USP

Campus de São Carlos

AVALIAÇÃO DE CONFLITOS DE USOS MÚLTIPLOS DE ÁGUA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JAGUARI – SP, ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Carlos Roberto Ruchiga Corrêa Filho

Orientador: Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Carlos Roberto Ruchiga Corrêa Filho

AVALIAÇÃO DE CONFLITOS DE USOS MÚLTIPLOS DE ÁGUA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JAGUARI – SP, ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Hidráulica e Saneamento.

DEDALUS - Acervo - EESC
31100050047

Orientador: Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad

EESC - USP
Biblioteca
CAMPUS DE S. CARLOS

São Carlos

2004

Class. TESE EESC
Cutt. J625
Tombo T279/04
Sysno 1409037

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

C824a

Corrêa Filho, Carlos Roberto Ruchiga
Avaliação de conflitos de usos múltiplos de água na bacia hidrográfica do Rio Jaguari-SP, através de simulação computacional / Carlos Roberto Ruchiga Corrêa Filho. -- São Carlos, 2004.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2004.
Área: Hidráulica e Saneamento.
Orientador: Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad.

1. Rio Jaguari. 2. Modelo de simulação. 3. Análise de sistemas de recursos hídricos. 4. Usos múltiplos. 5. Bacia hidrográfica I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **CARLOS ROBERTO RUCHIGA CORRÊA FILHO**

Dissertação defendida e julgada em 17-09-2004 perante a Comissão Julgadora:

Aprovado

Prof. Dr. **FREDERICO FÁBIO MAUAD (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **EDUARDO MÁRIO MENDIONDO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **WILSON FADLO CURI**
(Universidade Federal de Campina Grande/UFCG)

Profa. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia (Hidráulica e Saneamento) e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

A Carlos e Elaine: pais, amigos
e grandes incentivadores.
Com amor.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, e Fundação para o Incremento da Indústria e do Aperfeiçoamento Industrial, FIPAI, pelas bolsas de estudo concedidas.

Ao Professor Frederico Fábio Mauad, pela orientação e amizade.

Aos professores Fazal Hussain Chaudhry, Rodrigo de Melo Porto, Edson Wendland e Eduardo Mario Mendiondo pelas contribuições nas etapas de qualificação.

À colega Liliane Lazzari Albertin, pelo companheirismo na execução dos trabalhos.

À Sociedade de Estudos e Pesquisas em Ecossistemas Aquáticos – SEPEA, pelo apoio e incentivo. Agradeço especialmente ao presidente Murilo Pires Fiorini pela atenção e amizade.

À CESP – Companhia Energética de São Paulo, em particular aos Srs. Sílvio Roberto Areco Gomes, diretor de geração oeste e Sérgio Zuculin, gerente do departamento de planejamento da operação pelas informações referentes à Usina Hidrelétrica do Jaguari.

Ao CBH-PS – Comitê de Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul, em especial ao Sr. Romildo Eugênio de Souza, secretário executivo, pelas informações repassadas.

Ao DAEE – Departamento de Água e Energia Elétrica de São Paulo, em especial a Dra. Leila Gomes, pelo fornecimento do cadastro de usuários da bacia do Paraíba do Sul.

A Elaine Anarosa Nunes Corrêa e Elisa Nunes Ruchiga Corrêa pela revisão do texto e pelo amor de família nos momentos mais difíceis.

Muito Obrigado.

"Ai, águas barrentas que correm,
Quando as vejo passar e passar
Refletem-me lágrimas que escorrem".

Marcos Freitas

RESUMO

CORRÊA FILHO, C.R.R. *Avaliação de Conflitos de Usos Múltiplos de Água na Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari – SP, Através de Simulação Computacional.* Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

No gerenciamento de recursos hídricos, a bacia hidrográfica é considerada a unidade natural de gestão. Suas características físicas definem um espaço onde a água converge para uma saída comum. O desenvolvimento integrado de uma bacia, bem como os possíveis conflitos ocasionados por demandas concorrentes do mesmo recurso, devem ser administrados respeitando esse conceito de unidade. No caso específico da Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari, existe uma crescente preocupação relacionada aos usos múltiplos da água superficial. O rio Jaguari, importante afluente do Paraíba do Sul no estado de São Paulo, tem suas águas represadas para geração de energia elétrica e regularização de vazões. Nos últimos anos, tem-se constatado um crescente rebaixamento dos níveis operacionais da represa do Jaguari. Segundo estudos da sociedade civil organizada local, a tendência é de esgotamento do reservatório em poucos anos. Este trabalho aborda a questão do rebaixamento dos níveis de Jaguari através da aplicação do software DHI Mike Basin 2000. Trata-se de um simulador genérico para sistemas de recursos hídricos, de ampla aplicação. A bacia do Jaguari é representada em um modelo matemático e são simulados quatro cenários distintos de usos de água na bacia. Verifica-se que o problema é real e requer uma intervenção multi-institucional para ser solucionado.

Palavras-chave: Rio Jaguari, Modelo de Simulação, Análise de Sistemas de Recursos Hídricos, Usos Múltiplos, Bacia Hidrográfica.

ABSTRACT

CORRÊA FILHO, C.R.R. *Evaluation of Multiple Uses of Water Conflicts in Jaguari River Basin – SP, By Computational Simulation.* M.Sc. Dissertation - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

In the management of water resources, basin is naturally considered the administration unit. Its physical properties define a land space where water flows on the way to a common outlet. The integrated development of a basin, as well as potential conflicts resulted by divergent users should be managed under this unit concept. On Jaguari River basin, in state of São Paulo, Brazil, there is an emergent concern related to the multiplicity of water uses. Jaguari River, an important branch of Paraíba do Sul River in State of São Paulo is dammed for the generation of electricity and stream flow regulation. In last years, it has been observed an increasing reduction in Jaguari reservoir operational levels. According to local organizations' studies, the reservoir trends to collapse in few years. The present dissertation holds a discussion about the reduction of water level trend in Jaguari reservoir, through the application of DHI MIKE BASIN 2000 software. It is a generic, very useful simulator for water resources systems. The Jaguari basin is represented by a mathematic model, simulated for four different water use scenarios. It is shown that the problem is real, and requires a multi-institutional intervention to be solved.

Keywords: Jaguari River, Simulation Model, Water Resources System Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Definição de duração e déficit de volume no período de falha do sistema (adaptado de Kjeldsen & Rosbjerg, 2001). 25
Figura 02: Localização da Bacia do Paraíba do Sul em São Paulo (ANA, 2004; CEIVAP, 2003)....28
Figura 03: Bacia Hidrográfica do Jaguari (adaptado de CPTI, 2000)....29
Figura 04: Pluviosidade média mensal (fonte SIGRH, 2004 - Posto Barragem Jaguari)....31
Figura 05: Mapa Topológico do rio Jaguari (adaptado de CPTI, 2000) 32
Figura 06: Mapa Topológico do rio Parateí (adaptado de CPTI, 2000)....33
Figura 07: Mapa Topológico do rio do Peixe (adaptado de CPTI, 2000) 33
Figura 08: Barragem da Represa do Jaguari (foto do autor)....34
Figura 09: Imagem de Satélite "Landsat" da Represa do Jaguari (fonte: LANDSAT TM5, 1999)....35
Figura 10: Sistema de Represas da Bacia do Rio Paraíba do Sul (fonte: CPTI, 2000)....35
Figura 11: – Gráfico "Volume útil (%) x Tempo" (fonte: CESP, 2003)....37
Figura 12: Represa do Jaguari – Viaduto Rodovia Dom Pedro I (foto do autor) 38
Figura 13: Níveis da Represa do Jaguari_(foto do autor) 38
Figura 14: Represa do Jaguari em Santa Isabel_(foto do autor, em 06/09/2003)....41
Figura 15: Localização dos pontos de captação de água na bacia do Jaguari. (Fonte: DAEE, 2003)....44
Figura 16: Localização dos pontos de lançamento de efluentes na bacia do Jaguari. (Fonte: DAEE, 2003)....46
Figura 17: Conceito do modelo MIKE BASIN....53

Figura 18: Exemplo do editor de séries históricas TSedit. 53
Figura 19: Esquema de arcos e nós do MIKE BASIN 55
Figura 20: Zonas de armazenamento dos reservatórios 57
Figura 21: Entrada dos dados de precipitação (mm/dia) no TSEdit 59
Figura 22: Entrada de dados de consumo de água na irrigação 61
Figura 23: Esquemas de Abastecimento e lançamento de águas 62
Figura 24: modelo do SRH da Bacia do Jaguari. 67
Figura 25: Caixa de entrada de dados para o nó "N1". 68
Figura 26: Série de vazões naturais consistidas afluentes à represa de Jaguari 70
Figura 27: Caixa de atributos 70
Figura 28: Caixas de diálogo para nós do tipo Reservatório 71
Figura 29: Níveis operacionais da Represa do Jaguari. 72
Figura 30: Tela de Entrada de dados - Curva Cota x Área x Volume 73
Figura 31: Polinômio Cota x Área (fonte: CESP, 1972) 74
Figura 32: Polinômio Cota x Volume (fonte: CESP, 1972) 75
Figura 33: Caixa de diálogo para UHE's 76
Figura 34: Caixa de entrada para o nó de demandas do Paraíba. 77
Figura 35: Gráfico de saída do MIKE BASIN 78
Figura 36: Cenários simulados para o sistema 79
Figura 37: Cenário 1 - Satisfação no atendimento à UHE 82
Figuras 38: Cenário 1 - Índices de Desempenho para a UHE Jaguari 82
Figura 39: Cenário 1 – Índices de desempenho no atendimento às demandas do Paraíba 83
Figura 40: Cenário 1 - Níveis relativos da Represa do Jaguari 84
Figura 41: Cenário 2 - Satisfação no atendimento à UHE 86
Figura 42: Cenário 2 - Índices de Desempenho para a UHE Jaguari 86
Figura 43: Cenário 2 – Índices de desempenho no atendimento às demandas do Paraíba 87
Figura 44: Cenário 2 - Níveis relativos da Represa do Jaguari 88
Figura 45: Cenário 3 - Satisfação no atendimento à UHE 90
Figura 46: Cenário 3 - Índices de Desempenho para a UHE Jaguari 90
Figura 47: Cenário 3 - Índices de Desempenho no atendimento às demandas do Paraíba 91

Figura 48: Cenário 3 - Níveis relativos da Represa do Jaguari.....92
Figura 49: Cenário 4 - Índices de Desempenho para a UHE Jaguari 94
Figura 50: Cenário 4 - Satisfação no atendimento à UHE 94
Figura 51: Cenário 4 - Índices de Desempenho no atendimento às demandas do Paraíba 95
Figura 52: Cenário 4 - Níveis relativos da Represa do Jaguari.....96

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Características da represa do Jaguari 36
Tabela 02: Características da UHE Jaguari 39
Tabela 03: Bacia do Jaguari - Usos consuntivos – pontos de captação 43
Tabela 04: Bacia do Jaguari – Recepção de efluentes – Pontos de lançamentos 45
Tabela 05: Captações à montante da Barragem de Jaguari 47
Tabela 06: Lançamentos à montante da barragem 48
Tabela 07: Captações no Rio Jaguari, à Jusante da Barragem 49
Tabela 08: Captações no Rio Jaguari, à Jusante da Barragem 49
Tabela 09: Captações no rio Parateí 50
Tabela 10: Lançamentos no rio Parateí 50
Tabela 11: Série de vazões naturais consistidas afluentes a represa de Jaguari 69
Tabela 12 – Valores de entrada para curva cota x área x volume 74
Tabela 13: Regras Operacionais 80
Tabela 14: Cenário 1 - Índices de desempenho no atendimento à geração elétrica 81
Tabela 15: Cenário 1 - Índices de desempenho no atendimento às demandas do Paraíba 83
Tabela 16: Cenário 2 - Índices de desempenho no atendimento à geração elétrica 85
Tabela 17: Cenário 2 - Índices de desempenho no atendimento às demandas do Paraíba 87
Tabela 18: Cenário 3 - Índices de desempenho no atendimento à geração elétrica 89
Tabela 19: Cenário 3 - Índices de desempenho no atendimento às demandas do Paraíba 91

Tabela 19: Cenário 4 - Índices de desempenho no atendimento à geração elétrica 93
Tabela 20: Cenário 4 - Índices de Desempenho no atendimento às demandas do Paraíba 95
Tabela 21: Índices de Desempenho para a Geração Energética.....97
Tabela 22: Índices de Desempenho para o atendimento às Demandas do rio Paraíba 97
Tabela 23: Geração energética e Comportamento do reservatório 97

ABREVIATURAS E SIGLAS

ACA – Ant Colony Algorithm
AE – Algoritmos Evolucionários
AG – Algoritmos Genéticos
CBH-PS – Comitê de Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul
CEDAE – Companhia Estadual de Águas e Esgotos (RJ)
CESP – Companhia Energética de São Paulo
CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (SP)
CPTI – Cooperativa de Serviços, Pesquisas Tecnológicas e Industriais.
DAEE – Departamento de Água e Energia Elétrica (SP)
DHI – Danish Hydraulic Institute
HEC – Hydrologic Engineering Center (EUA)
IRAS - Interactive River and Aquifer Simulation
IRIS - Interactive River System Simulation
PD – Programação Dinâmica
PDD – Programação Dinâmica Determinística
PDE – Programação Dinâmica Estocástica
PL – Programação Linear
PNL – Programação Não Linear
RNA – Redes Neurais Artificiais
SA – Simulated Annealing
SAAE – Sistema Autônomo de Água e Esgotos
SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
UGRHI – Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos
UHE – Usina Hidrelétrica
USACE – United States Army Corps of Engineering

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
2. OBJETIVOS 5
3. REVISÃO DE LITERATURA 6
3.1. Análise de Sistemas em Recursos Hídricos 6
3.2. Modelos de Simulação 8
3.2.1. Exemplos de Modelos de Simulação 9
3.2.1.1. HEC 9
3.2.1.2. IRIS 10
3.2.1.3. IRAS 10
3.2.1.4. MODSIM 11
3.2.1.5. MIKE BASIN 11
3.2.2. Aplicações da Simulação 12
3.3. Técnicas de Otimização 14
3.3.1. Programação Linear (PL) 15
3.3.2. Programação Não Linear (PNL) 17
3.3.3. Programação Dinâmica (PD). 18
3.3.4. Outros Métodos de Otimização 21
3.4. Índices de Desempenho em Sistemas de Recursos Hídricos 23
4. LOCAL DE ESTUDO 27
4.1. Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari 27
4.1.1. Aspectos Físicos 30
4.1.2. Clima 31
4.1.3. Hidrografia 32
4.2. A Represa do Jaguari 34
4.3. A Usina Hidrelétrica Jaguari 39
4.4. Qualidade das Águas 41
4.5. Qualidade das águas – represa do Jaguari 41
4.6. Qualidade das Águas - Rio Jaguari 42
4.7. Qualidade das Águas – Rio Parateí. 42
4.8. Usos dos Recursos Hídricos na Bacia 43
4.8.1. Usuários à montante da barragem 47
4.8.2. Usuários à jusante da barragem 49
4.8.3. Usuários no Rio Parateí 50

5. METODOLOGIA 51
5.1. MIKE BASIN 2000 51
5.1.1 Simulação de Rios 55
5.1.2 Simulação de Reservatórios 56
5.1.3 Simulação de Sistemas de Irrigação 60
5.1.4 Simulação de Sistemas de Abastecimento urbano e industrial 62
5.1.5 Simulação de Usinas hidrelétricas 63
5.1.6 Simulação de Águas Subterrâneas 64
5.1.7 Simulação de Qualidade da Água 65
5.1.8 Apresentação dos resultados 65
5.2. Modelo de Rede de Fluxo da Bacia do Jaguari 65
5.2.1. N1 – Nó simples 67
5.2.2. N2 - Nó à montante do reservatório de Jaguari 68
5.2.3. Represa Jaguari 71
5.2.4. UHE Jaguari. 75
5.2.5. Demandas Paraíba: 77
5.2.6. Dados de Saída do Modelo 78
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES 79
6.1. CENÁRIO 01: 81
6.1.1 Atendimento à geração energética 81
6.1.2 Atendimento às demandas do Paraíba do Sul 83
6.1.3 Desempenho do Reservatório 84
6.1.4 Avaliação geral do Cenário 1 84
6.2. CENÁRIO 02: 85
6.2.1 Atendimento à geração energética 85
6.2.2 Atendimento às demandas do Paraíba do Sul 87
6.2.3 Desempenho do Reservatório 88
6.2.4 Avaliação geral do Cenário 2 88
6.3. CENÁRIO 03: 89
6.3.1 Atendimento à Geração Energética. 89
6.3.2 Atendimento às demandas do Paraíba do Sul 91
6.3.3 Desempenho do reservatório 92
6.3.4 Avaliação geral do Cenário 3 92
6.4. CENÁRIO 04: 93
6.4.1 Atendimento à Geração Energética. 93
6.4.2 Atendimento às demandas do Paraíba do Sul 95
6.4.3 Desempenho do reservatório 96
6.4.4 Avaliação geral do Cenário 4 96
6.5. Resultados Gerais 97
7. CONCLUSÕES 98
8. REFERÊNCIAS 101

1. INTRODUÇÃO

A água é indispensável para a manutenção da vida na Terra. Usada para consumo humano, atividades industriais, geração de energia, irrigação e tantos outros fins, é fonte de riquezas e desenvolvimento. No entanto, essa multiplicidade de usos demanda quantidades e qualidades diferentes, o que ocasionalmente pode gerar conflitos.

Para garantir o fornecimento em qualidade e quantidade adequadas aos diversos usos, é necessária a aplicação de políticas que regulamentem as atividades de captação de água e lançamento de efluentes nos recursos hídricos. A legislação brasileira sobre recursos hídricos aborda a questão de usos múltiplos na Lei n^0 9433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH). A lei visa, entre outros objetivos, assegurar à atual e às futuras gerações a disponibilidade de água em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos.

A referida lei determina, entre seus fundamentos, que as bacias hidrográficas sejam as unidades territoriais para a implementação da PNRH. Tundisi (2003) afirma que a bacia hidrográfica, como unidade de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, representa um avanço conceitual muito importante e integrado de ação.

O desenvolvimento integrado de uma bacia, assim como os possíveis conflitos ocasionados por demandas concorrentes do mesmo recurso, deve ser administrado considerando a bacia hidrográfica como unidade natural de gestão.

A gestão e o planejamento em uma bacia hidrográfica devem ocorrer em um processo participativo, dinâmico e interativo, englobando aspectos sócio-econômicos, tecnológicos e ambientais. As técnicas de resolução de conflitos, a simulação e a otimização dos usos múltiplos de rios, lagos, represas e áreas alagadas e a promoção de bases científicas sólidas são muito relevantes para o gerenciamento integrado de recursos hídricos. Incluem-se ainda, avaliações subjetivas de aspectos não mensuráveis, mas igualmente importantes em relação ao uso das águas.

Esta dissertação apresenta uma revisão das técnicas de análise de sistemas aplicadas a estudos de recursos hídricos. Foram pesquisadas diversas publicações sobre o tema, desde as mais antigas, que tratam do desenvolvimento das técnicas, até as mais recentes, que aplicam essas técnicas com o auxílio dos computadores modernos.

Também foi realizado um estudo de caso na bacia hidrográfica do rio Jaguari, principal afluente do rio Paraíba do Sul no estado de São Paulo. Foi aplicado o modelo de simulação MIKE BASIN 2000 para auxiliar na avaliação das possíveis causas do crescente rebaixamento dos níveis do reservatório do rio Jaguari.

A represa do rio Jaguari, junto com as represas de Paraibuna/Paraitinga e Santa Branca, compõe os chamados "reservatórios de cabeceira" da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. A estes reservatórios cabe a função principal de regulação das vazões no rio Paraíba do Sul. Deste sistema hídrico dependem 14,7 milhões de habitantes (CEDAE, 2003), nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais, incluindo os da Região Metropolitana do Rio de Janeiro, que são abastecidos através da transposição para a bacia do rio Guandú. A dependência de chuvas e a enorme demanda à jusante dos reservatórios de cabeceira comprometem o abastecimento de água dos usuários à montante.

Este estudo ainda analisa a situação de escassez hídrica que a bacia hidrográfica do rio Jaguari enfrenta. A bacia foi selecionada em função da situação de rebaixamento da represa do Jaguari, dos danos sociais, econômicos e ambientais decorrentes da escassez hídrica e, principalmente, da mobilização de organizações locais para reverter a situação, o que facilitou a obtenção de dados secundários, fundamentais para a análise computacional realizada. Foi avaliado o impacto de medidas de redução de demandas na gestão operacional da represa de Jaguari.

A análise foi baseada na construção de um modelo de simulação tipo rede de fluxo, através do sistema computacional MIKE BASIN 2000, desenvolvido pelo Danish Hydraulic Institute, na Dinamarca. Trata-se de um software para análise de sistemas de recursos hídricos que trabalha em conjunto com o Sistema de Informações Geográficas (SIG) ESRI ARCVIEW. O MIKE BASIN utiliza as principais equações da Hidrologia e Hidráulica Fluvial na simulação de eventos no modelo. Possui uma interface amigável e elevada rapidez de processamento. Os cenários avaliados são simulados em poucos segundos, o que favorece a sua aplicabilidade gerencial. Os resultados podem ser visualizados nas formas gráfica e analítica, inclusive com animação que reproduz a evolução dos processos ao longo do tempo.

Através da aplicação da simulação foi possível analisar diferentes cenários de disponibilidade hídrica e confrontá-los com as demandas existentes. Como objetivo, procurou-se enfatizar a importância dos Sistemas de Suporte à Decisão na análise dos conflitos entre os diversos usuários dos recursos hídricos e no auxilio a decisões gerenciais em recursos hídricos.

Através das respostas do modelo, são propostas possíveis medidas para reverter a situação. Sabe-se que ações gerenciais não são simples de serem adotadas e tornam-se mais difíceis de acordo com a complexidade do sistema em estudo.

A dependência de condições climáticas favoráveis e as incertezas com relação ao futuro, inerentes aos processos hidrológicos, aliadas à diversidade de interesses dos usuários, são fatores determinantes nos processos decisórios. Frisa-se aqui a importância dos operadores do sistema na adoção de medidas mais corretas para a reversão do problema. E ressalta-se, também, a importância de um modelo de simulação de fácil operação e compreensão que facilite a interpretação dos resultados de diversas simulações das mais variadas condições hidrológicas e operacionais.

2. OBJETIVOS

O trabalho tem como objetivo apresentar um modelo de simulação que atue como ferramenta de decisão no gerenciamento de sistemas de recursos hídricos. As técnicas de simulação não têm como objetivo fornecer a solução ótima para um sistema e sim gerar conhecimento que permita aos decisores avaliar o comportamento dos reservatórios em diversos cenários de operação.

São objetivos deste estudo:

- Apresentar a revisão de alguns dos métodos existentes em Análise de Sistemas aplicados à gestão e planejamento de recursos hídricos.

- Aplicação do modelo de simulação MIKE BASIN 2000 na bacia hidrográfica do rio Jaguari, principal afluente do rio Paraíba do Sul no estado de São Paulo, com vistas a orientar o manejo da represa do Rio Jaguari para atender as suas principais demandas.

- Avaliação do atendimento às demandas hídricas através da determinação dos índices estatísticos de Confiabilidade, Vulnerabilidade e Resiliência.

3. REVISÃO DE LITERATURA

Em uma bacia hidrográfica podem existir diferentes demandas. Muitas vezes, o uso de um manancial hídrico para determinada atividade interfere, ou até mesmo compromete o desenvolvimento de outra atividade.

O planejamento para futuros aproveitamentos da água em uma bacia requer que as conclusões originadas de estudos de aspectos particulares sejam unidas e confrontadas num sistema capaz de contemplar uma análise integrada.

O gerenciamento dos recursos hídricos depende do conhecimento das variáveis que compõem o ciclo hidrológico e dos aspectos sociais, econômicos e ambientais. Para promover a integração destas variáveis na solução de problemas foram desenvolvidos modelos matemáticos e simuladores computacionais, sistemas de suporte às tomadas de decisão por parte dos gestores e planejadores de recursos hídricos.

Neste capítulo são apresentadas técnicas computacionais aplicadas à gestão e planejamento de recursos hídricos. São descritos os métodos normalmente utilizados e revistas algumas das aplicações destas técnicas em estudos da comunidade científica internacional.

3.1. Análise de Sistemas em Recursos Hídricos

Apesar da grande quantidade de dados hidrológicos coletados diariamente, até a década de 1950 os métodos utilizados na hidrologia limitavam-se, praticamente, a indicadores estatísticos dos processos envolvidos. (TUCCI, 1998).

Na década de 1960, o processamento de dados hidrológicos foi a principal aplicação dos computadores no gerenciamento de recursos hídricos. Nos últimos 30 anos, grandes avanços foram conseguidos devido à aplicação de metodologias relacionadas à busca de soluções de problemas complexos, tais como os conflitos entre os diversos aproveitamentos dos recursos hídricos.

A Pesquisa Operacional, a Análise de Sistemas e, mais recentemente, os Sistemas de Suporte a Decisões apresentam, geralmente, uma abordagem sistêmica, através da qual o sistema de recursos hídricos e seus componentes são descritos em termos quantitativos e qualitativos por meio de equações matemáticas e funções lógicas. Entre as técnicas mais utilizadas na área de planejamento de recursos hídricos destacam-se a otimização e a simulação (LIMA, 2002).

Segundo Braga (1987), a análise de sistemas de recursos hídricos consiste em decompor qualquer problema de planejamento e operação em cinco etapas: 1) definição dos objetivos; 2) formulação de medidas quantitativas e qualitativas dos objetivos; 3) geração de alternativas de solução; 4) quantificação das alternativas e 5) seleção da melhor alternativa. Ao longo dos anos, várias técnicas foram desenvolvidas no processo de seleção da alternativa ótima, sendo as mais conhecidas: a Programação Linear; a Programação Dinâmica e a Simulação. Atualmente, técnicas de otimização como Programação não-linear, Redes Neurais Artificiais, Algoritmos Genéticos entre outras, vêm sendo extensivamente aplicadas.

3.2. Modelos de Simulação

A simulação matemática é considerada a técnica mais flexível para a análise de sistemas de recursos hídricos. É amplamente utilizada na gestão e planejamento de recursos hídricos. A simulação permite que a maioria dos sistemas seja representada matematicamente através de modelos computacionais (AZEVEDO et al., 2002).

Os modelos de simulação são conjuntos de expressões matemáticas estruturadas em seqüência lógica que descrevem a operação de um sistema no espaço e no tempo. Têm como objetivo representar e reproduzir o comportamento de um sistema da forma mais detalhada possível e prever o seu comportamento sob determinadas condições, fornecendo informações para avaliar o comportamento do sistema real.

A vantagem da simulação é que pode ser aplicada a sistemas complexos e aceitar quaisquer equações de restrição. Ao contrário dos modelos otimizantes, os modelos de simulação não determinam a política ótima de operação. A solução ótima, em alguns casos, pode ser encontrada iterativamente, processando-se diversas simulações alternativas e comparando seus desempenhos.

A grande desvantagem da técnica de simulação é que não oferece aos usuários a oportunidade de restringir o espaço decisório e, por conseqüência, a solução de problemas é alcançada através do exaustivo processo de tentativa e erro. No entanto, a simulação pode ser associada a técnicas de otimização para determinados casos (AZEVEDO et al., 2002).

3.2.1. Exemplos de Modelos de Simulação

Os modelos de simulação podem ser desenvolvidos para sistemas específicos como, por exemplo, uma determinada bacia hidrográfica. Também existem os modelos genéricos, softwares comerciais aplicáveis a qualquer sistema, sem a necessidade de desenvolvimento ou alteração de rotinas computacionais. Geralmente, os modelos genéricos descrevem os sistemas de maneira mais simplificada que os específicos. Entretanto, a rapidez no processamento de dados, a flexibilidade na aplicação a diversos sistemas e os resultados satisfatórios favorecem o uso dos genéricos em estudos de planejamento e gestão de recursos hídricos. Os fatores decisivos na escolha do modelo a ser utilizado são: facilidade de operação, robustez, eficiência, precisão, documentação e suporte ao usuário. A seguir, alguns exemplos de modelos de simulação comerciais.

3.2.1.1. HEC

Lançado em 1973, pelo Hydrologic Engineering Center (HEC), do Corpo de Engenheiros do Exército Norte-Americano (USACE), o HEC-3 evoluiu para as versões HEC-5 e, atualmente, HEC ResSim. Os programas do HEC têm sido utilizados em um grande número de projetos, incluindo estudos de relocação e modificações operacionais em reservatórios existentes, bem como estudos de viabilidade para implantação de novos projetos. Os HEC's simulam a operação seqüencial de sistemas de recursos hídricos para múltiplos usos com os dados de entrada de vazão e taxa de evaporação de reservatórios.

3.2.1.2. IRIS

O modelo IRIS (Interactive River System Simulation) foi desenvolvido na Universidade de Cornell, Estados Unidos, por Loucks et al, em 1989. O sistema de recursos hídricos é representado por uma rede de nós e arcos, onde os nós representam pontos significativos dos sistemas, tais como pontos de captação, lançamentos, junções, etc. e os arcos representam trechos de rio ou canais entre os nós. Os dados de entrada incluem as séries de vazões do sistema. Dados de saída incluem as seqüências de vazão, armazenamento, geração de energia e qualidade de água para os nós e arcos do sistema e gráficos de probabilidade de falhas, assim como a magnitude e duração das mesmas.

3.2.1.3. IRAS

O modelo IRAS (Interactive River and Aquifer Simulation) foi desenvolvido por Loucks et al., em 1995, como uma extensão do IRIS. O IRAS é um programa genérico para sistemas de gestão de águas superficiais e subterrâneas. Foi concebido para ser um sistema interativo e flexível para a resolução de problemas envolvendo a interação entre águas superficiais e subterrâneas e quantidade e qualidade das águas. O modelo calcula o alcance e a probabilidade de impactos na quantidade e qualidade das águas e na geração hidrelétrica. As simulações são baseadas em balanços de massa quantitativos e qualitativos, levando em consideração o sentido do fluxo, lançamento de esgotos, evaporação, demandas, crescimento e decaimento de poluentes, quando necessário.

3.2.1.4. MODSIM

O MODSIM é um modelo de rede de fluxo de caráter geral e adaptável a diversos tipos de problemas, de forma que a maior parte das configurações e estruturas operacionais das bacias hidrográficas possa ser representada por meio da especificação de dados de entrada apropriados (AZEVEDO et al., 2002).

O MODSIM foi desenvolvido na Colorado State University, por John Labadie. É um modelo versátil, bem documentado e testado em uma variedade de situações.

3.2.1.5. MIKE BASIN

Desenvolvido pelo Danish Hydraulic Institut (DHI), o MIKE BASIN é uma representação matemática de bacias hidrográficas que inclui a configuração dos principais rios e seus tributários, a hidrologia da bacia no tempo e espaço, assim como as várias demandas de água. Com o módulo WQ, o software também realiza a modelagem da qualidade de água.

O MIKE BASIN é um modelo de rede de fluxo. Seu conceito matemático consiste em encontrar soluções estacionárias para cada intervalo de tempo. A sua principal vantagem é a velocidade computacional, permitindo a avaliação de vários cenários. O MIKE BASIN é uma extensão do software ESRI ARCVIEW GIS. Portanto, sistemas de informações geográficas podem ser incluídos na simulação de recursos hídricos. A rede de arcos e nós também é editada no ArcView.

Os modelos aqui apresentados são apenas uma fração da grande diversidade de modelos existentes e em desenvolvimento. Foram considerados por terem grande aplicação comprovada através de publicações internacionais.

3.2.2. Aplicações da Simulação

O emprego de simulação em estudos de recursos hídricos é uma prática amplamente difundida. São diversos os estudos, utilizando diferentes técnicas e modelos. A seguir são apresentadas algumas aplicações.

Silva et al. (2002) aplicaram os modelos MODSIM e AÇUMOD na construção de diversos cenários para o planejamento dos recursos hídricos na bacia do rio Gramame, no Estado da Paraíba. Foram identificadas as principais características dos usos dos recursos hídricos para a determinação de três índices de sustentabilidade hídrica. A bacia estudada é uma bacia litorânea, de médio porte (589,1 km^2), que se encontra próxima a regiões urbanas e abastece a cidade de João Pessoa (capital do estado) e mais cinco municípios, num total de 900.000 habitantes. Inclui, ainda, o açude Gramame-Mamuaba, com capacidade de acumulação de 56,9 milhões de metros cúbicos. A avaliação dos cenários sugeriu a implantação de novos reservatórios na bacia, a fim de minimizar as sucessivas falhas de abastecimento a que o sistema está sujeito.

