

LUCIANA KINDL DA CUNHA

**SISTEMAS AVANÇADOS DE PREVISÃO HIDROLÓGICA E OPERAÇÃO
HIDRÁULICA EM TEMPO REAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Alexandre Kolodynskie Guetter

CURITIBA, JUNHO DE 2004

Aos meus pais
João Carlos da Cunha e
Sieglinde Kindl da Cunha,
dedico.

AGRADECIMENTOS

Para todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a concretização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos:

A Deus, por ter me dado a vida e a disposição necessárias para correr atrás dos meus objetivos e, acima de tudo, por me fazer crer em mim mesma;

Aos meus pais e irmãos por terem sempre me apoiado nos momentos mais difíceis, me incentivando a continuar, por terem me educado de forma a me tornar uma pessoa digna e por me amarem incondicionalmente;

Aos meus amigos pelos momentos de alegria e felicidade passados juntos, pelos ensinamentos de vida e pela compreensão por minhas eventuais ausências.

Ao SIMEPAR, pela oportunidade de execução do projeto;

Aos colegas do SIMEPAR, pelas discussões técnicas altamente instrutivas, pelas valiosas ajudas, pelos incentivos e pela companhia nos momentos de descontração;

A LIGHT pelo fornecimento das informações necessárias e apoio à realização do trabalho;

Ao meu orientador, por ter compartilhado seus preciosos conhecimentos.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE SIGLAS.....	xi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiv
RESUMO.....	xviii
ABSTRACT.....	xix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA	1
1.2 OBJETIVOS	7
1.2.1 Objetivo geral	7
1.2.2 Objetivos específicos.....	7
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 MODELO HIDROLÓGICO.....	10
2.1.1 Histórico.....	10
2.1.2 Modelos atualmente em uso.....	12
2.1.3 Classificação	13
2.1.4 Seleção	16
2.2 MODELOS HIDROLÓGICOS CONCEITUAIS.....	17
2.2.1 Estrutura básica.....	17
2.2.1.1 Fase bacia.....	18
2.2.1.2 Fase canal	18
2.2.2 Etapas de modelagem	19
2.2.3 Calibração	20
2.2.3.1 Função objetivo	22
2.2.3.2 Algoritmos de calibração.....	23
2.2.3.3 Critério de finalização	25
2.2.3.4 Dados para calibração	26
2.2.4 Verificação	27
2.2.4.1 Análise gráfica	27
2.2.4.2 Análise estatística.....	29
2.2.5 Validação	32
2.3 MODELO HIDROLÓGICO DE SACRAMENTO	33
2.3.1 Histórico.....	33
2.3.2 Critérios de desenvolvimento	36
2.3.3 Conceitos Gerais do Modelo.....	37
2.3.4 Módulo bacia	40
2.3.4.1 Componentes.....	40
2.3.4.1.1 Reservatórios do solo	41
2.3.4.1.2 Fração Impermeável	43
2.3.4.2 Fluxos.....	44
2.3.4.2.1 Escoamento Direto.....	44
2.3.4.2.2 Escoamento Subsuperficial.....	44

2.3.4.2.3.	Percolação	44
2.3.4.2.4.	Infiltração	45
2.3.4.2.5.	Fluxo de base.....	46
2.3.4.2.6.	Evapotranspiração	46
2.3.4.3	Formulação dos processos.....	46
2.3.5	Módulo canal	48
2.3.6	Sistemas de previsão com o modelo de Sacramento no Brasil.....	49
2.3.6.1	Bacia do rio Iguaçu	49
2.3.6.2	Bacia do rio Paraíba do Sul	51
2.4	EFEITOS OROGRÁFICOS	51
3	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	56
3.1	CARACTERÍSTICAS DA BACIA DO PARAÍBA DO SUL.....	56
3.1.1	Hidrografia	57
3.1.2	Usinas Hidrelétricas e aproveitamentos hidráulicos.....	58
3.1.3	Sistema de Telemetria Hidrológica da LIGHT.....	61
3.1.3.1	Componentes do Sistema	62
3.1.3.2	Armazenamento dos dados	63
3.1.3.3	Aplicativos hidráulicos de monitoramento e previsão.....	64
3.2	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	64
3.2.1	Localização	65
3.2.2	Geologia e Relevo	66
3.2.3	Uso do Solo.....	67
3.2.4	Sistema Hidráulico da LIGHT.....	67
3.2.5	Problemas decorrentes de eventos extremos.....	70
3.2.5.1	Cheia	70
3.2.5.2	Estiagem.....	73
3.2.6	Operação dos reservatórios	73
3.2.6.1	Operação Normal do Sistema LIGHT	74
3.2.6.2	Operação em situações de eventos extremos de seca.....	75
3.2.6.3	Operação em situações de eventos extremos de cheia.....	75
3.2.7	Sub-bacias modeladas	76
4	SISTEMA DE PREVISÃO HIDROLÓGICA E OPERAÇÃO	
	HIDRÁULICA EM TEMPO REAL.....	78
4.1	MÓDULOS DE PREVISÃO	79
4.1.1	Módulo de Previsão Típica	79
4.1.2	Módulo de Simulação	81
4.2	PONTOS DE PREVISÃO DO SIPOP	82
4.3	ESPECIFICAÇÃO DOS COMPONENTES DO SIPOP.....	82
4.4	COMPONENTE 1 – BANCO DE DADOS	84
4.4.1	Vantagens do banco de dados em relação à arquitetura tradicional	84
4.4.2	Banco de Dados Hidrológicos – BDH.....	85
4.4.3	Banco de dados do SIPOP - BDS.....	88
4.5	COMPONENTE 2 – MÓDULOS DE PROCESSAMENTO	93
4.5.1	Módulo de Atualização	93
4.5.1.1	Dados de chuva	94
4.5.1.1.1.	Consulta aos dados monitorados.....	94

4.5.1.1.2.	Preenchimento de falhas na série.....	94
4.5.1.1.3.	Estimativa da chuva média.....	94
4.5.1.2	Dados de nível e vazão	96
4.5.1.2.1.	Consulta aos dados monitorados.....	96
4.5.1.2.2.	Preenchimento de dados na série.....	97
4.5.1.2.3.	Transformação dos dados em valores horários	98
4.5.1.2.4.	Conversão do nível em vazão	98
4.5.1.2.5.	Inserção dos dados no banco de dados.....	99
4.5.2	Módulo de Previsão Típica	99
4.5.3	Módulo de Simulação	101
4.5.4	Módulo de Validação	102
4.5.4.1	Análise Gráfica	103
4.5.4.2	Análise Estatística	104
4.6	COMPONENTE 3 - INTERFACE GRÁFICA DO USUÁRIO – IGU	105
5	AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS HIDROLÓGICOS	106
5.1	INTRODUÇÃO.....	106
5.2	DADOS PLUVIOMÉTRICOS.....	107
5.2.1	Estações analisadas	107
5.2.2	Metodologia para consistência e preenchimento das séries.....	107
5.2.3	Resultado da análise das séries pluviométricas	112
5.2.4	Cálculo da chuva média.....	114
5.3	DADOS FLUVIOMÉTRICOS.....	115
5.3.1	Estações analisadas	115
5.3.2	Metodologia de consistência e preenchimento das séries.....	116
5.3.3	Sub-bacia de cabeceira 1	119
5.3.3.1	Vazão vertida pelo túnel de Tocos	120
5.3.3.2	Varição do volume do reservatório de Tocos	125
5.3.3.3	Vazão vertida pelo vertedouro livre.....	128
5.3.3.4	Cálculo da vazão afluente a Tocos.....	129
5.3.4	Sub-bacia de cabeceira 2	131
5.3.5	Sub-bacia intermediária 1	133
5.4	DADOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....	135
5.5	ANÁLISE DA CONSISTÊNCIA HIDROLÓGICA DAS SÉRIES.....	137
5.5.1	Sub-bacia de cabeceira 1	138
5.5.2	Sub-bacia de cabeceira 2	139
5.5.3	Sub-bacia intermediária 1	141
6	CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO.....	143
6.1	ESTIMATIVA MANUAL DE PARÂMETROS.....	143
6.1.1	Parâmetros obtidos diretamente da série de chuva e vazão observada.....	145
6.1.1.1	Estimativa de x_4^o e d_1'	146
6.1.1.2	Estimativa de x_5^o e d_1''	148
6.1.1.3	Estimativa de b_2	150
6.1.2	Parâmetros Mais Difíceis de Estimar Através de Observações.....	151

6.1.2.1	Estimativa de x_3^o	151
6.1.2.2	Estimativa de p_f	155
6.1.3	Parâmetros Estimados através das Características de Percolação do Solo .	155
6.1.4	Parâmetros Usando Valores Nominais	157
6.1.5	Resumo da estimativa manual dos parâmetros.....	157
6.2	CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA	158
6.2.1	Série histórica de dados de chuva e vazão	159
6.2.2	Função objetivo	160
6.2.3	Algoritmo de otimização – “Método <i>Simplex</i> Modificado”	161
6.2.3.1	Descrição geral do Método <i>Simplex</i> Modificado	161
6.2.3.2	Implementação para calibração do Modelo de Sacramento.....	163
6.3	ALTERAÇÕES NO MODELO DE SACRAMENTO	166
6.4	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO	167
6.5	SIMULAÇÃO DA PREVISÃO	171
7	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	178
8	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	183
APÊNDICE 1 - CARACTERÍSTICAS DAS SUB-BACIAS E ESTRUTURAS		
HIDRÁULICAS DO SISTEMA HIDRÁULICO DA LIGHT		190
APÊNDICE 2 - METODOLOGIA PARA DEFINIÇÃO DO CENÁRIO DE		
CHUVA		203
APÊNDICE 3 – TELAS DA INTERFACE GRÁFICA DO USUÁRIO		212
APÊNDICE 4 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO MODELO		
HIDROLÓGICO SUB-BACIA DE CABECEIRA 1 E		
INTERMEDIÁRIA 1		227
APÊNDICE 5 – MAPAS DA ÁREA DE ESTUDO		236

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Modelos hidrológicos.....	12
Tabela 2.2 Variáveis de entrada e saída.....	39
Tabela 2.3 Variáveis de estado.....	40
Tabela 2.4 Parâmetros.....	40
Tabela 3.1 Área da bacia do Paraíba do Sul por estado.....	56
Tabela 3.2 Usinas Hidrelétricas.....	59
Tabela 3.3 Aproveitamentos hidráulicos.....	59
Tabela 3.4 Estações telemétricas do STH-LIGHT.....	62
Tabela 3.5 Principais características dos reservatórios.....	69
Tabela 3.6 Principais características das estações elevatórias.....	69
Tabela 3.7 Principais características das UHE.....	70
Tabela 3.8 Principais restrições operativas dos reservatórios.....	70
Tabela 3.9 Vazão afluente e vertimento pela barragem de Santana durante eventos de cheia.....	72
Tabela 3.10 Vazões máximas diárias na bacia do Piraí durante eventos de cheias.....	73
Tabela 3.11 Restrição da vazão defluente dos reservatórios.....	74
Tabela 3.12 Bombeamento pela Usina Elevatória de Santa Cecília.....	74
Tabela 3.13 Bombeamento pela Usina Elevatória de Vigário.....	74
Tabela 4.1 Estações telemétricas usadas no cálculo da chuva média por sub-bacia.....	95
Tabela 4.2 Pré-processamento de dados de Chuva e Nível – Dados coletados no banco de dados.....	97
Tabela 4.3 Variáveis editadas pelo operador no módulo de simulação.....	103
Tabela 5.1 Estações pluviométricas com dados horários.....	107
Tabela 5.2 Estatística de falhas das séries pluviométricas para o período de nov./2002 a dez./2003.....	113
Tabela 5.3 Estatística das séries pluviométricas para o período de nov./2002 a dez./2003.....	113
Tabela 5.4 Estações utilizadas no cálculo da chuva média das sub-bacias.....	115
Tabela 5.5 Estações fluviométricas.....	116
Tabela 5.6 Estatística de falhas da série de vazão da estação de Várzea.....	122
Tabela 5.7 Estatística de falhas da série de vazão da estação de Rosário.....	124
Tabela 5.8 Estatística de falhas da série de vazão da estação de Tocos.....	126
Tabela 5.9 Valores preenchidos nas séries utilizadas no cálculo da vazão afluente ao reservatório de Tocos.....	130
Tabela 5.10 Estatística de falhas da série de vazão da estação de Morsing.....	133
Tabela 5.11 Estatística de falhas da série de vazão da estação de Fazenda Nova Esperança.....	135
Tabela 5.12 Valores diários de EVPT para cada mês.....	136
Tabela 5.13 Frações para desagregação dos dados de EVPT.....	136
Tabela 5.14 Dados hidrológicos mensais (mm/mês) – sub-bacia de Cabeceira 1.....	138
Tabela 5.15 Dados hidrológicos mensais (mm/mês) – sub-bacia de Cabeceira 2.....	140
Tabela 5.16 Dados hidrológicos mensais (mm/mês).....	142

Tabela 6.1 Dados necessários para a estimativa inicial da fração de área permanentemente impermeável (b_2) na sub-bacia B6	151
Tabela 6.2 Dados necessários para a estimativa de x_3^o	154
Tabela 6.3 Parâmetros do modelo hidrológico estimados inicialmente e Limites inferiores e superiores.....	158
Tabela 6.4 Verificação estatística dos resultados do modelo	169
Tabela 6.5 Eventos hidrológicos selecionados	172

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Análise gráfica – comparação do hidrograma observado e calculado	29
Figura 2.2 Análise gráfica – vazões observadas x vazões calculadas	29
Figura 2.3 Esquema dos componentes e fluxos do modelo hidrológico de Sacramento	39
Figura 3.1 Localização da bacia do Paraíba do Sul	57
Figura 3.2 Topologia da área de interesse da LIGHT	60
Figura 3.3 Localização das obras hidráulicas na bacia do Paraíba do Sul	61
Figura 3.4 Esquema dos centros regionais e centro de hidrologia do STH	63
Figura 3.5 Localização da área de estudo	65
Figura 3.6 Figura esquemática do Sistema LIGHT	69
Figura 3.7 Esquema das sub-bacias hidrográficas modeladas	77
Figura 4.1 Esquema do ciclo de atualização com os períodos de monitoramento e previsão	80
Figura 4.2 Esquema dos componentes integrantes do SIPOP	83
Figura 4.3 Modelo lógico do banco de dados hidrologia – 1	87
Figura 4.4 Modelo lógico do banco de dados hidrologia - 2	88
Figura 4.5 Modelo lógico do banco de dados do SIPOP - 1	92
Figura 4.6 Modelo lógico do banco de dados do SIPOP - 2	92
Figura 4.7 Modelo lógico do banco de dados do SIPOP - 3	93
Figura 4.8 Sub-bacias e estações telemétricas para cálculo da chuva média	95
Figura 4.9 Seqüência de execução do modelo de previsão hidrológica e de operação hidráulica do SIPOP	101
Figura 4.10 Gráfico para validação dos resultados do modelo	104
Figura 5.1 Fluxograma da análise de consistência dos dados Pluviométricos	111
Figura 5.2 Hietograma mensal	113
Figura 5.3 Curvas duplo massa acumulativas	114
Figura 5.4 Fluxograma da análise de consistência dos dados fluviométricos	118
Figura 5.5 Tela principal do aplicativo utilidades.exe	119
Figura 5.6 Curva de descarga da estação de Várzea	121
Figura 5.7 Hidrograma da estação de várzea	122
Figura 5.8 Curva de descarga da estação de Rosário	123
Figura 5.9 Hidrograma da estação de rosário	124
Figura 5.10 Série de vazão desviada do reservatório de Tocos pelo túnel	125
Figura 5.11 Curva cota-volume de Tocos	126
Figura 5.12 Série de volume do reservatório de Tocos	127
Figura 5.13 Variação de volume do reservatório de Tocos	127
Figura 5.14 Série de Nível do reservatório de Tocos	128
Figura 5.15 Curva de descarga do vertedouro de Tocos	128
Figura 5.16 Série de vazão vertida pelo vertedouro livre de Tocos	129
Figura 5.17 Série corrigida de vazão afluyente ao reservatório de Tocos	131
Figura 5.18 Curva de descarga de Morsing	132
Figura 5.19 Hidrograma da Estação Morsing	132
Figura 5.20 Curva de descarga da estação Fazenda Nova Esperança	134

Figura 5.21 Hidrograma da Estação Fazenda Nova Esperança	134
Figura 5.22 Distribuição da EVTP (mm/dia), para o posto de Pirai, ao longo doze meses do ano	136
Figura 5.23 Exemplos de inconsistências encontradas nos dados hidrológicos de Tocos	139
Figura 5.24 Dados hidrológicos de Morsing (jan. e noV. de 2003)	141
Figura 5.25 Dados hidrológicos da sub-bacia intermediária 1	142
Figura 6.1 Série de dados para calibração manual	145
Figura 6.2 Período de recessão no posto fluviométrico de Lídice – determinação de d_i' e x_4^o	147
Figura 6.3 Período de recessão no posto fluviométrico de Lídice – Determinação de d_i'' e x_5^o	148
Figura 6.4 Série de vazões no posto fluviométrico de Lídice para estimativa de b_2	150
Figura 6.5 Série de vazões no posto fluviométrico de Lídice para estimativa de x_3^o	153
Figura 6.6 Algoritmo Simplex Modificado	163
Figura 6.7 Esquema do processo realizado durante a determinação automática dos parâmetros do modelo	164
Figura 6.8 Série de dados hidrológicos	168
Figura 6.9 Hidrogramas e pluviograma observados e hidrograma calculado da sub-bacia de cabeceira 2	169
Figura 6.10 Curva de permanência da sub-bacia cabeceira 2	170
Figura 6.11 Vazões classificadas calculadas versus observadas sub-bacia de cabeceira 2	170
Figura 6.12 Vazões observadas e previstas - evento 1	174
Figura 6.13 Chuva observada e cenário de chuva máxima - evento 1	174
Figura 6.14 Vazões observadas e previstas - evento 2	175
Figura 6.15 Chuva observada e cenário de chuva máxima - evento 2	175
Figura 6.16 Vazões observadas e previstas - evento 3	176
Figura 6.17 Chuva observada e cenário de chuva máxima- evento 3	176
Figura 6.18 vazões observadas e previstas - evento 4	177
Figura 6.19 Chuva observada e cenário de chuva máxima- evento 3	177

LISTA DE SIGLAS

AMH – Ambiente de Monitoramento Hidrológico (*software* do SIMEPAR)

ANA – Agência Nacional de Águas

API - *Antecedent Precipitation Index*

BDH – Banco de dados hidrológico

BDS – Banco de dados do SIPOP

CECA - Comissão Estadual de Controle Ambiental

CEDAE – Companhia Estadual de Água e Esgoto

CERJ – Companhia de Eletricidade do Rio de Janeiro

CESP – Companhia Energética de São Paulo

COS – Centro de Operações do Sistema

CPRM - Serviço Geológico do Brasil

DAEE/SP - Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo

DNAEE – Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica

EPS – *Environmental Protection Agency*

ETA – Estação de tratamento de água

EVTP – Evapotranspiração

HEC - *Hydrologic Engineering Center*

HECHMS - *Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System*

HSPF - *Hydrologic Simulation Program-Fortran*

IAC - Instituto Agrônomo de Campinas

IGU – Interface gráfica do usuário

IHFS – *Integrated Hydrometeorological Forecast System*

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

IOP – Instruções de Operação

IPA - Índice da Precipitação Precedente

IPH – Modelo matemático chuva-vazão

LIGHT – Light Serviços de Eletricidade S/A

MMS - *Modular Modeling System*

MODOPE - Modelo de Operação Hidráulica

MODSAC - Modelo Hidrológico Chuva-Vazão-Propagação

MODSIM – Módulo de execução do modelo hidrológico

MSM - Método *Simplex* Modificado

NOAA – *National Weather Service*

NWSRFS - *National Weather Service - River Forecasting System*

ONS – Operador Nacional do Sistema

RAMS - *Regional Atmospheric Modeling System*

RMS – *Route Mean Square*

RORB - *Runoff Routing Software*

SCADA - Sistema de supervisão, controle e aquisição de dados

SCE-UA - *Shuffled Complex Evolution Method*

SCS - *Soil Conservation Service*

SHE – *System Hydrologic European*

SIMEPAR – Instituto Tecnológico SIMEPAR

SIPOP - Sistema Integrado de Previsão Hidrológica e Operação Hidráulica em Tempo Real

SWM - *Stanford Watershed Model*

SSARR - *Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation*

STH – Sistema de Telemetria hidrológica

SUDERHSA – Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

SWMM - *Storm Water Management Model*

UBC – *University British Columbia*

UE- Usina Elevatória

UFPR – Universidade Federal do Paraná

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

UHE – Usina Hidroelétrica

USP - Universidade de São Paulo

WMO – *World Meteorological Organization*

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔQ = Variação da vazão entre dois pontos consecutivos da curva de descarga

Δt = Intervalo de tempo

$\Delta V_{TOS(t)}$ = Variação do volume do reservatório de Tocos

a = Coeficiente do modelo de propagação no canal

b_1 = Fração da bacia que se torna impermeável quando a capacidade de capilaridade for atingida

b_2 = Fração da bacia permanentemente impermeabilizada

e = Coeficiente da função de percolação

q = Vetor de parâmetros do modelo

qc = Expoente da função de percolação

m = Fração de fluxo base que não aparece no rio, constituindo recarga do aquífero

m_o = média dos valores observados

m_p = média dos valores previstos

r_o, p = correlação entre valor observado e previsto

s_o = desvio padrão dos valores observados

s_p = desvio padrão dos valores previstos

C_1 = variável auxiliar – módulo bacia

C_2 = variável auxiliar – módulo bacia

d_u = Coeficiente de drenagem instantânea da camada superior ($1/\Delta t$)

d'_1 = Coeficiente de drenagem instantânea primária da camada inferior ($1/\Delta t$)

d''_1 = Coeficiente de drenagem instantânea secundária da camada inferior ($1/\Delta t$)

D_{est}^{calc} = duração de estiagem para a série calculada

D_{est}^{obs} = duração de estiagem para a série observada

D_{cheia}^{calc} = duração da cheia para a série calculada

D_{cheia}^{obs} = duração da cheia para a série observada

$F(\mathbf{q})$ = Valor da função objetivo (geral);

$FUNK(x)$ = Valor da função objetivo para o modelo AMOEBA;

m_1 = Expoente da função da sub-zona de capilaridade da camada superior;
 m_2 = Expoente da função da sub-zona de água livre da camada superior
 m_3 = Expoente da função da sub-zona de capilaridade da camada inferior
 M = Expoente do modelo de propagação no canal
 N = número de estações consideradas no cálculo
 n = número de intervalos de tempo
 p_f = Fração de água percolada para as sub-zonas de água livre da camada inferior
 P_d = demanda por percolação
 PM_t = Chuva média na bacia M para o intervalo de tempo t
 PN_t = Chuva observada na estação N para o intervalo de tempo t
 Q_{MP}^{obs} = máxima vazão de pico observada da série
 Q_{MP}^{calc} = máxima vazão de pico calculada da série
 Q_p^{obs} = vazão instantânea de pico observada
 Q_p^{calc} = vazão instantânea de pico calculada
 Q_t^{obs} = vazão observada no tempo t
 Q_t^{calc} = vazão calculada no tempo t
 \bar{Q}_t^{calc} = vazões médias calculadas
 \bar{Q}_t^{obs} = vazões médias observadas
 $Qa(t)$ = Vazão afluyente ao reservatório
 $Qe(t)$ = Vazão defluente do reservatório
 $Qdesviada(t)$ = Vazão desviada do reservatório através de túneis e estações elevatórias
 $Q_{FUNDO(t)}$ = Vazão vertida pelo descarregados de fundo de Tocos no tempo t (m³/s)
 $Q_{A_TOS(t)}$ = Vazão afluyente ao reservatório de Tocos no tempo t (m³/s)
 $Q_{TUNEL(t)}$ = Vazão vertida pelo túnel de Tocos no tempo t (m³/s)
 $Q_{VERT(t)}$ = Vazão vertida pelo vertedouro livre de Tocos no tempo t (m³/s)
 $Q_i(t)$: descarga do trecho i no instante t
 $R(\mathbf{q})$ = Somatório das diferença entre os dados observados e os dados simulados utilizando o conjunto de parâmetros (\mathbf{q}) ;
 $\bar{R}(\mathbf{q})$ = Média de $R(\mathbf{q})$;

$QM(t)$ = Vazão monitorada correspondente ao nível ZM

QP1 = vazão 1, correspondente ao nível 1 na curva de descarga

QP2 = vazão 2, correspondente ao nível 2 na curva de descarga

RQ_p = Relação da vazão máxima

RDC = Relação de duração de cheia

$R\bar{Q}_p$ = Relação de vazões de Pico

R^2 = Coeficiente de determinação

RDE = Relação de duração de estiagem

RV = relação de volume

sq_t^{obs} = Desvio padrão de Q_i^{obs} ;

$s(\mathbf{q})$ = Desvio padrão de $R(\mathbf{q})$;

$S_i(t)$: armazenamento do trecho i no instante t

u_e = evaporação potencial

u_c = vazão instantânea total

u_p = chuva média na bacia

$VM(t)$ = Volume monitorado correspondente ao nível ZM

VP1 = volume 1, correspondente ao nível 1 na curva de descarga

VP2 = volume 2, correspondente ao nível 2 na curva de descarga

w_t = peso do intervalo de tempo t .

x_2^0 = Capacidade da sub-zona de água livre da camada superior (mm)

x_4^0 = Capacidade da sub-zona de água livre primária da camada inferior (mm)

x_5^0 = Capacidade da sub-zona de água livre secundária da camada inferior (mm)

x_3^0 = Capacidade da sub-zona de capilaridade da camada inferior (mm)

x_1^0 = Capacidade da sub-zona de capilaridade da camada superior (mm)

y_o = valor de chuva ou vazão observada.

y^f = valor de chuva ou vazão prevista

\bar{y}_o = valor médio dos dados de chuva ou vazão observada.

y = variável auxiliar – módulo bacia

ZM = Nível monitorado

ZP1 = Nível 1 da curva de descarga ou curva cota volume

ZP2 = Nível dois da curva de descarga ou curva cota volume

RESUMO

Previsões hidrológicas são de grande importância para a otimização do gerenciamento de reservatórios com múltiplos objetivos. Este estudo aborda as questões de previsão hidrológica e operação hidráulica para um sistema de reservatórios que atende a três objetivos: (a) geração hidrelétrica, (b) abastecimento de água e (c) controle de cheias. Neste estudo foi desenvolvido e calibrado um sistema integrado de previsão hidrológica e operação hidráulica em tempo real, composto por seis macro-atividades que envolveram hidrologia, hidráulica e informática: modelagem e implantação do banco de dados, análise de consistência dos dados hidrológicos, calibração dos parâmetros do modelo hidrológico, desenvolvimento de modelo de balanço hídrico para trechos com controle hidráulico, desenvolvimento de cenários de previsão de chuva, e desenvolvimento da interface gráfica do usuário. O sistema foi implantado para o Sistema Hidráulico da LIGHT, abrangendo parte da bacia do rio Paraíba do Sul e a sub-bacia do rio Piraí. A integração entre previsão hidrológica e operação hidráulica é importante para o Sistema LIGHT devido à transposição das águas do Paraíba do Sul para a vertente atlântica da Serra do Mar, aproveitando assim 295 metros de queda para geração de energia. Além da geração de energia, o sistema também contribui para o abastecimento de água do Rio de Janeiro (Sistema Guandu). No entanto, a transposição das águas dos rios Paraíba do Sul e Piraí através da Serra do Mar alterou o regime hidrológico natural, secando um trecho do rio Piraí, no município de Barra do Piraí, sendo que a população passou a ocupar a planície de inundação e até mesmo o leito do rio. Todavia, quando ocorrem chuvas intensas nas cabeceiras e a operação de transposição não tem capacidade suficiente para armazenar e transpor toda a cheia, então volta a ocorrer o escoamento sobre o trecho normalmente seco do rio Piraí a jusante do reservatório de Santana. O desenvolvimento do sistema integrado de previsão hidrológica e operação hidráulica para os rios Paraíba do Sul e Piraí visa otimizar a operação hidráulica de vários reservatórios para reduzir a probabilidade de vertimento no trecho seco do rio Piraí, em Barra do Piraí, e, caso o vertimento seja inevitável, a previsão hidrológica deve aumentar a antecedência para a emissão de alertas que possibilitem a minimização dos danos ocasionados pelas enchentes. Os principais desafios para o desenvolvimento deste estudo foram: (1) necessidade de dados hidrológicos e operativos consistentes e qualificados em tempo real; (2) necessidade de séries hidrometeorológicas e operativas longas para calibração do modelo hidrológico e de propagação de cheias; (3) incorporação do efeito orográfico na estimativa da chuva média na bacia; (4) previsão de chuva assumindo cenários derivados das propriedades da distribuição de chuva para cada posto e estação do ano; (5) indisponibilidade de dados monitorados de evaporação, os quais foram estimados através da análise climatológica; (6) conhecimentos multidisciplinares para a especificação do banco de dados, programação de rotinas científicas e arquitetura da interface gráfica do usuário. O desenvolvimento deste estudo demonstra a complexidade inerente à conjugação de conhecimentos de hidrologia, hidráulica, informática, monitoramento hidrológico e operativo visando a elaboração de um sistema integrado de previsão hidrológica em tempo real.

ABSTRACT

Streamflow forecasting is a pivotal input for the optimization of multiple-purpose reservoir operation. The goal of this study is to develop a system that integrates real time hydrologic and reservoir operational data assimilation, hydrologic forecasting and reservoir hydraulic operation. The integrated system development was geared toward a test case application, which comprises the Paraiba do Sul and Pirai basins, with three kinds of consumptive water use: (a) power generation, (b) water supply and (c) flood control. The application, named Real-Time Integrated Hydrologic Forecasting and Reservoir Operation System, required multidisciplinary expertise in hydrology, hydraulic and computer science. The main system development activities were: (a) database modeling and implementation, (b) hydrologic data consistency analysis, (c) hydrologic model calibration, (d) reservoir operation simulation, (e) rainfall forecasting scenarios, and (f) user interface. The test case was the “Light Hydraulic System”, with three reservoirs, two pumping stations and two hydroelectric power plants within the Paraiba do Sul and Pirai basins. The main objective of the Integrated Hydrologic Forecasting and Reservoir Operation System is to optimize the reservoir operation, in order to reduce the of spilling probability into the Pirai River which crosses the city of Barra do Pirai. To avoid flooding in the Barra do Pirai city, the group of three reservoirs, one in the Paraiba do Sul river and two in the Pirai river, should use streamflow forecasting to trigger the operation rules for flood control. The integration of hydrologic forecast and hydraulic operation is very important for these basins because the transposition of the Paraiba do Sul streamflow to the Pirai basin generates energy with 295 m-head across Serra do Mar and yields water to the city of Rio de Janeiro (Guandu System). The main challenges for the development of this research were: (a) the set up of operational and hydrologic real-time data; (b) long series of both hydrologic and hydraulic operational data for the hydrologic model calibration; (c) the mean-areal precipitation estimation with strong orographic effect; (d) data base design and computational programming of the model algorithms and user interface. This study delves into the design of real time data acquisition, hydrologic forecasting and complex hydraulically controlled reservoir operation, to develop and test the Real-Time Integrated Hydrologic Forecasting and Reservoir Operation System.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

Desastres naturais relacionados a inundações, alagamentos e enchentes, além de muito freqüentes, provocam grandes danos materiais e, dependendo de sua magnitude, causam a irreparável perda de vidas (CASTRO, 1996). A ocorrência de inundações em áreas urbanas e ribeirinhas no Brasil tem se intensificado e tornado mais freqüente a cada ano. Este agravamento é função tanto da crescente impermeabilização do solo, decorrente da urbanização acelerada, como da imprevidente ocupação urbana de áreas ribeirinhas, que antes constituíam as várzeas e planícies de inundação (Agência Nacional de Águas, 2000).

Para minimizar os danos decorrentes de inundações podem ser implantadas medidas estruturais (de controle) e não-estruturais (de convivência).

As medidas estruturais são obras de engenharia executadas para reduzir o risco e a intensidade dos impactos das enchentes. As medidas estruturais não são projetadas para dar uma proteção completa aos bens e a sociedade, o que seria física e economicamente inviável.

As medidas não-estruturais são procedimentos de convivência com as enchentes, sem alteração do meio físico, reduzindo o impacto da enchente sobre a sociedade. As medidas não-estruturais não modificam o risco das enchentes naturais. Riscos estes que são freqüentemente majorados artificialmente por ações antrópicas, tais como a ocupação do solo e a impermeabilização de vastas áreas que aceleram o acúmulo de água nas áreas baixas, provocando o aumento das vazões de pico resultantes de eventos de chuva (SUDERHSA, 2000). As medidas não-estruturais mais comuns são as institucionais e os sistemas de previsão e alerta de enchentes. As medidas institucionais regulam a ocupação do solo, através de políticas e planos diretores, afastando a população das áreas de risco. Os sistemas de previsão e alerta de

enchente, visam reduzir os impactos das enchentes sobre as pessoas e seus patrimônios, através da antecipação da ocorrência da enchente (previsão) e da divulgação antecipada da enchente (alerta), permitindo a remoção de pessoas e bens através de um plano de evacuação coordenado. A evacuação requer coordenação institucional, participação pública e privada no fornecimento de meios físicos para deslocamento de pessoas e bens, pré-definição de locais de abrigo temporário que garantam condições de subsistência às pessoas e segurança aos seus bens, além de ações preventivas de saúde.

Há casos em que medidas estruturais e não-estruturais se conjugam, por exemplo, quando há um sistema de previsão hidrológica aplicado à operação de reservatórios. O reservatório constitui um elemento de medida estrutural que pode controlar a enchente, e o sistema de previsão hidrológica integrado à operação hidráulica do reservatório é uma medida não-estrutural que aumenta a eficiência do reservatório em controlar a cheia. Essencialmente a forma com que a previsão integrada com a operação do reservatório aumenta a eficiência do controle de enchente é resultante da antecipação do esvaziamento do reservatório (aumento do volume de espera) para acomodar a onda de cheia que foi estimada pela previsão hidrológica. O reservatório é usado dinamicamente para reduzir a vazão de pico, através do encadeamento das atividades de previsão hidrológica (medida não estrutural), que dispara a operação hidráulica de esvaziamento do reservatório, que por sua vez elimina ou então reduz a onda de cheia através do armazenamento desta no reservatório (medida estrutural).

Outro fator de grande importância e que deve ser considerado durante a operação dos reservatórios é o uso múltiplo da água, seja este previsto no projeto ou imposto pela sociedade ao longo do tempo (CUNHA, 1981). No caso de reservatórios construídos com o objetivo de geração hidrelétrica, existem dois usos principais, os quais são conflitantes entre si. O primeiro uso refere-se à geração de energia, cujo objetivo é maximizar o volume de água disponível no reservatório, a fim de aumentar

e garantir a geração. O segundo refere-se à alocação de um determinado volume vazio no mesmo, denominado volume de espera, capaz de amortecer a onda de cheia durante eventos extremos. As alocações de volumes de espera excessivos, que reduzam a eficiência energética através do rebaixamento do nível do reservatório, podem ser evitadas através da operação otimizada dos reservatórios (CASTANHARO, MINE, 1998). Sendo a operação realizada em função do estado (nível d'água) do reservatório, das vazões afluentes e das restrições físicas de montante e de jusante, o monitoramento dos dados hidrológicos e a previsão de afluência aos reservatórios permitem sua otimização (MINE, 1998). Este fato foi provado por Rutter já em 1949, quando demonstrou que, caso houvesse uma previsão “perfeita” de vazões, a eficiência dos reservatórios de controle de cheia do *Tennessee Valley Authority* poderia ter sido aumentada em aproximadamente 50 % (BRAGA, 1981).

Neste contexto, a implantação de um sistema de monitoramento das variáveis hidrológicas em tempo real, aliado a um sistema de previsão de vazão de curto prazo, funciona como um instrumento de alerta ao risco de inundação, além de permitir a otimização da operação dos reservatórios. As informações fornecidas por este sistema possibilitam que sejam tomadas medidas de contingência em tempo hábil para minimização dos danos ocasionados pelas enchentes, sem que seja necessária a implantação de medidas conservadoras que prejudiquem a operação dos reservatórios.

Vale ressaltar que embora a previsão e o alerta de enchentes sejam essencialmente medidas não-estruturais, a sua eficiência está associada à capacidade de resposta em deslocar as populações que seriam afetadas pela enchente e à confiança das populações em participar dos planos de evacuação. No caso da previsão falhar e a população ter sido evacuada desnecessariamente, então a credibilidade do alerta ficará comprometida, reduzindo a adesão da população em evacuações futuras, mesmo que nos casos futuros as previsões e alertas estejam corretos. Desta forma, a previsão hidrológica só produz benefícios à sociedade se a incerteza associada aos dados e a metodologia (modelo e parâmetros) que deram origem à previsão forem conhecidas,

caso contrário aumentam as chances de falsos alertas, com conseqüente descrédito do sistema de previsão. Para que se determinem as incertezas da previsão hidrológica é absolutamente necessário prever um período de acompanhamento do desempenho do sistema de previsão para eliminar erros, reforçar os meios tecnológicos de coleta e transferência dos dados medidos em tempo real, e treinar a equipe que opera o sistema e emite os alertas. No entanto, o que se verifica na prática é a eliminação do período de acompanhamento, prevalecendo a operação imediata do sistema de previsão, resultante da necessidade de “venda” para a sociedade de um projeto tecnológico. A “venda” antecipada tende a ser contra-producente, pois cria uma expectativa de solução para o problema das enchentes, que freqüentemente é desfeita pela emissão de falsos alertas, trazendo descrédito e impedindo que sejam realizadas as etapas necessárias de acompanhamento, ajuste e treinamento.

A motivação deste trabalho é desenvolver um sistema que forneça previsão de vazão afluente e de nível de reservatórios em tempo real, além de previsões de vazão e nível em estações telemétricas localizadas em pontos estratégicos da bacia. Entende-se por previsão em tempo real, aquela que é feita para um horizonte de tempo que permita a tomada de decisão. Durante o intervalo entre a atualização das previsões novos dados são coletados e processados, permitindo que novas previsões possam ser realizadas (MINE, 1984).

O sistema será implantado para a área denominada Sistema Hidráulico da LIGHT, localizada na bacia do rio Paraíba do Sul, onde foram construídos reservatórios e obras hidráulicas com o objetivo de geração hidroenergética. Estas obras passaram a ter grande importância no abastecimento de água da cidade do Rio de Janeiro, na refrigeração da usina nuclear de Angra e no controle de cheias da região. O sistema de previsão permitirá otimizar a operação hidráulica dos reservatórios e das obras hidráulicas no âmbito dos usos múltiplos da água. Além disso, as previsões permitirão que o Sistema de Defesa Civil seja alertado, com maior antecedência, sobre a evolução dos fenômenos adversos, e reaja de forma adequada e eficiente, reduzindo

a vulnerabilidade das populações ameaçadas.

O estudo visa unir a pesquisa científica e o desenvolvimento tecnológico na produção de um sistema integrado de previsão hidrológica e de operação hidráulica em tempo real (SIPOP) para suporte à operação de reservatórios, sendo que tanto os aspectos científicos quanto os tecnológicos são descritos individualmente na seqüência desta seção. A união entre o ambiente científico e operacional é de grande importância no aprimoramento dos sistemas de previsão, uma vez que os avanços nesta área, tanto científicos como tecnológicos, ocorrem muito rapidamente e podem trazer grandes benefícios para o alerta e controle de cheias (GEORGAKAKOS, 2004).

A pesquisa científica está associada com a implantação do modelo hidrológico de Sacramento para um trecho da bacia do Paraíba do Sul, localizada na região sudeste do território brasileiro. O modelo de Sacramento tem sido amplamente utilizado pelo Serviço Meteorológico dos Estados Unidos para a produção de previsões hidrológicas operacionais. A aplicação do modelo de Sacramento para os rios Paraíba do Sul e seu afluente Piraí necessitou o desenvolvimento de modificações funcionais para adequá-lo às peculiaridades orográficas e climatológicas da bacia selecionada.

A região de serra cria condições particulares no processo físico que gera o fluxo de base, que fogem da formulação original do modelo de Sacramento. Caso a formulação de percolação do Modelo de Sacramento fosse aplicada diretamente à bacia do Paraíba do Sul, o modelo não teria memória suficiente para manter a vazão de base até o final da estação seca. A bacia do Paraíba do Sul, encaixada entre a Serra do Mar e a Serra da Mantiqueira, apresenta uma sazonalidade bastante marcada, através de estações chuvosa (novembro a março) e seca (abril a outubro) bem definidas. Durante a estação chuvosa o modelo essencialmente transforma a chuva (que pode ser medida) em escoamento superficial e armazenamento do solo. O escoamento superficial (que não pode ser medido), tem a mesma escala temporal da ocorrência da chuva, sendo que, com breve retardo, o escoamento superficial se concentra no sistema de drenagem natural da bacia e então se propaga no canal do rio contribuindo para o

aumento rápido da vazão (que pode ser medida). A parcela da chuva que percola, aumenta o armazenamento da água no solo, que por sua vez confere a memória de longo prazo do sistema hidrológico, dando origem à vazão de base. A variação da vazão de base apresenta escala de tempo (memória) muito maior do que a escala da duração da chuva que caracteriza as variações bruscas do escoamento superficial. A concepção original do Modelo de Sacramento não seria capaz de simultaneamente produzir as elevadas vazões de pico, associadas com as chuvas intensas na bacia serrana, e manter o escoamento de base durante toda a estação seca. Caso esta fosse diretamente aplicada à bacia deste estudo, produziria um escoamento de base muito inferior ao registrado na série histórica de vazões. A alteração aqui introduzida no modelo de Sacramento visa garantir a manutenção da vazão de base, com magnitude semelhante à registrada nos postos fluviométricos, durante toda a estação seca. A hipótese sobre o processo físico que garante a manutenção de vazão de base elevada durante vários meses na bacia do Paraíba do Sul consiste em se admitir que a vazão de base é resultante do armazenamento nas camadas não saturadas do solo e de contribuições das camadas saturadas que não estão confinadas às áreas limitadas pelos divisores da bacia. Admitiu-se a hipótese de que ocorrem fluxos subterrâneos na bacia do Paraíba do Sul que contribuem para a vazão de base que são originados na chuva ocorrida em outra vertente da serra, fora do limite da bacia. Portanto, as vazões de enchente estão claramente associadas à chuva na bacia, mas as vazões de base podem ser originadas de recarga do aquífero provocada pela chuva dentro do limite da bacia e da recarga do aquífero resultante da chuva fora da bacia. A orografia e a evolução dos sistemas meteorológicos que provocam chuva naquela região podem justificar esta hipótese.

O desenvolvimento tecnológico empregado nesta dissertação é constituído pela integração funcional e operacional de uma rede telemétrica, banco de dados relacional com assimilação automática dos dados hidrológicos e entrada interativa de dados operativos, aplicativo de controle de qualidade de dados, aplicativo hidrológico,

aplicativo de operação hidráulica e interface gráfica para visualização das previsões e simulações.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

A proposta deste estudo é desenvolver e calibrar um sistema integrado de previsão hidrológica e de operação hidráulica em tempo real para suporte à operação de reservatórios, constituído de banco de dados, aplicativos de processamento de dados, simulação hidrológica e balanço hídrico de reservatórios e interface gráfica do usuário.

O modelo hidrológico utilizado na previsão de vazão foi o Sacramento, o qual foi alterado com o objetivo de obter uma representação mais precisa dos processos físicos de geração do fluxo de base em áreas de serra.

1.2.2 Objetivos específicos

O desenvolvimento e implantação de um sistema de previsão de vazão envolvem um grande número de atividades:

- a) descrição detalhada da área de estudo e definição dos principais pontos de controle;
- b) implantação de um sistema de coleta de dados em tempo real;
- c) arquitetura e implantação do banco de dados;
- d) aquisição dos dados hidrometeorológicos e análise de consistência destes;
- e) cálculo da chuva média;
- f) calibração e verificação dos parâmetros do modelo hidrológico para as sub-bacias modeladas;
- g) modelo de balanço hídrico em trechos com mecanismos de controle e

- aproveitamento hidráulico;
- h) definição dos cenários de previsão de chuva;
- i) estimativa da evapotranspiração;
- j) desenvolvimento dos aplicativos de processamento dos dados hidrológicos e de operação hidráulica;
- k) desenvolvimento de uma interface gráfica amigável;
- l) testes e manutenção do sistema.

Estas atividades configuram os objetivos específicos deste trabalho, com exceção da atividade (b) que foi desenvolvida pela equipe de infra-estrutura do SIMEPAR. Vale ressaltar ainda que o desenvolvimento das atividades (c), (k) e (l) foram desenvolvidos por equipe multidisciplinar, incluindo programadores e analistas de dados, sobre orientação da autora do trabalho e coordenação do orientador desta dissertação.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este documento está organizado em oito itens. O item um consiste desta introdução, onde são apresentados o escopo e objetivos gerais e específicos do estudo. O item dois apresenta a revisão da literatura, sendo abordados como temas a modelagem hidrológica, modelos hidrológicos conceituais, o modelo hidrológico de Sacramento e uma breve discussão a respeito dos efeitos orográficos sobre o regime pluviométrico da bacia do Paraíba do Sul. A escolha dos temas da revisão bibliográfica foi realizada com o objetivo de direcionar o estudo sobre o modelo hidrológico utilizado neste trabalho. Iniciou-se com uma revisão bastante geral sobre modelos hidrológicos, focando-se gradualmente em um tema específico, que é o próprio modelo utilizado neste trabalho. O item três apresenta uma breve descrição da área de estudo, enfatizando suas principais características físicas, sua importância na geração hidroenergética e no abastecimento de água, e os principais problemas decorrentes da instalação das estruturas hidráulicas e reservatórios. No item quatro é apresentado o

Sistema Integrado de Previsão Hidrológica e Operação Hidráulica em Tempo Real (SIPOP), descrevendo seus principais componentes e processos. O item cinco descreve os dados hidrológicos horários disponíveis para calibração e a metodologia de consistência e preenchimento das séries hidrológicas aplicada neste trabalho. O item seis descreve os procedimentos manuais e automáticos de calibração dos parâmetros do modelo hidrológico, além de apresentar os resultados obtidos. O item sete apresenta as principais conclusões obtidas no desenvolvimento desta dissertação e recomendações para trabalhos futuros. Ao final do trabalho, no item oito, são apresentadas as referências citadas nesta dissertação.

O documento apresenta ainda cinco Apêndices. O primeiro contém uma descrição detalhada das sub-bacias modeladas e dos aproveitamentos hidráulicos nelas localizados. O segundo apresenta a metodologia utilizada na definição do cenário de previsão de chuva utilizado na previsão de vazão. No terceiro são apresentadas as telas que fazem parte da interface gráfica do usuário. O quarto apresenta os resultados obtidos na calibração do modelo para duas sub-bacias localizadas na área de estudo. No último podem ser visualizados três mapas detalhados da área de estudo. O primeiro apresenta a localização da bacia do Paraíba do Sul e da área de estudo, o segundo a área do Sistema Hidráulico da Light e suas principais informações e o terceiro a hipsometria da bacia do Paraíba o Sul.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MODELO HIDROLÓGICO

Segundo BURNASH (1995, p.311-366), a modelagem hidrológica busca descrever e quantificar os processos responsáveis por gerar os escoamentos observados no histórico da bacia e, desta forma, fornecer uma ferramenta de estimativa do escoamento futuro. Os modelos hidrológicos têm ampla aplicação no gerenciamento de recursos hídricos, orientando os planejadores a tomarem decisões que melhor atendam os interesses da sociedade sem comprometer o meio ambiente.

2.1.1 Histórico

A história do desenvolvimento dos modelos hidrológicos pode ser dividida em três etapas principais: até 1940, de 1940 até metade da década de 1960 e deste marco até os dias atuais. Nas primeiras décadas do século XIX, a hidrologia estava voltada a estudar os elementos do ciclo hidrológico de maneira descritiva, sem a necessidade de quantificar o volume de água atribuído a cada processo (TUCCI, 1998, p. 232 – 235).

Com o avanço econômico, a partir da década de 1940, os recursos hídricos disponíveis começaram a ser utilizados em grandes obras de engenharia e surgiu a necessidade de se quantificar estes recursos. Nesta etapa, houve um grande esforço de pesquisa voltado ao desenvolvimento de modelos e teorias matemáticas que estimassem os volumes de água envolvidos em cada processo do ciclo hidrológico. A maioria dos modelos estudados buscava apenas representar componentes do ciclo hidrológico isolados, como o escoamento superficial, escoamento no canal, infiltração, evaporação e etc. Exemplos deste tipo de modelos são listados nos itens 1 a 8 da Tabela 2.1, dando destaque ao método racional, desenvolvido por Mulvaney em 1950, e ao Método do Hidrograma unitário, desenvolvido por Sherman em 1932.

Somente com a revolução digital tornou-se possível integrar os modelos utilizados para representar cada componente do ciclo hidrológico e tentar simular o comportamento da bacia hidrográfica como um todo. Em 1966, LINSLEY e CRAWFORD (1966)¹, citados por THIMOTTI (2003), apresentaram o modelo conceitual concentrado Stanford (*Stanford Watershed Model – SWM*), o qual foi provavelmente a primeira tentativa de integrar todos os processos do ciclo hidrológico. Simultaneamente, um grande número de modelos de menor abrangência foi apresentado, por exemplo, o sistema HEC – 1 (*Hydrologic Engineering Center, 1968*), onde diversos modelos foram agrupados. Surgiram também modelos semidistribuídos, capazes de levar em consideração a variabilidade espacial dos processos hidrológicos, como o modelo Tank, desenvolvido por Sugawara em 1967 (SINGH, 2002). Exemplos deste tipo de modelo podem ser visualizados na Tabela 2.1, itens 9 a 19.

O sucesso obtido pelo modelo de Stanford na previsão de vazão incentivou o desenvolvimento de diversos outros modelos conceituais concentrados durante os anos de 1970 e 1980, incluindo o Modelo de Sacramento.

Um dos grandes desafios atuais é a integração de informações geradas por novas tecnologias nos modelos hidrológicos, como por exemplo, dados gerados por sensoriamento remoto, sistemas de informações geográficas, sistemas de gerenciamento de dados e sistemas especialistas.

No Brasil um dos grandes problemas encontrados na modelagem hidrológica reside no fato de não se dispor de dados hidrológicos em quantidade e qualidade adequadas, sendo estes insuficientes para descrever as principais características das bacias hidrográficas. Este problema normalmente dificulta a aplicação de modelos com precisão, uma vez que a calibração ou estimativa dos parâmetros não pode ser realizada adequadamente.

¹ LINSLEY, R. K.; CRAWFORD, N. H. Computation of a synthetic streamflow record on a digital computer, pub. n° 51, International Association of Scientific Hydrology, p. 526-538, 1960.

TABELA 2.1 MODELOS HIDROLÓGICOS

N	MODELO / AUTOR(ANO) / OBSERVAÇÕES
1	Método Racional / Mulvany (1850) / Ainda hoje utilizado em diversas áreas, como em projeto de drenagem urbana.
2	Fórmula de Manning/ Manning (1891) / Fórmula empírica para cálculo unidimensional do fluxo de água em canais.
3	Hidrograma Unitário / Sherman (1932) / Cálculo do escoamento direto proveniente de um evento de precipitação
4	HORTON / Horton (1933) /- Estimativa da infiltração e separação do hidrograma
5	HORTON / Horton (1945) / Análise das características das redes de drenagem de bacias hidrográficas, com base na geomorfologia
6	<i>Curve number</i> / <i>Soil Conservation Service</i> – SCS (1956) / Determinação da vazão de cheia
7	Método de Puls / Puls (1949) / Escoamento em canal
8	Método de Muskingum / Mc Carthy e outros (1935) / Escoamento em canal
9	SWM - <i>Stanford Watershed Model</i> / Crawford e Linsley (1966) / Primeiro modelo a integrar todos os componentes do ciclo hidrológico
10	<i>Antecedent Precipitation Index</i> (API) / Sittner et al. (1969) / Modelo concentrado utilizado para previsão de vazão
11	<i>Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System</i> (HECHMS) / Feldman (1981), HEC (1981, 2000) / Conceitual, semi-distribuído para simular o escoamento na exutória da bacia.
12	<i>Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation</i> – SSARR / Rockwoos (1982) / Modelo concentrado e contínuo
13	<i>National Weather Service – River Forecast System</i> (NWSRFS) / Burnash, (1973, 1975) / Modelo de Sacramento utilizado para previsão de vazão
14	Modelo tanque / Sugawara (1974) / Modelo semi-distribuído
15	<i>Storm Water Management Model</i> (SWMM) - Metcalf e Eddy (1971), entre outros - Modelo semi-distribuído para simulação da vazão de cheia
16	ARNO / Todini (1988) / Modelos semi-distribuído
17	<i>Integrated Hydrometeorological Forecasting System</i> (IHFS) / Georgakakos et al. (1999) / Modelo conceitual de previsão de chuva e Modelo de Sacramento para previsão de vazão
18	IPHII (Instituto de pesquisas Hidráulicas) / Tucci et al. (1981) / Modelo desenvolvido no Brasil com o objetivo de permitir seu uso para projetos de engenharia em bacias rurais e urbanas.
19	TOPMODEL / BEVEN et al (1994) / Modelo hidrológico que considera a topografia como participante direta do processo de formação do escoamento superficial.

2.1.2 Modelos atualmente em uso

Diversos modelos se encontram em uso por todo o mundo. Como estes são utilizados para diferentes propósitos, suas estruturas variam significativamente em relação à modelagem de cada processo do ciclo hidrológico.

Nos Estados Unidos, o HEC – HMS, um sistema que abrange um grande número de modelos, é considerado o modelo mais utilizado pelo setor privado, principalmente em projeto de sistemas de drenagem, quantificação dos efeitos

decorrentes de mudança do uso do solo, etc. O Modelo NWS, calcado no modelo de Sacramento, é considerado o principal modelo quando se trata de previsão de vazões e, por isso, foi escolhido para ser utilizado neste trabalho. O modelo HSPF (*Hydrologic Simulation Program-Fortran*) e seus aplicativos de modelagem da qualidade da água são extensamente utilizados pela agência de proteção ambiental (EPS – *Environmental Protection Agency*). O modelo MMS (*Modular Modeling System*) é amplamente utilizado para planejamento de recursos hídricos, especialmente aqueles executados sobre a supervisão do U.S. Bureau of Reclamation.

No Canadá os modelos mais populares para simulação hidrológica são WATFLOOD e UBC. Na Austrália, os modelos RORB e WBN são comumente utilizados na previsão de vazão, projetos de drenagem e avaliação de mudanças no uso do solo. Os modelos TOPMODEL e SHE são utilizados na maioria dos países europeus. Os modelos mais aceitos no Japão são ARNO, LCS e TOPIKAKI e na China o modelo Xinanjiang (SINGH, 2002).

No Brasil encontra-se em destaque o modelo IPH, descrito por TUCCI e CAMPANA (1993) e TUCCI (1998), o qual é amplamente utilizado no ambiente acadêmico e institucional. Este modelo é aplicado em bacias que não necessitam de propagação no leito do rio ou que este efeito não seja importante no processo, uma vez que simula somente o escoamento na superfície da bacia. Em operação contínua encontram-se também os modelos utilizados pelo ONS para otimização da operação dos reservatórios para geração elétrica, podendo-se destacar os modelos NEWAVE, NEWDESP e DECOMP (ONS, 2000).

2.1.3 Classificação

Nas últimas três décadas um considerável número de pesquisas tem levado ao desenvolvimento de diversos modelos matemáticos, os quais apresentam características diferentes entre si. Neste item serão apresentadas as principais classificações dos modelos hidrológicos e suas descrições:

- a) estocástico, determinístico e híbrido: Refere-se ao tipo de variável utilizada pelo modelo. O modelo é dito estocástico quando pelo menos uma variável envolvida tem comportamento aleatório e é descrita no modelo por meio de uma distribuição de probabilidade. O modelo determinístico é aquele para o qual um determinado valor de entrada sempre produzirá o mesmo valor de saída, considerando o mesmo estado inicial do sistema, ainda que suas variáveis de entrada sejam aleatórias. Neste caso, os conceitos probabilísticos das variáveis são negligenciados. O modelo híbrido combina componentes determinísticos e estocásticos;
- b) conceituais e empíricos: Os modelos conceituais baseiam-se na representação dos processos físicos que envolvem o fenômeno estudado. Estes são subdivididos em semiconceituais e fisicamente fundamentados. O primeiro relaciona as características físicas do processo mantendo razoável empirismo na definição dos parâmetros e o segundo se aproxima bastante da física do sistema. Os modelos empíricos não apresentam nenhuma relação com os processos físicos envolvidos e, por isso, são também denominados de modelos “caixa-preta”;
- c) concentrados e distribuídos: Um modelo é dito concentrado quando seus parâmetros e variáveis variam somente em função do tempo, ou seja, não é levada em conta a variabilidade espacial na área considerada. Neste caso, os dados de entrada e saída são representativos de toda a sub-bacia modelada. São exemplos deste tipo de modelo: Fórmula racional, Modelo do Hidrograma Unitário, Modelo reservatório linear simples, Modelo Clark, Modelo NASH (*Storm response models of Nash*), Modelo de Armazenamento, Modelo de Tanque, Modelo HEC, Modelo Stanford e Modelo de Sacramento (BAE, 1992). Os modelos distribuídos possuem a capacidade de representar a variabilidade espacial das características físicas da bacia hidrográfica. Neste caso, as variáveis e parâmetros do

modelos dependem do tempo e do espaço. Os modelos distribuídos aplicam a lei da conservação de massa em escala local e utilizam como dado de entrada uma grande quantidade de informações que definem as características espaciais da bacia hidrográfica. Estes modelos fornecem como dado de saída o volume de escoamento em qualquer ponto do canal. Como exemplo deste tipo de modelo citam-se: Modelo da onda cinemática, Modelo de Fluxo saturado e não-saturado, Modelo hidrológico europeu – SHE e TOPOG. O modelo semi-distribuído representa uma bacia hidrográfica como um conjunto de sub-bacias. Como exemplo deste tipo de modelo pode-se citar os modelos de Sacramento e TOPMODEL;

- d) lineares e não Lineares: Considerando a teoria estatística, um modelo é linear, se uma variável de saída, y , encontra-se associada à variável de entrada, x , por meio de uma equação linear do tipo $y = a + b \times x$. Como exemplo deste tipo de modelo pode-se citar os modelos de regressão. Segundo a teoria de sistemas, um sistema é dito linear quando o princípio da superposição é respeitado, ou seja, se $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são variáveis de saída do modelo produzidas pelas entradas $x_1(t)$ e $x_2(t)$, respectivamente, a resposta a uma entrada $x_1(t) + x_2(t)$ será $y_1(t) + y_2(t)$. Desta forma, nem sempre os modelos classificados pela teoria estatística como lineares respeitam o princípio da superposição;
- e) estacionários e não-estacionários: Os modelos são ditos estacionários quando os parâmetros permanecem constantes ao longo da simulação e não estacionários quando estes são atualizados. A atualização dos parâmetros se torna viável quando os fenômenos representados mudam de comportamento segundo certos intervalos de tempo definidos ou em modelos para a previsão de curto prazo;
- f) contínuo e discreto: Um modelo hidrológico é dito discreto (por evento) quando objetiva modelar períodos isolados da série, normalmente

buscando representar eventos de cheia ou recessão. Os modelos contínuos buscam representar longos períodos da série, muitas vezes contemplando épocas de comportamentos hidrológicos diferentes. Em decorrência disto, estes modelos apresentam estrutura mais detalhada, desenvolvida para simular com maior exatidão todas as fases do ciclo hidrológico. Mesmo os modelos contínuos no tempo apresentam discretização temporal, denominada passo de cálculo, pois muitas vezes os fenômenos do ciclo hidrológico são representados por equações diferenciais que não possuem solução analítica. A escolha do intervalo de tempo do modelo depende basicamente do fenômeno estudado, da disponibilidade de dados e da precisão desejada nos resultados. Em geral, quanto menor o intervalo de tempo maior será a precisão dos resultados, aumentando também o custo computacional para geração destes resultados (RENNÓ, SOARES, 2003).

Os conceitos aqui apresentados estão baseados no texto de TUCCI (1998, p. 20-24). Mais discussões a respeito das classificações de modelos hidrológicos podem ser encontradas em MAIDMENT (1993), SINGH (1995, p.1-23), e SINGH e WOOLHISER (2002).

2.1.4 Seleção

Segundo TUCCI (1998, p. 313 - 320), a escolha do modelo hidrológico a ser aplicado deve ser realizada tendo em vista os seguintes aspectos:

- a) objetivos do estudo: Este critério visa definir o grau de detalhamento que se pretende atingir, o qual reflete no grau de detalhamento do modelo a ser aplicado. Modelos para previsão em tempo real, por exemplo, exigem previsões executadas com rapidez e alta precisão. Por outro lado, modelos para extensão de séries de vazão devem procurar representar as características estatísticas da série produzida;

- b) características físicas e climáticas da área de estudo: Neste caso, deve-se analisar a variabilidade espacial e temporal das características da bacia, sendo que o modelo aplicado deve ser capaz de reproduzir estas características, mesmo que de maneira simplificada;
- c) disponibilidade de dados: Alguns modelos exigem uma grande quantidade de dados monitorados para estimativa de seus parâmetros, sendo que a indisponibilidade destes dados impossibilita sua utilização. Por outro lado, existem modelos que possuem pequeno número de parâmetros e podem ser utilizados em áreas com falta de dados.
- d) familiaridade com o modelo: O conhecimento do usuário a respeito do modelo utilizado e dos parâmetros a serem estimados tende a reduzir as incertezas na aplicação deste.

O objetivo deste trabalho é realizar previsões automáticas de vazão, utilizando dados hidrológicos monitorados em tempo real. Um tipo de modelo que é amplamente utilizado para este objetivo e que apresenta bons resultados é o modelo chuva-vazão conceitual e, por isso, foi selecionado para ser utilizado neste trabalho. A estrutura deste será descrita com maior detalhe no subitem a seguir.

2.2 MODELOS HIDROLÓGICOS CONCEITUAIS

2.2.1 Estrutura básica

Modelos conceituais chuva-vazão têm sido desenvolvidos para representar, de maneira realista, os sub-processos e relações envolvidas no processo chuva-vazão. Embora esses modelos variem significativamente quanto ao grau de complexidade, precisão e quantidade de parâmetros utilizados, eles possuem características essencialmente comuns, as quais serão apresentadas neste subitem.

A estrutura dos modelos conceituais busca representar os mecanismos físicos

que governam a bacia hidrográfica (infiltração, interceptação, percolação, evaporação, escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo). Normalmente estes são representados em duas fases distintas: uma primeira, denominada “fase bacia”, em que o balanço hídrico é realizado ao nível do solo e o escoamento superficial resultante é calculado; e uma segunda, denominada “fase canal”, em que essa vazão é propagada ao longo dos cursos d'águas, até a seção de controle da bacia hidrográfica.

2.2.1.1 Fase bacia

A fase bacia é a mais importante e, por isso, é a que mais diferencia os diversos modelos hidrológicos existentes. Ela expressa o balanço hídrico da bacia hidrográfica, definindo a parcela do volume de água precipitada que será evaporada, absorvida pelo solo, ficará retida na superfície (interceptação ou armazenamento superficial) ou será destinada ao escoamento superficial. Neste tipo de modelo também é comum tratar separadamente o volume de escoamentos superficial e subterrâneo, por apresentarem processos físicos bastante distintos. Outra importante razão para a separação dos escoamentos é tornar possível a estimativa do volume de água nas diversas camadas do solo, possibilitando estimar com maior precisão a contribuição do fluxo de base durante períodos secos e úmidos.

2.2.1.2 Fase canal

Após realizar o balanço hídrico na fase bacia, a vazão correspondente à soma dos componentes de escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo é propagada (transladada) até a seção de controle da bacia hidrográfica, através da fase canal do modelo. Os modelos de propagação baseiam-se na equação de continuidade e da quantidade de movimento e podem ser classificados em (TUCCI, 1998):

- a) armazenamento: Consideram a atenuação e o deslocamento produzidos pelo armazenamento na calha do rio, desprezando os efeitos da equação de quantidade de movimento;

- b) onda Cinemática: Utilizam a equação da continuidade e a equação da quantidade de movimento na sua formulação, desprezando, no entanto, os termos de pressão e de inércia;
- c) difusão: Este modelo não despreza os efeitos de pressão da equação de quantidade de movimento, permitindo avaliar o efeito de jusante sobre o escoamento proveniente de montante;
- d) hidrodinâmico: Estes modelos, além da equação da continuidade, consideram todos os termos da equação de quantidade de movimento. É importante quando ocorrem grandes variações temporais e espaciais da velocidade no sistema.

Ao contrário da fase bacia, esta não diferencia significativamente os modelos hidrológicos conceituais que, tipicamente, adotam procedimentos mais simples, baseados em modelos de armazenamento ou de onda cinemática.

2.2.2 Etapas de modelagem

As etapas principais para a implementação de um modelo hidrológico integrante de um sistema de previsão de vazões são:

- a) divisão em sub-bacias: Em acordo com as características físicas e hidrológicas da área, disponibilidade de estações telemétricas e localização das obras hidráulicas;
- b) criação da base de dados históricos: Com análise de consistência e seleção de séries simultâneas de chuva, vazão para a calibração do modelo hidrológico. Quando existem reservatórios e/ou obras hidráulicas há a necessidade de dados operativos para determinação da vazão nos pontos de controle;
- c) organização da estrutura do modelo: A modelagem chuva-vazão é aplicada para cada sub-bacia e modelos de propagação de cheias são aplicados para os segmentos que conectam as sub-bacias. Quando a área

apresenta reservatórios ou estruturas hidráulicas de controle, há a necessidade de se quantificar a vazão através do balanço hídrico.

- d) **calibração:** A calibração do modelo hidrológico visa estimar o conjunto de parâmetros através da minimização de uma função objetivo que representa a diferença entre as vazões observadas e as simuladas pelo modelo. A calibração normalmente é realizada em duas fases, uma “manual” para estimar subjetivamente os parâmetros, seguida da fase “automática” que estima os parâmetros através de um algoritmo robusto de minimização da função objetivo.
- e) **verificação:** Tem por objetivo a realização de uma análise detalhada da formulação matemática do modelo, da sua parametrização e da qualidade da simulação, através da comparação entre as vazões simuladas com as vazões observadas. A verificação do modelo é expressa através de estatísticas de erros e correlação para períodos de amostragem longos (pelo menos uma estação úmida e uma estação seca), e através da intercomparação gráfica dos hidrogramas observados e simulados, com identificação das diferenças na fase, na magnitude do pico, e na taxa de recessão.
- f) **validação:** Etapa de teste do modelo sob condições diferentes daquelas utilizadas na calibração e verificação.

