (1974). Optimization of real time operation of a multiple-reservoir system. *Water Resources Research*, v. 10, n. 6, p. 1107-1112. Dez.
- BELAINEH, Getachew ; PERALTA, Richard C.; HUGHES, Trevor C. (1999). Simulation/Optimization Modeling for Water Resources Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 125, n. 3, p. 154-161. Maio/Jun.
- BRAGA, B.P.F. (1987). Técnicas de otimização e simulação aplicadas em sistemas de recursos hídricos. In: *Modelos de Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 1, Nobel/ ABRH.
- BRAGA,B.; BARBOSA P. S.; NAKAYAMA, P.T. (1988). Sistemas de suporte à decisão em Recursos Hídricos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.3, n.3, p. 73-95. Jul/Set.
- BRANDÃO, C.; RODRIGUES, R. (2000). Hydrological simulation of the international catchment of Guadiana river. *Phys. Chem. Earth*, v. 25, n. 3, p. 329-339. Mar.

- CÂMARA, A.S.; et al. (1986). Water resources management of a watershed in Algarve. In: *Systems analysis applied to water and related land resources: proceedings of the IFAC conference*. IFAC proceedings series, Lisbon, 1986. n. 4.
- COIMBRA, Roberto; ROCHA, Ciro Loureiro; BEEKMAN, Gertjan Berndt. (1999). *Recursos Hídricos: conceitos, desafios e capacitação*. Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília.
- COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO SAPUCAÍ-MIRIM/GRANDE. Relatório Zero: Diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do plano da bacia hidrográfica do Sapucaí-Mirim/Grande. (CD-ROM). 1999.
- CORREIA, F.N.; SANTOS, M.A.; RODRIGUES, R.R. (1986). Risk, resilience and vulnerability in regional drought studies. In: *Systems analysis applied to water and related land resources: proceedings of the IFAC conference*. IFAC proceedings series, Lisbon, 1986. n. 4.
- DOLAN, Larry S.; DELUCA, Denise K. (1993). Use of a hydrologic model in a basin-wide water allocation proceeding. *Water Resources Bulletin*, v. 29, n. 1, p. 107-117. Fev.
- HSU, Nien-Sheng; CHENG, Ker-Wei. (2002). Network flow optimization for basin-scale water supply planning. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 128, n. 2, p. 102-112. Mar/Abr.
- IRAS – Interactive River-Aquifer Simulation (1994). Cornell University and Resources Planning Associates, Incorporated. Version: 1.00.
- KADEN, S. (1986). Multi-Criteria analysis and simulation for long term water management in open-pit lignite mining areas. In: *Systems analysis applied to water and related land resources: proceedings of the IFAC conference*. IFAC proceedings series, Lisbon, 1986. n. 4.
- LABADIE, John W.; FONTANE, Darrel G.; KO, Seok-Ku. (1992). Multiobjective optimization of reservoir systems operation. *Water Resources Bulletin*, v. 28, n. 1, p. 111-128. Fev.
- LIMA, Guilherme de (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*. 129p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Universidade de São Paulo – USP.
- MAUAD, Frederico Fábio. (2000). *Planejamento Integrado de Recursos Hidroenergéticos: O Confronto de Usos Múltiplos da Água no Aproveitamento Hidroelétrico de Alqueva em Portugal*. 182p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.
- NEELAKANTAN, T.R.; PUNDARIKANTHAN, N.V. (2001). Hedging rule optimization for water supply reservoir systems. *Water Resources Management*, v. 37, n. 7, p. 409-426. Jul.

- PEIXOTO, Luciana Silva. (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 – EESC, Universidade de São Paulo – USP.
- SANTO, Clovis M. do Espírito e et al. (2001). Simulação hidrológica de pequena bacia na Amazônia tropical. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 6, n. 2, p. 107-115. Abr/Jun.
- SETTI, Arnaldo Augusto Lima e et al. (2001). *Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Agência Nacional de Águas. Brasília.
- TATE, Emma L.; FARQUHARSON, Frank A.K. (2001). Simulating reservoir management under the threat of sedimentation: the case of Tarbela dam on the river Indus. *Water Resources Management*, v. 15, n. 1, p. 191-208. Fev.
- THIESSEN, Ernest M.; LOUCKS, Daniel P. (1992). Computer assisted negotiation of multiobjective water resources conflicts. *Water Resources Bulletin*, v. 28, n. 1, p. 163-178. Fev.
- TUCCI, Carlos E.M. (1987). Modelos Determinísticos. In: *Modelos de Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 1, Nobel/ ABRH.
- YEH, William W-G. (1985). Reservoir management and operations models: a state of the art review. *Water Resources Research*, v. 21, n. 12, p. 1797-1818. Dez.
- YEH, W.; BECKER, Leonard. (1982). Multiobjective Analysis of Multireservoir Operations. *Water Resources Research*, v. 18, n. 5, p. 1326-1336. Out.