Mauad (2000) utilizou o modelo IRAS com o objetivo de determinar os níveis de garantia e satisfação de abastecimento dos diversos usos da água no sistema hídrico composto pelos rios Guadiana e Ardila, a represa de Alqueva (área= 245 km^2, volume= 4.150 x 10^6 m^3) e o açude de Pedrogão (área = 27 km^2, volume = 106 x 10^6 m^3), em Portugal e Espanha, e também para atender uma regra de operação estabelecida para várias prioridades. Foram considerados dois cenários de afluências e várias hipóteses de uso da água.

Os índices de confiabilidade, vulnerabilidade e resiliência foram determinados para as hipóteses simuladas.

Lima (2002) aplicou o software MIKE BASIN 2000 na simulação de conflitos de usos múltiplos da água na bacia do rio Atibaia (área = 2.818 km^2), localizado no estado de São Paulo. Além da transferência de água para a região metropolitana de São Paulo, através do sistema Cantareira, encontram-se usos para abastecimento urbano e industrial, irrigação e geração de energia elétrica. Após a avaliação de diversos cenários, o autor sugere o aumento das vazões mínimas liberadas pelo sistema Cantareira e a conseqüente redução das vazões transferidas para a região metropolitana de São Paulo.

Jha e Das Gupta (2003) avaliaram a performance e estabeleceram diretrizes para a gestão do uso dos recursos hídricos na bacia do rio Mun (área= 69.000 km^2), no norte da Tailândia. O modelo utilizado foi o MIKE BASIN 2000. A análise mostrou que a disponibilidade hídrica nos períodos de seca é insuficiente para abastecer os usos domésticos que representam menos de 10% da demanda hídrica total.

Kjeldsen e Rosbjerg (2001) utilizaram o MIKE BASIN 2000 na análise do problema de escassez hídrica da bacia do rio Mgeni (área= 4.400 km^2), na província de Kwa-Zulu Natal, África do Sul. Foram simuladas duas alternativas para a reversão do problema em cenários futuros. A primeira consiste na construção de uma represa no rio Mkomazi com transposição para o rio Mgeni. A segunda consiste na implantação de racionamentos nos próximos quatro anos para a recuperação dos seis reservatórios da bacia. Para cada alternativa foram associados índices de sustentabilidade que permitiram determinar a primeira alternativa (construção do reservatório) como solução tecnicamente mais eficiente no atendimento às demandas. Os autores ressaltaram os impactos sociais e ambientais advindos da possível construção de um reservatório.

Maia (2002) aplicou um modelo de simulação, denominado OperRes, que atua como ferramenta de decisão no gerenciamento de estoques de água para sistemas de múltiplos reservatórios. O OperRes foi aplicado na bacia do rio Paraguaçu, no estado da Bahia, com área de 55.317 km^2. O sistema determinado considerou os treze maiores reservatórios da bacia, incluindo o açude formado pela barragem de Pedra do Cavalo que é responsável pela maior parte do abastecimento da cidade de Salvador e região metropolitana. A simulação da operação do sistema foi feita para um período de estiagem de sete meses, considerando diferentes condições iniciais de volume dos reservatórios.

3.3. Técnicas de Otimização

Segundo Cirilo (2002), a busca da solução ótima em projetos de engenharia é feita, de forma geral, com base na experiência do projetista que, quase sempre, através de processo heurístico, define uma solução entre algumas alternativas. À medida que cresce a complexidade do problema, essa busca é naturalmente dificultada. Nessas situações, fica evidente a importância da aplicação de técnicas de otimização para determinar-se a solução ideal de um problema de engenharia.

A otimização é um conjunto de técnicas de modelagem em que um algoritmo determina valores para um conjunto de variáveis de decisão que minimizam ou maximizam uma função-objetivo sujeita a restrições (WURBS, 1996). Os modelos de otimização são formulados num formato específico para soluções com os métodos-padrão disponíveis. Nos modelos de otimização a função-objetivo, bem como suas restrições, são representadas por expressões matemáticas em função de variáveis de decisão.

Dentre as técnicas de otimização, destacam-se a Programação Linear (PL), Programação Não-linear (PNL) e Programação Dinâmica (PD). Atualmente são utilizadas novas técnicas de otimização (REIS & AKUTSU, 2002). São ferramentas matemáticas, baseadas no conhecimento de mecanismos naturais, que vêm sendo utilizadas em substituição aos métodos convencionais de otimização nas mais diversas áreas do conhecimento. Desta categoria de métodos fazem parte os Algoritmos Genéticos (AGs), as Redes Neurais Artificiais (RNAs) e técnicas como Simulated Annealing (SA) e Ant Colony Algorithms (ACAs).

3.3.1. Programação Linear (PL)

Pode-se assegurar que a Programação Linear é a técnica mais conhecida e usada na solução de problemas de otimização, inclusive na área de Recursos Hídricos (BARBOSA, 2002). Segundo o autor, as razões para a maior utilização são:

- flexibilidade para adaptação a uma grande variedade de problemas;
- maior facilidade de entendimento, comparada a outras técnicas;
- capacidade de tratar problemas de grande porte, comuns em Recursos Hídricos;
- disponibilidade de pacotes computacionais comerciais para pronta utilização.

A principal desvantagem deste método é a exigência da linearidade das funções, não encontrada em muitas aplicações a problemas de recursos hídricos.

Segundo Braga (1987), uma das primeiras aplicações da programação linear em gerenciamento de recursos hídricos foi o trabalho do "Harvard Water Resources Group", em 1965. Os pesquisadores H.A. Thomas e R.P. Burden utilizaram a PL no gerenciamento das águas subterrâneas no vale do rio Indus, no Paquistão.

A primeira aplicação de programação linear no planejamento de uso múltiplo da água no Brasil foi o plano Hibrace, em 1968 (BRAGA, 1987). Neste plano contempla-se um sistema constituído de 31 reservatórios, entre existentes e projetados, para regularização e controle de recursos hídricos da região metropolitana de São Paulo. O modelo desenvolvido visou a definição do escalonamento ótimo das obras.

Nos últimos trinta anos, registram-se inúmeras aplicações de PL em sistemas de recursos hídricos, em vários países.

Bessa et al. (2003) aplicaram a PL na otimização da operação dos reservatórios das usinas hidrelétricas de Foz do Areia (volume máximo = 5.778,15 x 10^6 m^3) e Segredo (volume máximo = 2.943,34 x 10^6 m^3), na bacia do rio Iguaçu – PR, com o objetivo específico de maximizar a energia gerada. O trabalho apresentou os resultados do estudo comparativo entre diferentes formas de otimização da operação de reservatórios em longo prazo, com o objetivo específico de maximizar a energia gerada. As ferramentas utilizadas foram Programação Linear Determinística (Método dos Pontos Interiores, disponível na Optimization Toolbox do Matlab®) e heurísticas. As políticas operacionais obtidas, com decisão mensal, foram testadas na simulação numérica da operação através dos dados históricos disponíveis no Sipot (Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro, Versão 4.0). Procurou-se dar atenção não somente aos valores médios do desempenho da operação, mas também ao desvio padrão, medida de dispersão da variável aleatória em torno da média, porque é um modo de avaliação da volatilidade da política operacional.

Pillar & Lanna (1999) publicaram um trabalho sobre planejamento através de otimização de um sistema de recursos hídricos por programação linear. Neste estudo fica evidente a importância da função-objetivo em problemas de otimização. Foi adotada a maximização do valor presente dos benefícios líquidos (VPBL) como função-objetivo, pois consideraram que o mesmo reflete razoavelmente os objetivos de um plano de recursos hídricos. Com a adoção da maximização do VPBL, os autores concluíram que os resultados obtidos consistem em um importante e eficiente subsídio para o processo decisório, pois foram obtidos com custos computacionais muito baixos. A PL foi utilizada sem necessidade de simplificações grosseiras, mostrando-se como uma importante ferramenta de otimização, quando bem utilizada.

Mousavi e Ramarurthy (2000) apresentaram duas técnicas potenciais para se otimizar sistemas de abastecimento de água grandes e complexos. Este modelo utiliza aplicações da teoria do controle ótimo e da programação linear de sucessivas penalidades. Foi feita uma comparação com um modelo existente de programação dinâmica, aplicado em um sistema de múltiplos reservatórios.

3.3.2. Programação Não Linear (PNL)

Uma característica típica dos problemas abordados na Engenharia de Recursos Hídricos é a não linearidade observada nos modelos matemáticos que representam os processos físicos envolvidos (CIRILO, 2002).

A PNL vem se consolidando nas últimas três décadas como importante ferramenta na busca de soluções otimizadas para problemas não lineares na engenharia e em diversas áreas do conhecimento.

No caso particular da Engenharia de Recursos Hídricos, são inúmeras as aplicações encontradas na literatura técnica sobre o assunto. É grande a potencialidade de novas aplicações.

Andrade et al. (2001) aplicaram técnicas de programação não linear para determinar a operação ótima do sistema hídrico formado pelos reservatórios em série de Jucazinho e Carpina, com área de 5.947 km^2, localizados na bacia do rio Capibaribe, em Pernambuco. O processo de otimização foi resolvido, numericamente, através da programação não linear, contemplando função-objetivo para maximização da receita líquida anual advinda da agricultura irrigada, avaliando também o retorno financeiro da piscicultura extensiva nos reservatórios.

Francato et al. (2000) utilizaram a PNL na otimização da operação de um sistema de geração hidrelétrica na bacia do rio Paranaíba, na região Sudeste brasileira. O sistema contém as usinas de Emborcação (volume máximo: 17.190 hm^3), Nova Ponte (12.810 hm^3), Itumbiara (17.027 hm^3), Cachoeira Dourada (fio d'água) e São Simão (12.540 hm^3). Para a modelagem foram estruturadas as principais equações de restrição comumente empregadas na operação de sistemas hidrelétricos. Tratou-se do problema de planejamento da operação de médio prazo, com horizonte de planejamento anual e intervalo de discretização mensal. Foi assumida a hipótese determinística para as vazões afluentes a cada reservatório. O software utilizado para a otimização foi o GAMS/CONOPT para programação não linear.

3.3.3. Programação Dinâmica (PD)

A Programação Dinâmica não é um algoritmo precisamente estruturado como a PL. A PD envolve a decomposição de um problema complexo em uma série de subproblemas mais simples que são resolvidos seqüencialmente, enquanto se transmitem informações essenciais de um estágio a outro (WURBS, 1996).

Segundo Wurbs (1996), os modelos de programação dinâmica possuem as seguintes características:

a) O problema é dividido em uma seqüência de etapas com uma tomada de decisão a cada uma delas. As etapas podem representar diferentes pontos no tempo (como na determinação da liberação de reservatórios para cada intervalo de tempo), ou diferentes atividades (como liberação para diferentes usuários).

b) Cada etapa do problema precisa ter um número finito de estados associados. Os estados descrevem as possíveis condições em que o sistema pode se encontrar a cada etapa. A quantidade de água armazenada é um exemplo típico de variável de estado.

c) O efeito de uma decisão a cada etapa do problema é a transformação do estado atual do sistema em um estado associado com a próxima etapa. Se a variável de decisão é "vazão liberada do reservatório no atual período de tempo", esta decisão irá transformar a quantidade de água armazenada no reservatório (variável de estado) em uma nova quantidade na próxima etapa (período de tempo).

Segundo Barros (2002), na PD o trabalho computacional cresce de forma aproximadamente linear com o número de etapas, enquanto que, em outros métodos, o crescimento é geralmente geométrico. A PD pode ser utilizada num grande número de problemas de programação discreta, sem muita precisão numérica. As funções-objetivo e as restrições podem ser não-lineares e, até mesmo, descontínuas. Esta propriedade é muito atraente do ponto de vista matemático, uma vez que a PD pode ser empregada em problemas complexos, difíceis de serem tratados através de outras técnicas de otimização. A busca de ótimos em etapas (processo de solução da PD) gera informações complementares e fornece meios para flexibilizar a análise de sistemas complexos.

Lima & Lanna (2001) utilizaram um modelo conjunto de otimização (Programação Dinâmica Incremental Determinística com Restrições) e simulação. O objetivo geral dessa pesquisa foi mostrar um esquema metodológico que pode ser usado em sistemas de grandes reservatórios para dar subsídios aos decisores na escolha da política operacional que melhor se ajuste aos objetivos pretendidos. Como objetivo específico, a pesquisa procurou avaliar o atual sistema de abastecimento de água de Fortaleza, propondo políticas operacionais de fácil implementação e examinando se a atual política operacional está fazendo bom uso da água. Três políticas de operação foram sugeridas, garantindo 100% de abastecimento nas mais diversas condições climáticas.

Alaya et al. (2003) aplicaram a Programação Dinâmica Estocástica para identificar a regra de operação ótima do reservatório de Nebhana, na Tunísia. Este reservatório situa-se em uma região de clima árido e é utilizado para irrigação. A identificação da regra ótima de operação foi baseada em dois objetivos opostos: a satisfação da demanda para irrigação e a garantia de um armazenamento mínimo no reservatório. A técnica aplicada levou em consideração a variabilidade do volume afluente à represa, em termos de sua probabilidade de ocorrência; as perdas de água através de modelos de previsão e os objetivos de usos da água, utilizando coeficientes de ponderação (peso). A aplicação da técnica permitiu identificar várias regras de operação. Cada uma delas foi otimizada de acordo com os objetivos. Através da aplicação de técnica de simulação foram avaliados os impactos da adoção das diferentes regras ao longo do tempo. Dentre todas as regras, a que gerou o menor número de falhas na operação do reservatório foi selecionada. A quantidade total de água disponibilizada para a irrigação, estimada com a aplicação da regra escolhida, representou um ganho de 105% em relação ao total liberado no mesmo período.

Alvim et al. (2003) determinaram a operação otimizada de um reservatório de regularização do ribeirão Serra Azul que abastece a cidade de Belo Horizonte – MG. Procurou-se a maximização da vazão aduzida para o abastecimento, deixando o reservatório o mais próximo possível do nível

considerado ideal. Para isto foi empregada a técnica de Programação Dinâmica Estocástica Markoviana. Estes dois objetivos foram associados em uma função recursiva que minimiza a diferença entre os desvios da vazão aduzida máxima e do volume de armazenamento ideal, fazendo com que ambos os objetivos sejam obedecidos paritariamente. A afluência média mensal foi considerada como variável sujeita a incerteza, cuja probabilidade de ocorrência está condicionada à afluência ocorrida no mês anterior. A variável de estado é o volume armazenado nos diversos níveis operacionais do reservatório; a variável de decisão é a vazão aduzida em cada mês.

3.3.4. Outros Métodos de Otimização

Segundo Reis & Akutsu (2002), ferramentas matemáticas baseadas no conhecimento de mecanismos naturais vêm sendo utilizadas em substituição aos métodos convencionais de otimização nas mais diversas áreas do conhecimento. Desta categoria de métodos fazem parte os Algoritmos Genéticos (AGs), as Redes Neurais Artificiais (RNAs) e técnicas como Simulated Annealing (SA) e Ant Colony Algorithms (ACAs). A seguir, algumas aplicações destes métodos.

REDES NEURAIS ARTIFICIAIS (RNAs): São ferramentas baseadas nas funções desenvolvidas pelo cérebro humano, através de mecanismo de transmissão de estímulos e produção de respostas do sistema nervos.

Canceliere et al. (2002) aplicaram a técnica de Redes Neurais Artificiais para a definição de regras de operação do reservatório de Pozzillo, no rio Salso, na Sicília, Itália. O volume de armazenamento do reservatório é de cerca de 123 hm^3 e a área da bacia é igual a 577 km^2. O reservatório é parte de um sistema de usos múltiplos para geração elétrica, irrigação e abastecimento urbano. O sistema abastece o distrito de irrigação de Catania Plain, com área irrigada de 18.000 ha.

SIMULATED ANNEALING (SA): Técnica de busca estocástica, baseia-se no mecanismo de anelamento físico de metais para encontrar valores ótimos de funções-objetivo.

Teegavarapu & Simonovic (2002) aplicaram a técnica Simulated Annealing para otimizar a operação de múltiplos reservatórios. A técnica foi aplicada ao problema padrão de um sistema de quatro reservatórios resolvido previamente por programação linear. A técnica também foi aplicada pelos autores a um sistema de quatro reservatórios de usinas hidrelétricas em Manitoba, Canadá, para encontrar regras ótimas de operação. O mesmo sistema foi resolvido através de programação não-linear e os resultados foram comparados. O melhor valor para a função-objetivo foi encontrado através da aplicação de SA. Os resultados indicam que a técnica pode ser utilizada em reservatórios para encontrar soluções próximas do ótimo para problemas de operação multiperíodo intratáveis computacionalmente.

ANT COLONY ALGORITHMS (ACAs): imitam o comportamento das colônias de formigas ao estabelecer as trajetórias a serem seguidas na busca de alimentos.

ALGORITMOS GENÉTICOS (AGs): Técnicas de busca estocásticas que imitam matematicamente os mecanismos de evolução natural, compreendendo os processos de seleção e genética das populações, em analogia com o processo biológico de sobrevivência e adaptação dos indivíduos mais capazes.

Reis & Akutsu (2002) aplicaram algoritmos genéticos na resolução dos problemas de operação de reservatórios em um sistema hidrotérmico hipotético, composto de quatro usinas hidrelétricas que podem ter sua carga complementada por uma termelétrica. Também foi admitida a hipótese de importação de energia de sistemas vizinhos. Admitiram-se conhecidos o estado inicial do sistema em termos de volumes armazenados, bem como as afluências incrementais naturais. O problema foi definido como de determinação da estratégia operacional de menor custo, em termos das vazões turbinadas para cada usina hidrelétrica ao longo do tempo.

3.4. Índices de Desempenho em Sistemas de Recursos Hídricos

Muitas medidas, como confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade têm sido propostas para avaliar o risco do desempenho de sistemas de recursos hídricos (TICKLE & GOULTER, 1994; MAIER et al., 2001; KJELDSEN & ROSBJERG, 2001).

Hashimoto et al. (1982) foram os primeiros a introduzir estes índices de desempenho em análise de sistemas de recursos hídricos, embora conceitos similares de freqüência, magnitude e duração das falhas já tinham sido usados previamente para avaliar sistemas de abastecimento de água (FIERING, 1969).

Um sistema de recursos hídricos inclui um conjunto "I" de usuários e vários cenários futuros possíveis. A noção de usuários não é limitada para consumo humano, mas pode ser entendida por qualquer atividade econômica, social e ambiental que dependa da oferta de água do sistema em consideração. O desempenho do sistema para qualquer usuário "i" pode ser determinado a partir das variáveis do sistema denotadas por X_t, que podem ser fluxo, vazão, velocidade, armazenamento, nível de água, ou seja, o estado do sistema definido por um processo estocástico. As séries temporais das variáveis de desempenho podem ser obtidas através da simulação, usando um modelo hidrológico apropriado.

Para cada usuário é preciso ter um nível limite especificado para a variável do sistema, X_0, de forma que se possam separar valores satisfatórios (S) e não satisfatórios, ou falhas (F). Isto pode ser definido como:

$$S = \{X_t \mid X_t \geq X_0\} \qquad (1)$$

$$F = \{X_t \mid X_t < X_0\} \qquad (2)$$

Aplicando a teoria ao exemplo de um sistema de abastecimento de água, temos que: para um determinado usuário i qualquer, a sua demanda

hídrica seja representada por X_0. Se, num determinado instante t, a disponibilidade hídrica for maior ou igual à demanda de i, então existe uma situação satisfatória (S). Caso contrário, há uma situação de falha (F).

Baseando-se nestes conceitos de satisfação e falha, Hashimoto (1982) propôs os seguintes índices de desempenho:

Confiabilidade (C): índice que representa a freqüência de estados satisfatórios no sistema em estudo. Ou seja, a probabilidade de não ocorrer uma falha no sistema.

$$C = \Pr\{X_t \in S\} = \Pr\{X_t \geq X_0\} \qquad (3)$$

Resiliência (R): descreve quão rapidamente o sistema irá se recuperar quando uma falha ocorrer. Esta medida tem sido descrita de formas diferentes por diversos autores.

Hashimoto et al. (1982) propuseram uma definição de probabilidade condicional.

$$R_1 = \Pr\{X_{t+1} \in S | X_t \in F\} = \Pr\{X_{t+1} \geq X_0 | X_t < X_0\} \qquad (4)$$

Ou seja, a probabilidade de um estado satisfatório ocorrer logo após um estado de falha.

MOY et al. (1986) descreveram a resiliência como sendo a duração máxima da permanência no estado de falha.

$$R_2 = 1 - \frac{L_{\max}}{N} \qquad (5)$$

Onde:

Lmax: duração máxima da permanência no estado de falha

N: número de eventos de falha

A adaptação dada por Wurbs (1991) incorpora a duração máxima da permanência no estado de falha e o número de vezes em que $X_t < X_0$, definido na equação (6) como n_s.

$$R_3 = \frac{1}{n_s \cdot L_{\max}} \qquad (6)$$

Valores baixos de resiliência indicam que o sistema tem dificuldade de recuperar-se das falhas. Já os valores altos representam rapidez na recuperação.

Vulnerabilidade (V): é a medida da magnitude da falha do sistema.

A Figura 01 representa a definição de duração (dj) e déficit (sj) da variável de estado no período de falha.

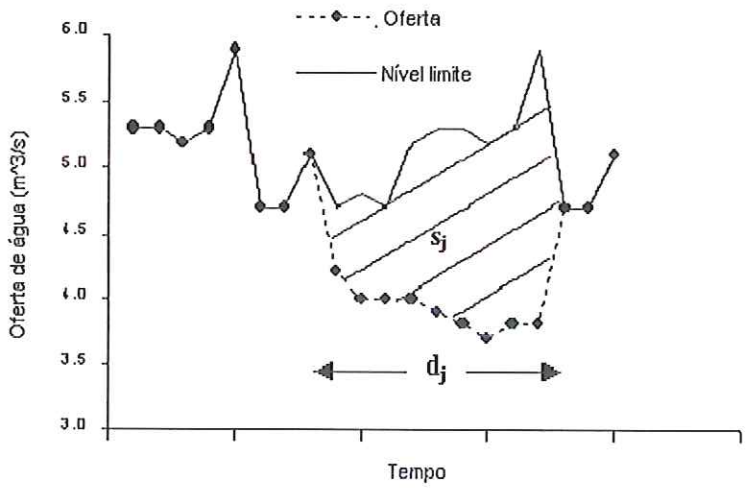


Figura 01: Definição de duração e déficit de volume no período de falha do sistema (adaptado de Kjeldsen & Rosbjerg, 2001).

A vulnerabilidade é então definida pela equação (7)

$$V = \frac{1}{M.dem} \sum_{j=1}^{M} s_j \qquad (7),$$

Onde "dem" é a demanda média do sistema e
M é o número de ocorrências de déficit.

Altos valores de vulnerabilidade indicam que as falhas no abastecimento são severas, ou seja, a meta de abastecimento é muito inferior ao valor desejado. Já para valores baixos da vulnerabilidade as metas são parcialmente atendidas. Por exemplo, uma determinada captação para abastecimento urbano requer $1m^3/s$ de água. Em um período de falha esse sistema consegue captar $0,8\ m^3/s$. A vulnerabilidade para este caso é de 20%, isto é, a meta é parcialmente atendida.

Os índices de desempenhos aqui apresentados servirão de referência na análise do atendimento às demandas nos cenários avaliados para o sistema de recursos hídricos da bacia do Jaguari.

Dentre as diversas técnicas de análise de sistemas estudadas, optou-se pela simulação, utilizando o software MIKE BASIN. Devido à flexibilidade de aplicação, rapidez de processamento e fidelidade na reprodução das situações, a técnica adotada consiste em um importante auxiliar aos gestores de recursos hídricos.

4. LOCAL DE ESTUDO

A área de abrangência das simulações consiste em um sistema de recursos hídricos inserido na bacia hidrográfica do rio Jaguari, constituído pela represa de mesmo nome e os diversos usuários das águas da bacia.

Nos itens subseqüentes são caracterizados detalhadamente os componentes do sistema.

4.1. Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari

A bacia hidrográfica do rio Jaguari é uma sub-bacia do rio Paraíba do Sul. Localiza-se no extremo oeste desta, afluindo na margem esquerda do Paraíba, orientando-se de sudoeste para nordeste. Segundo dados da Cooperativa de Serviços, Pesquisas Tecnológicas e Industriais (CPTI, 2000), possui área de 1.767,32 km^2, e tem suas cabeceiras na Serra da Mantiqueira e no divisor de águas da bacia hidrográfica do Alto Tietê.

A área da bacia do Jaguari abrange nove municípios do estado de São Paulo: Santa Isabel, Igaratá, São José dos Campos, Jacareí, Guararema, Mogi das Cruzes, Itaquaquecetuba, Arujá e Guarulhos.

Destes, apenas Santa Isabel e Igaratá situam-se inteiramente na bacia. São José dos Campos, Jacareí e Guararema situam-se parcialmente e fazem parte da bacia do rio Paraíba do Sul. Mogi das Cruzes, Itaquaquecetuba, Arujá e Guarulhos pertencem à bacia do Alto Tietê, embora com domínios parciais na bacia do Jaguari e sedes fora da bacia do rio Paraíba. Nas figuras 02 e 03, a localização da área de estudo.

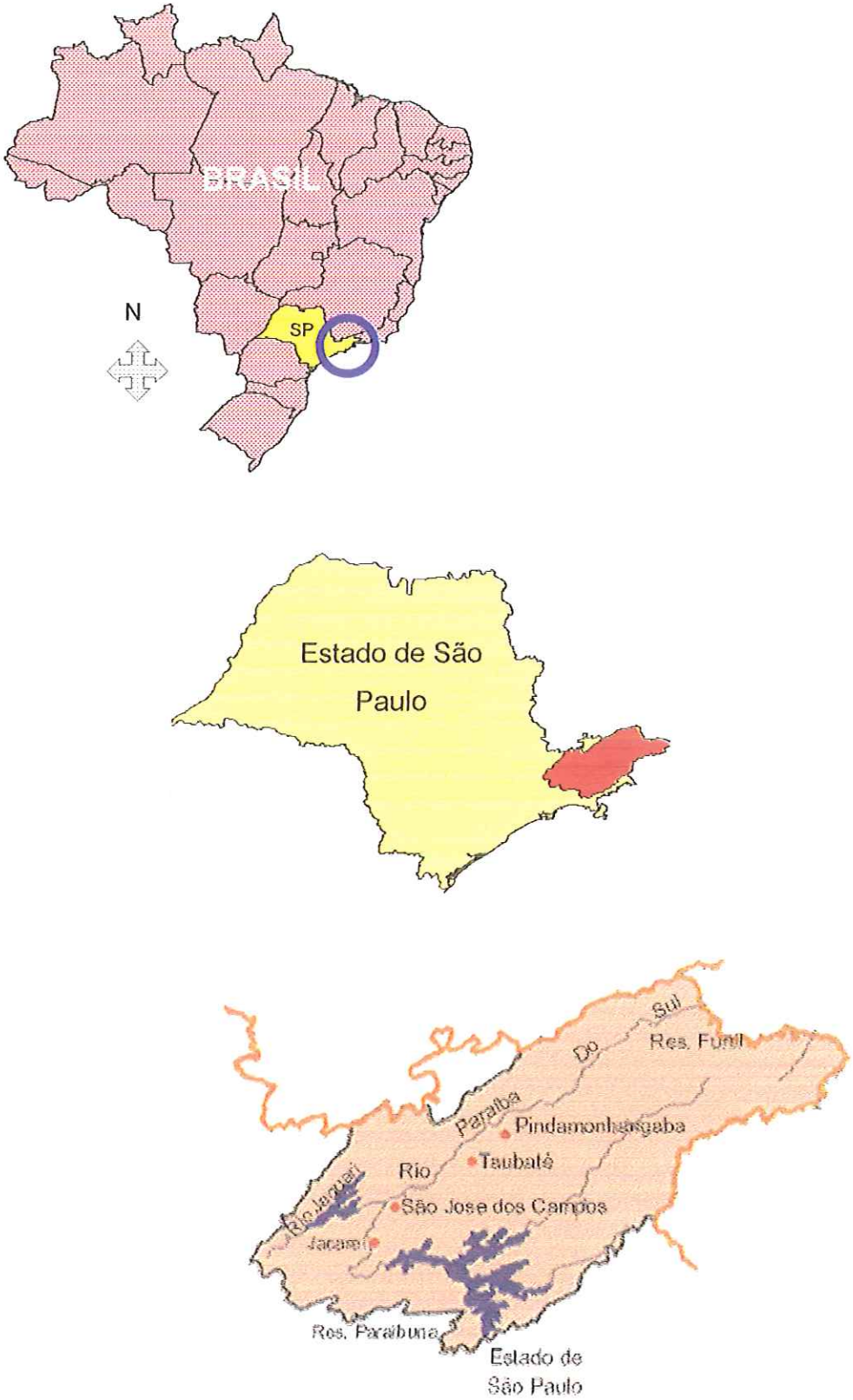


Figura 02: Localização da Bacia do Paraíba do Sul em São Paulo (ANA, 2004; CEIVAP, 2003)

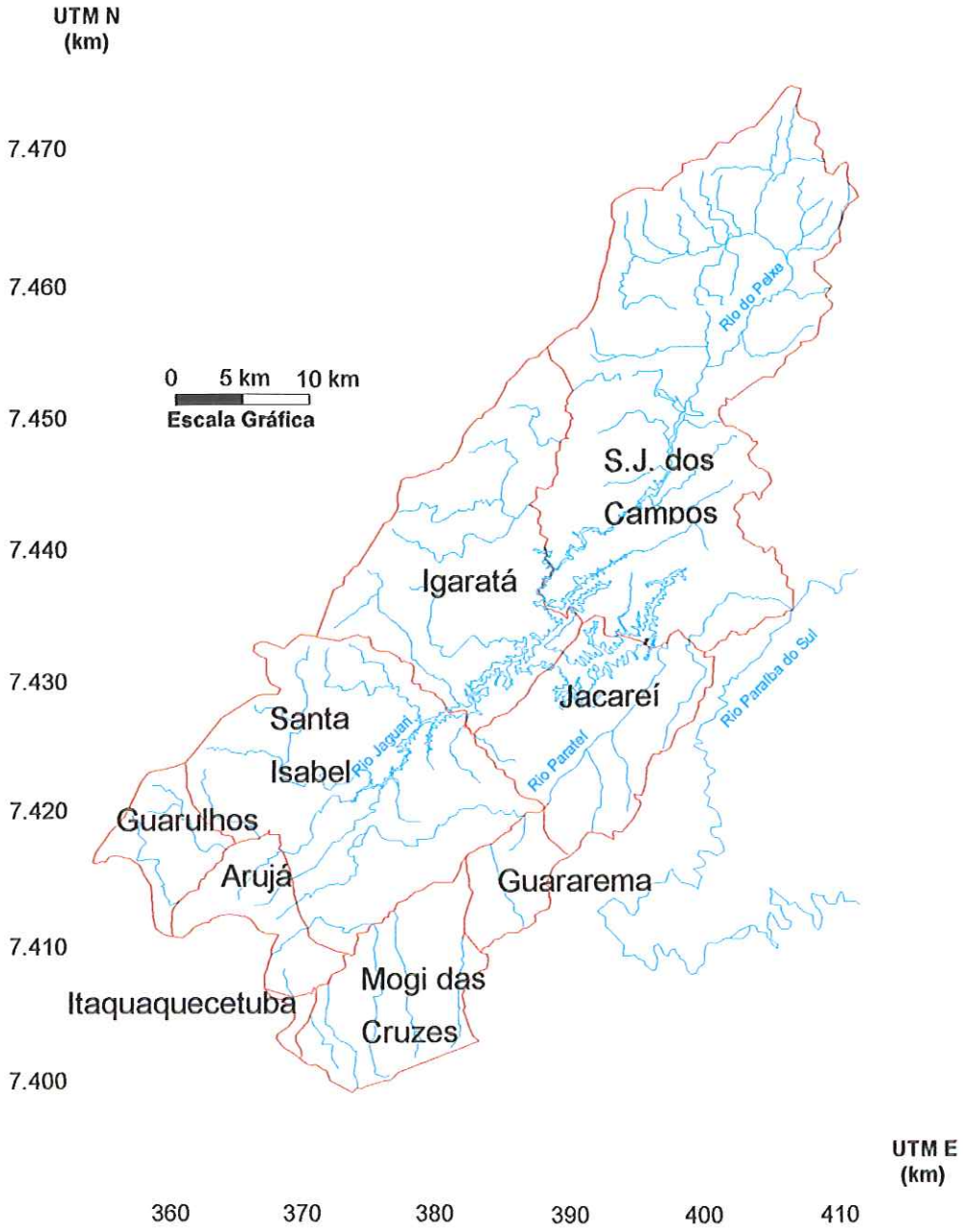


Figura 03: Bacia Hidrográfica do Jaguari
(adaptado de CPTI, 2000)

4.1.1. Aspectos Físicos

A bacia do rio Jaguari possui terrenos de morros e serras de topos arredondados, com interflúvios que constituem um conjunto de formas em "meia laranja", ligado à alta densidade de drenagem da bacia. As vertentes geralmente possuem perfis convexos e/ou retilíneos, cujas declividades podem chegar a 60% nos contrafortes da Serra da Mantiqueira (CPTI, 2000).