2.2.3 Calibração

Os modelos hidrológicos apresentam um grande número de parâmetros que não podem ser diretamente medidos e, por isso, devem ser estimados através dos procedimentos de calibração. A estimativa deverá ser realizada de forma a ajustar adequadamente as vazões calculadas pelo modelo às aquelas observadas na bacia (DINIZ, p. 151-164).

O sucesso na aplicação de modelos conceituais chuva-vazão depende em

grande parte de sua calibração (YAPO et al., 1996, p. 23-48). Ao mesmo tempo, esta tarefa se mostrou de difícil execução devido a um grande número de fatores (não linearidade dos modelos, grande número de parâmetros desconhecidos, erros nos dados medidos, dados hidrológicos não representativos) (GUPTA, SOROOSHIAN, 1985, p. 57-77). Concluiu-se que sempre haverá alguma incerteza associada à estimativa dos parâmetros ótimos globais.

A estimativa de parâmetros únicos e realistas para uma determinada bacia é conceitualmente uma tarefa impossível, pois significa presumir que a amostra de dados selecionados para calibração representa toda a população de eventos hidrológicos possíveis. Não existe um conjunto único de parâmetros capaz de representar os processos hidrológicos, devido às incertezas inerentes dos dados, das simplificações na estrutura do modelo e da falta de representatividade dos parâmetros (COLLISCHONN, TUCCI, 2003). Existem várias opções possíveis para os valores dos parâmetros que, de forma adequada, darão a resposta desejada.

Este fato condiz com o conceito da equifinalidade, que diz que um sistema pode chegar a um mesmo estado final, partindo de estados iniciais diversos. Matematicamente, a calibração é um problema de infinitas soluções igualmente possíveis, já que existem mais equações do que incógnitas. Algumas soluções atendem às equações, mas não representam a realidade lógica do problema e dos valores esperados. Por outro lado, são encontradas diversas soluções adequadas para o problema, sendo impossível distinguir com exatidão a melhor entre elas.

Em geral, a estimativa dos parâmetros utiliza-se da calibração manual e/ou calibração automática. Na maioria dos casos, ambos os métodos para estimativas de parâmetros são utilizados. Ou seja, realiza-se a calibração manual para se obter uma estimativa inicial e, em seguida, os métodos automáticos para refinar estas estimativas. Os parâmetros obtidos são analisados manualmente com o objetivo de otimizar critérios hidrológicos, como erros na representação de picos ou na simulação de vazões em períodos de recessão.

A técnica manual é realizada através de inferências sobre os valores dos parâmetros (medição ou análise de dados hidrológicos) ou através de procedimentos tipo tentativa e erro. Quando executado por usuário experiente, este procedimento pode ser relativamente rápido e considerar múltiplos objetivos. A desvantagem do método é que envolve um alto grau de subjetividade, sendo que diferentes pessoas podem obter valores muito diferentes para cada parâmetro (BURNASH, 1995).

Técnicas automáticas são utilizadas para diminuir o subjetivismo do procedimento manual e para refinar matematicamente os resultados. A calibração automática é constituída de quatro elementos principais: (1) Função objetivo, (2) Algoritmo de otimização, (3) Critério de Finalização e (4) Dados para calibração.

2.2.3.1 Função objetivo

A função objetivo é uma equação utilizada para medir a diferença entre os dados simulados pelo modelo e os dados observados na bacia hidrográfica. O objetivo da calibração automática é encontrar o valor dos parâmetros que otimize (minimize ou maximize) o valor numérico da função objetivo. Várias funções foram propostas e testadas, sendo que a função quadrática da diferença das vazões (Fórmula 2.1) normalmente apresentou resultados mais satisfatórios porque não apresenta importantes singularidades (COLLISCHONN, TUCCI, 2003). Neste procedimento busca-se minimizar a seguinte função:

$$F(\mathbf{q}) = \sum_{t=1}^n w_t \times [Q_t^{obs} - Q_t^{calc}]^2 \quad (2.1)$$

onde:

Q_t^{obs} = dados observados na bacia hidrográfica no tempo t ;

Q_t^{calc} = dados calculados pelo modelo no tempo t ;

\mathbf{q} = vetor de parâmetros do modelo;

w_t = peso do intervalo de tempo t ;

n = número de intervalos de tempo analisados.

O w_t permite que sejam estipulados pesos maiores aos períodos mais importantes do hidrograma. Caso seja considerado que todos os períodos apresentam igual importância, seu valor será sempre igual a um. Vale ressaltar que considerando w_t igual a 1 estará se dando maior ênfase a vazões maiores do hidrograma.

Um novo estágio do desenvolvimento de técnicas de ajustes dos parâmetros dos modelos hidrológicos se iniciou com o uso da otimização multiobjetivo. A técnica original foi desenvolvida por YAPO et al. (1998) e vem sendo aplicada por diversos pesquisadores. O objetivo deste método é otimizar ao mesmo tempo várias funções objetivo, de forma a avaliar diversos aspectos da qualidade do ajuste entre hidrograma calculado e observado (COLLISCHONN, TUCCI, 2003).

2.2.3.2 Algoritmos de calibração

Os algoritmos de calibração são procedimentos lógicos desenvolvidos para encontrar os parâmetros que otimizem a função objetivo. Os algoritmos podem ser de busca local ou global. Os algoritmos de busca local dividem-se em métodos diretos e métodos de busca por gradiente. Os algoritmos de busca global dividem-se em determinísticos, estocásticos ou híbridos (THIMOTTI, 2003).

Os métodos de mínimo local partem de um conjunto inicial de parâmetros, normalmente estimado através da calibração manual, para o qual se calcula o valor da função objetivo. Em seguida são introduzidas pequenas variações nos valores dos parâmetros e são calculados os valores da função objetivo para cada conjunto de parâmetros. As variações nos parâmetros são realizadas nas direções que minimizem o valor da função objetivo.

A diferença dos métodos diretos e de busca por gradientes é que o primeiro utiliza somente a análise do valor da função objetivo na estratégia de otimização descrita anteriormente, enquanto o segundo avalia também o gradiente da função a

cada iteração.

Segundo SORROSHIAN E GUPTA (1995, p. 23-68) o método de busca local mais adequado é o Simplex, pois além de normalmente apresentar uma alta eficiência, apresenta algumas características que o torna mais apto a identificar o ótimo global. Neste trabalho será utilizado este método, o qual será descrito em maior detalhe no item 6.

O maior problema dos métodos de busca local consiste no fato das superfícies de resposta das funções objetivo serem não-lineares e descontínuas, resultando em diferentes parâmetros calibrados para cada ponto de início (parâmetros iniciais) do processo de busca (SORROSHIAN, GUPTA, 1985, p. 57-77).

Em decorrência destas dificuldades, nos últimos anos a atenção voltou-se para o desenvolvimento de métodos automáticos de busca global, de forma a aumentar a eficiência dos métodos locais em encontrar o mínimo das funções multimodais. Vários estudos foram realizados para comparar os diversos métodos globais existentes. Segundo estudo realizado por MADSEN et al. (2001, p. 48-59), onde foram comparados três métodos de busca global, os diferentes métodos analisados dão ênfase a diferentes aspectos do hidrograma e nem um deles pode ser considerado superior quando analisadas as medidas de performances consideradas no trabalho.

Um dos métodos analisado e que tem se mostrado bastante eficiente e eficaz na localização do ótimo global de modelos chuva-vazão é o algoritmo SCE-UA (*Shuffled Complex Evolution*), desenvolvido por DUAN et al. (1992), o qual combina técnicas de busca aleatória, algoritmos genéticos e otimização simplex. Uma das características mais importantes deste método é a sua persistência, uma vez que normalmente atinge o mesmo ponto ótimo, mesmo quando alterados alguns parâmetros e a semente do processo de geração de números aleatórios. Mesmo assim, os autores ressaltam que a localização do ótimo global em modelos chuva-vazão é fortemente influenciada por diversos fatores, tais como: imperfeições na estrutura do modelo, erros nos dados, escolha da função objetivo, entre outros.

XIONG e O'CONNOR (2002) definiram a curva dos parâmetros ótimos através da plotagem de todos os possíveis ótimos locais e globais, com o objetivo de analisar a superfície de respostas possíveis. Esse procedimento está relacionado ao conceito de equifinalidade, uma vez que parte do pressuposto que existe um conjunto de vetores de parâmetros igualmente aceitáveis. Neste artigo, os autores concluíram que o sucesso do procedimento de calibração é mais dependente da forma da superfície de resposta, a qual é determinada pela relação chuva-vazão expressa pelos dados hidrológicos, e pela estrutura do modelo selecionado, do que do método de calibração automática utilizado.

2.2.3.3 Critério de finalização

Alguns critérios são utilizados para determinar o momento adequado para encerrar o procedimento de calibração. Segundo SORROSHIAN E GUPTA (1995) os critérios mais utilizados são:

- a) convergência da função objetivo: considera que o procedimento deve ser encerrado quando o algoritmo não for mais capaz de causar mudanças significativas no valor da função objetivo;
- b) convergência dos parâmetros: considera que o procedimento deve ser encerrado quando o algoritmo não causar mais mudanças significativas nos valores dos parâmetros;
- c) número máximo de iterações: Normalmente é implementado quando o tempo computacional é limitado ou para se evitar que o algoritmo entre em um *loop* infinito. É definido um número máximo de iterações, sendo que o algoritmo pode ser finalizado antes desde que algum dos critérios definidos anteriormente seja atingido.

Nenhum destes critérios é suficiente para garantir que os parâmetros ótimos foram realmente encontrados. Para SOROOSHIAN (1985) o critério mais adequado é o da convergência dos parâmetros. Neste trabalho será utilizado o critério da

convergência da função objetivo, já que teoricamente o modelo não estará apresentando melhoras significativas através da alteração dos valores dos parâmetros.

2.2.3.4 Dados para calibração

Dois aspectos principais devem ser observados na série utilizada na calibração dos modelos hidrológicos: (1) a quantidade de dados e (2) a qualidade dos dados disponíveis.

Primeiramente, acreditava-se que o maior volume possível de dados deveria ser utilizado, com o objetivo de minimizar as dificuldades encontradas durante a calibração. No entanto, SOROOSHIAN et al. (1983) provou que um ano de dados é suficiente para obter estimativas realistas para os parâmetros do Modelo de Sacramento, caso seja utilizado um procedimento de calibração adequado. O uso de uma série maior de dados aumenta apenas marginalmente a qualidade dos parâmetros estimados. No entanto, para se considerar esta afirmação válida deve-se analisar a representatividade da série de um ano utilizada na calibração, ou seja, se esta série é capaz de representar o grande volume de eventos secos e úmidos que podem ocorrer na bacia hidrográfica.

A qualidade dos dados depende da quantidade de informações que a série consegue fornecer a respeito dos parâmetros do modelo e da quantidade de erros (ruídos) existentes na série de dados. Uma série é considerada informativa quando consegue representar a variabilidade hidrológica da bacia hidrográfica, abrangendo períodos úmidos, de recessão e intermediários. Já a existência de erros na série causa deterioração no procedimento de calibração, resultando em parâmetros menos confiáveis. Desta forma, aconselha-se que a série de calibração seja cuidadosamente analisada com o objetivo de eliminar erros óbvios, como períodos de chuva onde não se observa aumento na vazão (SOROOSHIAN et al., 1995).

2.2.4 Verificação

A verificação busca avaliar a qualidade dos resultados do modelo hidrológico. As principais fontes de incerteza são provenientes de variações aleatórias e erros de aquisição das variáveis de entrada, limitações da estrutura do modelo e incerteza nas estimativas dos parâmetros (TUCCI; 1998, p. 337-344).

A verificação de problemas na estrutura do modelo deve incluir análises de sensibilidade e de estabilidade de seus parâmetros. Espera-se que as incertezas nas vazões estimadas pelo modelo sejam decorrentes da estimativa inadequada dos parâmetros ou das incertezas nas variáveis de entrada. Estes elementos são fortemente interdependentes, uma vez que a calibração dos parâmetros é feita através das séries hidrológicas históricas.

A verificação destes dois itens é realizada através da análise da qualidade dos resultados do modelo hidrológico. A técnica consiste em comparar os dados observados e previstos pelo modelo hidrológico utilizando como dado de entrada para o modelo a chuva e evapotranspiração observada na bacia hidrográfica. Para realizar esta análise são utilizadas ferramentas estatísticas (análise quantitativa) e ferramentas gráficas (análise qualitativa).

2.2.4.1 Análise gráfica

O método mais comumente utilizado na análise gráfica consiste em plotar em um mesmo sistema cartesiano o hidrograma observado, calculado pelo modelo e o hietograma. A análise deste gráfico visa responder as seguintes questões básicas:

- a) os dados monitorados são de boa qualidade? A comparação entre a vazão e a chuva observada permite identificar inconsistências na série de dados monitorados, as quais poderão degradar o resultado do modelo;
- b) os hidrogramas observado e previsto estão em fase? Devem ser analisadas as subidas e descidas dos hidrogramas de forma a identificar se estas

- ocorrem ao mesmo tempo e apresentam a mesma duração;
- c) o modelo foi capaz de prever a intensidade do pico de vazão e o momento em que este ocorreu?
 - d) o modelo foi capaz de reproduzir o período de recessão do hidrograma?
 - e) o modelo foi capaz de reproduzir o período de ascensão do hidrograma?

A Figura 2.1 apresenta um exemplo deste gráfico para a calibração realizada para a sub-bacia de cabeceira do rio Piraí até o reservatório de Tocos, utilizando quatro meses de dados hidrológicos observados.

Outra técnica bastante utilizada consiste em plotar os valores de vazão observada e calculada previamente classificados em ordem crescente. Esse procedimento permite identificar a ocorrência de viés na simulação. Na ausência de erros, todos os pares de vazão observada e calculada devem se alinhar segundo uma linha reta que passa pela origem e apresenta inclinação de 45° . Um exemplo deste gráfico é apresentado na Figura 2.2, para o mesmo conjunto de dados apresentado na Figura 2.1. Observando este gráfico, conclui-se que há uma forte tendência do modelo em subestimar as vazões mais elevadas.

Outras análises podem ser realizadas, como a construção das curvas de permanência dos dados observados e calculados e a análise dos resíduos do modelo.

A análise do gráfico é de grande importância, pois permite uma avaliação inicial da qualidade dos resultados do modelo e dos dados utilizados na previsão, no entanto, é bastante subjetiva. Uma análise mais objetiva pode ser realizada através do uso de técnicas estatísticas.

FIGURA 2.1 ANÁLISE GRÁFICA – COMPARAÇÃO DO HIDROGRAMA OBSERVADO E CALCULADO

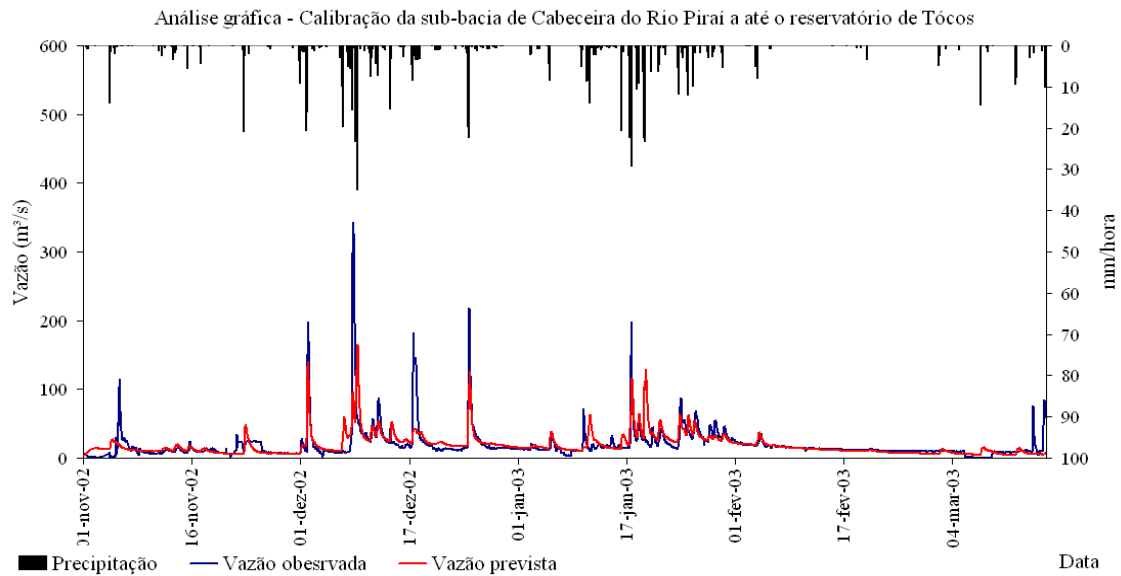
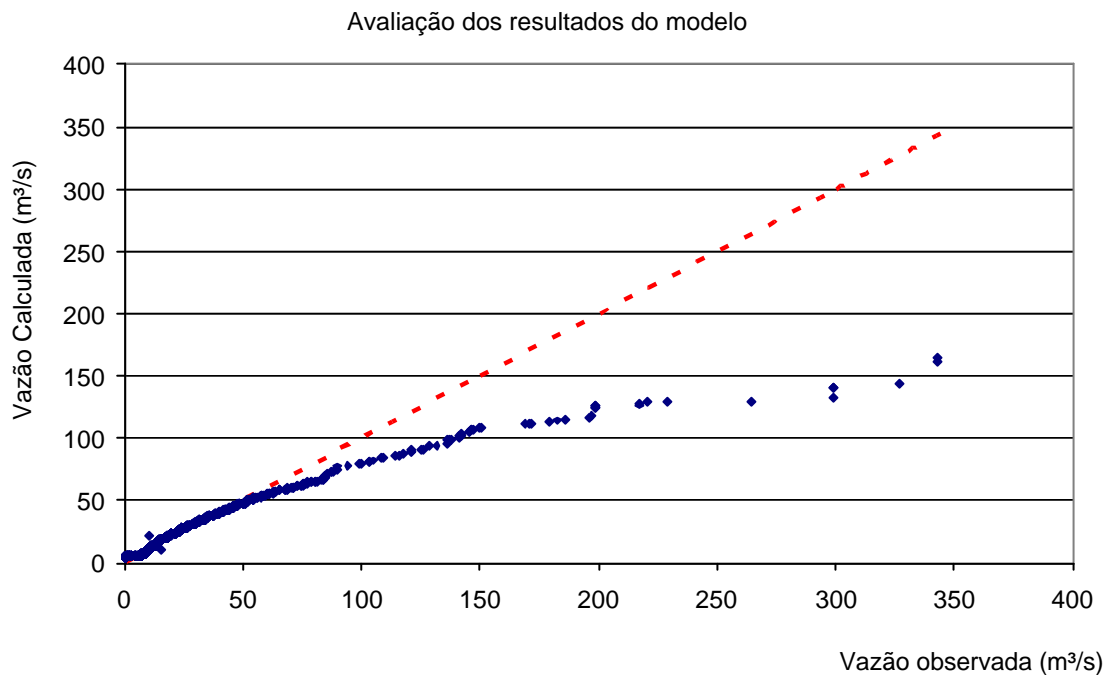


FIGURA 2.2 ANÁLISE GRÁFICA – VAZÕES OBSERVADAS X VAZÕES CALCULADAS



2.2.4.2 Análise estatística

São utilizados vários critérios que auxiliam na avaliação dos resultados dos modelos hidrológicos. As principais fórmulas encontradas na literatura estão listadas a seguir, onde:

- \bar{Q}_t^{calc} = vazões médias calculadas;
 \bar{Q}_t^{obs} = vazões médias observadas;
 Q_t^{calc} = vazão calculada no tempo t;
 Q_t^{obs} = vazão observada no tempo t;
 Q_p^{calc} = vazão instantânea de pico calculada;
 Q_p^{obs} = vazão instantânea de pico observada;
 Q_{MP}^{calc} = máxima vazão de pico calculada da série;
 Q_{MP}^{obs} = máxima vazão de pico observada da série;
 sQ_t^{obs} = desvio padrão dos valores observados;
 sQ_t^{calc} = desvio padrão dos valores previstos;
 D_{cheia}^{calc} = duração da cheia para a série calculada;
 D_{cheia}^{obs} = duração da cheia para a série observada;
 D_{est}^{calc} = duração de estiagem para a série calculada;
 D_{est}^{obs} = duração de estiagem para a série observada;
 n = número de intervalos de tempo da série.

- a) **BIAS**: Indica a direção média dos desvios de um conjunto de previsões a partir de um conjunto de valores observados, sendo um indicativo da tendência de erro ou vício do modelo.

$$BIAS = \frac{\sum (Q_t^{calc} - Q_t^{obs})}{n} \quad (2.2)$$

- b) **correlação ($r_{o,p}$)**: Corresponde a uma medida da relação entre os dados observados e calculados.

$$r_{o,p} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}_t^{obs})(Q_t^{calc} - \bar{Q}_t^{calc})}{sQ_t^{obs} \times sQ_t^{calc}} \quad (2.3)$$

- c) **erro médio quadrático (RMS)**: Corresponde à diferença entre as vazões observadas e calculadas.

$$RSM = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{calc})^2}{n}} \quad (2.4)$$

d) coeficiente de Nash ou coeficiente de determinação (R^2): Mede a habilidade do modelo em reproduzir a variância das séries de vazão observada e calculada. O R^2 pode apresentar valores negativos quando os resultados do modelo forem muito ruins.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{calc})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2} \quad (2.5)$$

e) relação de volume (RV): Representa a razão entre os volumes de escoamento calculado e observado.

$$RV = 100 \times \frac{\sum_{t=1}^n Q_t^{calc}}{\sum_{t=1}^n Q_t^{obs}} \quad (2.6)$$

f) relação de vazões de pico ($R\bar{Q}_p$): Representa a razão entre as médias das vazões de pico calculadas e observadas.

$$R\bar{Q}_p = 100 \times \frac{\sum_{t=1}^m Q_p^{calc}}{\sum_{t=1}^m Q_p^{obs}} \quad (2.7)$$

g) relação da vazão máxima (RQ_p): Representa a razão entre a máxima vazão instantânea calculada e observada encontrada na série.

$$RQ_p = 100 \times \frac{Q_{MP}^{calc}}{Q_{MP}^{obs}} \quad (2.8)$$

- h) relação de duração da cheia (*RDC*): É o somatório das durações de cheias na série de dados calculados e observados obtidas a partir de um valor de vazão de referência de cheia.

$$RDC = \frac{D_{cheia}^{calc}}{D_{cheia}^{obs}} \quad (2.9)$$

- i) relação de duração de estiagem (*RDE*): É o somatório das durações de estiagem na série de dados calculados e observados obtidas a partir de um valor de vazão de referência de estiagem.

$$RDE = \frac{D_{est}^{calc}}{D_{cest}^{obs}} \quad (2.10)$$

Os critérios apresentados foram consultados em THIMOTTI (2003), WOOD (1993, 26.1-26.30) e HENRIKSEN (2003, p. 52-71).

2.2.5 Validação

Na etapa de validação do modelo procura-se avaliar as diferenças entre as vazões calculadas e observadas para situações diferentes daquelas apresentadas durante a calibração. Um procedimento bastante utilizado consiste em:

- a) estimar os parâmetros para toda a série de dados históricos disponível;
- b) analisar os resultados (análise gráfica e estatística);
- c) dividir a série de dados em duas (ou três) séries com características distintas entre si, obtendo assim duas amostras de dados (amostra a e b);
- d) analisar os resultados da etapa (a) para a amostra “a” e a amostra “b” separadamente;
- e) estimar os parâmetros utilizando a amostra “a”;
- f) simular os valores da amostra “b”, utilizando os parâmetros obtidos na etapa (e) e analisar os resultados;

- g) estimar os parâmetros utilizando a amostra “b”;
- h) simular os valores da amostra “a”, utilizando os parâmetros obtidos na etapa (g) e analisar os resultados;
- i) analisar a estacionariedade dos parâmetros encontrados na etapa (a), (e) e (g).

2.3 MODELO HIDROLÓGICO DE SACRAMENTO

Neste item será descrito o modelo hidrológico de Sacramento, o qual foi utilizado neste trabalho. Este modelo já foi descrito em CUNHA e GUETTER (2003) e GUETTER et al. (2002), no entanto neste trabalho será apresentada uma descrição bastante detalhada dos conceitos, componentes e do funcionamento do modelo.

2.3.1 Histórico

O Serviço Meteorológico Americano é responsável por prover alertas públicos sobre as condições hidrológicas das bacias americanas e, por isso, foi responsável por grandes avanços na área de modelagem hidrológica. Seu objetivo é diminuir a vulnerabilidade da sociedade a eventos extremos de cheia e estiagem, minimizando a ocorrência de danos decorrentes de desastres naturais. Neste contexto, sistemas de monitoramento, previsão e alerta se tornam indispensáveis.

Em uma primeira fase, a previsão de vazão era realizada através do uso de dados de precipitação e da aplicação do método do Índice da Precipitação Antecedente (IPA), proposto por Kohler e Linsley em 1951. Em áreas onde os eventos chuvosos não são frequentes, fazendo com que o solo se torne substancialmente seco, o método IPA é incapaz de reproduzir a recessão do hidrograma e determinar o volume de vazão produzido por um evento de precipitação. Isso decorre do fato das variações do fluxo de base corresponderem a uma importante porção do hidrograma, sendo que o método IPA não fornece informações para descrever estas variações. Além disso, quando os

eventos de precipitação ocorriam seguidamente um do outro, a precisão do método diminuía ainda mais. A falta de precisão dos resultados nestes casos, aliada a um crescente desejo de melhor compreender os processos hidrológicos, levou o Serviço Meteorológico Americano a investir no desenvolvimento e implantação de novos modelos matemáticos voltados à área de hidrologia (BURNASH, 1995).

Em 1973, BURNASH et al², citado por BURNASH et al. (1996), apresentaram o “Sistema Generalizado de Simulação do Escoamento”, desenvolvido com o objetivo de melhorar a previsão hidrológica para o estado da Califórnia, nos EUA, onde o método IPA não apresentava bons resultados. Este sistema foi denominado “Modelo Hidrológico de Sacramento”, para diferenciá-lo de outros sistemas que estavam sendo desenvolvidos simultaneamente. O sistema foi inicialmente implantado e testado para a região de Nevada na Califórnia, onde foram realizadas novas modificações até que este apresentasse alto grau de desenvolvimento. O modelo foi então aplicado a regiões dos Estados Unidos com diferentes características hidrológicas, obtendo resultados satisfatórios. Em 1975, a Organização Meteorológica Mundial realizou um estudo comparativo dos diversos modelos chuva-vazão (WMO, 1975). O relatório final contém os resultados do estudo e permite avaliar as habilidades dos modelos em diversas situações. Após uma revisão dos resultados do projeto e de uma avaliação detalhada da estrutura lógica do modelo de Sacramento, o Serviço Meteorológico Americano decidiu abandonar a maioria dos componentes do seu antigo sistema de modelagem hidrológica e adotar o Modelo de Sacramento como componente principal do sistema integrado de previsão de vazões conhecido por NWSRFS (*National Weather Service - River Forecasting System*).

Após sua implantação o modelo hidrológico de Sacramento passou por diversas alterações. KATANIDIS e BRAS (1980) implementaram algumas simplificações no modelo original, através da reformulação das equações, obtendo

² BURNASH, R.J.C., FERRAL, R.L.; MCGUIRE, R.A., 1973: A generalized streamflow simulation system - conceptual modeling for digital computers. U.S. Department of Commerce, National Weather Service and State of California, Department of Water Resources, California, USA.

equações diferenciais não lineares que tornaram possível a implementação de filtros nos ciclos de previsão. Este sistema não era capaz de identificar e quantificar as causas dos erros com precisão, mas tornou possível a utilização do modelo em sistemas de previsão de vazão em tempo real. Passaram então a existir duas versões principais do modelo de Sacramento. Na primeira versão, denominada Modelo de Sacramento, as equações são discretizadas no tempo conforme originalmente concebido. Na segunda versão, as equações do modelo são definidas como equações diferenciais. Neste trabalho será utilizada a segunda versão.

Outras implementações foram realizadas por GEORGAKAKOS em 1986³, citadas por BAE e GEORGAKAKOS (1992), para permitir a introdução de um componente de quantificação da umidade do solo no Sistema Integrado de Previsão Hidrometeorológica, (*IHFS – Integrated Hydrometeorological Forecast System*), o qual abrange mais dois componentes principais com as seguintes funções: (1) previsão quantitativa de chuva e (2) propagação do escoamento em canal.

Entre os anos de 1984 e 1992, um novo estudo foi realizado pela Organização Meteorológica Mundial, com o objetivo de comparar os diversos sistemas de previsão existentes, incluindo o IHFS, verificando suas capacidades de simular as vazões em tempo real. Conclui-se que o número de eventos analisados era insuficiente para dar um parecer final a respeito do melhor modelo de previsão em tempo real disponível. No entanto, os resultados finais obtidos pelo IHFS comprovam a eficiência deste sistema (WMO, 1992).

O modelo de Sacramento trouxe um grande avanço para a área de hidrologia, na medida que os modelos hidrológicos desenvolvidos até então, em sua grande maioria, buscavam simular o escoamento fluvial dando grande ênfase ao processo de escoamento superficial na bacia hidrográfica, sendo os outros elementos geradores do escoamento considerados processos secundários. Muitas destas metodologias

³ GEORGAKAKOS, K. P. On the design of national, real-time warning systems with capability for site-specific, flash-flood forecasts. **Bulletin of the American Meteorological Society**, vol. 67, 1233-1239. 1986.

mostraram-se ineficientes e houve a necessidade de se introduzir mais detalhes na modelagem dos outros elementos do ciclo hidrológico. Os autores deste modelo mostraram grande esforço em considerar as características do solo e do estado de umidade deste, sendo estes fatores predominantes para o aumento ou não do escoamento fluvial após a ocorrência de precipitação.

2.3.2 Critérios de desenvolvimento

O modelo de Sacramento foi desenvolvido com o objetivo de estimar de forma efetiva a vazão na exutória da bacia hidrográfica, utilizando como dados de entrada a precipitação e a evapotranspiração média na bacia. Estes dados, em conjunto com parâmetros que descrevem as características físicas da bacia, são processados através de equações matemáticas que representam os processos do ciclo hidrológico e que geram o escoamento fluvial resultante.

Durante o desenvolvimento do modelo os autores levaram em consideração alguns aspectos importantes quando se trata de um modelo hidrológico a ser utilizado operacionalmente. Primeiramente, buscou-se desenvolver um modelo conceitual, ou seja, que levasse em consideração as características físicas dos fenômenos modelados. Os autores acreditavam que desta forma as alterações nos parâmetros do modelo devido a alterações nas características morfológicas das bacias poderiam ser realizadas de maneira racional. Esta característica foi confirmada durante a operacionalização do sistema de previsão, quando grandes queimadas alteraram drasticamente as características de escoamento na bacia e, mesmo assim, foi possível modelar as alterações resultantes antes que os eventos hidrológicos ocorressem (BURNASH, 1995).

Por ser um modelo conceitual, seu uso apropriado requer total entendimento dos mecanismos básicos do ciclo hidrológico. A falta deste entendimento pode levar ao uso inadequado dos componentes do sistema para representar fenômenos para os quais eles não foram criados, compensando erros decorrentes da baixa qualidade dos

dados ou da estimativa inadequada dos parâmetros do modelo.

Outra preocupação dos autores durante o desenvolvimento foi que a grande complexidade envolvida na descrição detalhada de todos os processos físicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica limitaria a aplicação da metodologia em um sistema de previsão operacional para grandes áreas. No esforço de simplificar o modelo, os autores se concentraram nos processos que claramente interferem na geração do escoamento fluvial, tornando possível implementar o modelo sem a necessidade de uma grande quantidade de dados e cálculos.

Outra característica importante deste modelo é que sua operacionalização em um sistema de previsão de vazão requer a existência de uma rede de coleta de dados hidrológicos em tempo real. Isso se deve ao fato do volume de escoamento superficial resultante de um evento de precipitação não ser função apenas do volume precipitado, mas do estado inicial de umidade da bacia hidrográfica. Este é determinado através das variáveis de estado do modelo, as quais são atualizadas para cada intervalo de tempo, dando um parecer a respeito do estado atual de umidade da bacia e do seu histórico. A atualização é realizada através de dados observados de chuva e evapotranspiração, sendo que quando esta última não é medida pode ser estimada através de metodologias conhecidas ou através da análise climatológica dos dados históricos. Deve-se observar que a qualidade dos dados monitorados é de grande importância no processo de modelagem da bacia.

2.3.3 Conceitos Gerais do Modelo

O modelo hidrológico de Sacramento é um modelo conceitual, aplicado de forma semi-distribuída, que calcula a vazão instantânea total (u_c), expressa em unidades (mm/hora), utilizando como dados de entrada a chuva média na bacia (u_p) e a evaporação potencial (u_e) (BAE, GEORGAKAKOS, 1992). Como conceito básico, o modelo de Sacramento divide o solo em duas camadas principais:

- a) a camada superior representa os processos rápidos junto à superfície do

solo que são: evaporação, percolação, escoamento superficial e escoamento subsuperficial;

- b) a camada inferior representa os processos lentos da região não-saturada do solo que são: transpiração, recarga do aquífero e escoamento de base.

Ambas as camadas têm subzonas onde a água está sob efeito da tensão superficial (capilaridade) ou está sob efeito da pressão hidrostática (água livre). O mecanismo básico do modelo pode ser resumido da seguinte maneira: a umidade é estocada em uma determinada porção da coluna do solo como água sob pressão, até que a capacidade deste reservatório seja atingida. A partir daí, toda água adicionada ao sistema será armazenada como água livre. Os elementos referentes à água sob pressão podem ser reduzidos somente através de evaporação ou transpiração, enquanto que os elementos referentes à água livre também sofrem decaimento devido à percolação da camada superior para a camada inferior, escoamento sub-superficial, escoamento de base e recarga do aquífero.

A vazão instantânea total é composta por fluxos provenientes de processos nas subzonas de água livre das camadas superior e inferior:

- a) escoamento direto: proveniente da chuva que cai sobre a fração impermeabilizada da bacia, com resposta hidrológica em escalas de horas;
- b) escoamento superficial: proveniente da chuva quando a camada superior do solo estiver saturada, com resposta hidrológica em escala de horas;
- c) escoamento sub-superficial: função do grau de saturação parcial da sub-zona de água livre da camada superior, com resposta hidrológica em escala de dias;
- d) escoamento de base primário: proveniente da sub-zona de água livre primária da camada inferior, com resposta hidrológica em escala de semanas-meses;

- e) escoamento de base suplementar: proveniente da sub-zona de água livre suplementar da camada inferior, com resposta hidrológica em escala de dias-semanas.

Os principais componentes do sistema são apresentados no esquema da Figura 2.3, as variáveis de entrada e saída na Tabela 2.2, as variáveis de estado na Tabela 2.3 e os parâmetros na Tabela 2.4. A descrição dos componentes e dos processos será realizada ao longo deste item.

FIGURA 2.3 ESQUEMA DOS COMPONENTES E FLUXOS DO MODELO HIDROLÓGICO DE SACRAMENTO

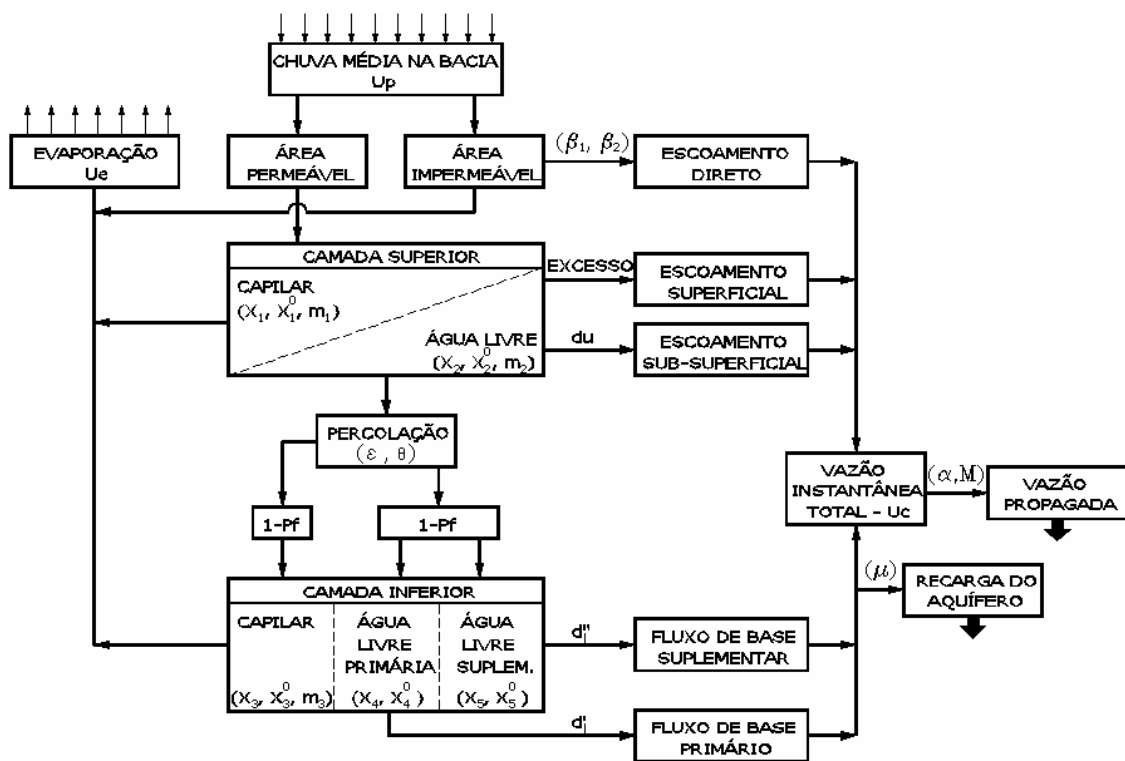


TABELA 2.2 VARIÁVEIS DE ENTRADA E SAÍDA

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
Variáveis de entrada	
u_p	chuva média na bacia (mm/hora)
u_e	Evapotranspiração (mm/hora)
Variáveis de saída	
u_c	vazão instantânea total (mm/hora)
u_{er}	Evapotranspiração real (mm/hora)

TABELA 2.3 VARIÁVEIS DE ESTADO

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
x_1	Índice de água sob pressão na camada superior (mm)
x_2	Índice de água livre na camada superior (mm)
x_3	Índice de água sob pressão na camada inferior (mm)
x_4	Índice de água livre primária na camada inferior (mm)
x_5	Índice de água livre secundária na camada inferior (mm)
x_6	Armazenamento adicional impermeabilizado (mm)

TABELA 2.4 PARÂMETROS

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
x_1^0	Capacidade da sub-zona de capilaridade da camada superior (mm)
x_2^0	Capacidade da sub-zona de água livre da camada superior (mm)
x_3^0	Capacidade da sub-zona de capilaridade da camada inferior (mm)
x_4^0	Capacidade da sub-zona de água livre primária da camada inferior (mm)
x_5^0	Capacidade da sub-zona de água livre secundária da camada inferior (mm)
d_u	Coefficiente de drenagem instantânea da camada superior (1/ Δt)
d'_1	Coefficiente de drenagem instantânea primária da camada inferior (1/ Δt)
d''_1	Coefficiente de drenagem instantânea secundária da camada inferior (1/ Δt)
e	Coefficiente da função de percolação
qc	Expoente da função de percolação
p_f	Fração de água percolada para as sub-zonas de água livre da camada inferior
m	Fração de fluxo base que não aparece no rio, constituindo recarga do aquífero.
b_1	Fração da bacia que se torna impermeável quando a capacidade de capilaridade for atingida
b_2	Fração da bacia permanentemente impermeabilizada
m_1	Expoente da função da sub-zona de capilaridade da camada superior
m_2	Expoente da função da sub-zona de água livre da camada superior
m_3	Expoente da função da sub-zona de capilaridade da camada inferior
a	Coefficiente do modelo de propagação no canal
M	Expoente do modelo de propagação no canal

2.3.4 Módulo bacia

2.3.4.1 Componentes

O modelo é composto de uma série de reservatórios com capacidades pré-

determinadas, interligados por processos que permitem a quantificação das condições de umidade do solo, as quais controlam a produção do escoamento fluvial. À medida que ocorrem eventos de precipitação estes reservatórios são preenchidos. O deplecionamento ocorre por percolação, evaporação ou drenagem lateral. Além disso, o modelo discretiza a área da bacia em regiões permeáveis e impermeáveis. Uma descrição mais detalhada destes componentes é apresentada nos subitens a seguir. A descrição aqui apresentada baseia-se nos textos de BURNASH et al. (1996), BURNASH (1995) e NAGHETTINI et. al (2001).

2.3.4.1.1. Reservatórios do solo

Qualquer componente do meio ambiente possui uma quantidade de “umidade natural”, representativa do limite inferior de umidade deste componente. Isso ocorre também com o solo. Estas moléculas de água estão tão fortemente presas às moléculas de solo que não se encontram disponíveis para uso da vegetação ou para evaporação, ou seja, esta quantidade de água é considerada permanente, não varia no tempo e, por isso, não precisa ser analisada junto aos outros componentes de umidade.

À medida que se adiciona lentamente água ao solo que apresenta apenas sua umidade natural, observa-se que a água adicionada é totalmente absorvida até um determinado limite, o qual depende das características e do tipo de solo, mas geralmente está em torno de 15% do peso do solo. Neste ponto não existem moléculas de água livre no solo. Este volume de água é denominado água sob pressão e está tão fortemente atraído ao solo que somente pode ser removido através da evapotranspiração.

No momento em que a demanda de água sob pressão do solo é suprida, todas as moléculas de água adicionadas a este se encontrarão livres. O volume de água que pode ser adicionado ao solo e que não se encontra preso às moléculas deste é denominado água livre. Segundo BURNASH et al. (1996), esta sistemática respeita as

conclusões de BODMAN e COLEMAN⁴, a qual considera que o escoamento no solo só inicia após este alcançar uma taxa mínima de umidade.

Estes dois componentes, água livre e água sobre pressão, são os principais elementos do modelo de Sacramento. O maior problema é representar estes dois elementos de uma forma que permita o cálculo da percolação e da drenagem de maneira realista, os quais servem de controle para o processo de geração de escoamento.

Para conseguir representar fisicamente o processo de escoamento ainda houve a necessidade de dividir o solo em duas camadas, inferior e superior. Apesar do solo poder ser subdividido em infinitas camadas, foram utilizadas o mínimo de camadas necessárias para representação física do sistema, com o objetivo de otimizar ou mesmo tornar possível a parametrização do modelo. As duas camadas possuem elementos de água livre e água sobre pressão, sendo definidos quatro diferentes reservatórios de armazenamento da umidade do solo:

- a) reservatório de água sob pressão da camada superior (x_1^0) - representa o volume de água que pode ser adicionado ao solo antes que qualquer elemento de água se encontre livre.
- b) reservatório de água livre da camada superior (x_2^0) - representa o volume de água que escoar lateralmente no solo, dando origem ao escoamento subsuperficial, somado ao volume de água que se move verticalmente por este de forma a recarregar o lençol freático.
- c) reservatório de água sob pressão da camada inferior (x_3^0) - volume de água necessário para satisfazer as necessidades de umidade do solo baseados na atração molecular, sem incluir nenhuma água livre entre as moléculas do solo.
- d) reservatório de água livre da camada inferior (x_4^0 e x_5^0) - volume de água

⁴ BODMAN, G. B.; COLEMAN, E. A. Moisture and energy conditions during downward entry of water into soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 8, 116-122.

que preenche os vazios do solo na camada inferior e é responsável pela geração do fluxo de base. Assume-se que a drenagem deste volume de água segue a lei de Darcy, ou seja, a drenagem é igual a uma constante de condutividade vezes o gradiente do potencial hidráulico.

No modelo de Sacramento a constante de condutividade é multiplicada pelo volume residual de água livre como uma representação da lei de Darcy. Neste caso, não são consideradas as variações no escoamento de base devido as recessões que ocorrem na natureza. Para resolver este problema o reservatório de água livre da camada inferior foi ainda subdividido em primária (x_4^0) e suplementar (x_5^0). A primária é responsável pelo escoamento bastante lento que ocorre durante um longo período do ano e a suplementar pelo escoamento de base que ocorre determinado tempo após os eventos de precipitação. Combinando as águas livres da camada primária e suplementar, cada uma com um comportamento de drenagem diferente, pode-se representar com uma certa aproximação as condições de fluxo de base encontradas na natureza.

2.3.4.1.2. Fração Impermeável

A área da bacia hidrográfica é dividida em duas frações: permeável e impermeável. No modelo de Sacramento a parcela de área impermeável da bacia não é constante, podendo ser alterada conforme a umidade da bacia. Esta fração representa a área impermeável adicional gerada pelo preenchimento de pequenos reservatórios, regiões alagadas e caminhos temporários de fluxo lento, as quais proporcionam características de impermeabilidade à medida que a superfície do solo se torna úmida. As áreas definidas no modelo são:

- a) permeável: área que produzem escoamento superficial somente quando a intensidade de chuva é superior a capacidade de infiltração do solo;
- b) permanentemente Impermeável (b_2): áreas cobertas por rios, lagos, pântanos e outros materiais impermeáveis, diretamente ligados ao

escoamento da rede de drenagem, ou seja, produzem escoamento direto independente da intensidade da chuva;

- c) ocasionalmente Impermeável (b_1): Fração da bacia que se torna impermeável quando a capacidade de capilaridade for atingida.

2.3.4.2 Fluxos

2.3.4.2.1. Escoamento Direto

Corresponde a parcela da água da chuva que precipita sobre superfícies consideradas impermeáveis e escoam rapidamente para o leito do rio.

2.3.4.2.2. Escoamento Subsuperficial

O escoamento subsuperficial corresponde a água livre que se move lateralmente no solo em resposta às forças gravitacional e de pressão. Este escoamento é proporcional a quantidade de água livre disponível na camada superior do solo após a ocorrência da percolação.

2.3.4.2.3. Percolação

A percolação corresponde ao movimento vertical da água para camadas mais profundas do solo e é controlada pela disponibilidade de água livre na camada superior e pela deficiência de água na camada inferior do solo. Este movimento é prioritário em relação ao movimento lateral, sendo que o segundo ocorrerá somente quando a taxa de precipitação exceder a taxa limite do escoamento vertical.

A mecânica da percolação deste sistema foi desenhada para responder a algumas características observadas no movimento da umidade entre as camadas de solo, incluindo a formação e transmissão das características da frente de umidade,

como mencionado em GREEN et al.⁵ e HANKS et al.⁶, citados por BURNASH et al. (1996). A mecânica da transferência da água livre da camada superior para a camada inferior é baseada no cálculo da demanda de percolação da camada inferior. Quando a camada inferior está totalmente saturada, então a percolação está limitada ao volume de água que está sendo drenado para fora da camada através do escoamento de base. Assim, a máxima percolação ocorre quando a camada superior está saturada e a camada inferior está seca.

O volume de água percolado para as camadas inferiores é dividido para os três reservatórios de umidade do solo aí existentes, sendo que pode ser totalmente destinado ao reservatório de água sob pressão da camada inferior ou uma parte maior para este e uma menor para o reservatório de água livre, primária ou suplementar. No momento em que o reservatório de água sob pressão for totalmente preenchido, a água percolada é dividida entre os dois reservatórios de água livre. Em qualquer tempo, a quantidade de água que irá para os reservatórios primário ou suplementar é definida em função da sua deficiência relativa.

2.3.4.2.4. Infiltração

A infiltração total é o resultado do suprimento de umidade necessária para percolação, escoamento subsuperficial e preenchimento das deficiências de umidade do solo dos reservatórios de água sobre pressão e livre da camada superior. O modelo considera uma função para limitar a taxa de infiltração, a qual é função da deficiência de umidade dos reservatórios da camada superior e da percolação potencial. Este procedimento resulta em uma curva de infiltração semelhante às obtidas em ensaios de campo.

⁵ GREEN, D. W. et al. Numerical Modeling of unsaturated groundwater flow and comparison of the modeling of the model to a field experiment. *Water Resources* . V. 6, 862-874

⁶ HANKS, R. J.; KLUTE, A.; BRESTES, E. A numerical method for estimation infiltration, redistribution, drainage, and evaporation of water from soil. *Water Resources*, V. 5, 1064-1069

2.3.4.2.5. Fluxo de base

Corresponde ao escoamento fluvial gerado pelos reservatórios de água livre primário e secundário da camada inferior.

2.3.4.2.6. Evapotranspiração

A evapotranspiração é calculada a partir da taxa de evapotranspiração potencial. No solo, a evapotranspiração varia com a demanda de evapotranspiração potencial e a distribuição de água nos diversos reservatórios do solo. Esta pode ocorrer a uma taxa tal que a razão entre o volume e a capacidade do reservatório de água livre inferior pode se tornar superior a mesma razão para o reservatório de água sob pressão. Nesse ponto, o reservatório de água livre começa a suprir o volume de água sob pressão com o objetivo de equilibrar os conteúdos relativos de cada reservatório.

2.3.4.3 Formulação dos processos

Neste item são apresentadas as equações diferenciais representativas dos processos descritos anteriormente. As variáveis das equações estão descritas nas tabelas 2.2, 2.3 e 2.4. Para facilitar a notação são introduzidas algumas variáveis auxiliares (GEORGAKAKOS, 1988):

$$y = 1 - \frac{x_3 + x_4 + x_5}{x_3^0 + x_4^0 + x_5^0} \quad (2.11)$$

$$C_1 = d_1' x_4^0 + d_1'' x_5^0 \quad (2.12)$$

$$C_2 = d_1' x_4^0 / C_1 \quad (2.13)$$

onde:

y = demanda de água da camada inferior;

C_1 = taxa limite inferior da percolação;

C_2 = porcentagem da percolação destinada ao reservatório de água livre da camada inferior;

a) Equação de estado da água sob pressão na camada superior:

$$\frac{dx_1}{dt} = \left[1 - \left(\frac{x_1}{x_1^0} \right)^{m_1} \right] \times u_p - u_e \times \left(\frac{x_1}{x_1^0} \right) \quad (2.14)$$

b) Equação de estado da água livre na camada superior:

$$\frac{dx_2}{dt} = \left(\frac{x_1}{x_1^0} \right)^{m_1} \times u_p \times \left[1 - \left(\frac{x_2}{x_2^0} \right)^{m_2} \right] - d_u x_2 - C_1 \times (1 + e \times y^{qc}) \times \left(\frac{x_2}{x_2^0} \right) \quad (2.15)$$

c) Equação de estado da água sob pressão na camada inferior:

$$\frac{dx_3}{dt} = C_1 \times (1 + e \times y^{qc}) \times \left(\frac{x_2}{x_2^0} \right) \times (1 - p_f) \times \left[1 - \left(\frac{x_3}{x_3^0} \right)^{m_3} \right] - u_e \times \left(1 - \left(\frac{x_1}{x_1^0} \right) \right) \times \left(\frac{x_3}{x_1^0 + x_3^0} \right) \quad (2.16)$$

d) Equação de estado de água primária na camada inferior:

$$\begin{aligned} \frac{dx_4}{dt} = & C_1 \times (1 + e \times y^{qc}) \times \left(\frac{x_2}{x_2^0} \right) \times \left[1 - (1 - p_f) \times \left[1 - \left(\frac{x_3}{x_3^0} \right)^{m_3} \right] \right] \times \\ & \times \left[\left(C_2 \times \left(\frac{x_5}{x_5^0} \right) - 1 \right) \times \left(\frac{x_4}{x_4^0} \right) + 1 \right] - d_1' x_4 \end{aligned} \quad (2.17)$$

e) Equação de estado de água secundária na camada inferior:

$$\frac{dx_5}{dt} = C_1 \times (1 + e \times y^{qc}) \times \left(\frac{x_2}{x_2^0} \right) \times \left[1 - (1 - p_f) \times \left[1 - \left(\frac{x_3}{x_3^0} \right)^{m_3} \right] \right] \times x_1''$$

$$\times \left(1 - C_2 \times \left(\frac{x_5}{x_5^0} \right) \right) \times \left(\frac{x_4}{x_4^0} \right) - d_1'' x_5 \quad (2.18)$$

f) Equação de estado da água na área impermeabilizada:

$$\frac{dx_6}{dt} = \left[1 - \left(\frac{x_6}{x_3^0} \right)^2 \right] \times \left[1 - \left(\frac{x_2}{x_2^0} \right)^{m_2} \right] \times \left(\frac{x_1}{x_1^0} \right)^{m_1} \times u_p - u_e \times \left(1 - \left(\frac{x_1}{x_1^0} \right) \right) \times \left(\frac{x_6}{(x_3^0 + x_1^0)} \right) \quad (2.19)$$

g) Equação da vazão fluvial (u_c) por unidade de tempo:

$$u_c = \left(d_u x_2 + \frac{d_1' x_4 + d_1'' x_5}{1 + m} \right) \times (1 - \mathbf{b}_1 - \mathbf{b}_2) + u_p \mathbf{b}_2 + \left(\frac{x_6 - x_1}{x_3^0} \right) \times u_p \times \left(\frac{x_1}{x_1^0} \right)^{m_1} \times \mathbf{b}_1$$

$$+ u_p \times \left(\frac{x_1}{x_1^0} \right)^{m_1} \left(\frac{x_2}{x_2^0} \right)^{m_2} (1 - \mathbf{b}_1 - \mathbf{b}_2) + \left[1 - \left(\frac{x_6}{x_3^0} \right)^2 \right] \times \left(\frac{x_2}{x_2^0} \right)^{m_2} \left(\frac{x_1}{x_1^0} \right)^{m_1} \times u_p \times \mathbf{b}_1 \quad (2.20)$$

2.3.5 Módulo canal

A propagação da vazão resultante pelo canal é feita através de uma cascata de reservatórios. GEORGAKAKOS e BRAS (1980) definiram as equações diferenciais para que este método pudesse ser utilizado no Modelo de Sacramento. Nesta formulação, o trecho de canal é subdividido em diversos trechos, cada um sendo representado pela seguinte relação:

$$Q_i(t) = \mathbf{a} S_i(t)^M \quad (2.21)$$

onde:

$Q_i(t)$: descarga do trecho i no instante t ;

$S_i(t)$: armazenamento do trecho i no instante t ;

\mathbf{a}, M : parâmetros do modelo, comuns a todos os trechos.

Este tipo de modelo pode ser classificado como de onda cinemática. Assumido que todo o volume do aporte total ao canal entra a montante de uma cascata de n reservatórios e aplicando a equação de conservação de massa a cada um dos reservatórios da cascata resulta:

$$\frac{dS_1(t)}{dt} = u_c(t) - a S_1(t)^M \quad (2.22)$$

$$\frac{dS_i(t)}{dt} = a S_{i-1}(t)^M - a S_i(t)^M, \quad \text{com } i = 2, \dots, n \quad (2.23)$$

O sistema de equações apresentado é resolvido através de um método de integração numérica, sendo que neste trabalho será utilizado o método de Runge-Kutta. (SPERFSLAGE, GEORGAKAKOS, 1996).

2.3.6 Sistemas de previsão com o modelo de Sacramento no Brasil

2.3.6.1 Bacia do rio Iguaçu

A aplicação do Modelo de Sacramento para a previsão hidrológica diária da bacia do rio Iguaçu foi descrita por GUETTER (1999), LOBO e GUETTER (1999), GUETTER e ABUCARUB (1999), e GUETTER e CUNHA (1998). O sistema de previsão hidrológica do rio Iguaçu tem fornecido desde 1999 as previsões das vazões médias diárias, com horizonte de 5 dias, para a exutória de nove sub-bacias do Alto Iguaçu. O sistema de previsão hidrológica assimila diariamente dados telemétricos de chuva e nível de nove estações hidrológicas localizadas entre Porto Amazonas e União da Vitória, incluindo o rio Negro, tributário do rio Iguaçu. Os dados telemétricos de precipitação são acumulados em totais diários e são pré-processados para estimar a precipitação média sobre cada sub-bacia, as quais apresentam dimensões da ordem de 2.500 km². A chuva média por sub-bacia é usada como dado de entrada no modelo

chuva-vazão-propagação. As vazões produzidas pelas bacias de cabeceira são adicionadas às vazões produzidas pelas bacias internas em acordo com a configuração topológica da rede natural de drenagem. Monitoram-se os níveis nas estações telemétricas, convertem-se os níveis em vazão e se estimam as vazões médias diárias por bacia. O sistema de previsão hidrológica computa as diferenças entre as vazões médias diárias observadas e simuladas pelo modelo hidrológico para atualizar e corrigir o armazenamento de água nas camadas superiores do solo e na rede natural de drenagem (estados do modelo). Seguindo a assimilação da chuva e vazão observadas, roda-se o modelo hidrológico no modo de previsão de vazão.

São assumidos três cenários de previsão de chuva: chuva-zero, chuva-média e chuva-máxima. O cenário de chuva-zero assume que não ocorrerá chuva em todas as sub-bacias durante o horizonte de 5 dias. Este cenário indica a taxa de recessão nas diversas sub-bacias do Alto Iguaçu. O cenário denominado de chuva-média assume que ocorrerão seqüências de chuva leve sobre toda a bacia. O padrão espacial de ocorrência de chuva leve reflete as propriedades estatísticas de cada sub-bacia. O cenário de chuva-máxima assume que ocorrerão seqüências de chuvas intensas sobre todas as sub-bacias. Este cenário indica a velocidade de subida do hidrograma para cada sub-bacia até União da Vitória.

O sistema de previsão hidrológica foi composto por (1) pré-processamento dos dados telemétricos de chuva e nível (vazão), (2) modelo hidrológico chuva-vazão-propagação com encadeamento topológico das sub-bacias, rodando nos modos de atualização (para redução das incertezas na estimativa dos estados) e previsão (usando os cenários de chuva), e (3) sistema para visualização gráfica dos cenários de chuva e hidrogramas previstos para cada sub-bacia. O processo de execução do modelo hidrológico, denominado MODSIM, é realizado diariamente no Instituto Tecnológico SIMEPAR, onde após a execução do aplicativo são disponibilizados um conjunto de resultados numéricos utilizados como entrada para o protótipo de visualização, sendo este processo realizado de forma semi-automática.

2.3.6.2 Bacia do rio Paraíba do Sul

CUNHA e GUETTER (2003) descreveram os princípios e conceitos técnicos do “SIPOP - Sistema Integrado de Previsão Hidrológica e Operação Hidráulica em Tempo Real”, desenvolvido para os reservatórios do sistema hidráulico da LIGHT, localizado nas bacias do Pirai e parte do Paraíba do Sul. O objetivo do SIPOP é fornecer uma ferramenta de apoio ao gerenciamento de reservatórios, estações de bombeamento e usinas hidrelétricas, baseada na previsão de nível e vazão em pontos estratégicos da bacia, com resolução horária e horizonte de previsão de três dias. As previsões hidrológicas usam cinco componentes, incluindo: (1) coleta de dados monitorados em tempo real através de estações telemétricas, (2) pré-processamento dos dados monitorados, (3) definição de cenários futuros de chuva, evapotranspiração e operação hidráulica, (4) modelo hidrológico chuva-vazão e (5) modelo de balanço hídrico dos reservatórios. Para facilitar a operação e visualização dos resultados do modelo foi desenvolvida uma interface gráfica em DELPHI. O SIPOP é o objeto principal desta dissertação.

2.4 EFEITOS OROGRÁFICOS

O relevo interfere fortemente na distribuição espacial das chuvas, alterando o padrão de vento local e a condensação da água precipitável. A região do Paraíba do Sul comporta-se topográfica e morfologicamente como um corredor climático, entre as Serras da Mantiqueira e do Mar, sujeitas a clima úmido (verificar hipsometria da bacia do Paraíba do Sul no mapa 03 do apêndice 5). As massas de ar quente e úmido que chegam do oceano elevam-se na região entre as Serras do Mar e Serra da Mantiqueira, chocando-se com outra massa de ar, mais fria, provocando chuva na bacia do Paraíba do Sul.

BONACINA (1945)⁷, citado por BASIST et al. (1994), identificou quatro processos físicos pelos quais a topografia influencia a distribuição local e a intensidade das chuvas. São eles: 1) a deflexão vertical de ar úmido, 2) bloqueio ou modificação de sistemas de baixa pressão e frontais, 3) geração de correntes convectivas locais e 4) resfriamento de ar quente e úmido sobre superfícies de terra fria, durante o inverno.

Várias análises estatísticas têm sido empregadas para desvendar a complicada relação entre topografia e a distribuição espacial de chuva. Os primeiros modelos estatísticos usavam a elevação como única variável na previsão de chuva. Durante a evolução dessas técnicas, novos parâmetros foram incorporados, tais como: inclinação da topografia e sua orientação em relação aos ventos predominantes. SPREEN (1947)⁸, citado por BASIST et al. (1994), desenvolveu um modelo estatístico para prever a precipitação nas Montanhas Rochosas (Colorado). Nesse modelo foram levadas em conta quatro variáveis topográficas: elevação, inclinação, exposição (ao vento predominante) e orientação que explicaram 88% da variância da chuva média anual e 76% da variação espacial da chuva. Os resultados de Spreen sugerem que equações estatísticas que usam somente variáveis topográficas como determinadores podem efetivamente estimar a distribuição espacial da chuva média anual em regiões montanhosas, embora não se tenha avaliado a questão da modelagem do efeito orográfico sobre a chuva em base temporal diária e horária. Segundo BASIST et al. (1994) a modelagem estatística do efeito orográfico é defendida em estudos desenvolvidos para outras regiões montanhosas (HUTCHINSON, 1973⁹; DANARD, 1976¹⁰; VITAL E VARAS, 1982¹¹).

⁷ BONACINA, L. C. W., 1945: Orographic rainfall and its place in hydrology of the globe. **Quart. J. Roy. Meteor. Soc.**, v. 71, 41-55.

⁸ SPREEN, W. C. A determination of the effect of topography upon precipitation. *Trans Amer. Geophys. Union*, v. 28, 1947, p. 285-290.

⁹ HUTCHINSON, P. The interaction of relief and synoptic situation on the distribution of storm rainfall in the vicinity of Dunedin. **New Zealand Geogr.**, v. 29, 1973, p. 31-44.

¹⁰ DANARD, M. A simple model for mesoscale effects of topography on surface winds. **Mon. Wea. Rev.**, v. 105, 1976, p. 575-581.

A abordagem estatística é interessante por dois motivos. Primeiro, a grande variabilidade espacial da chuva observada em regiões montanhosas é difícil de ser quantificada, devido ao limitado número de estações. Segundo, uma vez que áreas montanhosas distantes freqüentemente constituem a primeira fonte de água de muitas regiões vizinhas, a revisão dos processos hidrológicos locais proporcionada por tais modelos estatísticos pode ter muitas aplicações, como localização de reservatórios, irrigação e, sobretudo, gerenciamento de bacias hidrográficas.

BASIST, BELL e MEENTEMEYER (1994) desenvolveram relações estatísticas entre a topografia e a distribuição espacial da precipitação média anual para dez diferentes regiões montanhosas, agrupadas aos pares, por critério de semelhança de climas, cada qual com vinte postos climáticos no mínimo. Tais relações derivam de análises lineares bi e multivariadas, utilizando seis variáveis topográficas como estimadores de precipitação: elevação, inclinação, orientação, exposição, o produto (da interação) da inclinação e orientação, e o produto da elevação e exposição. Segundo aqueles autores, os dois termos interativos são os melhores estimadores bivariados globais da precipitação média anual, enquanto a orientação e a exposição são os mais fortes estimadores bivariados não-interativos. Em muitas das regiões climaticamente similares, as equações de regressão tendem a ter valores similares de coeficientes angulares e interceptos-y, indicando que as condições de clima locais influenciam fortemente a relação entre topografia e distribuição espacial de chuva. No entanto, as equações de regressão para as regiões tropicais e extra-tropicais exibem diferentes valores de coeficientes angulares e interceptos-y, indicando que a topografia influencia a distribuição espacial de chuva de modo diverso em meios convectivos *versus* não convectivos. As equações multivariadas contêm entre um e três estimadores topográficos significativos. Os melhores, em tais modelos, de acordo com BASIST, BELL e MEENTEMEYER (1994), são a exposição e a interação da elevação e

¹¹ VITAL, I. P.; VARAS, E. Estimaciones de precipitación en lugares con poca información. Agric. Tec., v. 42, 1982, p. 23-30.

exposição, indicando que a exposição ao vento predominante é talvez a única característica mais importante que relaciona a topografia à distribuição espacial da precipitação nas regiões montanhosas estudadas. Tais resultados sugerem que, em certas regiões, pode-se estimar a distribuição espacial da precipitação média anual a partir de uma rede limitada de monitoramento pluviométrico, utilizando equações de regressão topograficamente baseadas.

O regime de precipitação na região do Vale do Paraíba do Sul é bastante particular por ser um corredor entre a Serra da Mantiqueira e a Serra do Mar. Os sistemas que atuam nessa região são: as circulações de brisa vale-montanha e brisa marítima, os sistemas convectivos e os sinóticos. A precipitação na região ocorre principalmente devido aos efeitos orográficos e apresenta um gradiente intenso na Serra do Mar, a qual retêm grande parte da umidade. Um segundo gradiente, menos intenso, é observado na Serra da Mantiqueira. SOUZA e SAKURAGI (2000), através de simulações utilizando o RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*), concluíram que a configuração da brisa marítima, após sobrepujar as brisa vale-montanha, é semelhante à distribuição da precipitação na região, e que a presença de Ilha Bela produz uma divergência do vento, diminuindo a velocidade do vento em direção ao canal. Por outro lado, a baixa topografia ao sul de Taubaté facilita o avanço da brisa marítima em direção ao vale.

Em conclusão, a região da bacia do Paraíba do Sul é fortemente influenciada por forçantes topográficas, provocando distribuições de chuva que se concentram nas regiões montanhosas. Para regiões com essas características, a estimativa de precipitação possui um alto grau de incerteza, gerado pela distribuição não-uniforme de estações pluviométricas, causada pela dificuldade de acesso a regiões muito acidentadas.

A modelagem do efeito orográfico sobre o regime de chuvas é muito importante para a estimativa da chuva média na bacia, sendo esta utilizada tanto na calibração quanto na operação do modelo chuva-vazão integrante do SIPOP. Há uma

grande probabilidade que o processo de calibração do modelo hidrológico seja negativamente comprometido pela incerteza na estimativa da chuva. A rede de monitoramento de chuva é mais densa do que as requeridas pela ANEEL, mas mesmo assim a complexidade topográfica da bacia do Paraíba do Sul demanda maior detalhamento do que o fornecido pela rede. A questão que se coloca é sobre a importância de se desenvolver um processo de modelagem para estimar a distribuição espacial de chuva, uma vez que a solução pelo adensamento da rede implica em custos de implantação e operação muito significativos.