As unidades litoestratigráficas presentes são: sedimentos aluvionares, dominando a área de várzea, suítes graníticas sintectônicas pré-cambrianas, depósitos continentais e o Complexo Juiz de Fora.

Os terrenos cristalinos formam o aqüífero de maior extensão aflorante presente na bacia do Jaguari, denominado regionalmente de Sistema Aqüífero Cristalino (SAC) do Paraíba do Sul.

As unidades sedimentares formam o principal aqüífero presente na bacia, nas extensões dos municípios de Jacareí e São José dos Campos. Denomina-se Sistema Aqüífero Sedimentar do Paraíba do Sul ou Taubaté (CETESB et al., 1997; apud CPTI, 2000). Seu substrato hidrogeológico é formado por rochas cristalinas do embasamento, as mesmas que constituem o SAC.

Os latossolos vermelho-amarelos abrangem grande parte da bacia. Aparecem também os argissolos, principalmente nos morros menos elevados.

4.1.2. Clima

O clima da sub-bacia é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen (mesotérmico com chuvas de verão e verões quentes), com temperatura média anual de 20,8 °C. Nos meses de verão, as temperaturas médias variam entre 21 e 24°C. No inverno, oscilam entre 15 e 18°C.

As chuvas concentram-se no verão, enquanto os invernos são, geralmente, mais secos. Segundo dados de CPTI (2000), a pluviosidade média na bacia do Jaguari é de 1475,4 milímetros ao ano.

A figura 04 apresenta os valores das médias mensais das chuvas entre os anos de 1970 e 2000 no posto pluviométrico "Barragem de Jaguari (E3-055), monitorado pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do estado de São Paulo (DAEE).

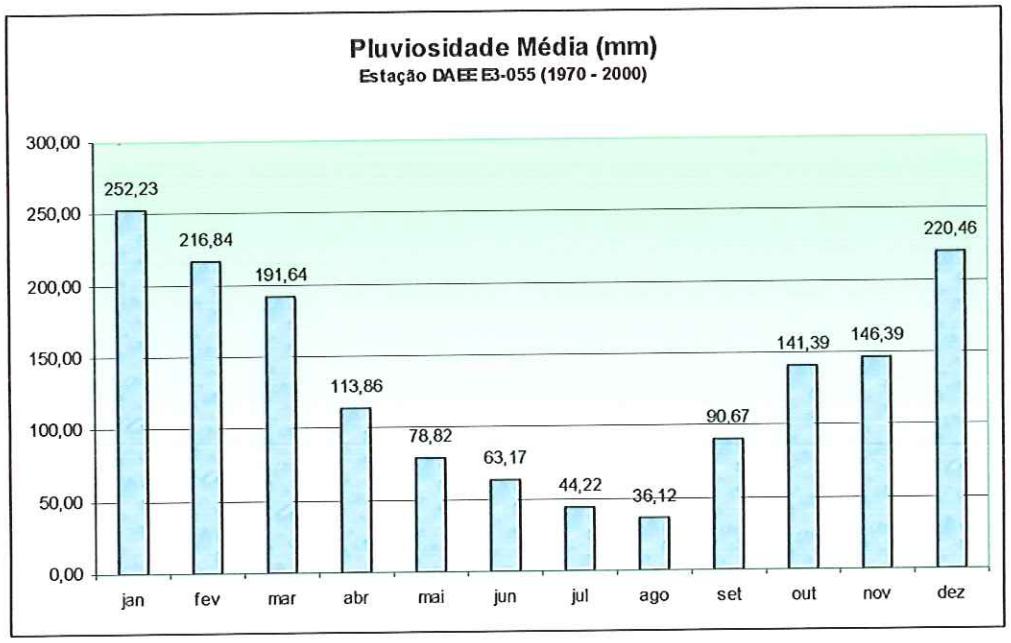


Figura 04: Pluviosidade média mensal
(fonte SIGRH, 2004 - Posto Barragem Jaguari)

4.1.3. Hidrografia

O rio Jaguari é um dos principais afluentes do rio Paraíba do Sul no estado de São Paulo. Deságua na margem esquerda do Paraíba e tem como principais afluentes os rios do Peixe (margem esquerda) e Parateí (margem direita)

As figuras 05, 06 e 07 representam a topologia da rede hidrográfica da bacia do Jaguari, contendo o curso principal do rio (fig. 05) e seus maiores afluentes, Rio Parateí (fig. 06) e Rio do Peixe (fig 07).

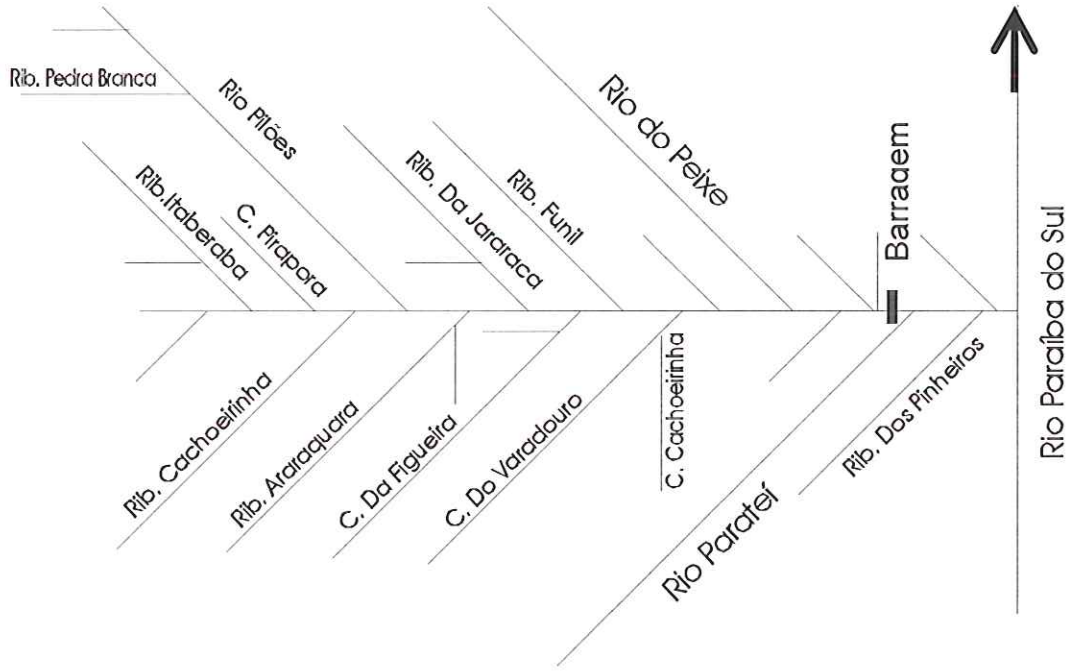


Figura 05: Mapa Topológico do rio Jaguari
(adaptado de CPTI, 2000)

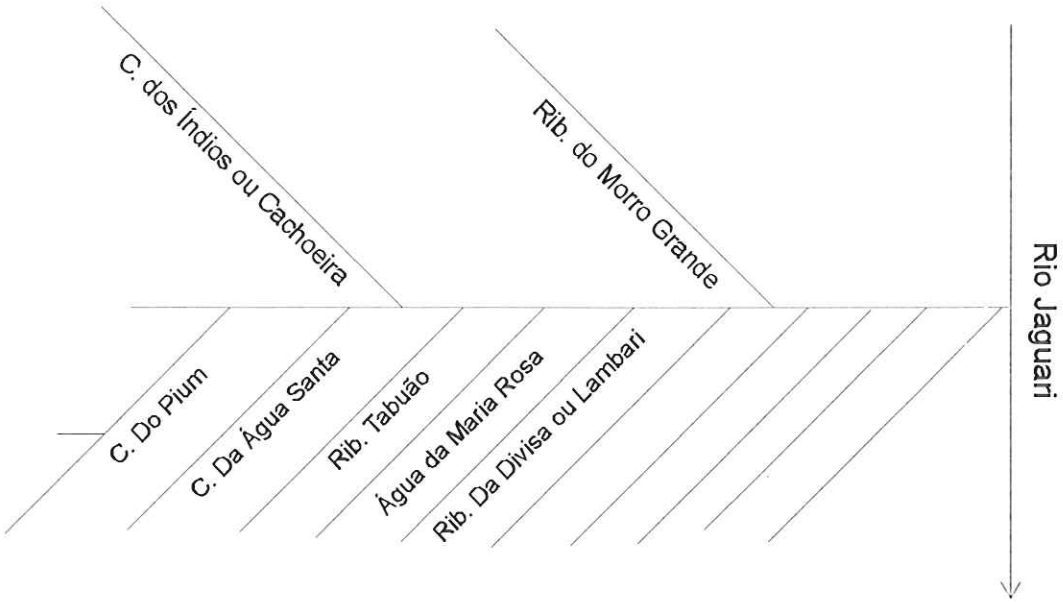


Figura 06: Mapa Topológico do rio Parateí
(adaptado de CPTI, 2000)

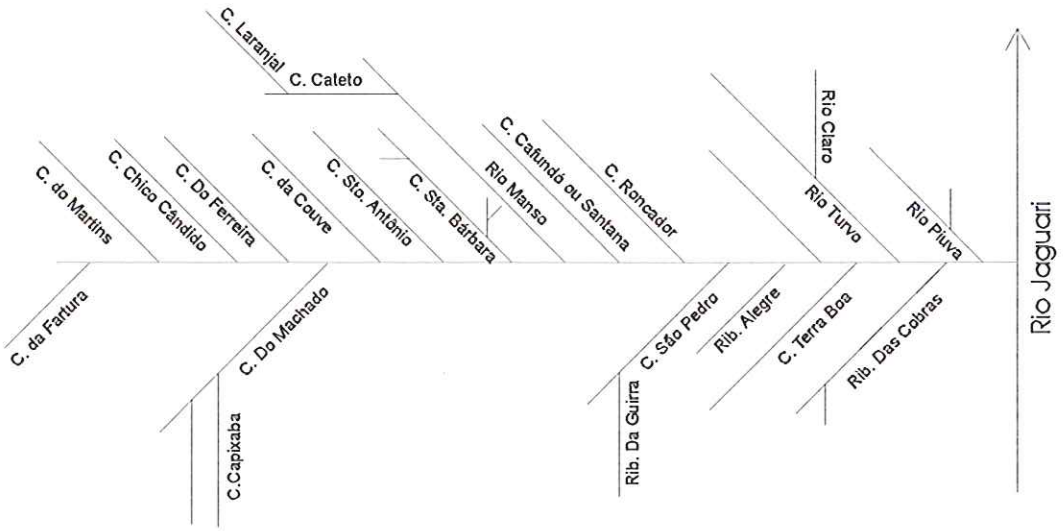


Figura 07: Mapa Topológico do rio do Peixe
(adaptado de CPTI, 2000)

4.2. A Represa do Jaguari

O curso do rio Jaguari é represado através de uma barragem de enrocamento de 30 metros de altura por 623 metros de comprimento (figura 08). A represa possui área de espelho d'água de 56 km^2 e uma bacia de contribuição de 1.300 km^2. Foi inaugurada em 1972 e tem como principal função a regularização das vazões afluentes ao rio Paraíba do Sul. A represa é parte de um complexo sistema que envolve geração de energia elétrica, abastecimentos industriais, rurais e urbanos, incluindo a transposição das águas do Paraíba do Sul para a bacia do rio Guandu, responsável pelo abastecimento da região metropolitana do Rio de Janeiro. A figura 09 mostra a represa do Jaguari através de uma imagem do satélite Landsat, de 1999. A figura 10 representa o sistema de represas da bacia do Paraíba do Sul, no qual está inserida a represa do Jaguari.

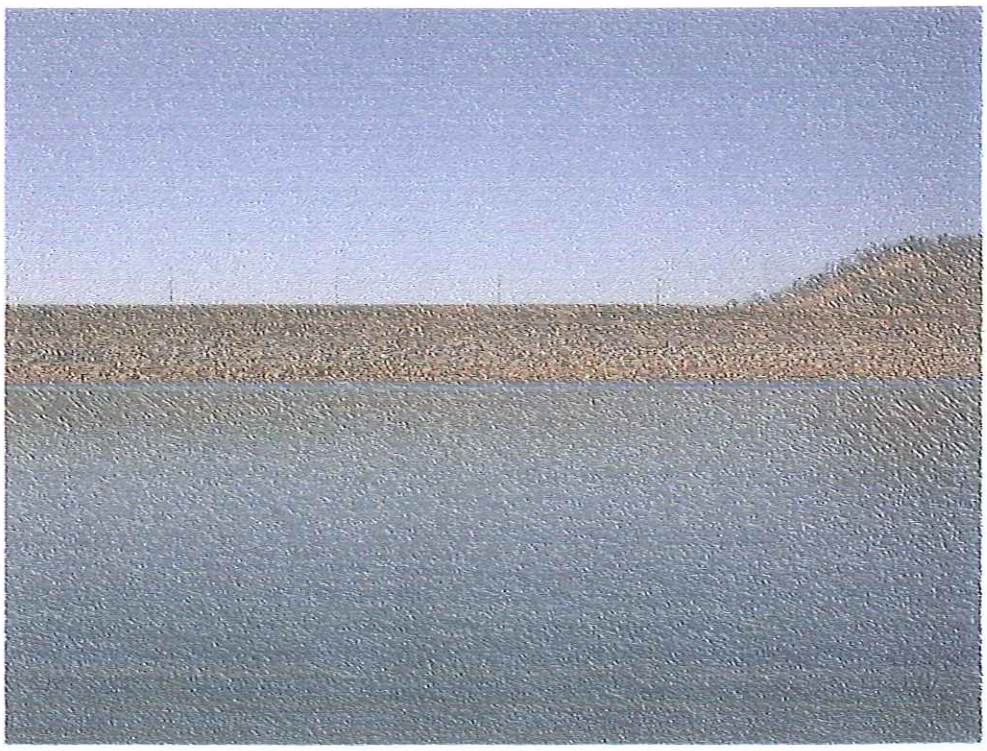


Figura 08: Barragem da Represa do Jaguari
(foto do autor)

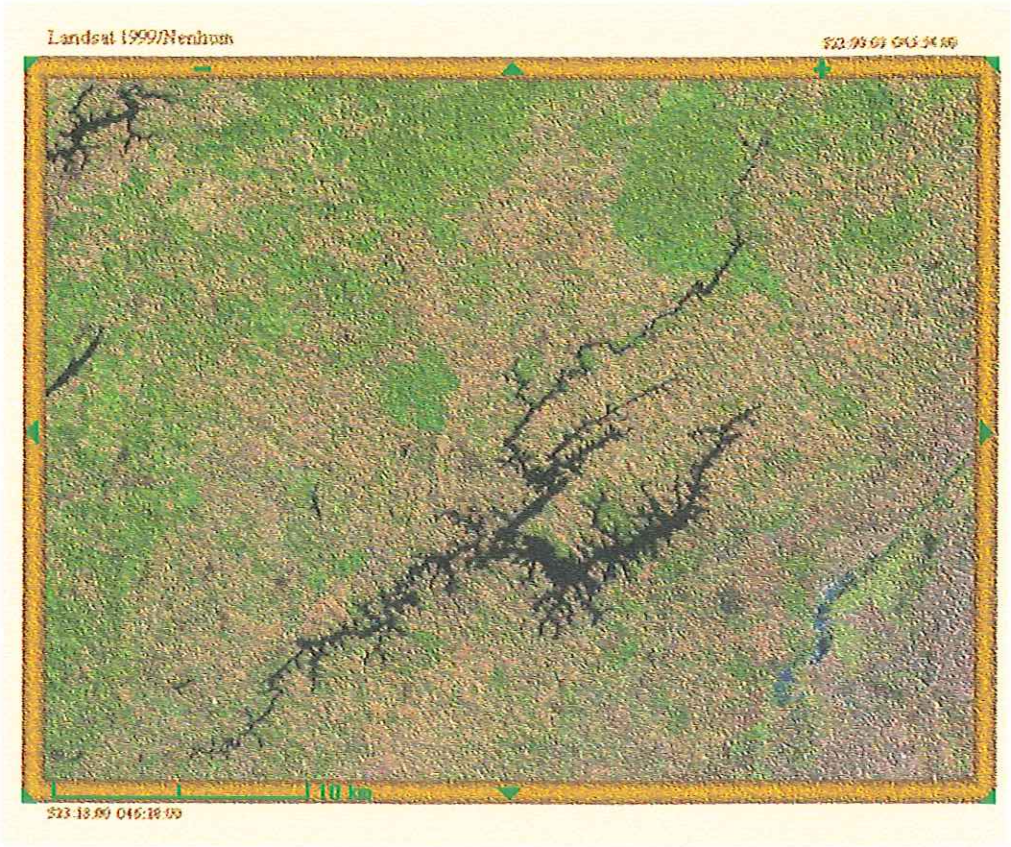


Figura 09: Imagem de Satélite "Landsat" da Represa do Jaguari (fonte: LANDSAT TM5, 1999)

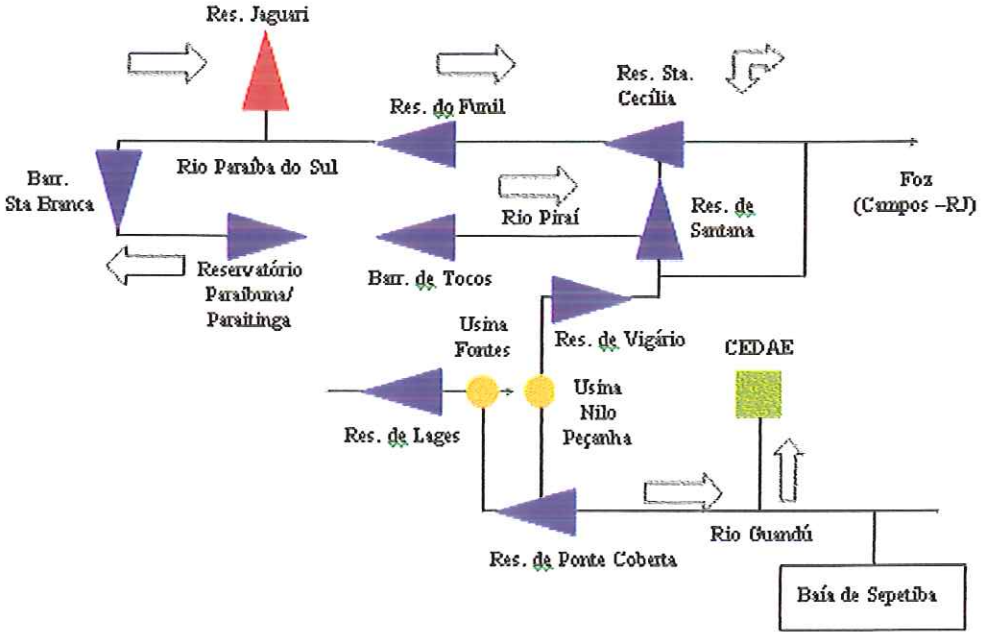


Figura 10: Sistema de Represas da Bacia do Rio Paraíba do Sul (fonte: CPTI, 2000)

A Portaria DNAEE n^0 22, de 24.02.1977, solicita garantia de descarga mínima de 10 m^3/s a partir do reservatório do Jaguari e, segundo normas de operação, exceto quando as condições hidrológicas não exijam, durante o período seco (junho - novembro), deverá descarregar 42 m^3/s.

Durante o período mais úmido (dezembro a maio), deverá reter água, soltando até a descarga mínima de 10 m^3/s, como definido pela portaria.

Algumas das principais características da barragem do Jaguari são apresentadas na tabela 01.

Tabela 01 – Características da represa do Jaguari

Altura máxima	30,00 m
Comprimento no coroamento	623,00 m
Volume máximo do reservatório	1236,00 hm^3
Área do espelho d'água	56,00 km^2
Área da bacia hidrográfica	1300,00 km^2

(fonte: CESP, 2003)

Atualmente, os níveis da represa do Jaguari encontram-se baixos em relação ao ótimo operacional. Segundo dados da CESP, há uma crescente redução nos níveis operacionais.

Organizações como:

- CEIVAP – Comitê para a Integração do Vale do Paraíba;
- CBH-PS – Comitê da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul;
- Sub-Comitê da Bacia do rio Jaguari;
- SAPE – Sociadade Amigos de Proteção ao Ecossistema;
- SEPEA – Sociedade de Estudos e Pesquisas em Ecossistemas Aquáticos

vêm realizando freqüentes debates sobre a situação da represa. Os argumentos referem-se principalmente aos impactos ambientais decorrentes da manutenção de baixos níveis no reservatório. Pela análise da figura 11, percebe-se a redução do volume útil nos últimos cinco anos. As figuras 12 e 13 ilustram o aspecto visual da variação dos níveis do reservatório.

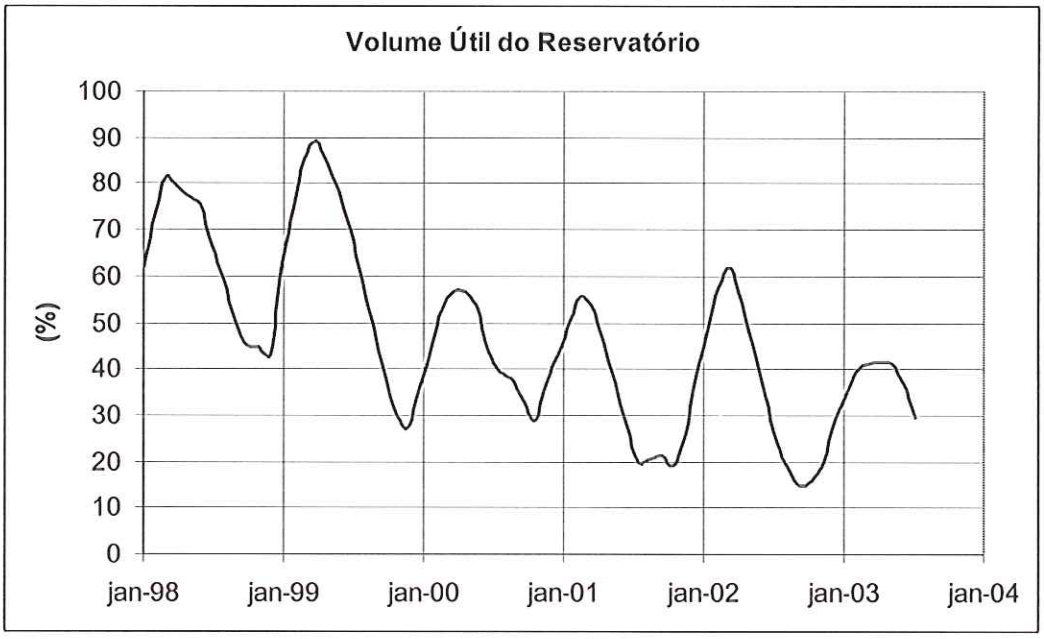


Figura 11: – Gráfico "Volume útil (%) x Tempo"
(fonte: CESP, 2003)

Figura 12: Represa do Jaguari – Viaduto Rodovia Dom Pedro I

(foto do autor)

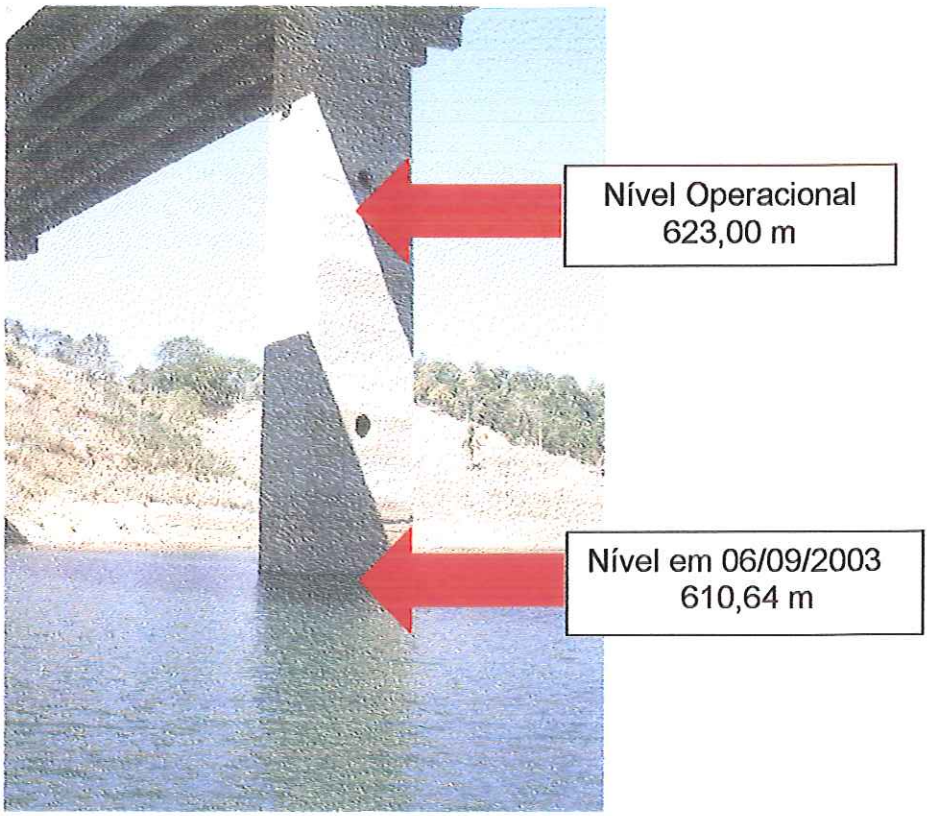


Figura 13: Níveis da Represa do Jaguari

(foto do autor)

4.3. A Usina Hidrelétrica Jaguari

Junto à represa do Jaguari está instalada, desde 1972, a Usina Hidrelétrica (UHE) Jaguari, entre os municípios de Jacareí e São José dos Campos. O acesso é feito pela Rodovia Presidente Dutra, km 165. A UHE Jaguari possui potência instalada de 27,6 MW distribuída por duas unidades geradoras com turbinas tipo Francis. As turbinas possuem queda de referência de 49,9 m e engolimento máximo de 25 m^3/s. A tabela 02 fornece outras características da usina.

Tabela 02: Características da UHE Jaguari

Condições de montante	
Área da bacia hidrográfica	1.300 km^2
Área do espelho d'água (N.A. 623,00m)	56 km^2
Volume morto	443 x $10^6 m^3$
Volume útil	793 x $10^6 m^3$
Volume reservado para cheia de projeto	163 x $10^6 m^3$
Barragem	
Comprimento no coroamento	623,00 m
Níveis característicos de montante	
N.A. máximo maximorum	625,80 m
N.A. máximo útil	623,00 m
N.A. mínimo útil	603,20 m
Vazão média a longo termo (MLT 1931 - 1998)	29 m^3/s
Vazão máxima média diária observada (30/05/83)	213 m^3/s
Condições de jusante	
N.A. máximo maximorum	562,40 m
N.A. máximo	557,90 m
N.A. mínimo	555,80 m
Vazão máxima dos vertedores (vertedores + válvulas)	410 m^3/s
Vazão turbinada nominal total	50 m^3/s

(fonte: CESP, 2003)

Tabela 02: Características da UHE Jaguari

Unidades geradoras – turbinas	
Tipo	Francis eixo vertical
Turbinas	2
Potência nominal unitária	12.364 kW
Queda de referência	49,90 m
Engolimento máximo	25 m^3/s

Unidades geradoras – geradores	
Tipo	síncrono
Potência nominal efetiva	12.000 kW
Potência nominal da placa	13.800 kW
Potência nominal total instalada	27.600 kW
Órgãos de descarga	
Vertedor de superfície	Livre
Dimensões do vão	43,00 x 2,50 m
Cota da soleira	623,00 m
Descarga no nível máximo útil	0 m^3/s
Descarga máxima por vão (N.A. 625,80 m)	350 m^3/s
Descarregador de fundo	2
Tipo	Válvula dispersora
Diâmetro da válvula	1,55 m
Descarga por válvula (limitada em 70% da abertura – N.A. 614,00 m)	30 m^3/s
Descarga por válvula (limitada em 70% da abertura – N.A. 623,00 m)	32 m^3/s
Descarga máxima por válvula (limitada em 70% da abertura - N.A. 625,80 m)	32,60 m^3/s

(fonte: CESP, 2003)

A Resolução da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nº 453, de 30 de dezembro de 1998, determina uma energia assegurada de 14 MW para a UHE Jaguari. Segundo o artigo 21 do decreto nº 2655, de 2 de julho de 1998, considera-se energia assegurada do sistema aquela que pode ser obtida conforme regras aprovadas pela ANEEL. A energia assegurada relativa a cada usina constituirá o limite de contratação para os geradores hidrelétricos do sistema.

4.4. Qualidade das Águas

O plano de bacias da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI-2), Rio Paraíba do Sul, apresenta as condições qualitativas das águas da Represa do Jaguari e do Rio Jaguari, baseadas nas análises da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB).

4.5. Qualidade das águas – represa do Jaguari

Os resultados obtidos pela CETESB permitiram concluir que as condições de qualidade das águas do reservatório do Jaguari são boas, apresentando poucos valores em desacordo com os padrões de qualidade. Ressalta-se que metade dos valores de coliformes termotolerantes esteve acima dos limites legais no ponto JAGJ00200, situado na cidade de Santa Isabel. Nas proximidades de Santa Isabel, a represa possui infestação por macrófitas aquáticas, indicando a presença de poluicão (figura 14).

Figura 14: Represa do Jaguari em Santa Isabel.
(foto do autor, em 06/09/2003)

O índice de Qualidade das Águas (IQA), na maior parte de 2003, classificou as águas do reservatório como de qualidade variando entre Boa e Regular. Os valores de coliformes termotolerantes evoluíram em relação à média dos últimos dez anos, bem como as concentrações de nitratos. A concentração de oxigênio dissolvido média em 2003 foi de 4,5 mg/L enquanto a média dos últimos dez anos era de 6,4 mg/L.

O braço do ribeirão Araraquara tem sido o responsável pela variação da qualidade das águas deste reservatório, devido aos esgotos domésticos gerados pela cidade de Santa Isabel serem despejados em seu leito sem nenhum tratamento.

4.6. Qualidade das Águas - Rio Jaguari

As condições observadas da qualidade das águas deste rio são condizentes com a recepção de esgotos domésticos sem nenhum tratamento ou com tratamento inadequado (CPTI 2000), devido à existência de inconformidades em praticamente todas as amostras de coliformes termotolerantes e fósforo total. Além desses casos, vale mencionar a ocorrência de concentrações de oxigênio dissolvido abaixo dos padrões de qualidade em algumas das amostras analisadas. A qualidade da água, avaliada pelo IQA, foi considerada Boa em 2003.

4.7. Qualidade das Águas – Rio Parateí

Dentre os pontos de coleta na bacia do Jaguari, este é o de pior qualidade. O IQA foi considerado regular no ano de 2003, sendo ruim no mês de fevereiro. Em comparação com os últimos dez anos. A concentração de coliformes aumentou significativamente. A piora na qualidade da água pode ser verificada também pelo aumento da concentração de nitratos e diminuição do OD médio.

4.8. Usos dos Recursos Hídricos na Bacia

Dentre os principais usos de água na bacia do rio Jaguari destacam-se, como usos consuntivos: abastecimento público, abastecimento industrial, aqüicultura, irrigação e dessedentação de animais.