A complexidade do efeito orográfico sobre a chuva é suficientemente ampla para constituir um tema de pesquisa isoladamente. Desta forma este não foi desenvolvido neste estudo cujo foco é no desenvolvimento do sistema de previsão de vazões e no modelo hidrológico de Sacramento. Para minimizar as incertezas decorrentes da existência do efeito orográfico sobre o regime de chuvas da região as sub-bacias do SIPOP foram discretizadas de forma a modelar separadamente as regiões que apresentam características pluviométricas diferentes.

3 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 CARACTERÍSTICAS DA BACIA DO PARAÍBA DO SUL

A bacia do Paraíba do Sul está incluída na macro-bacia do Atlântico Sul, trecho leste, sub-bacia 58, e localiza-se ao longo do eixo de ligação Rio de Janeiro - São Paulo, contendo parte de sua área nestes dois estados e parte no estado de Minas Gerais. A área total da bacia hidrográfica é de aproximadamente 57.000 km², sendo que 22.600 km² encontram-se no Estado do Rio de Janeiro, 13.500 km² no Estado de São Paulo e 20.900 km² no Estado de Minas Gerais, como é apresentado na Tabela 3.1(ANA, p. 214-222).

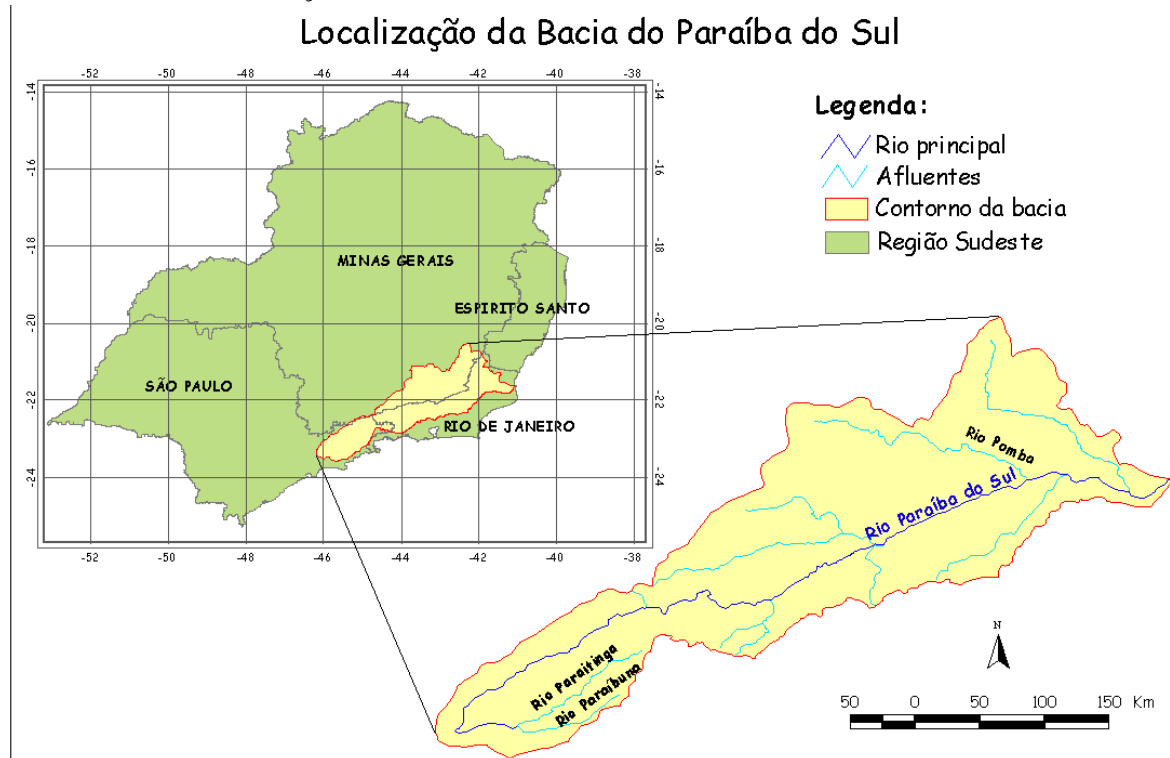
A bacia está compreendida entre os paralelos 20°26' e 23°38' Sul e meridianos 41°00' e 46°30' Oeste. Ao Norte e a Oeste apresenta divisores de águas com rios pertencentes à bacia do Paraná, como é o caso do rio Grande e do rio Tietê. O divisor de águas, nesse caso, é a Serra da Mantiqueira. Ao Sul é limitada pela Serra do Mar. Na região leste encontra como divisor o relevo montanhoso entre a Serra do Mar e a Serra da Mantiqueira, que a separa da bacia do rio Itabapoana. A Figura 3.1 ilustra a localização geográfica da bacia do Paraíba do Sul.

TABELA 3.1 ÁREA DA BACIA DO PARAÍBA DO SUL POR ESTADO

ESTADO	ÁREA DA BACIA DO PARAÍBA DO SUL (KM2)	% DA ÁREA DA BACIA
Rio de Janeiro	20.700	39,60
São Paulo	13.900	23,68
Minas Gerais	20.900	36,67
Total	57.000	100

A área de interesse da LIGHT se encontra entre a cabeceira e a UHE de Ilha dos Pombos, abrangendo uma área de 32.516 km².

FIGURA 3.1 LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO PARAÍBA DO SUL



3.1.1 Hidrografia

A hidrografia do Estado do Rio de Janeiro está dividida em dez unidades, de acordo com a liberação nº 804 da Comissão Estadual de Controle Ambiental (CECA), de 20.02.1986. A região em estudo nesta classificação localiza-se na Região Hidrográfica 6, a qual compreende toda a bacia do rio Paraíba do Sul. Este é formado pela confluência dos rios Paraitinga e o Paraibuna. A extensão do curso d'água, desde a nascente do rio Paraitinga, na serra da Bocaina em São Paulo, até a foz no município de São João da Barra, na região norte Fluminense, é de 1.137 km. Nos primeiros 300 km o rio corre na direção sudoeste, onde se curva abruptamente para a direita tomando a direção oposta, ou seja, nordeste. Essa direção só não é mantida no trecho entre as cidades de Cachoeira Grande e Barra do Piraí, onde o rio corre para leste. Nos últimos 80 km o rio corre na direção leste, formando meandros que deságuam no Oceano Atlântico (CPRM, 2001).

Os rios da bacia do Paraíba do Sul que constituem o trecho de interesse para a LIGHT são (de montante, São Paulo, para jusante, Rio de Janeiro e Minas Gerais): rio Paraíba do Sul, rio Piraí e ribeirão das Lajes.

O SIPOP foi implantado para um trecho do rio Paraíba do Sul, entre a Usina Hidrelétrica de Funil e o reservatório de Santa Cecília e para a sub-bacia do rio Piraí. Nesta região está localizado o ‘Sistema Hidráulico da LIGHT’, onde são realizadas duas transposições de bacias com o objetivo de abastecimento urbano e geração de energia. Esta região será descrita com maior detalhe no item 3.2 deste trabalho.

3.1.2 Usinas Hidrelétricas e aproveitamentos hidráulicos

Ao longo do percurso do rio Paraíba do Sul e de seus contribuintes, existem 14 conjuntos de obras hidráulicas operadas por quatro empresas geradoras de energia (LIGHT, Furnas, CESP, CERJ e Cataguazes Leopoldina) listados na Tabela 3.2. Além das usinas localizadas na bacia do Paraíba do Sul, são citadas as 3 usinas localizadas na sub-bacia do Guandu, por fazerem parte do Sistema Hidráulico da LIGHT. Outros aproveitamentos hidráulicos localizados na área de estudo são listados na Tabela 3.3.

A Figura 3.2 apresenta a topologia da área de interesse da LIGHT, onde está representada a interligação entre Usinas Hidrelétricas, reservatórios e estações elevatórias. A Figura 3.3 ilustra a localização das obras hidráulicas (usinas hidrelétricas, reservatórios e estações elevatórias) na bacia do rio Paraíba do Sul.

TABELA 3.2 USINAS HIDRELÉTRICAS

HIDRELÉTRICA OU REPRESA	EMPRESA	NOME DO RIO
1 – bacia do Paraíba do Sul – Estado do Rio de Janeiro		
UHE de Funil	FURNAS	Paraíba do Sul
UHE Santa Branca	LIGHT	Paraíba do Sul
UHE de Paraibuna/Paraitinga	CESP	Paraibuna Paulista
UHE de Jaguari	CESP	Jaguari
UHE Ilha dos Pombos	LIGHT	Paraíba do Sul
UHE Areal	CERJ	Rio Piabanha
UHE Piabanha (Alberto Torres)	CERJ	Rio Piabanha
UHE Fagundes	CERJ	Rio Fagundes
UHE Euclidelândia	CERJ	Rio Negro
UHE Chave do Vaz	CERJ	Rio Negro
UHE Hans	Cat. Leopoldina	R. S. Antonio
UHE Xavier	Cat. Leopoldina	Rio Grande
UHE Comendador Venâncio	CERJ	Rio Muriaé
UHE Tombos	CERJ	Rio Carangola
1 – bacia do rio Guandú		
UHE Nilo Peçanha	LIGHT	---
UHE Fontes Nova e Velha	LIGHT	Ribeirão das lajes
UHE Pereira Passos	LIGHT	Ribeirão das lajes

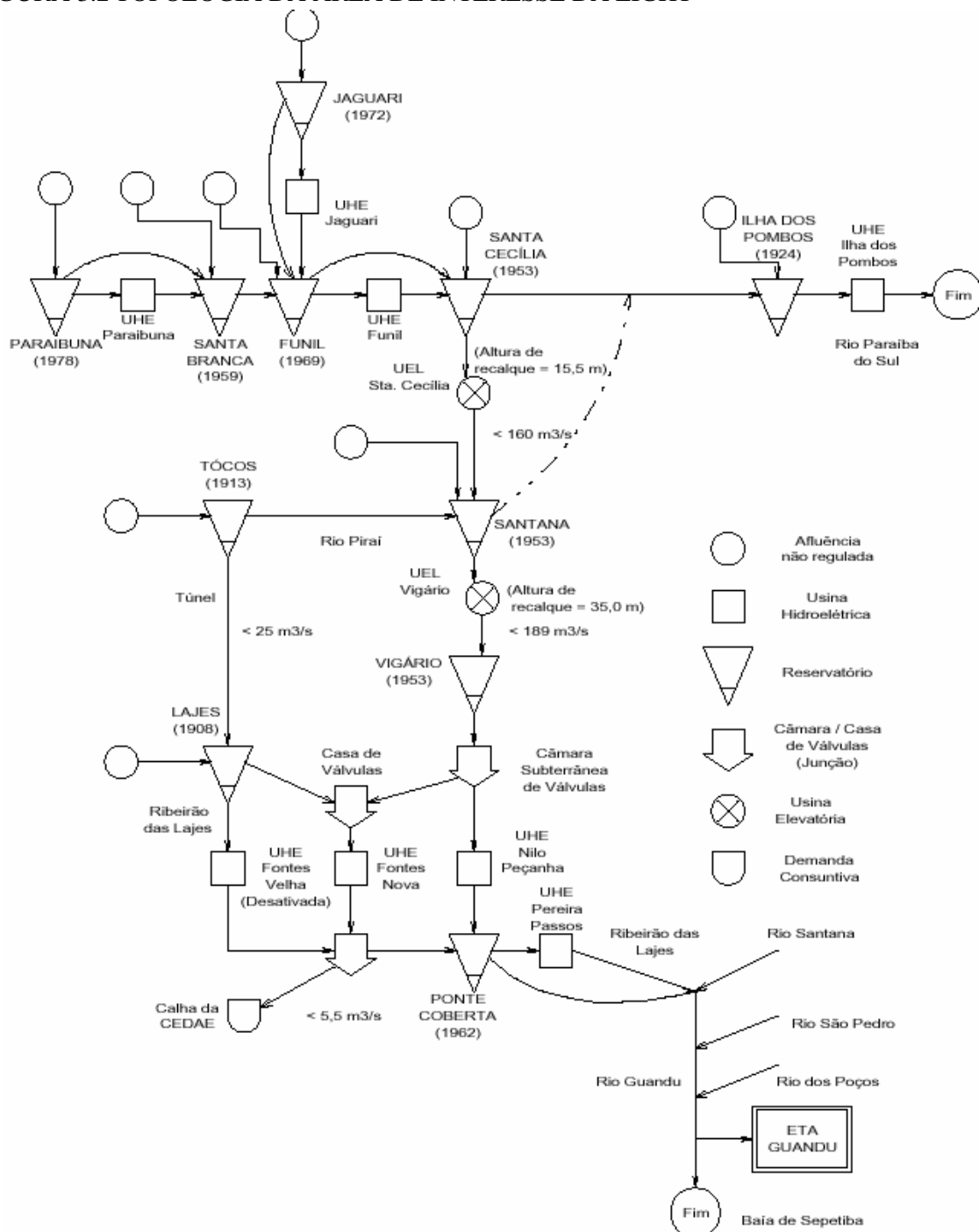
FONTE: Agência Nacional de Águas. Série: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Rio de Janeiro, p. 247-246. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb/cd4/index.htm>. Acesso em mar. 2003

TABELA 3.3 APROVEITAMENTOS HIDRÁULICOS

OBRA	ASPECTOS RELEVANTES
1 – bacia do Paraíba do Sul – Estado do Rio de Janeiro	
Barragem de Santa Cecília	Localizada no rio Paraíba do Sul, possui uma estação elevatória equipada com quatro bombas, podendo elevar 40m ³ /s a uma altura de 15 m. O canal tem um comprimento de 2.500 m, ligando o túnel ao antigo leito do rio Piraí
Reservatório de Santana	Localizada no rio Piraí, recebe as águas desviadas da bacia do rio Paraíba do Sul.
Estação elevatória de Vigário	Localizada no reservatório de Santana eleva as águas deste reservatório para reservatório de Vigário.
Reservatório de Tocos	Localizada a montante da barragem de Santana, faz parte do Sistema Hidráulico da LIGHT
1 – bacia do rio Guandú	
ETA Guandu	Em 1950 iniciou-se a captação de água do Sistema Guandu, construído para produzir 13,8m ³ /s, sendo posteriormente ampliado para 24 m ³ /s (1961-1964), 40 m ³ /s (1978-1982) e atualmente subiu para cerca de 45 m ³ /s.

FONTE: Agência Nacional de Águas. Série: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Rio de Janeiro, p. 214-222. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb/cd4/index.htm>. Acesso em mar. 2003

FIGURA 3.2 TOPOLOGIA DA ÁREA DE INTERESSE DA LIGHT



FONTE: PLANO DE RECURSOS HÍDRICOS DA bacia DO PARAÍBA DO SUL. Operação dos reservatórios da bacia do rio Paraíba do Sul e sistema LIGHT. Disponível em: <http://www.hidro.ufrj.br/pqarj/pqarj.htm>. Acesso em: nov. 2002.

FIGURA 3.3 LOCALIZAÇÃO DAS OBRAS HIDRÁULICAS NA BACIA DO PARAÍBA DO SUL



Como nesta bacia se encontram reservatórios de diversas empresas e para diversos fins o gerenciamento da bacia é de grande importância na definição do correto uso da água por cada uma das empresas de energia, além da necessidade de garantir disponibilidade hídrica para os demais usos da água, como é o caso de abastecimento urbano e irrigação (UFRJ, 2002). Em 1996, foi criado o Comitê da bacia do Paraíba do Sul, através do Decreto-lei n. 1.842 (BRASIL, 1996), o qual atua no gerenciamento integrado desta bacia.

3.1.3 Sistema de Telemetria Hidrológica da LIGHT

Neste item será apresentada uma breve descrição do Sistema de Telemetria Hidrológica da LIGHT. Uma descrição mais detalhada pode ser encontrada no Relatório Técnico SIMEPAR No. 007/2002, SIPOP – Sistema Integrado de Previsão Hidrológica e Operação Hidráulica em Tempo Real: Especificações (GUETTER, GONÇALVES, CUNHA, 2002).

O Sistema de Telemetria Hidrológica (STH) foi implantado pelo consórcio

ICSA/SIMEPAR e é composto por 34 estações telemétricas, sendo 2 de medição somente de chuva, 12 de vazão e 20 de chuva e vazão. Estas estações encontram-se listadas na Tabela 3.4. A última coluna desta tabela indica o tipo da estação telemétrica, sendo: F = fluviométrica (cujo código LIGHT inicia-se pela letra “V”, referindo-se a medição de vazão), P = pluviométrica (“P” no código LIGHT, neste caso) e FP = fluviométrica e pluviométrica.

TABELA 3.4 ESTAÇÕES TELEMÉTRICAS DO STH-LIGHT

Nº	CÓD. LIGHT	NOME	LAT. (°S)	LONG. (°W)	ALT. (M)	MUNIC.	UF	TIPO
1	V-1-007	Paraibuna Jusante	23° 24' 52"	45° 36' 30"	626	Paraibuna	SP	FP
2	V-1-014	Santa Branca – Barragem	23° 22' 23"	45° 52' 10"	630	Santa Branca	SP	FP
3	V-1-018	Guararema	23° 24' 55"	46° 01' 28"	571	Guararema	RJ	FP
4	V-1-020	Jacareí	23° 18' 38"	45° 58' 16"	588	Jacareí	RJ	FP
5	V-1-112	Santa Branca – Jusante	23° 22' 02"	45° 52' 40"	582	Santa Branca	RJ	F
6	V-1-051	Porto Novo do Cunha	21° 53' 10"	42° 41' 52"	145	Além Paraíba	RJ	FP
7	V-1-054	Sapucaia	21° 59' 18"	42° 54' 10"	267	Sapucaia	RJ	FP
8	V-1-062	Ilha dos Pombos – Barragem	21° 51' 09"	42° 36' 24"	138	Carmo	RJ	FP
9	V-1-067	Ilha dos Pombos – Tomada d'Água	21° 50' 37"	42° 34' 41"	136	Carmo	RJ	F
10	V-1-068	Ilha dos Pombos – Descarga	21° 50'	42° 35'	108	Carmo	RJ	F
11	V-1-046	Fazenda Piracema (antiga Sta.Fé)*	22° 05' 13"	43° 09' 05"	299	Sapucaia	RJ	F
12	V-1-050	Fazenda Barreira*	22° 08' 31"	43° 09' 33"	306	Sapucaia	RJ	F
13	V-1-245	Três Rios	22° 07' 12"	43° 12' 29"	293	Três Rios	RJ	FP
14	V-1-044	Morsing	22° 32' 21"	43° 46' 39"	389	Piraí	RJ	FP
15	V-1-080	Volta Redonda*	22° 30' 06"	44° 05' 29"	378	Volta Redonda	RJ	FP
16	V-1-087	Santa Cecília – Saída do Túnel	22° 30' 40"	43° 49' 28"	383	Barra do Piraí	RJ	F
17	V-1-090	Barra do Piraí*	22° 27' 02"	43° 47' 52"	350	Barra do Piraí	RJ	FP
18	V-1-094	Santa Cecília – Jusante	22° 28' 46"	43° 50' 04"	357	Barra do Piraí	RJ	F
19	V-1-092	Santa Cecília – Tomada d'Água	22° 28' 58"	43° 50' 20"	355	Barra do Piraí	RJ	FP
20	V-1-098	Vigário – Tomada d'Água	22° 37' 44"	43° 53' 42"	370	Piraí	RJ	F
21	V-1-099	Vigário – Descarga d'Água	22° 37' 48"	43° 53' 42"	401	Piraí	RJ	FP
22	P-1-295	Passa Três	22° 41' 33"	44° 00' 25"	451	Piraí	RJ	P
23	V-1-041	Barragem Santana	22° 31' 55"	43° 49' 08"	373	Piraí	RJ	FP
24	V-1-105	Fazenda Nova Esperança	22° 39' 47"	43° 57' 25"	370	Piraí	RJ	FP
25	V-1-040	Barragem de Tocos	22° 44' 58"	44° 07' 31"	451	Rio Claro	RJ	FP
26	P-1-108	Lídice Pluviômetro	22° 50' 08"	44° 11' 37"	588	Lídice	RJ	P
27	V-1-108	Lídice Linímetro	22° 49' 55"	44° 11' 55"	530	Lídice	RJ	F
28	V-1-100	Nilo Peçanha – Canal Vigário	22° 41' 01"	43° 52' 24"	400	Piraí	RJ	FP
29	V-1-481	Várzea	22° 46' 13"	44° 05' 28"	506	Rio Claro	RJ	FP
30	V-3-482	Rosário	22° 47' 31"	44° 03' 03"	453	Rio Claro	RJ	F
31	V-3-485	Barragem de Lajes	22° 42' 08"	43° 52' 51"	432	Piraí	RJ	FP
32	V-3-486	Calha da CEDAE	22° 41' 29"	43° 51' 48"	92	Piraí	RJ	F
33	V-3-489	Pereira Passos – Jusante	22° 41' 10"	43° 49' 20"	53	Piraí	RJ	FP
34	V-3-500	Pereira Passos – Montante	22° 41' 09"	43° 49' 30"	89	Piraí	RJ	F

3.1.3.1 Componentes do Sistema

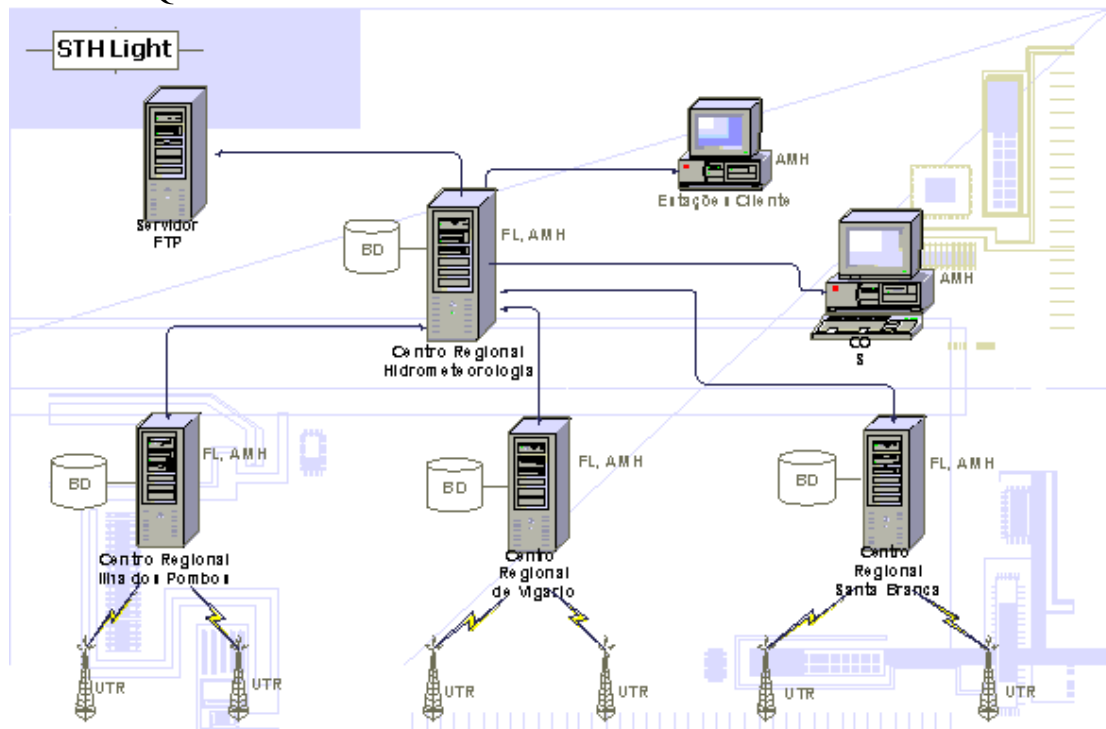
O STH é composto por três Centros de Aquisição de Dados Regionais

localizados em:

- a) usina de Santa Branca – Município de Santa Branca – São Paulo
- b) usina de Vigário – Município de Pirai
- c) usina de Ilha dos Pombos - Município de Carmo

A Figura 3.4 ilustra esquematicamente a interligação entre os Centros Regionais, Centro de Hidrologia e o Centro de Operação do Sistema (COS).

FIGURA 3.4 ESQUEMA DOS CENTROS REGIONAIS E CENTRO DE HIDROLOGIA DO STH



Os dados coletados pelas estações telemétricas são enviados para os centros regionais com atualização de 15 minutos e, posteriormente, replicados para o servidor do centro de hidrologia. O STH possui estações de trabalho especiais no Centro de Operações do Sistema (COS) no Rio de Janeiro.

3.1.3.2 Armazenamento dos dados

Os dados processados são armazenados em um banco de dados *Oracle* com manipulação de dados via *SQL*. Antes de serem armazenados, os dados passam por

uma análise de consistência, na forma de uma verificação de coerência da ordem de grandeza das leituras.

Além dos dados monitorados pelas estações telemétricas, o banco de dados armazena os dados fixos e operativos das estruturas hidráulicas. Os dados fixos compreendem as curvas de descarga das estações e das estruturas hidráulicas, curvas cota x volume dos reservatórios e as curvas das bombas. Os dados operativos compreendem a operação das comportas, turbinas e estações elevatórias. A inserção destes últimos fica a cargo dos operadores. Estes dados permitem o cálculo das estatísticas hidráulicas e hidrológicas, assim como a implementação de um sistema de previsão hidrológica e hidráulica em tempo real.

3.1.3.3 Aplicativos hidráulicos de monitoramento e previsão

O STH possui dois *softwares* para manipulação dos dados hidráulicos e hidrológicos. O primeiro, denominado “Ambiente de Monitoramento Hidrológico” (AMH), é responsável pela aquisição, processamento, cálculo das estatísticas e visualização dos dados monitorados em resolução diária. O segundo *software*, denominado “Sistema Integrado de Previsão Hidrológica e Operação Hidráulica em Tempo Real” (SIPOP), é responsável pelo processamento dos dados monitorados em tempo real em escala horária e pela previsão da vazão e de nível, na mesma escala, em pontos estratégicos do sistema. Ambos realizam processos que utilizam como dados de entrada os dados monitorados em tempo real e os dados fixos armazenados no banco de dados.

3.2 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Neste item será descrito em maior detalhe a área de implantação do SIPOP, referente ao Sistema Hidráulico da LIGHT, apresentando sua localização, os objetivos e vantagens obtidos com sua implantação, suas principais características, as

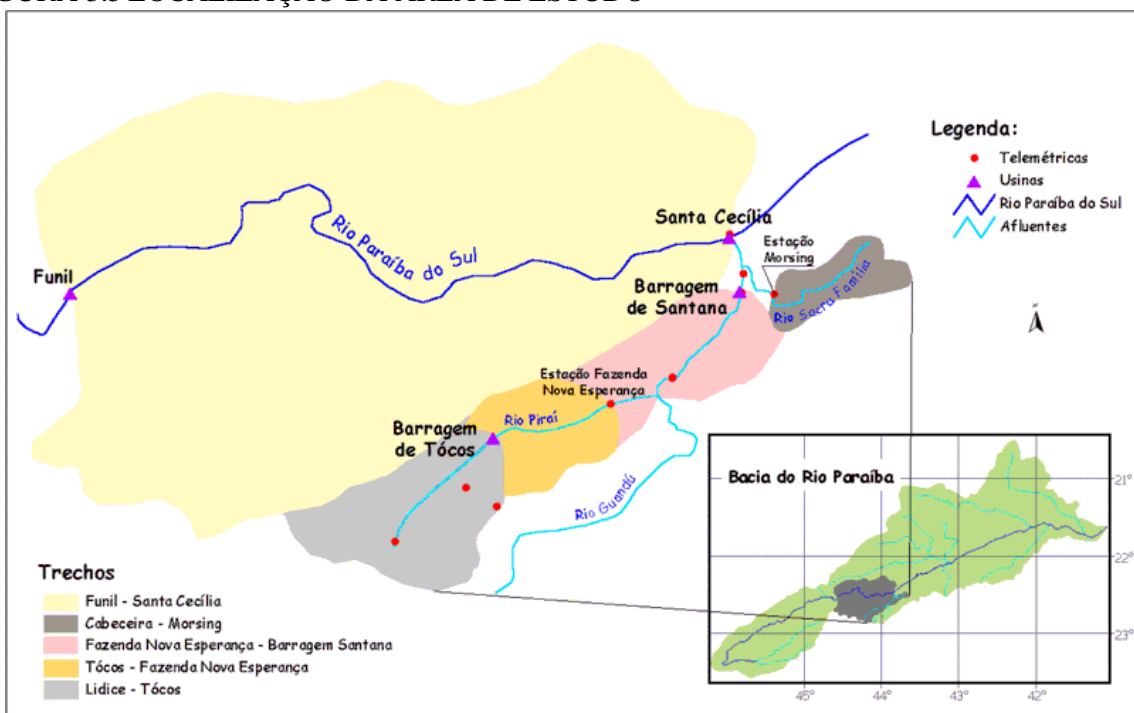
problemáticas decorrentes de situações de eventos extremos e um breve resumo da operação das estruturas hidráulicas. Este sistema já foi detalhado por CUNHA e GUETTER (2003).

O Apêndice 5 apresenta mapas detalhados da área de estudo. O mapa 1 apresenta a localização da bacia do Paraíba do Sul e da área de estudo. O mapa 2 apresenta o Sistema Hidráulico da LIGHT, com a localização das usinas, reservatórios, estações telemétricas e sedes municipais. O mapa 3 apresenta a hipsometria da bacia do Paraíba do Sul.

3.2.1 Localização

A área de estudo localiza-se na bacia do rio Paraíba do Sul, abrangendo a sub-bacia entre a Usina de Funil e o reservatório de Santa Cecília e a sub-bacia do rio Pirai (Figura 3.5). Esta região está totalmente inserida no estado do Rio de Janeiro. Os reservatórios contidos nesta área, com exceção do reservatório de Funil que pertence a FURNAS, fazem parte do Sistema Hidráulico da LIGHT, o qual foi desenhado com o objetivo de aumentar o potencial energético e de abastecimento de água local.

FIGURA 3.5 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO



3.2.2 Geologia e Relevo

A área de estudo insere-se na Unidade Morfoestrutural do Cinturão Orogênico do Atlântico e na Unidade Morfoescultural denominada depressões Interplanálticas do Médio Vale do rio Paraíba do Sul. Os sistemas de relevo encontrados na região são descritos a seguir (CPRM, 2000^a):

- a) planícies aluviais (planícies de inundação, terraços fluviais e leques alúvio-coluviais): superfícies subhorizontais, com gradientes extremamente suaves e convergentes em direção aos canais- tronco. Este sistema abrange a planície aluvial do rio Paraíba do Sul.
- b) domínio suave colinoso: relevo de colinas muito pouco dissecadas, com vertentes convexas e topos arredondados ou alongados, com expressiva sedimentação de colúvios e alúvios. Ocorrência subordinada de morrotes alinhados. Densidade de drenagem baixa a média com padrão de drenagem variável, de dendrítico a treliça ou retangular. Predomínio de amplitudes topográficas inferiores a 50m e gradientes. Este sistema abrange a sub-bacia do rio Piraí, até aproximadamente o reservatório de Vigário.
- c) domínio colinoso (zona típica do domínio de mar de morros): relevo de colinas pouco dissecadas, com vertentes convexo- côncavas e topos arredondados ou alongados, com sedimentação de colúvios e alúvios. Ocorrência subordinada de morrotes alinhados e morros baixos. Densidade de drenagem média com padrão de drenagem variável, de dendrítico a treliça ou retangular. Predomínio de amplitudes topográficas inferiores a 100m e gradientes suaves. Este sistema abrange a sub-bacia do rio Piraí, iniciando no reservatório de Vigário e indo até a Cidade de rio Claro.
- d) domínio de colinas dissecadas, morrotes e morros baixos: relevo de colinas dissecadas, com vertentes convexo- côncavas e topos arredondados e/ ou alongados e de morrotes e morros dissecados, com vertentes retilíneas e côncavas e topos aguçados ou alinhados, com sedimentação de

colúvios e alúvios. Densidade de drenagem média a alta com padrão de drenagem variável, de dendrítico a treliça ou retangular. Predomínio de amplitudes topográficas entre 100 e 200m e gradientes suaves a médios. Este sistema abrange a sub-bacia do rio Pirai, iniciando na Cidade de rio Claro até Lídice.

- e) domínio montanhoso: relevo montanhoso, muito acidentado, localizado, em geral, no reverso da escarpa da Serra do Mar. Vertentes predominantemente retilíneas a côncavas, escarpadas e topos de cristas alinhadas, aguçados ou levemente arredondados. Ocorrência de compartimentos colinosos e/ou de morros, em seções alveolares nos vales principais. Ocorrência pontual de relevo suave ondulado, com elevações locais, localizado nos planaltos elevados das serras do Mar e da Mantiqueira. Densidade de drenagem alta com padrão de drenagem variável, de dendrítico a treliça ou retangular. Predomínio de amplitudes topográficas superiores a 400m e gradientes elevados a muito elevados, com ocorrência de colúvios e depósitos de tálus, solos rasos e afloramentos de rocha.

3.2.3 Uso do Solo

A área de estudo apresenta regiões de pastagem, mata, urbanas e solo exposto. Em sua grande maioria encontram-se áreas de pastagem, correspondente a áreas cobertas por gramíneas, com intensa infestação de espécies herbáceas e de pastagem plantada. Essa região sofreu intensa intervenção humana para o uso da terra, descaracterizando a vegetação primária. As regiões urbanas estão localizadas na região de Volta Redonda, Pirai, Barra do Pirai e Mendes (CPRM, 2000^b).

3.2.4 Sistema Hidráulico da LIGHT

O Sistema de reservatório LIGHT foi constituído com o objetivo de realizar a transposição das águas do Paraíba do Sul para a vertente atlântica da Serra do Mar, aproveitando assim 295m de queda para a geração de energia.

Além disso, esta transposição possibilitou o início da exploração do rio Guandu para fins de abastecimento de água, sendo que hoje o abastecimento da capital do Estado e da Baixada Fluminense é totalmente dependente deste sistema. A água desviada também é utilizada para outros fins, como abastecimento industrial, preservação da flora e fauna e disposição final de esgotos (UFRJ, 2002).

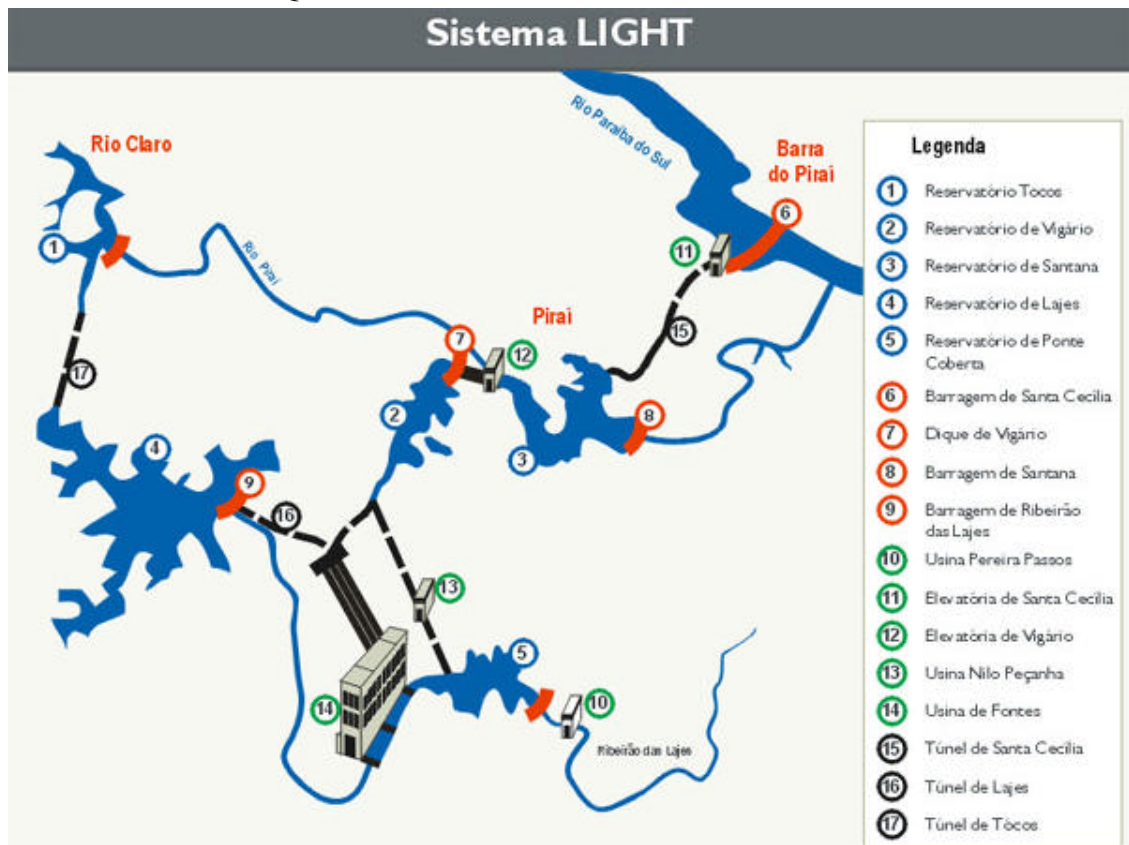
O sistema de transposição de águas inicia através da usina elevatória de Santa Cecília, localizada no rio Paraíba do Sul, que desvia água do reservatório de Santa Cecília para o reservatório de Santana, na bacia do rio Piraí. A capacidade desta usina é de $160\text{m}^3/\text{s}$ de água, aproximadamente 60% da vazão média de longo termo. A altura recalçada neste ponto é de 15,50m.

A água armazenada no reservatório de Santana é decorrente da afluência do rio Piraí e do desvio das águas do Paraíba do Sul. Neste local está localizada a usina elevatória de Vigário que recalca a uma altura de 35,0 m a vazão máxima de $189\text{ m}^3/\text{s}$ para o reservatório de Vigário localizado no rio Guandu. A água do reservatório de Vigário é utilizada somente na geração de energia, através das Usinas hidrelétricas de Nilo Peçanha e Fontes Nova.

A montante do reservatório de Santana localiza-se o reservatório de Tocos. Esse reservatório desvia cerca de $25\text{ m}^3/\text{s}$ para o reservatório de Lajes, também localizado no rio Guandu, através do túnel de Tocos. Esta água apresenta alta qualidade e, após gerar energia pela Usina Hidrelétrica de Fontes Nova, é utilizada para abastecimento de água.

A Figura 3.6 apresenta uma ilustração esquemática do conjunto de obras hidráulicas e reservatórios. As Tabelas 3.5, 3.6, 3.7 (UFRJ, 2002) apresentam as principais características dos reservatórios, das estações elevatórias e das usinas deste sistema, respectivamente.

FIGURA 3.6 FIGURA ESQUEMÁTICA DO SISTEMA LIGHT



SISTEMA DE GESTÃO INTEGRADA DA BACIA DO PARAÍBA DO SUL. Serviços de informações da bacia do Paraíba do Sul. Recursos Hídricos. Disponível em: <http://pbs.ana.gov.br/pbs0800/> Acesso em: fev. 3002.

TABELA 3.5 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS RESERVATÓRIOS

RESERVATÓRIO	ÁREA DE DRENAGEM (KM ²)	VOLUMES (HM ³)			COTAS (M)		
		MIN.	MAX.	ÚTIL	MIN.	MAX.	DESN.
Santa Cecília	16.694	3,39	5,56	2,17	352,00	352,95	0,95
Tocos	386	0,00	5,29	5,29	441,00	452,00	11,00
Santana	902	5,872	13,10	7,22	362,25	363,60	1,35

TABELA 3.6 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS

USINA ELEVATÓRIA	BOMBEAMENTO MÁXIMO	Nº DE BOMBAS	ALTURA DE RECALQUE (M)	INÍCIO DA OPERAÇÃO
Santa Cecília	160,00	4	15,5	1953
Vigário	189,00	4	35,0	1953

TABELA 3.7 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS UHE

USINA HIDRELÉTRICA	POTÊNCIA EFETIVA (MW)	RENDIMENTO GERADOR (PU)	REND. TURBINA(PU)	INÍCIO OPERAÇÃO
Fontes Velha	26	0,980	0,826	1908
Fontes Nova	132	0,984	0,826	1940
Nilo Peçanha	380	0,984	0,874	1953

As restrições impostas à operação dos reservatórios estão relacionadas aos níveis na barragem e às vazões efluentes. Na Tabela 3.8 estão relacionadas as principais restrições dos reservatórios de Santa Cecília, Santana e Tocos. A restrição de nível mínimo em Santa Cecília visa permitir o pleno bombeamento pela Usina Elevatória e o nível máximo refere-se ao nível da soleira da barragem. No caso do reservatório de Tocos o nível mínimo refere-se a cota inferior do túnel de Tocos, sendo que abaixo deste nível não haverá desvio para o reservatório de Lajes. O nível máximo é decorrente da cota da soleira da barragem. Os níveis máximos e mínimos definidos para o reservatório de Santana foram retirados do documento Instruções de Operação – IOP – nº 902 (LIGHT, 2002), que descreve a operação dos reservatórios de Santana e Vigário durante a ocorrência de cheias. O restante foi consultado no documento Operação dos reservatórios da bacia do Paraíba do Sul e Sistema LIGHT (UFRJ, 2002).

TABELA 3.8 PRINCIPAIS RESTRIÇÕES OPERATIVAS DOS RESERVATÓRIOS

RESERVATÓRIO	RESTRIÇÃO DE NÍVEL A MONTANTE (M)		RESTRIÇÃO DE DESCARGA A JUSANTE (M ³ /S)	
	ZMIN.	ZMÁX	QMIN.	QMÁX
Sta Cecília	352,00	353,00	71	1.100
Tocos	440,00	452,00	0,0	-
Santana	362,25	363,60	0,02	15

3.2.5 Problemas decorrentes de eventos extremos

3.2.5.1 Cheia

O maior problema encontrado durante situações de cheia refere-se aos

alagamentos e enchentes na cidade de Barra do Piraí, localizada na confluência do rio Piraí e do rio Paraíba do Sul, recebendo então contribuições de ambos.

A transposição de águas do rio Piraí para o rio Guandu através dos reservatórios de Santana e do reservatório de Tocos iniciou no ano de 1953, ou seja, a mais de 40 anos. Esse procedimento praticamente anulou a vazão do rio Piraí a jusante do reservatório de Santana em situações de operação normal, trazendo diversos prejuízos ambientais.

Uma das conseqüências mais desfavoráveis foi a ocupação antrópica do leito maior do rio Piraí, facilitada pela falta de fiscalização do poder público. Esta ocupação se tornou tão significativa que hoje cerca de 35% da população do Município de Barra do Piraí encontra-se sobre o leito do Rio. Outro agravante foi o assoreamento da calha do rio em decorrência das baixas vazões encontradas neste trecho. O rio Sacra Família, afluente da margem direita do rio Piraí, deposita os sedimentos na calha deste, obstruindo ainda mais o canal do rio. A bacia do rio Piraí entre a barragem de Santana e a foz apresenta uma área de 227,4 km², sendo que 190,2 km² correspondem à sub-bacia do rio Sacra família. Sendo assim, a contribuição deste afluente é de grande importância durante os eventos de cheia.

Outro fator de grande importância na análise das inundações na Cidade de Barra do Piraí é a vazão defluente do reservatório de Santa Cecília. Sempre que esta exceder o valor de 1.100 m³/s, uma parte da cidade de Barra do Piraí sofre inundações, tendo como principal conseqüência a inundação de rodovias de grande importância para a malha rodoviária, como a RJ 145.

Com o objetivo de proteger a população contra danos ocasionados por eventos extremos, além de acomodar os interesses de outros usuários dos recursos hídricos da bacia, foi criado um aparato legal que regula a operação dos reservatórios da bacia. Estas regras foram estabelecidas através do Decreto nº 68.324 de 9 de março de 1971 (BRASIL, 1971), da Portaria nº 22 (DNAEE, 1977) e do Decreto nº 81.436 (BRASIL, 1978). Um resumo das regras operativas é apresentado na seqüência.

As situações mais críticas de cheias encontram-se na bacia do rio Pirai e, por isso, em caso de situações extremas busca-se sempre interromper o desvio de água do reservatório de Santa Cecília para Santana. Em situações muito críticas, antes de iniciar o vertimento pela barragem de Santana, pode-se ainda realizar reversão, ou seja, fazer com que a água do reservatório de Santana retorne ao reservatório de Santa Cecília, utilizando para isso uma ou duas bombas. Mas nem sempre essa ação é suficiente para resolver o problema, sendo necessário então iniciar o vertimento pela barragem de Santana.

A descarga de restrição da barragem de Santana, em condições normais de operação é de $15 \text{ m}^3/\text{s}$, sendo que na verdade esta vazão já ocasiona danos a jusante. A vazão que é normalmente descarregada é de $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$, somente necessária para diluição de esgoto a jusante. No entanto, durante eventos extremos foram observadas vazões muito superiores ao limite estipulado, conforme apresentado nas Tabelas 3.9 e 3.10. Como fontes destas tabelas apresentam-se os seguintes documentos: NASCIMENTO e BARBOSA (1985), NICODEMUS et al (1992), NICODEMUS e SILVA (1996) e ALVES e LEMOS (2000).

Observa-se que nos últimos anos vem sendo realizado um intenso trabalho com a comunidade e com o governo local com o objetivo de minimizar os danos causados pelas enchentes. Além disso, o monitoramento das vazões em tempo real e a previsão de afluições e níveis dos reservatórios permitirão obter um maior controle sobre a bacia hidrográfica, possibilitando a tomada de decisões em tempo hábil para minimização dos danos causados à população.

TABELA 3.9 VAZÃO AFLUENTE E VERTIMENTO PELA BARRAGEM DE SANTANA DURANTE EVENTOS DE CHEIA

EVENTO (ANO)	VAZÃO MÉDIA DIÁRIA (M^3/S)	VAZÃO DE PICO (M^3/S)	VERTIMENTO MÁXIMO (M^3/S)
1985	287	473	300
1992	376	691	240
1996	262	409	160
2000	283	324	78,5

TABELA 3.10 VAZÕES MÁXIMAS DIÁRIAS NA BACIA DO PIRAÍ DURANTE EVENTOS DE CHEIAS

DADO/ANO	1985	1992	1996	2000
Afluência ao reservatório de Tocos	167	220	200	188
Vertimento da barragem de Tocos	151	232	181	174
Afluência ao reservatório de Santana	287	376	262	283
Bombeamento na EU. Sta Cecília (máx/mín)	135/2	32,1/-25	60/16	118/-36
Bombeamento UE. Vigário	189	184	193	187
Vertimento da barragem de Santana	198	101	100	50,1

3.2.5.2 Estiagem

O maior problema encontrado nestes eventos deve-se à manutenção do abastecimento de água da cidade de Barra do Piraí, que depende de vazões e níveis mínimos no reservatório de Santa Cecília. Além disso, deve se manter a vazão mínima defluente de Santa Cecília. Outro importante fator a ser considerado é o bombeamento mínimo para Santana, o que garante o funcionamento do Sistema CEDAE na bacia do rio Guandu.

3.2.6 Operação dos reservatórios

As regras de operação dos reservatórios em cascata da bacia do Paraíba do Sul, até o reservatório de Santa Cecília foram editadas a Portaria DNAEE nº 022 em 24 de fevereiro de 1977 (DNAEE, 1977). Com essas regras buscou-se assegurar uma afluência mínima ao reservatório de Santa Cecília que atendesse a derivação para o Sistema LIGHT e a defluência mínima de 90,0 m³/s a jusante.

A defluência mínima de 90 m³/s é dificilmente atendida durante períodos muito secos, devido ao pequeno volume do reservatório de Santa Cecília. Este fator tornou-se ainda mais grave devido à grande sedimentação neste reservatório, diminuindo ainda mais o volume disponível e a capacidade de regularização. Considerando estes fatores, foram estabelecidas novas regras de operação, através do Decreto nº 81.436, de 1978 (BRASIL, 1978), a serem seguidas durante condições hidrológicas extremas. Neste decreto foi estabelecida a vazão defluente mínima de 71

m^3/s , a ser praticada somente sobre autorização do DNAEE.

O item a seguir apresenta um resumo das regras operativas, dando maior ênfase aos itens que foram levados em consideração durante o desenvolvimento do SIPOP.

3.2.6.1 Operação Normal do Sistema LIGHT

Neste item são apresentadas algumas tabelas que resumem as principais restrições de operação das estruturas hidráulicas durante a operação normal. A Tabela 3.11 apresenta a vazão defluente máxima e mínima dos reservatórios, a Tabela 3.12 e 3.13 apresenta as vazões bombeada mínima, ideal e máxima pelas usinas de Santa Cecília e Vigário, respectivamente.

Em condições de operação normal, o reservatório de Tocos, localizado a montante do reservatório de Santana no rio Piraí, opera com o objetivo de desviar 25 m^3/s através do túnel para o reservatório de Lajes.

TABELA 3.11 RESTRIÇÃO DA VAZÃO DEFLUENTE DOS RESERVATÓRIOS

RESERVATÓRIO	Q DEFLUENTE MÁX. (M ³ /S)	Q DEFLUENTE MIN. (M ³ /S)
Funil	700	80
Santa Cecília	1.100	90
Tocos	-	-
Santana	15	0,02

TABELA 3.12 BOMBEAMENTO PELA USINA ELEVATÓRIA DE SANTA CECÍLIA

MÍNIMO (M ³ /S)	META (M ³ /S)	MÁXIMO (M ³ /S)
100	160	160

TABELA 3.13 BOMBEAMENTO PELA USINA ELEVATÓRIA DE VIGÁRIO

META (M ³ /S)	MÁXIMO (M ³ /S)
178	189

3.2.6.2 Operação em situações de eventos extremos de seca

Em situações de seca duas regras de operação são alteradas. Primeiramente, a defluência mínima em Santa Cecília é reduzida, conforme critério estipulado pelo DNAEE, podendo atingir o valor mínimo minimorum de 71 m³/s. Além disso, o bombeamento meta Paraíba – Piráí é reduzido para 130 m³/s, sendo que pode chegar, em caso de condições muito adversas, a 119 m³/s.

3.2.6.3 Operação em situações de eventos extremos de cheia

Foram definidos diversos procedimentos operativos no caso de eventos extremos de cheia que visam minimizar os danos decorrentes de inundações na bacia do rio Piráí e rio Paraíba do Sul, principalmente na cidade de Barra do Piráí. A operação consiste em evitar o vertimento pela barragem de Santana. Para isso, são utilizados os seguintes recursos disponíveis, apresentados segundo a ordem de execução:

- a) diminuição do nível do reservatório de Santana, ou seja, alocação de um volume de espera, tendo em vista o monitoramento das condições hidrológicas de montante e a previsão da vazão afluente ao reservatório;
- b) suspensão de bombeamento na Usina elevatória de Santa Cecília. O número de bombas que devem ser desligadas é determinado em função do nível do reservatório de Santana, da previsão de afluência a este e da probabilidade de manutenção do bombeamento para Vigário;
- c) pleno bombeamento através da Usina Elevatória de Vigário, observando sempre o nível máximo do reservatório de Vigário;
- d) reversão através da Estação Elevatória de Santa Cecília utilizando uma ou duas bombas
- e) caso ainda haja possibilidade de extrapolação do nível máximo em Santana, iniciar a descarga pelas comportas.

3.2.7 Sub-bacias modeladas

No SIPOP o modelo hidrológico será aplicado para sete sub-bacias, as quais são representadas pelos retângulos na Figura 3.7 e listadas em seguida. Os retângulos amarelos representam sub-bacias intermediárias e os retângulos verdes sub-bacias de cabeceira. A divisão em sub-bacia pode ser visualizada na Figura 3.5. No apêndice 1 é apresentada uma descrição detalhada das características de cada sub-bacia modelada e de suas estruturas hidráulicas de controle.

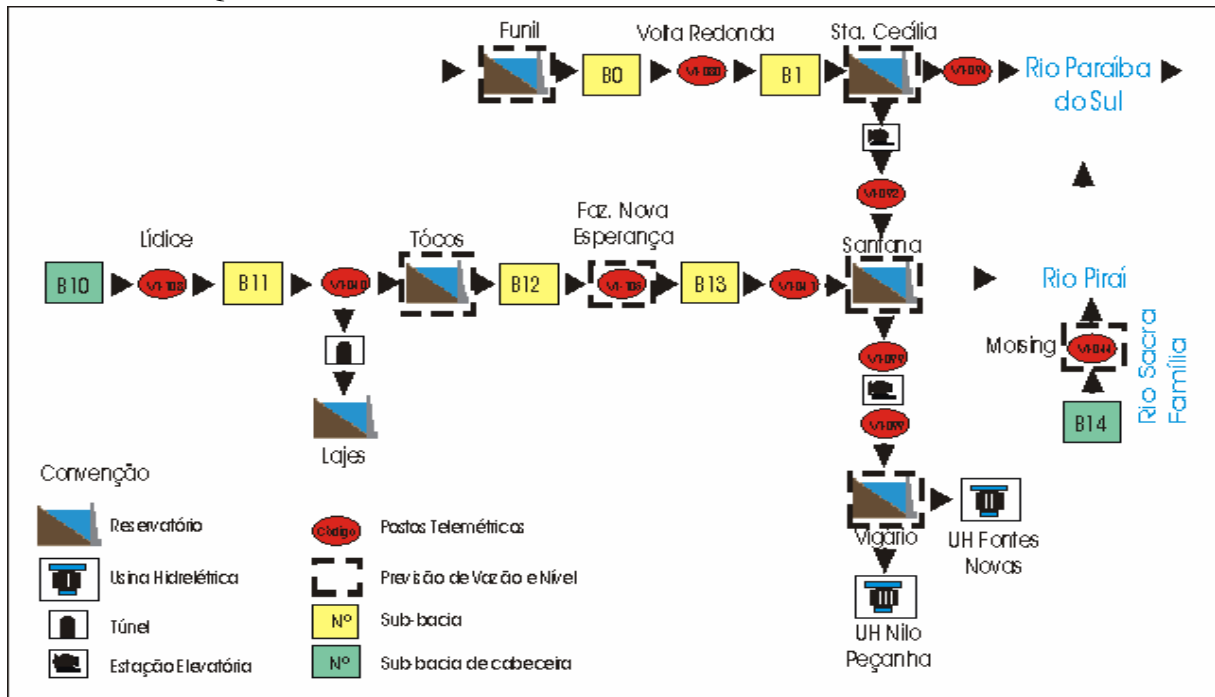
Bacia do rio Paraíba do Sul:

- a) B0: área entre a Usina Hidrelétrica de Funil e a estação telemétrica de Volta Redonda;
- b) B1: área entre estação telemétrica de Volta Redonda e o reservatório de Santa Cecília;

Sub-Bacia do rio Pirai:

- a) B10: área de cabeceira da sub-bacia do rio Pirai, até a estação telemétrica de Lídice;
- b) B11: área entre a estação telemétrica de Lídice e o reservatório de Tocos;
- c) B12: área entre o reservatório de Tocos e a estação telemétrica de Fazenda Nova Esperança;
- d) B13: área entre a estação telemétrica de Fazenda Nova Esperança e o reservatório de Barragem Santana;
- e) B14: área de cabeceira da sub-bacia do rio Sacra Família até a estação telemétrica de Morsing.

FIGURA 3.7 ESQUEMA DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS MODELADAS



4 SISTEMA DE PREVISÃO HIDROLÓGICA E OPERAÇÃO HIDRÁULICA EM TEMPO REAL

A realização de previsões de vazão em tempo real requer a utilização intensiva de recursos computacionais para geração, processamento e armazenamento de um grande conjunto de informações (CASTANHARO; MINE, 2001).

Este item descreve detalhadamente a atividade de desenvolvimento tecnológico que criou a infra-estrutura necessária para a implantação do modelo hidrológico para previsão de afluências integrado com a operação hidráulica de reservatórios. Esta atividade de desenvolvimento demandou a interação de conhecimentos em hidrologia, modelagem e gerenciamento de banco de dados, programação científica e arquitetura de interfaces para visualização. O detalhamento da modelagem hidrológica é apresentado nos itens 5 e 6, sendo que neste item o objetivo é apresentar os conceitos e a descrição do sistema lógico em que estão embutidos o pré-processamento dos dados, o modelo hidrológico e o balanço hídrico. O grau de detalhe da descrição do sistema pode parecer excessivo para uma dissertação com foco em hidrologia. Todavia, entende-se que o detalhamento da concepção e desenvolvimento do sistema é absolutamente necessário para demonstrar as dificuldades inerentes à transposição do conhecimento científico em hidrologia para a operacionalização de um sistema de previsão hidrológica.

Neste estudo foram integrados seis conjuntos de recursos computacionais, descritos em CUNHA e GUETTER (2003), sendo eles:

- a) banco de dados para assimilação automática dos dados hidrológicos e entrada interativa de dados operativos;
- b) banco de dados para armazenamento dos dados de entrada, saída e parâmetros do modelo de previsão;
- c) aplicativo de pré processamento e controle de qualidade dos dados monitorados;

- d) aplicativo de previsão hidrológica;
- e) aplicativo de operação hidráulica (balanço hídrico);
- f) interface gráfica para visualização das previsões e simulações.

4.1 MÓDULOS DE PREVISÃO

O SIPOP possui dois módulos de previsão. O primeiro, denominado “Módulo de Previsão Típica”, foi concebido de forma a manter o sistema sempre em funcionamento, mesmo que não haja nenhuma intervenção dos usuários. O objetivo deste módulo é manter o sistema atualizado para quando houver maior necessidade de uso. O segundo, denominado “Módulo de Simulação”, permite que o usuário realize diversas simulações, verificando as previsões de níveis e vazões para diferentes previsões de chuva e operações hidráulicas. Neste item estes módulos serão descritos com maior detalhe.

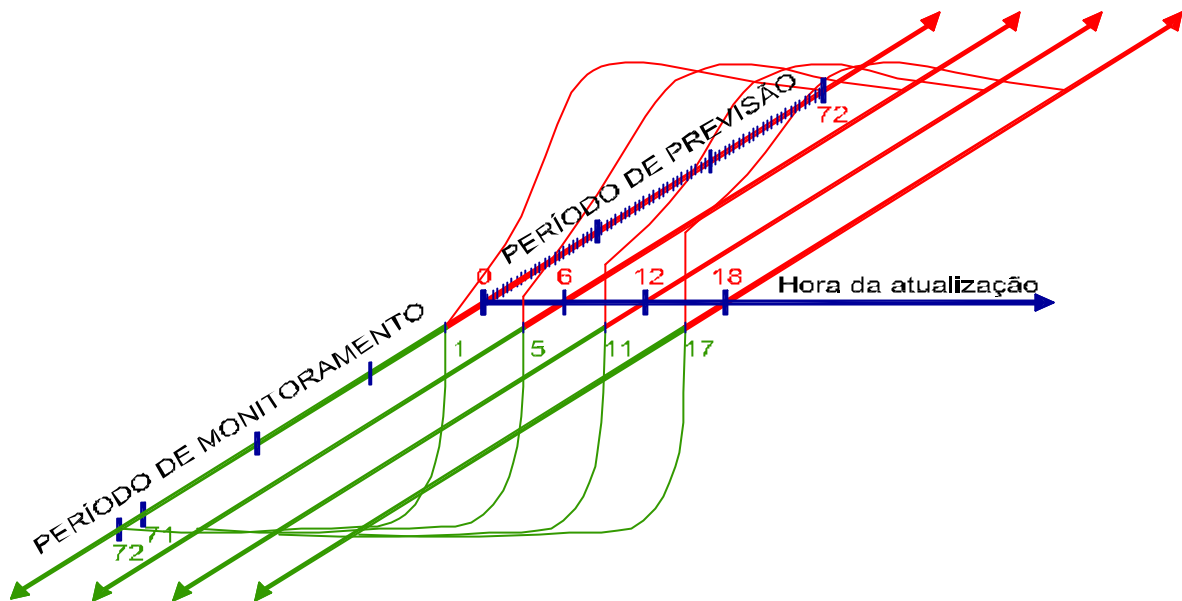
4.1.1 Módulo de Previsão Típica

A previsão de vazões e níveis tem horizonte de 72 horas, com resolução horária. A atualização da previsão é realizada automaticamente a cada 6 horas, sendo que as atualizações ocorrem às 00, 06, 12 e 18 horas de cada dia.

O modelo hidrológico é aplicado de maneira contínua, sendo necessário transferir de uma atualização para outra as variáveis de estado do solo (condições iniciais do modelo) para o instante inicial da previsão. Na Figura 4.1 este procedimento está representado pelo “Período de Monitoramento”, onde se realiza o cálculo das variáveis de estado para o período compreendido entre a hora de inicial de previsão e as 72 horas anteriores. Como a atualização ocorre a cada 6 horas, as variáveis de estado são recalculadas para as últimas 66 horas. Esse procedimento é realizado com o objetivo de garantir que todos os dados monitorados necessários ao cálculo já estejam armazenados corretamente no banco de dados, mesmo após a

ocorrência de alguma falha no sistema de medição.

FIGURA 4.1 ESQUEMA DO CICLO DE ATUALIZAÇÃO COM OS PERÍODOS DE MONITORAMENTO E PREVISÃO



Para o “Período de Previsão”, representado na Figura 4.2, é necessário fornecer ao modelo hidrológico 72 horas de previsão de chuva (denominados de cenário de chuva) e de evaporação potencial horárias de cada sub-bacia. O SIPOP, não dispõe de previsão quantitativa de chuva em tempo real e, por isso, foi necessário definir cenários de chuva prevista, tentando estimar a chuva mais provável para cada intervalo de tempo. São realizadas previsões para dois cenários diferentes de chuva.

- a) chuva zero – considera que não haverá chuva durante o horizonte de previsão;
- b) chuva máxima – foi definida climatologicamente e visa estimar as vazões de pico do hidrograma resultante de chuvas intensas. O método utilizado na definição da chuva máxima encontra-se descrito no Apêndice 2 deste trabalho.

Estes cenários puderam ser utilizados uma vez que o tempo de resposta da bacia mais de montante é aproximadamente igual ao intervalo de atualização do sistema.

O modelo hidrológico fornece a vazão prevista na exutória de cada sub-bacia modelada. Para calcular a previsão de nível nestes pontos utiliza-se a curva de descarga da estação ou se executa o modelo de operação hidráulica, usando como dados de entrada os dados operativos das estruturas hidráulicas. Neste módulo são definidas as “operações típicas” das estruturas hidráulicas, referentes às operações normais.

As vazões, níveis e precipitações previstos e monitorados são visualizados através da interface gráfica do usuário.

Os resultados da previsão de vazões são apresentados de duas formas:

- a) previsão horária com horizonte de 24 horas, para utilização na previsão de cheias e nas operações das estruturas hidráulicas;
- b) previsão diária com horizonte de 3 dias, para que seja enviada ao ONS, conforme solicitação feita aos agentes geradores de energia.

4.1.2 Módulo de Simulação

O módulo de simulação também realiza previsão de vazão e nível com horizonte de 72 horas e resolução horária, mas com dois graus de liberdade em relação à previsão típica:

- a) a atualização da previsão poderá ocorrer a qualquer hora, conforme a necessidade do operador. Esse procedimento permite assimilar as chuvas de grande intensidade mais recentes e que exercem influência significativa sobre as vazões para as primeiras horas de previsão.
- b) os cenários de previsão de chuva e de operação hidráulica para as 72 horas de previsão podem ser editadas pelo usuário, o que permite que o usuário analise a sensibilidade do hidrograma previsto para diferentes possibilidades de chuva futura e operação hidráulica.

Desta forma, para iniciar este módulo o operador deverá primeiramente

fornecer a hora inicial da previsão. Em seguida, o usuário poderá editar os cenários de chuva prevista e os cenários de operação futura através da interface gráfica do usuário. Caso deseje, o operador poderá manter os dados de entrada definidos para o módulo de previsão típica, os quais serão apresentados na tela após a escolha do horário inicial da previsão. Ao comando do operador a previsão é realizada e os resultados são visualizados através da interface gráfica do usuário.

4.2 PONTOS DE PREVISÃO DO SIPOP

O SIPOP realiza previsão de vazão afluente e nível para três reservatórios, sendo eles:

- a) reservatório de Tocos no rio Piraí;
- b) reservatório de Santana no rio Piraí;
- c) reservatório de Santa Cecília no rio Paraíba do Sul;

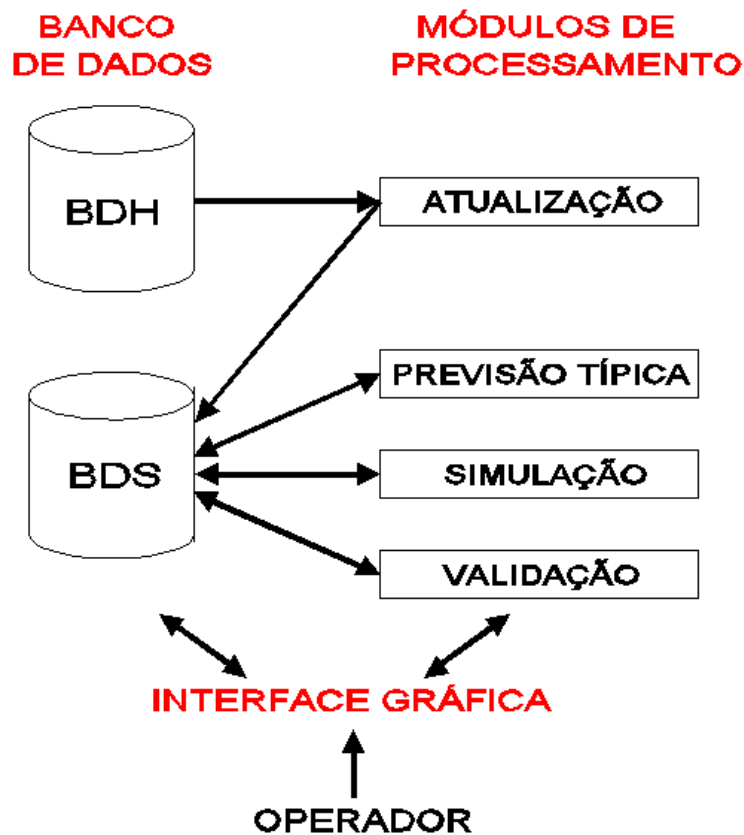
Além dos reservatórios, são realizadas previsão de vazão e nível em dois rios de grande importância para o alerta e controle das inundações no município de Barra do Piraí, sendo elas:

- a) estação Fazenda Nova Esperança no rio Piraí;
- b) estação Morsing no rio Sacra Família.

4.3 ESPECIFICAÇÃO DOS COMPONENTES DO SIPOP

A Figura 4.2 ilustra esquematicamente a integração entre os diversos componentes do SIPOP, sendo eles: banco de dados hidrológico e do SIPOP, os módulos de processamento e a interface gráfica do usuário. Em seguida são listadas as subdivisões destes componentes.

FIGURA 4.2 ESQUEMA DOS COMPONENTES INTEGRANTES DO SIPOP



- a) COMPONENTE 1 - Banco de Dados;
- banco de dados Hidrológicos (BDH) - Dados Monitorados e dados fixos das estruturas hidráulicas
 - banco de dados do SIPOP (BDS) – Dados de entrada, saída e parâmetros do SIPOP.
- b) COMPONENTE 2 - Módulos de Processamento;
- Módulo de Atualização:
 - pré-processamento de dados de chuva;
 - pré-processamento de dados de vazão.
 - Módulo de Previsão Típica:
 - rotinas de consulta ao banco de dados – dados monitorados, dados típicos e parâmetros do modelo;
 - modelo Hidrológico Chuva-Vazão-Propagação – MODSAC;

- modelo de Operação Hidráulica – MODOPE;
 - Módulo de Simulação:
 - edição dos dados de entrada;
 - rotinas de consulta ao banco de dados – Dados monitorados, dados editados pelo operador e parâmetros do modelo;
 - modelo Hidrológico Chuva-Vazão-Propagação – MODSAC;
 - modelo de Operação Hidráulica – MODOPE;
 - Módulo de Validação dos Resultados da Previsão Típica.
- c) COMPONENTE 3 - Interface gráfica do Usuário.

4.4 COMPONENTE 1 – BANCO DE DADOS

O banco de dados foi dividido em duas *tablespace* pertencentes ao mesmo banco de dados *Oracle*, denominadas de “BDH” (banco de dados hidrológico) e “BDS” (banco de dados do SIPOP).

4.4.1 Vantagens do banco de dados em relação à arquitetura tradicional

Na arquitetura tradicional os dados do sistema são armazenados fisicamente separados um do outro em arquivos. O acesso é feito pelos programas de aplicação, que chamam e abrem os arquivos externos e definem todos os registros independentes.

Na arquitetura com banco de dados, os dados são definidos pelo Sistema Gerenciador de Banco de Dados, através da linguagem de definição de dados. Fisicamente estão armazenados em um único local, sendo o acesso realizado apenas através do Sistema Gerenciador. Nos programas de aplicação, é necessário apenas definir os campos que serão utilizados pelo programa.

As principais vantagens obtidas com o uso de banco de dados ao invés do sistema tradicional são:

- a) redução ou eliminação de redundâncias - Os dados são armazenados em um único local, mesmo sendo comuns a mais de um sistema.
- b) eliminação de inconsistências - Através do armazenamento da informação em um único local com acesso descentralizado e, sendo compartilhada à vários sistemas, os usuários estarão utilizando uma informação confiável. A inconsistência ocorre quando um mesmo campo tem valores diferentes em sistemas diferentes.
- c) compartilhamento dos dados - Permite a utilização simultânea e segura de um dado, por mais de uma aplicação ou usuário, independente da operação que esteja sendo realizada.
- d) restrições de segurança - Define para cada usuário o nível de acesso a ele concedido (leitura, leitura e gravação ou sem acesso) ao arquivo e/ou campo. Este recurso impede que pessoas não autorizadas utilizem ou atualizem um determinado arquivo ou campo.
- e) padronização dos dados - Permite que os campos armazenados na base de dados sejam padronizados segundo um determinado formato de armazenamento (padronização de tabela, conteúdo de campos, etc) e ao nome de variáveis seguindo critérios padrões pré-estabelecidos.
- f) manutenção de integridade - Exige que o conteúdo dos dados armazenados no Banco de Dados possua valores coerentes ao objetivo do campo, não permitindo que valores absurdos sejam cadastrados.

4.4.2 Banco de Dados Hidrológicos – BDH

O BDH foi modelado e implantado pelo SIMEPAR e não faz parte do desenvolvimento deste trabalho de dissertação. Todavia, o conhecimento e pleno entendimento do BDH foi requisito para a especificação do banco de dados do SIPOP, que foi parte integrante deste trabalho de dissertação. O BDH opera em modo automático através do sistema SCADA (Sistema de supervisão, controle e aquisição de

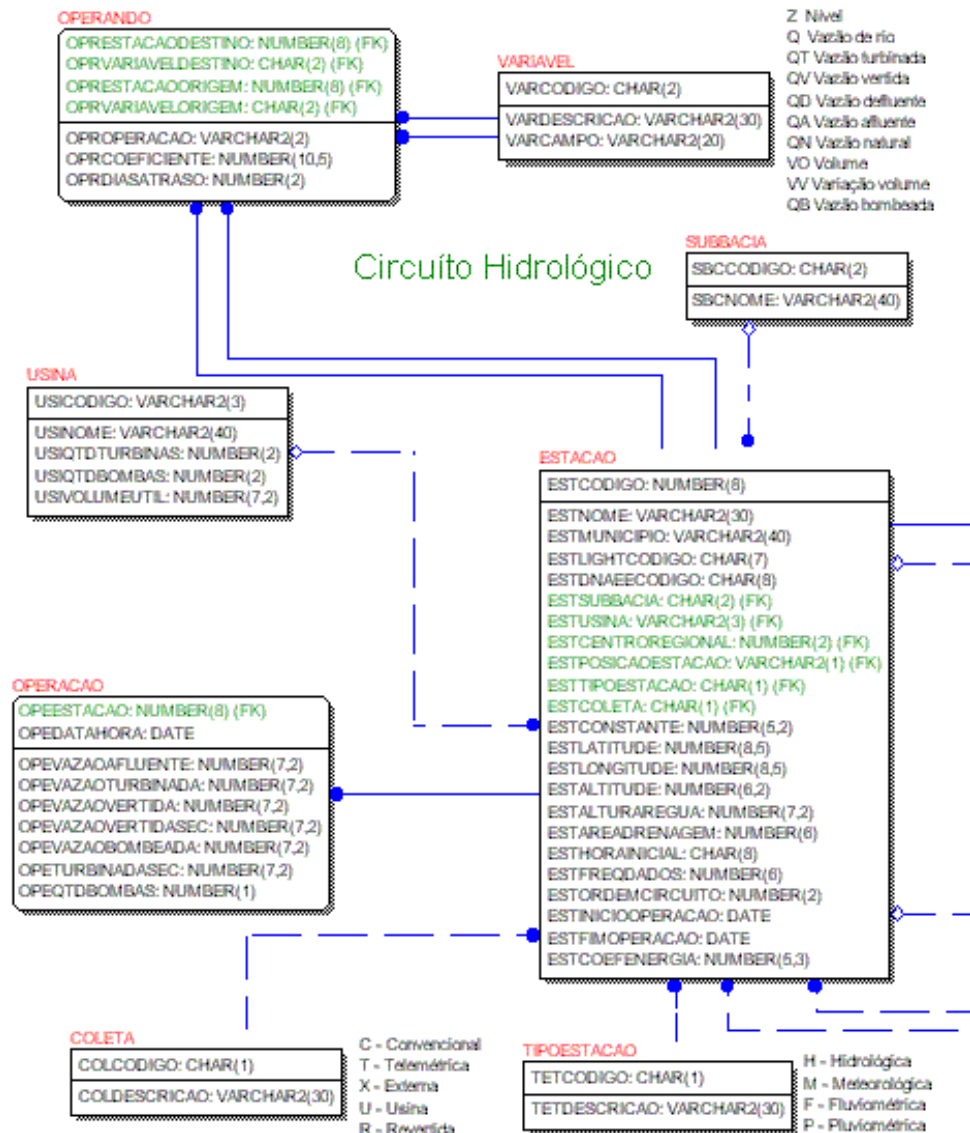
dados) e em modo manual através de digitação pelo operador, coletando as seguintes variáveis:

- a) precipitação
- b) nível
- c) vazão
- d) operação das estruturas hidráulicas

O BDH foi dividido em quatro esquemas, localizados em diferentes servidores, sendo um para cada Centro Regional e um para o Centro de Hidrologia. Os dados coletados em tempo real pela rede telemétrica pluviométrica e fluviométrica, bem como as tabelas que contêm as relações fixas das estações telemétricas (curva de descarga), reservatórios (relação cota-volume) e estruturas hidráulicas (curva de descarga dos túneis, comportas e vertedouros e curva das bombas) encontram-se no servidor dos Centros Regionais. Estes dados são replicados para o esquema localizado no servidor do Centro de Hidrologia, o qual consolida os dados provenientes dos três Centros Regionais. Os dados utilizados pelo aplicativo são consultados diretamente deste esquema.

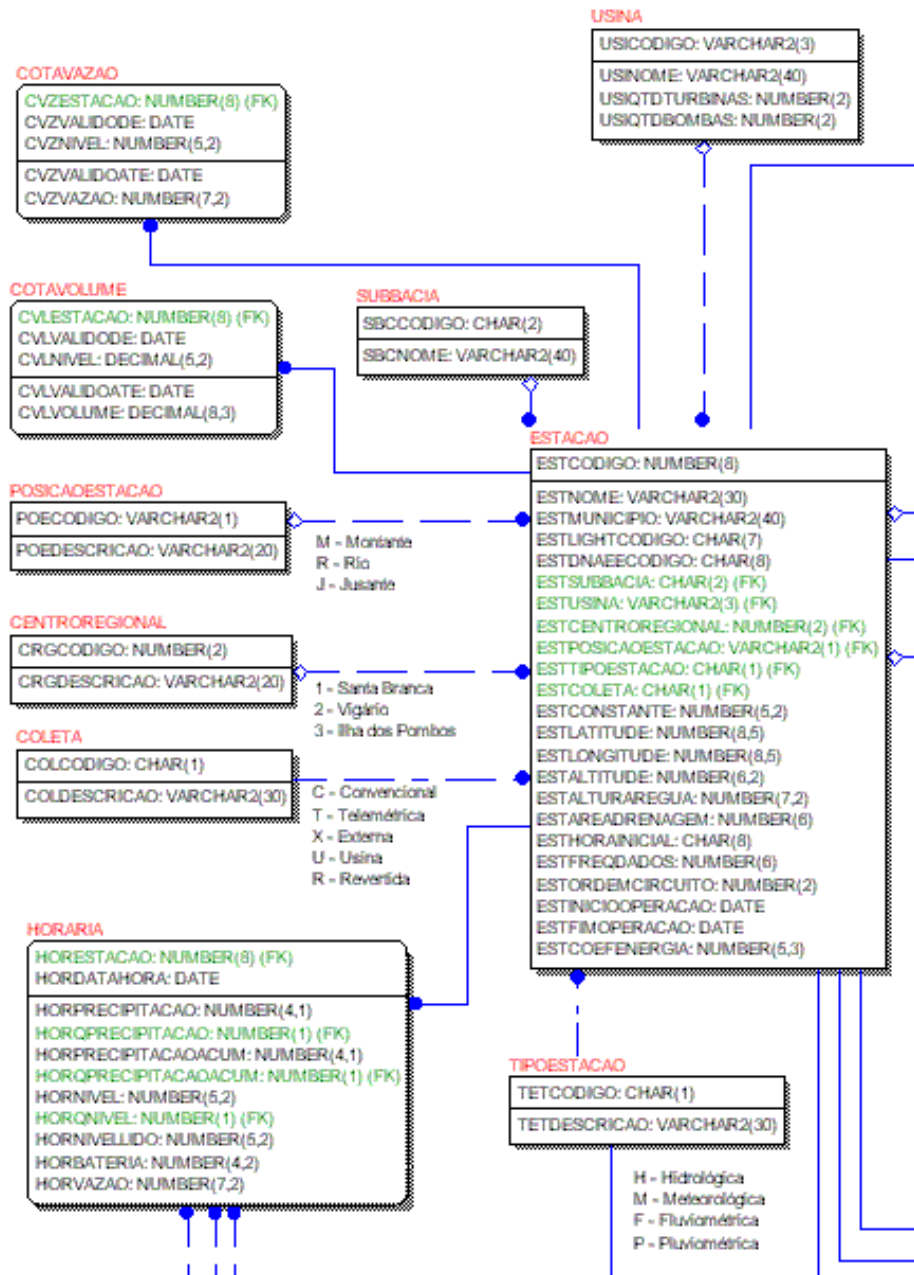
As tabelas que armazenam os dados consultados pelo SIPOP são visualizadas no modelo do banco de dados apresentado nas Figuras 4.3 e 4.4. O modelo foi apresentado em duas figuras de forma a apenas facilitar a visualização, no entanto compreendem uma única estrutura de banco de dados. Estas figuras apresentam o modelo de entidade e relacionamento, mapeando o mundo real do sistema em um modelo gráfico que irá representar o relacionamento existente entre os dados. A entidade identifica o objeto de interesse do sistema e corresponde a representação abstrata de um objeto do mundo real sobre o qual deseja-se guardar informações. O relacionamento representa a associação entre os elementos do conjunto de uma entidade com outra entidade. Nestas figuras o texto em vermelho representa o nome da tabela no banco, o texto na primeira parte do retângulo as chaves da tabela e o restante as colunas da tabela.

FIGURA 4.3 MODELO LÓGICO DO BANCO DE DADOS HIDROLOGIA – 1



- FONTE: Coordenadoria de Infra-estrutura do SIMEPAR

FIGURA 4.4 MODELO LÓGICO DO BANCO DE DADOS HIDROLOGIA - 2



- FONTE: Coordenadoria de Infra-estrutura do SIMEPAR

4.4.3 Banco de dados do SIPOP - BDS

Os procedimentos do SIPOP envolvem um grande número de consultas e inserção de dados no banco. Para assegurar eficiência ao aplicativo de previsão e simulação foi desenvolvido o BDS (Banco de Dados do SIPOP) com estrutura adequada para permitir acessos rápidos e seguros. A especificação do BDS foi parte

integrante do trabalho de dissertação.

Para estruturar e projetar o BDS primeiramente se determinou claramente o objetivo dos dados armazenados, para especificar quais dados deveriam ser armazenados e a frequência que o *software* acessaria cada dado. Em seguida, estas informações foram classificadas em assuntos diferentes, de forma a separá-las em diferentes tabelas do banco. Prosseguiu-se definindo quais informações deveriam ser mantidas em cada tabela, os campos que seriam utilizados como Chave Primária e como os dados de uma tabela se relacionariam com os dados de outras tabelas. Desta forma, foram criadas 24 Tabelas no *schema* "PREVISAÇÃO", descritas individualmente na seqüência:

- a) CHUVAMEDIACALCULADA: Contêm dados de chuva média horária para as sete sub-bacias do SIPOP. Armazena o resultado do Pré-processamento dos dados de chuva;
- b) NIVELMONITORADO: Contém dados de nível horário monitorado para todos os postos da rede telemétrica na área do SIPOP. Armazena os dados de nível resultantes do pré-processamento;
- c) VAZAOMONITORADA: Contém informação de vazão horária monitorada para todos os postos telemétricos na área do SIPOP. É resultado do Pré-processamento dos dados de nível;
- d) EVPTPOT: Contém os valores calculados de evapotranspiração potencial para todos os meses do ano;
- e) VAZAOOBSERVADAFUNIL: Contém dados de vazão horária monitorada defluente de Usina Hidrelétrica de Funil. Estes dados são editados pelo operador através da interface gráfica do usuário e são utilizados como vazão afluente a sub-bacia B0 durante o cálculo das variáveis de estado desta bacia;
- f) VAZAOTIPICAFUNIL: Apresenta informações sobre a vazão típica defluente da Usina Hidrelétrica de Funil, no caso definida próxima da

vazão mínima de restrição. Este dado será utilizado durante o processo de previsão ou como dado observado no caso deste não ter sido editado pelo operador;

- g) CENARIOCHUVA: Contêm dados de chuva prevista para o módulo de previsão típica. A metodologia utilizada na definição destes valores encontra-se em Apêndice;
- h) EVAPOTRANPIRACAO: Contém dados de evapotranspiração para todos os dias e horas do ano. Estes dados são utilizados como valores observados, devido à inexistência de medições, e durante a previsão;
- i) OPERATIPICA: Contêm dados referentes às operações normais para todas as estruturas hidráulicas, as quais serão utilizadas durante o módulo de previsão típica pelo modelo de operação hidráulica;
- j) CINDICOESINICIAIS: Contêm as variáveis de estado do modelo hidrológico as quais representam o estado físico da bacia no instante inicial da previsão. São determinadas através do uso de dados monitorados;
- k) ESTACAOMODELO: relaciona as sub-bacias modeladas com as estações existentes na exutória destas, por exemplo, a sub-bacia B0, entre Funil e Volta Redonda, é representada no banco por Volta Redonda;
- l) USINAESTACAO: relaciona os reservatórios às estações localizadas nestes, por exemplo, o reservatório de Santa Cecília está relacionado à estação Santa Cecília Entrada Bombas ;
- m) OBJETOUSINA: Contêm a relação de estruturas hidráulicas existentes nos reservatórios de Tocos, Santa Cecília e Barragem de Santana;
- n) PARAMETROMODELO: Contêm os parâmetros do modelo hidrológico para as sete sub-bacias do SIPOP;
- o) OBJETOSIMULACAO: Contêm a relação de todos as variáveis que podem ser alteradas no módulo de simulação através da interface gráfica do usuário;

- p) VALORSIMULACAO: Contêm o valor das variáveis que foram editadas pelo operador na última execução do módulo de simulação;
- q) PARAMETRO: Armazena as Figuras apresentadas na interface do SIPOP;
- r) EXECMODELOHIST: Contêm a relação das previsões já realizadas pelo SIPOP pelo módulo de previsão típica;
- s) EXECMODELO: Contêm os horários de atualização da previsão típica;
- t) EXECMODELOSEQ: Armazena a seqüência para execução do modelo de previsão hidrológica e operação hidráulica, ou seja, o encadeamento da bacia;
- u) VALIDASIMULACAO: Contêm informações quanto as operações possíveis das estruturas hidráulicas, como abertura das estruturas de descarga;
- v) USUARIO: Contêm o cadastro dos usuários do SIPOP, relacionando *logins*, senhas e tipos de cadastros;
- w) RESULTMODELO: Contêm os dados de saída do modelo de previsão hidrológica e de operação hidráulica para o módulo de previsão típica. Estes dados serão armazenados por um período de um ano para serem utilizados pelo módulo de validação;
- x) RESULTSIMULACAO: Contêm os dados de saída do sistema para o módulo de simulação. Só serão armazenados os dados referentes à última simulação de cada usuário;

As tabelas que compõem o *Schema* “PREVISÃO” podem ser visualizadas nos modelos de banco de dados apresentados nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7. Estas figuras correspondem a apenas uma estrutura de banco de dados, no entanto foram divididas de forma a facilitar a visualização. As tabelas em destaque pertencem ao banco de hidrologia.

FIGURA 4.5 MODELO LÓGICO DO BANCO DE DADOS DO SIPOP - 1

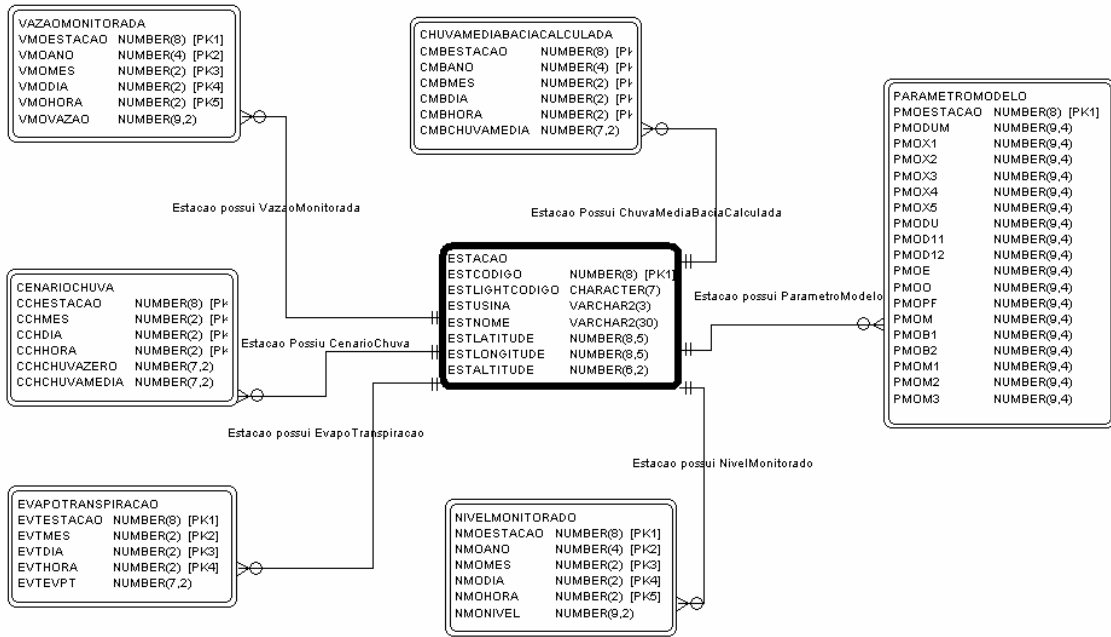


FIGURA 4.6 MODELO LÓGICO DO BANCO DE DADOS DO SIPOP - 2

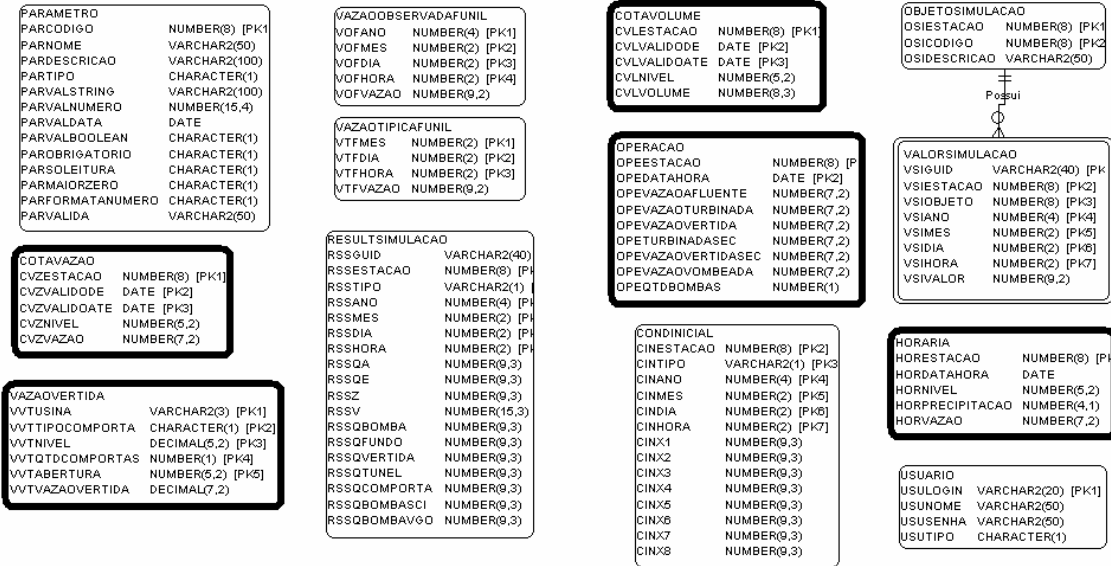
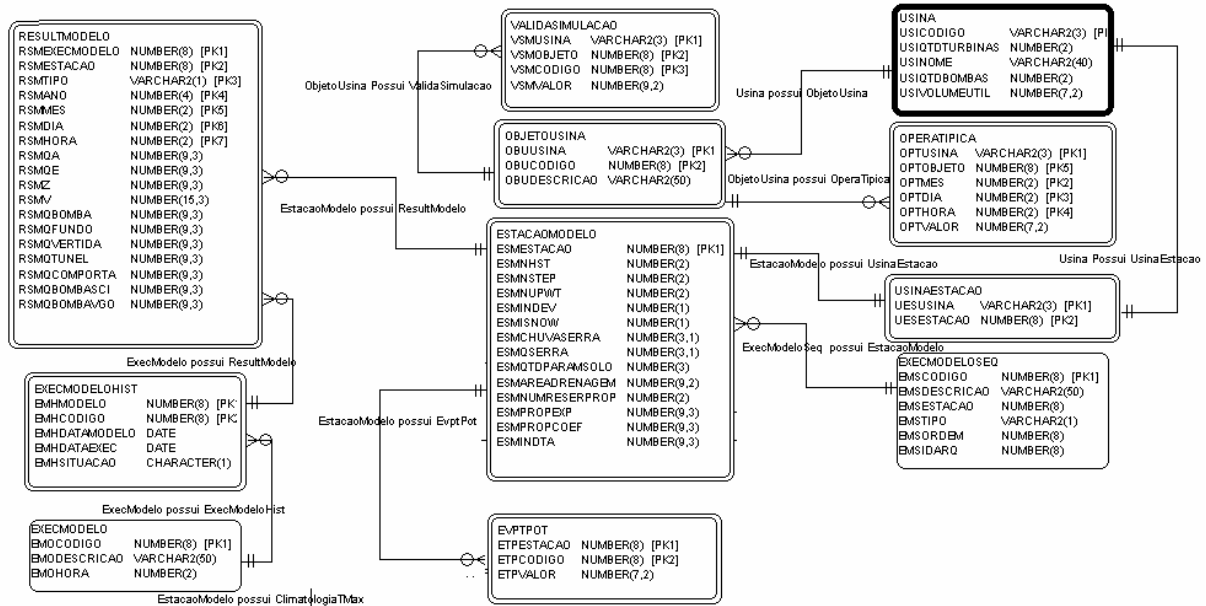


FIGURA 4.7 MODELO LÓGICO DO BANCO DE DADOS DO SIPOP - 3



4.5 COMPONENTE 2 – MÓDULOS DE PROCESSAMENTO

4.5.1 Módulo de Atualização

O módulo de atualização foi desenvolvido em DELPHI pela autora desta dissertação apoiada por uma equipe de programadores. Corresponde ao processo inicial do SIPOP, onde são consultados no servidor do centro de hidrologia dados monitorados de nível com resolução de 15 minutos e chuva com resolução horária. Esses dados são tratados de forma a fornecer os dados de entrada para o módulo de previsão típica ou para o módulo de simulação com resolução horária e sem falhas.

O início do Módulo de Atualização ocorre de forma diferente para o Módulo de Previsão Típica e para o Módulo de Simulação. No primeiro caso, o acionamento é automático e ocorre a cada 6 horas, em horários previamente definidos de acordo com os horários da Previsão Típica. No segundo caso, o início do pré-processamento ocorre de acordo com a necessidade do operador, após este ter escolhido a hora inicial da simulação.

A seguir são detalhados os procedimentos realizados para pré processar os

dados de chuva e nível para cada sub-bacia do SIPOP.

4.5.1.1 Dados de chuva

O módulo pré-processamento dos dados de chuva possui os seguintes algoritmos embutidos:

4.5.1.1.1. Consulta aos dados monitorados

Os dados de chuva estão armazenados no BDH, no centro de hidrologia. Para a atualização dos dados de chuva média são coletadas 72 horas de dados monitorados de chuva, anteriores a hora inicial da simulação, para todas as estações consideradas no cálculo da chuva média.

4.5.1.1.2. Preenchimento de falhas na série

O SIPOP não pode operar se ocorrer falha de um determinado dado para um certo instante de tempo. Se em algum ponto da série não existir um valor de chuva correspondente, este deverá ser preenchido. No caso de dados pluviométricos as falhas são preenchidas sempre com chuva igual a zero. Outra alternativa testada foi corresponde ao preenchimento da série utilizando dados de uma estação vizinha. Este procedimento não foi aplicado, pois observou-se que normalmente as estações apresentavam falhas nos mesmos horários, não existindo dados disponíveis para o preenchimento.

4.5.1.1.3. Estimativa da chuva média

A chuva média é estimada para cada sub-bacia pertencente ao SIPOP, pelo método da média aritmética, por ser de fácil aplicação em um sistema operacional que processa dados em tempo real. Recomenda-se um estudo mais elaborado para se

definir qual método de cálculo da chuva média poderia ser aplicado operacionalmente e que apresenta os melhores resultados.

A chuva média é calculada para os cinco trechos onde são realizadas as previsões hidrológicas, sendo que dois destes trechos estão subdivididos, resultando em um total de sete sub-bacias. As estações utilizadas no cálculo da chuva para cada trecho são mostradas na Figura 4.8 e Tabela 4.1.

FIGURA 4.8 SUB-BACIAS E ESTAÇÕES TELEMÉTRICAS PARA CÁLCULO DA CHUVA MÉDIA

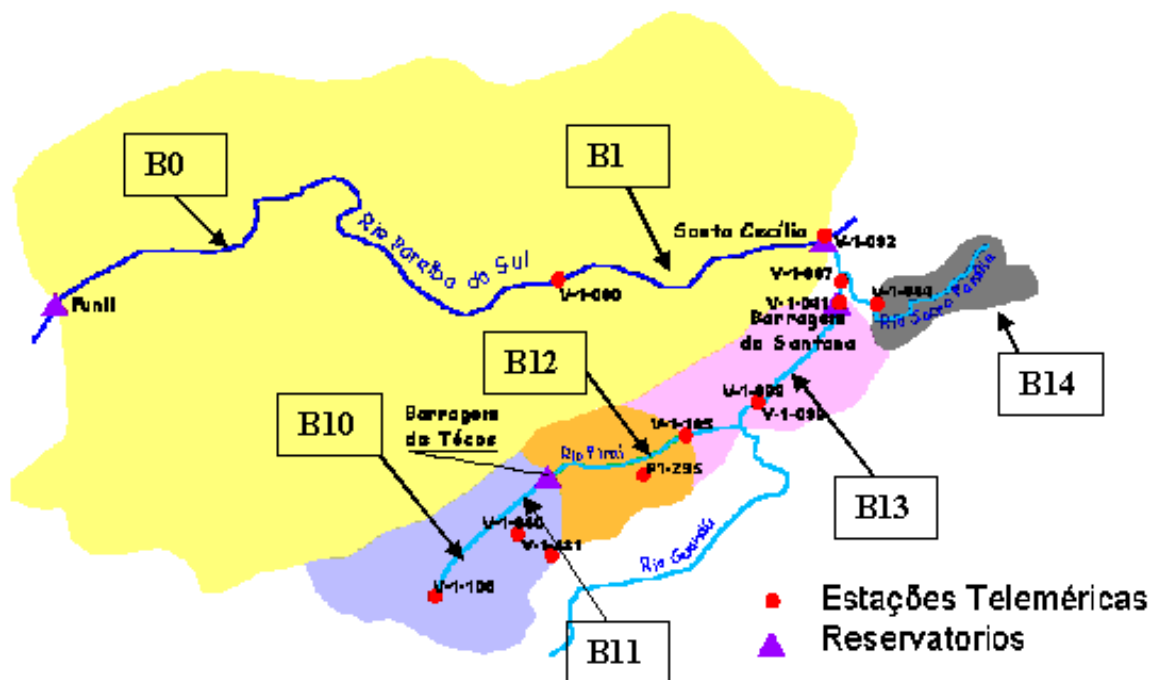


TABELA 4.1 ESTAÇÕES TELEMÉTRICAS USADAS NO CÁLCULO DA CHUVA MÉDIA POR SUB-BACIA

SUB-BACIA	TRECHO	ESTAÇÕES TELEMÉTRICAS		
		NOME	CÓD. LIGHT	CÓD. BDH
0	Funil – Volta Redonda	Volta Redonda	V1-080	22304405
1	Volta Redonda – Santa Cecília	Volta Redonda	V1-080	22304405
		Sta Cecília Tomada d'água	V1-092	22284351
10	Cabeceira – Lídice	Lídice Plu	V1-108	22504411
11	Lídice – Tocos	Lídice Plu	V1-108	22504411
		Barragem de Tocos	V1-040	22444407
12	Tocos – Nova Esperança	Barragem de Tocos	V1-040	22444407
		Passa Três	P1-295	02244099
		Faz. Nova Esperança	V1-105	22394357
13	Nova Esperança – Santana	Faz. Nova Esperança	V1-105	22394357
		Barragem de Santana	V1-041	22314349
14	Cabeceira – Morsing	Morsing	V1-044	22324346

Os valores de chuva média na bacia são armazenados no banco de dados do SIPOP, indexados pelo código da estação na exutória da bacia.

4.5.1.2 Dados de nível e vazão

O módulo de pré-processamento dos dados de nível e vazão é composto por cinco funções, que são descritas individualmente na seqüência.

4.5.1.2.1. Consulta aos dados monitorados

Para o processamento de dados de nível e vazão são utilizados três tipos de informações, sendo elas:

- a) nível monitorado – São coletados dados monitorados para o período de 72 horas anteriores a hora inicial da previsão, no caso de estações localizadas no leito dos rios, ou 73 horas para estações localizadas em reservatórios;
- b) dados operativos das estruturas hidráulicas e estações elevatórias – Da mesma forma são coletados dados monitorados para o período de 73 horas anteriores a hora inicial da previsão. Correspondem às variáveis consideradas no cômputo do balanço hídrico dos reservatórios para determinação da vazão afluente a estes;
- c) dados fixos: Correspondem as curvas de descargas das seções dos rios e das estruturas hidráulicas, curvas cota x volume dos reservatórios e curvas das bombas.

A Tabela 4.2 lista as informações consultadas.

TABELA 4.2 PRÉ-PROCESSAMENTO DE DADOS DE CHUVA E NÍVEL – DADOS COLETADOS NO BANCO DE DADOS

TIPO DE DADO	ESTAÇÃO/RESERVATÓRIO/USINA ELEVATÓRIA
Nível monitorado	Volta Redonda, Santa Cecília Entrada das Bombas, Lídice, Barragem Tocos Montante, Fazenda Nova Esperança, Barragem Santana Montante, Morsing, Várzea – Desvio p/ Túnel, Rosário Saída Túnel, Vigário Tomada d'água e Vigário Descarga d'água.
Operativos	Abertura da comporta de fundo de Tocos e Santana Abertura da comporta setor de Santana e Santa Cecília bombas de Vigário e Santa Cecília
Fixos	Curvas de descarga das estações: Volta Redonda, Lídice, Fazenda Nova Esperança, Morsing, Várzea Desvio pelo Túnel: Rosário Saída Túnel Curvas cota-volume: Santa Cecília Entrada das Bombas, Barragem Tocos e Barragem Santana Montante Curvas de descarga: comporta de fundo e do vertedor de Tocos, da comporta de fundo e da comporta setor de Santana, da comporta setor de Santa Cecília. Curvas das bomba: Santa Cecília e Vigário.

4.5.1.2.2. Preenchimento de dados na série

Para o caso dos dados de nível, os dados em falta são estimados pela interpolação dos dados de nível no instante anterior e posterior ao dado falho. A vazão, para cada intervalo de tempo, é calculada através dos dados de nível, dados operativos e dados fixos.

Os dados operativos são inseridos no banco de dados toda vez que ocorrer uma alteração na operação das estruturas hidráulicas. Desta forma, o banco armazenará somente os dados referentes às alterações na operação e a hora em que esta ocorreu. Para o intervalo entre dois registros no banco supõe-se que a operação continuou a mesma que a registrada no horário inicial. Os dados deverão ser inseridos no banco através de outro aplicativo (AMH). Como é considerado o último valor registrado, sempre haverá dados no banco de dados, não havendo a necessidade de corrigir falha. A maior preocupação, no entanto, é que estes dados sejam corretamente atualizados pelo operador. Caso estes dados não estejam sendo corretamente atualizados, o cálculo da vazão afluente aos reservatórios estará utilizando valores

irreais e, conseqüentemente, apresentará erros.

4.5.1.2.3. Transformação dos dados em valores horários

Os valores de nível com resolução de 15 minutos são transformados em dados horários, através do cálculo da média dos valores dentro de uma determinada hora, ou seja, a média dos valores correspondentes ao minuto 00, 15, 30 e 45. Este valor médio corresponde ao nível horário.

4.5.1.2.4. Conversão do nível em vazão

A determinação da vazão nos pontos de interesse do SIPOP pode ocorrer de duas formas. Na primeira, é determinada a vazão nas estações telemétricas localizadas nas seções dos rios através da curva de descarga da estação. Na segunda, é determinada a vazão afluente aos reservatórios, através do balanço hídrico dos mesmos.

Para calcular a vazão através do balanço hídrico se aplica a metodologia em função das estruturas hidráulicas existentes. Para o balanço são necessários dados monitorados de nível nos reservatórios para estimar a variação de armazenamento, e dados operativos das estruturas hidráulicas, para estimar as vazões defluentes ou desviadas através de estações elevatórias ou túneis. A vazão afluente ao reservatório é estimada como resíduo da variação de armazenamento e das vazões defluentes ou desviadas, em acordo com o procedimento:

- a) encontra a posição do nível monitorado na curva cota x volume da estação, ou seja, determina-se entre quais valores dos níveis ZP da curva encontra-se o nível ZM monitorado. Esses níveis serão denominados ZP1 E ZP2, sendo que $ZP1 < ZP2$ e $ZP1 < ZM < ZP2$;
- b) determina-se o volume correspondente aos níveis ZP1 e ZP2, sendo denominadas VP1 e VP2;

- c) através da interpolação simples determina-se o volume correspondente a ZM. Os cálculos realizados para interpolação são apresentados abaixo:

$$\Delta V = \frac{VP2 - VP1}{ZP2 - ZP1} \quad (3.1)$$

$$VM(t) = VP1 + \Delta V \times (ZM(t) - ZP1) \quad (3.2)$$

- d) através dos dados operativos e dos dados fixos das estruturas hidráulicas são calculadas as vazões defluentes e desviadas dos reservatórios.
- e) a vazão afluyente ao reservatório é calculada pela equação a seguir:

$$Qa(t) = Qe(t) + Qdesviada(t) + \left(\frac{V(t) - V(t-1)}{\Delta t} \right) \quad (3.3)$$

A discretização temporal utilizada é de uma hora, por isso o valor de Δt é de 3.600 segundos.

4.5.1.2.5. Inserção dos dados no banco de dados

Os níveis e vazões resultantes do pré-processamento dos dados hidrológicos e operativos são armazenados no banco de dados do SIPOP.

4.5.2 Módulo de Previsão Típica

O módulo de Previsão típica é composto por quatro elementos:

- rotinas de consulta ao banco de dados e montagem dos arquivos de entrada;
- modelo Hidrológico (modsac.exe);
- modelo de Operação Hidráulica – balanço hídrico de Tocos (bal_hidro01.exe), Santa Cecília (bal_hidro03.exe) e Santana (bal_hidro02.exe);

d) rotinas de inserção dos resultados no banco de dados de previsão.

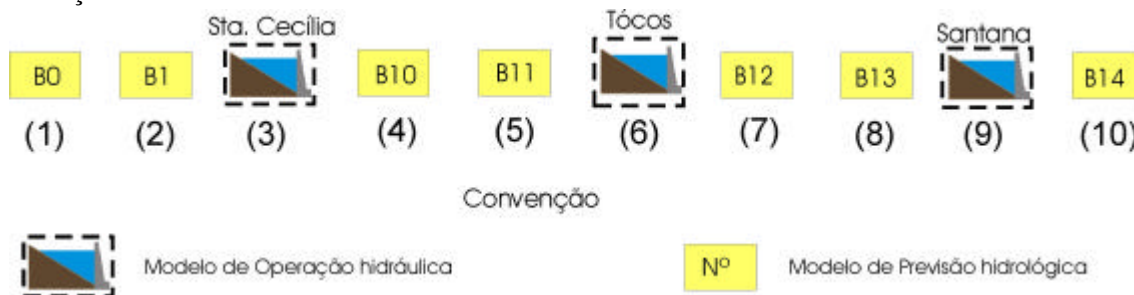
A seqüência de execução de cada procedimento respeita a ordem de encadeamento das sub-bacias e usinas existentes na área de interesse. O primeiro processo, referente à consulta ao banco de dados, é realizado a todo momento para geração dos arquivos de entrada para cada um dos processos. A seqüência de execução do modelo hidrológico para cada sub-bacia e do modelo de Operação Hidráulica é apresentada a seguir. No caso da previsão típica todos os processos são executados duas vezes: uma utilizando o cenário de chuva máxima e outra a chuva zero.

- (1) hidrológico – Funil – Volta Redonda – Sub-bacia B0;
- (2) hidrológico – Volta Redonda - Santa Cecília – Sub-bacia B1;
- (3) hidráulico – Santa Cecília;
- (4) hidrológico – Lídice – Sub-bacia B10;
- (5) hidrológico – Lídice - Tocos – Sub-bacia B11;
- (6) hidráulico – Tocos;
- (7) hidrológico – Tocos - Fazenda Nova Esperança – Sub-bacia B12;
- (8) hidrológico – Fazenda Nova Esperança - Santana – Sub-bacia B13;
- (9) hidráulico – Santana;
- (10) hidrológico – Morsing – Sub-bacia B14.

A rotina de consulta ao banco de dados e montagem dos arquivos de entrada ocorre no início de cada um dos procedimentos apresentados acima e o processo de inserção dos resultados no banco de dados de previsão ocorre no final dos mesmos.

A seqüência de execuções conforme numeração apresentada anteriormente pode ser visualizada na Figura 4.9, onde cada reservatório representa a execução de um modelo de operação hidráulica e os retângulos significam a execução do modelo de previsão hidrológica.

FIGURA 4.9 SEQUÊNCIA DE EXECUÇÃO DO MODELO DE PREVISÃO HIDROLÓGICA E DE OPERAÇÃO HIDRÁULICA DO SIPOP



4.5.3 Módulo de Simulação

Nesse módulo o operador pode editar dados de chuva prevista, que são utilizados como dado de entrada para o modelo hidrológico, e dados de operação hidráulica que servem de dados de entrada para o modelo de operação hidráulica. Com isso, o módulo de Previsão típica é composto pelas seguintes procedimentos:

- a) edição dos dados de entrada;
- b) consulta ao banco de dados e montagem dos arquivos de entrada;
- c) modelo Hidrológico – MODSAC;
- d) modelo de Operação Hidráulica – MODOPE;
- e) rotinas de inserção dos resultados no banco de dados de previsão.

Os processos de rotinas de consulta ao banco de dados, modelo hidrológico e modelo de operação hidráulica seguem os mesmos procedimentos do módulo de Previsão Típica. A seqüência de execução dos procedimentos também é a mesma apresentada anteriormente. A diferença está somente nas informações utilizadas como dados de entrada e no fato de que só o resultado da última simulação é armazenado no banco de dados.

A edição dos dados de entrada é realizada através da Interface Gráfica do Usuário. Para auxiliar o operador são apresentadas tabelas para edição dos dados com as informações utilizadas na previsão típica. O operador pode editar um ou mais dados, sendo que os dados que não forem editados continuam apresentando os mesmos valores utilizados pela previsão típica. Ao comando do operador os dados editados são

armazenados nas tabelas de simulação do banco de dados e inicia-se o processo seguinte.

Cada sub-bacia apresenta diferentes variáveis que poderão ser editadas pelo operador, sendo que a chuva média prevista poderá ser editada em todas. O SIPOP apresenta 5 sub-bacias para as quais podem ser editadas as variáveis de entrada, sendo que as variáveis para cada uma delas são apresentadas na Tabela 4.3.

4.5.4 Módulo de Validação

Os modelos hidrológicos de previsão em tempo real apresentam limitações quanto a seus resultados. A maior dificuldade está relacionada à representação da rápida subida do hidrograma durante eventos chuvosos, que muitas vezes não apresenta boa precisão numérica, e a representação correta do período de recessão. Outra dificuldade normalmente encontrada é conseguir identificar corretamente a fase do hidrograma.

Quanto maior o horizonte da previsão, mais difícil se torna de realizar a previsão, ou seja, menos precisos serão os resultados. A chuva também produz forte influência no resultado do modelo. Uma previsão de chuva condizente com a realidade produzirá resultados satisfatórios para horizontes de previsão maiores do que o tempo de concentração das bacias. O SIPOP, não dispõe de previsão quantitativa de chuva em tempo real e, por isso, foi necessário definir cenários de chuva prevista, tentando estimar a chuva mais provável para cada intervalo de tempo. Em decorrência disto, torna-se importante acompanhar a aderência entre a chuva monitorada e o cenário de chuva prevista.

O Módulo de Validação permite avaliar os resultados do modelo de previsão típica através da comparação dos dados de chuva e vazão observados e calculados. Podem ser analisados os resultados das previsões geradas nos últimos 365 dias, para as quatro atualizações do dia.

A análise poderá ser feita de duas formas, gráfica e estatística, descritas

individualmente na seqüência.

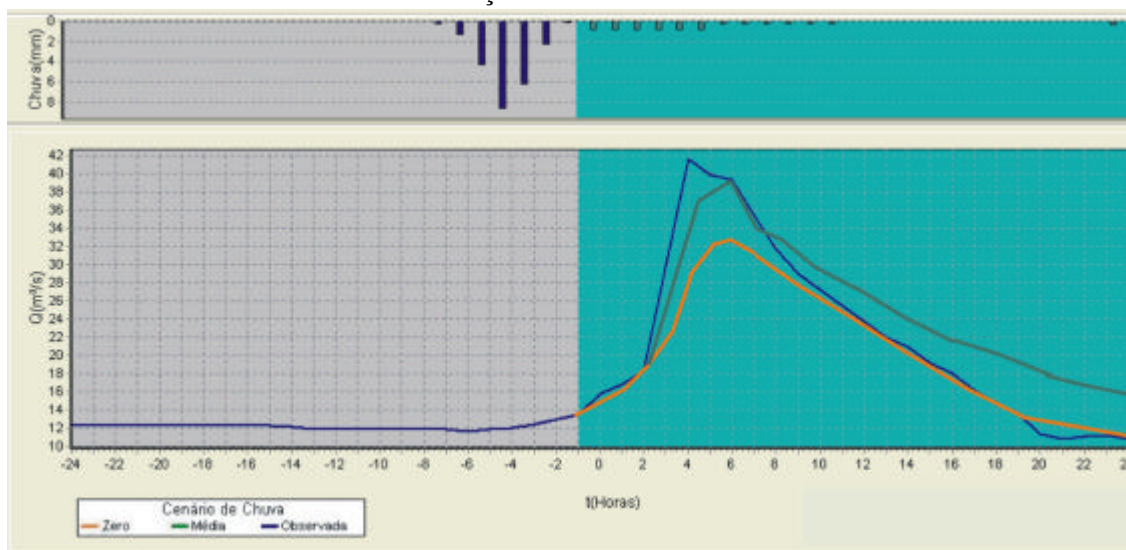
TABELA 4.3 VARIÁVEIS EDITADAS PELO OPERADOR NO MÓDULO DE SIMULAÇÃO

PONTO DE PREVISÃO	SUB-BACIA	VARIÁVEIS
Reservatório de Santa Cecília	B0+B1	1 - Chuva Média da bacia; 2 - Vazão efluente à Usina Hidrelétrica de Funil; 3 - Operação das 4 Bombas, podendo estar ligadas, desligadas ou realizando reversão; 4 - Vazão defluente de Santa Cecília.
Reservatório de Tocos	B10 + B11	1 - Chuva Média da bacia; 2 - Abertura da Descarga de Fundo.
Estação Faz. Nova Esperança	B12	1 - Chuva Média da bacia.
Reservatório de Santana	B13	1 - Chuva Média da bacia; 2 - Abertura da Comporta de Fundo; 3 - Operação das 4 Bombas, podendo estar ligadas ou desligadas; 4 - Abertura das duas comportas setor.
Morsing	B14	1 - Chuva Média da bacia.

4.5.4.1 Análise Gráfica

São produzidos gráficos comparativos dos dados observados e previstos para chuva, vazão e nível. A Figura 4.10 apresenta um exemplo de gráfico de comparação entre valores previstos e observados. No gráfico superior foram plotados os valores de chuva e no inferior os valores de vazão.

FIGURA 4.10 GRÁFICO PARA VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO



4.5.4.2 Análise Estatística

A precisão do modelo diminui com o aumento do horizonte de previsão. Sendo assim, os dados foram separados em três conjuntos de dados. O primeiro abrange as primeiras 24 horas de previsão, o segundo e o terceiro os intervalos entre a vigésima quarta e quadragésima oitava e quadragésima oitava e septuagésima segunda hora de previsão, respectivamente. Desta forma, os dados são analisados separadamente para cada um dos três dias de previsão. São calculadas duas funções estatísticas: coeficiente de Nash e a correlação.

O coeficiente de Nash mede a habilidade do modelo em simular as variações do hidrograma. É calculada também a correlação, onde são analisadas as relações entre os valores previstos e os valores observados. Estas fórmulas podem ser visualizadas no item 2, subitem 2.2.4.2.

O resultado da análise poderá ser visualizado através da interface gráfica do usuário, onde o operador deverá selecionar a data e a hora de atualização da previsão que ele pretende avaliar.

4.6 COMPONENTE 3 - INTERFACE GRÁFICA DO USUÁRIO – IGU

A Interface Gráfica SIPOP foi desenvolvida em DELPHI pela autora desta dissertação apoiada por uma equipe de programadores e apresenta cinco funções:

- a) visualização dos Resultados da Previsão Típica;
- b) edição dos dados de Entrada e visualização dos resultados do Módulo de Simulação;
- c) visualização dos Resultados do Módulo de Validação do Modelo;
- d) Edição dos dados monitorados de vazão efluente da Usina Hidrelétrica de Funil;
- e) edição dos dados de Entrada para a Previsão Típica e Parâmetros do Modelo Hidrológico.

A interface foi desenvolvida como um Sistema de Suporte a Decisões, tornando-se um instrumento de apoio às operações do Sistema LIGHT. O Apêndice 3 apresenta as principais telas da Interface Gráfica do Usuário.

5 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS HIDROLÓGICOS

5.1 INTRODUÇÃO

A calibração do modelo hidrológico para cada sub-bacia da área de estudo foi realizada com o uso das séries históricas horárias de chuva média na bacia, evapotranspiração e vazão, sendo que para as bacias de cabeceira foi necessário o dado de vazão na exutória da bacia, e para as bacias intermediárias foi necessário utilizar também os dados de vazão na entrada da bacia, ou seja, a vazão na exutória da bacia localizada a montante.

As séries utilizadas no procedimento de calibração automática apresentam resolução horária, ou seja, a mesma resolução especificada para previsão de vazão. Os dados foram coletados pelo sistema de telemetria da LIGHT. Como este foi implantado há pouco tempo (concluído em final de 2002), além do pequeno período de dados, a série apresenta inconsistências que são comuns na operação inicial de qualquer rede de monitoramento. Portanto, há a necessidade de se consistir e preencher as séries de dados antes de utilizá-la no procedimento de calibração. Devido ao pequeno período de dados horários disponível a calibração manual foi realizada com o uso de uma série de dados hidrológicos diários consultados no HIDROWEB (Sistema de Informações Hidrológicas da SIH, 2003)

A definição das bacias para calibração foi realizada de acordo com a disponibilidade de dados hidrológicos para cada sub-bacia. Como ainda não se encontram disponíveis dados hidrológicos para todas as sub-bacias, em uma primeira aproximação para as bacias sem dados para calibração do modelo foram utilizados os parâmetros da sub-bacia que apresenta características físicas semelhantes. As sub-bacias que dispõem de dados para calibração são:

- a) cabeceira 1: rio Piraí até a estação de Barragem de Tocos;
- b) cabeceira 2: rio Sacra Família até a estação de Morsing;

- c) intermediária 1: entre o reservatório de Tocos e a estação telemétrica de Fazenda Nova Esperança.

Neste item são descritas as metodologias para consistência e preenchimento das séries, assim como as séries finais obtidas para cada estação analisada.

5.2 DADOS PLUVIOMÉTRICOS

5.2.1 Estações analisadas

Para o cálculo da chuva média foram utilizados dados de cinco estações telemétricas localizadas na área de estudo, as quais são listadas na Tabela 5.1. Foi aplicado o método da média aritmética, conforme será descrito no item 2.2.4. O período de dados disponível é de aproximadamente 13 meses, entre 11/2002 e 12/2003.

TABELA 5.1 ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS COM DADOS HORÁRIOS

CÓDIGO LIGHT	NOME	CÓDIGO ANEEL	ALT.	LAT	LONG.	BACIA
P1-277	Barragem de Tocos	02244103	479m	22° 45' 15"	44° 07' 11"	Piraí
P-1-299	Lídice	02244099	554m	22° 49' 59"	44° 11' 39"	Piraí
P-1-343	Volta Redonda	02244101	390m	22° 30' 46"	44° 05' 39"	Par. do Sul
V1-105	Faz. N. Esperança	02244440				Piraí
P-3-485	Morsing	02232434		22° 32' 00"	43° 46' 00"	S. Família

5.2.2 Metodologia para consistência e preenchimento das séries

O sucesso na estimativa dos parâmetros do modelo hidrológico depende da qualidade dos dados disponíveis para calibração. As observações hidrometeorológicas podem apresentar erros que tornam difícil, ou até impossível, a adequada calibração destes parâmetros. Por isso, as séries hidrológicas devem passar por procedimentos de consistência antes de serem utilizadas na calibração. Além disso, como o modelo

hidrológico é contínuo no tempo, a calibração exige séries ininterruptas, havendo a necessidade de se preencher os períodos com falhas. Caso os períodos de falhas sejam muito longos devem ser descartados.

Sendo assim, a análise de consistência e preenchimento dos dados pluviométricos visa identificar falhas grosseiras nas séries e preencher períodos curtos de falhas. Durante esta análise será verificada a qualidade da série disponível para cada estação. A Figura 5.1 apresenta o fluxograma das atividades realizadas para consistir os dados de chuva de cada estação. Estas atividades foram divididas em quatro etapas principais, sendo que a primeira foi programada em Fortran e realizada automaticamente e as três últimas foram realizadas utilizando planilha eletrônica *EXCEL*.

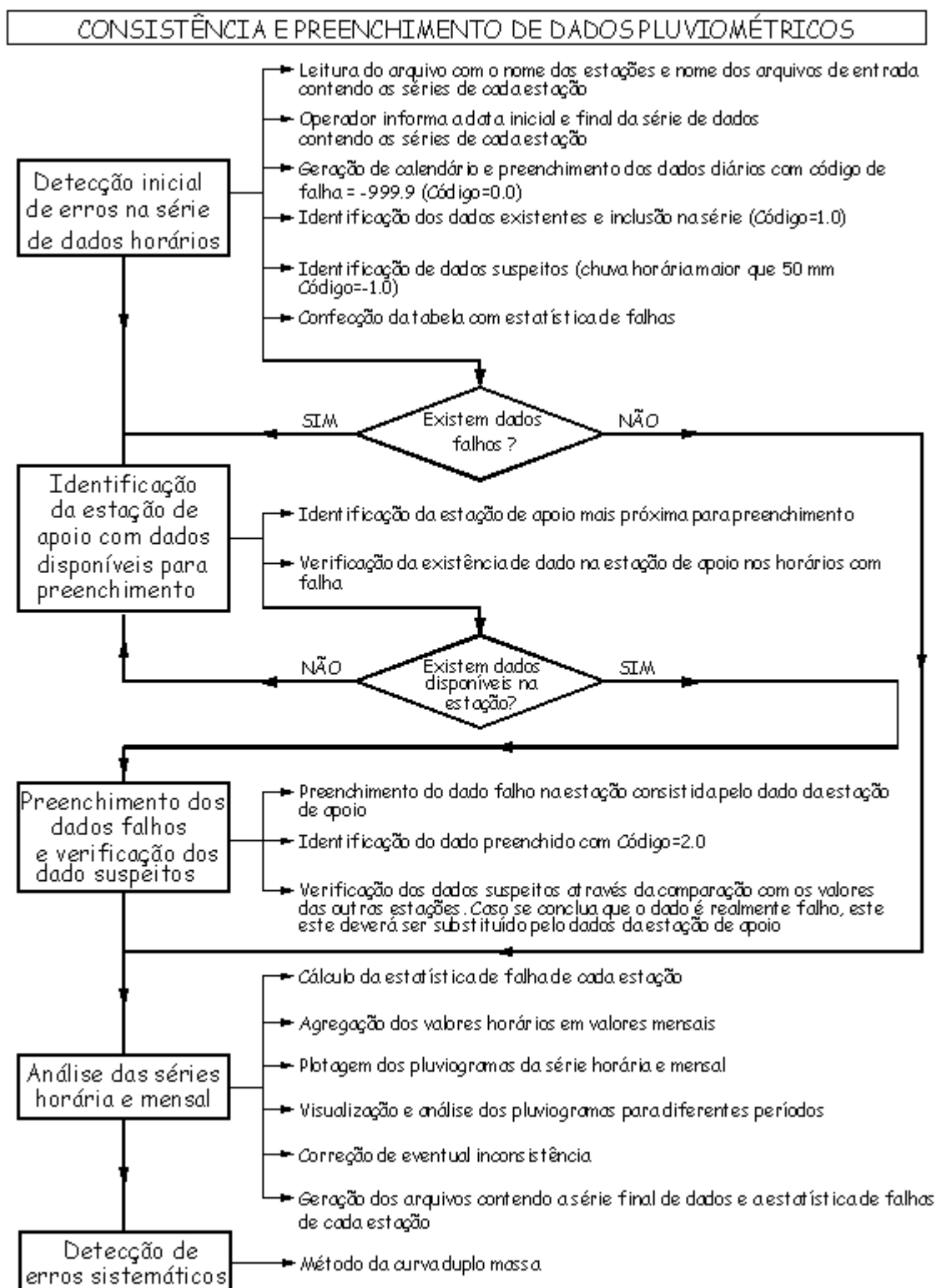
- a) detecção inicial de erros na série de dados horários: O procedimento inicia com a execução do programa Fortran denominado “Chuva.exe”. O programa identificará períodos com indisponibilidade de dados na série e períodos com dados suspeitos, ou seja, que apresentem chuva horária maior que 25 mm. Este valor foi considerado por representar um valor alto para chuva horária, tornando adequada à verificação da série;
- b) identificação da estação de apoio com dados disponíveis para preenchimento: Para as estações que apresentaram falhas ou indisponibilidade na série de dados foram escolhidas estações de apoio, cujos dados foram utilizados no preenchimento. Estas foram selecionadas de forma a respeitar os seguintes critérios: proximidade das estações, características climatológicas semelhantes e existência de dados válidos para os horários com dados indisponíveis na série da estação analisada;

- c) preenchimento dos dados falhos e verificação dos dados suspeitos: O dado indisponível da estação foi substituído pelo dado válido da estação de apoio. O preenchimento da série em escala horária é desaconselhável devido à grande variabilidade espacial e temporal da precipitação. No entanto, devido à necessidade de se obter séries contínuas, optou-se pela aplicação desta metodologia. Além disso, os resultados em termos de volume total de água precipitada no mês e no ano não foram afetados significativamente. Outra opção seria utilizar modelos ARMA(1,1) e ARMA(2,2), os quais são eficientes na estimativa de chuva para pequenos períodos da série, no entanto devido ao pequeno número de falhas optou-se por não utilizar esta metodologia. Procedeu-se com a verificação da validade dos dados suspeitos através da comparação do dado suspeito com dados de outras estações no mesmo intervalo de tempo e dados da mesma estação para os intervalos de tempo anteriores e posteriores. Quando se verificava que realmente haviam ocorrido eventos de chuva intensa para outras estações e nos intervalos de tempo anteriores e posteriores, o dado suspeito foi considerado válido. Caso contrário este foi substituído pelo dado da estação de apoio;
- d) análise das séries de chuva horária e mensal: Primeiramente foram analisadas as estatísticas de falhas de cada estação, fornecendo uma avaliação inicial da qualidade da série. Os valores horários foram agrupados em valores mensais, para que fosse possível analisar a consistência dos dados agregados. Foram plotados os pluviogramas horários e hietogramas mensais, os quais foram analisados visualmente. Caso fossem identificados períodos com inconsistência nas séries, estes seriam preenchidos com dados da estação de apoio. Se este período inconsistente fosse muito longo, a estação seria descartada do estudo. Como resultado final são gerados os arquivos de saída contendo a série de

dados consistidos e as estatísticas de falha de cada estação;

- e) verificação de erros sistemáticos: Após o preenchimento das falhas foi realizada a análise da consistência dos dados de cada estação em relação aos dados observados em estações vizinhas. Foi utilizado o método clássico das curvas duplo massa acumulativas descritos em TUCCI (1993). Este método consiste na construção de uma curva duplo acumulativa, na qual são comparados os valores acumulados de precipitação da estação em estudo, com os valores acumulados das estações localizadas numa mesma região e que estejam sob condições meteorológicas similares. A detecção de mudanças de declividade nesta curva representa anomalias nas medidas realizadas. Estas devem ser corrigidas utilizando-se como referência a inclinação da reta do período mais confiável.

FIGURA 5.1 FLUXOGRAMA DA ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS



5.2.3 Resultado da análise das séries pluviométricas

A tabela 5.2 apresenta as estatísticas de falha para as cinco estações pluviométricas analisadas neste estudo. Entende-se por dados falhos àqueles indisponíveis na série. A estação de Lídice apresentou o maior número de dados falhos, representando 23,1% da série. Estes dados foram preenchidos por dados da estação de Barragem de Tocos, a qual apresenta baixa porcentagem de falhas. O maior período com falhas consecutivas também foi encontrado para esta estação e ocorreu de 10/03/2004 às 24 horas a 04/06/2003 às 14 horas. As outras estações apresentaram um período máximo consecutivo com falhas de 24 horas. A estação de Lídice apresentou também um dado suspeito de 41,7 mm/hora no mês de janeiro, o qual foi considerado falho por apresentar-se isolado na série. Este também foi substituído pelo dado da estação de apoio. As outras estações apresentaram séries de dados com poucas falhas.

No gráfico da figura 5.2 foram plotados as precipitações acumuladas mensais para as cinco estações analisadas. Verifica-se que estes valores são consistentes, uma vez que nenhuma estação apresentou valores mensais muito diferentes em relação às outras analisadas.

A verificação de erros sistemáticos foi realizada através do método das curvas duplo massa acumulativas. O resultado desta análise pode ser verificado na figura 5.3. Nenhuma estação apresentou mudanças bruscas na declividade da curva e por isso não houve necessidade de correção das séries.

Na tabela 5.3 são apresentados o número de horas com chuva, número de horas com chuva maior que 5 mm e maior que 10 mm. A estação de Lídice apresentou uma maior porcentagem de horas com chuva, no entanto estas são de menor intensidade em relação aos postos vizinhos, uma vez que o número de horas com chuva maior que 5 mm é menor. Este fato confirma o efeito orográfico sobre a chuva na região, o qual ocasiona chuvas de pequena intensidade e grande duração. A estação de Volta Redonda também apresenta um maior número de dias com chuva em relação às outras estações, no entanto as chuvas de maior intensidade ocorrem relativamente

com a mesma frequência.