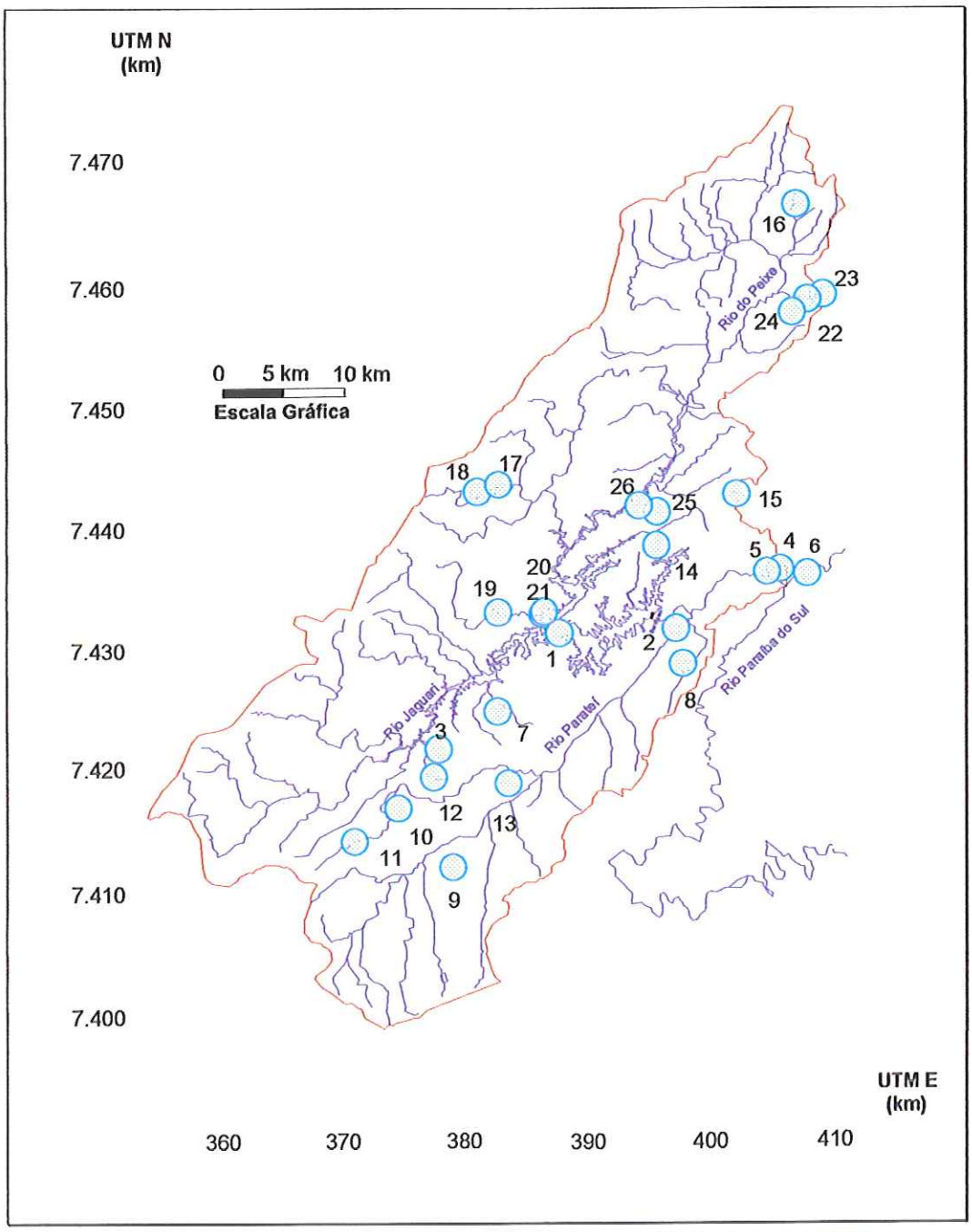
A tabela 03 apresenta os usuários das águas superficiais da bacia do Jaguari.

Tabela 03: Bacia do Jaguari - Usos consuntivos – pontos de captação

Captação	Curso d'água	Município	Uso	UTM L (km)	UTM N (km)	Vazão (l/s)	Período (horas/dia)
1	Jaguari	Igaratá	Loteamento	386,25	7435,90	0,00	0
2	Jaguari	Jacareí	Industrial	395,95	7434,06	1414,00	24
3	Jaguari	Santa Isabel	Industrial	372,50	7422,90	500,00	24
4	Jaguari	S. J. dos Campos	Industrial	406,25	7437,60	40,00	11
5	Jaguari	S. J. dos Campos	Industrial	405,50	7438,00	30,00	24
6	Jaguari	Jacareí	Aqüicultura	389,26	7427,78	3,00	24
7	Jaguari	Santa Isabel	Industrial	380,40	7425,25	1,00	4
8	Parateí	Jacareí	Rural	395,34	7429,48	3,60	24
9	Parateí	Santa Isabel	Aqüicultura	376,85	7416,75	1,00	24
10	Araraquara	Santa Isabel	Irrigação	372,21	7417,25	20,00	4
11	Araraquara	Santa Isabel	Aqüicultura	368,47	7414,68	3,00	24
12	Araraquara	Santa Isabel	Saneamento			252,00	22
13	Morro Grande	Santa Isabel	Aqüicultura	379,27	7420,30	5,40	24
14	Piuva	S. J. dos Campos	Aqüicultura	389,55	7439,55	1,00	12
15	Claro	S. J. dos Campos	Aqüicultura	398,00	7444,99	4,50	24
16	Sta. Bárbara	S. J. dos Campos	Rural	403,72	7468,02	1,00	24
17	Grande	Igaratá	Aqüicultura	379,45	7445,15	10,00	24
18	Grande	Igaratá	Aqüicultura	378,86	7445,80	80,00	24
19	Palmeiras	Igaratá	Rural	378,78	7435,71	85,00	12
20	Palmeiras	Igaratá	Saneamento	382,00	7435,30	0,00	0
21	Palmeiras	Igaratá	Saneamento	382,00	7435,30	29,00	24
22	Peixe	S. J. dos Campos	Rural	405,55	7463,43	5,00	24
23	Peixe	S. J. dos Campos	Aqüicultura	406,38	7462,91	23,00	24
24	Peixe	S. J. dos Campos	Aqüicultura	403,45	7466,30	3,24	24
25	Peixe	S. J. dos Campos	Aqüicultura	393,78	7445,19	2,90	24
26	Peixe	S. J. dos Campos	Aqüicultura	393,84	7445,15	2,80	24

(fonte: DAEE/SP, 2003)

A figura 15 mostra um mapa da bacia do Jaguari, com a localização geográfica dos pontos de captação de água identificados na tabela 03.



Legenda: 9 Ponto de captação e código do usuário

Figura 15: Localização dos pontos de captação de água na bacia do Jaguari. (Fonte: DAEE, 2003)

Dentre os usos não consuntivos destacam-se a regularização de vazões do rio Paraíba do Sul, a geração de energia elétrica na UHE Jaguari e a recepção de efluentes. Os pontos de lançamento de efluentes são fornecidos na tabela 04.

Tabela 04: Bacia do Jaguari – Recepção de efluentes – Pontos de lançamentos

Lançamento	Curso d'água	Município	Uso	UTM L (km)	UTM N (km)	Vazão (l/s)	Período (horas/dia)
1	Jaguari	Jacareí	Industrial	396,90	7434,65	1250,00	24
2	Jaguari	S. J. dos Campos	Industrial	406,45	7437,40	48,00	2
3	Jaguari	S. J. dos Campos	Industrial	405,30	7438,00	14,00	24
4	Jaguari	Jacareí	Aqüicultura	389,02	7428,08	1,00	24
5	Jaguari	Santa Isabel	Industrial	380,90	7425,35	1,00	4
6	Parateí	Santa Isabel	Comunitário	375,80	7414,35	0,40	10
7	Parateí	Guararema	Industrial	385,06	7420,55	10,00	8
8	Parateí	Jacareí	Industrial	391,25	7426,75	9	24
9	Parateí	Jacareí	Rural	395,25	7429,63	3,6	24
10	Parateí	Santa Isabel	Aqüicultura	376,80	7416,70	1	24
11	Araraquara	Santa Isabel	Irrigação	372,33	7417,31	20	8
12	Araraquara	Santa Isabel	Aqüicultura	368,47	7414,61	3,00	24
13	Araraquara	Santa Isabel	Industrial	374,00	7419,90	1000,00	24
14	Araraquara	Santa Isabel	Saneamento			147,00	24
15	Morro Grande	Santa Isabel	Aqüicultura	379,25	7420,34	3,60	24
16	Morro Grande	Santa Isabel	Aqüicultura	379,19	7420,33	1,80	24
17	Piuva	S. J. dos Campos	Aqüicultura	389,70	7439,50	1,00	12
18	Claro	S. J. dos Campos	Aqüicultura	398,19	7444,95	4,50	24
19	Sta. Bárbara	S. J. dos Campos	Rural	403,47	7467,79	1,00	24
20	Sta. Bárbara	S. J. dos Campos	Aqüicultura	403,67	7466,17	1,94	24
21	Sta. Bárbara	S. J. dos Campos	Aqüicultura	403,65	7466,12	1,30	24
22	Grande	Igaratá	Aqüicultura	379,20	7445,00	10,00	24
23	Grande	Igaratá	Aqüicultura	379,00	7445,20	80,00	24
24	Palmeiras	Igaratá	Rural	378,81	7435,65	85,00	12
25	Palmeiras	Igaratá	Saneamento	382,30	7434,70	0,00	0
26	Palmeiras	Igaratá	Saneamento	382,30	7434,70	13,00	24
27	Peixe	S. J. dos Campos	Aqüicultura	406,07	7462,83	23,00	24
28	Peixe	S. J. dos Campos	Saneamento	402,85	7466,00	18,42	24
29	Peixe	S. J. dos Campos	Saneamento	401,20	7465,54	5,00	24
30	Peixe	S. J. dos Campos	Rural	405,55	7463,48	5,00	24
31	Peixe	S. J. dos Campos	Aqüicultura	393,87	7444,80	5,70	24

(fonte: DAEE/SP, 2003)

A figura 16 apresenta o mapa da bacia do Jaguari, com a localização geográfica dos pontos de lançamento de efluentes identificados na tabela 04.

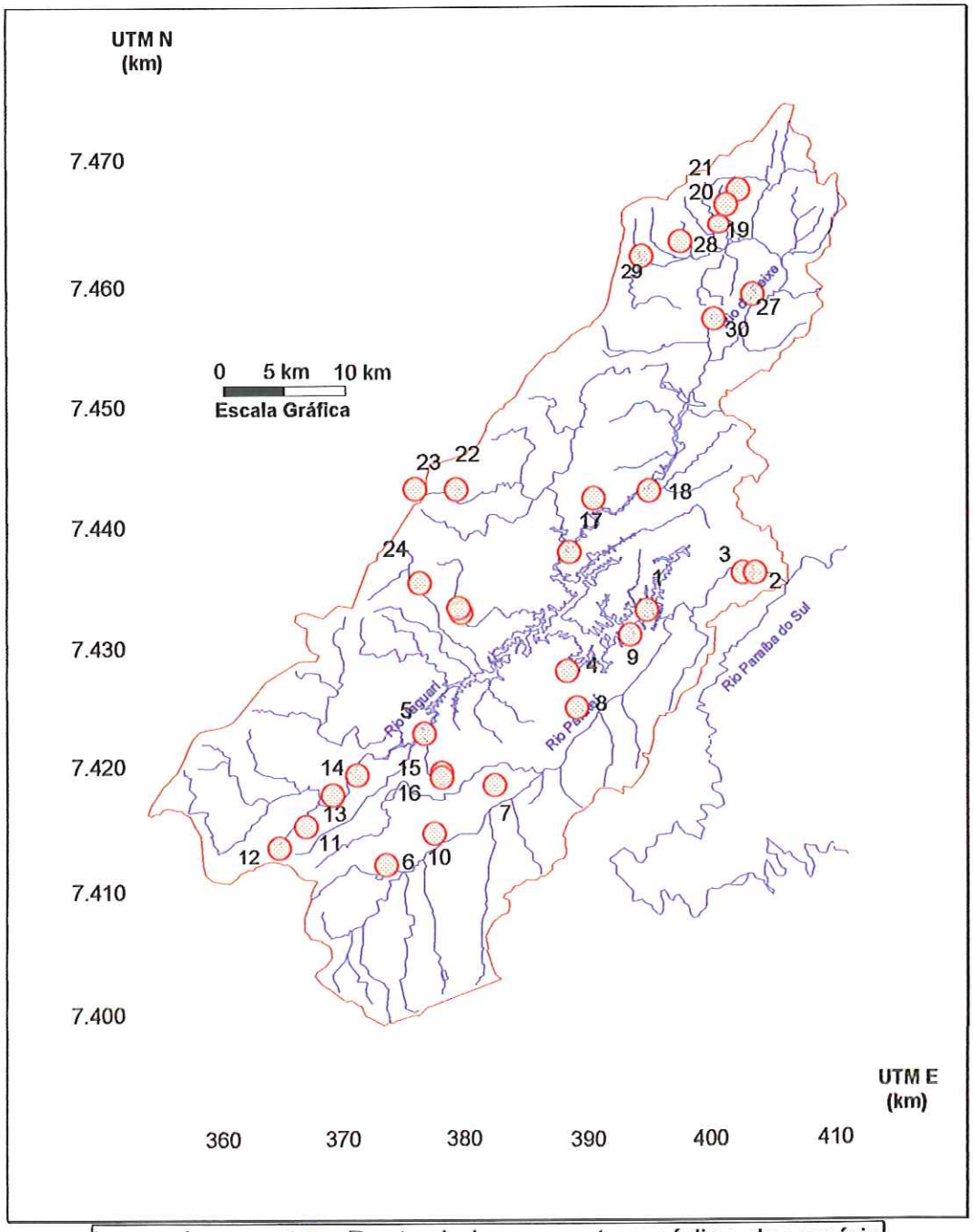


Figura 16: Localização dos pontos de lançamento de efluentes na bacia do Jaguari.

(Fonte: DAEE, 2003)

4.8.1. Usuários à montante da barragem

Os usuários outorgados à montante da barragem de Jaguari utilizam água da represa e de seus afluentes. As tabela 05 e 06 mostra os usuários cadastrados no local.

Tabela 05: Captações à montante da Barragem de Jaguari

Código	Curso d'água	Município	Uso	UTM L (km)	UTM N (km)	Vazão (l/s)	Período (h/dia)
1	Jaguari	Igaratá	Loteamento	386.25	7435.90	0.00	0
2	Jaguari	Jacareí	Industrial	395.95	7434.06	1414.00	24
3	Jaguari	Santa Isabel	Industrial	372.50	7422.90	500.00	24
7	Jaguari	Santa Isabel	Industrial	380.40	7425.25	1.00	4
10	Araraquara	Santa Isabel	Irrigação	372.21	7417.25	20.00	4
11	Araraquara	Santa Isabel	Aqüicultura	368.47	7414.68	3.00	24
12	Araraquara	Santa Isabel	Saneamento	373.52	7420.00	252.00	22
14	Piuva	S. J. dos Campos	Aqüicultura	389.55	7439.55	1.00	12
15	Claro	S. J. dos Campos	Aqüicultura	398.00	7444.99	4.50	24
16	Sta. Bárbara	S. J. dos Campos	Rural	403.72	7468.02	1.00	24
17	Grande	Igaratá	Aqüicultura	379.45	7445.15	10.00	24
18	Grande	Igaratá	Aqüicultura	378.86	7445.80	80.00	24
19	Palmeiras	Igaratá	Rural	378.78	7435.71	85.00	12
20	Palmeiras	Igaratá	Saneamento	382.00	7435.30	0.00	0
21	Palmeiras	Igaratá	Saneamento	382.00	7435.30	29.00	24
22	Peixe	S. J. dos Campos	Rural	405.55	7463.43	5.00	24
23	Peixe	S. J. dos Campos	Aqüicultura	406.38	7462.91	23.00	24
24	Peixe	S. J. dos Campos	Aqüicultura	403.45	7466.30	3.24	24
25	Peixe	S. J. dos Campos	Aqüicultura	393.78	7445.19	2.90	24
26	Peixe	S. J. dos Campos	Aqüicultura	393.84	7445.15	2.80	24

(fonte: DAEE, 2003)

As captações à montante da represa perfazem um total de 2,356 m^3/s

Tabela 06: Lançamentos à montante da barragem

Código	Curso d'água	Município	Uso	UTM L (km)	UTM N (km)	Vazão (l/s)	Período (h/dia)
4	Jaguari	Jacareí	Aqüicultura	389,02	7428,08	1	24
5	Jaguari	Santa Isabel	Industrial	380,90	7425,35	1	4
11	Araraquara	Santa Isabel	Irrigação	372,33	7417,31	20	8
12	Araraquara	Santa Isabel	Aqüicultura	368,47	7414,61	3	24
13	Araraquara	Santa Isabel	Industrial	374,00	7419,90	1000	24
14	Araraquara	Santa Isabel	Saneamento	375,00	7421,00	147	24
17	Piuva	S. J. dos Campos	Aqüicultura	389,70	7439,50	1	12
18	Claro	S. J. dos Campos	Aqüicultura	398,19	7444,95	4.5	24
19	Sta. Bárbara	S. J. dos Campos	Rural	403,47	7467,79	1	24
20	Sta. Bárbara	S. J. dos Campos	Aqüicultura	403,67	7466,17	1.94	24
21	Sta. Bárbara	S. J. dos Campos	Aqüicultura	403,65	7466,12	1.3	24
22	Grande	Igaratá	Aqüicultura	379,20	7445,00	10	24
23	Grande	Igaratá	Aqüicultura	379,00	7445,20	80	24
24	Palmeiras	Igaratá	Rural	378,81	7435,65	85	12
25	Palmeiras	Igaratá	Saneamento	382,30	7434,70	0	0
26	Palmeiras	Igaratá	Saneamento	382,30	7434,70	13	24
27	Peixe	S. J. dos Campos	Aqüicultura	406,07	7462,83	23	24
28	Peixe	S. J. dos Campos	Saneamento	402,85	7466,00	18.42	24
29	Peixe	S. J. dos Campos	Saneamento	401,20	7465,54	5	24
30	Peixe	S. J. dos Campos	Rural	405,55	7463,48	5	24
31	Peixe	S. J. dos Campos	Aqüicultura	393,87	7444,80	5.7	24

(fonte: DAEE, 2003)

À montante da barragem há 1,370 m^3/s de lançamentos de efluentes.

De toda a vazão consumida neste trecho da bacia, há um retorno de 58,15% sob forma de efluentes. A série de usos consuntivos foi descontada do total afluente ao reservatório, no ponto de captação da UHE Jaguari, conforme metodologia do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), aprovada pela ANA. Portanto, não será simulado o atendimento a estes usuários.

4.8.2. Usuários à jusante da barragem

Entre a barragem de Jaguari, e sua foz no rio Paraíba, são cadastrados os seguintes usuários (tabelas 07 e 08):

Tabela 07: Captações no Rio Jaguari, à Jusante da Barragem

Código	Curso d'água	Município	Uso	UTM L (km)	UTM N (km)	Vazão (l/s)	Período (h)
4	Jaguari	S. J. dos Campos	Industrial	406.25	7437.60	40.00	11
5	Jaguari	S. J. dos Campos	Industrial	405.50	7438.00	30.00	24
6	Jaguari	Jacareí	Aqüicultura	389.26	7427.78	3.00	24

(fonte: DAEE, 2003)

As captações no rio Jaguari, à jusante da barragem, são da ordem de 0,051 m^3/s.

Tabela 08: Captações no Rio Jaguari, à Jusante da Barragem

Código	Curso d'água	Município	Uso	UTM L (km)	UTM N (km)	Vazão (l/s)	Período (h)
1	Jaguari	Jacareí	Industrial	396,90	7434,65	1250	24
2	Jaguari	S. J. dos Campos	Industrial	406,45	7437,40	48	2
3	Jaguari	S. J. dos Campos	Industrial	405,30	7438,00	14	24

(fonte: DAEE, 2003)

A vazão de efluentes lançados neste trecho é igual a 1,268 m^3/s

Devido à existência de captações de águas subterrâneas neste trecho da bacia, o volume de água lançado ao rio é superior às captações. Como as demandas do rio Paraíba do Sul são cerca de 823 vezes maiores (42 m^3/s), o atendimento a estes usuários não será objeto de estudo.

4.8.3. Usuários no Rio Parateí

O rio Parateí deságua no Jaguari após o barramento. Os usuários outorgados nesta sub-bacia são apresentados nas tabelas 09 e 10:

Tabela 09: Captações no rio Parateí

Código	Curso d'água	Município	Uso	UTM L (km)	UTM N (km)	Vazão (l/s)	Período (h/dia)
8	Parateí	Jacareí	Rural	395.34	7429.48	3.60	24
9	Parateí	Santa Isabel	Aqüicultura	376.85	7416.75	1.00	24
13	Morro Grande	Santa Isabel	Aqüicultura	379.27	7420.30	5.40	24

(fonte: DAEE, 2003)

Na sub-bacia do rio Parateí há um total de 0,010 m^3/s de captação de água.

Tabela 10: Lançamentos no rio Parateí

Código	Curso d'água	Município	Uso	UTM L (km)	UTM N (km)	Vazão (l/s)	Período (h/dia)
6	Parateí	Santa Isabel	Comunitário	375,80	7414,35	0.4	10
7	Parateí	Guararema	Industrial	385,06	7420,55	10	8
8	Parateí	Jacareí	Industrial	391,25	7426,75	9	24
9	Parateí	Jacareí	Rural	395,25	7429,63	3.6	24
10	Parateí	Santa Isabel	Aqüicultura	376,80	7416,70	1	24
15	Morro Grande	Santa Isabel	Aqüicultura	379,25	7420,34	3.6	24
16	Morro Grande	Santa Isabel	Aqüicultura	379,19	7420,33	1.8	24

(fonte: DAEE, 2003)

O lançamento de efluentes na sub-bacia do Parateí é de 0,023 m^3/s.

Na sub-bacia do Parateí percebe-se, também, uma predominância do uso de águas subterrâneas no atendimento às demandas, sendo a diluição de efluentes o principal uso do curso d'água. O atendimento às demandas do Parateí não é objeto de estudo.

5. METODOLOGIA

A aplicação do modelo de rede de fluxo do sistema de recursos hídricos da bacia do rio Jaguari foi baseada em dados secundários, obtidos junto a fontes oficiais.

As simulações foram desenvolvidas no Laboratório de Simulação Numérica – LABSIN, do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Todos os softwares utilizados nas simulações foram adquiridos através de convênios de pesquisa da Universidade.

Nos parágrafos seguintes são apresentadas as características do MIKE BASIN, software utilizado na modelagem do sistema, bem como as equações adotadas nas simulações.

Os dados de entrada do modelo e suas respectivas fontes são igualmente referenciados.

5.1. MIKE BASIN 2000

O software MIKE BASIN 2000, desenvolvido pela empresa Danish Hydraulics Institute - DHI Water & Environment da Dinamarca, é uma representação matemática de sistemas de recursos hídricos que simula a configuração de rios principais e tributários, a hidrologia da bacia no espaço e no tempo e os vários esquemas de demanda de água.

O modelo é estruturado em uma rede de arcos e nós digitalizada no ambiente do Sistema de Informações Geográficas ESRI ArcView 3.1. Todas as informações relativas à configuração da rede são editadas na tela do computador. O MIKE BASIN explora a capacidade do ArcView e adiciona a dimensão de tempo nas informações espaciais.

Na rede digitalizada, os nós representam locais como nascentes, confluências de rios, postos fluviométricos, pontos de captação, lançamento de águas residuárias e outros pontos de interesse em estudos hídricos. Os arcos representam rios, canais, linhas de adução, ou seja, trechos de ligação entre os nós do sistema.

O esquema da Figura 17 mostra os principais dados de entrada e a resposta do modelo de simulação. O conceito matemático do modelo consiste na aplicação de balanço de massa em toda a rede e na busca de soluções no estado estacionário para cada intervalo de tempo, diário ou mensal, definido pelo usuário.

As séries temporais são inseridas na forma de gráficos e tabelas no editor de séries históricas denominado TSEdit, compatível com o Excel®. A Figura 18 apresenta um exemplo de séries editadas no TSEdit.

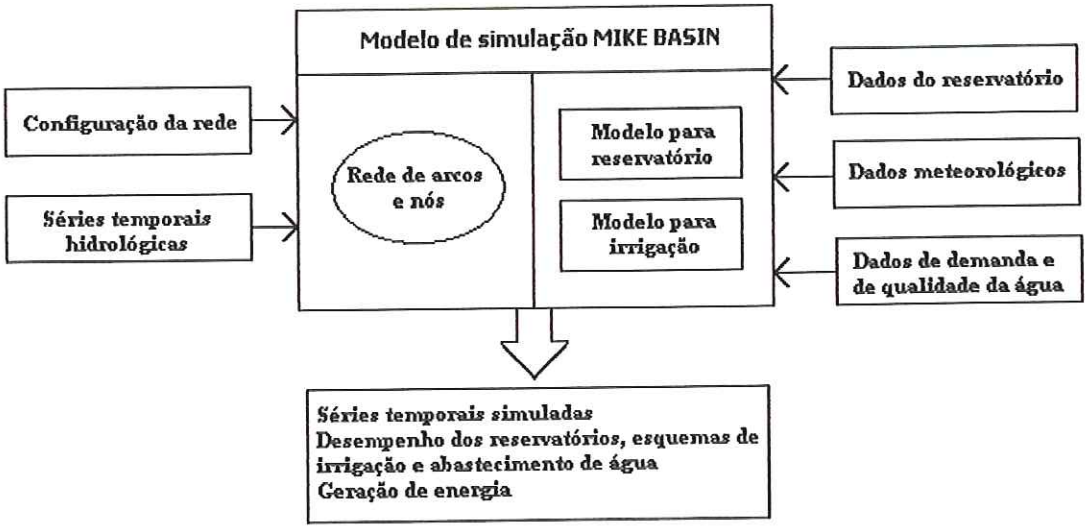


Figura 17: Conceito do modelo MIKE BASIN

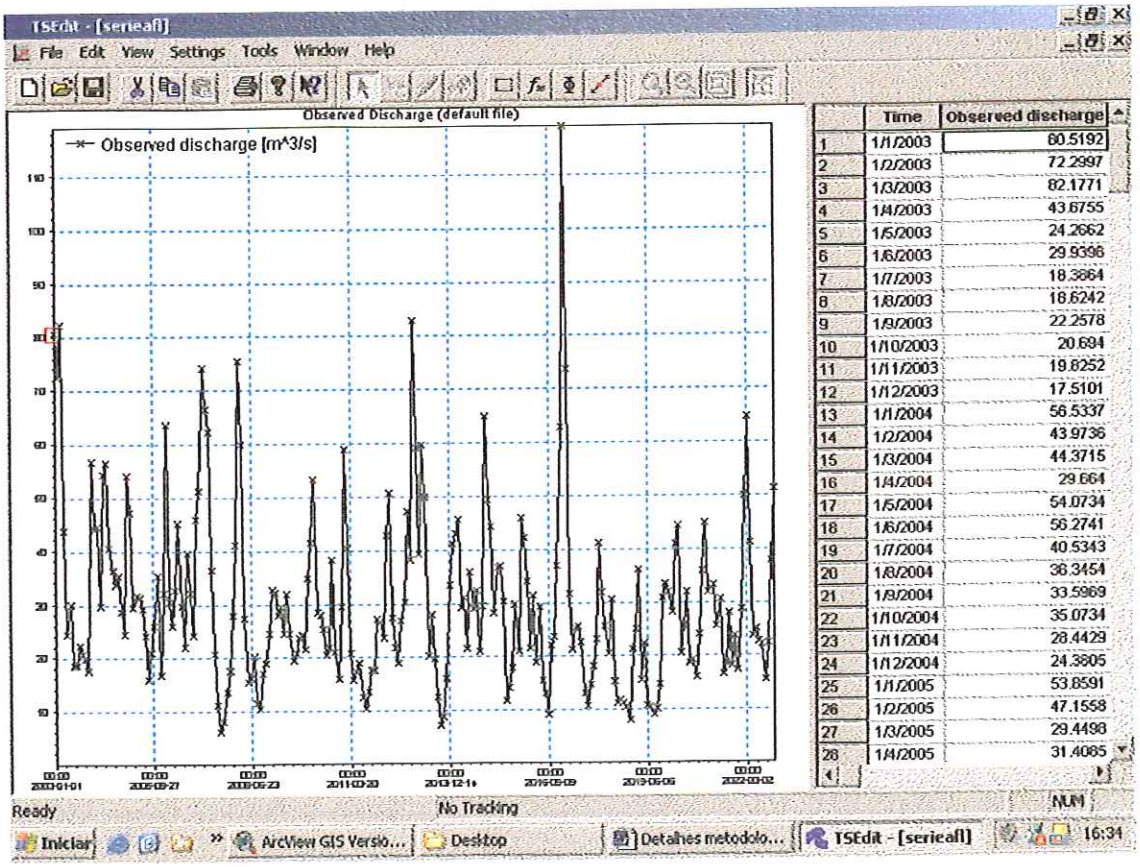


Figura 18: Exemplo do editor de séries históricas TSedit

Freqüentemente, vários usuários recebem água da mesma fonte. Em situações de escassez, o conflito de como distribuir a água disponível entre os usuários é solucionado pelo modelo através de duas alternativas: "Regras de Prioridade Local" e "Regras de Prioridade Global". A opção deve ser definida no início da simulação.

As Regras de Prioridade Local estabelecem que, quando mais de um usuário retira água do mesmo nó, deve-se criar uma relação de prioridades entre eles. O primeiro usuário da lista irá receber, se possível, toda a sua demanda pela água, o segundo usuário irá receber o restante da água e assim por diante. Em outras palavras, a água não é repartida, e o último usuário da lista pode ficar sem água para seu consumo.

Já na Regra de Prioridade Global, a água é distribuída de acordo com certas regras que podem afetar qualquer nó do sistema. Por exemplo: pode-se definir uma regra que garanta a demanda de um usuário mais a jusante do rio; nenhum outro usuário irá receber água até que a demanda do primeiro esteja garantida. Várias regras podem ser definidas e cada uma pode ter a sua importância. Os tipos de regras mais usados são: garantir a demanda, como estipulada nas séries temporais, dos usuários da água; obrigar um mínimo fluxo em um determinado nó; armazenar água nos reservatórios em um nível especificado.

No sistema em estudo, é utilizada a Regra de Prioridade Local, pois considera-se que o nó de onde serão atendidas as diversas demandas é a Represa do Jaguari. A lista de prioridades é alterada a cada cenário, para permitir uma avaliação dos impactos decorrentes das diversas regras operacionais do sistema.

5.1.1 Simulação de Rios

Os rios são representados pelos arcos do sistema. São desenhados automaticamente entre os usuários da água (abastecimento urbano e industrial, irrigação, usinas hidrelétricas) e os nós de captação e retorno do fluxo. Os arcos de coloração roxa representam os trechos em que o escoamento é simulado pelo MIKE BASIN através do método de Muskingun (figura 03), que simula escoamentos não-pemanentes gradualmente variados, tradicionalmente aplicado em hidráulica fluvial. Os arcos de coloração preta representam trechos de captação e lançamento. Os arcos verdes indicam prioridade no abastecimento. Os azuis são digitalizados na definição do sistema e não são modelados.

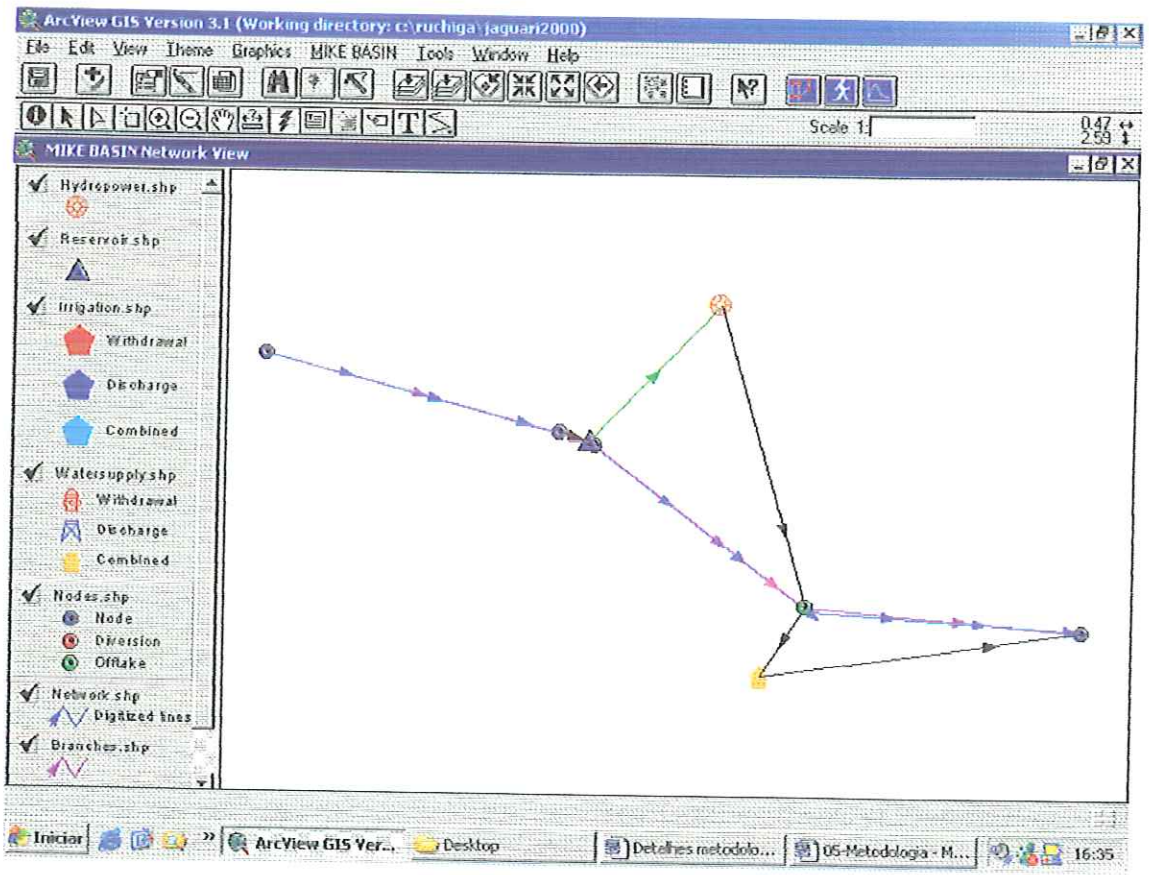


Figura 19: Esquema de arcos e nós do MIKE BASIN

O escoamento em rios se desenvolve numa seção mais estreita, com menor profundidade e maior velocidade que em reservatórios. Um dos métodos mais utilizados para a simulação do escoamento em rios é o modelo Muskingun (TUCCI, 1998).

Este modelo foi concebido para a modelagem da propagação de cheias em cursos d'água, onde a complexidade da geometria das calhas principal e de inundação dificulta a modelagem hidráulica do escoamento.

5.1.2 Simulação de Reservatórios

O MIKE BASIN pode simular sistemas de reservatórios destinados aos usos múltiplos da água. O desempenho de políticas operacionais é simulado para cada reservatório através das curvas de regras operacionais. Estas curvas definem o volume de armazenamento, nível de água e vazão como função do nível do reservatório e do tempo.

Há dois tipos de reservatórios que podem ser modelados pelo MIKE BASIN: "Standard Reservoir" e "Allocation Pool Reservoir". O primeiro considera o reservatório como um único armazenamento físico e todos os usuários captam água do mesmo volume disponível, respeitando uma política operacional. Este modelo foi adotado no sistema em estudo.

O "Allocation Pool Reservoir" tem um armazenamento físico, mas os usuários da água possuem, individualmente, certos volumes de armazenamento destinados a eles e outro volume que tem a finalidade de garantir uma liberação mínima que garanta a sustentabilidade do rio à jusante do reservatório.

As regras de operação, que devem ser fornecidas, são definidas para várias zonas de armazenamento e podem variar com o tempo (Figura 20).

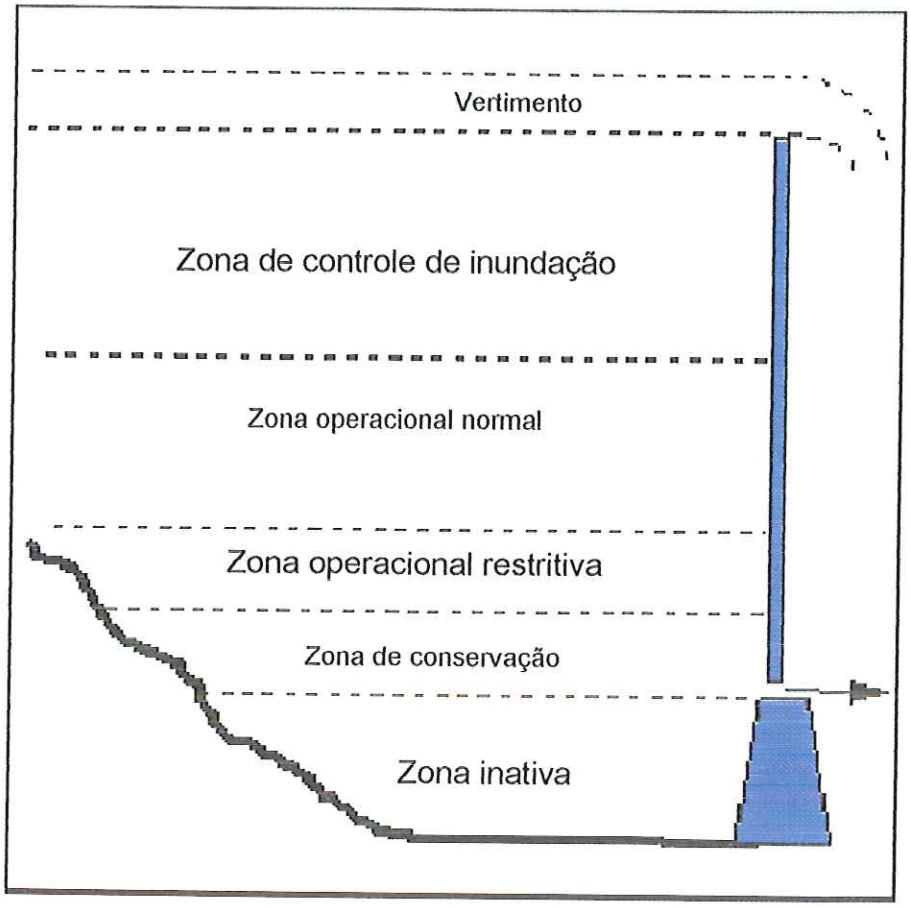


Figura 20: Zonas de armazenamento dos reservatórios

- Zona de controle de inundação: serve para diminuir o impacto de grandes inundações. Em circunstâncias normais, o nível do reservatório é mantido na zona de controle de inundação para proteger contra enchentes e armazenar água para abastecimento. Se o nível da água estiver nesta zona, a água é liberada segundo uma vazão máxima definida pelo usuário.

- Zona operacional normal: reserva de água para todas as demandas.

- Zona operacional restritiva: se o nível de água estiver nesta zona, as demandas são atendidas parcialmente. Em períodos de seca, a liberação do reservatório pode ser reduzida de acordo com uma certa fração definida para cada usuário. Se o reservatório estiver em um nível reduzido 1, a demanda para determinado usuário é reduzida por um fator de redução 1. Se o reservatório estiver em um nível 2 abaixo de 1, a demanda será reduzida por um fator de redução 2.

- Zona de conservação: se a água estiver nesta zona, só será liberada para manutenção da vazão mínima especificada.

- Zona inativa: volume morto do reservatório. Apenas evaporação, precipitação e infiltração influenciarão nesta zona.

A curva cota x área x volume deve ser fornecida e o modelo confere se ela obedece a seguinte relação:

$$V(h_{i+1}) \geq V(h_i) + A(h_i) \cdot (h_{i+1} - h_i) \qquad (8)$$

Na equação (8) h, A e V correspondem, respectivamente, à cota, área e volume. Em outras palavras, para cada cota subseqüente o acréscimo no volume deve, pelo menos, ser a área no estágio anterior multiplicada pela diferença de altura. Durante a simulação, MIKE BASIN faz interpolações nas curvas e, se houver qualquer resultado fora dela, aparece uma mensagem de erro na hora da simulação.

Dados de precipitação (mm/dia) e evapotranspiração potencial (mm/dia) também são necessários. A Figura 21 apresenta a entrada dos dados de precipitação no TSEdit.

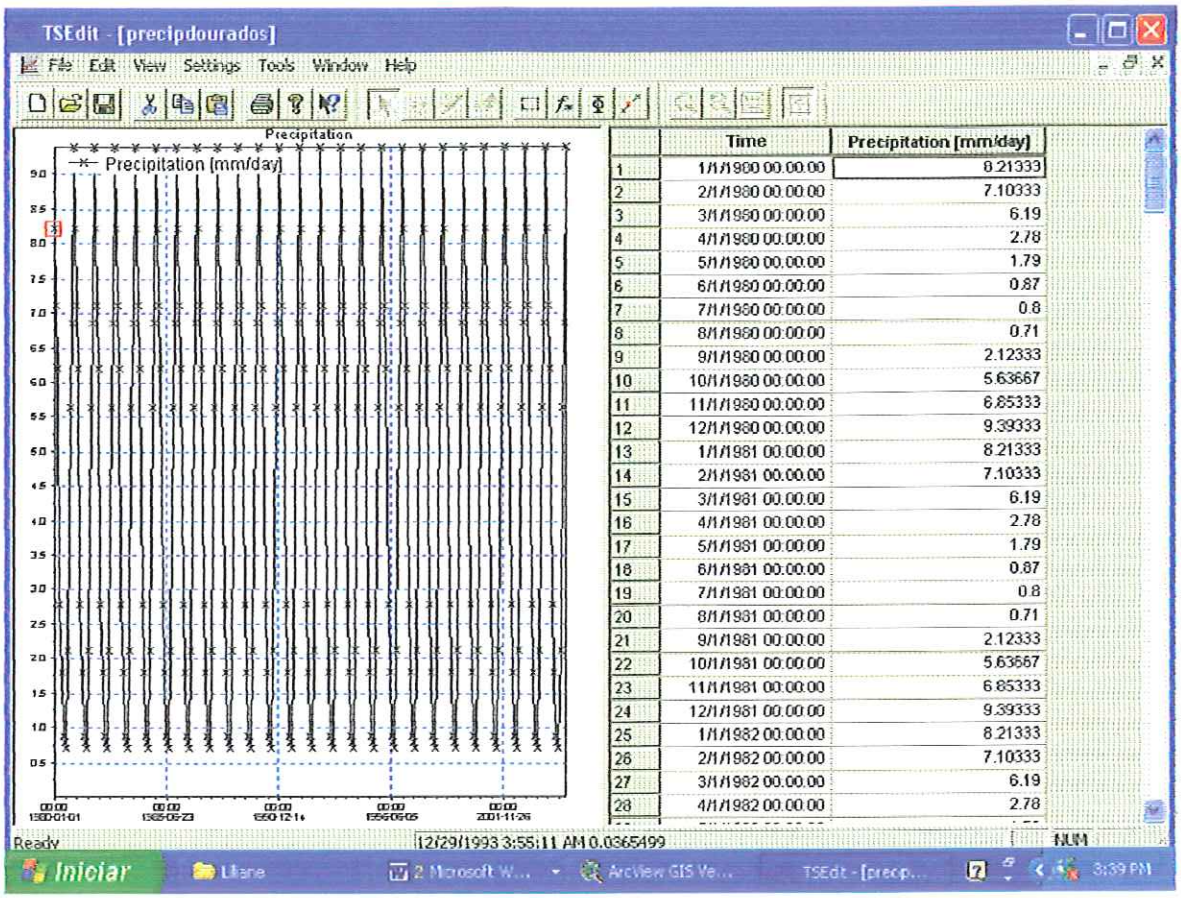


Figura 21: Entrada dos dados de precipitação (mm/dia) no TSEdit

Em caso de estiagens, as liberações do reservatório podem ser reduzidas. Efetivamente, as liberações são reduzidas em um determinado fator para cada um dos níveis críticos de água.

Os fatores de redução devem ser especificados para cada um dos usuários de jusante. Para o reservatório padrão, dois fatores devem ser especificados.

Os fatores de redução são usados durante a simulação, dependendo dos níveis encontrados, de acordo com o especificado na série temporal de controle operacional.

O fator de perda deve ser especificado para cada usuário à jusante. Representa as perdas no canal, por evaporação ou infiltração. Esta perda é uma taxa constante. O valor é entre 0 e 1, onde 0 representa ausência de perdas e 1, perda total.

A perda no sistema de abastecimento é compensada pela seguinte equação 11:

$$W = \frac{D}{(1 - Fp)} \qquad (11)$$

Onde:

D= demanda do usuário

W= Quantidade de água a ser extraída do reservatório.

Fp= Fator de perda

Reservatórios geralmente requerem uma taxa de liberação para vazão ecológica. Tais necessidades podem ser especificadas em nós de controle à jusante do reservatório. Uma liberação máxima pode ser excedida em casos onde há vertedor sobre a barragem.

5.1.3 Simulação de Sistemas de Irrigação

A demanda de água para irrigação pode ocorrer de duas maneiras: diretamente, através de uma série histórica, ou indiretamente, através de dados gerais relacionados à agricultura (Figura 22), a partir dos quais o MIKE BASIN calcula a necessidade de água.

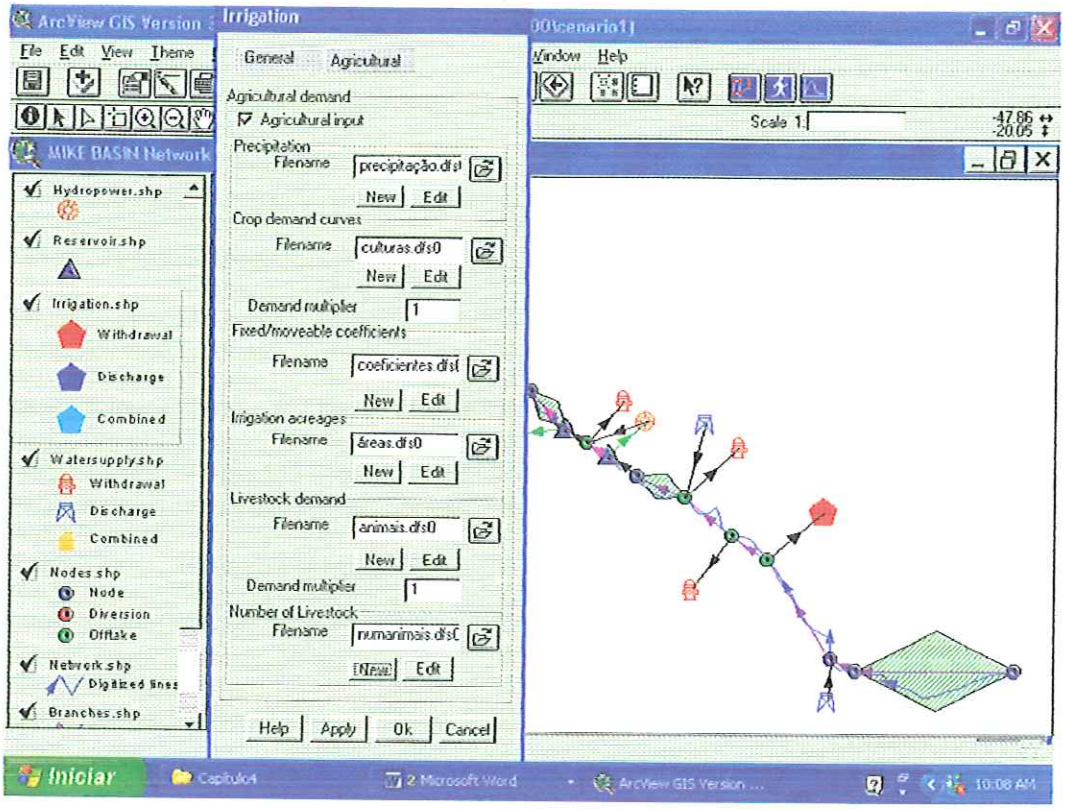


Figura 22: Entrada de dados de consumo de água na irrigação

Os dados indiretos são: precipitação; culturas plantadas e suas demandas pela água durante o ano; área irrigada; coeficiente de ajuste de culturas. Pode-se optar pelos coeficientes 1 e 0. O primeiro indica que a demanda pela água dos equipamentos de irrigação leva em conta também a chuva. O ajuste é feito, para cada intervalo de tempo, comparando-se a necessidade de água de uma cultura (C) e a quantidade de chuva em um determinado período (R) e, dessa forma, a quantidade de água necessária para irrigação (I) pode ser computada da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} &\text{Se} \quad C > R \quad \Rightarrow \quad I = C - R \\ &\text{Se} \quad C < R \quad \Rightarrow \quad I = 0 \end{aligned} \qquad (12)$$

O coeficiente 0 indica que não se deve levar em consideração a precipitação, pois a cultura é irrigada regularmente por equipamentos.

A dessedentação de animais também é considerada uso agrícola e está inserida, apesar de outra natureza, no modelo "irrigação". O consumo de água é estimado em função do número de animais de cada criação.

5.1.4 Simulação de Sistemas de Abastecimento urbano e industrial

Há três tipos de esquemas para abastecimento urbano e industrial: captação, lançamento e a combinação dos dois (figura 23).

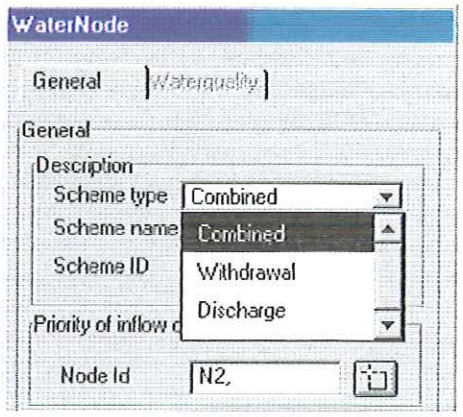


Figura 23: Esquemas de Abastecimento e lançamento de águas

Os dados necessários são as séries de demanda ou lançamentos, em m^3/s, a fração de água captada nos aqüíferos (quando se trabalha com água subterrânea) e a fração de água que retorna aos rios, em esquemas combinados. No módulo de qualidade de água, o modelo incorpora as características qualitativas do lançamento de efluentes.

5.1.5 Simulação de Usinas hidrelétricas

Embora a utilização de água para geração de energia elétrica seja considerada como uso não consuntivo dos recursos hídricos, a geração hidráulica de energia impõe custos sociais de sustentabilidade aos sistemas hídricos, os quais não têm sido levados em consideração pelo setor elétrico na formação das tarifas de energia elétrica (CARRERA-FERNANDEZ & GARRIDO, 2002, p.240).

Segundo os autores, o setor elétrico impõe custos à sociedade ao:

- restringir, nessa bacia, o uso dos recursos hídricos à montante da geração, tornando indisponíveis assim grandes quantidades desses recursos, que poderiam ser utilizadas em outras finalidades;
- provocar perdas por evaporação nos reservatórios de regularização de vazão
- alterar o padrão de viabilidade do escoamento à jusante, para o caso das usinas que trabalham no pico de consumo

O modelo pode calcular geração de energia em conexão com a operação de reservatórios. Os principais dados necessários são a potência gerada pela usina, o desnível geométrico e a eficiência das turbinas. A potência gerada é calculada pela seguinte fórmula:

$$P = \Delta h \cdot Q \cdot \eta \cdot g \cdot \rho \qquad (13)$$

Em que:

P: potência gerada (kw)

Δh: carga hidráulica (N.A. montante – N.A. jusante) (m)

Q: vazão que passa através das turbinas (m^3/s)

η: eficiência das turbinas (%)

g: constante de aceleração da gravidade (m/s^2)

ρ: densidade da água

A demanda de água para geração de energia é calculada através da resolução iterativa da eq. (13) para Q. Quando a diferença de altura é pequena, as turbinas são desligadas. Primeiro, porque a operação se torna ineficiente. Segundo, porque um grande volume de água seria requerido. Deste modo, pode ser fixado um Δh mínimo para operação das turbinas e, se Δh for menor que Δh mínimo, nenhuma água passará pelas turbinas.

O MIKE BASIN tem uma opção para produzir mais energia que a demanda, dependendo da capacidade instalada, no momento em que tiver um excedente de água no reservatório. Quando o reservatório está acima do nível de controle de inundação, a água que seria vertida passa pelas turbinas. O que não passar devido à capacidade instalada é, então, vertido.

5.1.6 Simulação de Águas Subterrâneas

Módulo de simulação opcional. Neste modelo, os aqüíferos interagem com os recursos hídricos superficiais através de: infiltração do rio para o aqüífero, recarga subterrânea da bacia para o aqüífero, descarga do aqüífero para o rio e do bombeamento de água para os usuários. Os dados de infiltração e recarga devem ser fornecidos, enquanto que a descarga do aqüífero para o rio é computada pelo MIKE BASIN através de um modelo hidráulico conceitual de reservatório linear, onde a vazão de saída é proporcional ao armazenamento.

5.1.7 Simulação de Qualidade da Água

Com o módulo de qualidade de água (não utilizado neste estudo), o MIKE BASIN simula o transporte e degradação em "steady-state" de substâncias que afetam a qualidade da água em rios e reservatórios: amônia, nitrato, oxigênio dissolvido, fósforo total, nitrogênio total, Escherichia coli e qualquer outra substância de interesse do usuário, desde que sua cinética seja de primeira ordem.

5.1.8 Apresentação dos resultados

Os resultados do modelo incluem informação sobre o desempenho individual de cada esquema, como reservatórios, unidades de geração de energia, demandas de água, etc. Para o período de simulação a magnitude e a freqüência de qualquer escassez hídrica podem ser ilustradas. Além disso, séries de vazões do rio são simuladas para cada nó do sistema, habilitando o usuário à tomada de decisão. Todos os resultados podem ser visualizados através de séries de dados, gráficos e animação. Há também a possibilidade de gerar os resultados em tabelas no formato HTML (Hypertext Mark-up Language) para a Internet, incluindo automaticamente a geração de "hyperlinks" aos nós do sistema. Podem ser computadas médias mensais e estatísticas descritivas para qualquer etapa da simulação.

5.2. Modelo de Rede de Fluxo da Bacia do Jaguari

Neste item descreve-se a confecção do modelo de rede de fluxo da bacia do Jaguari. Os dados básicos de entrada do modelo consistem em uma série temporal de vazões para a área da bacia em cada nó. Dados de entrada adicionais definem as características dos reservatórios, regras de operação dos reservatórios, séries de dados meteorológicos e informações de captação e lançamento dos usuários de água. As opções de simulação podem incluir

modelos de balanço quantitativo de águas superficiais, de águas subterrâneas e modelo de qualidade de água. Devido à disponibilidade de dados, as simulações serão realizadas no modelo de balanço quantitativo.

Um dos principais requisitos à utilização de modelos de planejamento e gestão de recursos hídricos é a quantidade e representatividade das informações sobre o sistema a ser simulado. Fornecer parâmetros autênticos para o modelo de simulação é fundamental para permitir resultados confiáveis.

Para a confecção do modelo da bacia do Jaguari, foram obtidos dados junto a fontes oficiais como: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Operador Nacional do Sistema (ONS), Companhia Energética de São Paulo (CESP), Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) do estado de São Paulo, Agência Nacional de Águas (ANA), Comitê da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul (CBH-PS), entre outros.

O modelo desenvolvido para o sistema de Recursos hídricos em estudo é composto pelos seguintes componentes (figura 24):

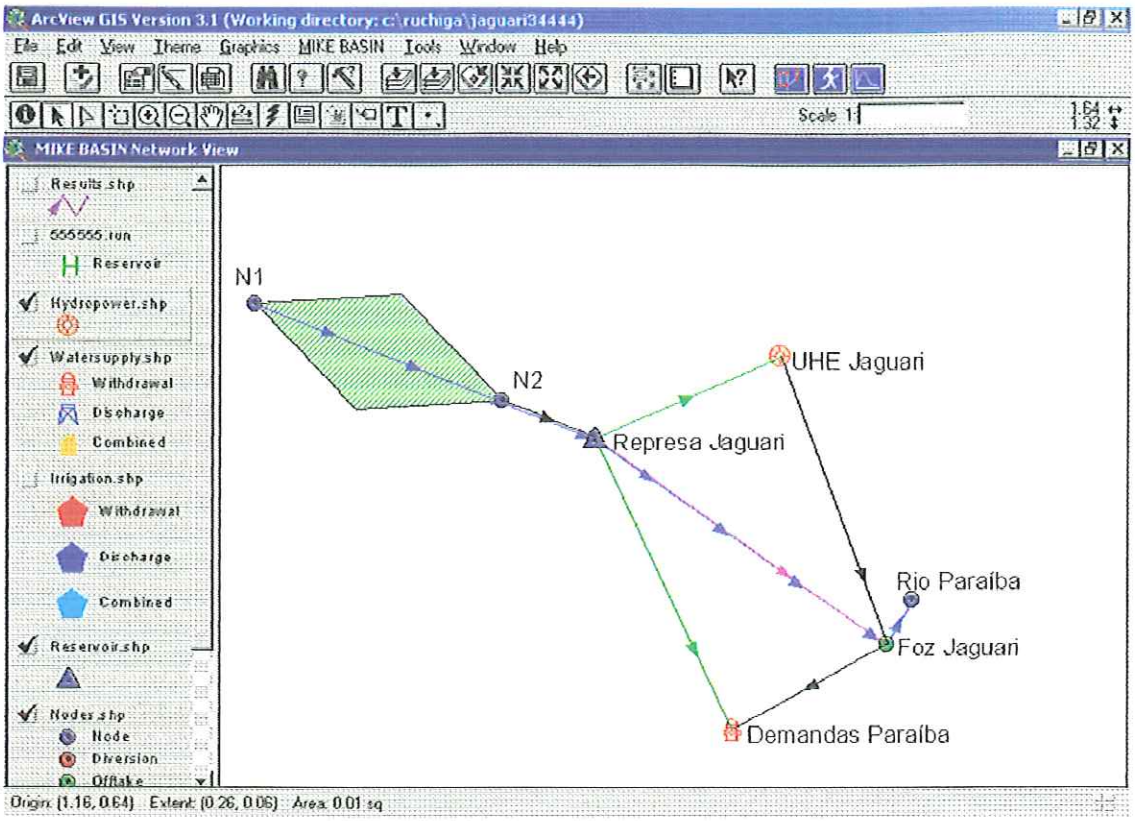


Figura 24: modelo do SRH da Bacia do Jaguari.

As principais componentes do sistema são:

5.2.1. N1 – Nó simples

Utilizado para caracterizar o início do sistema, ou seja, o ponto mais a montante. Neste caso, representa a nascente do rio Jaguari. O único atributo do nó (figura 25) é a sua identificação.

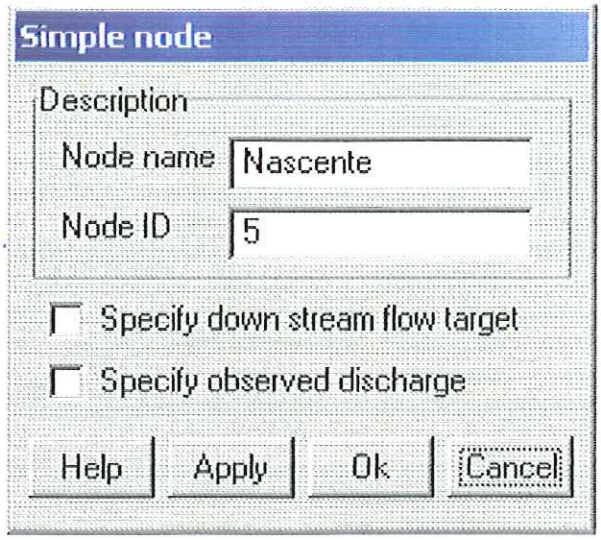


Figura 25: Caixa de entrada de dados para o nó "N1".

5.2.2. N2 - Nó à montante do reservatório de Jaguari

Representa o ponto de medição das vazões afluentes ao reservatório de Jaguari. Neste nó, são consideradas as vazões naturais, já consistidas, obtidas junto ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) para a represa de Jaguari, entre os anos de 1931 e 2001 (tabela 11, Figura 26). Esta série de vazões já incorpora as séries de vazões de usos consuntivos aprovados pela ANA. Portanto, todos os usos cadastrados à montante da represa são atendidos antes deste nó. A série de vazões restantes (ONS) é utilizada para o abastecimento do reservatório e constitui o principal atributo deste nó.

Tabela 11: Série de vazões naturais consistidas afluentes a represa de Jaguari

JAGUARI	Vazões (m3/s)											
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1931	48	57	61	51	31	27	24	21	22	24	20	42
1932	35	47	44	33	31	38	26	22	22	21	21	37
1933	46	35	34	24	24	21	20	19	18	19	19	31
1934	45	41	37	29	25	23	19	17	16	18	15	42
1935	34	49	47	35	28	26	22	21	24	32	23	21
1936	24	30	61	33	22	18	16	18	18	17	17	53
1937	68	71	47	46	34	28	22	19	16	25	31	50
1938	56	47	47	42	31	25	21	22	20	28	30	34
1939	43	41	41	42	29	22	19	16	15	15	18	25
1940	32	68	40	28	23	19	15	14	14	17	24	25
1941	25	24	27	21	16	14	14	11	24	23	30	34
1942	31	43	43	37	26	22	21	17	16	16	18	35
1943	39	37	41	29	21	18	15	16	15	22	19	28
1944	30	53	62	35	25	20	18	14	13	12	24	22
1945	32	64	37	32	24	33	24	18	18	17	22	29
1946	47	42	48	36	26	23	20	16	15	19	19	24
1947	60	61	83	44	35	29	29	25	28	31	32	60
1948	49	59	61	44	36	27	25	24	22	24	26	32
1949	45	49	40	30	24	21	18	15	13	15	17	31
1950	56	68	57	48	34	27	22	18	16	22	27	38
1951	36	53	49	38	26	21	19	18	14	18	20	20
1952	46	74	63	36	26	28	20	17	18	16	21	21
1953	18	23	21	25	19	15	12	12	12	15	23	28
1954	26	38	31	22	26	20	15	12	11	16	11	20
1955	33	23	30	22	17	15	12	13	11	11	18	22
1956	27	27	35	24	25	26	18	21	17	19	16	20
1957	51	41	47	40	27	22	19	17	28	22	31	31
1958	44	43	47	37	43	35	27	21	22	24	29	35
1959	48	44	49	38	28	21	17	18	15	15	22	25
1960	40	56	63	36	31	26	20	18	16	20	23	58
1961	62	61	70	44	35	28	23	19	16	17	22	28
1962	45	58	69	32	26	21	19	17	18	30	27	55
1963	46	65	46	24	20	17	15	14	11	17	17	18
1964	22	45	26	21	19	15	15	13	12	18	17	36
1965	59	49	38	27	27	20	20	15	14	22	26	38
1966	71	44	64	38	28	22	20	19	16	22	31	57
1967	78	84	79	45	33	28	23	19	21	24	29	37
1968	46	30	40	31	23	19	16	15	14	14	13	23
1969	20	26	21	22	18	15	12	12	11	16	35	26
1970	66	78	48	33	26	23	19	18	24	21	21	22
1971	22	15	26	13	12	16	16	13	11	23	20	33
1972	36	50	38	27	22	19	21	22	18	29	26	25
1973	38	40	31	34	19	23	23	16	17	25	26	42
1974	50	29	41	30	25	24	16	13	14	16	16	30
1975	23	41	30	20	15	13	11	9	7	11	21	45
1976	36	46	44	41	38	32	41	32	41	34	34	54
1977	45	29	36	46	25	23	17	14	14	16	22	39
1978	42	31	35	18	18	21	17	11	11	11	32	24
1979	30	27	27	22	21	14	14	17	20	19	31	34
1980	36	39	30	35	19	19	13	13	12	14	17	45
1981	54	30	31	23	15	14	13	10	10	25	34	31
1982	48	44	66	39	25	29	21	22	14	28	32	61
1983	64	71	52	52	53	74	42	30	53	40	39	49
1984	43	28	31	33	32	19	16	18	19	11	13	22
1985	45	50	51	32	26	18	14	12	16	10	17	18
1986	19	29	51	22	20	13	12	18	12	11	18	51
1987	51	41	44	40	44	40	25	20	21	21	19	21
1988	45	60	60	40	46	37	25	21	17	24	21	25
1989	53	57	55	36	25	24	28	20	19	15	18	26
1990	41	22	38	24	21	15	18	14	18	20	19	15
1991	45	48	66	53	30	24	18	15	16	29	13	13
1992	19	20	22	15	18	11	10	10	21	23	30	30
1993	27	47	41	32	23	23	16	13	22	19	11	15
1994	25	31	35	26	20	14	12	10	8	13	15	30
1995	33	98	49	31	24	19	22	15	13	27	19	26
1996	58	50	76	37	24	19	15	16	29	23	24	34
1997	53	38	34	25	21	25	16	12	16	15	27	25
1998	30	48	33	22	24	18	12	11	16	26	16	24
1999	70	53	43	26	19	21	16	12	12	10	12	20
2000	37	39	33	22	13	12	10	11	20	10	22	36
2001	31	35	29	25	16	12	11	11	12	26	21	38
MLT	42	46	45	32	26	23	19	17	17	20	22	32

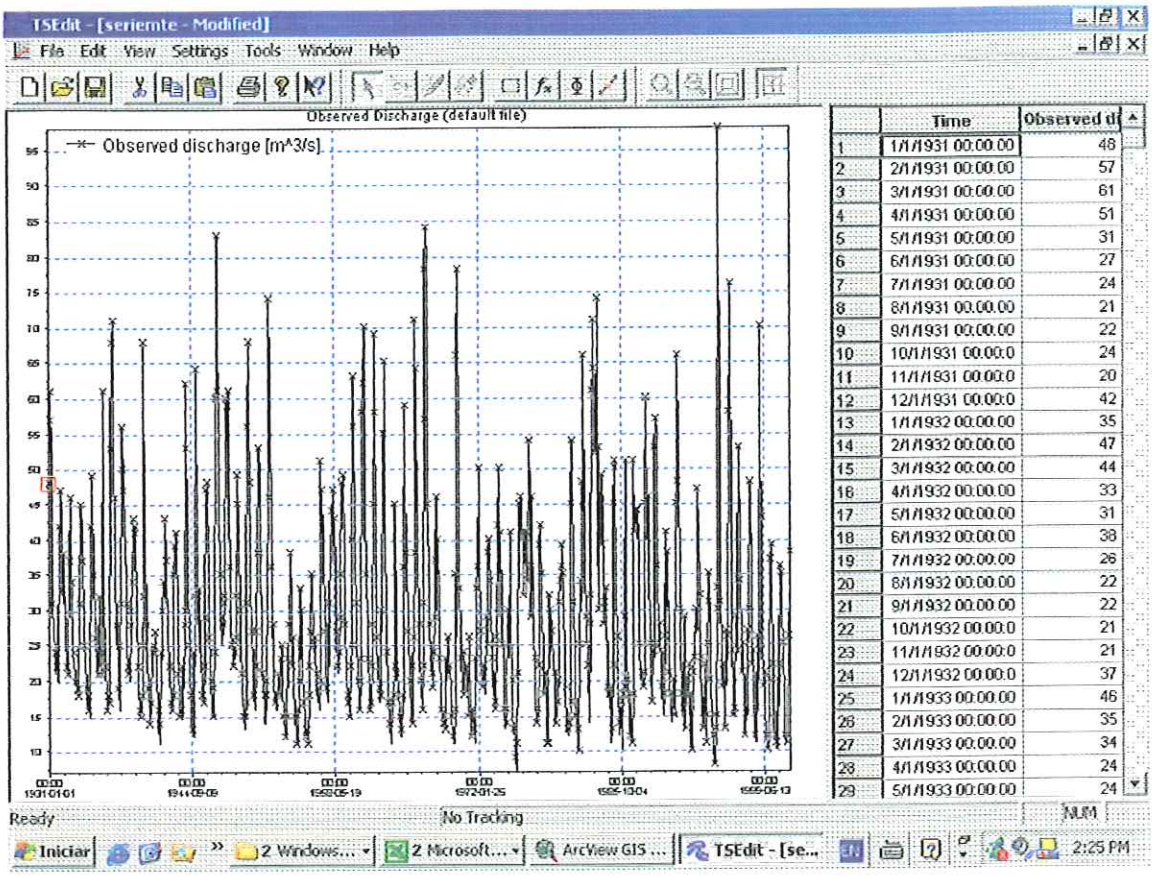


Figura 26: Série de vazões naturais consistidas afluentes à represa de Jaguari

Figura 27: Caixa de atributos

A entrada dos dados é feita na caixa de atributos (figura 27), onde consta a identificação do nó e o arquivo que contém a série de dados de vazões observadas.