FIGURA 5.2 HIETOGRAMA MENSAL

Precipitação acumulada mensal

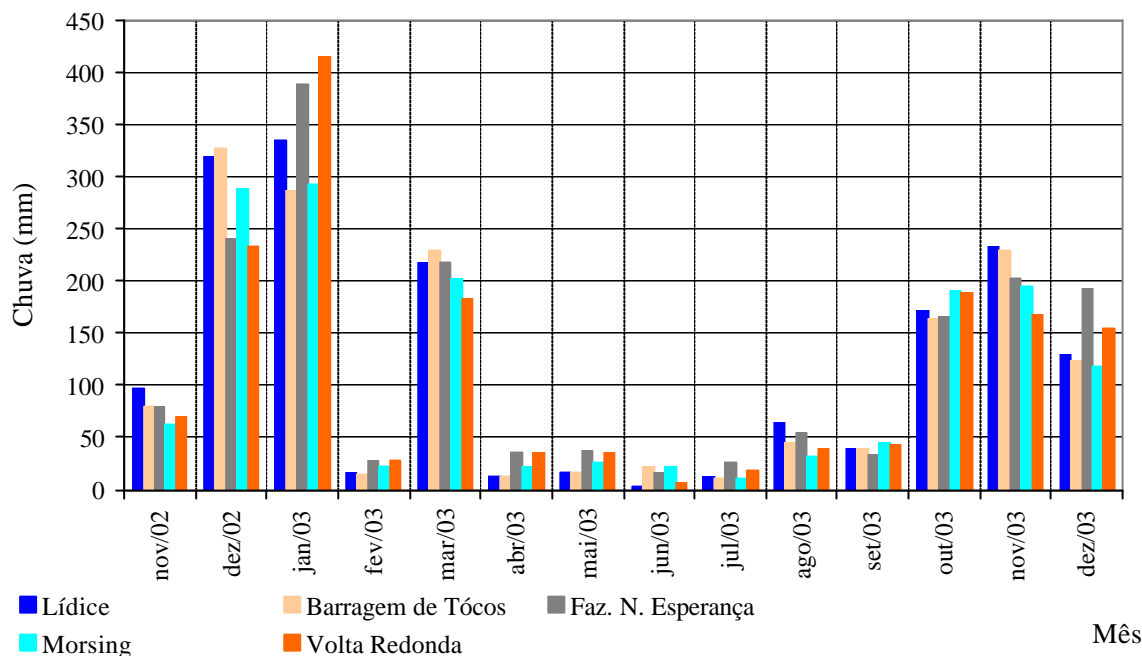


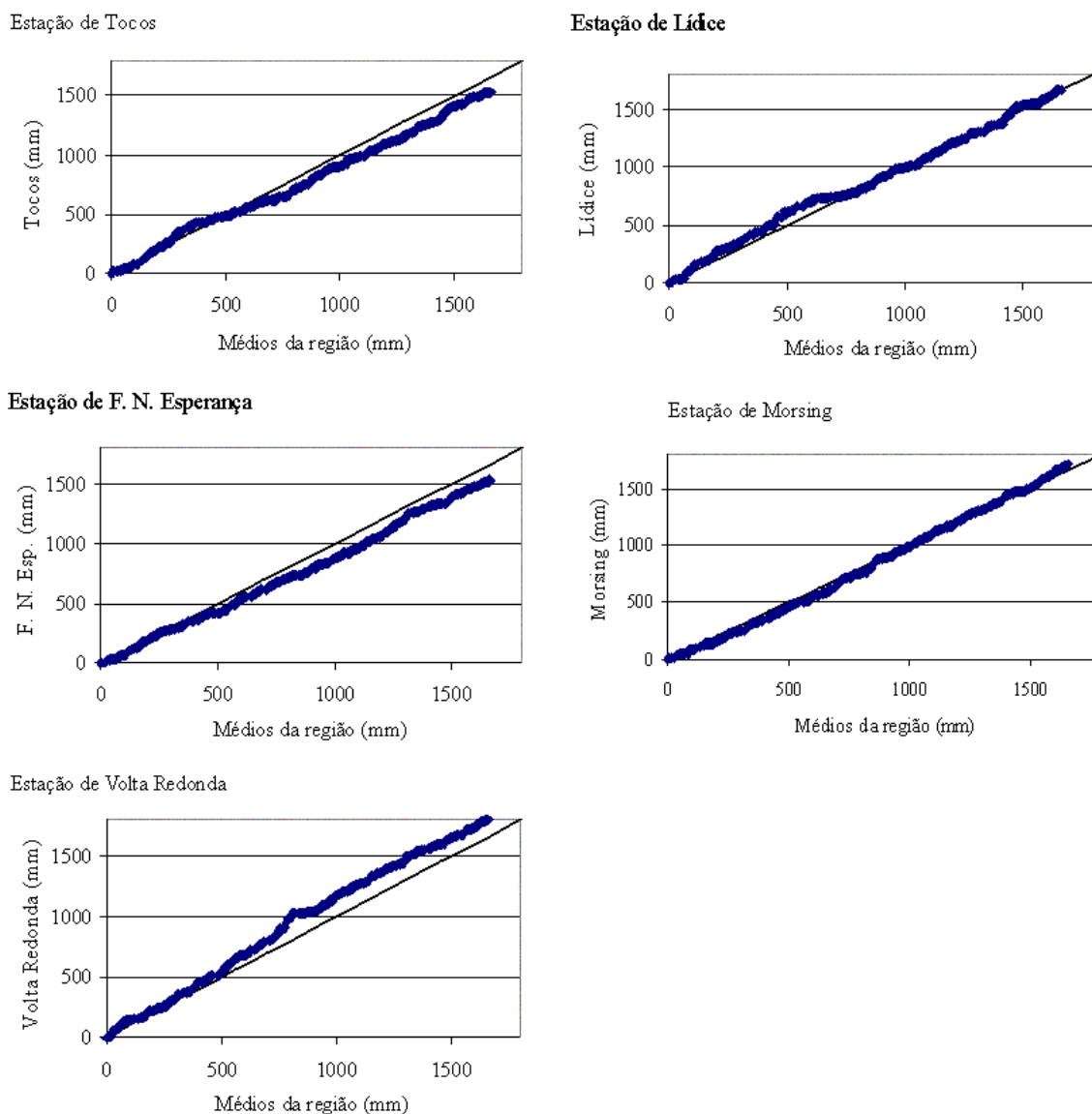
TABELA 5.2 ESTATÍSTICA DE FALHAS DAS SÉRIES PLUVIOMÉTRICAS PARA O PERÍODO DE NOV./2002 A DEZ./2003

DADO/ESTAÇÃO	LÍDICE	BAR.DE TOCOS	F.N.ESPE-RANÇA	MORSING	VOLTA REDONDA
Nº de valores	9912	9912	9912	9912	9912
Nº de valores corretos	7623	9834	9882	9887	9893
Nº de falhas	2289	78	30	25	19
Nº de dados suspeitos	8	7	3	4	10
Nº de dados suspeitos corrigidos	1	0	0	0	0
Nº de dados corrigidos	2290	78	30	25	19
% de dados corrigidos	23,10	0,79	0,30	0,25	0,19

TABELA 5.3 ESTATÍSTICA DAS SÉRIES PLUVIOMÉTRICAS PARA O PERÍODO DE NOV./2002 A DEZ./2003

DADO/ESTAÇÃO	LÍDICE	BAR.DE TOCOS	F.N.ESPE-RANÇA	MORSING	VOLTA REDONDA
Nº de horas com chuva	1197	792	910	873	1079
% de horas com chuva	12,08	7,99	9,18	8,81	10,89
Nº de horas com chuva >5,0mm	77	86	85	84	82
Nº de horas com chuva >10,0mm	34	37	33	38	41
Chuva acumulada (11/02 a 12/03)	1668	1601	1724	1531	1615

FIGURA 5.3 CURVAS DUPLO MASSA ACUMULATIVAS



5.2.4 Cálculo da chuva média

O método escolhido para cálculo da chuva média foi o da média aritmética, por ser o mesmo que será utilizado durante o processo de previsão. As estações que foram utilizadas para estimar a chuva média de cada sub-bacia estão listadas na Tabela 5.4.

TABELA 5.4 ESTAÇÕES UTILIZADAS NO CÁLCULO DA CHUVA MÉDIA DAS SUB-BACIAS

SUB-BACIA	ESTAÇÕES
Cab. 1	Lídice Barragem de Tocos
Cab. 2	Morsing
Intermediária 1	Tocos Fazenda Nova Esperança

5.3 DADOS FLUVIOMÉTRICOS

5.3.1 Estações analisadas

Para determinar as vazões em cada ponto de interesse do SIPOP foram utilizados dados de nível, coletados pelas estações telemétricas, com resolução de 15 minutos, para o período de 14/11/2002 até 31/12/2003. O período de dados efetivamente utilizado para calibração foi definido de acordo com a qualidade de cada série.

A execução da calibração e/ou validação do modelo chuva–vazão requer dados horários de vazão a montante da sub-bacia e na exutória da sub-bacia considerada. Quando não existem obras hidráulicas no trecho, são coletados dados de nível e a vazão é calculada através da curva de descarga da estação, caso contrário é necessário determinar a vazão afluente ao reservatório através do balanço hídrico deste.

A Tabela 5.5 lista os postos fluviométricos que foram utilizados no cálculo da vazão.

TABELA 5.5 ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS

ESTAÇÕES	VÁRZEA	ROSÁRIO	TOCOS	MORSING	F. NOVA ESPERANÇA
Código LIGHT	V3-481	V3-482	V1-040	V1-044	V1-105
Código ANEEL	58347000	58347000	58345000	58339001	-
Código BDH	22464405	22474403	22444407	22324346	22394357
Altitude			440	389	370,00
Latitude: -	-22,7714	-22,7911	-22,7489	-22,5389	-22,6625
Longitude:	-44,0906	-44,0503	-44,1247	-43,7775	-43,9567
Área de drenagem (km ²)	50	-	382	270	604,00
Área de drenagem incremental (km ²)	-	-	-	-	218,00
Rio:	Várzea	Túnel de Tocos	Piraí	Sacra Família	Piraí
Cota min(m)	490,8	422,6	440,0	384,02	363,00
Cota max(m)	492,96	423,75	451,49	386,02	372,55
Vazão/vol min. (m ³ /s - hm ³)	0,0	0,0	0,0	0,5	0,00
Vaz/vol* min. (m ³ /s - hm ³)	10,1	30,16	4,716 *	16,0	939,0

5.3.2 Metodologia de consistência e preenchimento das séries

Analogamente aos dados pluviométricos, os dados fluviométricos passaram por procedimentos de consistência e preenchimento antes de serem utilizados na calibração. A Figura 5.4 apresenta o fluxograma das atividades realizadas para consistir os dados de nível e vazão de cada estação telemétrica. Estas atividades foram divididas em 4 etapas principais, sendo que as três primeiras foram programadas em Fortran e realizadas automaticamente. Como a etapa (4) depende da visualização dos gráficos de vazão e precipitação simultaneamente, para realizá-la foi desenvolvido um aplicativo em DELPHI que tornasse o procedimento mais automático. A seguir será apresentada a descrição de cada uma das etapas:

- a) análise da série de dados de nível com resolução de 15 minutos: O procedimento inicia com a execução do programa Fortran denominado “Consist_nivel.exe”. O programa identificará períodos com indisponibilidade de dados na série. São computadas as estatísticas de falhas, as quais fornecem um parecer da qualidade da série analisada;

- b) cálculo da vazão ou do volume: A vazão foi calculada para as estações localizadas no leito do rio ou em canais e o volume para estações localizadas em reservatórios. Para os intervalos de tempo que continham códigos de falha, não foi realizado o cálculo e este foi mantido para que pudesse ser preenchido posteriormente;
- c) cálculo dos dados horários: Nesta etapa são calculados os valores de nível e vazão/volumes médios horários. Primeiramente foram identificados na série os números de valores válidos (diferente do código de falha) para cada hora. Caso não houvesse nenhum valor válido, preenchia-se a hora da série com código de falhas. Caso existisse somente um valor válido, este valor era atribuído à hora. Caso existissem mais de um valor válido, calcularam-se os valores de nível e vazão médios. Foram computadas as estatísticas de falhas da série horária de dados;
- d) preenchimento das falhas da série de vazão/volume: Procedeu-se com o preenchimento das séries de vazão/volume, as quais serão utilizadas no procedimento de calibração. Os dados de saída da etapa anterior, juntamente com a chuva média de cada sub-bacia, foram fornecidos ao aplicativo “Utilidades.exe”, desenvolvido em DELPHI. Este plotava na mesma tela os hidrogramas e hietogramas de cada sub-bacia, permitindo a identificação de inconsistência nas séries. O preenchimento das falhas foi realizado por interpolação simples, interpolação média ou por simples edição do valor do dado. Após preenchimento de todas as falhas da série gerou-se o arquivo de saída contendo as séries ininterruptas de dados horários de vazão/volume. A figura 5.5 ilustra a tela principal do aplicativo, onde são visualizados o código da estação que está sendo analisada, o hietograma (gráfico superior), hidrograma e a tela auxiliar para alteração (interpolação ou edição) dos valores de vazão/volume (canto direito).

FIGURA 5.4 FLUXOGRAMA DA ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA DOS DADOS FLUVIOMÉTRICOS

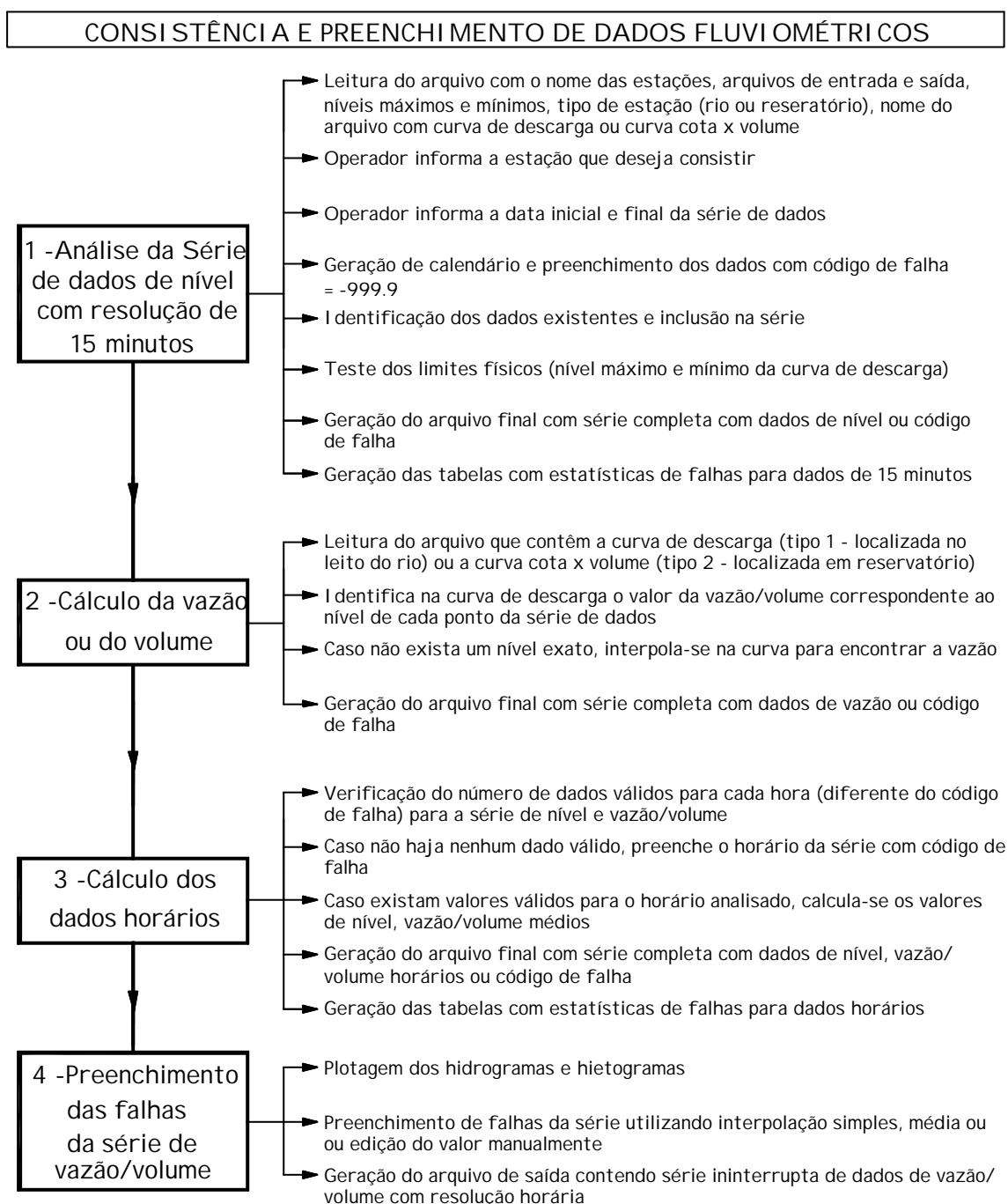
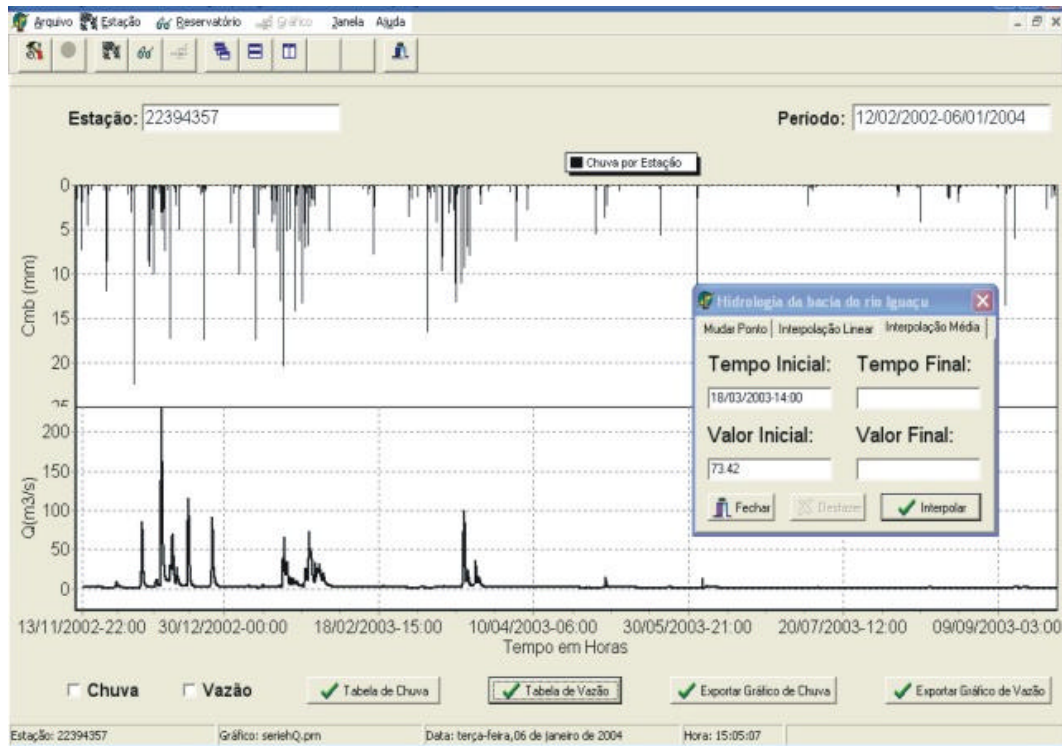


FIGURA 5.5 TELA PRINCIPAL DO APLICATIVO UTILIDADES.EXE



5.3.3 Sub-bacia de cabeceira 1

A sub-bacia Cabeceira-1, entre a cabeceira do rio Pirai e o reservatório de Tocos, tem área de drenagem de 382 km². O cálculo da vazão em Tocos é realizado através do balanço hídrico do reservatório de Tocos, representado pela seguinte equação:

$$Q_{A_TOS(t)} = Q_{VERT(t)} + Q_{FUNDO(t)} + Q_{TUNEL(t)} + \frac{\Delta V_{TOS(t)}}{\Delta t} \quad (5.1)$$

onde:

$Q_{A_TOS(t)}$ = Vazão afluyente ao reservatório de Tocos no tempo t (m³/s);

$Q_{VERT(t)}$ = Vazão vertida pelo vertedouro livre no tempo t (m³/s);

$Q_{FUNDO(t)}$ = Vazão vertida pelos descarregados de fundo no tempo t (m³/s);

$Q_{TUNEL(t)}$ = Vazão vertida pelo túnel de Tocos no tempo t (m³/s);

$\Delta V_{TOS(t)}$ = Variação do volume do reservatório de Tocos no intervalo de tempo t e $t-1$ (m^3);

Δt = Intervalo de tempo (segundos).

Desta forma, para determinar a vazão afluyente ao reservatório de Tocos foi necessário preencher as falhas nas séries de nível/volume da estação de Tocos e de vazão nas estações de Várzea e Rosário, assim como determinar a vazão vertida pelo vertedouro livre através da série de nível do reservatório e da curva de descarga do vertedouro. A vazão vertida pela descarga de fundo é sempre igual a zero, pois a comporta não foi aberta durante este período.

Neste item são apresentadas as principais características de cada estação, os resultados da análise de consistência dos dados de vazão/volume e as séries finais obtidas para cada uma das variáveis necessárias ao cálculo do balanço hídrico.

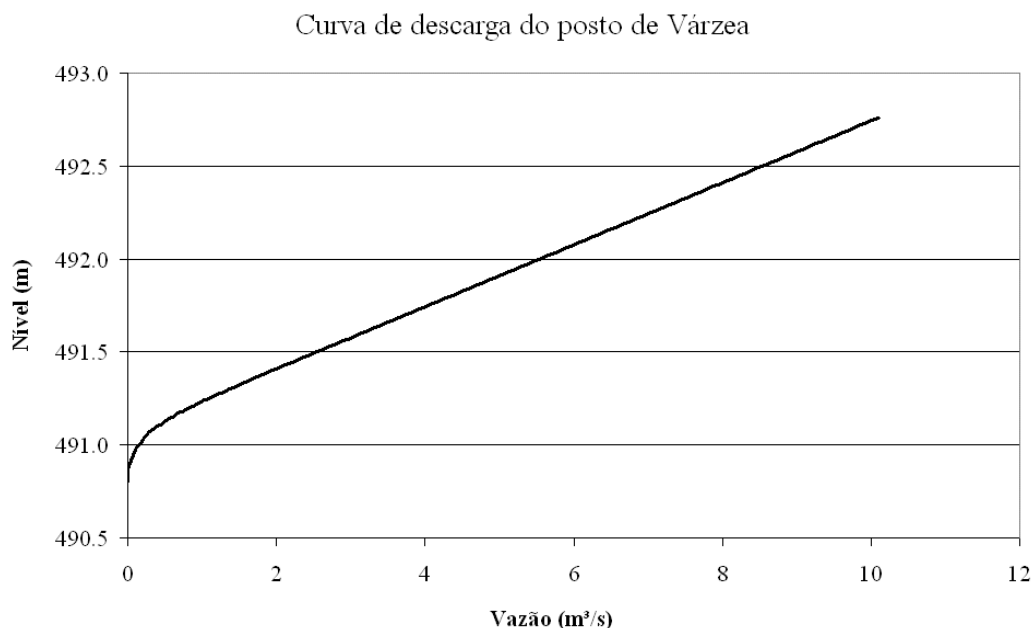
Os dados referentes às características das estações foram coletados no banco de dados hidrologia, ou seja, foram fornecidos pela LIGHT.

5.3.3.1 Vazão vertida pelo túnel de Tocos

A vazão vertida pelo túnel de Tocos é calculada através dos dados da estação de Várzea e de Rosário. A primeira monitora a vazão desviada do rio da Várzea (afluyente do Piraí) para o reservatório de Lajes, através do Túnel de Tocos e, a segunda, monitora a vazão na saída do túnel, correspondente à soma da vazão desviada do reservatório de Tocos e do rio da Várzea. Desta forma, é necessário consistir os dados das duas estações, a fim de se obter a contribuição do reservatório.

A curva de descarga de Várzea foi obtida no banco de dados hidrologia e está ilustrada na Figura 5.6.

FIGURA 5.6 CURVA DE DESCARGA DA ESTAÇÃO DE VÁRZEA



A tabela 5.6 apresenta a estatística de falhas da série de vazão e a figura 5.7 a série de vazão horária final obtida após a consistência e preenchimento. Os pontos indicados em vermelho no gráfico correspondem a dados indisponíveis na série que foram preenchidos. Pode-se verificar que os dados indisponíveis da série se concentram no início do período, entre a data de 14/11/2002 a 12/12/2002, resultando em um longo período de falha. Para que não fosse preciso descartar todo este período de dados, este foi preenchido por interpolação linear simples. Como a vazão de contribuição do rio da Várzea é relativamente baixa, supõe-se que este procedimento não acarretará em grandes erros no cálculo do balanço hídrico. A validade desta afirmação será analisada durante o cálculo do balanço hídrico do reservatório de Tocos.

A curva de descarga de Rosário foi obtida no banco de dados hidrologia e está ilustrada na Figura 5.8. A figura 5.9 apresenta a série de vazão horária final para a estação de Rosário. Verifica-se que há uma grande quantidade de falhas no período de abril a julho de 2003. No entanto, para todo o período existem dados disponíveis isolados que permitem estimar a forma do hidrograma. Para confirmar este fato, encontra-se plotada no gráfico da figura 5.9 a série de dados sem correção,

representada pelos pontos em amarelos. Desta forma, a qualidade da série de dados não foi comprometida, uma vez que o preenchimento da série foi realizado para intervalos de tempo pequenos.

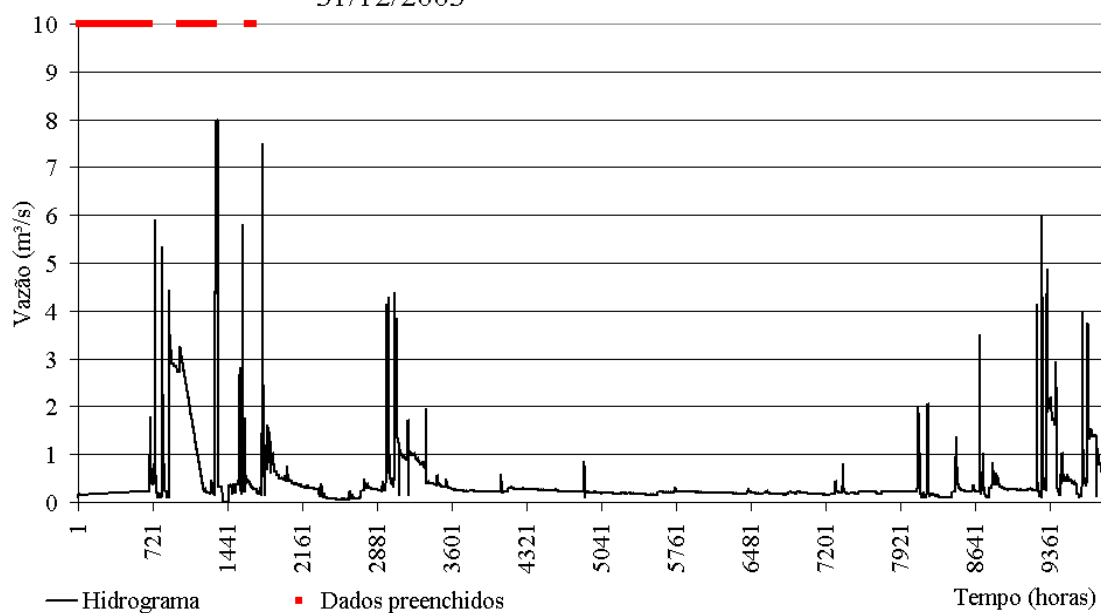
A vazão retirada do reservatório de Tocos pelo túnel foi determinada através do cálculo da diferença da vazão na estação de Rosário e de Várzea. A serie final obtida pode ser visualizada no gráfico da figura 5.10.

TABELA 5.6 ESTATÍSTICA DE FALHAS DA SÉRIE DE VAZÃO DA ESTAÇÃO DE VÁRZEA

ESTATÍSTICA DE FALHAS - DADOS DE 15 MINUTOS	
Nº Total de dados	39656
Nº de dados indisponíveis na série	4195
Nº de dados abaixo do limite inferior	242
Nº de dados acima do limite superior	0
% de falhas	11,19
ESTATÍSTICA DE FALHAS - DADOS HORÁRIOS	
Nº Total de dados	9914
Nº de dados indisponíveis na série (nenhuma leitura na hora)	976
Nº de dados abaixo do limite inferior	60
Nº de dados acima do limite superior	0
% de falhas	10,45

FIGURA 5.7 HIDROGRAMA DA ESTAÇÃO DE VÁRZEA

Hidrograma da estação de Várzea - Período de 14/11/2002 a 31/12/2003



A curva de descarga de Rosário foi obtida no banco de dados hidrologia e está

ilustrada na Figura 5.8. A figura 5.9 apresenta a série de vazão horária final para a estação de Rosário. Verifica-se que há uma grande quantidade de falhas no período de abril a julho de 2003. No entanto, para todo o período existem dados disponíveis isolados que permitem estimar a forma do hidrograma. Para confirmar este fato, encontra-se plotada no gráfico da figura 5.9 a série de dados sem correção, representada pelos pontos em amarelos. Desta forma, a qualidade da série de dados não foi comprometida, uma vez que o preenchimento da série foi realizado para intervalos de tempo pequenos.

A vazão retirada do reservatório de Tocos pelo túnel foi determinada através do cálculo da diferença da vazão na estação de Rosário e de Várzea. A serie final obtida pode ser visualizada no gráfico da figura 5.10.

FIGURA 5.8 CURVA DE DESCARGA DA ESTAÇÃO DE ROSÁRIO

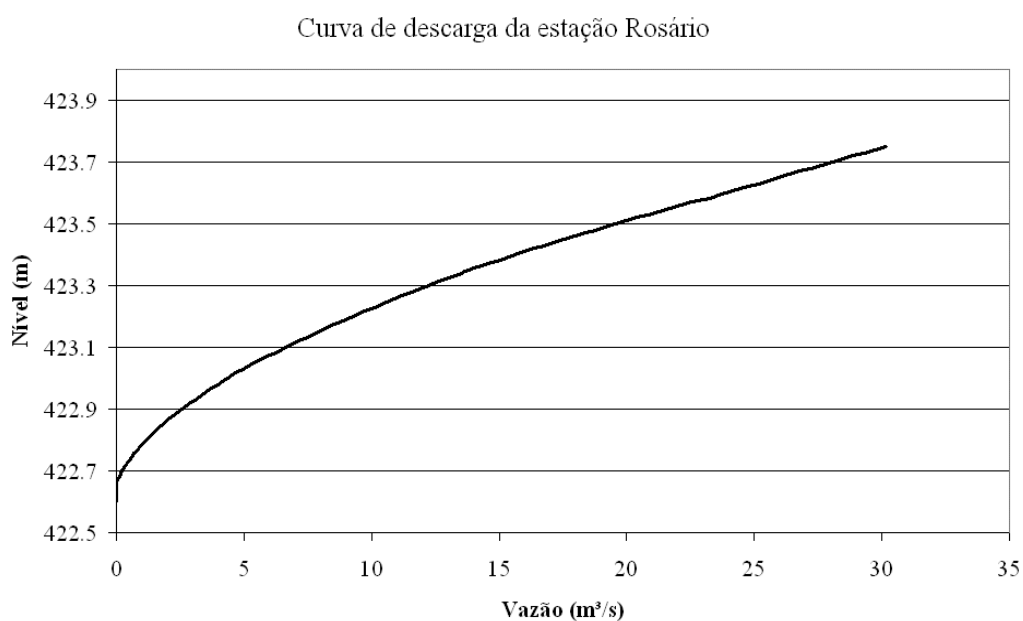


FIGURA 5.9 HIDROGRAMA DA ESTAÇÃO DE ROSÁRIO

Hidrograma da estação de Rosário - Período de 14/11/2002 a

31/12/2003

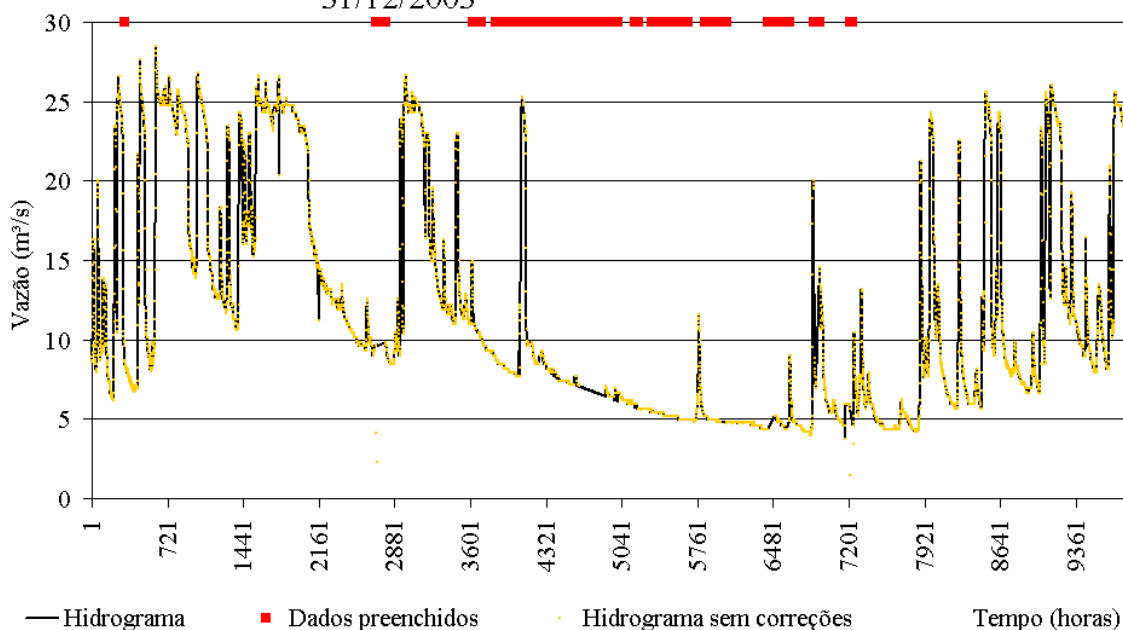
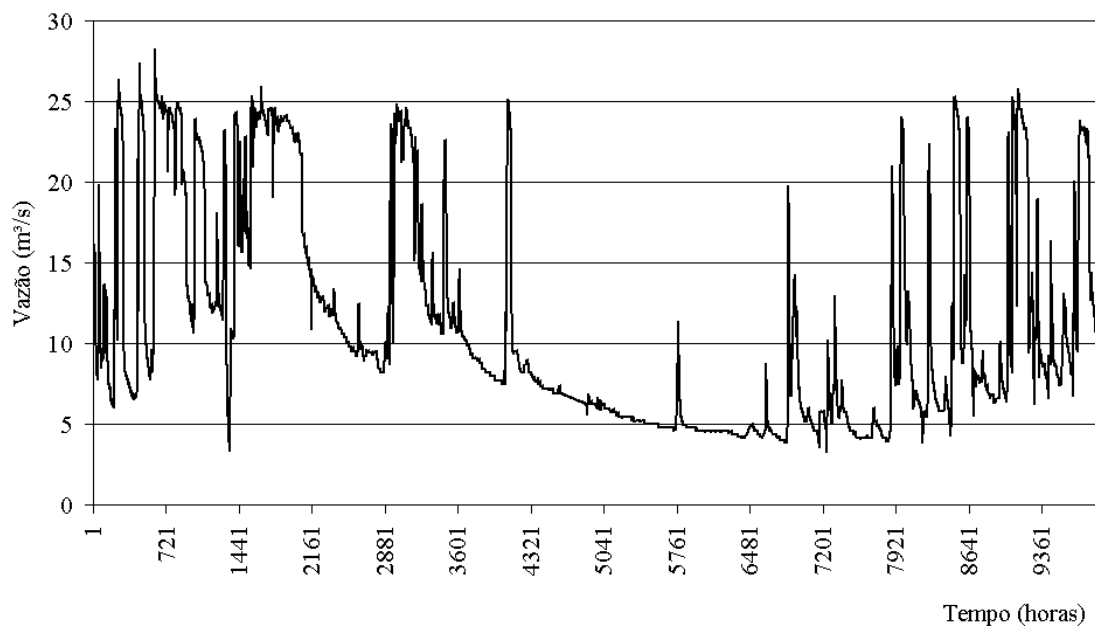


TABELA 5.7 ESTATÍSTICA DE FALHAS DA SÉRIE DE VAZÃO DA ESTAÇÃO DE ROSÁRIO

ESTATÍSTICA DE FALHAS - DADOS DE 15 MINUTOS	
Nº Total de dados	39656
Nº de dados indisponíveis na série	4114
Nº de dados abaixo do limite inferior	500
Nº de dados acima do limite superior	0
% de falhas	11,64
ESTATÍSTICA DE FALHAS - DADOS HORÁRIOS	
Nº Total de dados	9914
Nº de dados indisponíveis na série (nenhuma leitura na hora)	848
Nº de dados abaixo do limite inferior	122
Nº de dados acima do limite superior	0
% de falhas	9,78

FIGURA 5.10 SÉRIE DE VAZÃO DESVIADA DO RESERVATÓRIO DE TOCOS PELO TÚNEL

Vazão desviada do reservatório de Tócos pelo tunel



5.3.3.2 Variação do volume do reservatório de Tocos

O volume do reservatório de Tocos é calculado através dos dados da estação Barragem de Tocos, localizada no reservatório. A curva cota x volume da estação, obtida no banco de dados hidrologia, está ilustrada na Figura 5.11.

As séries de volume e de variação do volume horário do reservatório são apresentadas nos gráficos das figuras 5.12 e 5.13, respectivamente. Verifica-se que há uma pequena quantidade de dados indisponíveis, os quais puderam ser preenchidos por interpolação. As maiores variações de volume são encontradas na série em períodos onde ocorreu vertimento através do vertedouro livre, decorrente de períodos muito chuvosos.

FIGURA 5.11 CURVA COTA-VOLUME DE TOCOS

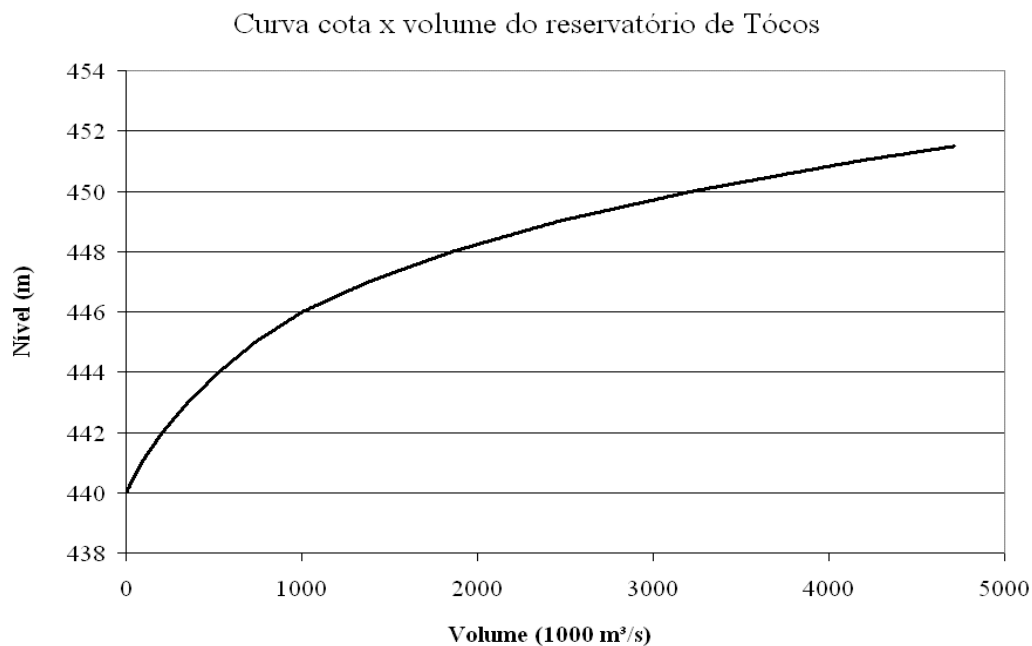


TABELA 5.8 ESTATÍSTICA DE FALHAS DA SÉRIE DE VAZÃO DA ESTAÇÃO DE TOCOS

ESTATÍSTICA DE FALHAS - DADOS DE 15 MINUTOS

Nº Total de dados	39656
Nº de dados indisponíveis na série	248
Nº de dados abaixo do limite inferior	0
Nº de dados acima do limite superior	1
% de falhas	0,63

ESTATÍSTICA DE FALHAS - DADOS HORÁRIOS

Nº Total de dados	9914
Nº de dados indisponíveis na série (nenhuma leitura na hora)	54
Nº de dados abaixo do limite inferior	0
Nº de dados acima do limite superior	0
% de falhas	0,54

FIGURA 5.12 SÉRIE DE VOLUME DO RESERVATÓRIO DE TOCOS

Volume do reservatório de Tócos - Período de 14/11/2002 a

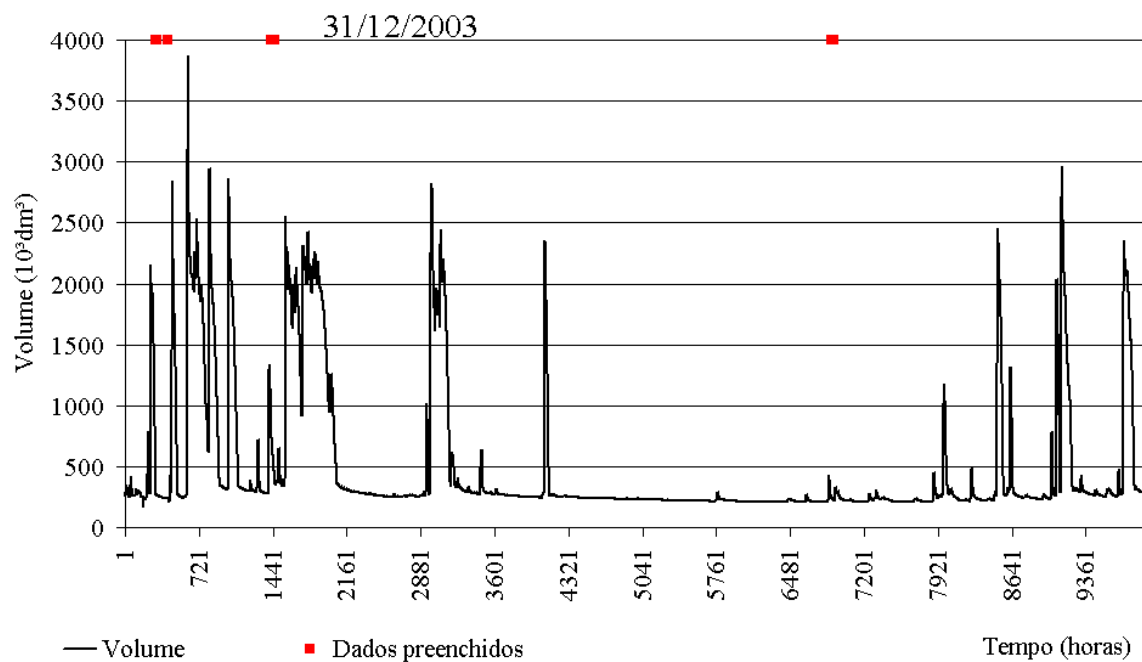
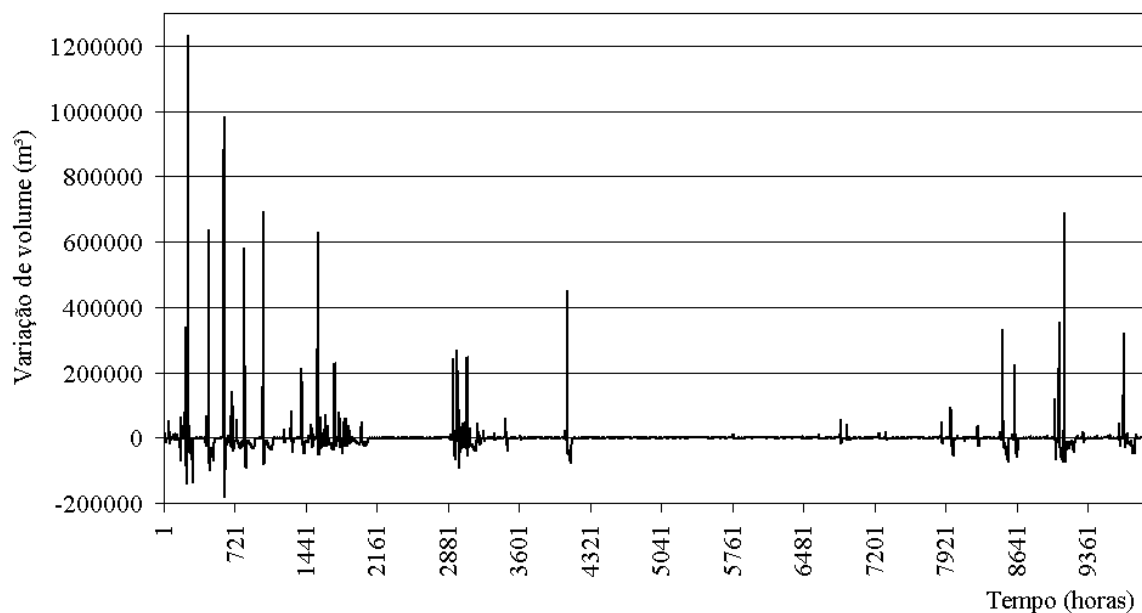


FIGURA 5.13 VARIAÇÃO DE VOLUME DO RESERVATÓRIO DE TOCOS

Variação de volume do reservatório de Tócos - Período de
14/11/2002 a 31/12/2003



5.3.3.3 Vazão vertida pelo vertedouro livre

A vazão vertida pelo vertedouro livre é calculada através dos dados de nível do reservatório de Tocos (Figura 5.14), obtida pela estação Barragem de Tocos, descrita anteriormente, e da curva de descarga do vertedouro (Figura 5.15). A Figura 5.16 apresenta a série horária de vazão vertida.

FIGURA 5.14 SÉRIE DE NÍVEL DO RESERVATÓRIO DE TOCOS

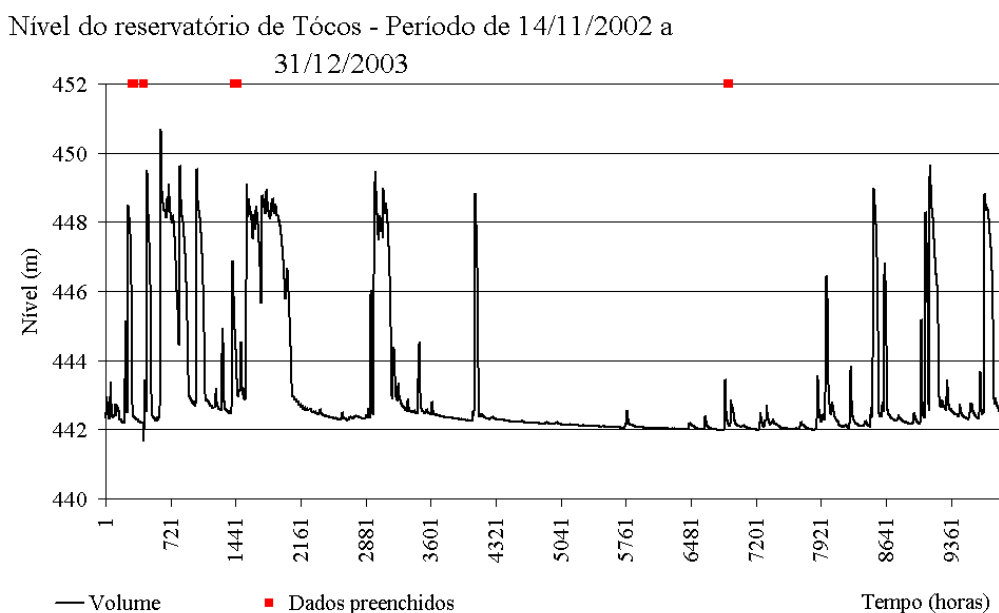


FIGURA 5.15 CURVA DE DESCARGA DO VERTEDOURO DE TOCOS

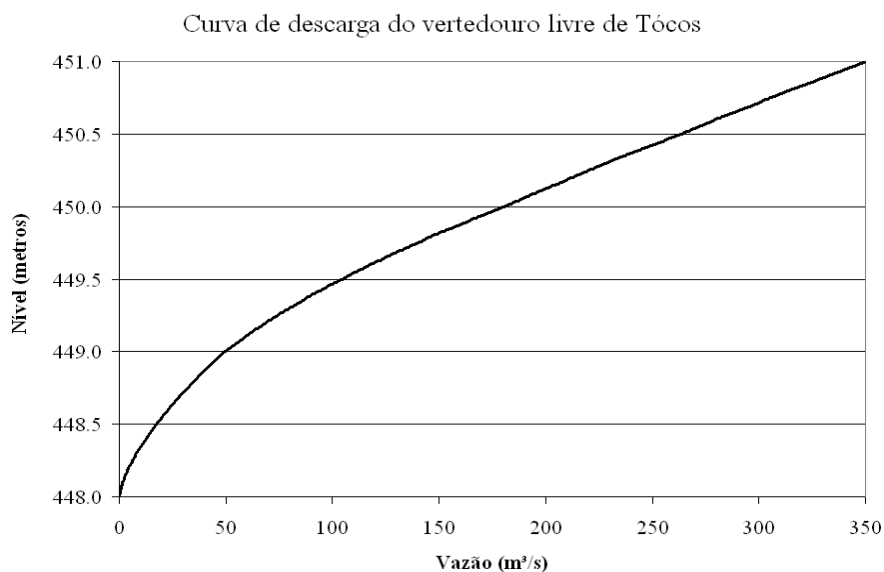
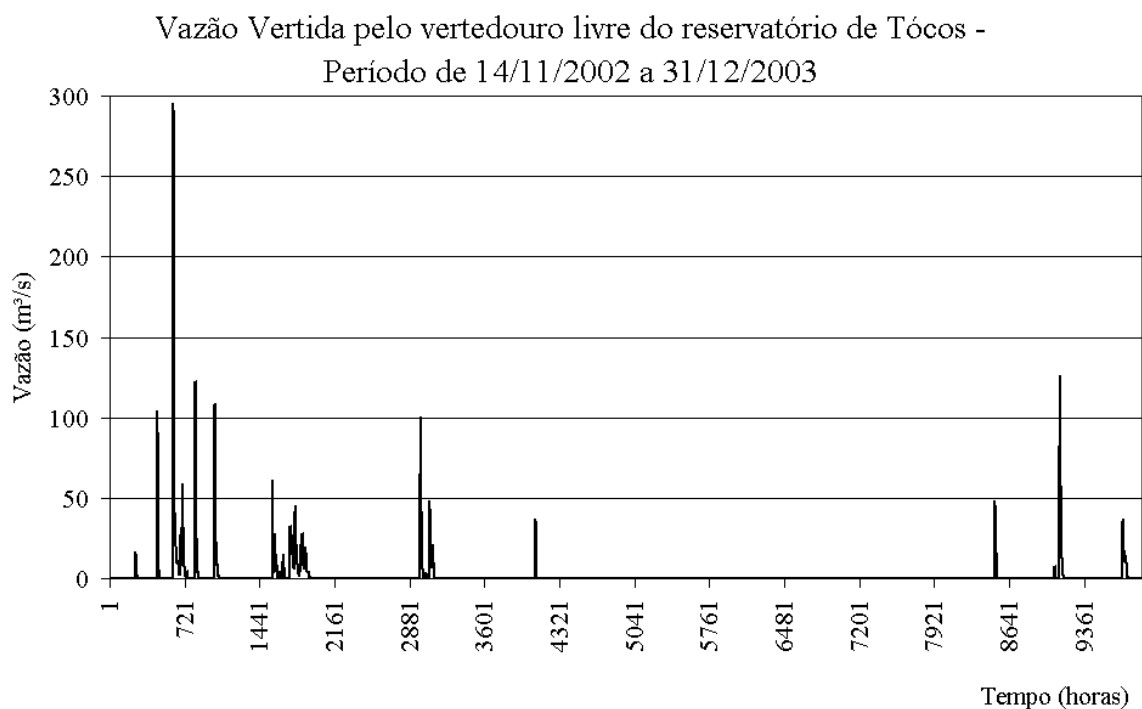


FIGURA 5.16 SÉRIE DE VAZÃO VERTIDA PELO VERTEDOURO LIVRE DE TOCOS



5.3.3.4 Cálculo da vazão afluyente a Tocos

Para o cálculo da vazão afluyente foram utilizadas as séries de dados de vazão e volume para as estações de Várzea, Rosário e Tocos. Inconsistências nestas séries ocasionaram uma diminuição da precisão no cálculo da vazão afluyente a Tocos. A tabela 5.9 apresenta um resumo da estatística de falhas de cada série. Pode-se observar que a série de menor qualidade é da estação de Várzea, decorrente da grande quantidade de falhas existentes no início do período. A série de Rosário também possui uma alta porcentagem de dados falhos, no entanto mostrou-se no item anterior que foi possível preencher estes dados com precisão. A quinta coluna desta tabela apresenta o número de intervalos de tempo que contêm pelo menos um dado falho correspondente a qualquer uma das séries analisadas e, portanto, pelo menos um valor que foi preenchido (estimado). Estes dados podem causar erros no cálculo do balanço hídrico (já que foram estimados) e, por isso, estes intervalos de tempo foram analisados com maior cuidado.

TABELA 5.9 VALORES PREENCHIDOS NAS SÉRIES UTILIZADAS NO CÁLCULO DA VAZÃO AFLUENTE AO RESERVATÓRIO DE TOCOS

SÉRIE	Z/VOL. EM TOCOS	VAZÃO VÁRZEA	VAZÃO ROSÁRIO	VAZÃO AFLUENTE
Qtde de valores	9914	9914	9914	9914
Qtde de valores preenchidos	54	1036	970	1990
% de falhas	0,54	10,45	9,78	20,00

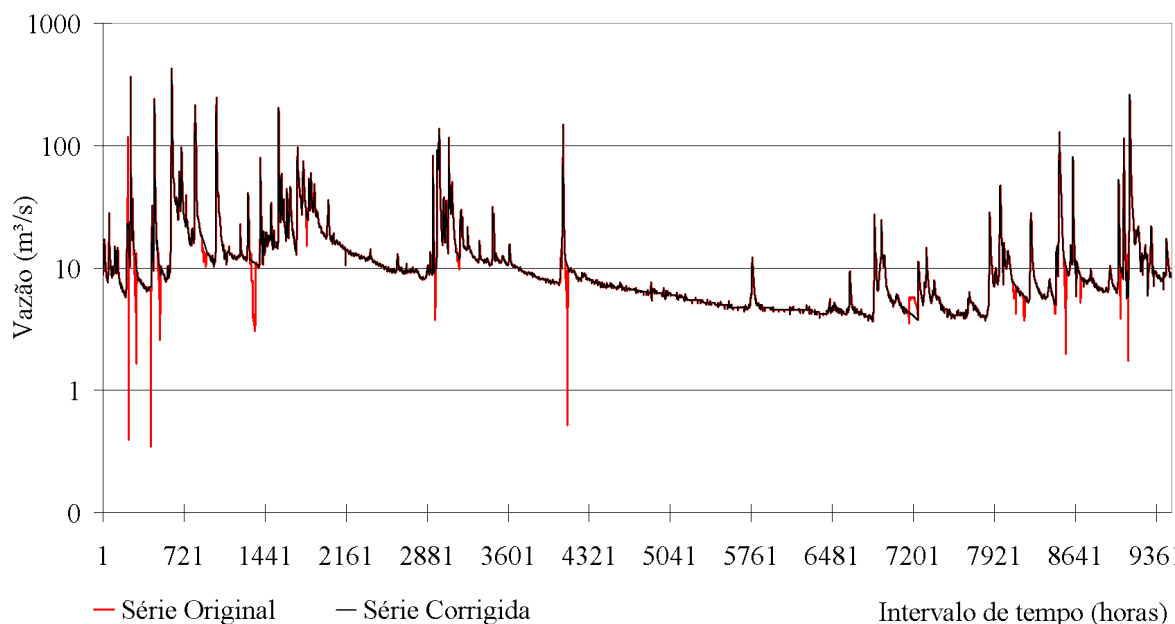
Analisando a série final de vazão afluyente, percebeu-se que alguns pontos da série não respeitavam a tendência do hidrograma, ou seja, apresentavam mudanças bruscas nos valores de vazão afluyente. Após a análise das diversas variáveis que compõem o cálculo do balanço hídrico pode-se concluir que os erros apresentavam três causas principais:

- a) erro na medição de nível realizada pela estação telemétrica, os quais são devidos normalmente a problemas nos sensores;
- b) a série de nível foi gerada com precisão de duas casas decimais, fazendo com que as mudanças ocorressem somente na ordem do centímetro, ou seja, não ocorressem gradativamente, se concentrassem em um único intervalo de tempo. Este erro foi repassado à série de volume utilizada no balanço hídrico, concentrando os valores de variação do volume em um único intervalo de tempo;
- c) percebeu-se que durante a recessão do hidrograma ocorriam oscilações nos valores de vazão. Possivelmente isso se deve ao fato de existirem erros na definição da curva cota-volume.

A série original foi corrigida através de interpolação, tendo sido alterados um total de 525 valores, ou seja, 5,3 % dos dados. A série original (com erros) e a série corrigida foram plotadas em um gráfico semi-logaritmico apresentado na Figura 5.17, permitindo sua comparação.

FIGURA 5.17 SÉRIE CORRIGIDA DE VAZÃO AFLUENTE AO RESERVATÓRIO DE TOCOS

Série de vazão afluente a Tócos



5.3.4 Sub-bacia de cabeceira 2

A sub-bacia de Cabeceira 2 está localizada na sub-bacia do rio Sacra Família, e abrange uma área de 190,2 km², se estendendo da nascente do rio Sacra Família à estação de Morsing.

A Figura 5.18 ilustra a curva de descarga de Morsing. Observando esta figura pode-se perceber que foi definida uma relação linear entre a vazão e a cota da estação, o que normalmente não é representativo da realidade. As medições de vazão para esta estação não se encontram disponíveis no *site* da ANA e não foram disponibilizadas pela equipe da LIGHT. Optou-se então por utilizar esta curva, assim definida, conforme recomendação da equipe de hidrologia da LIGHT. Esta curva é também utilizada por esta equipe em todos os cálculos hidrológicos.

A figura 5.19 apresenta a série de vazão horária final para a estação de Morsing. Verificou-se uma pequena quantidade de dados falhos para esta série, os quais foram preenchidos por interpolação.

FIGURA 5.18 CURVA DE DESCARGA DE MORSING

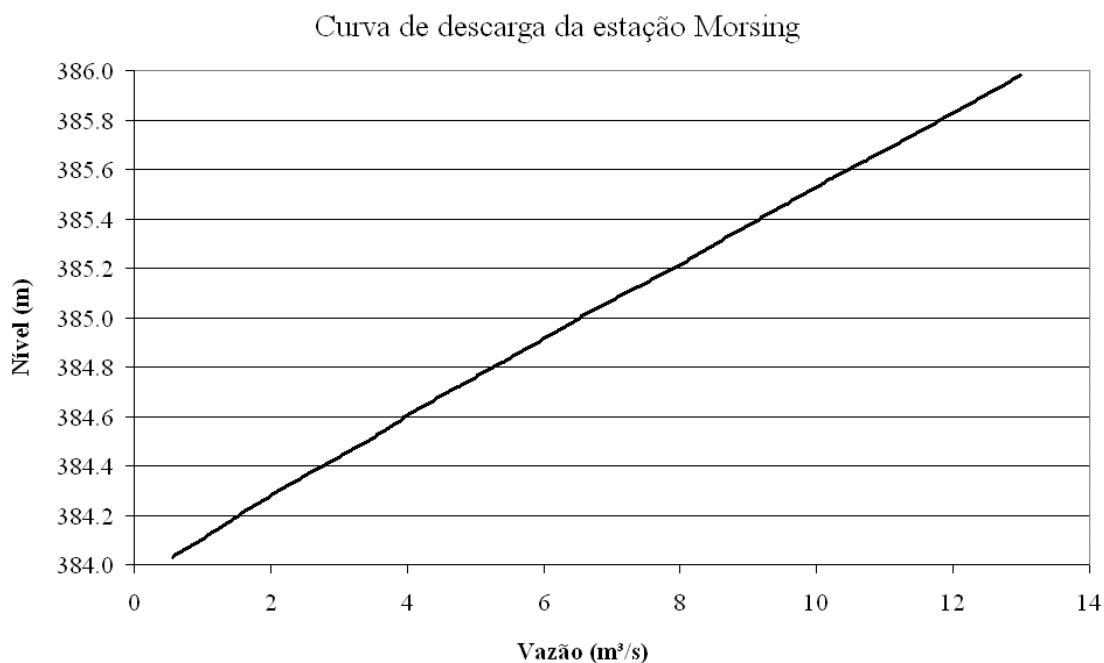


FIGURA 5.19 HIDROGRAMA DA ESTAÇÃO MORSING

Hidrograma da estação de Morsing - Período de 14/11/2002 a 31/12/2003

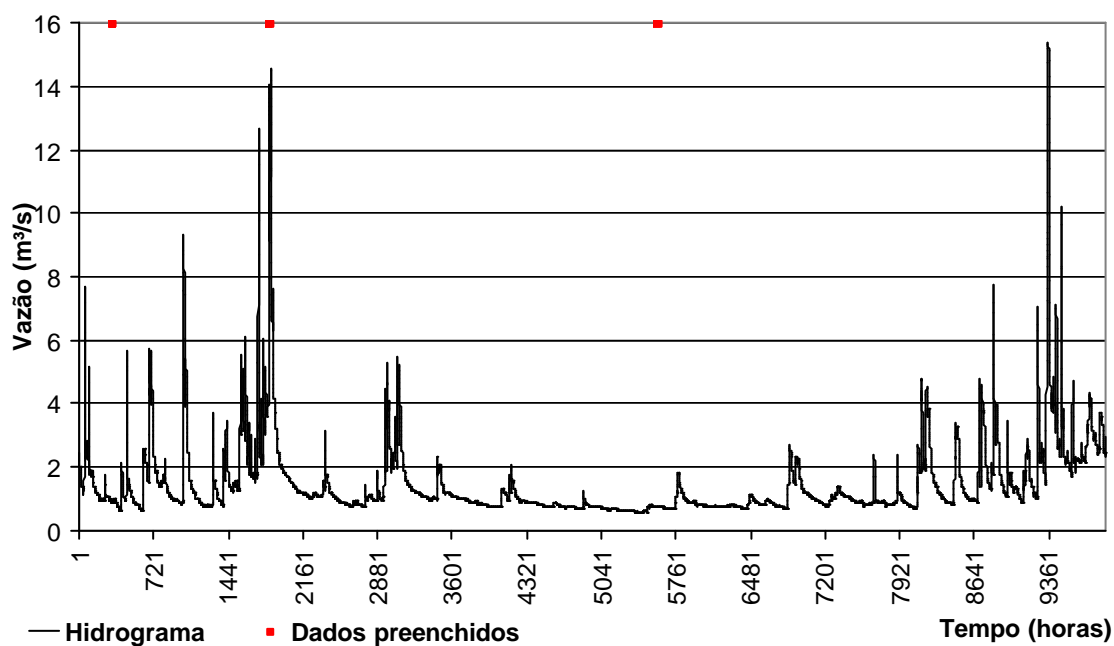


TABELA 5.10 ESTATÍSTICA DE FALHAS DA SÉRIE DE VAZÃO DA ESTAÇÃO DE MORSING

ESTATÍSTICA DE FALHAS - DADOS DE 15 MINUTOS	
Nº Total de dados	39656
Nº de dados indisponíveis na série	65
Nº de dados abaixo do limite inferior	0
Nº de dados acima do limite superior	22
% de falhas	0,002
ESTATÍSTICA DE FALHAS - DADOS HORÁRIOS	
Nº Total de dados	9914
Nº de dados indisponíveis na série (nenhuma leitura na hora)	6
Nº de dados abaixo do limite inferior	0
Nº de dados acima do limite superior	4
% de falhas	0,001

5.3.5 Sub-bacia intermediária 1

A sub-bacia Intermediária 1 está localizada entre o reservatório de Tocos e a estação telemétrica de Fazenda Nova Esperança e possui área incremental de 218 km². A área total de drenagem da estação de Fazenda Nova Esperança é de 604 km². A vazão defluente ao reservatório de Tocos é igual à vazão vertida pelo vertedor livre, já determinada no item anterior. O cálculo da vazão na exutória da bacia é realizado com a utilização de dados de nível e da curva de descarga da estação Fazenda Nova Esperança.

A curva de descarga disponível para esta estação foi fornecida pela LIGHT e pode ser visualizada no gráfico da Figura 5.20.

A figura 5.21 apresenta a série de vazão horária final para a estação de Fazenda Nova Esperança, onde se verifica uma pequena quantidade de falhas. Os maiores picos nesta série ocorrem devido a vertimentos pela barragem de Tocos.

FIGURA 5.20 CURVA DE DESCARGA DA ESTAÇÃO FAZENDA NOVA ESPERANÇA

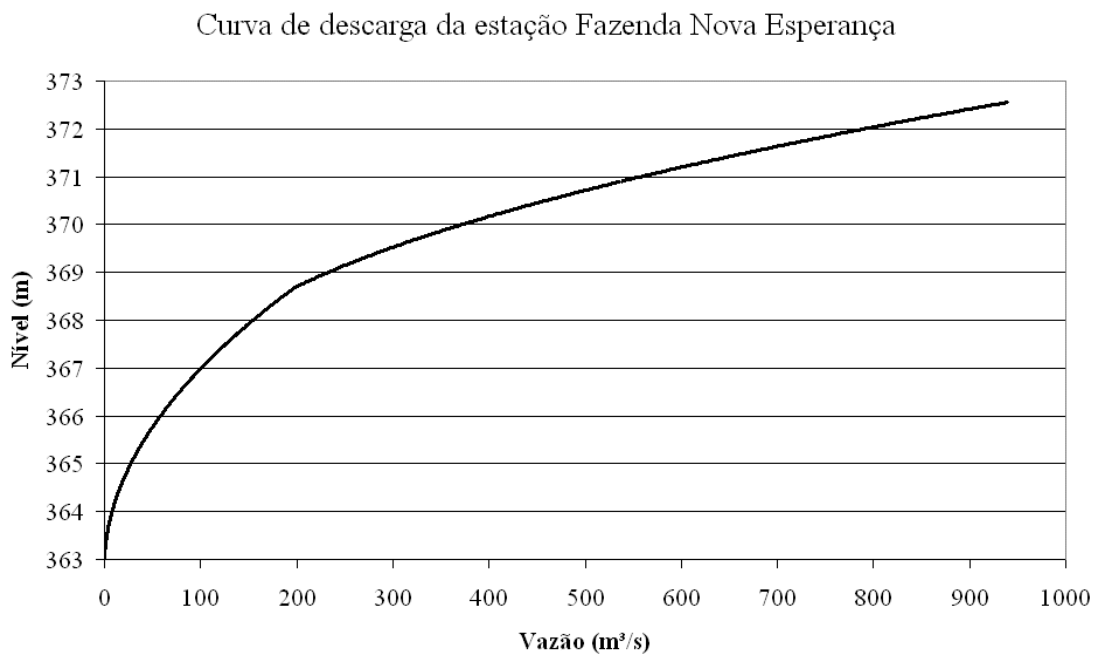


FIGURA 5.21 HIDROGRAMA DA ESTAÇÃO FAZENDA NOVA ESPERANÇA

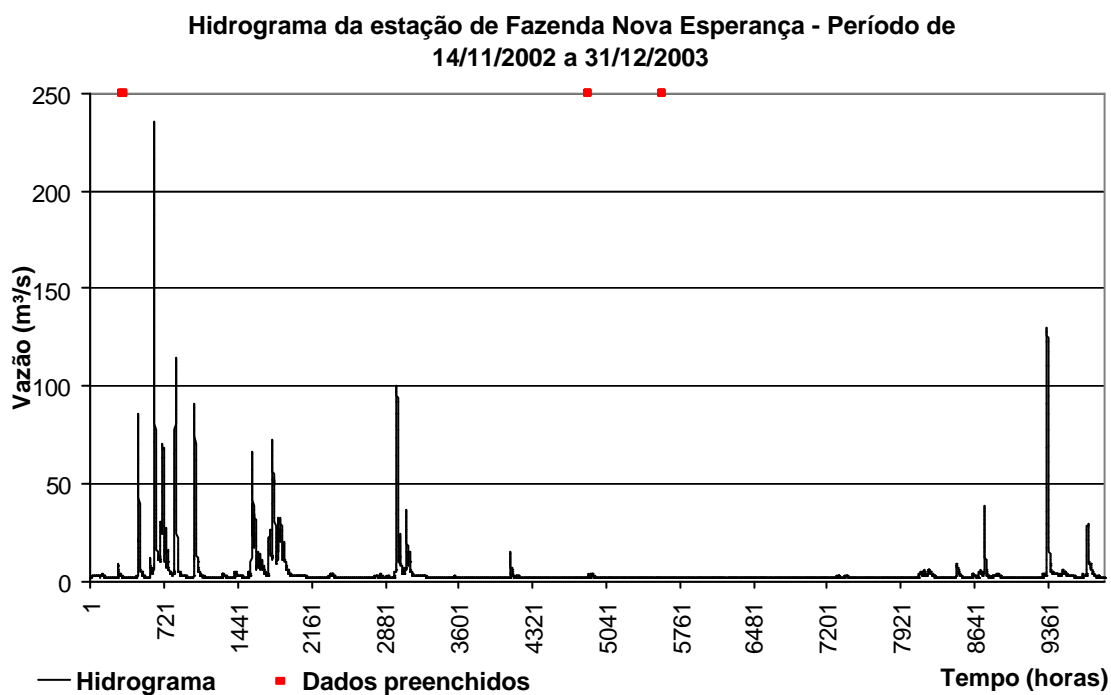


TABELA 5.11 ESTATÍSTICA DE FALHAS DA SÉRIE DE VAZÃO DA ESTAÇÃO DE FAZENDA NOVA ESPERANÇA

ESTATÍSTICA DE FALHAS - DADOS DE 15 MINUTOS	
Nº Total de dados	39656
Nº de dados indisponíveis na série	50
Nº de dados abaixo do limite inferior	0
Nº de dados acima do limite superior	0
% de falhas	0,001
ESTATÍSTICA DE FALHAS - DADOS HORÁRIOS	
Nº Total de dados	9914
Nº de dados indisponíveis na série (nenhuma leitura na hora)	6
Nº de dados abaixo do limite inferior	0
Nº de dados acima do limite superior	0
% de falhas	0,001

5.4 DADOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

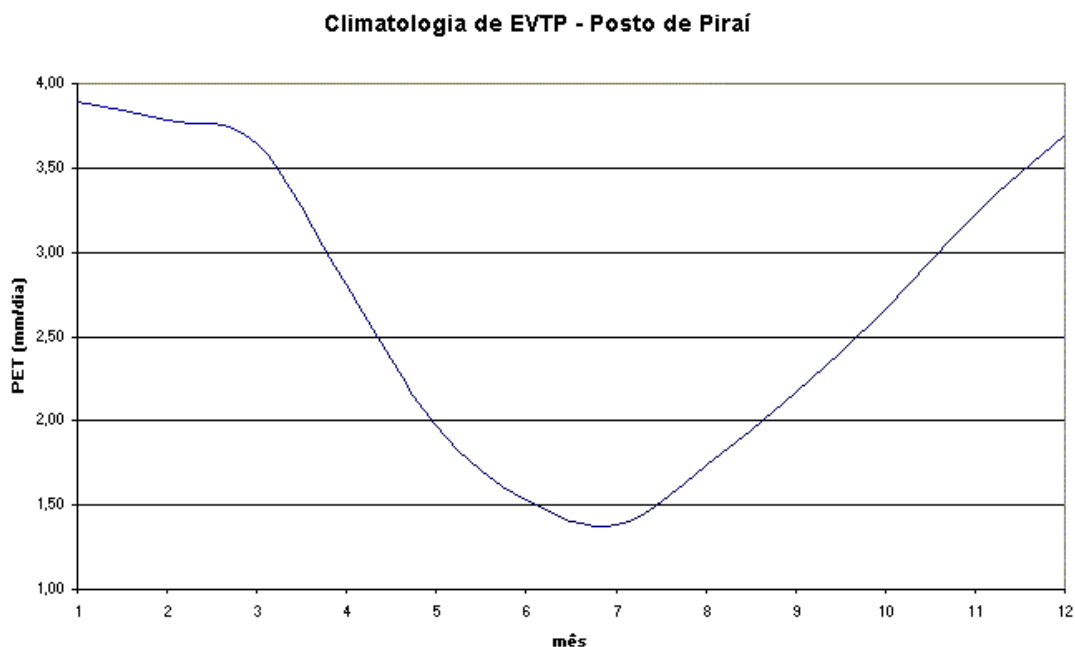
Os dados de evapotranspiração potencial (EVTP) utilizados neste trabalho foram obtidos com base no trabalho Balanços Hídricos Climatológicos do Brasil (SENTELHAS, 1999), desenvolvido pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo (USP). Nesse trabalho, a evapotranspiração é estimada pelo método de THORNTHWAITE (1948), com base nos dados pertencentes às redes de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE/SP) e da USP. Os dados originais, disponibilizados em meio magnético, representam a climatologia mensal de EVTP.