5.2.3. Represa Jaguari

Nó do tipo "reservatório padrão", considerado como um único armazenamento físico onde todos os usuários captam água do mesmo volume disponível, respeitando uma política operacional. O nível de água para o início da simulação é adotado em função do cenário a ser simulado. A topologia do trecho é fornecida através da especificação dos nós de montante e dos usuários, bem como a ordem de prioridade dos mesmos. A figura 28 apresenta a caixa de diálogo para entrada de dados de reservatórios.

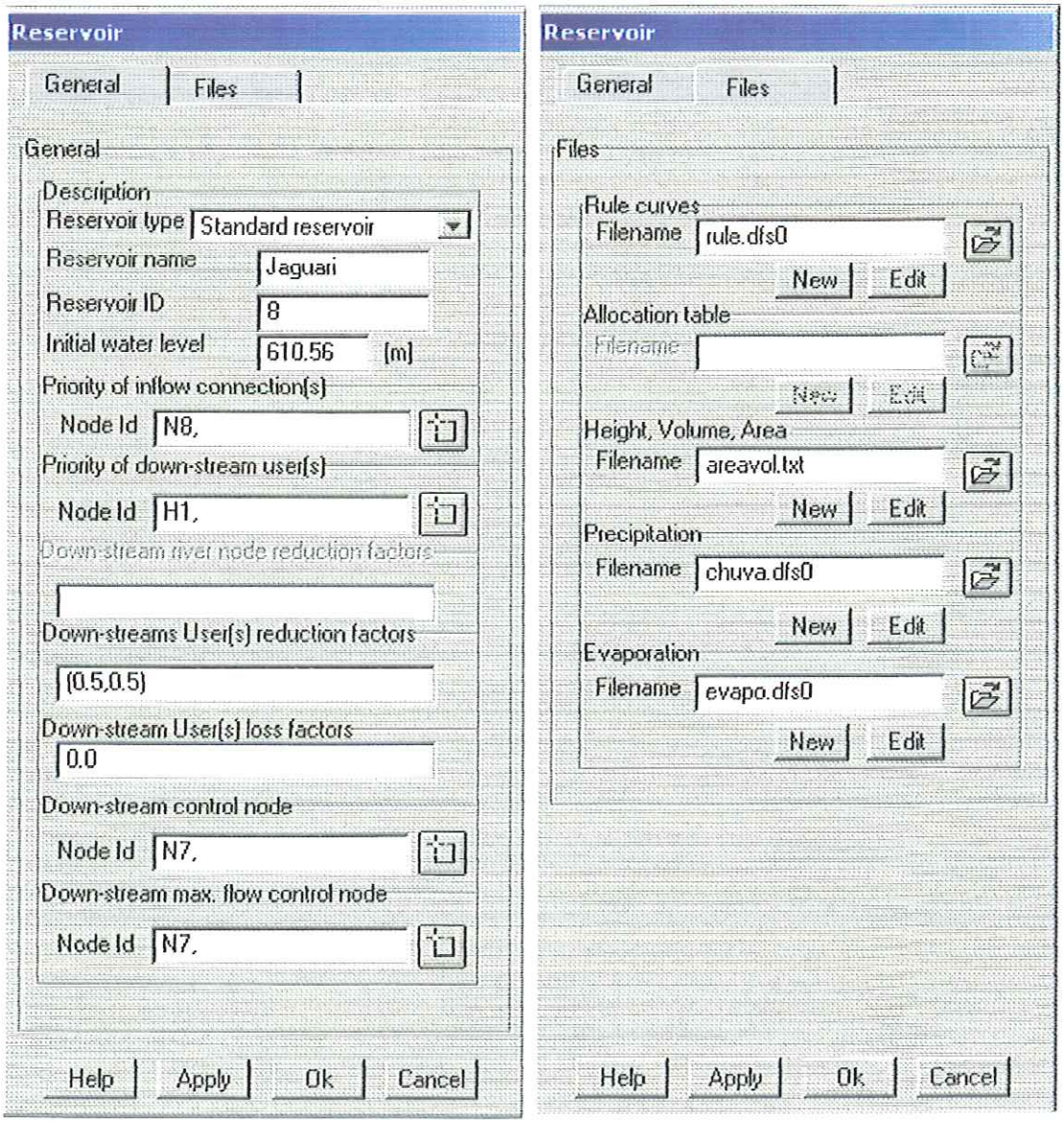


Figura 28: Caixas de diálogo para nós do tipo Reservatório

As séries temporais utilizadas foram: vazões afluentes, precipitação e evaporação. Foram consideradas as regras operacionais fornecidas pela Companhia Energética de São Paulo (CESP). Para a liberação dos volumes são considerados os seguintes fatores (figura 29):

- Cota máxima do reservatório: 625,80 m
- Cota operacional mínima: 603,20 m
- Cota de controle de cheias: 623,00 m
- Cota máxima do volume morto: 603,20 m
- Cota mínima do volume morto: 600,00 m
- Vazões liberadas a jusante: Conforme demandas.
- Nível de redução: Conforme cenário simulado.

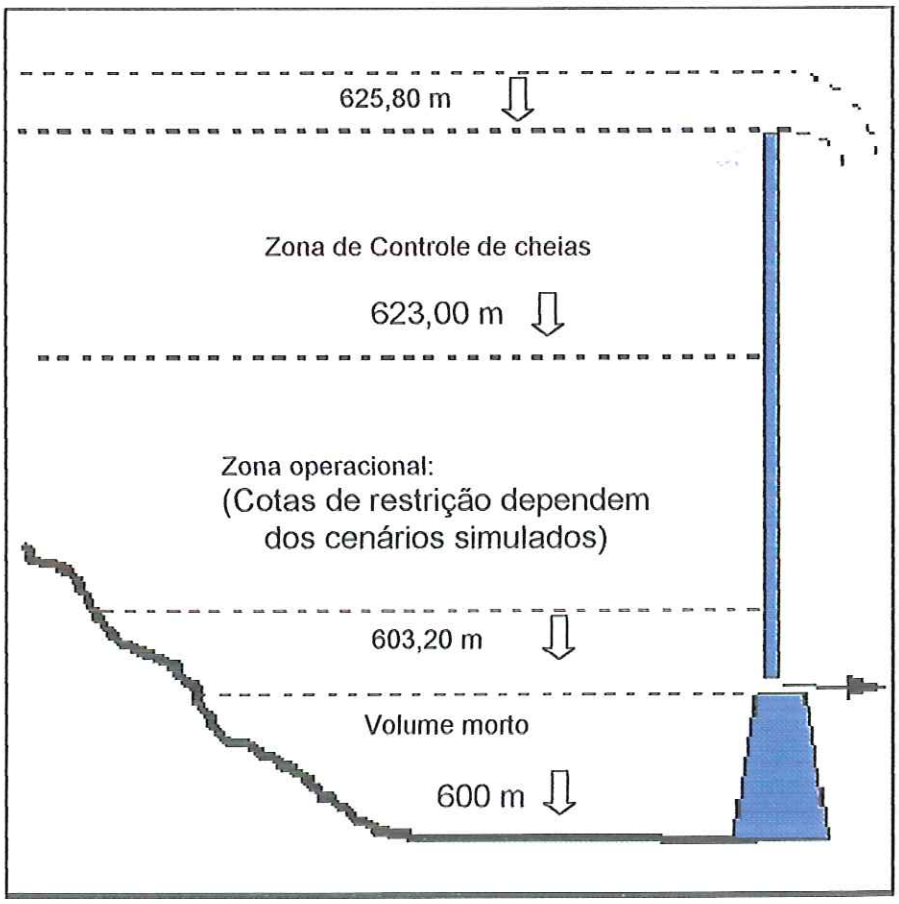
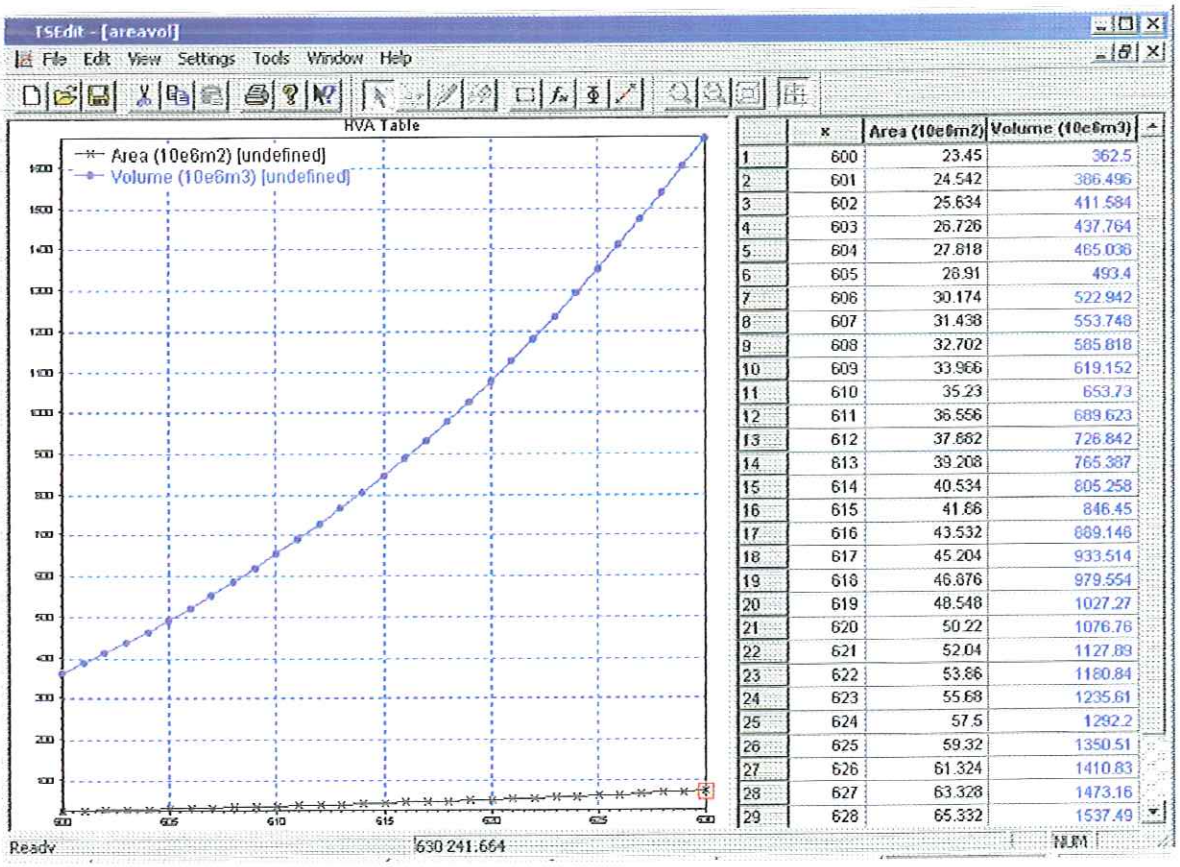


Figura 29: Níveis operacionais da Represa do Jaguari.

Os dados de precipitação foram obtidos junto ao Departamento de Águas e Energia Elétrica do estado de São Paulo (DAEE), referentes ao posto pluviométrico Barragem de Jaguari (E3-055), localizado junto à barragem, com dados entre 1970 e 2000. Os dados de evaporação adotados foram os do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o município de São José dos Campos, coletados entre 1931 e 1990. Os dados de evaporação consistem em valores médios mensais e não em série histórica. Devido a diferença entre os períodos monitorados para vazão, chuva e evaporação, considerou-se o período de 31 anos, entre 1970 e 2000, para as simulações, utilizando a média mensal de evaporação. Este procedimento é adotado em diversos estudos sobre simulação, como em Mauad (2000) e Pinheiro (2003).

Outro dado de entrada é a curva cota x área x volume do reservatório (figuras 30, 31 e 32; tabela 12).



	x	Area (10e6m2)	Volume (10e6m3)
1	600	23.45	362.5
2	601	24.542	386.496
3	602	25.634	411.584
4	603	26.726	437.764
5	604	27.818	465.036
6	605	28.91	493.4
7	606	30.174	522.942
8	607	31.438	553.748
9	608	32.702	585.818
10	609	33.966	619.152
11	610	35.23	653.73
12	611	36.556	689.623
13	612	37.882	726.842
14	613	39.208	765.387
15	614	40.534	805.258
16	615	41.86	846.45
17	616	43.532	889.146
18	617	45.204	933.514
19	618	46.876	979.554
20	619	48.548	1027.27
21	620	50.22	1076.76
22	621	52.04	1127.89
23	622	53.86	1180.84
24	623	55.68	1235.61
25	624	57.5	1292.2
26	625	59.32	1350.51
27	626	61.324	1410.83
28	627	63.328	1473.16
29	628	65.332	1537.49

Figura 30: Tela de Entrada de dados - Curva Cota x Área x Volume

Tabela 12 – Valores de entrada para curva cota x área x volume

Cota (m)	Volume (hm^3)	Área (km^2)	Cota (m)	Volume (m^3)	Área (m^2)	Cota (m)	Volume (m^3)	Área (m^2)
600	362.500	23.450	610	653.730	35.230	620	1,076.760	50.220
601	386.496	24.542	611	689.623	36.556	621	1,127.890	52.040
602	411.584	25.634	612	726.842	37.882	622	1,180.840	53.860
603	437.764	26.726	613	765.387	39.208	623	1,235.610	55.680
604	465.036	27.818	614	805.258	40.534	624	1,292.200	57.500
605	493.400	28.910	615	846.450	41.860	625	1,350.510	59.320
606	522.942	30.174	616	889.146	43.532	626	1,410.832	61.324
607	553.748	31.438	617	933.514	45.204	627	1,473.158	63.328
608	585.818	32.702	618	979.554	46.876	628	1,537.488	65.332
609	619.152	33.966	619	1,027.266	48.548	629	1,603.822	67.336

(fonte: CESP, 1972)

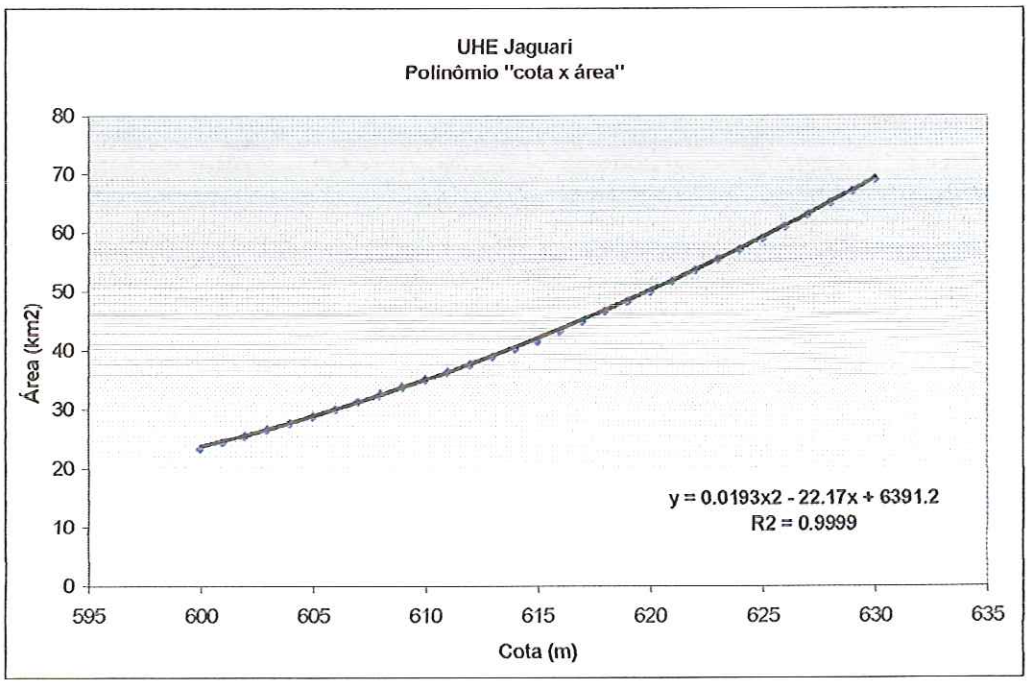


Figura 31: Polinômio Cota x Área

(fonte: CESP, 1972)

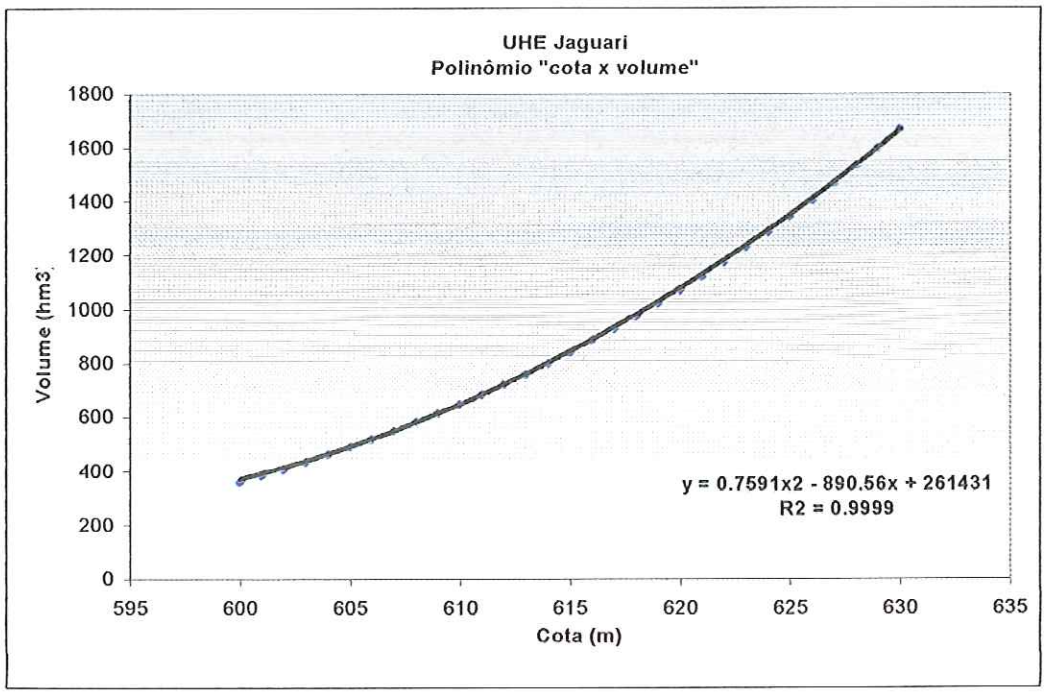


Figura 32: Polinômio Cota x Volume
(fonte: CESP, 1972)

5.2.4. UHE Jaguari

A representação da Usina Hidrelétrica Jaguari é feita através de um nó específico, que desvia água do reservatório e lança para os usuários à jusante. A caixa de diálogo para a entrada dos atributos é mostrada na figura 15. A série temporal de entrada contém valores de energia esperados para a hidrelétrica, variável de acordo com o cenário simulado.

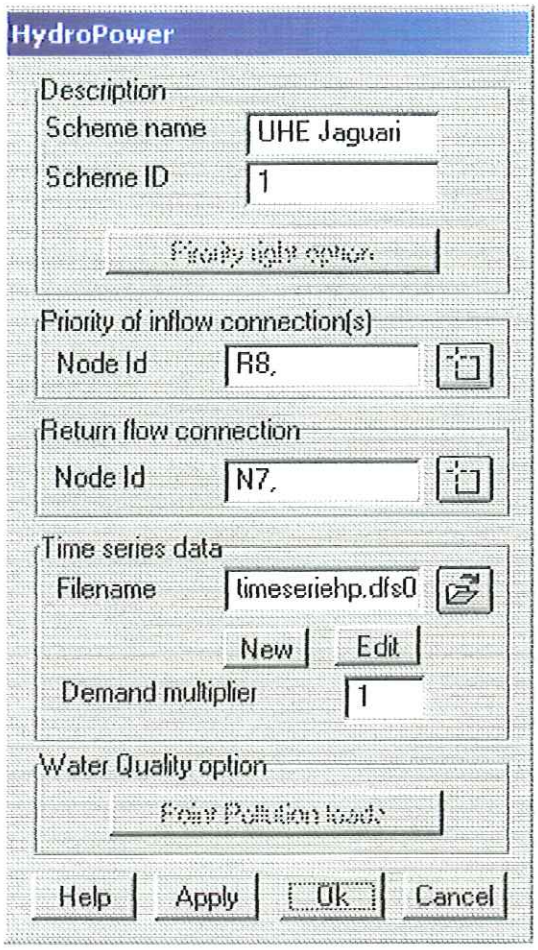


Figura 33: Caixa de diálogo para UHE's

5.2.5. Demandas Paraíba:

Nó do tipo "captação de água", usado para contabilizar o fornecimento de água que deve ser liberado ao rio Paraíba do Sul. O dado de entrada consiste em uma série temporal de demandas de água a serem retiradas do sistema..

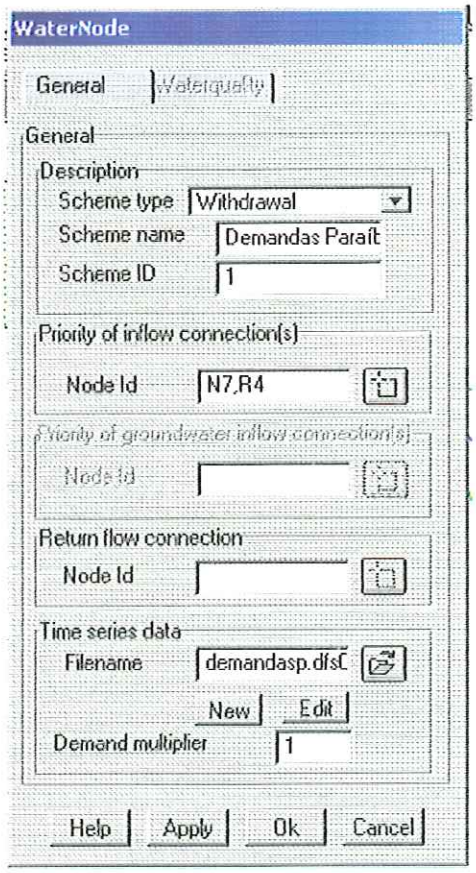


Figura 34: Caixa de entrada para o nó de demandas do Paraíba.

5.2.6. Dados de Saída do Modelo

Os resultados do MIKE BASIN são gerados em forma de planilhas que apresentam os valores de entrada, os valores-meta e os resultados atingidos. A partir da diferença entre metas de abastecimento e valores obtidos foram determinados os índices de desempenho: Confiabilidade, Vulnerabilidade e Resiliência. A figura 35 representa um dos gráficos de saída com os resultados de uma simulação feita no MIKE BASIN.

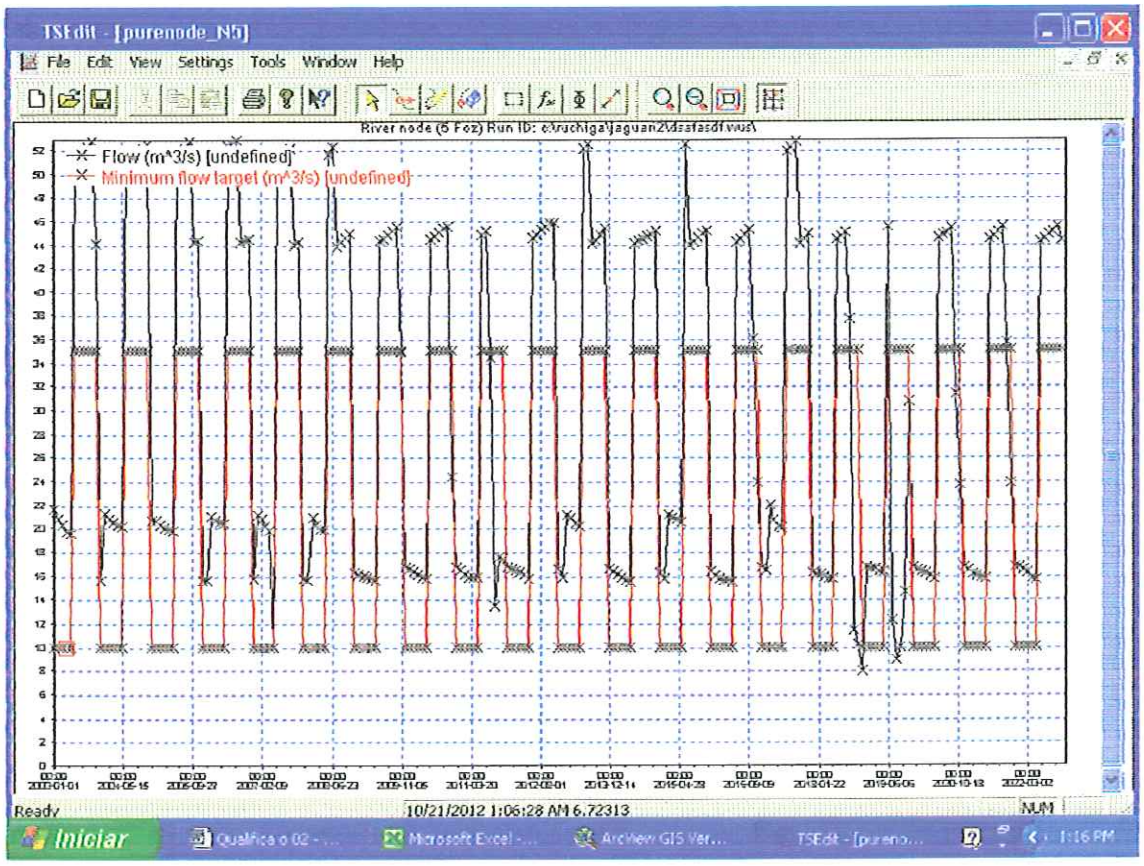


Figura 35: Gráfico de saída do MIKE BASIN

No capítulo "6- Resultados e Discussões", serão descritos os cenários avaliados para as simulações e apresentados os índices de desempenho para o atendimento a cada uma das demandas do sistema.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No modelo de rede de fluxo do Sistema de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Jaguari, aplicou-se o método de Simulação Contínua. A simulação é dita contínua porque o modelo executa os cálculos da seguinte maneira:

No primeiro mês, o modelo parte com os volumes iniciais dos reservatórios fornecidos pelo usuário e efetua os cálculos até o próximo mês. No segundo, parte-se com volumes iniciais iguais aos volumes finais do mês anterior. O procedimento é repetido até o último mês de simulação. Os resultados são fornecidos de forma contínua, do primeiro ao último mês.

Foram realizadas simulações para 04 cenários distintos, conforme a figura 36.

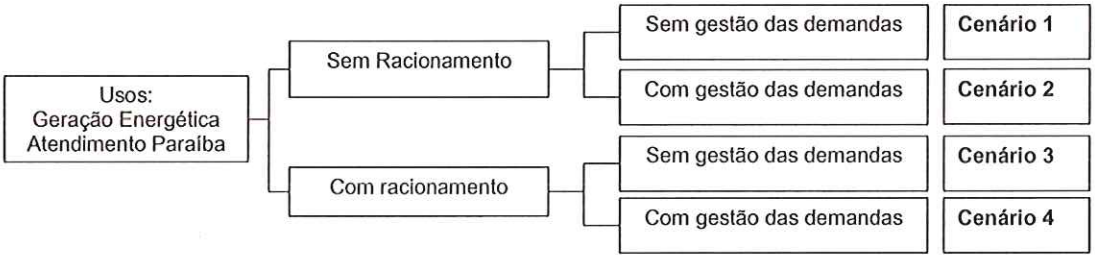


Figura 36 – Cenários simulados para o sistema

As condições de contorno adotadas foram:

- **Usos Simulados:** Geração Energética e Demandas do Paraíba. A energia assegurada para a UHE Jaguari é 14 MW. As demandas do Paraíba são de 10 m^3/s para os meses chuvosos (dezembro a maio) e 42 m^3/s nos meses secos (junho a novembro).

- **Sem racionamento:** As vazões de demandas são fornecidas integralmente para qualquer cota operacional do reservatório.

- **Com racionamento:** Há uma redução de 50% no atendimento à todas as demandas quando o nível do reservatório for inferior à cota 608,5 m (20% do volume útil operacional).

- **Sem gestão das demandas:** As demandas para o rio Paraíba são as da portaria 022/77 do DNAEE - 10 m^3/s no período chuvoso, entre dezembro e maio e 42 m^3/s entre junho e novembro.