Para os propósitos desse projeto foi selecionado o posto de Piraí, localizado no Estado do Rio de Janeiro, município de Piraí, com latitude $-43,90^\circ$ e longitude $-22,63^\circ$. Este posto apresenta EVPT anual média de 986,73 mm. Os dados mensais foram desagregados em valores diários e horários. A desagregação em valores diários foi feita dividindo o valor mensal, de cada um dos meses, pelo número de dias do mês. A Tabela 5.12 lista os valores dessa variável em mm/dia para cada mês. A Figura 5.22 mostra a distribuição dessa variável ao longo dos doze meses do ano.

TABELA 5.12 VALORES DIÁRIOS DE EVTP PARA CADA MÊS

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
3,89	3,78	3,65	2,81	1,98	1,53	1,38	1,74	2,17	2,66	3,23	3,69

FIGURA 5.22 DISTRIBUIÇÃO DA EVTP (MM/DIA), PARA O POSTO DE PIRAI, AO LONGO DOZE MESES DO ANO



A desagregação dos dados de EVTP diários em dados horários foi realizada proporcionalmente a pesos definidos para cada hora do dia, de maneira a concentrar os maiores valores nos períodos de maior insolação do dia. Estes valores estão listados na Tabela 5.13.

TABELA 5.13 FRAÇÕES PARA DESAGREGAÇÃO DOS DADOS DE EVTP

HORA	INTERVALO DE TEMPO (H)	FRAÇÃO	HORA	INTERVALO DE TEMPO (H)	FRAÇÃO
00	0-1	0,00	12	12-13	0,10
01	1-20	0,00	13	13-14	0,09
02	2-3	0,00	14	14-15	0,09
03	3-4	0,00	15	15-16	0,08
04	4-5	0,00	16	16-17	0,07
05	5-6	0,03	17	17-18	0,05
06	6-7	0,04	18	18-19	0,04
07	7-8	0,05	19	19-20	0,03
08	8-9	0,07	20	20-21	0,00
09	9-10	0,08	21	21-22	0,00
10	10-11	0,09	22	22-23	0,00
11	11-12	0,09	23	23-00	0,00

5.5 ANÁLISE DA CONSISTÊNCIA HIDROLÓGICA DAS SÉRIES

Como a calibração é realizada a partir de dados monitorados de vazão e chuva, procurou-se analisar estas informações consecutivamente, com o objetivo de identificar inconsistências no conjunto de dados. Estas inconsistências podem ser responsáveis por grandes diferenças encontradas nos valores de vazão observados e calculados pelo modelo hidrológico.

Em uma primeira análise, todos os dados foram transformados em mm/hora e acumulados em escala mensal. Com isso, busca-se identificar os meses mais secos e mais úmidos do ano e eventuais discrepâncias entre estas informações. Calculou-se o valor da chuva menos a vazão gerada em cada mês. Esta análise foi feita considerando que em um balanço hídrico bastante simplificado a diferença entre o valor de chuva e vazão na bacia é aproximadamente igual a evapotranspiração real somada a contribuição do fluxo de base.

Em seguida foram verificados os eventos de chuva, de forma a avaliar se estes realmente ocasionam a subida do hidrograma. É muito comum ocorrer elevações no hidrograma que não correspondem à intensidade do evento de chuva observada. O contrário também é válido, quando são identificadas subidas sem ao menos ter sido observado um evento chuvoso. Isso é ocasionado devido às grandes incertezas envolvidas no cálculo da chuva média da bacia, o qual não consegue representar de maneira adequada a variabilidade espacial e temporal da chuva.

Outra fonte de incerteza é o cálculo da vazão, o qual pode apresentar incertezas tanto na medição dos níveis, decorrente de problemas nos sensores, por exemplo, como erros nas curvas de descarga ou curvas cota-volume.

Estes tipos de inconsistências encontram-se muitas vezes isoladas na série e, por isso, são de difícil correção. Desta forma, de maneira geral a correção não será realizada. No entanto, é sabido que estas incertezas causam uma diminuição na correlação entre os valores observados e previstos durante o processo de calibração, uma vez que os valores observados não condizem com a realidade. Caso haja um

período com grande número de inconsistências, este não será utilizado no procedimento de calibração.

5.5.1 Sub-bacia de cabeceira 1

A tabela 5.14 apresenta os dados de chuva, vazão e evapotranspiração acumulados mensais para sub-bacia de Cabeceira 1. Nesta bacia são encontradas estações hidrológicas bem definidas, sendo que os meses chuvosos se encontram entre novembro e março e os meses secos entre abril e outubro. Nesta série pode-se identificar uma anomalia, pois o mês de fevereiro de 2003 foi bastante seco, apresentando chuva acumulada mensal de 15 mm. Outro fator a ser considerado é que durante os meses secos o volume de chuva é bastante inferior ao volume de vazão, o que demonstra a grande importância do fluxo de base para esta região.

TABELA 5.14 DADOS HIDROLÓGICOS MENSALIS (MM/MÊS) – SUB-BACIA DE CABECEIRA 1

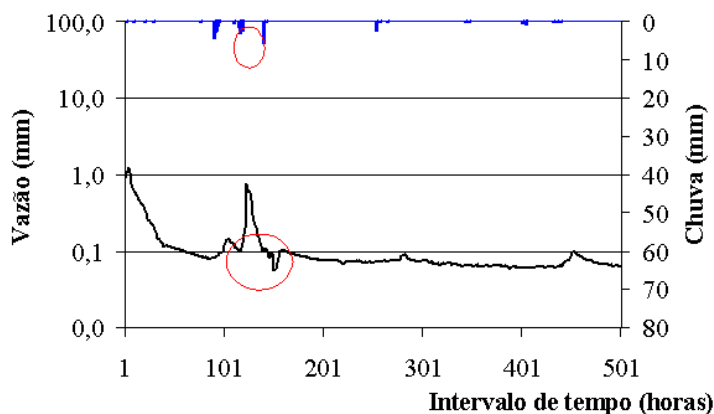
MES	EVPT	CHUVA = P	VAZAO = Q	P-Q
nov/02	55	80	48	32
dez/02	114	327	208	119
jan/03	120	286	174	112
fev/03	105	15	90	-75
mar/03	113	229	125	104
abr/03	83	13	70	-57
mai/03	62	17	63	-46
jun/03	46	21	39	-18
jul/03	42	11	32	-21
ago/03	54	44	38	6
set/03	66	38	35	3
out/03	82	163	57	106
nov/03	97	229	113	116
dez/03	114	123	96	27

A análise do pluviograma e fluviograma permitiu identificar alguns erros isolados na série, mas não foi possível realizar a correção. Os principais erros encontrados foram devido a alterações bruscas nos dados de vazão, subidas excessivas do hidrograma para pequeno volume de precipitação e eventos de precipitação sem registro de subidas no hidrograma. A figura 5.23 apresenta dois exemplos, sendo que a vazão encontra-se plotada em escala semi-logaritma de forma a facilitar a verificação

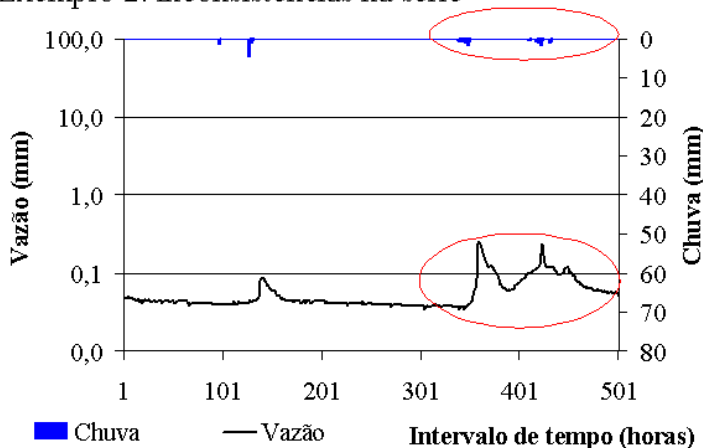
dos erros. O primeiro gráfico apresenta um decaimento do hidrograma, mesmo tendo sido observado um evento chuvoso. No segundo o hidrograma apresentou uma subida muito elevada para a chuva que foi observada.

FIGURA 5.23 EXEMPLOS DE INCONSISTÊNCIAS ENCONTRADAS NOS DADOS HIDROLÓGICOS DE TOCOS

Exemplo 1: inconsistências na série



Exemplo 2: inconsistências na série



5.5.2 Sub-bacia de cabeceira 2

A tabela 5.15 apresenta os dados de chuva, vazão e evapotranspiração acumulados mensais para sub-bacia de Cabeceira 2. Nesta bacia, como na bacia de cabeceira 1, também são encontradas estações hidrológicas bem definidas, sendo que os meses chuvosos se encontram entre novembro e março e os meses secos entre abril e outubro. A diferença é que nesta bacia, mesmo nos meses mais secos a precipitação supera a vazão, o que se justifica devido a evapotranspiração na bacia e as perdas

iniciais. O mês de fevereiro de 2003 também foi bastante seco, confirmando os dados obtidos para Tocos.

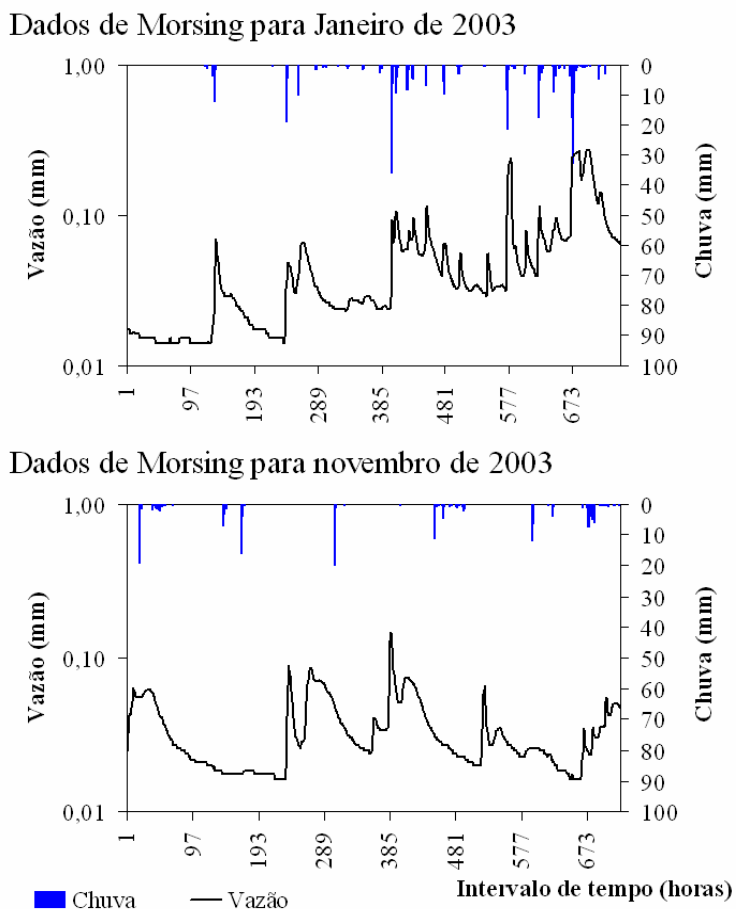
TABELA 5.15 DADOS HIDROLÓGICOS MENSIS (MM/MÊS) – SUB-BACIA DE CABECEIRA

2

MES	EVPT	CHUVA = P	VAZAO = Q	P-Q
nov/02	55	79	11	68
dez/02	114	240	24	216
jan/03	121	389	37	352
fev/03	105	28	17	11
mar/03	114	219	22	197
abr/03	83	37	14	23
mai/03	62	37	13	25
jun/03	47	16	9	7
jul/03	43	27	12	15
ago/03	54	55	14	40
set/03	66	34	13	20
out/03	83	166	18	148
nov/03	97	203	25	178
dez/03	114	192	43	149

A análise do pluviograma e fluviograma permitiu identificar uma inconsistência nos dados após a data de outubro de 2003. Para o período compreendido entre o mês de novembro de 2002 e setembro de 2003 a bacia apresentou um tempo de resposta bastante rápido, de aproximadamente 4 horas. Após o mês de outubro de 2003 este tempo se tornou bastante elevado, muitas vezes superiores a um dia, o que caracterizaria uma mudança muito radical no comportamento da bacia (ver Figura 5.24). Acredita-se que esta diferença tenha sido ocasionada por erros na medição ou de inserção dos dados no banco de dados hidrológico, e, por isso, o período após outubro foi descartado do processo de calibração.

FIGURA 5.24 DADOS HIDROLÓGICOS DE MORSING (JAN. E NOV. DE 2003)



5.5.3 Sub-bacia intermediária 1

A tabela 5.16 apresenta os dados de chuva, vazão e evapotranspiração acumulados mensais. A diferença desta tabela para as apresentadas para as sub-bacias de cabeceira é que nesta consta a vazão de contribuição da bacia de montante, no caso a vazão vertida pelo vertedouro de Tocos. Em uma primeira aproximação esta contribuição foi diminuída diretamente da vazão na bacia e calculou-se a diferença entre a precipitação e a vazão gerada na bacia.

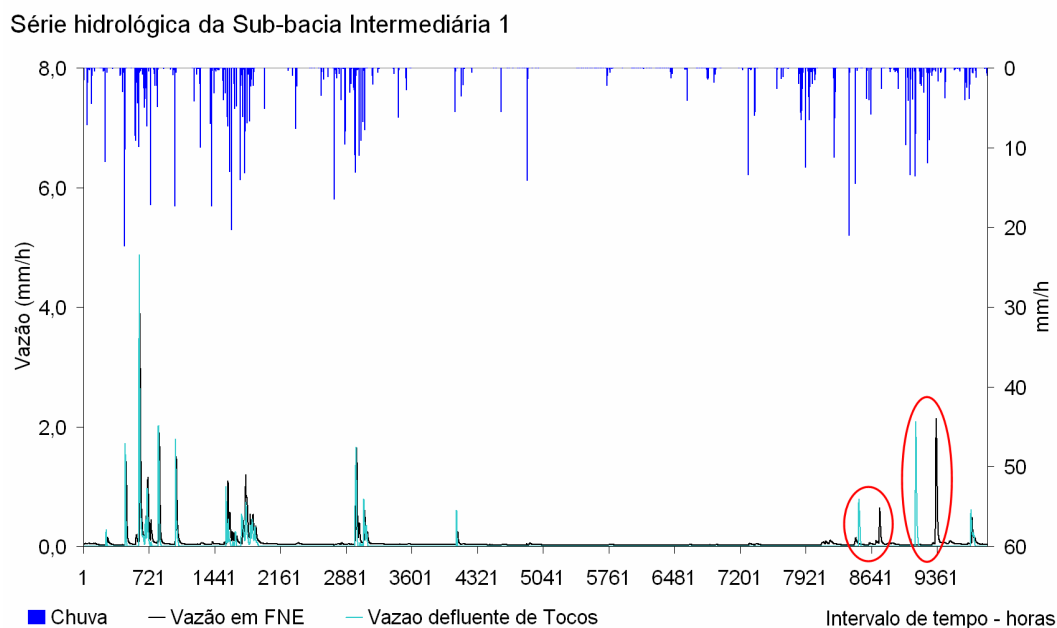
Pela análise do gráfico plotado na Figura 5.25 pode-se identificar uma inconsistência temporal entre os dados de vazão vertida pelo vertedouro de Tocos (contribuição de montante) e a vazão observada na estação Fazenda Nova Esperança. O tempo de viagem entre estes dois pontos da bacia é de aproximadamente 8 horas e

no mês de novembro de 2003 observou-se por duas vezes o tempo de 9 dias. O mesmo havia ocorrido para a sub-bacia de Cabeceira 2. Como a fonte deste erro é desconhecida optou-se por desprezar o período da série posterior a novembro.

TABELA 5.16 DADOS HIDROLÓGICOS MENSAIS (MM/MÊS)

MES	EVPT	CHUVA = P	VAZÃO.= Q	Q A MONT. =QM	QE=Q-QM	P-QE
nov/02	55	63	15	2	13	50
dez/02	114	289	185	131	53	235
jan/03	121	293	116	62	54	239
fev/03	105	22	28	1	27	-5
mar/03	114	202	70	38	32	170
abr/03	83	22	23	0	23	-1
mai/03	62	27	24	4	20	7
jun/03	47	22	19	0	19	3
jul/03	43	11	18	0	18	-7
ago/03	54	32	18	0	18	14
set/03	66	45	18	0	18	27
out/03	83	191	23	0	23	167
nov/03	97	195	36	40	-3	199
dez/03	114	119	75	12	63	56

FIGURA 5.25 DADOS HIDROLÓGICOS DA SUB-BACIA INTERMEDIÁRIA 1



6 CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO

A calibração de um modelo hidrológico consiste na estimativa de cada um dos membros de um grupo de parâmetros, de forma a minimizar as diferenças entre as vazões calculadas pelo modelo hidrológico e observadas na bacia hidrográfica. A taxa de acerto da previsão hidrológica é altamente dependente do sucesso obtido durante a calibração do modelo. A calibração dos parâmetros é uma atividade de difícil execução, pois requer conhecimento da estrutura do modelo hidrológico e a disponibilidade de uma série de dados observados que seja longa, contínua e precisa, para amostrar uma gama ampla de eventos úmidos e de eventos secos em diferentes estações do ano.

Neste trabalho, os parâmetros foram estimados com técnicas manual e automática. A calibração manual é predominantemente subjetiva, sendo útil para estimar a ordem de grandeza do parâmetro. A calibração automática estima detalhadamente cada parâmetro atendendo à minimização de uma função objetivo que mede a diferença entre as vazões calculadas e observadas. No primeiro caso foi utilizada série hidrológica com resolução diária e, no segundo, dados com resolução horária.

Neste estudo foram calibrados 16 parâmetros, sendo 14 correspondentes ao “módulo bacia” e 2 ao “módulo canal”. No caso do módulo bacia foram calibrados todos os parâmetros apresentados na Tabela 2.4, com exceção dos parâmetros m_1 , m_2 e m_3 , os quais tiveram valores fixados ($m_1 = m_2 = m_3 = 8,0$), conforme recomendações do manual de operação do modelo de Sacramento (*NWS – NATIONAL WEATHER SERVICE, 2003*).

6.1 ESTIMATIVA MANUAL DE PARÂMETROS

Os valores iniciais dos parâmetros são estimados a partir do conhecimento das características da bacia (condições do solo, cobertura vegetal e topografia) e séries

históricas de chuva, vazão e evaporação potencial. PECK (1976) mostrou que a obtenção de parâmetros realistas durante o procedimento de calibração automática depende, em grande parte, da estimativa inicial realizada manualmente. Uma estimativa inicial razoável pode diminuir o esforço computacional e a estimativa de grupos de parâmetros espúrios durante a calibração automática.

Neste trabalho foi utilizada a técnica de calibração manual elaborada por PECK (1976) e descrita também por BAE E GEORGAKAKOS (1992) para estimar os parâmetros do módulo bacia. Apesar da estimativa manual ser subjetiva, ela é bastante útil para que o modelador desenvolva o entendimento da função de cada parâmetro e sensibilidade para a sua variação. A descrição da metodologia de calibração manual será apresentada através de um exemplo para a sub-bacia de cabeceira do rio Piraí, até a estação de Lídice, utilizando série hidrológica diária. Esta sub-bacia foi escolhida por não haver controle hidráulico ao longo do trecho e por ter uma série longa de dados disponível.

Considerando o fato de que as sub-bacias pertencentes à região de interesse possuem características físicas similares e que a calibração manual tem por objetivo fornecer uma estimativa inicial da ordem de grandeza dos parâmetros, assumiu-se o mesmo conjunto de parâmetros iniciais para todas as sub-bacias calibradas.

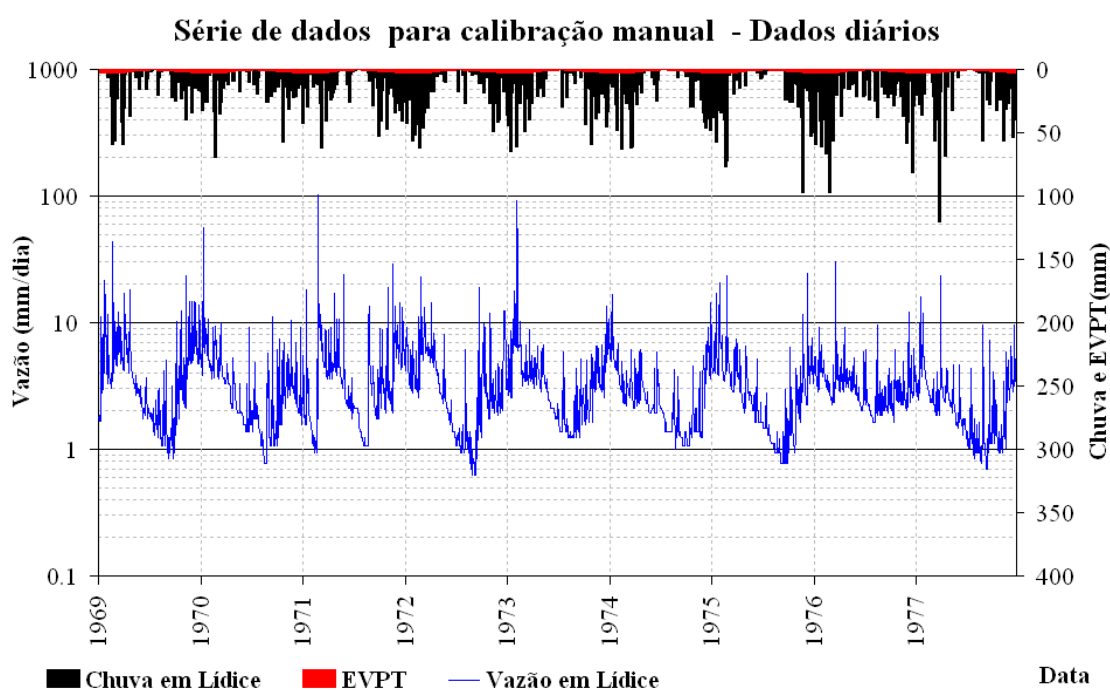
PECK (1976) agrupou os parâmetros do modelo de Sacramento de acordo com o método para obtenção de seus valores iniciais, os quais encontram-se listados a seguir conforme notação da Tabela 2.4:

- a) parâmetros obtidos diretamente, a partir da observação de dados de chuva e vazão ($x_4^0, x_5^0, d_1', d_1'' e \mathbf{b}_2$);
- b) parâmetros mais difíceis de estimar a partir de hidrogramas observados ($x_3^0 e P_f$);
- c) parâmetros estimáveis pelas características da percolação no solo (\mathbf{e}, \mathbf{q});
- d) parâmetros com valores nominais ($x_1^0, x_2^0, d_u, \mathbf{b}_1$ e \mathbf{m}).

A metodologia para determinação de cada um dos parâmetros será detalhada

nos subitens a seguir. Para facilitar a escolha dos períodos de dados utilizados durante o processo de calibração manual foram plotados os hidrogramas e hietogramas contínuos da série histórica com resolução diária. Para exemplificar a Figura 6.1 apresenta o hietograma e hidrograma de Lídice para o período entre 01/01/1969 a 31/12/1978. O hidrograma foi plotado na escala semi-logaritmica e as vazões se encontram em mm/dia. O hietograma foi plotado no mesmo gráfico para facilitar a identificação dos períodos mais secos e chuvosos.

FIGURA 6.1 SÉRIE DE DADOS PARA CALIBRAÇÃO MANUAL



6.1.1 Parâmetros obtidos diretamente da série de chuva e vazão observada

No modelo de Sacramento a representação dos fenômenos físicos de escoamento no solo é conceitualizado em duas camadas: superior e inferior. O volume de água livre contido na camada inferior é responsável pela geração do fluxo de base, sendo que este escoamento é regido pela Lei de Darcy. Para que se possa levar em consideração as variações no fluxo de base devido às recessões que ocorrem na natureza são considerados dois tipos de camadas inferiores do solo, sendo elas:

- a) primária: responsável pelo escoamento bastante lento que ocorre durante um longo período do ano;
- b) secundária: responsável pelo escoamento de base que ocorre um determinado tempo após eventos de precipitação.

Baseando-se neste conceito, são utilizados hidrogramas semi-logarítmicos para identificar o escoamento superficial, sub-superficial e a recessão do escoamento subterrâneo.

6.1.1.1 Estimativa de x_4^o e d_l'

Os parâmetros x_4^o , capacidade de armazenamento primário de água livre na camada inferior, e d_l' , coeficiente primário de drenagem da camada inferior, são estimados a partir das características da recessão nos hidrogramas selecionados. Recomenda-se a seleção de um período com mínima precipitação, quando o fluviograma apresenta uma região de decaimento lento (curva de recessão). Assume-se que, nesse período, a vazão que aparece no fluviograma é devida somente à contribuição do fluxo de base.

Os valores iniciais desses parâmetros podem ser obtidos das seguintes relações:

$$K_p = \left(\frac{Q_{p2}}{Q_{p1}} \right)^{\frac{1}{\Delta t}} \quad (6.1)$$

$$d_l' = 1 - K_p \quad (6.2)$$

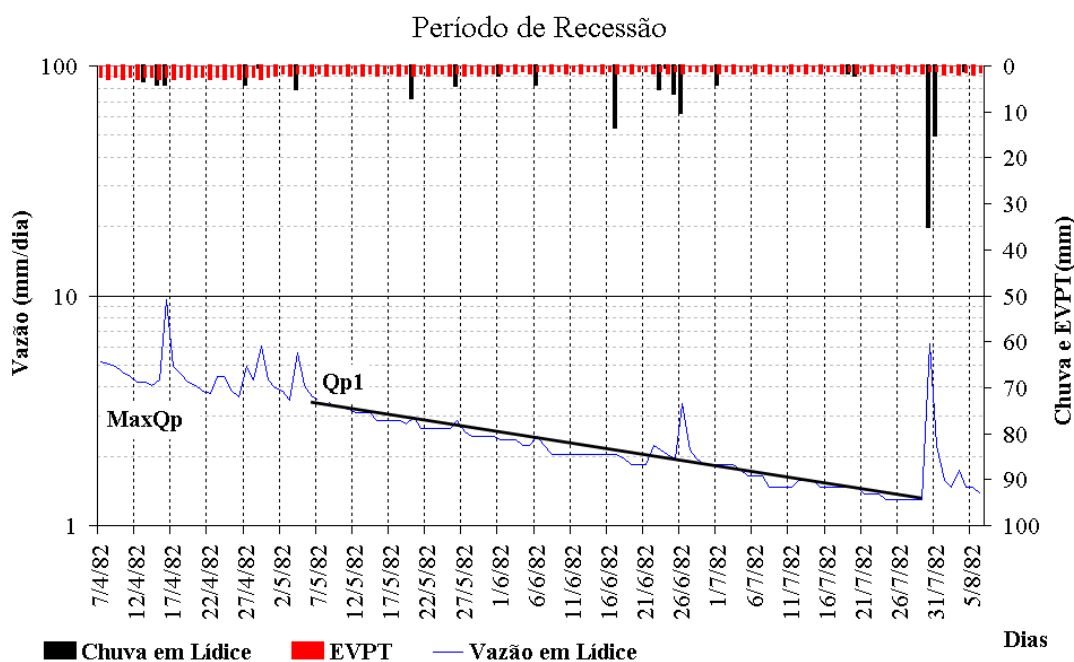
$$x_4^o = \frac{Max Q_p}{d_l'} \quad (6.3)$$

Onde K_p é a taxa de recessão primária diária obtida do fluxo primário (Q_{p1} e Q_{p2}) na curva de recessão, separados por um intervalo de tempo Δt , em dias. O

parâmetro x_4^o pode ser obtido pela divisão da máxima descarga sob condições de fluxo somente primário e a taxa de depleção diária d_i' . A variável $MaxQ_p$ corresponde ao máximo escoamento devido ao fluxo primário e pode ser estimada através da análise do hidrograma.

A Figura 6.2 mostra a recessão do fluviograma para o período de março a junho de 1982.

FIGURA 6.2 PERÍODO DE RECESSÃO NO POSTO FLUVIOMÉTRICO DE LÍDICE – DETERMINAÇÃO DE d_i' E x_4^o



Com base na Figura 6.2, obtém-se os seguintes valores para as variáveis:

$$Q_{p1} = 3,53 \quad 07/05/1982$$

$$Q_{p2} = 1,29 \quad 07/7//1982$$

$$\Delta T = 84(\text{dias})$$

$$K_p = 0,989(\text{dia}^{-1})$$

$$d_i' = 0,011(\text{dia}^{-1})$$

O coeficiente de drenagem d_i' possui dimensão de inverso do tempo. Calculando o inverso desse coeficiente, obtém-se o valor de 91 dias, correspondente a escala de tempo para drenar todo o volume do reservatório inferior primário.

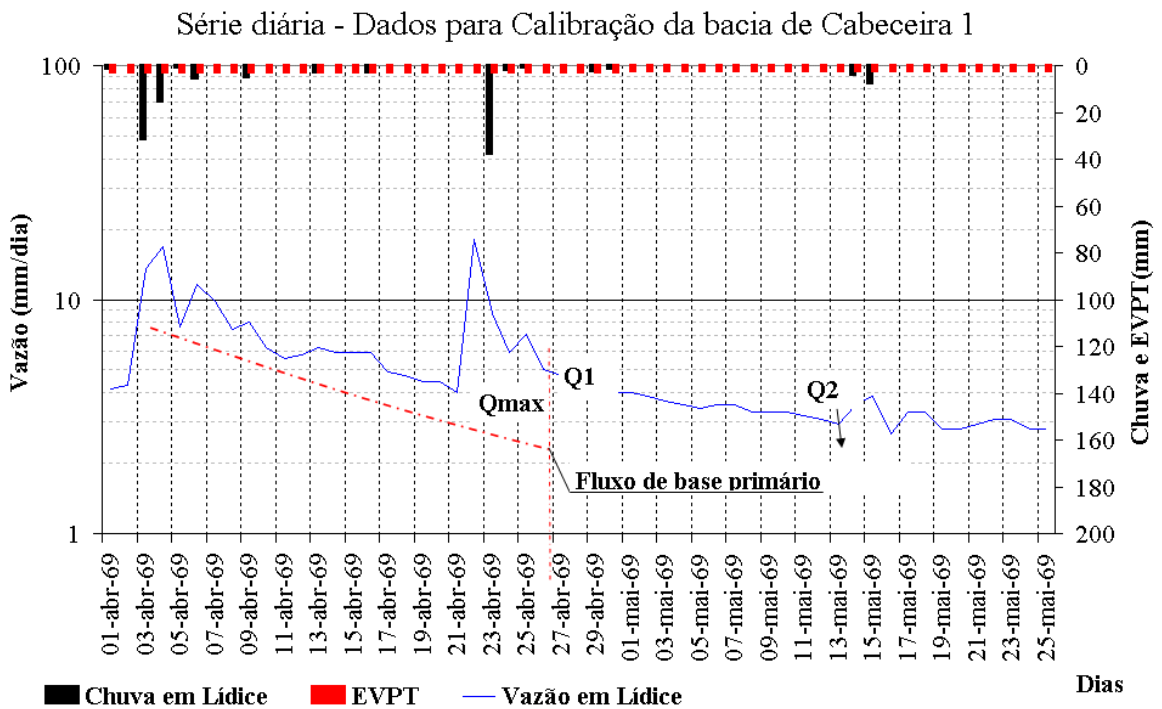
$$MaxQ_p = 4,08 \quad 14/04/1982$$

$$x_4^o = 371(mm)$$

6.1.1.2 Estimativa de x_5^o e d_i''

A técnica para estimativa inicial do parâmetro de capacidade de armazenamento secundário do nível inferior (x_5^o) e do coeficiente instantâneo de drenagem secundário (d_i'') é semelhante à técnica descrita anteriormente, no entanto o fluxo de base primário deve ser separado antes de se computar a recessão do fluxo de base secundário.

FIGURA 6.3 PERÍODO DE RECESSÃO NO POSTO FLUVIOMÉTRICO DE LÍDICE – DETERMINAÇÃO DE d_i'' E x_5^o



A Figura 6.3 mostra as vazões e precipitações observadas em Lídice, para o período de abril a maio de 1969. O período entre 26/04/1969 e 13/05/1969 apresentou poucos eventos de chuva, ocorrendo máxima recessão. Neste período pode-se considerar que ocorreu contribuição do fluxo de base primário e secundário, decorrente da chuva do dia 23/04/1969. A descarga total nesses dois passos de tempo, devido ao fluxo primário e ao fluxo secundário, foi de 5,02 mm/dia no dia 26/04/1969 e 2,94 mm/dia, no dia 13/05/1969. Para estimar a contribuição do fluxo secundário, o fluxo de base primário deve ser descontado. Este foi estimado em 1,2 mm/dia, conforme pode ser visualizado na Figura 6.3 pelas linhas em vermelho. A partir dessas observações, pode-se estimar o coeficiente secundário de drenagem da camada inferior (d_i''), através das seguintes relações:

$$Q_{s1} = 5,02 - 1,2 = 3,82 \quad 26/04/1969$$

$$Q_{s2} = 2,94 - 1,2 = 1,74 \quad 13/05/1969$$

$$K_p = 0,955(\text{dia}^{-1})$$

$$d_i'' = 0,045(\text{dia}^{-1})$$

Observa-se, novamente, que d_i'' possui dimensão de inverso do tempo, ou seja, calculando seu inverso, tem-se a escala de tempo necessária para efetuar-se a drenagem do volume de água armazenado na camada secundária inferior. Para esse caso específico, esse valor é da ordem de 23 dias.

A máxima contribuição devido ao fluxo de base foi estimada como sendo 5,94 mm/dia (valor do dia 24/04/1969) menos a contribuição do fluxo de base primário, resultando em 4,74 mm/dia de fluxo de base secundário.

$$\text{Max}Q_p = 4,08 \quad 24/04/1969$$

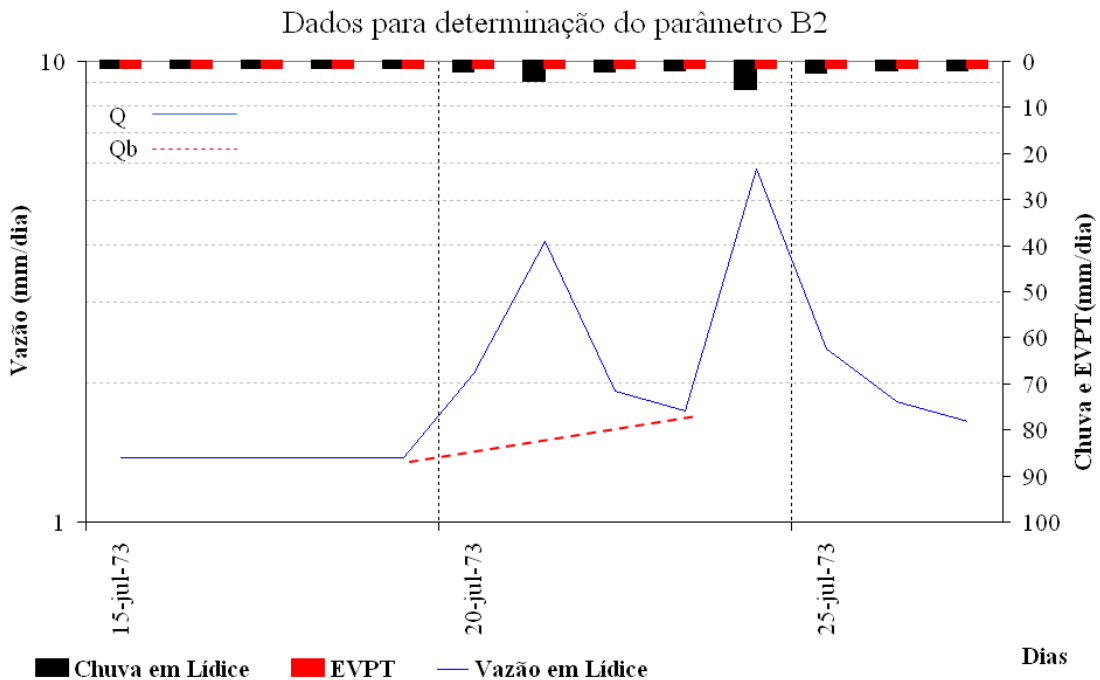
$$x_5^o = 105(mm)$$

6.1.1.3 Estimativa de b_2

A estimativa inicial do parâmetro b_2 , representativo da fração de área da bacia permanentemente impermeável, pode ser realizada através da seleção de um período de pequena subida no hidrograma devido a um evento pluviométrico, após um longo período de recessão. Considera-se que sob estas condições somente a precipitação que ocorrer sobre as áreas permanentemente impermeáveis se transformará diretamente em escoamento superficial, sendo o volume restante infiltrado.

A Figura 6.4 mostra outro período selecionado na série de vazões do posto fluviométrico de Lídice, onde se observa uma pequena elevação no sinal, causada por precipitação, após um longo período seco.

FIGURA 6.4 SÉRIE DE VAZÕES NO POSTO FLUVIOMÉTRICO DE LÍDICE PARA ESTIMATIVCA DE b_2



A Tabela 6.1 apresenta em sua primeira coluna os dias selecionados para análise; na segunda e na terceira as observações de chuva e vazão; na quarta uma estimativa do fluxo de base, dada pela reta auxiliar na Figura 6.4; na quinta coluna o escoamento superficial (*run-off*), obtido pela diferença entre as duas colunas anteriores (ou seja: escoamento superficial = vazão observada – fluxo de base).

TABELA 6.1 DADOS NECESSÁRIOS PARA A ESTIMATIVA INICIAL DA FRAÇÃO DE ÁREA PERMANENTEMENTE IMPERMEÁVEL (b_2) NA SUB-BACIA B6

DATA (DIA)	CHUVA OBSERVADA (MM)	VAZÃO OBSERVADA (MM)	FLUXO DE BASE ESTIMADO (MM)	ESCOAMENTO SUP. ESTIMADO (MM)
18/7/1973	0,00	1,38	1,38	0
19/7/1973	0,00	1,38	1,38	0
20/7/1973	30,20	2,10	1,40	0,70
21/7/1973	0,60	4,07	1,50	2,57
22/7/1973	0,40	1,92	1,60	0,32
23/7/1973	0,00	1,74	1,74	0
SOMA	31,20			3,59

O parâmetro b_2 pode, então, ser obtido pela seguinte relação:

$$b_2 = \frac{\sum \text{Escoamento}}{\sum \text{Chuva}} = \frac{3,59}{31,20} = 0,11 \quad (6.4)$$

6.1.2 Parâmetros Mais Difíceis de Estimar Através de Observações

6.1.2.1 Estimativa de x_3^o

Água sob pressão é a porção de água que está muito próxima do contorno das partículas do solo, em contraste à porção de água que se encontra livre para fluir. Assume-se que a porção de água sob pressão só pode ser reduzida por evapotranspiração sem nenhuma contribuição para o fluxo no canal. Para o propósito de se estimar a capacidade de armazenamento de água sob pressão na camada superior (x_3^o), sugere-se selecionar um período da série de vazão durante um período

extremamente seco para evitar complicações que possam surgir devido à presença de água livre no reservatório superior (PECK, 1976). Assumindo que, para dois intervalos de tempo distintos, a zona de água sob pressão está cheia e que a zona superior de água livre esteja vazia, o balanço hídrico para o período pode ser expresso pela seguinte relação:

$$\sum P - \sum Q - \sum ET - \sum GW = 0 \quad (6.5)$$

$$\sum GW = \Delta x_3 + \Delta x_4 + \Delta x_5 \quad (6.6)$$

onde:

$\sum P$ = quantidade de precipitação em mm;

$\sum Q$ = escoamento em mm;

$\sum ET$ = evapotranspiração para a bacia em mm. A contribuição da evapotranspiração é pequena e pode ser negligenciada para a maioria dos períodos secos.

$\sum GW$ = porção de água subterrânea para esse período, que é a somatória de mudanças na água sob pressão da zona inferior (Δx_3^0) e mudanças na água livre primária e secundária da zona inferior (Δx_4^0 e Δx_5^0).

Para determinação do parâmetro Δx_3^0 foi selecionado o período da série de agosto a setembro de 1977. Este período foi escolhido, pois os meses de junho e julho do mesmo ano apresentaram índice de precipitação bastante baixo, assegurando desta forma que o volume de água livre na camada superior é igual a zero. O hidrograma referente a este período pode ser visualizado na Figura 6.5, sendo que as descargas totais nos dois instantes de tempo selecionados t_1 e t_2 são 0,69 e 1,29 mm, respectivamente. Os fluxos primários nesses dois instantes de tempo são estimados como sendo 0,5 mm/dia e 0,45 mm/dia. Depois de se extrair o fluxo primário do total, obtém-se o fluxo secundário nesses dois instantes de tempo como sendo 0,19 e 0,84

mm/dia, respectivamente. A determinação de Δx_4^o e Δx_5^o utiliza os parâmetros d' e d'' calculados anteriormente. Δx_4^o , que é a diferença da capacidade de água livre na zona inferior primária entre os dois instantes de tempo, pode ser estimada como 4,545 mm pela subtração de $0,5 / 0,011$ de $0,45 / 0,011$. Δx_5^o , que é a diferença da capacidade de água livre na zona inferior secundária entre os dois instantes de tempo, pode ser estimada como 14,38 mm através da subtração de $0,84 / 0,0452$ de $0,19 / 0,0452$. A precipitação e o escoamento totais durante este período foram de 113,4 mm e 22,0 mm, respectivamente, como pode ser visualizado na Tabela 6.2.

FIGURA 6.5 SÉRIE DE VAZÕES NO POSTO FLUVIOMÉTRICO DE LÍDICE PARA ESTIMATIVA DE x_3^o

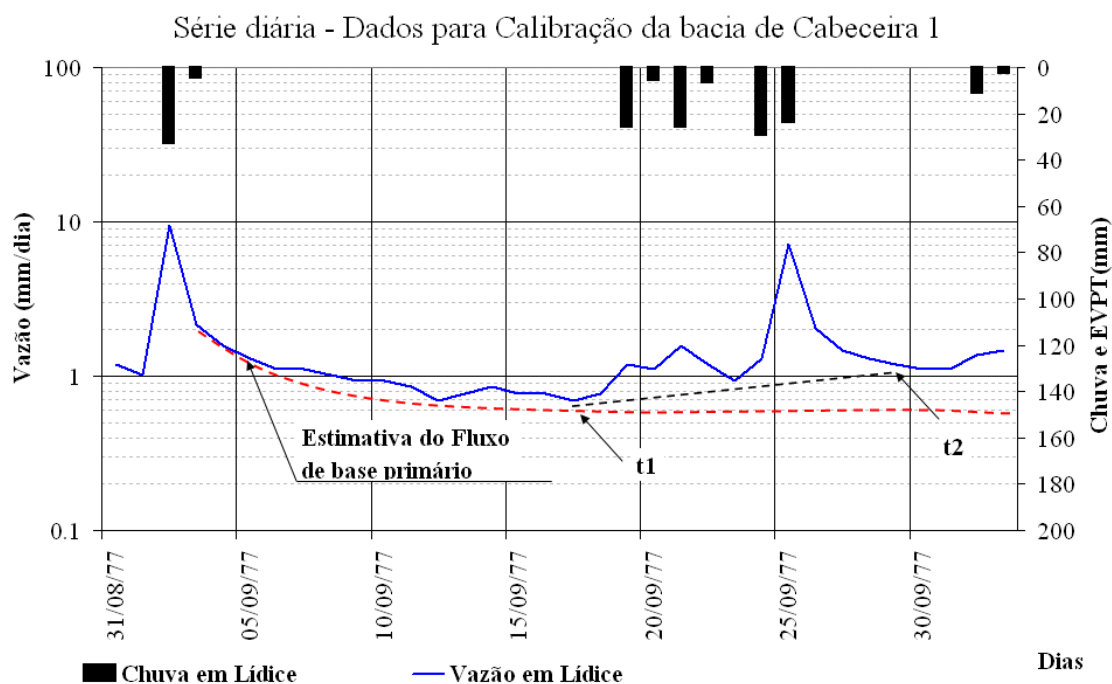


TABELA 6.2 DADOS NECESSÁRIOS PARA A ESTIMATIVA DE x_3^o

DATA (DIA)	CHUVA OBSERVADA (MM)	VAZÃO OBSERVADA (MM)
17/9/1977	0.69	0.00
18/9/1977	0.77	0.00
19/9/1977	1.20	25.40
20/9/1977	1.11	5.00
21/9/1977	1.57	25.00
22/9/1977	1.20	6.00
23/9/1977	0.93	0.00
24/9/1977	1.29	29.00
25/9/1977	7.24	23.00
26/9/1977	2.04	0.00
27/9/1977	1.47	0.00
28/9/1977	1.29	0.00
29/9/1977	1.20	0.00
Total	22.00	113.40

Assim, Δx_3^o é determinado pela seguinte equação:

$$\sum P - \sum Q - \sum ET - \sum GW = 113,40 - 22,00 - 0,0 - \sum GW = 0$$

$$\sum GW = 91,40mm$$

$$\sum GW = \Delta x_3 + \Delta x_4 + \Delta x_5 = 91,40$$

$$\Delta x_3 + 4,545 + 14,38 = 91,40$$

$$\Delta x_3 = 72,47mm$$

A estimativa da capacidade de água sob pressão da zona inferior representa o aumento do armazenamento de água na zona inferior durante o intervalo de tempo selecionado, e não é necessariamente igual à capacidade de água sob pressão da zona inferior. Considera-se que a zona inferior de água sob pressão não estava totalmente vazia no período anterior a chuva e, em decorrência disto, adiciona-se uma pequena porcentagem (10 – 20 %) à Δx_3 para se chegar a uma estimativa razoável para a capacidade de armazenamento no reservatório da camada inferior. Assim, após efetuar

essa correção, chega-se ao valor de 90 mm para o coeficiente x_3 .

6.1.2.2 Estimativa de p_f

O parâmetro da função de percolação (p_f), é o parâmetro que determina a fração de água transferida para o reservatório inferior de água livre (aquífero) através da percolação. Este parâmetro pode ser determinado através da análise do comportamento da bacia após eventos de tempestades que precedem a um longo período seco. Nestas condições, o reservatório de água livre da camada superior é completamente preenchido. Pode-se estimar a quantidade de água que percolou para a camada inferior analisando o fluxo de base após estes eventos. Podem ocorrer duas situações:

- a) o fluxo de base após a precipitação apresenta aproximadamente o mesmo valor que apresentava antes da ocorrência do evento. Isso significa que uma pequena fração de água se dirigiu para zona inferior por percolação e o valor de p_f é baixo. Sugere-se que esse se encontra na faixa entre 0,0 e 0,2;
- b) um aumento considerável no fluxo de base é observado após a ocorrência de uma tempestade. Isso significa que ocorreu um rápido reabastecimento da camada inferior, com alto p_f . Neste caso, sugere-se que p_f assumam valores da ordem de 0,5.

Através da análise dos hidrogramas conclui-se que a bacia do rio Pirai apresenta o comportamento indicado no item (a). Desta forma, optou-se por utilizar p_f igual a 0,2.

6.1.3 Parâmetros Estimados através das Características de Percolação do Solo

Os parâmetros de percolação (e, q) determinam a razão máxima de percolação como uma função da deficiência de umidade da camada inferior. A

demanda de percolação pode ser escrita como:

$$P_d = c_1 \times (1 + e y^q) \times \left(\frac{x_2}{x_2^0} \right) \quad (6.7)$$

$$c_1 = x_4^0 d_l' + x_5^0 d_l'' \quad (6.8)$$

$$y = 1 - \frac{x_3 + x_4 + x_5}{x_3^0 + x_4^0 + x_5^0} \quad (6.9)$$

onde:

c_1 = demanda mínima de percolação quando as zonas superiores e inferiores se encontram totalmente preenchidas;

y = é a razão de deficiência da camada inferior a um determinado instante de tempo.

A forma da curva de percolação é determinada pelo expoente (q) da função de percolação. A razão de percolação possui uma relação linear com (y) quando q é igual a 1. A função possui uma curvatura côncava à medida que q se torna maior que 1,0. A razão de percolação aumenta à medida que a umidade do solo da zona inferior se torna mais deficiente. Quando a zona inferior de água livre esta completamente seca (y é igual a 1) e a camada superior de água livre esta completa, a razão de percolação apresenta um valor máximo. Dentro dessas condições, pode-se simplificar a equação para calculo de P_d :

$$P_d = c_1(1 + e) \quad (6.10)$$

Com base nos valores determinados anteriormente, obtém-se c_1 igual a 8,806 mm/dia. Segundo PECK (1976) pode se estimar a máxima razão de percolação possível em 200 mm/dia, conforme estudos realizados anteriormente. Assim, o parâmetro (e) foi calculado resultando no valor igual a 22. Para q também será utilizado um valor nominal de 1,80, sugerido por PECK (1976).

6.1.4 Parâmetros Usando Valores Nominais

A estimativa da capacidade de água sob pressão na zona superior (x_1^o) a partir de dados hidrológicos é de difícil execução e apresenta alto grau de incerteza. Optou-se, portanto por utilizar um valor médio de 75 mm.

A água livre da camada superior (x_2^o) deve suprir a demanda de evaporação e percolação, antes que qualquer quantidade de água deste reservatório seja transformada em escoamento sub-superficial ou superficial. Esse elemento não segue uma curva de depleção simples, como a de armazenamento de água livre da camada inferior. PECK(1976) sugere que a capacidade deste reservatório varia de 6 a 75 mm, sendo o valor médio aproximadamente 25 mm. Desta forma, optou-se por utilizar inicialmente o valor de 25 mm.

O parâmetro μ determina a fração do fluxo de base que não contribui para o fluxo no canal. Este parâmetro deveria ser maior que zero, quando se soubesse, através de estudos geológicos e hidrológicos, que o fluxo de água do lençol freático para o canal é bastante grande. Apesar dessa informação, na grande maioria dos casos sugere-se utilizar o valor zero como estimativa inicial para μ (PECK 1976).

O parâmetro b_1 é a fração de área da bacia que se torna impermeável quando o volume de água sobre pressão da camada superior é totalmente preenchido. PECK (1976) sugere um valor de 0,01 para a estimativa inicial desse parâmetro.

O parâmetro d_u representa o coeficiente de drenagem lateral instantânea da água livre da camada superior. Inicialmente, será estimado um valor médio de 0,3 para este parâmetro.

6.1.5 Resumo da estimativa manual dos parâmetros

A estimativa inicial dos parâmetros foi realizada através de calibração manual utilizando dados hidrológicos observados ou assumindo valores nominiais. Os parâmetros iniciais estimados encontram-se listados na Tabela 6.3, onde também são

apresentados os valores mínimos e máximos de cada parâmetro, sugeridos por SOROOSHIAN et al (1993). Estes limites foram estipulados para dados diários, no entanto na tabela foram convertidos para horas devido a escala utilizada neste trabalho. Vale observar que o parâmetro β_2 , que representa a fração da bacia permanentemente impermeável, encontra-se acima do limite superior. Como os valores limites apresentados na bibliografia foram definidos para regiões localizadas no hemisfério Norte, as quais apresentam comportamento hidrológico e características físicas diferentes das bacias brasileiras, este será mantido como parâmetro inicial e verificado ao longo da calibração automática.

TABELA 6.3 PARÂMETROS DO MODELO HIDROLÓGICO ESTIMADOS INICIALMENTE E LIMITES INFERIORES E SUPERIORES

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	VALOR ESTIMADO	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR
x_1^0 (mm)	Res. capilar superior	75	10	150
x_2^0 (mm)	Res. de água livre superior	25	10	75
x_3^0 (mm)	Res. capilar inferior	90	75	400
x_4^0 (mm)	Res. de água livre 1º inferior	371	50	1000
x_5^0 (mm)	Res. de água livre 2º inferior	105	10	300
d_u (hora ⁻¹)	Coef. de drenagem camada superior	0,0125	0,0083	0,017
d_1' (hora ⁻¹)	Coef. de drenagem 1º da camada inferior	0,000458	0,000041	0,00083
d_1'' (hora ⁻¹)	Coef. de drenagem 2º da camada inferior	0,0018	0,00083	0,0104
ε (adim.)	Coef. da função de percolação	22	5	250
θ (adim.)	Exp. da função de percolação	1,8	1,1	4
p_f (fração)	Água percolada para os res. de água livre inferior	0,2	0	0,6
μ (fração)	Fluxo base que constitui recarga do aquífero	0,0	0,0	1,0
β_1 (fração)	Área ocasionalmente impermeável	0,01	0,0	0,2
β_2 (fração)	Fração da bacia permanentemente impermeabilizada	0,11	0	0,1

6.2 CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA

A implementação de um método automático de calibração requer a definição de alguns componentes:

- a) série histórica de dados hidrológicos;

- b) função objetivo;
- c) procedimento automático de busca de parâmetros (algoritmo de otimização);
- d) verificação (testes para determinar o grau de incerteza do modelo).

Estes componentes foram descritos em detalhe no item 2, os dados hidrológicos foram apresentados no item 5 e neste item são descritos os processos da calibração automática, além de apresentar os principais resultados obtidos.

6.2.1 Série histórica de dados de chuva e vazão

Para se obter parâmetros razoáveis a partir da calibração automática é aconselhável que a série de dados históricos contemple o maior número de eventos possível, abrangendo períodos úmidos, períodos secos e períodos com vazões próximas da média de longo termo. É claro que esse é o quadro desejável, mas o que se verifica na prática é uma grande dificuldade de se encontrar dados históricos simultâneos (dados de chuva, vazão e evapotranspiração) de boa qualidade cobrindo períodos longos.

A calibração dos parâmetros do modelo hidrológico deve ser realizada de preferência utilizando séries históricas de dados hidrológicos com a mesma resolução temporal da aplicação do modelo em tempo real, ou seja, séries com resolução horária. Os maiores problemas encontrados na utilização destas séries foram:

- a) curto período de dados disponíveis: encontram-se disponíveis dados horários referentes ao período de novembro de 2002 a dezembro de 2003, ou seja, 14 meses de dados;
- b) baixa qualidade dos dados: as séries apresentam um grande número de falhas, devido ao fato de terem sido coletadas logo após a instalação dos equipamentos, estando estes ainda em período experimental. Desta forma, para algumas sub-bacias não foi possível utilizar a série completa devido ao alto grau de incerteza de alguns períodos da série.

Os dados de evapotranspiração foram obtidos de dados climatológicos estimados para município localizado próximo a área de estudo. A chuva média por sub-bacia foi estimada através de média aritmética de postos de observação no interior e próximos de cada sub-bacia. Este procedimento não é recomendado para áreas que apresentam efeito orográfico e, portanto, deve ser objetivo de estudo mais detalhado no futuro. As séries de vazão foram obtidas através da leitura de níveis e das curvas de descarga das estações localizadas nas seções dos rios ou através do balanço hídrico dos reservatórios. As principais características dos dados utilizados e metodologias empregadas foram apresentadas no item 5.

6.2.2 Função objetivo

A função objetivo foi denominada de “Funk”, nomenclatura usada no algoritmo de otimização da calibração automática, e representa a ponderação entre viés e variância, isto é, a função objetivo minimiza simultaneamente a média das diferenças entre as vazões observadas e calculadas e a média do desvio padrão das mesmas. Quanto mais próximo de zero for o valor da função objetivo melhor será a calibração. O cálculo desta função é realizado pela fórmula abaixo.

$$Funk(\mathbf{q}) = 0,5 \times \left(\frac{sR(\mathbf{q})}{sQ_t^{obs}} + \left| \frac{\bar{R}(\mathbf{q})}{\bar{Q}_t^{obs}} \right| \right) \quad (6.11)$$

Onde:

Q_t^{obs} = Dados observados na bacia hidrográfica no tempo t ;

$R(\mathbf{q})$ = Diferença entre os dados observados e os dados simulados utilizando o conjunto de parâmetros (\mathbf{q}) .

$\bar{R}(\mathbf{q})$ = Média de $R(\mathbf{q})$;

\bar{Q}_t^{obs} = Média de Q_t^{obs} ;

$sR(\mathbf{q})$ = Desvio padrão de $R(\mathbf{q})$;

sQ_t^{obs} = Desvio padrão de Q_t^{obs} ;

6.2.3 Algoritmo de otimização – “Método *Simplex* Modificado”

6.2.3.1 Descrição geral do Método *Simplex* Modificado

Para a calibração automática, utilizou-se nesse trabalho o Método *Simplex* Modificado (MSM), desenvolvido por NELDER e MEAD (1965). Este método foi escolhido por ter sido extensivamente utilizado na calibração dos parâmetros do modelo hidrológico de Sacramento, apresentando resultados satisfatórios.

O Método *Simplex* Modificado objetiva encontrar o mínimo (ou máximo) de uma função de mais de uma variável independente. Este método surgiu de modificações realizadas no método *simplex*, as quais permitiram obter um ponto ótimo estacionário com suficiente precisão e clareza, além de um desenvolvimento mais rápido do *simplex* em direção ao ótimo (ANDRADE; CUSTODIO, 1996). Neste método, também é possível alterar o tamanho e a forma do *simplex*.

Um *simplex* é uma figura geométrica em n dimensões, constituído de $N+1$ pontos. Cada dimensão corresponde a uma variável a ser otimizada. Um *simplex* em duas dimensões é um triângulo, em três dimensões é um tetraedro e assim sucessivamente. Em problemas multidimensionais de otimização, o usual é fornecer ao algoritmo um ponto de partida, contendo os parâmetros iniciais (n variáveis). A partir daí o algoritmo deve seguir automaticamente através de uma topografia complexa N -dimensional até encontrar ao menos um mínimo local. No método *simplex* modificado, deve-se fornecer não somente um ponto de partida, mas $N+1$ pontos, definido como o *simplex* inicial. Desta forma, como dado de entrada do algoritmo deve-se fornecer uma matriz, denominada matriz *guess*, de dimensões $(N+1 \times N)$. A primeira linha da matriz contém os parâmetros iniciais estimados durante a calibração manual. Na linha seguinte estes são replicados, com exceção do primeiro parâmetro, o qual sofre uma pequena variação, imposta pelo calibrador. Na terceira linha o segundo parâmetro é variado e assim procede-se sucessivamente até a linha $N+1$, onde o último

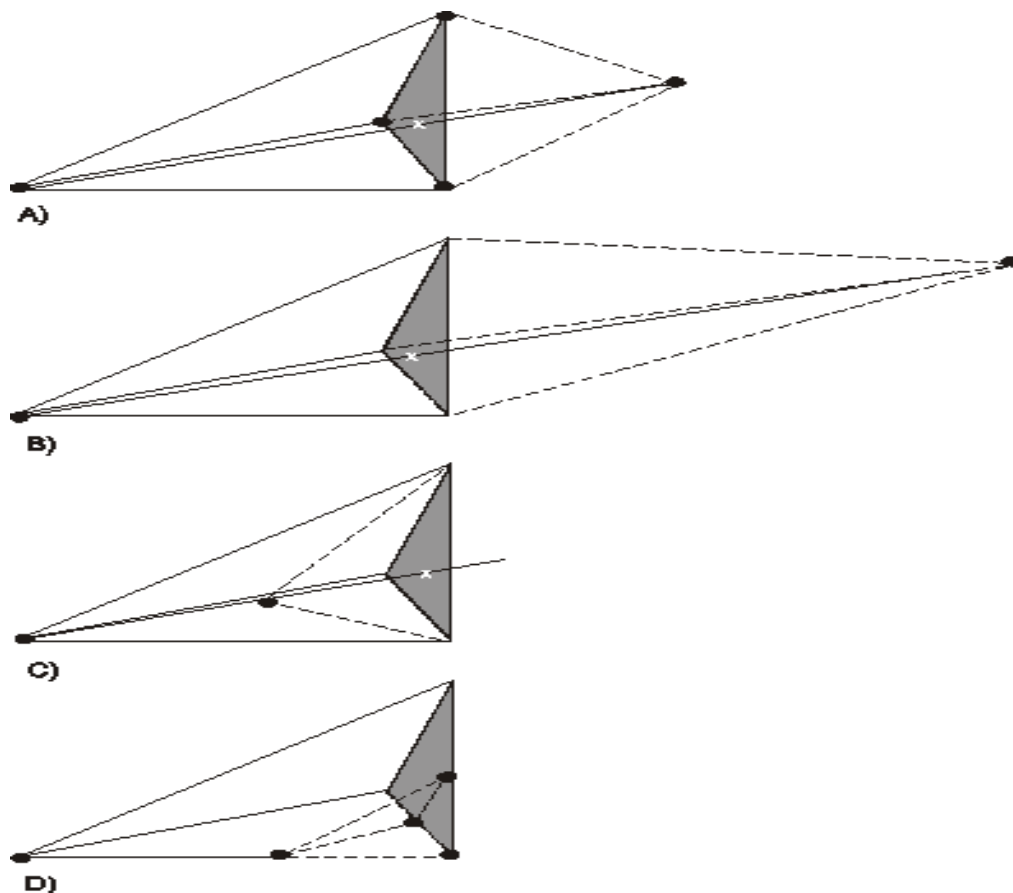
parâmetro é perturbado.

A partir da definição desse espaço inicial, o método *Simplex* Modificado realiza uma série de passos, a maioria dos quais movendo o ponto do *simplex* onde a função objetivo encontra-se no pior valor (máximo ou mínimo) para a face oposta do *simplex*, onde se encontra um ponto mínimo. Este procedimento é denominado passo de reflexão. Calcula o valor da função objetivo, se esta for melhor do que a pior encontrada no passo anterior parte-se para um novo ponto dobrando o passo de reflexão. Caso seja pior realiza-se o passo de contração, o qual ocorre no sentido contrário ao passo de reflexão.

A Figura 6.6 (PRESS et. al, 1986) apresenta os possíveis movimentos para um passo dentro do método *Simplex* Modificado. O *simplex* desenhado com linhas contínuas representa a sua forma antes de se realizar um movimento. Após o movimento, o *simplex* é representado por linhas tracejadas. Na Figura (a) representa uma reflexão se afastando do ponto mais alto, (b) uma reflexão e uma expansão se afastando do ponto mais alto, (c) uma contração ao longo de uma dimensão a partir do ponto mais alto e (d) uma contração ao longo de todas as dimensões em direção ao ponto mais baixo. Uma seqüência apropriada de tais passos (movimentos) irá sempre convergir em direção a um mínimo da função.

O algoritmo segue esta seqüência até atingir o critério de finalização. No processo de minimização, em um espaço multidimensional, recomenda-se reiniciar o processo de minimização a partir do ponto onde se encontrou um mínimo. Ou seja, utiliza-se o vetor de parâmetros otimizados como novo ponto de partida para construir uma nova matriz *guess* e reinicializa-se o algoritmo. Segundo NELDER e MEAD (1965) este procedimento deve ser realizado devido à influência do tamanho e orientação do *simplex* inicial sobre a velocidade de convergência. No entanto o processo de reinicialização não deve despendar muito tempo computacional, uma vez que a rotina está sendo reiniciada a partir de um ponto de convergência. Desta forma, o número máximo de iterações pode ser bastante baixo.

FIGURA 6.6 ALGORITMO SIMPLEX MODIFICADO

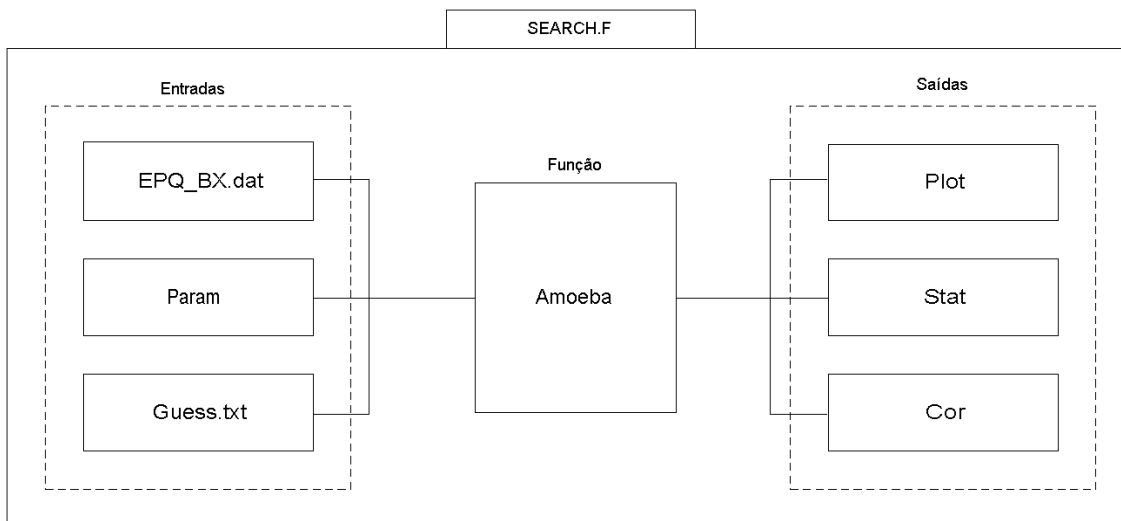


6.2.3.2 Implementação para calibração do Modelo de Sacramento

Serão calibrados 16 parâmetros, sendo 14 correspondentes ao módulo bacia e 2 ao módulo canal. O algoritmo foi implementado através da rotina **AMOEBA** (PRESS et. al, 1986) a qual realiza a minimização da função $FUNK(x)$, onde x é um vetor 16-dimensional, pelo método *Simplex* Modificado.

A Figura 6.7 mostra um esquema do processo realizado durante a determinação automática dos parâmetros do modelo, com base no algoritmo descrito, apresentando os arquivos de entrada e saída do procedimento.

FIGURA 6.7 ESQUEMA DO PROCESSO REALIZADO DURANTE A DETERMINAÇÃO AUTOMÁTICA DOS PARÂMETROS DO MODELO



A seguir é apresentado o conteúdo de cada um dos arquivos:

a) arquivos de entrada:

- Arquivo EPQ_BX.DAT – Contém a série histórica de dados de vazão, chuva e evapotranspiração, todos em unidade de mm/hora;
- Arquivo PARAM – arquivo com o período de calibração, características da bacia, condições iniciais e parâmetros; sendo que os parâmetros são substituídos durante o processo de calibração pelos parâmetros perturbados do arquivo *guess*;
- Arquivo GUESS.TXT – contém a matriz dos parâmetros. O número de parâmetros que se deseja calibrar é igual a 16, portanto a matriz terá dimensões 17x16, e é gerada como descrito anteriormente.

b) arquivos de saída:

- Arquivo PLOT.DAT –. Série temporal dos fluxos e armazenamento calculados pelo modelo. Esta saída é sobre-escrita a cada nova iteração da calibração, sendo que no final do processo só restará os dados obtidos com os parâmetros calibrados;
- Arquivo STAT –. Contém a matriz de parâmetros para cada iteração. A última matriz corresponde ao conjunto de parâmetros calibrados. A matriz tem 18 linhas, sendo que os parâmetros podem ser ligeiramente diferentes

de linha para linha. O parâmetro calibrado pode ser obtido da seleção de uma linha ou então da média das 17 linhas;

- Arquivo COR -. Arquivo que mostra as duas principais estatísticas da calibração para cada iteração. "funk"=estatística da função objetivo e "cor"=correlação entre a vazão simulada e observada. O valor de "cor" varia entre -1 e +1, sendo que a calibração será tanto melhor quanto mais próximo de 1 for este valor.

No caso deste estudo foram utilizados dois critérios de finalização, sendo eles:

- a) convergência da função objetivo: considera que o procedimento deve ser encerrado quando o algoritmo não for mais capaz de causar mudanças significativas no valor da função objetivo, ou seja, quando a distância percorrida naquele passo for menor que alguma tolerância, definida pelo calibrador. Neste caso foi definido o valor de 0,0001;
- b) número máximo de iterações: Representa o número máximo de iterações que o algoritmo pode realizar, sendo que este pode ser finalizado antes, desde que o critério (a) seja atingido. Foi definido pela autora para cada calibração, verificando o tempo computacional e os ganhos no valor da função objetivo. Neste trabalho variou de 200 a 5000.

É importante mencionar que no Método *Simplex* Modificado, utilizado neste trabalho, foram impostas condições topológicas que não permitem que o algoritmo produza valores negativos para os parâmetros. Os valores mínimos adotados para os parâmetros do Modelo de Sacramento foram: 10,0 para x_1^0 e x_3^0 ; 1,0 para x_2^0 , x_4^0 , x_5^0 , e qc ; 10^{-5} para d_u , d_u , d'' , e e b_2 ; e 0,0 para p_f , m , e b_1 . Pode-se notar que o expoente da função de percolação (qc), pode assumir valores menores que um, mas foi fixado somente valores maiores que um, para concordar com a teoria de infiltração exponencial de Horton.

6.3 ALTERAÇÕES NO MODELO DE SACRAMENTO

Durante a calibração da sub-bacia de Cabeceira 1, localizada na sub-bacia do rio Pirai até a barragem de Tocos, a primeira dificuldade encontrada ocorreu devido ao volume de chuva observado nos meses secos ser bastante inferior ao volume de vazão observada, como já mencionado na análise hidrológica das séries apresentada no item 5. Durante as tentativas de calibração do modelo observou-se que os reservatórios de água secavam antes que o período seco chegasse ao fim. Este comportamento é característico de regiões de serra, onde o fluxo de base apresenta condições particulares não consideradas durante a formulação do Modelo de Sacramento. Desta forma, caso a formulação do Modelo de Sacramento fosse aplicada diretamente a esta sub-bacia, o modelo não teria memória suficiente para manter a vazão de base até o final da estação seca.

No caso de uma bacia hidrográfica onde toda a umidade desta é retirada através da evapotranspiração ou do escoamento fluvial e/ou adicionada através dos eventos chuvosos, o balanço hídrico não precisa considerar o escoamento subterrâneo. No entanto, este costuma ocorrer mesmo que não seja facilmente identificável no hidrograma. Visando garantir a manutenção da vazão de base com magnitude semelhante à registrada nos postos fluviométricos durante toda a estação seca foi realizada uma alteração na formulação do modelo de Sacramento.

Supõe-se que a manutenção da vazão de base elevada durante vários meses em bacias de serra ocorrem devido a dois processos físicos:

- a) armazenamento nas camadas não saturadas do solo – esta hipótese esta prevista na formulação do Modelo de Sacramento;
- b) contribuições das camadas saturadas que não estão confinadas às áreas limitadas pelos divisores de água. Este processo foi adicionado à formulação do Modelo de Sacramento neste trabalho.

A contribuição das camadas saturadas que não estão confinadas às áreas limitadas pelos divisores de água foi denominada “vazão de serra”. Este valor

corresponde a uma vazão em mm/hora adicionada as vazões provenientes do fluxo de base suplementar e primário em cada intervalo de tempo, mantida fixa durante todas as estações do ano.

Para a bacia de Cabeceira 1 a vazão de serra foi estimada através da análise simplificada do balanço hídrico da bacia hidrográfica. Posteriormente foram testados diversos valores durante a calibração dos parâmetros do modelo e foi selecionado aquele que apresentou melhores resultados. Uma descrição detalhada da calibração desta bacia é apresentada no Apêndice 4.

6.4 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO

A calibração automática foi realizada para três bacias da área de estudo, no entanto neste item será apresentado o resultado obtido somente para a sub-bacia denominada sub-bacia de Cabeceira 2. Os resultados obtidos para a sub-bacia de Cabeceira 1 e Intermediária 1 podem ser verificados no Apêndice 4.

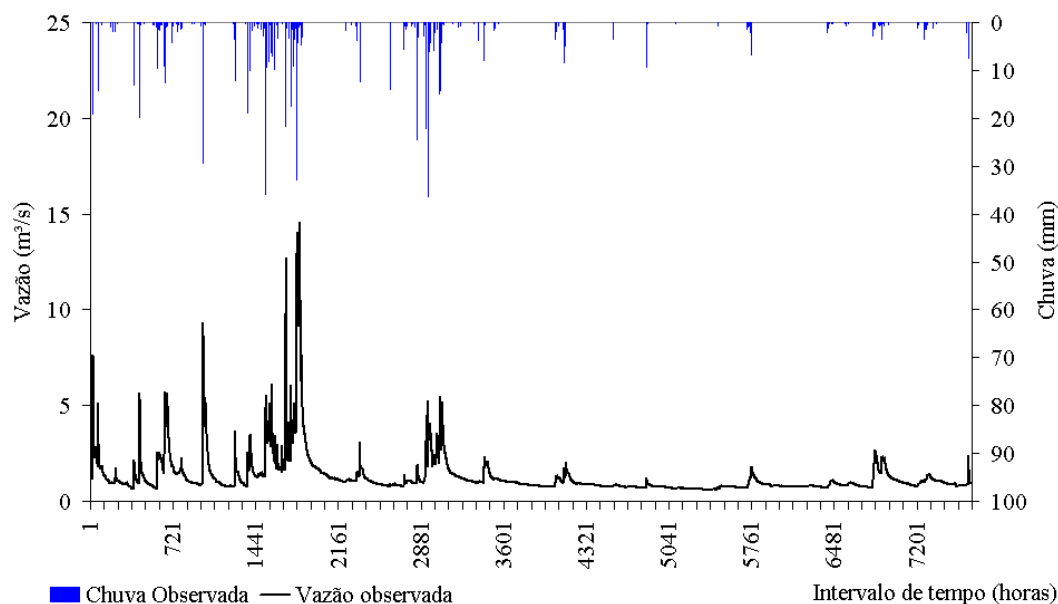
A sub-bacia Cabeceira 2 corresponde à sub-bacia B14 da figura 3.5 abrangendo uma área de 190,2 km². A exutória da bacia corresponde à estação telemétrica de Morsing. As principais características da sub-bacia B14 podem ser verificadas no Apêndice 1. A série hidrológica utilizada na calibração pode ser visualizada na Figura 6.8, onde foram plotados os dados de chuva e vazão observadas para o período de 15/11/2002 às 00:00 horas à 30/09/2003 às 23:00 horas. Esta série foi descrita em detalhes no item 5, sendo que o sub-item 5.3.4 descreveu os dados de vazão, e o sub-item 5.5.2 a consistência hidrológica de dados de chuva e vazão, consecutivamente. Segundo o texto, a série de dados apresentou inconsistências para o período pós-outubro de 2003, e por isso este foi descartado. A série final disponível para calibração apresenta aproximadamente 11 meses de dados horários, abrangendo estações secas e chuvosas.

A verificação da calibração do modelo será realizada através de ferramentas gráficas e estatísticas, ambas descritas no item de revisão bibliográfica. As estatísticas

de acerto podem ser verificadas na tabela 6.4. Verifica-se que esta bacia apresentou resultados satisfatórios, uma vez que o modelo é capaz de representar 82,54 (coeficiente de Nash) da variância natural observada na bacia, mesmo em escala horária.

FIGURA 6.8 SÉRIE DE DADOS HIDROLÓGICOS

Dados hidrológicos para calibração - sub-bacia de cabeceira 2



As Figuras 6.9, 6.10 e 6.11 fornecem subsídios para análise gráfica da calibração. Na Figura 6.9 pode-se observar que o modelo foi capaz de reproduzir a fase do hidrograma, o período de recessão da série, e a intensidade dos picos de vazão, apresentando problemas localizados provavelmente devido a erros nos dados monitorados e na curva de descarga definida para a estação. O gráfico da Figura 6.11 indica problemas com as vazões com valores na faixa de 5 a 12 m³/s, as quais sofrem a tendência de serem subestimadas pelo modelo. Este problema decorre de erros na definição da curva de descarga da estação para esta faixa de vazão, que se apresenta sobre a forma de uma relação linear entre o nível e a vazão (ver Figura 5.17). Caso a curva de descarga fosse melhor definida, o cálculo da vazão observada seria mais preciso e a vazão calculada pelo modelo hidrológico se aproximaria mais da observada na bacia.

TABELA 6.4 VERIFICAÇÃO ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO MODELO

CRITÉRIO	VALOR	CRITÉRIO	VALOR
Período de dados utilizados	15/11/2002 a 30/9/2003	Relação de Volume	99,9648
FUNK	0,20896	Relação de vazões de pico	102,4875
Correlação	0,9085	Relação da vazão máxima	95,8104
Media dos resíduos	0,0004	Relação da duração de cheia	111,1111
Desvio padrão dos resíduos	0,4698	Relação da duração de estiagem	103,3094
Resíduo relativo	0,0352	Media vazão observada (mm/h)	0,024009
BIAS	-0,2296	Media vazão calculada (mm/h)	0,024009
Covariância	1,0885	Desvio vazão observada (mm/h)	0,021705
Erro médio quadrático	0,4791	Desvio vazão calculada (mm/h)	0,019776
Coefficiente de Nash	82,5407		

FIGURA 6.9 HIDROGRAMAS E PLUVIOGRAMA OBSERVADOS E HIDROGRAMA CALCULADO DA SUB-BACIA DE CABECEIRA 2

Hidrograma e pluviograma da sub-bacia de cabeceira 2

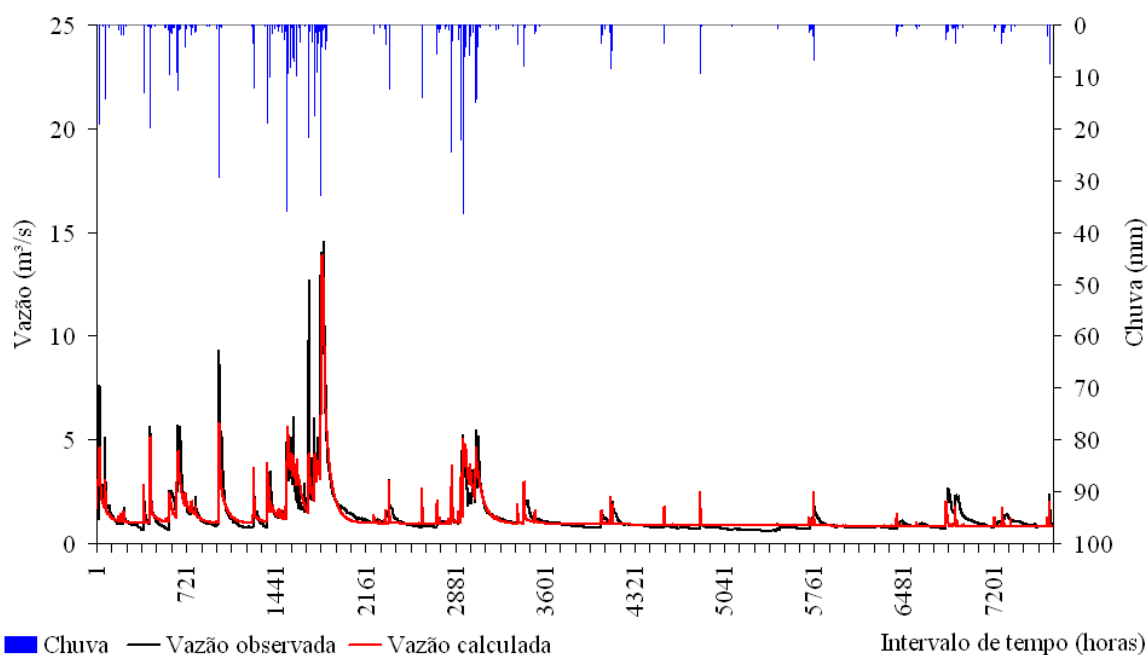


FIGURA 6.10 CURVA DE PERMANÊNCIA DA SUB-BACIA CABECEIRA 2

Permanência das vazões - Sub-bacia Cabeceira 2

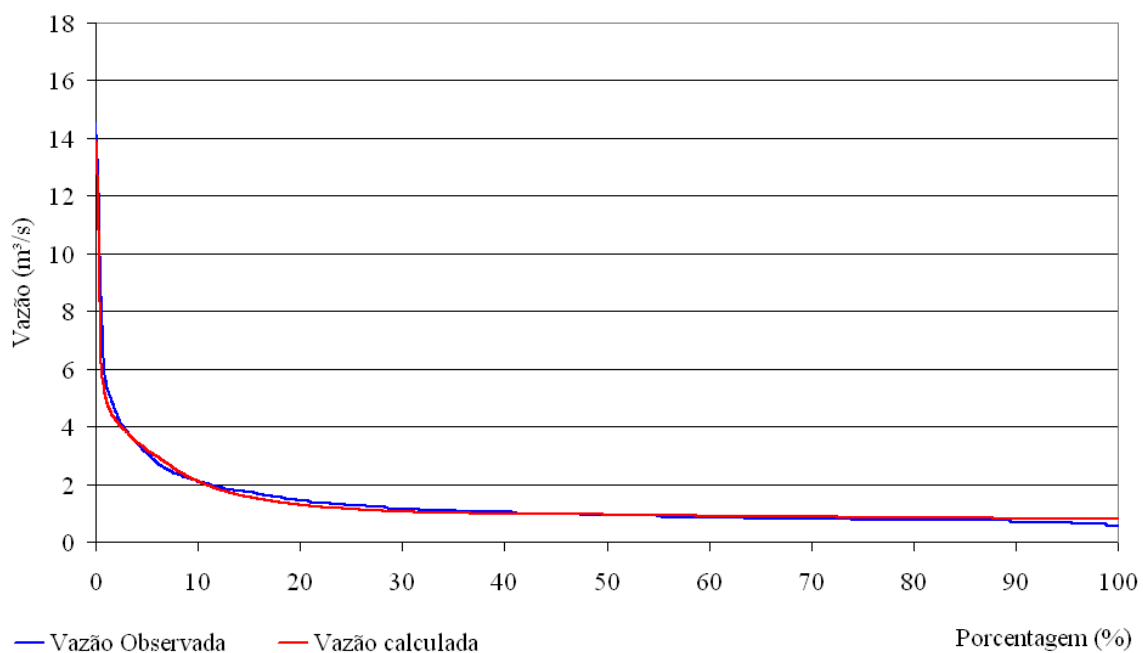
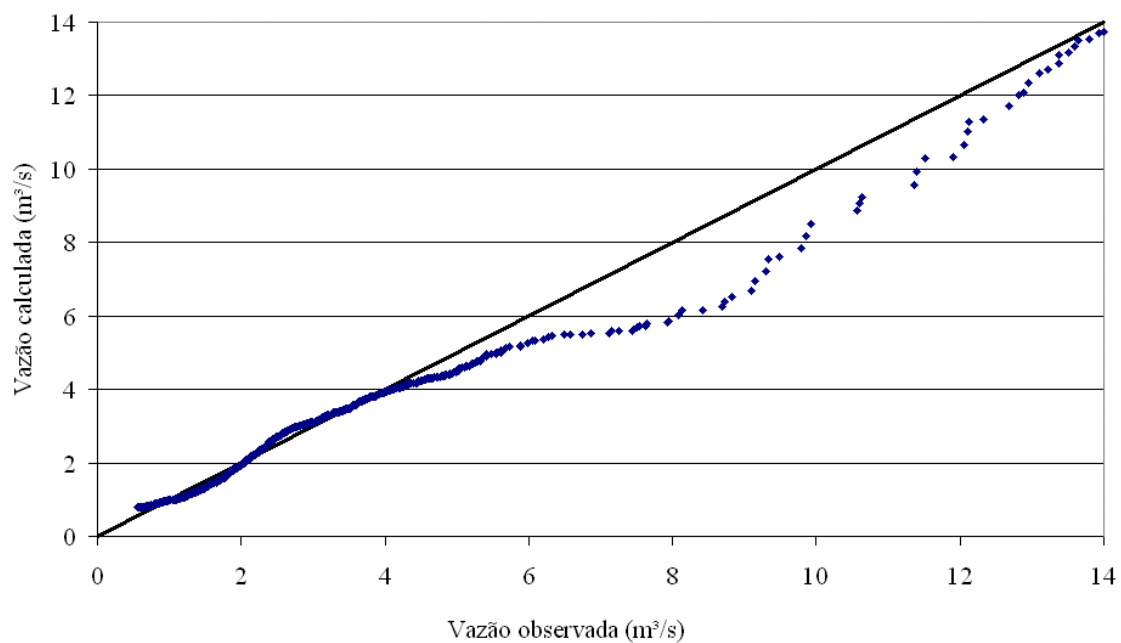


FIGURA 6.11 VAZÕES CLASSIFICADAS CALCULADAS VERSUS OBSERVADAS SUB-BACIA DE CABECEIRA 2

Vazões classificadas - Sub bacia 2



6.5 SIMULAÇÃO DA PREVISÃO

Neste item são apresentadas algumas simulações realizadas com o objetivo de avaliar os resultados da previsão produzidos pelo SIPOP utilizando os parâmetros do modelo hidrológico estimados durante a calibração automática e os cenários de previsão de chuva. As previsões aqui analisadas apresentam horizonte de 24 horas e resolução horária e referem-se à sub-bacia de cabeceira do rio Sacra Família.

Foram selecionados alguns eventos na série histórica de dados, para os quais o modelo hidrológico foi executado. As simulações foram realizadas considerando três previsões de chuva diferentes, sendo elas:

- a) chuva zero: considera previsão de chuva zero, ou seja, que durante as 24 horas de previsão não ocorrerá chuva;
- b) chuva máxima: definido com base na análise climatológica da série histórica de precipitação e no estudo de chuvas intensas para o estado do Rio de Janeiro. A metodologia para definição deste cenário encontra-se descrita no Apêndice 2;
- c) chuva observada: como os eventos foram selecionados na série histórica pode-se fazer uma simulação considerando como chuva prevista a chuva observada na bacia hidrográfica. O objetivo é simular uma situação onde se dispõe de uma previsão perfeita de chuva.

A escolha dos eventos foi realizada de forma a avaliar os resultados do modelo em quatro hipóteses diferentes:

- a) evento 1: chuva observada igual a zero;
- b) evento 2: chuva observada bastante inferior a máxima;
- c) evento 3: chuva observada levemente inferior a máxima;
- d) Evento 4: chuva observada maior que chuva máxima. Vale ressaltar que este foi o único evento na série de dados que apresentou esta condição.

A tabela 6.5 apresenta as datas iniciais e finais da previsão para os quatro eventos selecionados na série histórica e a chuva acumulada observada e prevista pelo

cenário de chuva máximo para o período de 24 horas.

TABELA 6.5 EVENTOS HIDROLÓGICOS SELECIONADOS

EVENTO	DATA INICIAL	DATA FINAL	CHUVA ACUMULADA		
			OBS	MÁX	OBS/MÁX
1	28/01/2003 21:00	29/01/2003 21:00	0,0	126,60	0
2	02/12/2002 17:00	03/12/2002 17:00	59,60	136,71	0,43
3	17/01/2003 15:00	18/01/2003 15:00	71,6	82,10	0,87
4	28/01/2003 21:00	29/01/2003 21:00	84,2	82,10	1,02

Os gráficos das Figuras 6.12, 6.14, 6.16 e 6.18 apresentam a vazão observada e as vazões simuladas utilizando como dados de entrada as 3 previsões de chuva diferentes. As primeiras 24 horas do gráfico correspondem a um período de monitoramento onde são plotadas somente as vazões observadas pelas estações telemétricas e previstas pelo modelo utilizando a chuva observada. As últimas 24 horas do gráfico apresentam os dados de previsão utilizando os diferentes dados de chuva. Nos gráficos das Figuras 6.13, 6.15, 6.17 e 6.19 foram plotadas a chuva observada e o cenário de chuva máxima de cada evento. Nestes também foram consideradas 24 horas de dados observados e 24 horas de dados previstos.

A análise dos gráficos do evento 1 (Figura 6.13 e 6.13) permite concluir que o modelo é capaz de representar com bastante perfeição o período de recessão do hidrograma. O que se observa no geral é que os resultados do modelo são bastante satisfatórios quando não há uma mudança brusca nas condições hidrográficas da bacia, ou seja, quando não está ocorrendo chuva e durante o período de previsão também não ocorre chuva. Neste caso o modelo tende a respeitar a tendência da curva de recessão.

A análise dos eventos 2, 3 e 4 permite concluir que durante eventos onde a precipitação é diferente de zero, mesmo quando se utiliza previsão perfeita de chuva, ou seja, chuva observada, o modelo não é capaz de reproduzir com exatidão a fase do hidrograma, ou seja, a subida e a descida deste. No entanto, quando se considera a previsão perfeita de chuva foi possível estimar a vazão de pico do hidrograma. Este fato pode ser claramente visualizado no evento 2.

O evento 4 apresenta chuva observada levemente superior a chuva máxima. Além disso, a chuva observada neste caso encontra-se concentrada nas primeiras horas. Novamente a previsão utilizando a chuva observada conseguiu reproduzir o valor da vazão de pico, apesar de não ter sido capaz de representar a fase do hidrograma. Neste evento a vazão prevista utilizando o cenário de chuva máximo foi menor do que a vazão observada na estação, mesmo apresentando valor de chuva observada acumulada bastante próximo ao da chuva máxima, Isto ocorreu principalmente devido ao fato da chuva observada estar concentrada em apenas algumas horas, apresentando pico de 32,90 mm, enquanto o pico da chuva máxima é de 16,26 mm. Vale lembrar que este evento é o único que apresenta estas características na série histórica de dados.

Com exceção do evento 4, pode-se observar que nos demais eventos analisados os cenários de chuva utilizados na previsão, ou seja, cenário de chuva máxima e cenário de chuva zero, permitem estimar o limite inferior e superior do hidrograma.

Destas análises pode-se destacar que a previsão quantitativa da variável chuva é de grande importância na previsão de vazão, uma vez que as simulações realizadas considerando previsão de chuva perfeita foram capazes de estimar a vazão de pico do hidrograma.

FIGURA 6.12 VAZÕES OBSERVADAS E PREVISTAS - EVENTO 1

Vazões observadas e previstas - Evento 1

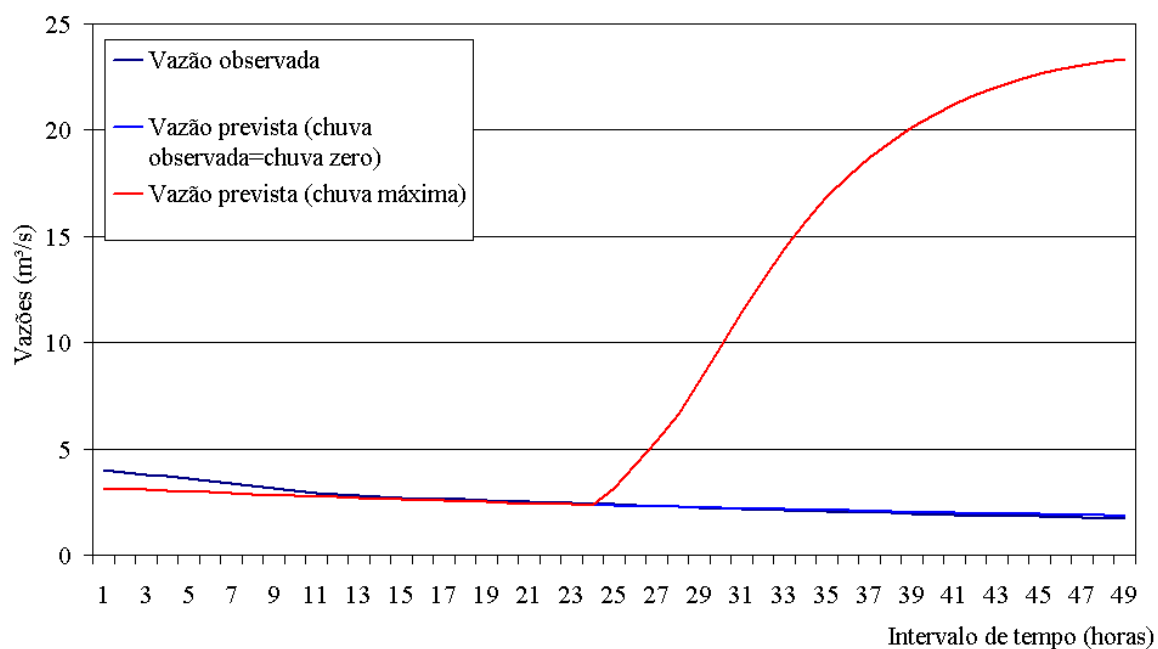


FIGURA 6.13 CHUVA OBSERVADA E CENÁRIO DE CHUVA MÁXIMA - EVENTO 1

Chuva observada e cenário de chuva máxima - Evento 1

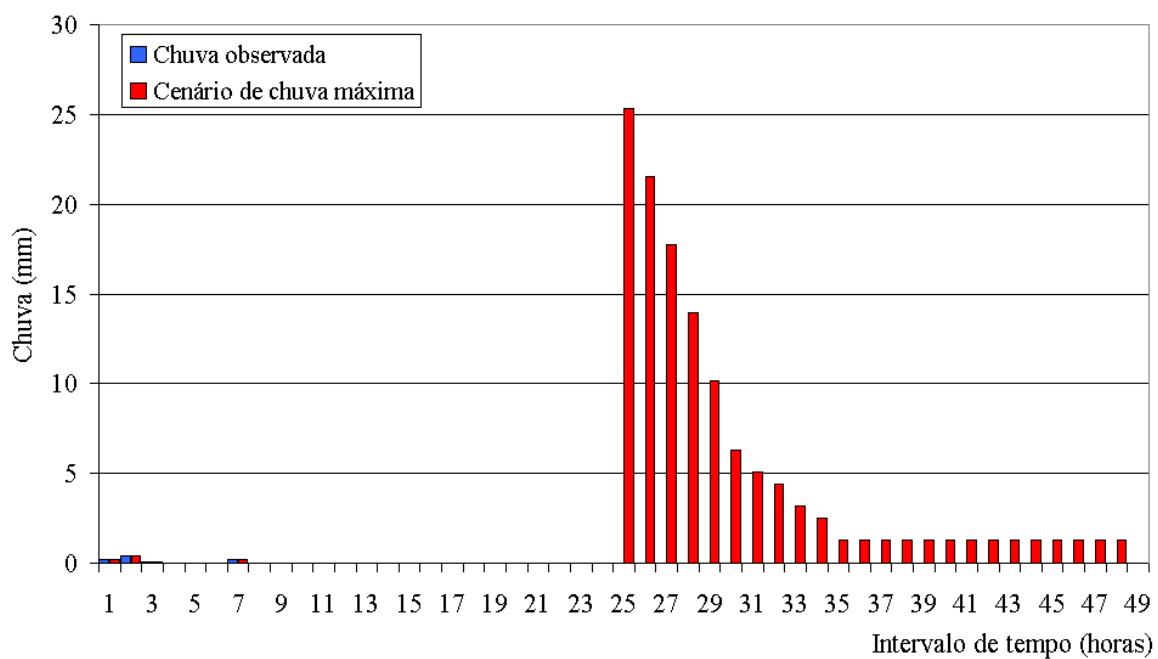


FIGURA 6.14 VAZÕES OBSERVADAS E PREVISTAS - EVENTO 2

Vazões observadas e previstas - Evento 2

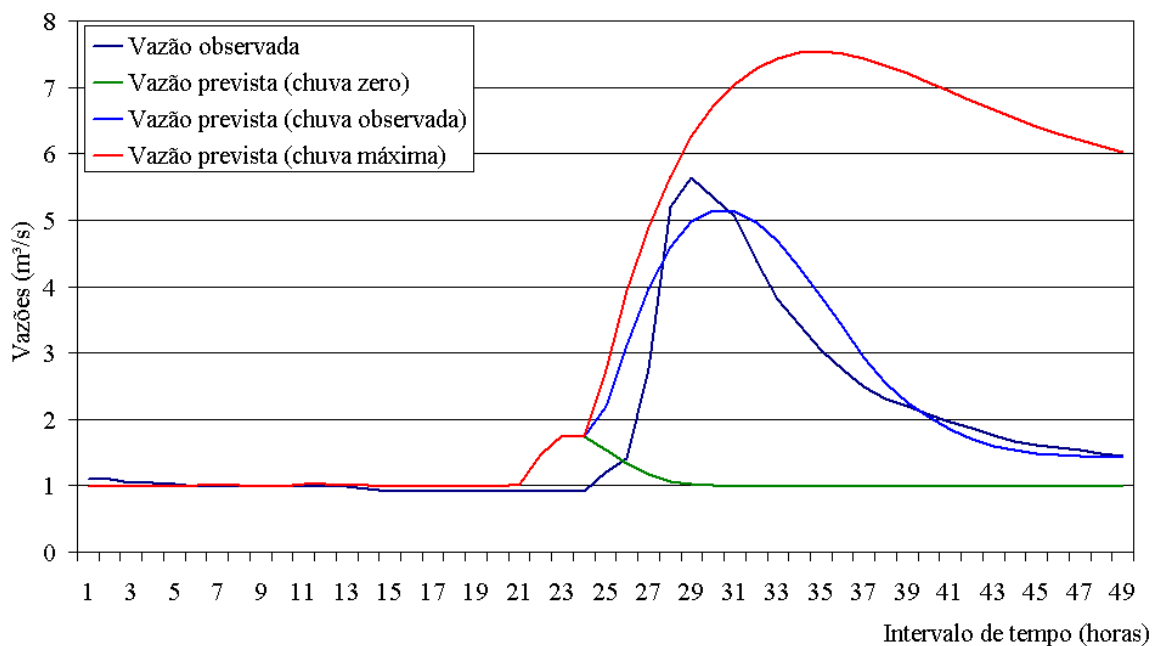


FIGURA 6.15 CHUVA OBSERVADA E CENÁRIO DE CHUVA MÁXIMA - EVENTO 2

Chuva observada e cenário de chuva máxima - Evento 2

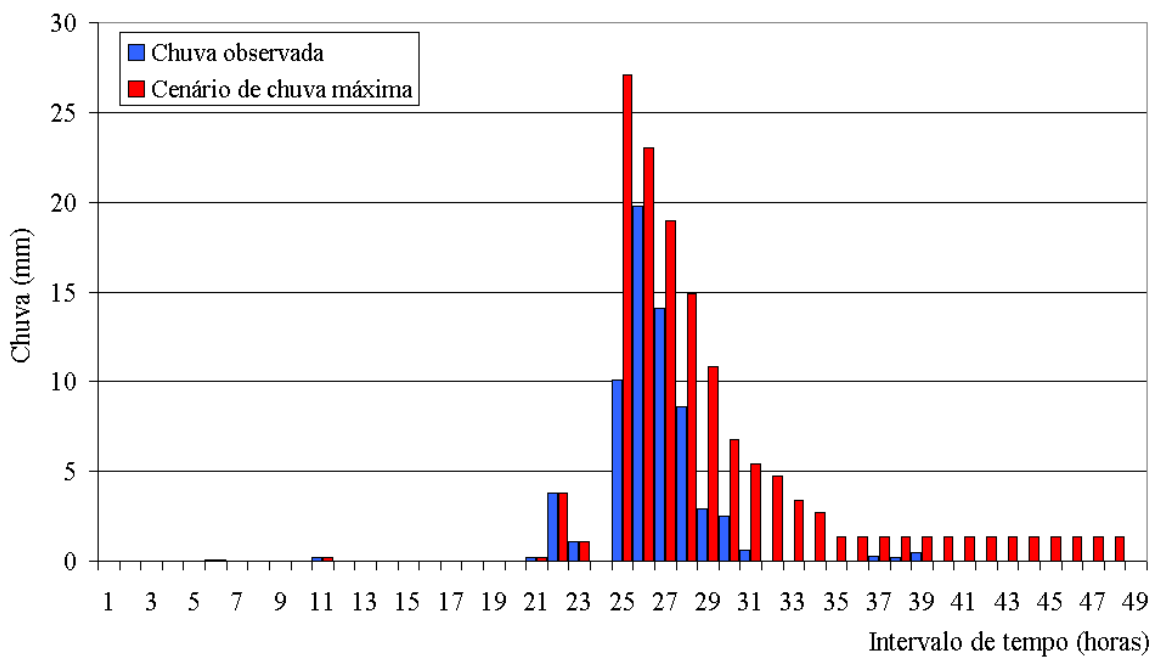


FIGURA 6.16 VAZÕES OBSERVADAS E PREVISTAS - EVENTO 3

Vazões observadas e previstas - Evento 3

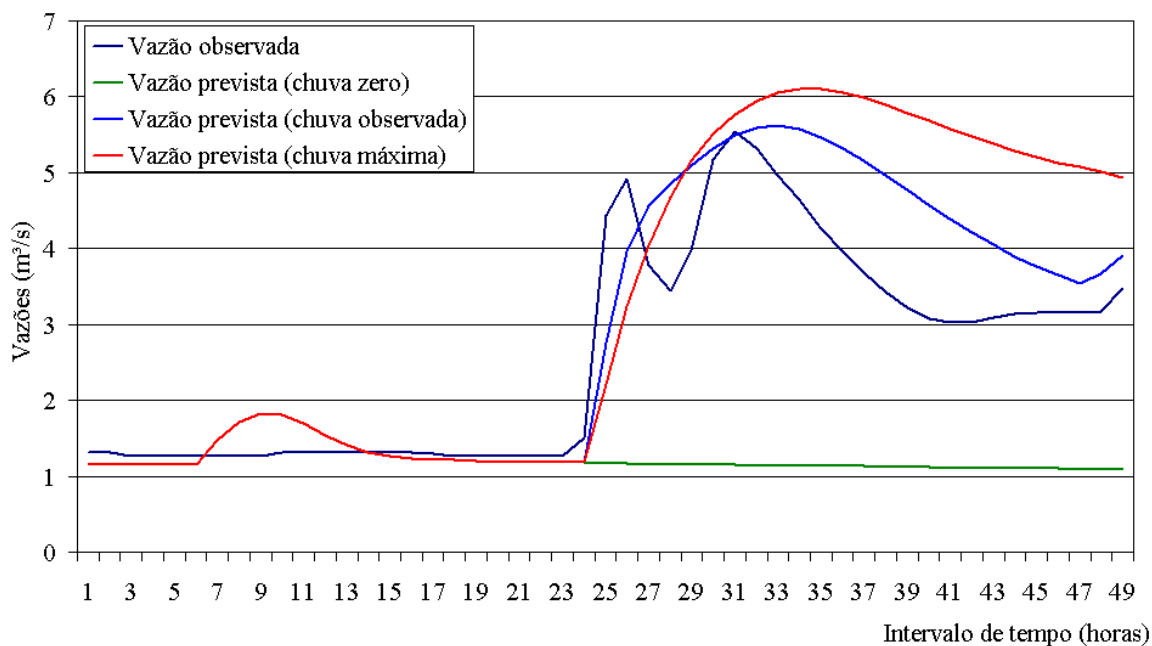


FIGURA 6.17 CHUVA OBSERVADA E CENÁRIO DE CHUVA MÁXIMA- EVENTO 3

Chuva observada e cenário de chuva máxima - Evento 3

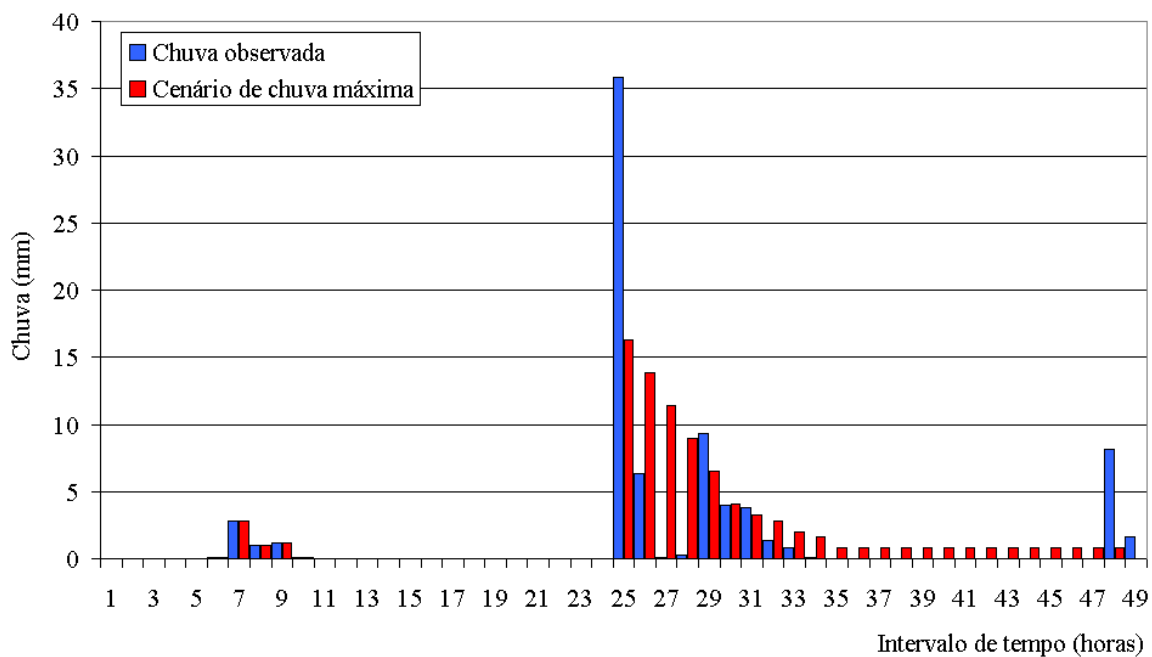


FIGURA 6.18 VAZÕES OBSERVADAS E PREVISTAS - EVENTO 4

Vazões observadas e previstas - Evento 4

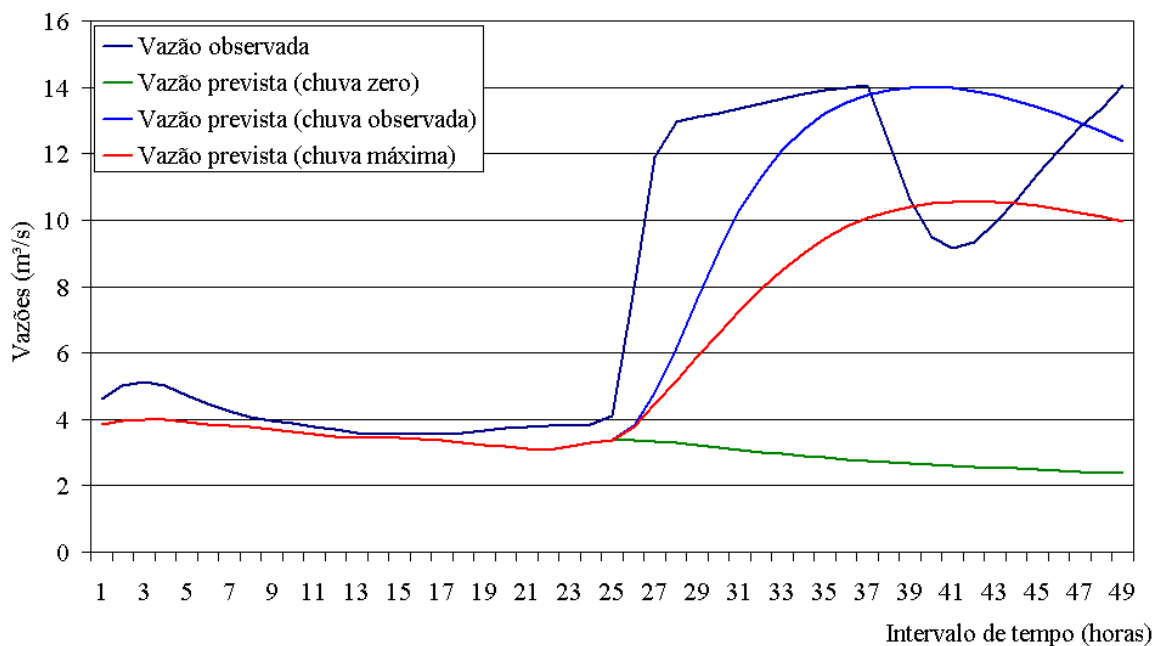
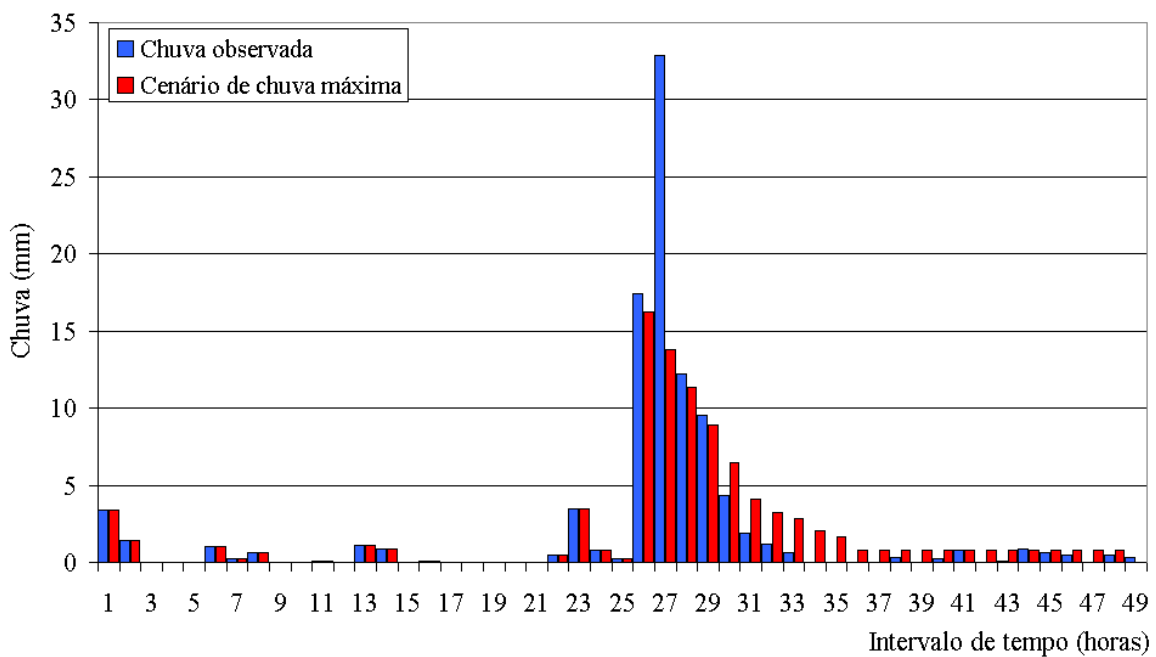


FIGURA 6.19 CHUVA OBSERVADA E CENÁRIO DE CHUVA MÁXIMA- EVENTO 3

Chuva observada e cenário de chuva máxima - Evento 4



7 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

O objetivo principal deste trabalho foi o desenvolvimento e implementação de um sistema de previsão hidrológica e operação hidráulica em tempo real para suporte a operação de reservatórios, buscando minimizar os riscos de enchentes e otimizar a operação. Este sistema é constituído por uma rede de coleta de dados hidrológicos em tempo real, banco de dados, aplicativos de processamento dos dados e interface gráfica do usuário. O modelo hidrológico utilizado foi o Sacramento, amplamente utilizado para previsões em tempo real, na versão programada por Alexandre Guetter. Os modelos de operação hidráulica e balanço hídrico dos reservatórios foram desenvolvidos pela autora em FORTRAN.

O desenvolvimento e a implantação de um sistema computacional de previsão hidrológica e operação hidráulica requer a execução de um conjunto de atividades, sendo que cada uma destas influi no correto funcionamento do sistema e na qualidade dos resultados obtidos. As principais conclusões e recomendações que foram obtidas durante a execução destas atividades são apresentadas na seqüência.

a) descrição detalhada da área de estudo;

Realizou-se um estudo detalhado da área de aplicação do modelo hidrológico, buscando descrever as características físicas da região, as estruturas hidráulicas existentes, suas operações e levantar os principais problemas encontrados devido a eventos extremos de cheia e estiagem. Esta etapa é de grande importância, pois identifica os principais pontos de controle da bacia, para os quais a disponibilidade de dados hidrológicos monitorados e previstos influencia nas tomadas de decisão.

b) implantação de um sistema de coleta de dados em tempo real;

Esta atividade foi realizada pelo SIMEPAR e não fez parte do escopo deste trabalho, no entanto é de grande importância uma vez que o desempenho dos sistemas de previsão de vazão depende muito da qualidade dos dados monitorados, os quais servem de entrada para os modelos de previsão. Conseqüentemente, a consistência em

tempo real dos dados hidrológicos é um requisito importante para a implantação dos sistemas de previsão. Os algoritmos de consistência de dados em tempo real devem detectar o dado falho, excluir o seu uso, e preencher a falha através de um algoritmo de contingências.

c) Arquitetura e implantação do banco de dados;

Um Banco de Dados eficiente deve disponibilizar as informações de forma estruturada, segura e íntegra. Desta forma, a construção de um Banco de Dados envolve o levantamento cuidadoso de requisitos e um projeto de dados adequado. Estas etapas são fundamentais para facilitar a etapa de implementação do banco e permitir que a rápida manipulação das informações seja realizada de forma rápida e segura.

Neste trabalho foram armazenados todos os dados de entrada e saída do modelo de previsão, assim como todos os parâmetros do sistema.

d) aquisição dos dados hidrometeorológicos e análise de consistência destes dados;

A disponibilidade de dados hidrometeorológicos de alta qualidade é de grande importância na implementação de sistemas de previsão, pois estes possibilitam o entendimento dos processos envolvidos no balanço hídrico da bacia e permitem a calibração dos parâmetros do modelo hidrológico. O maior problema encontrado neste trabalho foi o pequeno período de dados horários disponíveis e a grande quantidade de falhas da série, fatos que impossibilitaram a realização de uma análise mais apurada das características hidrológicas das sub-bacias hidrográficas.

e) cálculo da chuva média;

A chuva média nas bacias foi calculada através do método da média aritmética. Este método só é recomendado em áreas planas, de pequena área e com grande densidade de estações telemétricas. No entanto, foi utilizado, pois apresenta robustez operacional. Recomenda-se realizar um estudo mais completo para avaliar a viabilidade de aplicação de outros métodos mais precisos de cálculo da chuva média,

como Thiessen, média ponderada ou isoietas, associado com a avaliação da robustez desses métodos no uso em tempo real.

f) calibração e validação dos parâmetros do modelo hidrológico;

A calibração dos parâmetros de modelos hidrológicos conceituais é uma tarefa de difícil execução e altamente influenciada pela qualidade dos dados hidrológicos utilizados. Apesar dos procedimentos de verificação terem mostrado que os parâmetros determinados são válidos, o procedimento de calibração deve ser refeito à medida que mais dados horários forem sendo disponibilizados. Além disso, este procedimento deve ser realizado para as sub-bacias intermediárias, cujo procedimento não pode ser realizado devido à indisponibilidade de dados operativos para o cálculo da vazão afluente até o término do trabalho.

g) modelo de balanço hídrico em trechos com mecanismos de controle e aproveitamento hidráulico;

O balanço hídrico dos reservatórios foi realizado em duas fases:

- monitoramento: a vazão afluente é determinada através dos dados de vazão defluente, desviada e da variação do volume do reservatório;
- previsão: determina-se o nível/volume do reservatório através dos dados de vazão afluente, defluente e desviada previstas.

Para calcular a vazão defluente e desviada são necessários dados de nível, curvas de descarga das estruturas hidráulicas e dados operativos, sendo que estes últimos constituem uma fragilidade do sistema. Na fase de monitoramento, estes devem ser inseridos no banco de dados pelos operadores das usinas, sendo que dados não inseridos ou inseridos de maneira incorreta causam erro no cálculo da vazão afluente, a qual será utilizada na determinação das variáveis de estado do modelo. Mais uma vez destaca-se neste trabalho a importância dos dados monitorados.

Na fase de previsão, utiliza-se como dado de entrada do sistema a operação mais provável das estruturas hidráulicas, obtendo-se como resposta o nível do reservatório. Outra opção é alterar as operações no módulo de simulação, a fim de

otimizá-las.

h) previsão de chuva

Como o objetivo deste trabalho não era prever chuva, foram utilizados dois cenários de previsão, buscando definir o limite inferior e superior do hidrograma. O primeiro utiliza chuva zero, ou seja, considera que a chuva cessa no horizonte da previsão. O segundo foi definido através da análise climatológica das séries históricas, buscando identificar a máxima chuva provável para cada mês. Este procedimento pôde ser utilizado uma vez que o tempo de resposta da bacia mais de montante é aproximadamente igual ao intervalo de atualização do sistema. Este fato só não se aplica para a sub-bacia de cabeceira do rio Sacra Família, onde se provou que a previsão de chuva é de grande importância na determinação do hidrograma previsto. No entanto, em qualquer um dos casos analisados, para aumentar a precisão das previsões para horizontes maiores recomenda-se realizar previsões de chuva de curto prazo através da aplicação de métodos físicos, empíricos, estatísticos, técnicas de análise da série temporal ou através do uso de informações geradas por sensoriamento remoto.

i) estimativa da evapotranspiração

Como não se dispunha de dados monitorados de evaporação ou dados meteorológicos em tempo real de forma que a evapotranspiração pudesse ser calculada, esta foi estimada através da análise climatológica da série temporal. Recomenda-se que sejam feitos estudos mais aprofundados buscando analisar a validade destes cenários e a viabilidade da aplicação de outros métodos, como Penman ou Penman-Monteith.

j) desenvolvimento dos aplicativos de processamento;

No início do trabalho, pensou-se em desenvolver os aplicativos de processamento dos dados em DELPHI, no entanto percebeu-se que seria computacionalmente inviável, uma vez que os procedimentos se tornariam bastante lentos. Por ser uma linguagem orientada ao objeto, os aplicativos desenvolvidos em

DELPHI requerem um grande esforço computacional se comparados a linguagens computacionais que não apresentam esta característica. A vantagem do *DELPHI* é a fácil comunicação com o banco de dados. Desta forma, optou-se por manter o modelo hidrológico e de operação hidráulica, que apresentam grande volume de cálculo, em *FORTRAN*. Já o pré-processamento dos dados hidrológicos, como requer muitos acessos (consulta e inserção) ao banco de dados, foi desenvolvido em *DELPHI*.

k) desenvolvimento de uma interface gráfica amigável;

A interface gráfica foi desenvolvida com o objetivo de facilitar a utilização do sistema por parte dos funcionários da *LIGHT*, aumentando o tempo disponível para tomada de decisões. Esta permite que o usuário execute de forma rápida as seguintes atividades:

- visualização dos resultados do modelo hidrológico para cada ponto de previsão;
- edição dos dados de entrada e simulação para diferentes previsões de chuva e operação hidráulica;
- manipulação dos dados processados pelo sistema.

l) testes e manutenção.

É importante que todos os testes do sistema sejam realizados antes de disponibilizá-lo para uso geral, de forma a evitar que sejam encontrados problemas durante a operação, o que diminuiria a confiabilidade dos usuários no sistema. Além disso, é necessário prever um período de manutenção onde eventuais problemas poderão ser solucionados.

8 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALVES, R. S. A.; LEMOS, L. R. de. Cheia de Janeiro de 2000 na bacia do rio Piraí. Departamento de usinas elevatórias, 2000.p. 48. Relatório técnico.

ANA. Série: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos hídricos . Rio de Janeiro, p. 247-246. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb/cd4/index.htm>. Acesso em: mar. 2003.

ANA. HIDROWEB – Sistema de Informações Hidrológicas da SIH . Disponível em : <<http://hidroweb.ana.gov.br/hidroweb>> Acesso em: mar. 2003.

ANA. Uso múltiplos – Prevenção de inundações . Disponível em : <<http://www.ana.gov.br/GestaoRecHidricos/UsosMultiplos/inundacoes.asp>> Acesso em: jan. 2004.

ANDRADE, J. C.; CUSTÓDIO, R. Planejamento experimental e otimização. Disponível em: http://www.chemkeys.com/bra/md/peeo_6/mdoeq_1/metsim_4/metsim_4.htm. Acesso em: jan. 2004.

BAE, D. H.; GEORGAKAKOS, K. P. Hydrological modeling for flow forecasting and climate studies in large drainage basins. Iowa City: The University of Iowa, 1992. 241 p. Relatório Técnico nº 360.

BASIST, A.; BELL G. D.; MEENTEMEYER, V. Statistical relationships between topography and precipitation patterns. **Journal of Climate**, v. 7, set. 1994, p. 1305-1315.

BRAGA JUNIOR, B. P. F. Modelo de previsão de vazão em tempo real. In: Simpósio Brasileiro de Hidrologia Recursos Hídricos, 4, 1981, fortaleza. Anais. ABRH, 1981. v. 4, p. 72-88.

BRASIL. Decreto n. 1842, de 22 de março de 1996. Institui Comitê para Integração da bacia do rio Paraíba do Sul – CEIVAP, e das outras pro-vidências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 22 de março de 1996, v. 175º da Independência e v. 108º da República.

BRASIL. Decreto n. 68.324, de 09 de março de 1971. Aprova o plano de regularização do rio Paraíba e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 09 de março de 1971, v. 150º da Independência e v. 83º da República.

BRASIL. Decreto n. 81.436, de 09 de março de 1978. Altera a redação dos artigos 3º e 7º do Decreto nº 68324, de 9 de março de 1971, que aprova o plano de regularização do rio Paraíba do Sul e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 09 de março de 1978, v. 157º da Independência e v. 90º da República.

- BURNASH, R. J. C. The NWS River Forecast System - catchment modeling. In: SINGH, V. P. (Ed.). *Computer Models of Watershed Hydrology*. Colorado, USA: Water Resources Publications, 1995. p. 311-366.
- BURNASH, R.; FERRAL, L. Conceptualization of the sacramento soil moisture accounting model. Jul. 1996. Disponível em: http://www.nws.noaa.gov/oh/hrl/nwsrfs/users_manual/htm/xrfsdocwpd.php. Acesso em: fev. 2003.
- CASTANHARO, G.; MINE, M. R. M. Operação de reservatórios baseada em previsão de afluências de curto prazo em tempo real. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 14, 2001, Aracaju. CD-ROM.
- CASTRO, A. L. C. de; CALHEIROS, L. B.; CUNHA, M. I. R., BRINGEL M. L. N. da C. *Manual de Desastres – Vol I*. 1. Brasil: Imprensa Nacional, 1996.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. Disponível em: <http://www.iph.ufrgs.br/corpo docente/tucci/publicacoes/otimizaiph2.PDF>. Acesso em: 25 set. 2003.
- CUNHA, L. Um critério para operação hidráulica de reservatórios em tempo real – níveis flutuantes. In: *IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, p. 75-89, Rio de Janeiro, RJ, 1991.
- CUNHA L. K.; GUETTER, A. K. Sistema Integrado de Previsão Hidrológica e Operação Hidráulica em Tempo Real. In: *XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 23-27 nov. 2003, Curitiba-PR. CD-ROM.
- CUNHA, L. K., GUETTER, A. K. SIPOP – Sistema Integrado de Previsão Hidrológica e Operação Hidráulica em Tempo Real: Manual do Usuário. Curitiba: Instituto Tecnológico SIMEPAR, 2003. p. 102. Relatório Técnico 011/2003.
- DINIZ, L da S. Calibragem de Modelos Hidrológicos. In: GALVAO, C. O.; GALVÃO, M. J. S. *Sistemas Inteligentes: aplicações a recursos hídricos*. 1. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1999. p. 151-164 1
- DNAEE. Portaria n. 022, de 14 de fevereiro de 1977. Normas de operação – “Configuração futura” – dos reservatórios integrantes do Plano de Regularização do rio Paraíba. 14 de fevereiro de 1977.
- DUAN, Q., SOOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water Resources Research** 28 (4), 1015-1031. 1992
- GEORGAKAKOS, K. P. et al. On improved operational hydrologic forecasting of streamflow. Iowa City: University of Iowa, 1988. Relatório técnico n°. 525.

GEORGAKAKOS, K. P. Technology transfer in hydrometeorology. Disponível em: http://www.hrc-web.org/Tech_Transfer/Hydroinformatics_Keynote.pdf Acesso em: 03 mar. 2004.

GEORGAKAKOS, K. P.; BRAS, R. L. A statistical linearization approach to real time nonlinear flood routing. Cambridge: Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, 1980. Relatório técnico n°. 256.

GUETTER, A. K ; ABUCARUB M. N. Sistema de Previsão Hidrológica do Iguazu - Previsão de Vazões Médias Diárias (Trecho 1: até União da Vitória). Curitiba: Instituto Tecnológico SIMEPAR, jun. 1999. Relatório Técnico n° 005/1999.

GUETTER, A. K; GONÇALVES, J. E.; CUNHA, L. K., SIPOP – Sistema Integrado de Previsão Hidrológica e Operação Hidráulica em Tempo Real: Especificações. Curitiba: Instituto Tecnológico SIMEPAR, dez. 2002. p. 119. Relatório Técnico 007/2002.

GUETTER, A., CUNHA, L.M. River Forecasting and Simulation System for Reservoir Operation Support (in Portuguese). In: X Brazilian Conference of Meteorology, 26-30 Out.1998, Brasília, D.F. CD-ROM.

GUETTER. A. K., CUNHA, L. Sistema de previsão e simulação hidrológica para suporte à operação de reservatórios. In: X Congresso Brasileiro de Meteorologia, 26-30 out. 1998, Brasília.

GUPTA, V. K.; SOROOSHIAN, S. The relationship between data and the precision of parameter estimates of hydrologic models. **Journal of Hydrology**, v. 81, n° 1-2, 30 Out. 1985, p. 57-77.

HENRIKSEN, H. J. et al. Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark. **Journal of Hydrology**, v. 280, n° 1-4, Set. 2003, p. 52-71.

KITANIDIS, P.K; BRAS, R.L. Real-time forecasting with a conceptual hydrologic model. 2. Applications and results. **Water Resources Research**, vol. 16, no. 6, 1980, p. 1034–1044.

LIGHT. Instrução de Operação (IOP) n° 902 - Operação dos reservatórios de Vigário e Santana durante a ocorrência de cheias. Rio de Janeiro: Departamento de Operação do Sistema de Transmissão. p. 01-23. nov. 2002. Relatório técnico.

LOBO, M. L. C.; GUETTER. A. K. Real-time Gis application for environmental planning and flooding risk prevention for the state of Parana in Brazil. In: TeleGeo 99: First International Workshop on Telegeoprocessing, 6-7 mai. 1999, Lyon, França.

MADSEN, H.; WILSON, G.; AMMENTORP, H. C. Comparison of different automated strategies for calibration of rainfall-runoff models. **Journal of Hydrology**, v. 261, dec. 2001, p. 48-59.

MAIDMENT, D.R. GIS and hydrologic modeling. In: GOODCHILD, M.F.; Parks, B.O.; Steyaert, L.T.; ed. **Environmental modeling with GIS**. New York, Oxford University Press, 1993. Cap. 14, p. 147-167.

MINE, M.R.M. Método determinístico para minimizar o conflito entre gerar energia e controlar cheias. Porto Alegre: 1998. 146 f. Tese(Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – UFRGS.

MINE, M.R.M. Modelos estocásticos lineares para previsão de cheias em tempo real. São Paulo: 1984. 146 f. Tese(Mestre em Engenharia) – USP.

NAGHETTINI, M. C.; NASCIMENTO, N. O.; THIMOTTI, T. C.M.; LIMA, A. A.; QUEIROGA, Y.G.; BALBI, D. Modelo de simulação hidrológica para previsão de vazões de curto prazo, EHR-UFGM, Belo Horizonte, 2001. Relatório Técnico.

NASCIMENTO, F. J. L.; BARBOSA, C. S. Análise da cheia de janeiro/1985 no rio Paraíba do Sul e no desvio Paraíba-Piraí. Área de Planejamento da operação, 1985. p. 26. Relatório técnico.

NELDER, J. A.; MEAD, R. A simplex method for function minimization. *Computer Journal*, v. 7, p. 308- 313, 1965.

NICODEMUS et al (1992). Relatório sobre a cheia janeiro /92 na bacia do rio Piraí. Divisão de Planejamento energético, 1992. p. 46. Relatório técnico.

NICODEMUS, E. A.; SILVA, W. da. Cheia de fevereiro/96 na bacia do Piraí. Divisão de planejamento da operação, 1996. p. 23. Relatório técnico.

NWS – NATIONAL WEATHER SERVICE (s.d.a). *NWSRFS user manual*. -SAC State Space Sacramento Model Operation. Disponível em: http://www.nws.noaa.gov/oh/hrf/nwsrfs/users_manual/. Acesso em: jan. 2003.

ONS (Operador Nacional do Sistema). Procedimentos de rede – Módulo 9 – Hidrologia Operacional. Disponível em: www.ons.org.br/ons/procedimentos/index.htm. Acesso em:10 dez. 2003.

PECK, E. L.,1976: Catchment modeling and initial parameter estimation for the National Weather System river forecast system, *NWS Hydro-31*, National Weather Service, NOAA, Silver Spring, MD.

PRESS, W. H.; FLANNERY, B. P.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T. Numerical recipes – the art of scientific computing. Cambridge: Press Syndicate of the University of Cambridge, p. 289-294, 1986.

RENNÓ, C.D. ; SOARES, J. V. Modelos hidrológicos para gestão ambiental. Disponível em: [ttp://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio_modelos_hidrologicos.pdf](http://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio_modelos_hidrologicos.pdf). Acesso em: 06 ago. 2003

SAKURAGI, J.; SOUZA, L. H. de. Modelagem de brisas e circulação vale-montanha para o vale do Paraíba e litoral utilizando o RAMS. In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2000, Rio de Janeiro, R.J. CD-ROM.

SENTELHAS, P.C.; PEREIRA, A.R.; MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; ALFONSI, R.R.; CARAMORI, P.H.; SWART, S. Balanços Hídricos Climatológicos do Brasil - 500 balanços hídricos de localidades brasileiras. Piracicaba: ESALQ, 1999. 1 CD-ROM.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). Estudos de chuvas intensas do estado do Rio de Janeiro. Brasília, dez. 2000. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/geo/chuvas.html>. Acesso em: jan. 2003.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). Geologia do estado do Rio de Janeiro. Brasília, dez. 2000. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/geo/geologia.html>. Acesso em: jan. 2003

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). Uso e cobertura do solo. Brasília, dez. 2000. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/geo/usosolo.html>. Acesso em: jan. 2003

SILVA, C. R. da. Banco de dados. Universidade Veiga de Almeida, 1996. Disponível em: http://www.eletricazine.hpg.ig.com.br/apostilas/banco_de_dados/conceitos_banco_dados.pdf. Acesso em: jan. 2003.