- **Com gestão das demandas:** As vazões liberadas no período seco são reduzidas em 5%. O valor adotado é 39,9 m^3/s. As regras operacionais adotadas foram:

Tabela 13: Regras Operacionais

Constantes		**Observações**
Cota máxima do reservatório	625,8 m	(onde há a descarga máxima)
Cota mínima operacional	603,2 m	
Cota de controle de cheias	623 m	(acima desta há vertimentos)
Cota de topo do volume morto	603,2 m	
Cota de fundo do reservatório	600 m	
Taxa de infiltração	0 m^3/s	desconsiderada
Variáveis		**Observações**
Taxa de Racionamento	0,5	50% da demanda
Cota de racionamento (zona operacional restritiva)	608,5 m	20% do Volume Operacional
Liberações mínimas:	10 m^3/s (chuvas) 42 m^3/s (seco)	Demandas Paraíba
Liberações Reduzidas	10 m^3/s (chuvas) 39,9 m^3/s (seco)	5% de redução nos períodos secos

6.1. CENÁRIO 01:

As condições de contorno adotadas para o cenário 1 foram: Simulação do atendimento à geração energética e às demandas do rio Paraíba do Sul, sem racionamento e sem redução das demandas.

Os resultados encontrados foram:

6.1.1 Atendimento à geração energética

Durante os 31 anos de simulação, a geração total de energia foi de 4.245 MW. O índice de confiabilidade representa o atendimento à geração de 14 MW. Nos 372 meses simulados, a meta foi atingida em 57, 41% (figura 37). Nos meses em que a meta não foi atingida, a produção energética foi, em média, de cerca de 53,10% do valor esperado, representada pelo complemento da vulnerabilidade. Do total de meses em que o sistema não cumpriu a meta esperada, em 15,82% houve recuperação. Os índices de desempenho são mostrados na tabela 14 e na figura 38.

Tabela 14: Cenário 1 - Índices de desempenho no atendimento à geração elétrica

Índices de Desempenho	
Confiabilidade	57,41%
Vulnerabilidade	42,90%
Resiliência	15,82%

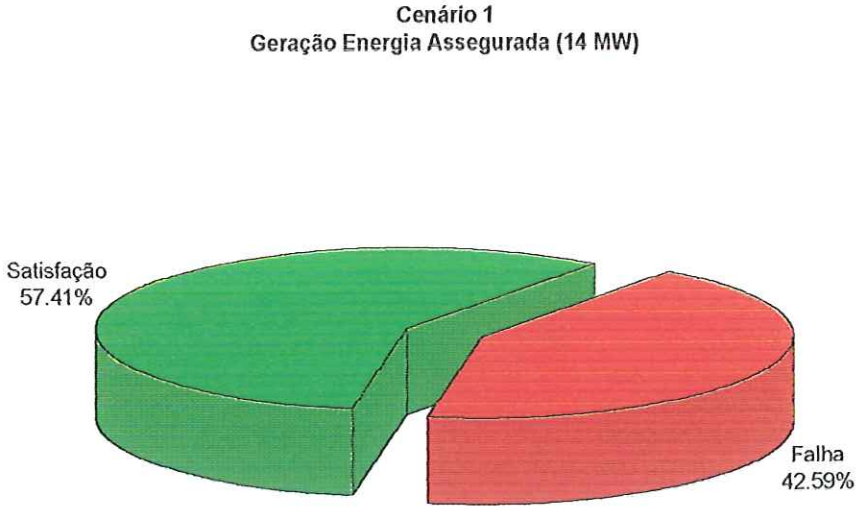
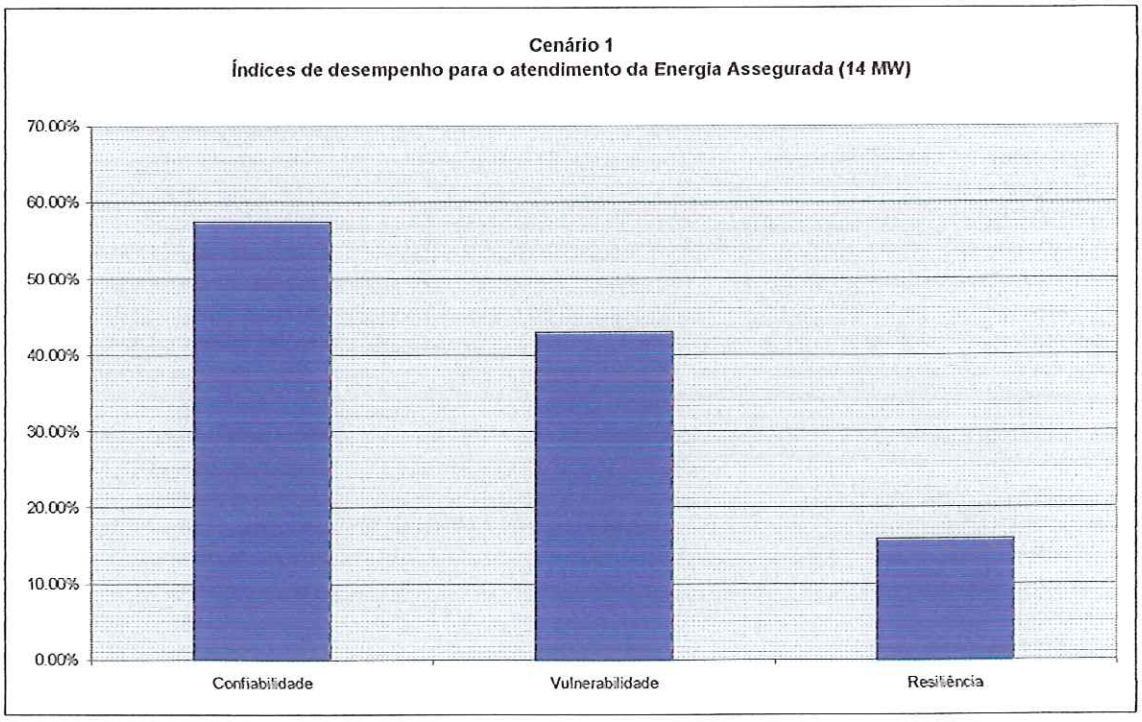


Figura 37: Cenário 1 - Satisfação no atendimento à UHE



Figuras 38: Cenário 1 - Índices de Desempenho para a UHE Jaguari

6.1.2 Atendimento às demandas do Paraíba do Sul

De acordo com os resultados obtidos (tabela 15, figura 39) a confiabilidade no atendimento das demandas do Paraíba do Sul representa um total de 69,00%. A vulnerabilidade do sistema foi de 56,56%, representando déficits significativos em períodos de falha. Em 20,87% destes períodos o abastecimento foi normalizado no mês seguinte.

Tabela 15: Cenário 1 - Índices de desempenho no atendimento às demandas do Paraíba

Índices de Desempenho	
Confiabilidade	69,00%
Vulnerabilidade	56,56%
Resiliência	20,87%

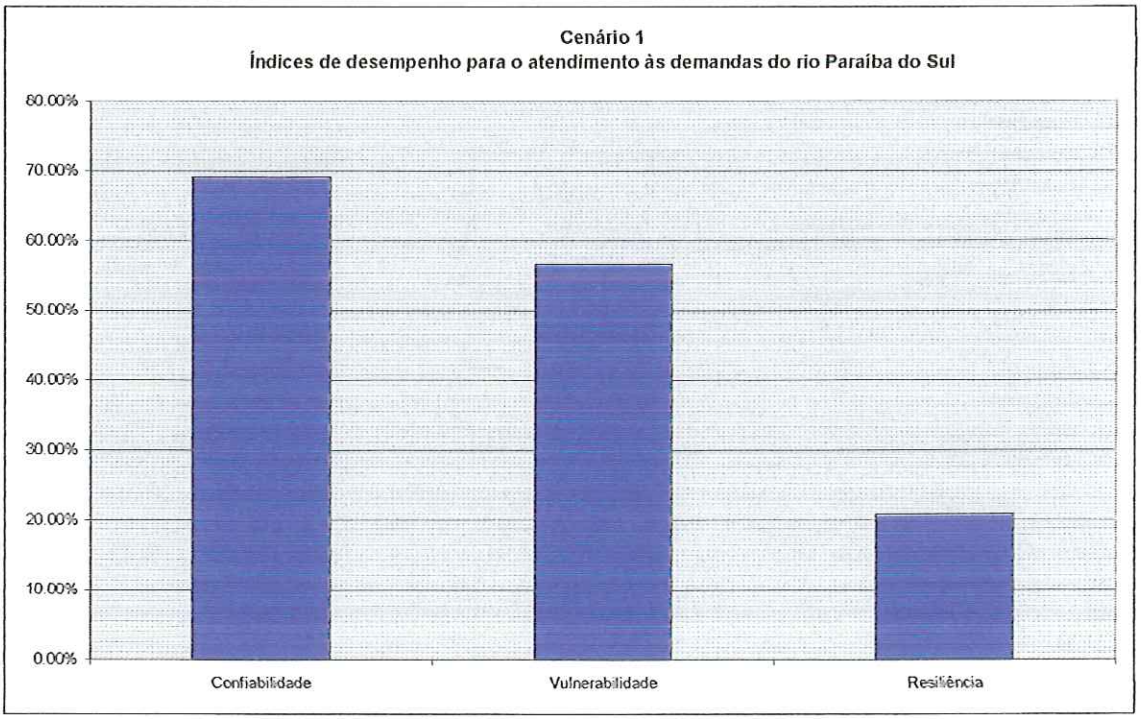


Figura 39: Cenário 1 – Índices de desempenho no atendimento às demandas do Paraíba

6.1.3 Desempenho do Reservatório

O nível mínimo operacional foi atingido em 43,40% dos meses simulados para o cenário 1. As demandas elevadas causaram grandes deplecionamentos no reservatório, conforme a figura 40.

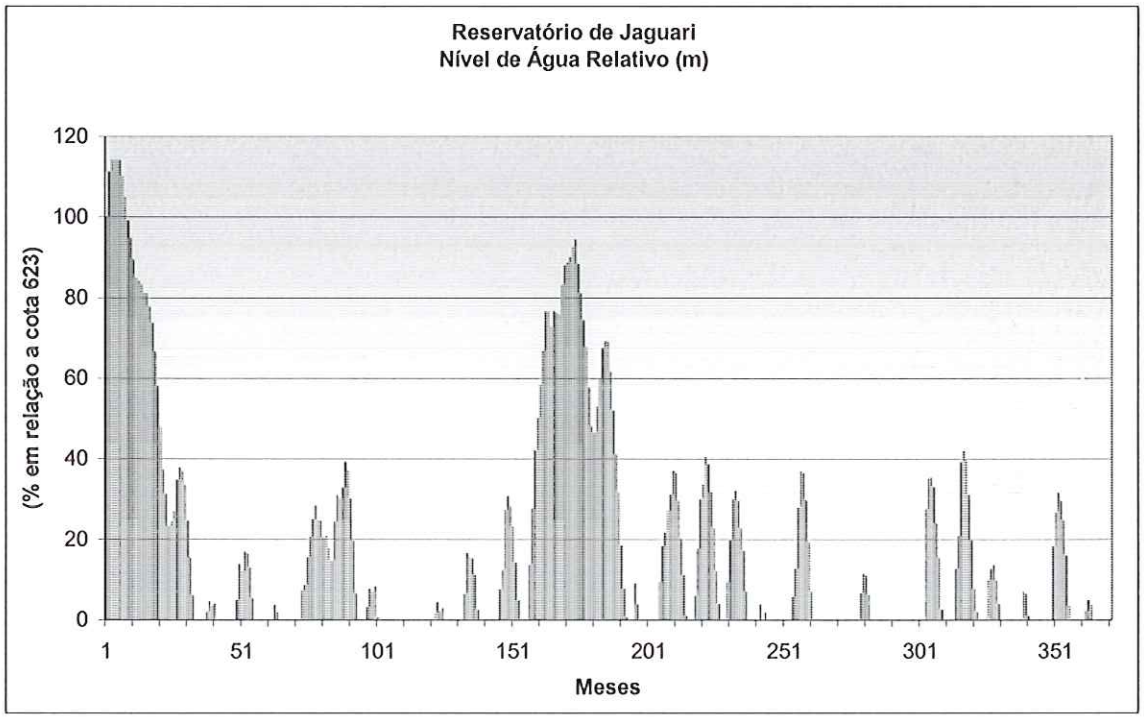


Figura 40: Cenário 1 - Níveis relativos da Represa do Jaguari

6.1.4 Avaliação geral do Cenário 1

Apesar de um bom atendimento às necessidades do rio Paraíba, este cenário garante a geração energética esperada em apenas 54,72% do tempo simulado. Além disso, os usos de montante ficam seriamente comprometidos, devido ao excessivo rebaixamento dos níveis da represa. Para o período simulado, o reservatório atingiu o mínimo operacional em 43,45% dos meses.

6.2. CENÁRIO 02:

As condições de contorno adotadas para o cenário 2 foram: Simulação do atendimento à geração energética e às demandas do rio Paraíba do Sul, sem racionamento e com redução de 5% das demandas dos meses secos.

6.2.1 Atendimento à geração energética

A redução de 5% nas demandas ocasionou um aumento na confiabilidade da geração elétrica. A geração total foi praticamente a mesma, com um total de 4.303 MW em 31 anos. Entretanto, o fornecimento máximo foi atingido com uma freqüência maior. A tabela 16 e as figuras 41 e 42 apresentam os índices de desempenho para o cenário 2.

Tabela 16: Cenário 2 - Índices de desempenho no atendimento à geração elétrica

Índices de Desempenho	
Confiabilidade	60,65%
Vulnerabilidade	43,57%
Resiliência	15,75%

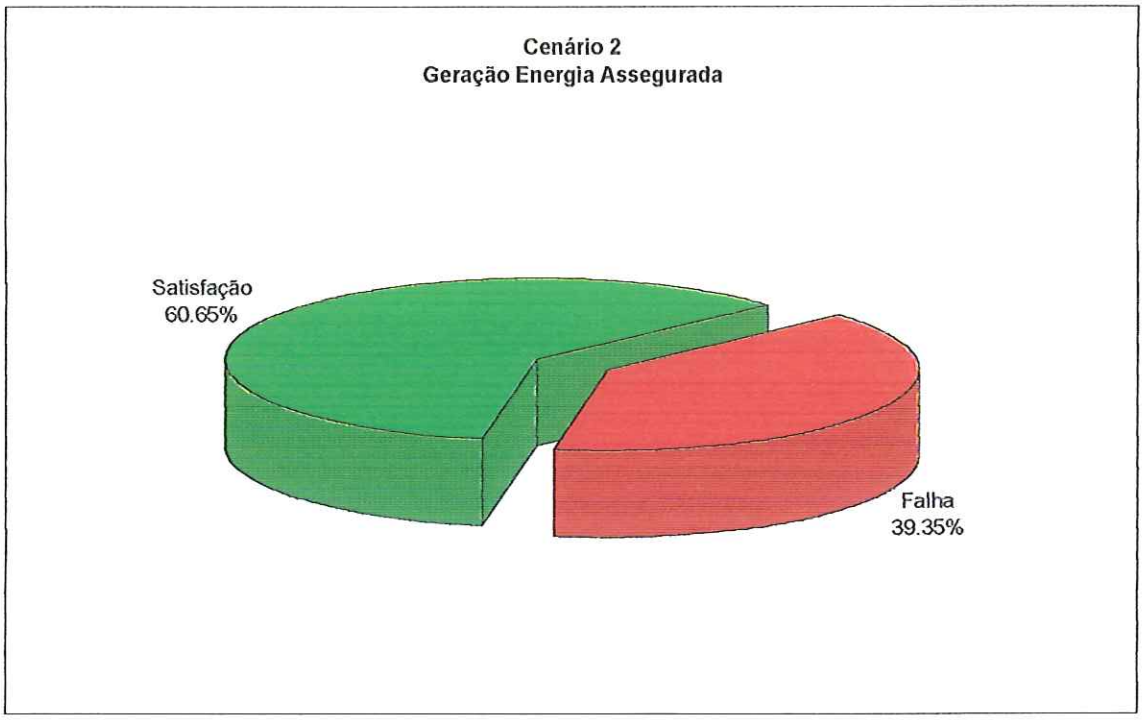


Figura 41: Cenário 2 - Satisfação no atendimento à UHE

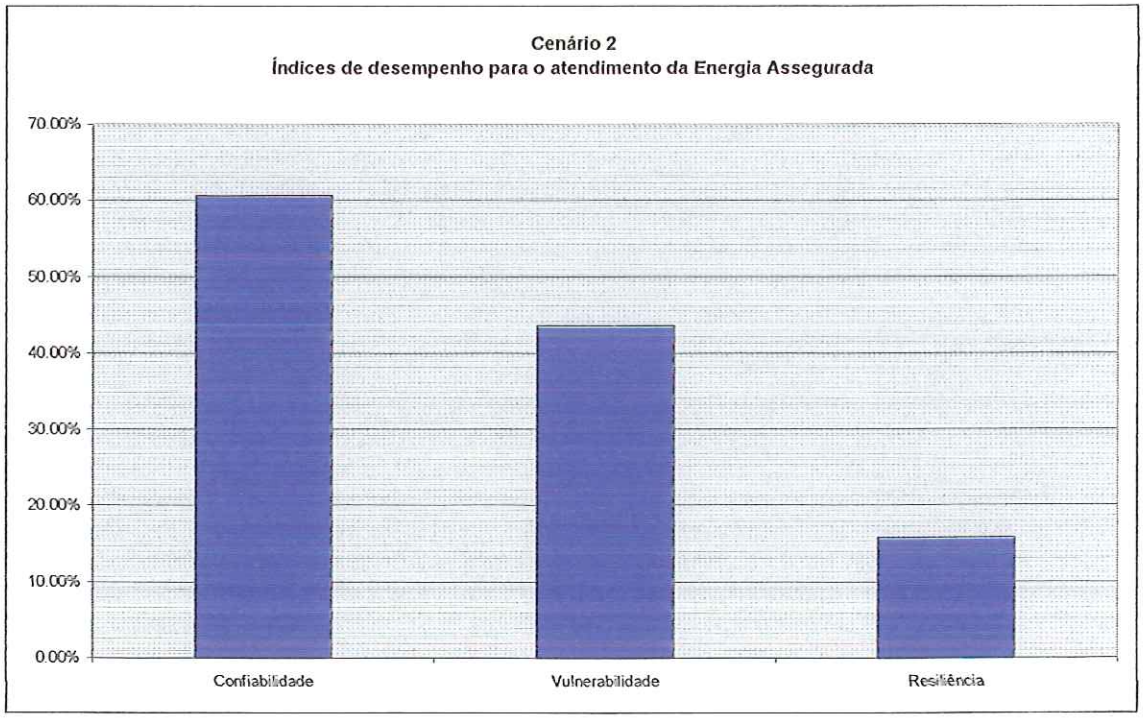


Figura 42: Cenário 2 - Índices de Desempenho para a UHE Jaguari

6.2.2 Atendimento às demandas do Paraíba do Sul

A redução no consumo de água garantiu mais estabilidade ao sistema. Houve um ligeiro aumento na confiabilidade do sistema, pois as demandas foram consideradas 5% menores. Entretanto, o sistema mostrou-se mais vulnerável, pois um mesmo déficit representa um percentual maior de falha em vazões menores. Os índices são mostrados na tabela 17 e na figura 43.

Tabela 17: Cenário 2 - Índices de desempenho no atendimento às demandas do Paraíba

Índices de Desempenho	
Confiabilidade	70,89%
Vulnerabilidade	54,23%
Resiliência	20,37%

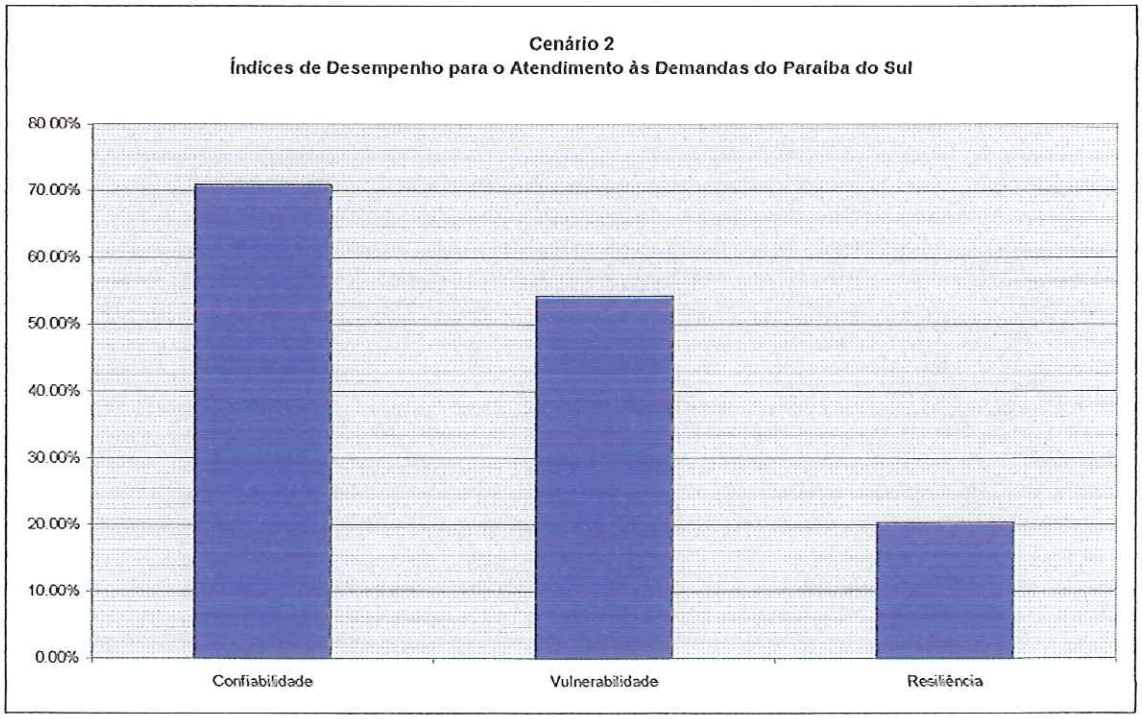


Figura 43: Cenário 2 – Índices de desempenho no atendimento às demandas do Paraíba

6.2.3 Desempenho do Reservatório

Mesmo com a redução nas demandas, por vários meses (40,43%) o reservatório atingiu o mínimo operacional. A figura 44 ilustra o comportamento do reservatório para o cenário 2.

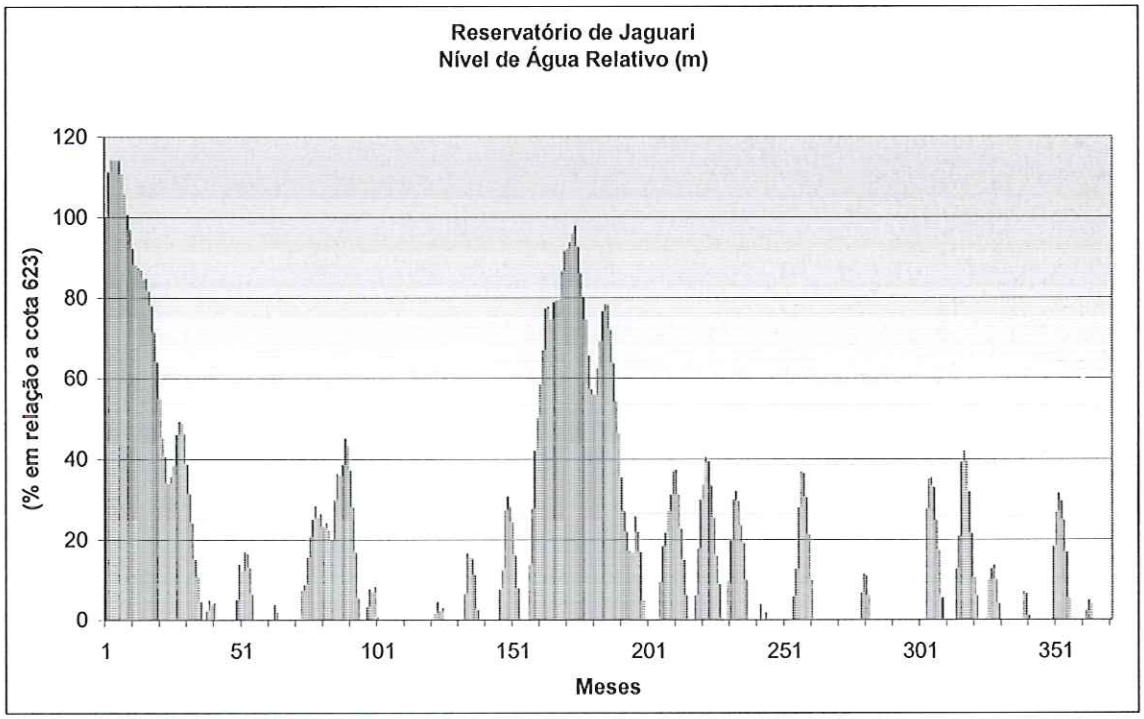


Figura 44: Cenário 2 - Níveis relativos da Represa do Jaguari

6.2.4 Avaliação geral do Cenário 2

Em função da redução da demanda, houve aumento na confiabilidade da geração elétrica e praticamente o mesmo comportamento no abastecimento das demandas do Paraíba em relação ao cenário 1. Os níveis do reservatório continuaram apresentando grande oscilação.

6.3. CENÁRIO 03:

As condições de contorno adotadas para o cenário 3 foram: Simulação do atendimento à geração energética e às demandas do rio Paraíba do Sul, com racionamento de 50% a partir da cota 608,5 m, sem redução das demandas nos meses secos.

Os resultados obtidos foram:

6.3.1 Atendimento à Geração Energética.

Para a geração elétrica os racionamentos mostraram-se prejudiciais. Houve queda significativa no índice de confiabilidade em relação aos cenários anteriores. O sistema tornou-se mais vulnerável, com a energia fornecida, em média, mais distante do valor esperado. A energia total gerada - 3.908 MW - foi menor que nos cenários anteriores. Os valores são mostrados na tabela 18 e figuras 45 e 46.

Tabela 18: Cenário 3 - Índices de desempenho no atendimento à geração elétrica

Índices de Desempenho	
Confiabilidade	53,64%
Vulnerabilidade	53,39%
Resiliência	15,12%

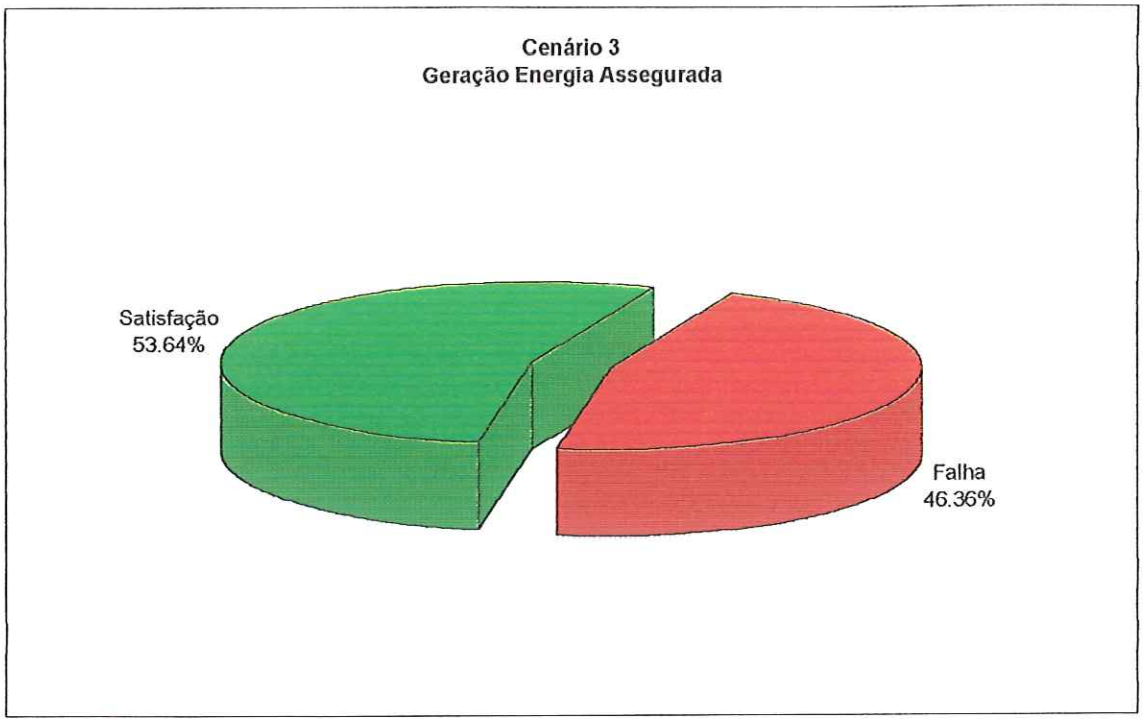


Figura 45: Cenário 3 - Satisfação no atendimento à UHE

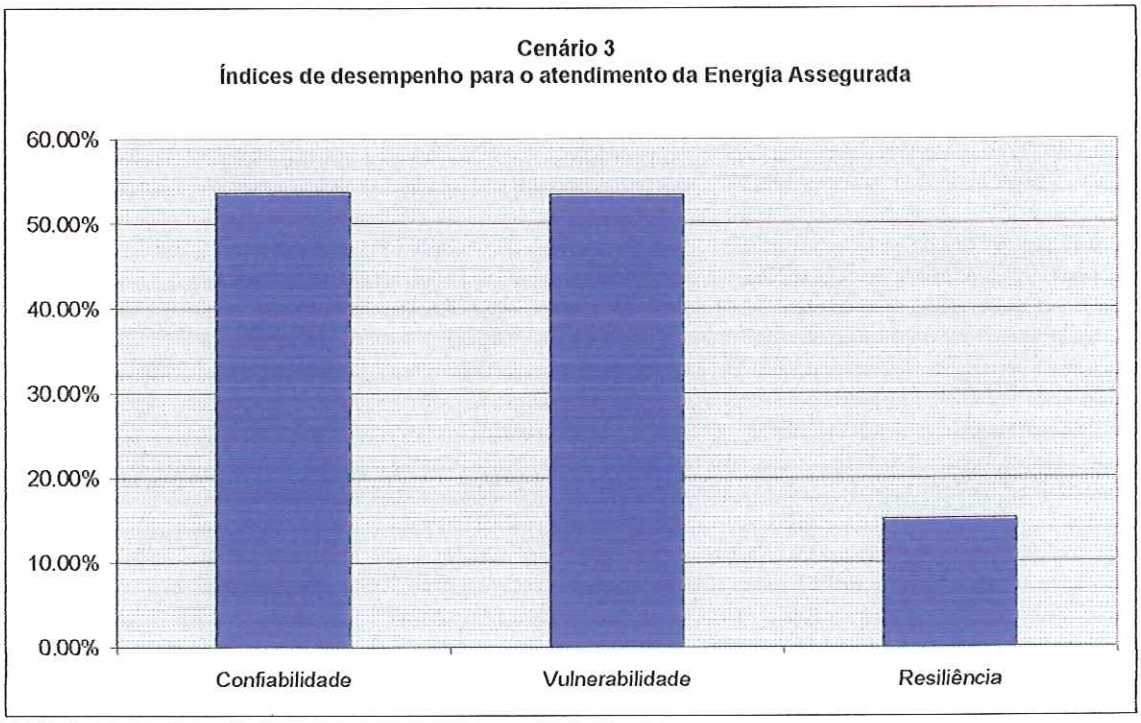


Figura 46: Cenário 3 - Índices de Desempenho para a UHE Jaguari

6.3.2 Atendimento às demandas do Paraíba do Sul

As demandas do Paraíba não foram significativamente afetadas com o racionamento. A vulnerabilidade foi reduzida, garantindo um abastecimento mais próximo do desejado em períodos de escassez. Os valores são apresentados na tabela 19 e ilustrados no gráfico da figura 47.

Tabela 19: Cenário 3 - Índices de desempenho no atendimento às demandas do Paraíba

Índices de Desempenho	
Confiabilidade	69,27%
Vulnerabilidade	42,63%
Resiliência	21,05%

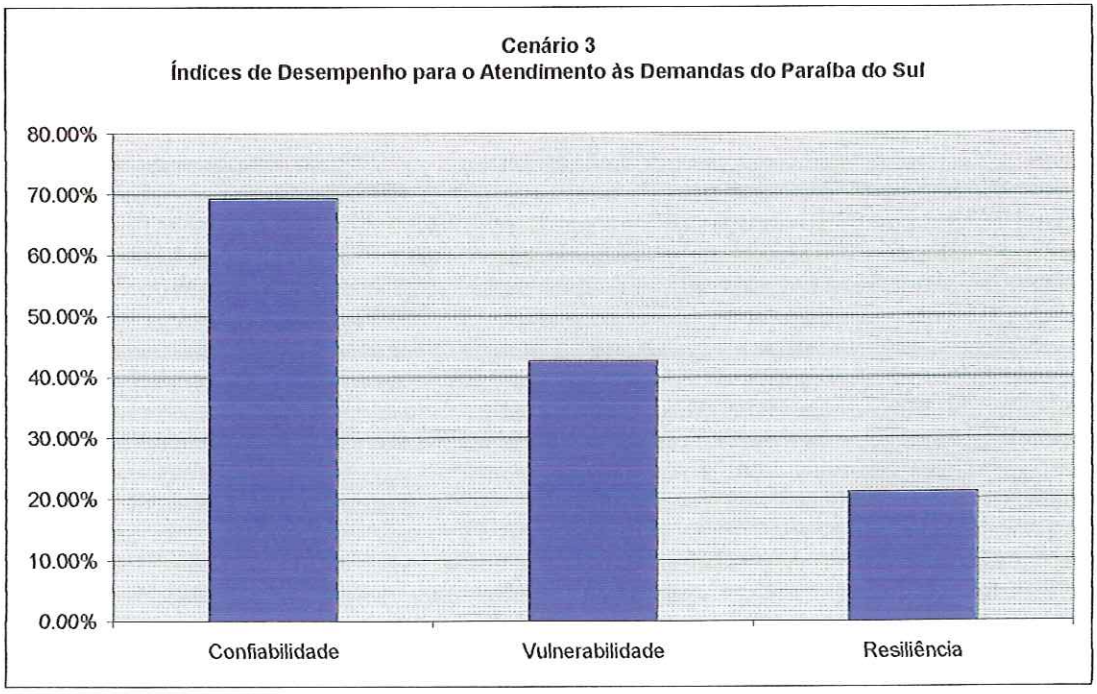


Figura 47: Cenário 3 - Índices de Desempenho no atendimento às demandas do Paraíba

6.3.3 Desempenho do reservatório

Os racionamentos mostraram-se uma eficiente medida na manutenção dos níveis do reservatório. O total de períodos em nível operacional mínimo foi reduzido de cerca 40% para 23,99%. O resultado da simulação em relação aos níveis do reservatório pode ser conferido na figura 48.

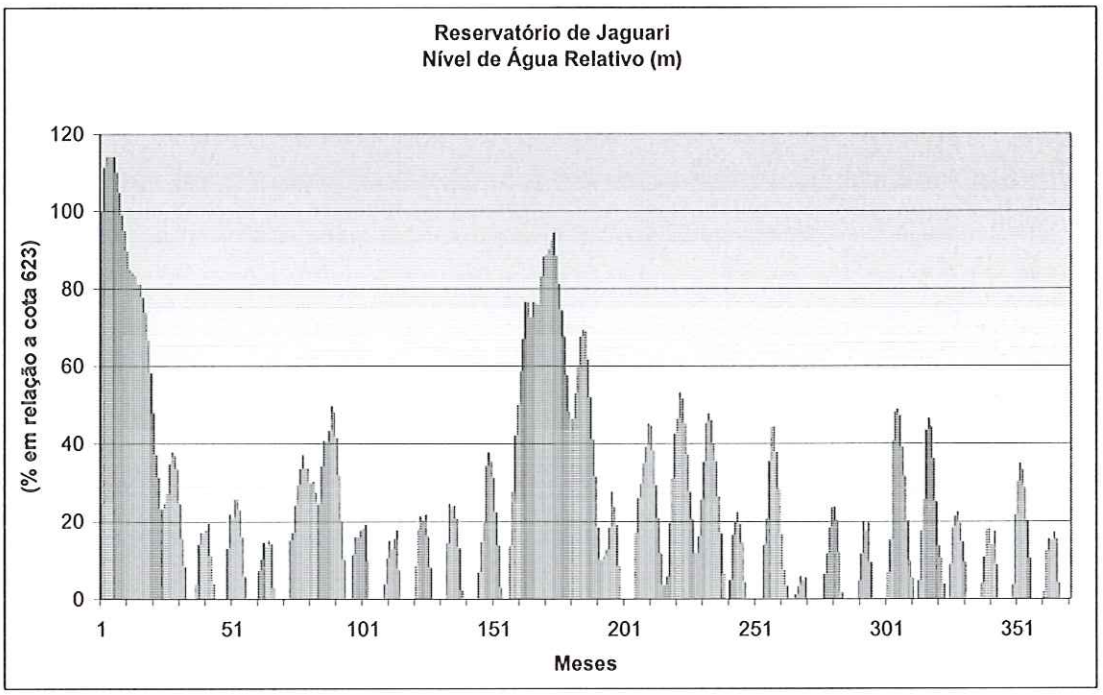


Figura 48: Cenário 3 - Níveis relativos da Represa do Jaguari

6.3.4 Avaliação geral do Cenário 3

O racionamento comprometeu a geração energética, reduzindo o total gerado e a confiabilidade. A vulnerabilidade do abastecimento foi reduzida para as demandas do Paraíba. Para o reservatório, a medida foi benéfica: reduziu o risco de ocorrência do mínimo operacional.

6.4. CENÁRIO 04:

Como condições de contorno para o cenário 4 foram usadas: Simulação do atendimento à geração energética e às demandas do rio Paraíba do Sul, com racionamento de 50% a partir da cota 608,5 m e com redução das demandas nos meses secos.

Os resultados encontrados foram:

6.4.1 Atendimento à Geração Energética.

Através dos dados da tabela 19, percebe-se novamente o impacto do racionamento na geração elétrica. O índice de confiabilidade teve o valor de 57,41%, o que reflete longos períodos abaixo da meta energética.

Tabela 19: Cenário 4 - Índices de desempenho no atendimento à geração elétrica

Índices de Desempenho	
Confiabilidade	57,41%
Vulnerabilidade	53,55%
Resiliência	15,82%

A figura 49 ilustra os valores encontrados para os índices de desempenho. A figura 50 apresenta a proporção de estados satisfatórios e de estados de falha.

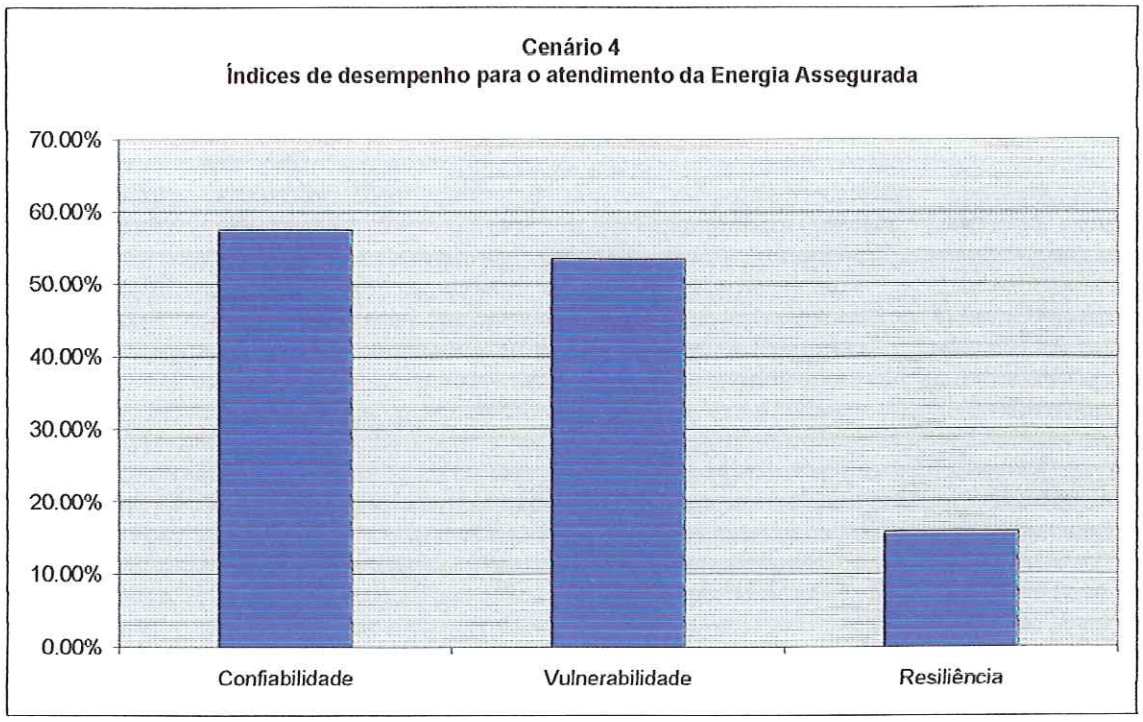


Figura 49: Cenário 4 - Índices de Desempenho para a UHE Jaguari

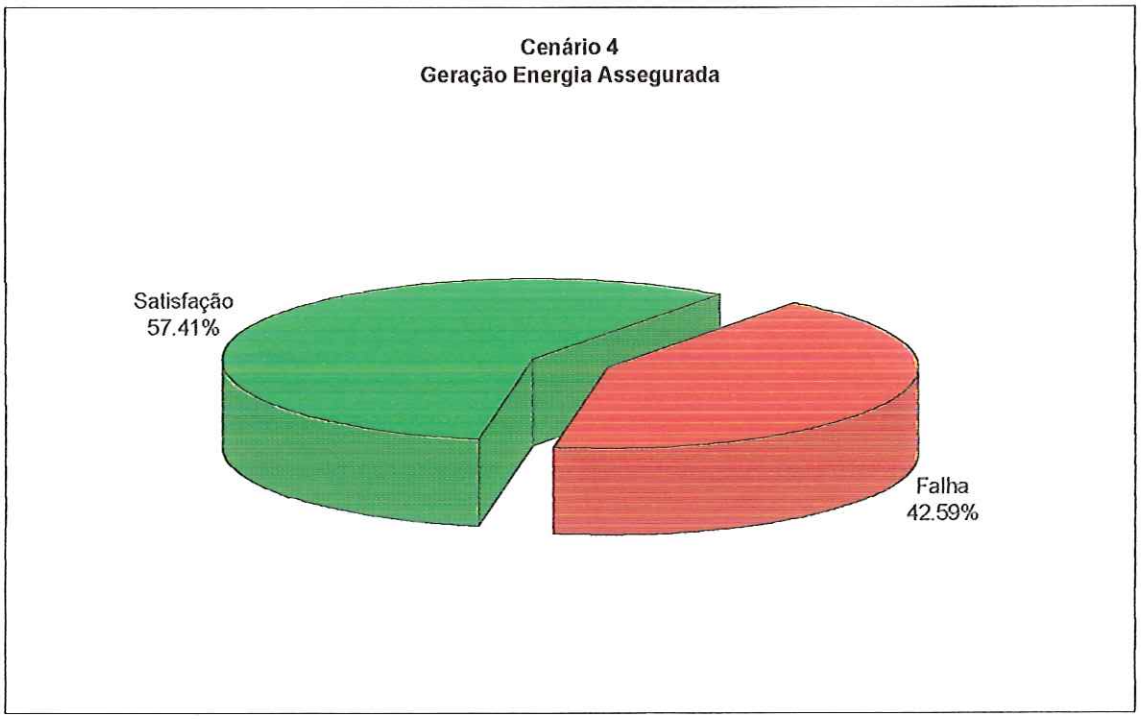


Figura 50: Cenário 4 - Satisfação no atendimento à UHE

6.4.2 Atendimento às demandas do Paraíba do Sul

A tabela 20 e a figura 51 apresentam os resultados obtidos.

Tabela 20: Cenário 4 - Índices de Desempenho no atendimento às demandas do Paraíba

Índices de Desempenho	
Confiabilidade	71,43%
Vulnerabilidade	40,58%
Resiliência	21,70%

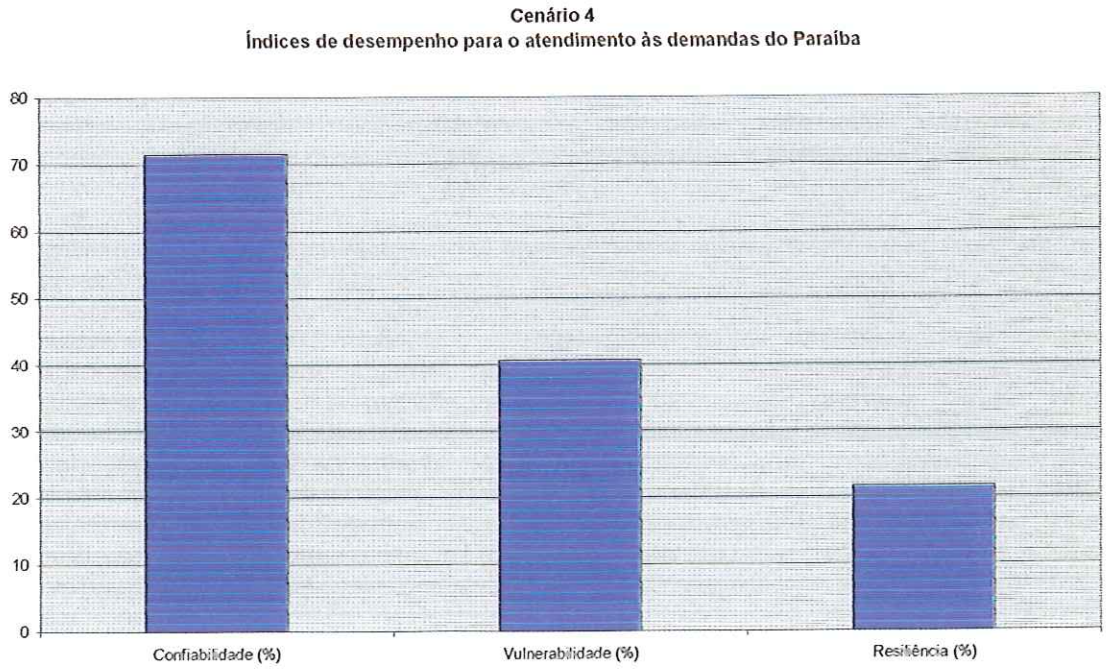


Figura 51: Cenário 4 - Índices de Desempenho no atendimento às demandas do Paraíba

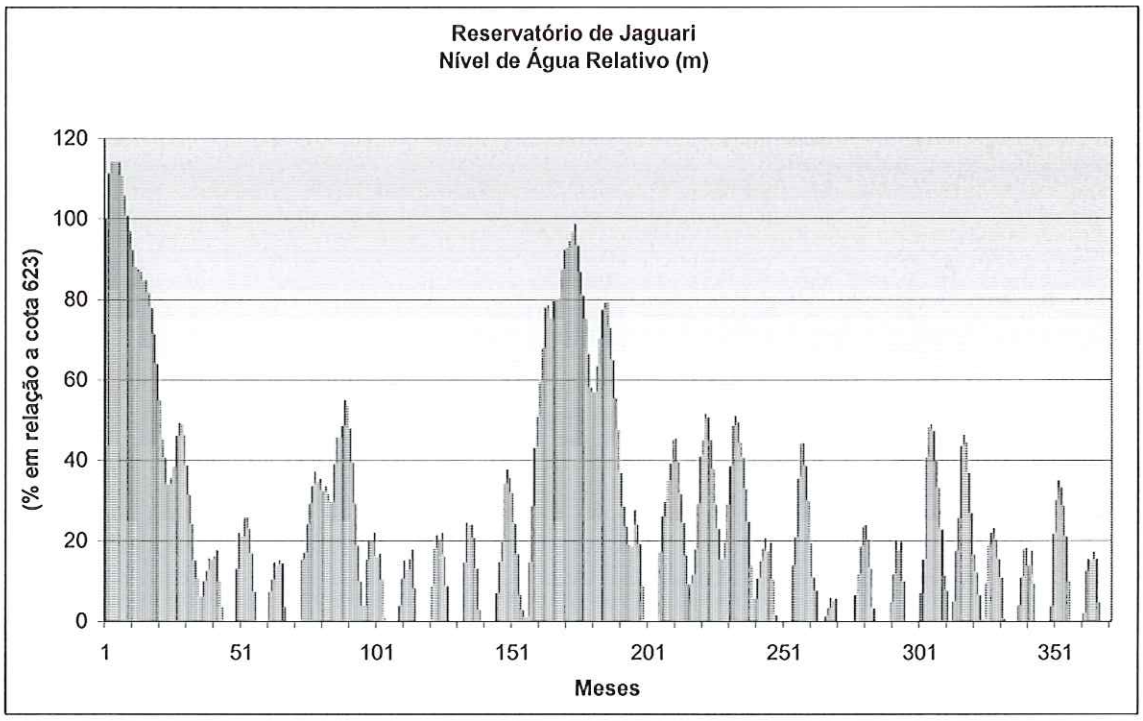


Figura 52: Cenário 4 - Níveis relativos da Represa do Jaguari

6.4.3 Desempenho do reservatório

O cenário 4 foi o mais favorável na manutenção dos níveis operacionais da represa de Jaguari. Nos 372 meses simulados, o nível mínimo foi atingido em 21,70%, valor ainda significativo.

6.4.4 Avaliação geral do Cenário 4

A associação de redução de demandas e racionamento foi favorável à manutenção dos níveis de água da represa. Os outros usos tiveram um aumento de confiabilidade em relação ao cenário 3.

6.5. Resultados Gerais

A avaliação das tabelas 21,22 e 23 proporcionam o entendimento de que, dentre os cenários avaliados, o melhor para a geração energética é o cenário 2, pois garante maior confiabilidade e maior produção de energia. Para os usuários do sistema do rio Paraíba, o cenário 4 apresentou maiores confiabilidade e resiliência e menor vulnerabilidade. Em comum, os dois cenários envolvem a gestão da demanda. Para a conservação dos níveis do reservatório, a opção de limitação nas liberações a partir de um determinado nível operacional mostrou-se bastante eficaz.

Tabela 21: Índices de Desempenho para a Geração Energética

Cenário	Confiabilidade (%)	Vulnerabilidade (%)	Resiliência (%)
1	54,72	42,90	15.82
2	60,65	43,57	15,75
3	53,64	53,39	15,12
4	57,41	53,55	15,82

Tabela 22: Índices de Desempenho para o atendimento às Demandas do rio Paraíba

Cenário	Confiabilidade (%)	Vulnerabilidade (%)	Resiliência (%)
1	69,00	56,56	20,87
2	70,89	54,23	20,37
3	69,27	42,63	21,05
4	71,43	40,58	21,70

Tabela 23: Geração energética e Comportamento do reservatório

Cenário	Energia Gerada Total (MW)	Reservatório vazio (% de meses)
1	4.245	43,40
2	4.303	40,43
3	3.908	23,99
4	4.009	21,02

7. CONCLUSÕES

As simulações realizadas na bacia do Jaguari através do MIKE BASIN, enfatizaram o impacto causado por duas demandas "não consuntivas" na bacia. Porque, apesar de não extrair água de um rio ou represa, a geração hidrelétrica altera os regimes naturais de vazão de um rio. E o papel de regularização de vazões da barragem faz com que os volumes armazenados na represa do Jaguari sejam destinados para usuários de outras bacias.

Nos quatro cenários simulados, houve situações de conflitos entre usos da água. Percebe-se que, para um período de 30 anos de dados hidrológicos, o atendimento às demandas foi comprometido várias vezes. As grandes demandas de água da represa de Jaguari mostram que, provavelmente, são uma das causas do rebaixamento de níveis. Tanto que, em 2004 a liberação mínima de 10 m^3/s nos períodos chuvosos foi reduzida a 7 m^3/s, após acordo entre o ministério de Minas e Energia e os Comitês Gestores da Bacia do Paraíba do Sul. Outra importante causa de conflitos é a variabilidade da disposição das chuvas, que causam períodos de escassez em determinadas épocas.

No caso da represa do Jaguari, não se conhecem, por exemplo, dados de novas batimetrias, realizadas para a determinação de um polinômio Cota x Área x Volume atualizado para a represa. O assoreamento em reservatórios é causa importante na diminuição de capacidade volumétrica dos reservatórios. Este estudo enfoca a importância de estudos de medição, prevenção e controle do aporte de sedimentos em represas. Esses são procedimentos fundamentais na definição de regras operacionais que garantam o uso sustentável dos reservatórios para suas múltiplas finalidades.

As etapas de calibração e validação do modelo não foram adotadas neste estudo, devido à necessidade de recursos extras para visitas de campo. Como o estudo foi baseado exclusivamente em dados secundários, optou-se por confiar na fidelidade dos mesmos. Com a realização de campanhas exclusivas para medições e calibração do sistema, e a conseqüente validação do método, seria possível uma maior aproximação da situação real do reservatório e seu comportamento em relação ao atendimento às suas demandas.

Na definição dos cenários simulados, os valores de redução de demanda, nível d'água e taxa de racionamento foram adotados sem um critério técnico elaborado neste trabalho. Decisões como estas devem ser realizadas com enfoque nos possíveis impactos sociais, econômicos e ambientais. A alocação de água no sistema é realizada sem levar em consideração esses aspectos. A análise foi realizada em termos de prioridade de atendimento às demandas.

Dentre as limitações do modelo, apresenta-se a dificuldade de desenvolvimento de uma regra de operação que garanta a sustentabilidade do sistema através do método de tentativa e erro Técnicas de otimização para funções-objetivo específicas também podem ser combinadas com o modelo estudado na análise de sistemas. Neste caso, a velocidade e robustez do MIKE BASIN é destaque, pois permite a avaliação de diversas situações operacionais, com rapidez e baixo custo.

O período de tempo considerado nas simulações foi de 30 anos. Portanto, as situações de escassez poderiam ser evitadas com alterações provisórias nas regras operacionais durante esses períodos críticos. A rigidez de uma regra operacional de 30 anos serve como avaliação de comportamento na recuperação de níveis no reservatório. Com um monitoramento horário, ou diário, os riscos de um colapso no sistema são reduzidos.

Após a análise dos resultados das simulações, fica comprovado que a adoção de medidas de controle de demandas e restrições de liberação é benéfica para a correta distribuição de águas em sistemas hídricos.

O modelo de simulação utilizado ofereceu respostas rápidas às alterações operacionais no sistema estudado, proporcionando agilidade para auxiliar as tomadas de decisão.

Dentre os objetivos do estudo, esperamos ter auxiliado na apresentação de alguns dos métodos existentes em Análise de Sistemas aplicados à gestão e planejamento de recursos hídricos. Procurou-se evidenciar as aplicações mais recentes da área. Quanto à aplicação do modelo, foram verificadas suas virtudes e limitações na análise do atendimento às demandas em um sistema hídrico. Fica evidente a funcionalidade do método aplicado, desde que seja utilizado como um auxílio complementar a um sistema amplo de informações sociais, econômicas e ambientais sobre a região de estudo. Aspectos subjetivos não mensuráveis, bom-senso e a priorização das necessidades básicas das comunidades devem sempre ser levados em consideração quando o objeto de disputa for o bem mais importante para a manutenção da vida na terra.

EESC • USP Biblioteca CARLOS

8. REFERÊNCIAS

ALAYA, A. et al. (2003). Optimization of Nebhana water allocation by stochastic dynamic programming. *Water resources management,* Netherlands, v.17 p. 259-272.

ALVIM, A.M.; CHAUDRHY, F.H.; MELLO, C.E.F.; NAGHETTINI, M. (2003). Operação otimizada de um reservatório do sistema de abastecimento de água de Belo Horizonte via programação dinâmica estocástica. In SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15., 2003, Curitiba. *Anais*...Curitiba, ABRH.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2004): *HidroWeb – Sistema de Informações Hidrológicas:* Sistema de Informações Geográficas. Disponível em <http://hidroweb.ana.gov.br/hidroweb/> Acesso 10/06/2003.

ANDRADE, P.R.G.S; CURI, W.F.; CURI, R.C. (2001). Otimização da operação do sistema hídrico Jucazinho-Carpina, para múltiplos usos, via modelo de programação não-linear. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 14., 2001, Aracajú. *Anais*...Aracajú, ABRH.

AZEVEDO, L.G.T; PORTO, R.L.P.; ZAHED FILHO, K. Modelos de simulação e de rede de fluxo. *In:* PORTO, R.L. (org.) et al. *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos.* Porto Alegre, Editora da UFRGS/Associação brasileira de recursos hídricos. Cap. 4, p. 165-227.

BARBOSA, P.S.F. (2002) Modelos de programação linear em recursos hídricos. *In:* PORTO, R.L. (org.) et al. *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos.* Porto Alegre, Editora da UFRGS/Associação brasileira de recursos hídricos. Cap. 3, p. 97-163.

BARROS, M.T.L. (2002) A programação dinâmica aplicada à engenharia de recursos hídricos. *In:* PORTO, R.L. (org.) et al. *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos.* Porto Alegre, Editora da UFRGS/Associação brasileira de recursos hídricos. Cap. 5, p. 239-278.

BESSA, M.R.; MOROZOWZKI FILHO, M; FAVORETO, R.S.; SALMAZO, C.T. (2003). Otimização da operação em longo prazo das usinas de Foz do Areia e Segredo na bacia do rio Iguaçu. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15., 2003, Curitiba. *Anais*...Curitiba, ABRH.

BRAGA, B. P. F. (1987). Técnicas de otimização e simulação aplicadas em sistemas de recursos hídricos. *In*: BARTH, F.T. (org.) et al. *Modelos de gerenciamento de recursos hídricos.* Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v.1, Nobel/ABRH. São Paulo-SP. Cap. 5 , p. 427-526.

CANCELILIERE, A et all. (2002) A neural networks approach for deriving irrigation reservoir operating rules. *Water resources management.* Netherlands, v.16 p. 71-88.

CARRERA-FERNANDEZ, J.; GARRIDO, R.J. (2002) *Economia dos recursos hídricos.* Salvador, Editora da UFBA

CEDAE - COMPANHIA ESTADUAL DE ÁGUAS E ESGOTOS - RJ (2003). O Apagão da Água. *Jornal da ASEAC - Informativo mensal da Associação dos Empregados de Nível Universitário da CEDAE.* Rio de Janeiro. Edição de Novembro / Dezembro de 2003. Disponível em <www.aseac.com.br/jorn50_3.htm> Acesso em 14/05/04.

CEIVAP - COMITÊ PARA INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL (2004). Resende – RJ. Home Page Institucional. Disponível em <www.ceivap.org.br>.

CESP – COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO(1972). *Polinômios Cota x Área e Cota x Volume do reservatório da UHE Jaguari.* Documentos obtidos junto à CESP, Av. Nossa Senhora do Sabará, 5312 - Bairro Pedreira, CEP: 04447-011 - São Paulo - SP

_____. (2003) *Características Técnicas do Reservatório e da UHE Jaguari; Série de Vazões Afluentes à Barragem.* Documentos obtidos junto à CESP, Av. Nossa Senhora do Sabará, 5312 - Bairro Pedreira, CEP: 04447-011 - São Paulo - SP

CIRILLO, J.A. (2002) Programação não linear aplicada a recursos hídricos. *In:* Porto, R.L. (org.) et al. *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos.* Porto Alegre, Editora da UFRGS/Associação brasileira de recursos hídricos. Cap. 3, p. 97-163.

CLARKE, R.T. (1994). *Statistical modelling in hydrology.* West Sussex, England. John Wiley & Sons.

CPTI - COOPERATIVA DE SERVIÇOS, PESQUISAS TECNOLÓGICAS E INDUSTRIAS (2000*). Plano de Bacia Hidrográfica, 2000-2003 / UGRHI-1 – Serra da Mantiqueira, UGRHI-2 – Paraíba do Sul – PSM.* Comitê das bacias hidrográficas do Paraíba do Sul e Mantiqueira. - CBH PSM.

DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA – SP (2003) Cadastro de Usuários da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 02 – UGRHI-02 – Paraíba do Sul: Banco de Dados. Disponível em DAEE Taubaté, Pça. Santa Luzia, nº 25 - Cx. Postal 318 - CEP: 12010-510 Taubaté – SP.

DHI WATER & ENVIRONMENT (2003) *Mike basin – guide to getting started tutorial* Dinamarca. Disponível em <www.dhisoftware.com>

FEIRING, B. R. et al. (1998). .A Sthocastic Programming Model for Water Resource Planning. Mathematical and Computer Modelling, V. 27, p. 1-7

FIERING, M. B. (1969). Forecasts with varying reliability. *Journal of Sanitary Engeneering Division*, v. 95, n. 4, p. 629-644.

FRANCATO, A.L.; BARBOSA, P.S.F.; SOLIANI, R. (2000) Um modelo de programação não linear para a otimização da operação de sistemas hidroelétricos. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 19. 2000, Córdoba, Argentina. *Anais.*

HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J. R.; LOUCKS, D. P. (1982). Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research*, v. 18, n. 1, p. 14-20.

JHA, M. K.; DAS GUPTA, A. (2003). Application of Mike Basin for water management strategies in a watershed. *Water International*, v. 28, n. 1, p. 27 - 35.

KJELDSEN, T. R.; ROSBJERG, D. (2001). A Framework for assessing the sustainability of a water resources system. Regional Management of Water Resources. 6th IAHS Scientific Assembly at Maastricht,. *IAHS Publ. n. 268.* The Netherlands, July

LANDSAT TM 5: imagem de satélite (1999). São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 1 fotografia aérea. Escala 1:100.000. Canais 3, 4 e composição colorida 3, 4 e 5.

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.* 141 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2002.

LIMA, H.V.C.; LANNA, A.L.L. (2001). Operação "ótima" de sistemas de reservatórios – aplicação ao sistema de abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza. . In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 14., 2001, Aracajú. *Anais*...Aracajú, ABRH.

MAIA, A.G. (2002). *Simulação em tempo real como ferramenta de decisão no gerenciamento de estoque de água de reservatórios.* 143 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

MAIER, H. R.; LENCE, B. J.; TOLSON, B. A.; FOSCHI, O. (2001). First-order reliability method for estimating reliability, vulnerability, and resilience. *Water resources research*, v.37, n.3, p.779-790, march.

MAUAD, F.F. (2000). *Planejamento integrado de recursos hidroenergéticos: o confronto de usos múltiplos da água no aproveitamento hidrelétrico de Alqueva em Portugal.* 182 p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2000.

MOUSAVI, H.; RAMAMURTHY, A. S. (2000). Optimal Design of Multi-Reservoir Systems for Water Supply. Advances in Water Resources, V. 23, p. 613-624.

MOY, W. S.; COHON, J. L.; RE VELLE, C. S. (1986). A programming model for analysis of the reliability, resilience, and vulnerability of a water supply reservoir. *Water resources research*, v. 22, n. 4, p. 489-498.

PILLAR, J.V.; LANNA,A.E.L. (1999) Utilização de modelos de otimização no planejamento do aproveitamento de um sistema de recursos hídricos sem regularização: bacia do rio Paracatú. in *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Porto Alegre: v.4, n.2, p.61 - 72, 1999.

PINHEIRO, T.M. (2003). Estudo da operação otimizada de um sistema de reservatórios considerando a evaporação através de algoritmo genético híbrido. 167 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2003.

REIS, L.F.R.; AKUTSU, J. (2002). Estratégias operacionais para sistemas de reservatórios via algoritmos genéticos (AGs). *Revista brasileira de recursos hídricos,* Porto Alegre, v. 7, n.3, p. 05-18, jul/set.

RIGHETTO, A.M. (1998) *Hidrologia e recursos hídricos.* São Carlos, Editora EESC/USP.

SIGRH - Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo (2004). Banco de dados pluviométricos do Estado de São Paulo: Banco de Dados. Disponível em<http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/bdhm.exe/plu> Acesso em 15/01/2004.

SILVA,T.C. et al. (2002). Planejamento dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Gramame, uma bacia litorânea do Nordeste brasileiro. *Revista brasileira de recursos hídricos,* Porto Alegre, v. 7, n.4, p. 121-134, out/dez.

TEEGAVARAPU, R.S.V.; SIMONOVIC, S.P. (2002). Optimal operation of reservoirs systems using simulated annealing. *Water resources management,* Netherlands, v.16 p. 401-428.

TICKLE, K. S.; GOULTER, I. C. (1994). Statistical Properties of Reliability and Resiliency Measures. In: *Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Environmental Engineering*, v. 4, p. 209-220. Keith W. Hipel and Liping Fang.

TUCCI, C. E. M. (1998). *Modelos hidrológicos.* Porto Alegre – RS. Ed. Universidade /UFRGS/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos

TUNDISI, J.G. (2003) *Água no século XXI: enfrentando a escassez*. São Carlos – SP, RiMa. Editora.

USACE - UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERING, WATER RESOURCES SUPPORT CENTER, INSTITUTE FOR WATER RESOURCES (1992). *Guidelines for risk and uncertainty in water resources planning – volume 1 – principles.* (IWR report 92-R-1). Fort Belvoir, VA, USA.

WURBS, R. A. (1991). *Optimization of multiple-purpose reservoir system operations: a review of modeling and analysis approaches*. (Res. Document No.34), U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, USA.

WURBS, R.A. (1996). *Modeling and analysis of reservoirs system operations.* United States, Prentice Hall.