SINGH, V. P. Computer Models of Watershed Hydrology. Colorado, USA: Water Resources Publications, 1995 . p. ¹⁻²³

SINGH, V. P.; WOOLHISER, D. A. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. Disponível em: http://www.clas.ufl.edu/users/mbinford/geo5159/Literature/singh_vp_da_woolhiser_2002_mathematical_modeling_of_hydrology_journal_hydrologic_engineering_7_270-292.pdf. Acesso em: jan. 2004.

SISTEMA DE GESTÃO INTEGRADA DA BACIA DO PARAÍBA DO SUL. Serviços de informações da bacia do Paraíba do Sul. Recursos Hídricos. Disponível em: <http://pbs.ana.gov.br/pbs0800/> Acesso em: fev. 3002.

SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K.; FULTON, J.L. Evaluation of Maximum Likelihood Parameter Estimation Techniques for Conceptual Rainfall-Runoff Models- Influence of Calibration Data Variability and Length on Model Credibility. **Water Resources Research**, Colorado, v. 1983, p.251-259.

SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. Calibration of rainfall-runoff models: application of global optimization to the sacramento soil moisture accounting model. **Water Resources Research**, Colorado, v. 81, nº 1-2, 30 out. 1985, p. 57-77..

SOROOSHIAN, S.; DUAN Q.;GUPTA, V.K. Calibration of rainfall-runoff models: application of global optimization to the Sacramento soil moisture accounting model. **Water Resources Research**, Colorado, v. 29, nº 4, 1993, p. 1185-1194.

SOROOSHIAN, S; GUPTA, V. K.. Model Calibration. In: SINGH, V. P. (Ed.). *Computer Models of Watershed Hydrology*. Colorado, USA: Water Resources Publications, 1995. p. 23-68

SPERFSLAGE, J. E.; GEORGAKAKOS, K. P. Implementation and testing of the HSF operation as part of the National Weather Service River Forecast System (NWSRFS). San Diego: HRC Technical Report no 1, 1996. Relatório técnico.

SUDERHSA. Manual de drenagem urbana da região metropolitana de Curitiba. Curitiba, Jun. 2000. Relatório técnico.

THIMOTTI, T. C. M. Concepção e avaliação de um sistema de previsão de vazões de longo termo. Belo Horizonte, 2003. 266 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v.38, p.55-94, 1948.

Tucci,C.E.M. Hidrologia - Ciência e Aplicação. Ed. Universidade UFRGS, p. 186-193, 1993.

TUCCI, C.E. M. Modelos hidrológicos. Porto Alegre: Ed. Universidade UFRGS, p. 232-235, 1998.

TUCCI, C.E.M.; CAMPANA, N. 1993. Simulação distribuída com IPH II, Nova versão. In: X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Gramado. Anais, v.3, p. 495-504.

UFRJ. Operação dos reservatórios da bacia do rio Paraíba do Sul e sistema LIGHT. Disponível em: <http://www.hidro.ufrj.br/pqarj/pqarj.htm>. Acesso em: nov. 2002

WOOD, E. F. Hydrologic Forecasting. In: MAIDMENT, D. R., *Handbook of hydrology*, Ed. McGraw-Hill, 26.1-26.30, 1993.

World Meteorological Organization. Intercomparison of models of used in operational hydrological forecasting. *Operational Hydrology Reporter*, nº 7, 1975.

World Meteorological Organization. Simulated realtime intercomparison of hydrological models. *Operational Hydrology Paper*, nº 779, Geneva, 1992

XIONG, L.;O'CONNOR. Analysis of the responde surface of the objective function by the optimum parameter curve: how good can the optimum parameter values be?. **Journal of hydrology**, v. 234, n° 3,4, p. 187-207, 2002.

YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Multiobjective global optimization for hydrologic models. **Journal of Hydrology**, v. 204, 1998, p. 83-97.

YAPO, P. O.; GUPTA, H.V.; SOROOSHIAN,S. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data. **Journal of Hydrology**, v. 181, n° 1-4, Jun. 1996, P. 23-48.

**APÊNDICE 1 - CARACTERÍSTICAS DAS SUB-BACIAS E ESTRUTURAS
HIDRÁULICAS DO SISTEMA HIDRÁULICO DA LIGHT**

APÊNDICE 1. CARACTERÍSTICAS DAS SUB-BACIAS E ESTRUTURAS HIDRÁULICAS DO SISTEMA HIDRÁULICO DA LIGHT

Neste anexo são apresentadas as principais características das sub-bacias e estruturas hidráulicas localizadas na área de estudo. Durante a coleta dos dados observou-se diferentes valores para a mesma variável, dependendo da fonte consultada. O critério utilizado foi optar sempre pela informação mais atual. As fontes consultadas estão listadas na tabela A1.1.

TABELA A1.1 FONTES DE CONSULTA DE DADOS

FONTE	TIPO DE DADO
Banco de dados hidrológico – informações fornecidas pela LIGHT (LIGHT, 2003)	Pontos de monitoramento (estações telemétricas), área de drenagem, cotas e localização das estações.
Banco de dados hidrológicos ANA – Hidroweb (ANA, 2003)	Vazão, chuva e áreas de drenagem.
SIPOT	Características físicas e hidrológicas dos reservatórios.
Relatório: Operação dos reservatórios da bacia do Paraíba do Sul e Sistema LIGHT (LIGHT, 2002)	Características físicas, hidrológicas e de operação dos reservatórios e estruturas hidráulicas.
Relatório de Chuvas Intensas –(CPRM;)	Dados de chuva
Planta de Projeto 82800 (LIGHT)	Características físicas dos reservatórios

A1.1 B0 + B1: DETERMINAÇÃO DA VAZÃO AFLUENTE A SANTA CECÍLIA

A vazão afluente ao reservatório de Santa Cecília é estimada através da modelagem hidrológica da sub-bacia B0, entre a usina de funil e o posto telemétrico Volta Redonda, e sub-bacia B1, entre o posto telemétrico de Volta Redonda à Barragem de Santa Cecília. A previsão de nível no reservatório é realizada através do balanço hídrico do reservatório.

As principais características das sub-bacias B0 e B1 são listadas nas Tabelas A1.2 e A1.3:

TABELA A1.2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS SUB-BACIA B0

CARACTERÍSTICAS	VALORES
Ponto de monitoramento a montante	Considera a vazão defluente de Funil
Ponto de monitoramento a jusante	1) V1-080 (Volta Redonda)
Área de drenagem a montante	15153 km ²
Área de drenagem na exutória	15980 km ²
Área de drenagem da sub-bacia	827 km ²
Altitude a jusante Funil	392 m
Altitude em Volta Redonda	390 m
Chuva média anual	1626 mm/ano
Vazão natural média na bacia incremental	65,20 m ³ /s
Coefficiente de deflúvio	0,53

TABELA A1.3 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS SUB-BACIA B1

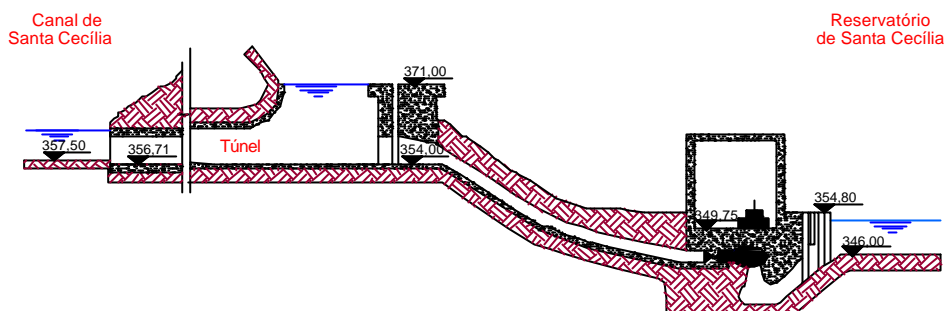
CARACTERÍSTICAS	VALORES
Ponto de monitoramento a montante	V1-080 (Volta Redonda)
Ponto de monitoramento a jusante	1) V1-092 (Santa Cecília – Tom. d'água) 2) V1-094 (Santa Cecília Jusante)
Área de drenagem a montante	15153 km ²
Área de drenagem na exutória	16694 km ²
Área de drenagem da sub-bacia	1541 km ²
Altitude em Volta Redonda	390 m
Nível mínimo do reservatório	351,50 m
Chuva média anual	1626 mm/ano
Vazão natural média na bacia incremental	296,12 m ³ /s
Coefficiente de deflúvio	0,33

No reservatório de Santa Cecília está localizada a Usina Elevatória de Santa Cecília, a qual desvia cerca de 160 m³/s da bacia do rio Paraíba do Sul para a bacia do rio Piraí. Suas principais características físicas e geométricas estão apresentadas na Tabela A1.4, enquanto a Figura A1.1 apresenta um corte transversal da obra.

TABELA A1.4 – ELEMENTOS GEOMÉTRICOS E FÍSICOS DA USINA ELEVATÓRIA DE SANTA CECÍLIA

CARACTERÍSTICAS	VALORES
Nº de bombas	4 unidades
Consumo Específico (MW/m ³ /s)	0,191
Vazão máx. bombeada para Santana	160 m ³ /s
Altura de Recalque	15,50 m

FIGURA A1.1 CORTE LONGITUDINAL DA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE SANTA CECÍLIA

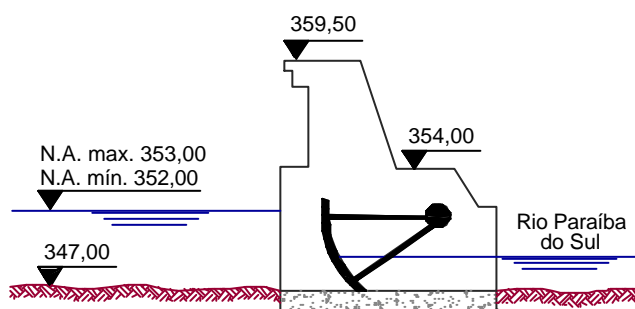


A Barragem de Santa Cecília apresenta comprimento total de 262 m e possui oito comportas de 18,30m e uma com 3,50m de comprimento. A Tabela A1.5 apresenta as características físicas deste reservatório, e a Figura A1.2 ilustra o corte longitudinal deste.

TABELA A1.5: ELEMENTOS GEOMÉTRICOS E FÍSICOS DO RESERVATÓRIO DE SANTA CECÍLIA

CARACTERÍSTICAS	VALORES
Área Inundada	2,70 km ²
Nível médio do reservatório	352,95 m
Cota da base do reservatório	347,00 m
Cota do crista da barragem	359,50 m
Nível máximo do reservatório	353,00 m
Nível mínimo do reservatório	352,00 m
Vazão média de longo termo	296,72 m ³ /s
Defluência mínima	71 m ³ /s
Defluência máxima	1.100 m ³ /s

FIGURA A1.2 CORTE LONGITUDINAL DAS COMPORTAS DO RESERVATÓRIO DE SANTA CECÍLIA



O reservatório de Santa Cecília foi implantado com o objetivo único de permitir o bombeamento pela Usina Elevatória de Santa Cecília. Com isso, possui apenas capacidade de regularização de vazão de algumas horas. A única contribuição

para o controle de cheias que pode ser proporcionada por este reservatório é a paralisação do bombeamento para Santana ou, no caso de situações muito críticas, receber água do reservatório de Santana através de uma ou duas bombas, realizando reversão.

Abaixo estão listadas as equações para o cálculo do balanço hídrico no reservatório de Santa Cecília:

$$V_{SCI(t-1)} = f(Z_{SCI(t-1)})$$

$$Q_{COMP(t-1)} = f(Z_{SCI(t)}; \text{operação}_{(t-1)})$$

$$Q_{BOMBSCI(t-1)} = f(Z_{V1-092(t-1)}; \text{operação}_{(t-1)})$$

$$Q_{E_SCI(t-1)} = Q_{COMP(t)}$$

$$V_{V1-092(t)} = V_{V1-092(t-1)} + (Q_{A_SCI(t)} - Q_{E_SCI(t)} - Q_{BOMBSCI(t)}) \times \Delta t$$

$$Z_{V1-092(t)} = f(V_{V1-092(t)})$$

onde:

$Q_{A_SCI(t)}$ = Vazão afluyente ao reservatório de Santa Cecília;

$Q_{E_SCI(t)}$ = Vazão defluyente do reservatório de Santa Cecília;

$Q_{COMP(t)}$ = Vazão liberada pela comporta de fundo;

$Q_{BOMBSCI(t)}$ = Vazão bombeada para o Reservatório de Santana;

$Z_{SCI(t-1)}$ = Nível do reservatório no instante t;

$V_{SCI(t-1)}$ = Volume do reservatório no instante t;

$\text{operação}_{(t-1)}$ = operação das estruturas hidráulicas;

A1.2. B10 +B11: DETERMINAÇÃO DA VAZÃO AFLUENTE A TOCOS

A vazão afluyente ao reservatório de Tocos é estimada através da modelagem hidrológica da sub-bacia B10, a qual abrange a cabeceira da bacia do Piraí até a estação de Lídice, e sub-bacia B11, entre Lídice e o reservatório de Tocos. A previsão de nível no reservatório é realizada através do balanço hídrico do reservatório.

Como já mencionado anteriormente, a discretização deste trecho em duas sub-bacias foi realizada de forma a separar as áreas da bacia que sofrem efeito orográfico sobre o regime de chuvas e as áreas que não sofrem. Esta sub-divisão visa minimizar os erros devido a utilização do método da média aritmética simples no cálculo da chuva média da bacia, ocasionados pelos efeitos orográficos observados na região.

As principais características das sub-bacias B10 e B11 são listadas nas tabelas A1.6 e A1.7:

TABELA A1.6 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS SUB-BACIA B10

CARACTERÍSTICAS	VALORES
Ponto de monitoramento a montante	Bacia de cabeceira
Ponto de monitoramento a jusante	V1-108 (Lídice)
Área de drenagem a montante	-
Área de drenagem na exutória	112 km ²
Área de drenagem da sub-bacia	112 km ²
Altitude a montante	-
Altitude em Lídice	554 m
Chuva média anual	1729 mm/ano
Vazão natural média na bacia incremental	4,12 m ³ /s
Coefficiente de deflúvio	0,68

TABELA A1.7 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS SUB-BACIA B11

CARACTERÍSTICAS	VALORES
Ponto de monitoramento a montante	V1-108 (Lídice)
Ponto de monitoramento a jusante	1) V1-040 (Barragem de Tocos) 2) V1-481 (Várzea) 3) V3-482 (Rozário)
Área de drenagem a montante	112 km ²
Área de drenagem na exutória	386 km ²
Área de drenagem da sub-bacia	274 km ²
Altitude em Lídice	554 m
Nível mínimo do reservatório	440 m
Chuva média anual	1351 mm/ano
Vazão natural média na bacia incremental	13,44 m ³ /s
Coefficiente de deflúvio	0,79

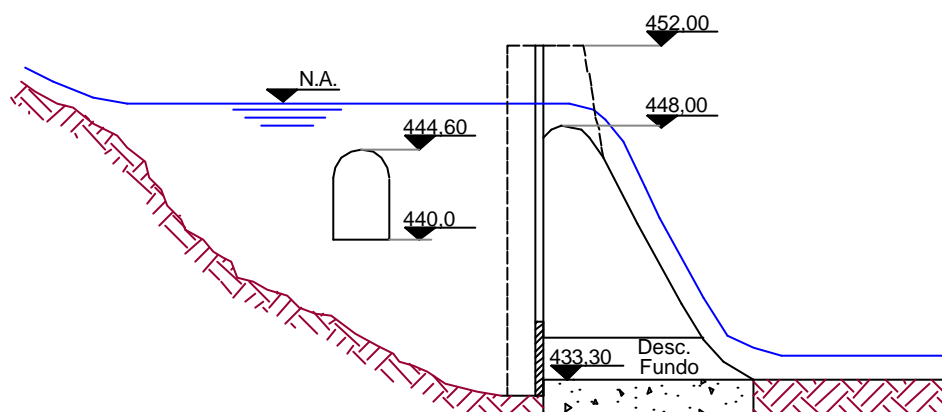
Neste reservatório está localizado o túnel de Tocos, o qual foi construído com o objetivo de desviar 25m³/s para o reservatório de Lajes, localizado na sub-bacia do rio Guandu. A base do túnel está na cota 440,00 m e o seu topo está na cota 444,60 m. Na barragem está localizado o vertedor livre, cuja crista se encontra na cota 448,00 m. O nível médio de água no reservatório é 443,00 m, ou seja, durante a operação

normal não há descarga pelo vertedouro e o túnel opera em descarga livre. A Tabela A1.8 apresenta as principais características deste reservatório e a Figura A1.3 ilustra seu corte longitudinal.

TABELA A1.8: ELEMENTOS GEOMÉTRICOS E FÍSICOS DO RESERVATÓRIO DE TOCOS

CARACTERÍSTICAS	VALORES
Área inundada	1,20 km ²
Nível médio do reservatório	433,37 m
Volume acumulado na cota 433 m	452.200 km ³
Cota da Base do Túnel	440,00 m
Cota do Topo do Túnel	444,60 m
Cota da Crista do Vertedouro	448,00 m
Cota da Barragem	452,00 m
Vazão média natural	13,44 m ³ /s
Vazão média desviada para Lajes (túnel)	11,44 m ³ /s
Vazão média vertida	2,01 m ³ /s

FIGURA A1.3 CORTE LONGITUDINAL DO RESERVATÓRIO DE TOCOS



Apesar da vazão média vertida ser bastante baixa, durante eventos extremos de cheia ela alcança valores bastante elevados, aumentando a contribuição ao reservatório de Santana. Como exemplo pode-se citar a cheia de 2000, onde ocorreu uma vazão máxima pelo vertedouro de 243,90 m³/s. Por isso, durante estes eventos é de extrema importância o monitoramento do reservatório de Tocos para a previsão de afluições ao reservatório de Santana. Sendo o tempo de percurso da água entre o reservatório de Tocos e Barragem de Santana de aproximadamente 11 horas, pode-se alocar um volume de espera no reservatório de Santana, tornando possível o recebimento do volume excedente de água sem que haja a necessidade de descarga para jusante deste reservatório.

Abaixo estão listadas as equações para o cálculo do balanço hídrico no reservatório de Tocos:

$$Q_{VERT(t-1)} = f(Z_{V1-040(t-1)})$$

$$Q_{FUNDO(t-1)} = f(Z_{V1-040(t-1)}; \text{operação}_{(t-1)})$$

$$Q_{TUNEL(t-1)} = f(Z_{V1-040(t-1)})$$

$$Q_{E_TOS(t-1)} = Q_{VERT(t-1)} + Q_{FUNDO(t-1)}$$

$$V_{V1-040(t)} = V_{V1-040(t-1)} + \left(Q_{A_TOS(t-1)} - Q_{E_TOS(t-1)} - Q_{TUNEL(t-1)} \right) \times \Delta t$$

$$Z_{V1-040(t)} = f(V_{V1-040(t)})$$

onde:

$Q_{A_TOS(t-1)}$ = Vazão afluente ao reservatório de Tocos;

$Q_{E_TOS(t-1)}$ = Vazão defluente do reservatório de Tocos;

$Q_{VERT(t-1)}$ = Vazão liberada pelo vertedouro livre;

$Q_{FUNDO(t-1)}$ = Vazão pela descarga de fundo;

$Q_{TUNEL(t-1)}$ = Vazão pelo túnel, função do nível do reservatório;

$V_{TOS(t)}$ = Volume do reservatório no instante t;

$Z_{TOS(t)}$ = Nível do reservatório no instante t.

A1.3 B12: DETERMINAÇÃO DA VAZÃO NA ESTAÇÃO DE NOVA ESPERANÇA

A vazão na Estação Fazenda Nova Esperança é estimada através da vazão efluente ao reservatório de Tocos, somada à parcela de vazão natural gerada na bacia B12, através da transformação chuva-vazão (modelo hidrológico) para a sub-bacia do trecho Tocos – Nova Esperança.

As principais características das sub-bacias B12 são listadas na tabela A1.9.

TABELA A1.9 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS SUB-BACIA B12

CARACTERÍSTICAS	VALORES
Ponto de monitoramento a montante	V1-040 (Barragem de Tocos)
Ponto de monitoramento a jusante	V1-105 (Fazenda Nova Esperança)
Área de drenagem a montante	386 km ²
Área de drenagem na exutória	604 km ²
Área de drenagem da sub-bacia	218 km ²
Altitude a jusante do reservatório de Tocos	433,3 m
Altitude em F. N. Esperança	372 m
Chuva média anual	1351 mm/ano
Vazão natural média na bacia incremental	Dados de vazão natural não disponíveis

O monitoramento da Vazão neste ponto é de grande importância para o controle de cheias na bacia do rio Pirai. O tempo de percurso da água entre Fazenda Nova Esperança e Santana é de aproximadamente 3 horas. Desta forma, o valor da afluência nesta estação é um dos fatores que determinam os procedimentos operativos durante e após os eventos extremos, definindo, por exemplo, o número de motores bombas a serem desligadas em Santa Cecília e a serem ligados em Vigário e o restabelecimento das condições operativas normais.

A1.4 B13: DETERMINAÇÃO DA VAZÃO AFLUENTE A SANTANA

A vazão afluente ao reservatório de Santana é estimada através da vazão do Pirai na Estação Fazenda Nova Esperança, somada à parcela de vazão gerada na sub-bacia incremental denominada B13, localizada entre a estação de Fazenda Nova Esperança e Santana, através da transformação chuva-vazão. A previsão de nível no reservatório é realizada através do balanço hídrico do reservatório.

As principais características da sub-bacia B13 são listadas na tabela A1.10:

TABELA A1.10 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS SUB-BACIA B13

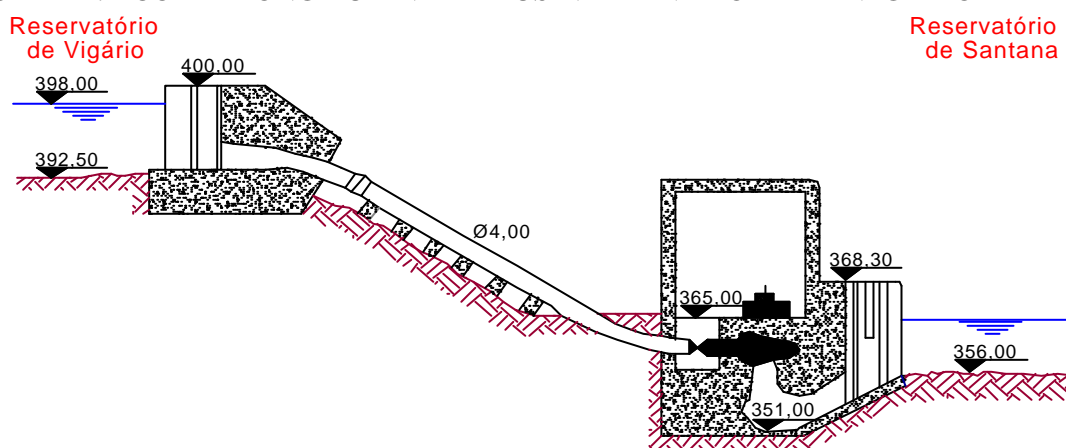
CARACTERÍSTICAS	VALORES
Ponto de monitoramento a montante	V1-105 (Fazenda Nova Esperança)
Ponto de monitoramento a jusante	1) V1-041 (Barragem de Santana) 2) V1-098 (Vigário tomada d'água) 3) V1-099 (Vigário descarga d'água)
Área de drenagem a montante	604 km ²
Área de drenagem na exutória	862 km ²
Área de drenagem da sub-bacia	258 km ²
Altitude em F. N. Esperança	372 m
Nível mínimo de água em Santana	363 m
Chuva média anual	1351 mm/ano
Vazão natural média na bacia incremental	19,7 m ³ /s
Coefficiente de deflúvio	0,53

A Usina Elevatória de Vigário está localizada ao longo do reservatório de Santana e desvia cerca de 180 m³/s para o reservatório de Vigário, na bacia do rio Guandu. Suas principais características físicas e geométricas estão apresentadas na Tabela A1.11, enquanto a Figura A1.4 apresenta um corte transversal da obra.

TABELA A1.11 ELEMENTOS GEOMÉTRICOS E FÍSICOS DA USINA ELEVATÓRIA DE VIGÁRIO

CARACTERÍSTICAS	VALORES
Nº de bombas	4 unidades
Consumo Específico (MW/m ³ /s)	0,446
Vazão máx. bombeada para Vigário	189 m ³ /s
Altura de Recalque	35,00 m

FIGURA A1.4 CORTE LONGITUDINAL DA USINA ELEVATÓRIA DE VIGÁRIO



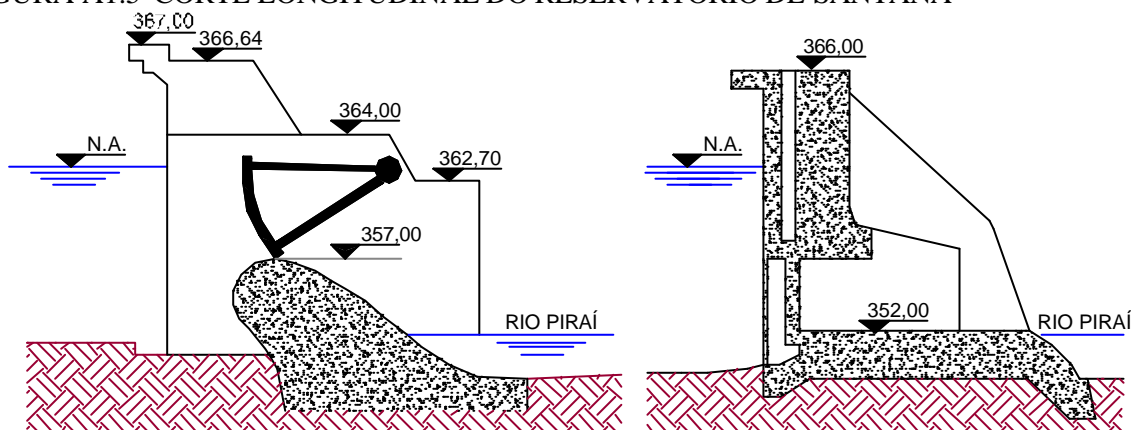
A barragem de Santana é composta de duas comportas de 18,30m de largura cada e uma comporta de fundo tipo “BROOME”. A grande restrição de operação do reservatório de Santana está relacionado a vazão defluente máxima durante eventos de cheia. A descarga de restrição é de 15 m³/s, mas essa vazão pode ser bastante superada

durante eventos extremos, ocasionando diversas inundações. A Tabela A1.12 apresenta as características físicas deste reservatório, e a Figura A1.5 ilustra o corte longitudinal deste.

TABELA A1.12 ELEMENTOS GEOMÉTRICOS E FÍSICOS DO RESERVATÓRIO DE SANTANA

CARACTERÍSTICAS	VALORES
Área Inundada	5,95 km ²
Nível médio do reservatório	363,12 m
Cota da Base do reservatório	351,25 m
Cota da crista da barragem	367,00 m
Cota da Crista do Vertedouro	357,00 m
Cota inferior da descarga de fundo	352,00 m
Vazão média afluente	4,71 m ³ /s
Defluência máxima	189,00 m ³ /s
Defluência mínima	0,02 m ³ /s
Defluência média	0,23 m ³ /s
Vazão média defluente para Montante devido remanso	0,17 m ³ /s
Vazão máxima bombeada para Vigário	189,00 m ³ /s
Vazão meta de bombeamento para Vigário	178,00 m ³ /s
Vazão média bombeada para Vigário	145,95 m ³ /s

FIGURA A1.5 CORTE LONGITUDINAL DO RESERVATÓRIO DE SANTANA



Abaixo estão listadas as equações para o cálculo do balanço hídrico no reservatório de Santana:

$$V_{V1-041(t-1)} = f(Z_{V1-041(t-1)})$$

$$Q_{VERT(t-1)} = f(Z_{V1-041(t-1)}; \text{operação}_{(t-1)})$$

$$Q_{FUNDO(t)} = f(Z_{V1-041(t-1)}; \text{operação}_{(t-1)})$$

$$Q_{BOMBSCI(t-1)} = f(Z_{V1-092(t-1)}; \text{operação}_{(t-1)})$$

$$Q_{BOMBVGO(t-1)} = f(Z_{V1-099(t-1)}; Z_{V1-099(t-1)} \text{ operação}_{(t-1)})$$

$$Q_{E_BSA(t-1)} = Q_{VERT(t-1)} + Q_{FUNDO(t-1)}$$

$$V_{V1-041(t)} = V_{V1-041(t-1)} + (Q_{A_BSA(t-1)} - Q_{E_BSA(t-1)} - Q_{BOMBVGO(t-1)}) \times \Delta t$$

onde:

$Q_{A_BSA(t-1)}$ = Vazão afluente ao reservatório de Santana;

$Q_{E_BSA(t-1)}$ = Vazão defluente do reservatório de Santana;

$Q_{VERT(t-1)}$ = Vazão pela descarga de fundo;

$Q_{BOMBSCI(t-1)}$ = Vazão bombeada para o reservatório de Vigário;

$Q_{BOMBVGO(t-1)}$ = Vazão bombeada para o reservatório de Santana;

$V_{V1-041(t-1)}$ = Volume do reservatório no instante t;

$Z_{V1-041(t-1)}$ = Nível do reservatório no instante t.

A1.5 B14: DETERMINAÇÃO DA VAZÃO NA ESTAÇÃO DE MORSING

A vazão na estação telemétrica de Morsing é estimada através da modelagem da sub-bacia B14 do rio Sacra Família, que inicia na cabeceira do rio Sacra Família e se estende até a estação de Morsing.

As principais características da sub-bacia B14 estão listadas na tabela A1.

13.

TABELA 1.13 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS SUB-BACIA B14

CARACTERÍSTICAS	VALORES
Ponto de monitoramento a montante	Bacia de cabeceira
Ponto de monitoramento a jusante	1) V1-044 (Morsing)
Área de drenagem a montante	-
Área de drenagem na exutória	190,2 km ²
Área de drenagem da sub-bacia	190,2 km ²
Altitude em Morsing	389 m
Vazão de Cheia – TR= 20 anos	228,2 m ³ /s

A bacia do rio Piráí a jusante do reservatório de Santana apresenta uma área de 227,4 km², sendo que 190,2 km² pertencem a sub-bacia do rio Sacra Família. Como a defluência do reservatório de Santana normalmente é bastante baixa, com exceção

dos períodos de ocorrência de eventos extremos de cheias, grande parte da vazão neste trecho é gerada nesta sub-bacia. Sendo assim, a vazão e a velocidade do escoamento do rio Pirai entre a Barragem de Santana e a foz do rio Sacra Família é muito baixa. Este fato faz com que a força das águas não seja suficiente para carrear os sedimentos vindos do rio Sacra Família e estes se depositam calha do rio Pirai. Esse assoreamento diminui ainda mais a capacidade do rio Pirai, já bastante reduzida devido a ocupação antrópica.

Além disso, durante eventos extremos de cheias é de grande importância o conhecimento da contribuição do rio Sacra Família para o controle das inundações na cidade de Barra do Pirai, já que esta cidade localiza-se próxima a confluência entre os dois rios.

APÊNDICE 2 – METODOLOGIA PARA DEFINIÇÃO DO CENÁRIO DE CHUVA

APÊNCIDE 2 – METODOLOGIA PARA DEFINIÇÃO DO CENÁRIO DE CHUVA

A2.1 INTRODUÇÃO

A previsão de precipitação é de grande importância para a previsão da ocorrência e intensidade dos eventos de cheia. Esta é considerada a principal entrada de água no sistema hidrológico e, por isso, a qualidade da previsão de chuva exerce grande influência sobre a qualidade dos resultados do modelo hidrológico. No entanto, realizar previsões quantitativas de precipitação que sejam confiáveis é uma tarefa de difícil execução. Existem várias metodologias propostas, incluindo métodos empíricos, estatísticos, físicos de análise da série temporal e extrapolação de condições de tempo atuais utilizando dados de sensoriamento remoto. No entanto, a aplicação destas metodologias em caráter operacional muitas vezes requer a utilização de computadores de alto porte, além da realização de estudos mais aprofundados.

Para substituir a previsão quantitativa de chuva e tornar viável a implantação do SIPOP, optou-se pela realização da previsão de vazão utilizando dois cenários de previsão de chuva diferentes, de forma a representar os limites inferior e superior do hidrograma. O primeiro cenário, denominado Cenário de Chuva Zero, supõe que não ocorrerá chuva para as próximas setenta e duas horas de previsão, representando o limite inferior do hidrograma. O segundo, denominado Cenário de Chuva Máxima, foi determinado buscando representar uma chuva intensa capaz de ocasionar uma rápida subida do hidrograma.

A2.2 DISTRIBUIÇÃO E REGIME PLUVIOMÉTRICO

A região Sudeste apresenta uma distribuição espacial de precipitações pluviométricas bastante variável, decorrente de fatores dinâmicos e orográficos, o que é confirmado ao se analisar as precipitações anuais médias para as diferentes regiões.

Na sub-bacia do rio Pirai o índice pluviométrico diminui de montante para jusante da bacia. A região localizada na cabeceira desta sub-bacia, próxima a Serra das Araras, apresenta efeito orográfico sobre o regime de chuvas produzindo índices pluviométricos elevados, aproximando-se de 1.900 mm/ano. Já no vale próximo ao rio Paraíba do Sul são encontrados valores em torno de 1.200 mm/ano. O trecho entre o reservatório de Funil e o reservatório de Santa Cecília apresenta uma menor variabilidade do total anual médio, o qual se encontra entre 1.200 e 1.600 mm/ano.

O Estudo de Chuvas Intensas para o Estado do Rio de Janeiro foi realizado pela CPRM em 2001. Foram utilizadas 34 estações para estimar as relações IDF para o estado do Rio de Janeiro. O número de anos hidrológicos em cada estação variou de 8 a 49 anos, com um número médio de 21 anos de registro. A descrição da metodologia utilizada pode ser encontrada no seguinte site: <http://www.cprm.gov.br/geo/chuvas.html>.

Neste estudo o estado do Rio de Janeiro foi dividido em Regiões Homogêneas, através da análise das informações fisiográficas, climatológicas e do mapa isoietal de precipitação média anual do estado do Rio de Janeiro, utilizando a técnica de análise de clusters recomendada por Hosking & Wallis (1997). A área do SIPOP foi dividida em duas regiões diferentes, denominadas região 3 e 4, sendo que a região 4 apresenta chuvas mais intensas e abrange a cabeceira do rio Pirai e a sub-bacia do rio Paraíba do Sul, entre Funil e Volta Redonda. As fórmulas IDF definidas encontram-se em função da região homogênea, da duração da chuva, do tempo de recorrência e da média anual de precipitação do ponto que se deseja analisar. Para que se tenha uma idéia dos valores obtidos as Tabelas A2.1 e A2.2 apresentam a chuva em mm/hora obtida para a região 4, tempo de recorrência de 10 e 50 anos, valores de

duração da chuva variando entre 1 e 24 horas e médias anuais de precipitação variando de 1.000 e 2.000 mm.

TABELA A2.1 VALORES DE CHUVA INTENSA (MM/HORA) PARA TR=10 ANOS

TEMPO DE RECORRÊNCIA = 10 ANOS					
DURAÇÃO (HORA)	PRECIPITAÇÃO MÉDIA ANUAL (MM)				
	1200	1400	1600	1800	2000
1	59,96	63,49	66,72	69,70	72,47
2	35,62	37,72	39,64	41,41	43,06
3	26,65	28,22	29,65	30,97	32,21
4	21,20	22,44	23,58	24,64	25,62
8	12,47	13,20	13,87	14,49	15,07
14	8,00	8,48	8,91	9,30	9,68
24	5,26	5,57	5,85	6,11	6,36

TABELA A2.2 VALORES DE CHUVA INTENSA (MM/HORA) PARA TR=50 ANOS

TEMPO DE RECORRÊNCIA = 50 ANOS					
DURAÇÃO (HORA)	PRECIPITAÇÃO MÉDIA ANUAL (MM)				
	1200	1400	1600	1800	2000
1	80,45	85,18	89,51	93,50	97,23
2	47,44	50,23	52,78	55,14	57,33
3	37,11	39,30	41,29	43,14	44,86
4	30,10	31,87	33,49	34,99	36,38
8	17,50	18,53	19,47	20,34	21,15
14	11,09	11,74	12,34	12,89	13,40
24	7,25	7,68	8,07	8,43	8,76

Apesar destes valores darem uma boa idéia da intensidade da chuva máxima para a região, estes valores não levam em consideração a climatologia da região, com maior frequência e intensidade de chuvas entre janeiro e março.

A2.3 DETERMINAÇÃO DOS CENÁRIOS DE CHUVA

Para determinar o cenário de chuva média, primeiramente buscou-se utilizar uma metodologia baseada na análise climatológica das séries pluviométricas, buscando definir o valor mais provável da chuva para cada hora. No entanto, esta metodologia resultou em valores de chuva horária muito baixos para alguns períodos do ano, chegando em alguns casos a apresentar chuva zero. Aplicou-se então uma segunda metodologia baseada na determinação da maior chuva diária ocorrida no histórico para cada mês do ano. A análise de cada mês individualmente permitiu inserir o aspecto climatológico na definição dos cenários.

O cenário de chuva média foi estimado através de quatro passos:

- d) seleção de postos pluviométricos em diferentes áreas da bacia do rio Pirai e rio Paraíba do Sul
- e) análise de consistência dos dados diários de cada posto
- f) determinação da máxima chuva diária ocorrida em cada mês do ano de cada posto
- g) desagregação da chuva máxima diária em valores horários

A2.3.1 Seleção dos postos e coleta dos dados de chuva

Para a realização do estudo foram selecionados três postos localizados em pontos distintos da bacia e cujos dados diários fizessem parte da base de dados da ANA e pudessem ser consultados através do Hidroweb. As principais características destes postos podem ser visualizadas na Tabela A2.3. Os dados destas estações foram utilizados para definir os cenários de previsão de chuva para cada uma das sub-bacias do SIPOP, conforme a localização dos postos. As sub-bacias definidas para cada estação podem ser visualizadas na última coluna da Tabela A2.3.

TABELA A2.3 ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS

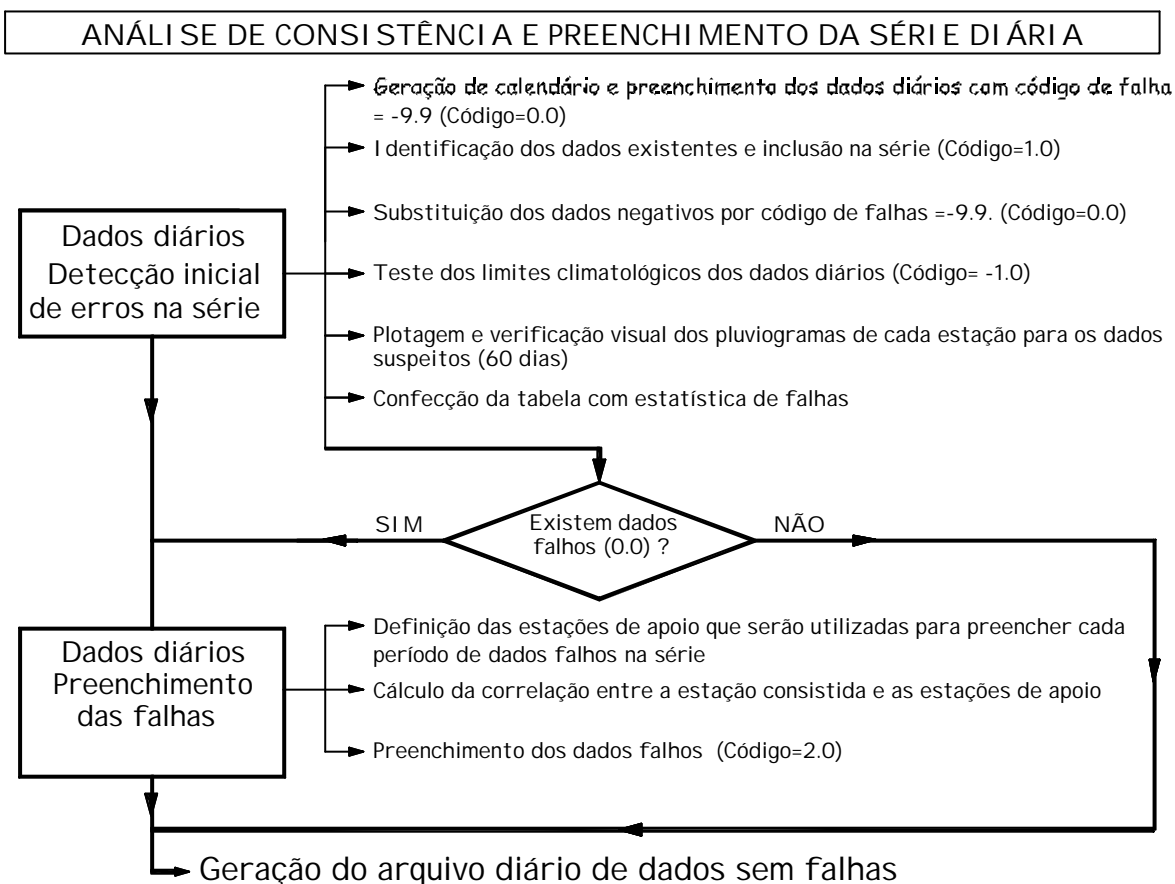
CÓDIGO	NOME	SUB-BACIA	PERÍODO	SUB-BACIAS
02244040	Lidice	Pirai	01/01/51-12/01/95	B10
02244041	V. Redonda	Paraíba do Sul	1/1/1943 - 02244041	B11, B12, B13, e B14
02244042	Barra Mansa	Paraíba do Sul	4/1/1940 - 12/01/2002	B0 e B1

A2.3.2 Consistência dos dados

A consistência das séries pluviométricas exige a execução de diversos procedimentos de análise, sendo que uma parte é realizada manualmente e outra automaticamente, o que exige grande atenção. Para realizar a parte automática do procedimento foi utilizado um aplicativo desenvolvido em Fortran. As saídas destes

aplicativos foram plotadas e analisadas através do uso do Excel. As atividades executadas estão listadas no fluxograma da figura A2.1.

FIGURA A2.1 FLUXOGRAMA DAS ATIVIDADES DE CONSISTÊNCIA E PREENCHIMENTO DA SÉRIE DIÁRIA



A2.3.3 Determinação da máxima chuva diária

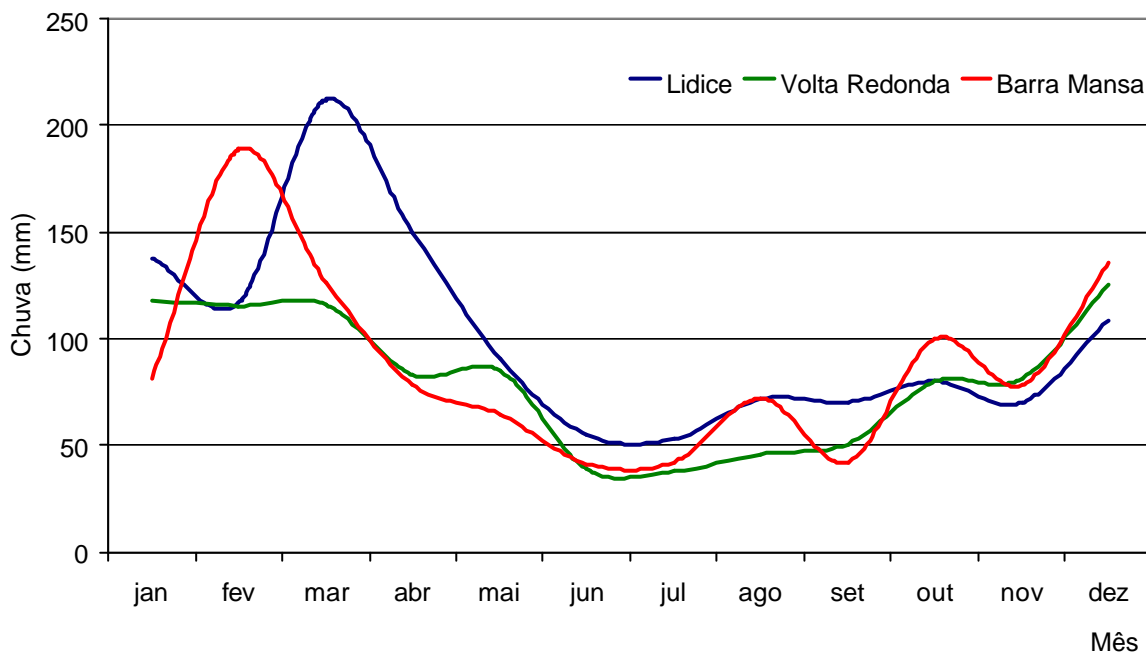
Após a consistência das séries pluviométricas, foram identificados os maiores valores de precipitação diária para cada mês, para todos os anos do histórico. As estatísticas destes dados podem ser visualizadas na tabela A2.4. No gráfico da Figura A2.2 são plotadas as máximas diárias para cada mês para as três estações analisadas.

TABELA A2.4 MÁXIMAS PRECIPITAÇÕES DIÁRIAS POR MÊS

EST.	LÍDICE			VOLTA REDONDA			BARRA MANSA		
	MÁX.	MÉD.	DESV.	MÁX.	MÉD.	DESV.	MÁX.	MÉD.	DESV.
jan	137,80	68,35	4,20	118,00	53,45	18,30	81,30	46,65	2,35
fev	116,90	60,32	7,50	115,40	49,54	2,65	188,60	50,06	16,90
mar	212,00	64,55	14,20	116,00	53,03	8,80	126,60	52,78	7,25
abr	149,80	39,20	2,10	83,00	30,76	4,25	78,40	29,45	12,20
mai	90,60	27,60	10,60	85,30	20,68	11,05	64,80	21,33	0,70
jun	55,00	17,64	5,70	38,80	12,11	1,30	41,40	10,74	5,50
jul	53,00	16,54	9,95	38,00	9,83	0,55	42,40	11,65	5,70
ago	71,80	19,51	30,95	46,10	13,55	6,70	72,00	13,54	5,00
set	70,20	23,74	3,50	50,80	21,04	19,60	42,40	19,81	0,00
out	80,20	32,94	7,00	79,90	32,90	2,90	100,00	32,94	10,65
nov	70,00	41,53	3,70	81,40	36,10	9,55	78,30	37,70	10,40
dez	108,80	55,12	3,40	125,30	50,20	5,55	135,40	48,94	16,60

FIGURA A2.2 CLIMATOLOGIA DA PRECIPITAÇÃO MÁXIMA DIÁRIA

Climatologia da precipitação máxima diária



Neste gráfico pode-se verificar que o regime pluviométrico da região apresenta estações secas e chuvosas bem definidas, comprovando a importância de definir os cenários de chuva levando em consideração a climatologia da região.

A2.3.4 Desagregação da chuva diária em horária

Como o objetivo é determinar um cenário de chuva prevista que consiga representar o limite superior do hidrograma, foram utilizados nesta definição os

valores observados de chuva máxima diária de cada mês. Desta forma, a soma da chuva prevista para as primeiras 24 horas de previsão será igual a máxima chuva diária observada em todo o histórico. Para as 48 horas restantes, como não exercem grande influência no controle de cheias, serão utilizadas chuvas previstas iguais a zero.

A previsão de chuva fornecida ao modelo deverá apresentar a mesma resolução temporal do modelo, ou seja, horária. Para desagregar a chuva diária em chuva horária foram definidas frações de desagregação para as primeiras vinte e quatro horas do horizonte de previsão, de forma que as primeiras horas apresentassem valores mais elevados de chuva e estes fossem diminuindo gradativamente com o aumento do horizonte de previsão. As frações definidas podem ser visualizadas no gráfico da Figura A2.3.

Para que o conceito fique mais claro será apresentado um exemplo para a sub-bacia B10, mês de janeiro. Para esta bacia são utilizados os dados da estação de Lídice e a chuva máxima diária para o mês de janeiro é de 137,8 mm, como apresentado na tabela A2.4. O gráfico da Figura A2.4 apresenta a previsão de chuva que será utilizada para esta bacia para todas as previsões realizadas em janeiro, independente do dia e da hora inicial da previsão. Pode-se notar que a soma de todos os valores apresentados no gráfico é igual a chuva máxima diária para este mês.

FIGURA A2.3 DISTRIBUIÇÃO DAS FRAÇÕES DE DESAGREGAÇÃO DA CHUVA DIÁRIA EM HORÁRIA

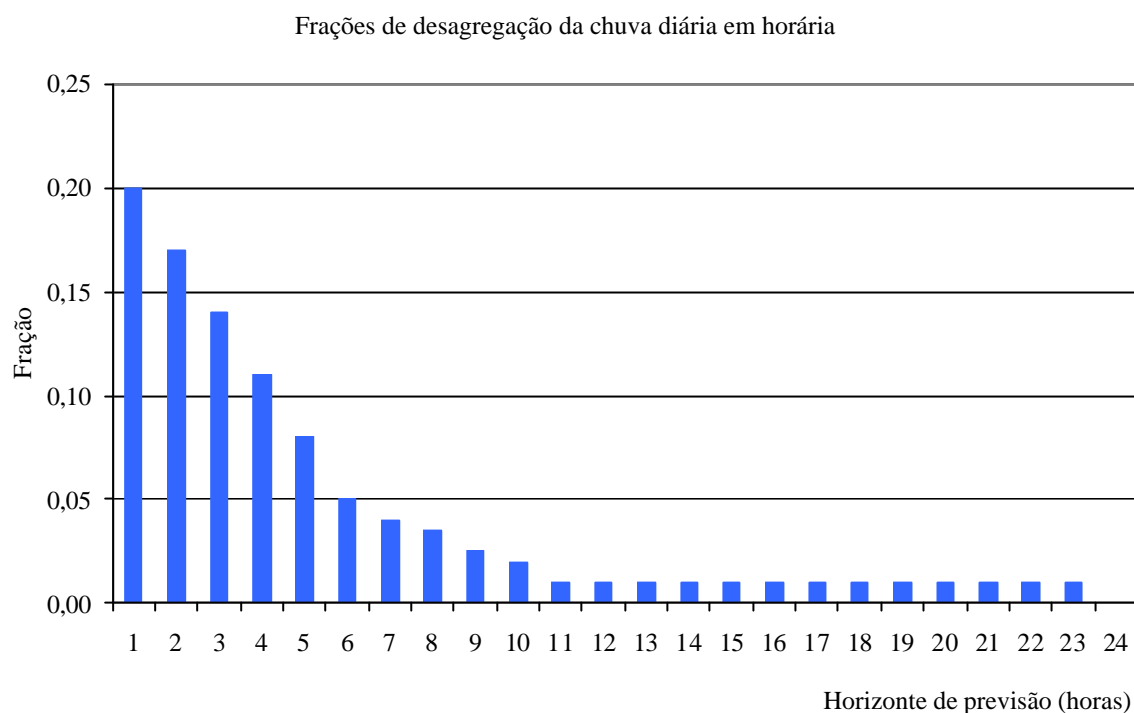
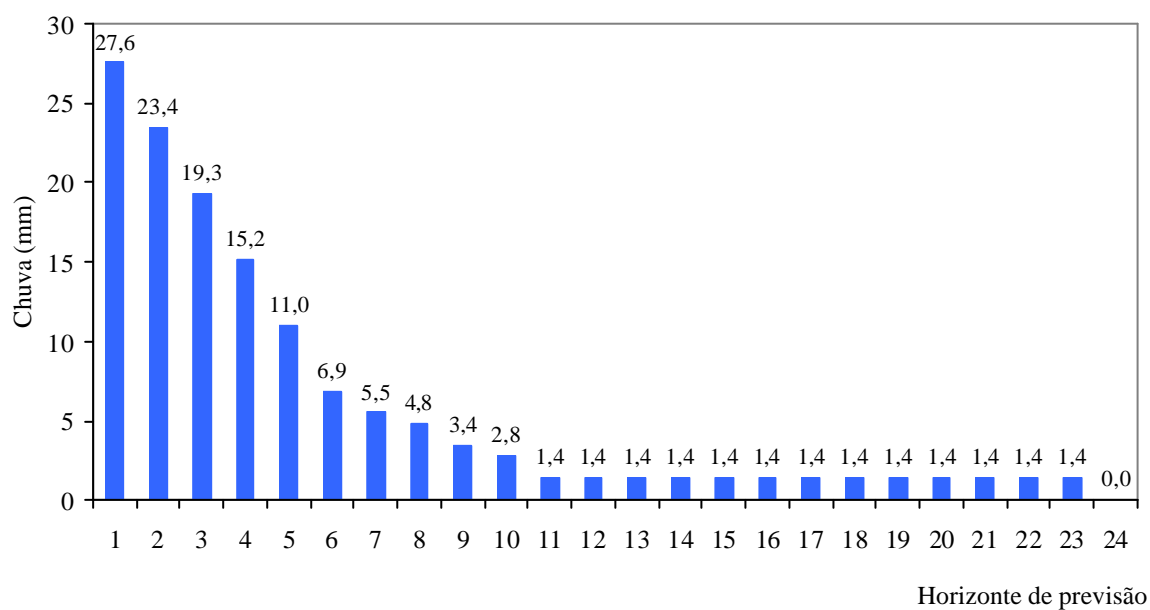


FIGURA A2.4 PREVISÃO DE CHUVA PARA O HORIZONTE DE 24 HORAS – SUB-BACIA B10, MÊS DE JANEIRO

Previsão de chuva para o horizonte de 24 horas - Sub-bacia B10, mês de janeiro



APÊNDICE 3 – TELAS DA INTERFACE GRÁFICA DO USUÁRIO

APÊNCICE 3 – TELAS DA INTERFACE GRÁFICA DO USUÁRIO

As telas da Interface gráfica do SIPOP foram desenvolvidas de forma a facilitar a utilização do software por parte dos operadores das usinas. As principais telas do aplicativo são:

- (1) Tela de abertura;
- (2) Tela inicial;
- (3) Tela da Previsão Típica:
 - a. Previsão de nível com resolução horária – resultados gráficos;
 - b. Previsão de vazão com resolução horária – resultados gráficos;
 - c. Previsão de vazão, nível e chuva com resolução horária – Resultados em tabela;
 - d. Previsão de vazão diário com horizonte de três dias - Tabela ONS.
- (4) Telas de Simulação
 - a. Seleção da data e hora inicial da simulação;
 - b. Edição dos dados de entrada de chuva e operação previstas;
 - c. Previsão de nível com resolução horária – resultados gráficos;
 - d. Previsão de vazão com resolução horária – resultados gráficos;
 - e. Previsão de vazão, nível e chuva com resolução horária – Resultados em tabela.
- (5) Telas de validação:
 - a. Análise gráfica;
 - b. Análise estatística.
- (6) Tela de edição da vazão defluente de Funil:
- (7) Telas de Utilitários
 - a. Cadastramento de novos usuários ou alteração de cadastros antigos;
 - b. Visualização e edição dos dados típicos (chuva e operação das estruturas hidráulicas) utilizados no módulo de previsão Típica;

- c. Visualização e edição dos parâmetros do modelo hidrológico para todas as sub-bacias;
- d. Visualização e edição das características físicas de cada sub-bacia modelada;
- e. Visualização das condições iniciais do modelo hidrológico – variáveis de estado;
- f. Visualização dos dados calculados durante o módulo de atualização - pré processamento;
- g. Visualização e edição das informações relativas ao horário de atualização do módulo de previsão típica;
- h. Cadastro e visualização dos parâmetros do sistema;

Devido ao grande número de telas, neste documento são apresentadas somente as telas principais do aplicativo.

A3.1 TELA INICIAL

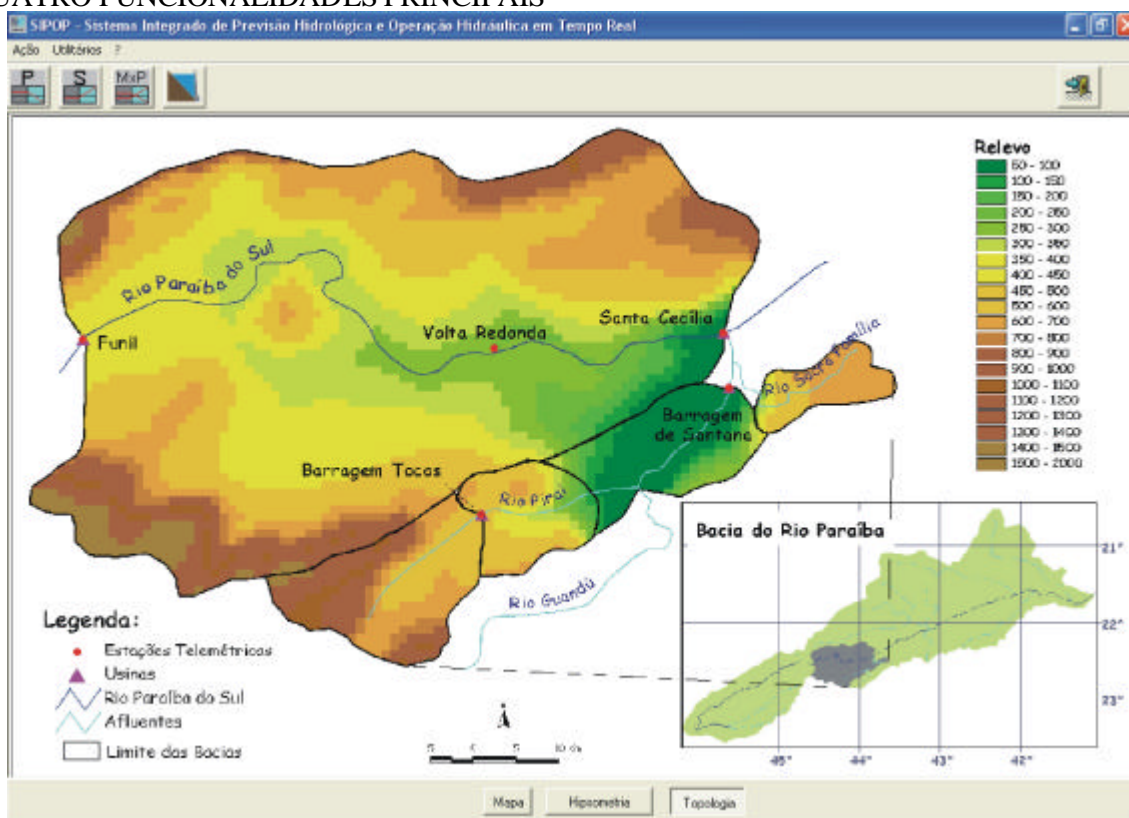
A tela inicial, ilustrada na Figura A3.1, apresenta as funcionalidades do aplicativo SIPOP. O acesso a estas funcionalidades depende do nível de permissão do usuário ao sistema.

Nesta tela o operador deverá selecionar um dos ícones apresentados na parte superior esquerda da tela, sendo eles:

- (1) Ícone com a letra P – Módulo de previsão típica;
- (2) Ícone com a letra S – Módulo de simulação;
- (3) Ícone com a letra M e P – Módulo de validação;
- (4) Ícone com reservatório – Edição dos dados observados de vazão defluente de Funil;
- (5) “Utilitários” – Acessado através da barra de ferramentas superior – Edição dos dados de entrada para o módulo de previsão típica e dos parâmetros do modelo de previsão hidrológica.

Abaixo do mapa existem três ícones que permitem que o usuário escolha a Figura a ser apresentada nesta tela, podendo optar por visualizar a hipsometria da área (apresentada na Figura A3.1), o mapa com divisão de sub-bacias e o esquema topológico das sub-bacias e estruturas hidráulicas do SIPOP.

FIGURA A3.1 TELA INICIAL DO SIPOP COM MAPA DA BACIA E OS ÍCONES DAS QUATRO FUNCIONALIDADES PRINCIPAIS



A3.2 TELAS DO MÓDULO DE PREVISÃO TÍPICA

Para acessar as telas de resultado da previsão típica o operador deverá clicar sobre o ícone com a letra “P” na tela inicial. Será apresentada ao operador a tela ilustrada na Figura A3.2, onde pode-se verificar na região superior esquerda da tela a data e a hora inicial da última previsão realizada, da qual são apresentados os resultados.

Os ícones com o nome dos trechos possibilitam que o operador visualize os resultados apenas clicando sobre o ícone referente ao trecho desejado. São apresentados os resultados para os seguintes pontos:

- (1) Santa Cecília - Afluência;
- (2) Tocos - Afluência;
- (3) Tocos vertida;
- (4) Nova Esperança;
- (5) Santana;
- (6) Morsing.

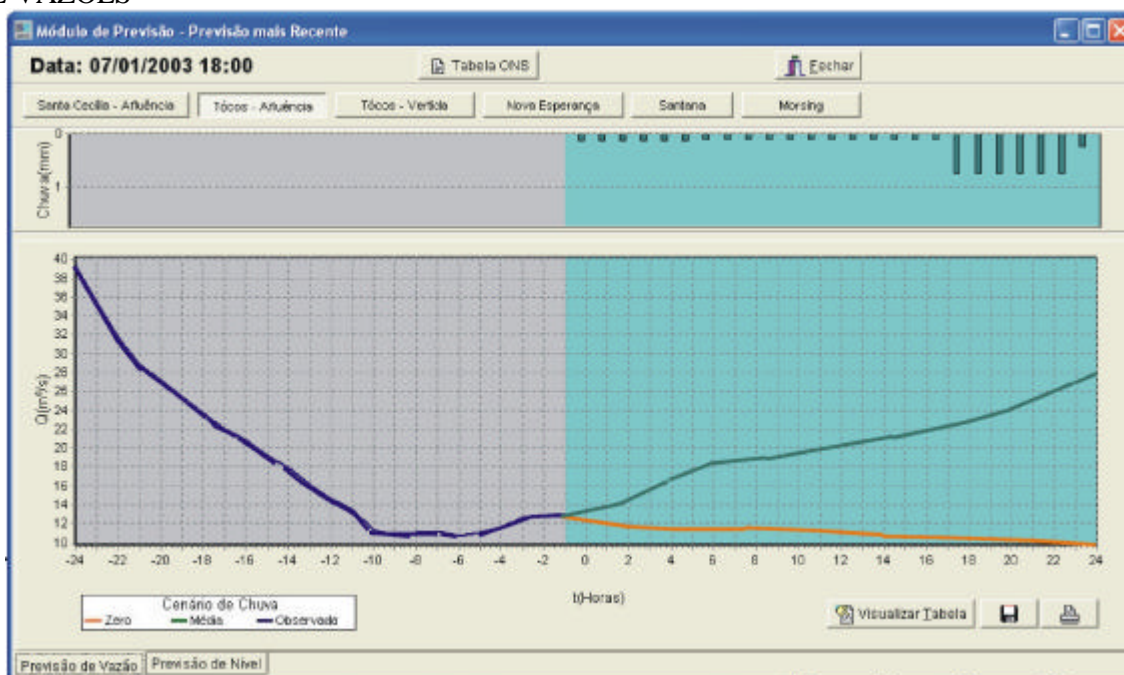
Na região central da tela, são apresentados dois gráficos que apresentam os valores monitorados e previstos, sendo que o gráfico localizado na região superior da tela representa dados de chuva e na região inferior dados de vazão (ou nível). Do lado esquerdo, no gráfico com fundo cinza, são apresentadas 24 horas de dados monitorados anteriores ao horário inicial da previsão (dados monitorados). A linha do gráfico referente aos dados monitorados apresenta a cor azul. Do lado direito, no gráfico de fundo azul, são apresentadas as previsões para as 24 horas subseqüentes. Neste campo são apresentadas duas linhas de cores diferentes: a linha de cor verde representa a previsão para o cenário de chuva máxima e a de cor laranja representa a previsão para o cenário de chuva zero. O mesmo ocorre com os gráficos de barra representativos da variável chuva. Desta forma, a tela sempre apresentará os valores monitorados e previstos de duas variáveis:

- (1) Chuva: localizada na parte superior da tela, representado por gráfico de barras com eixo das ordenadas invertido. As barras de cor azul representam dados monitorados e de cor verde o cenário de chuva média;
- (2) Vazão ou nível: localizada na parte inferior da tela e representada por gráfico de linha, sendo a linha verde representativa da previsão utilizando cenário de chuva média e linha laranja cenário de chuva zero. A escolha entre a

visualização da previsão de vazão ou de nível é realizada nos ícones localizados logo abaixo dos gráficos.

A abscissa dos gráficos apresenta a escala de tempo em horas e a ordenada os valores de chuva em milímetros, nível em metros ou vazão em metros cúbicos por segundo.

FIGURA A3.2 TELA DOS RESULTADOS DO MÓDULO DE PREVISÃO TÍPICA – GRÁFICO DE VAZÕES



Os gráficos podem ser salvos ou impressos através de seleção dos ícones auto-ilustrativos localizados no canto inferior direito da tela.

Além dos gráficos, podem ser visualizadas as Tabelas com os resultados numéricos da previsão, conforme tela ilustrada na Figura A3.3. Para isso, deve ser acionado o ícone “Visualizar Tabela”. Analogamente aos gráficos as tabelas também podem ser salvas ou impressas.

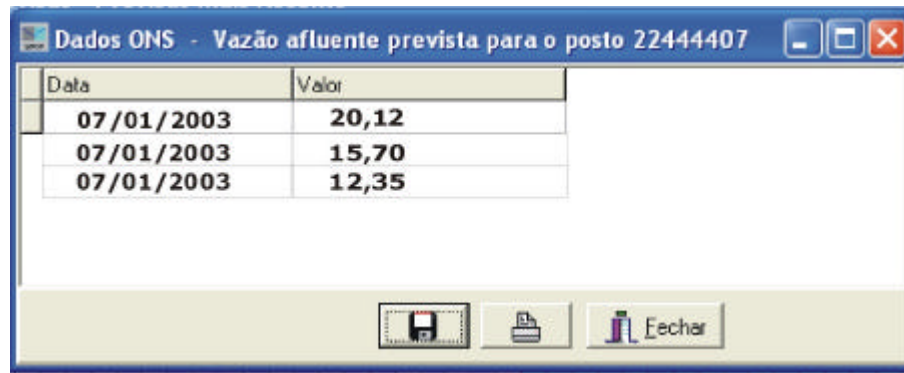
FIGURA A3.3 TELA DOS RESULTADOS DO MÓDULO DE PREVISÃO TÍPICA – DADOS NUMÉRICOS

Ano	Mês	Dia	Hora	Cenário Chuva D			Cenário Chuva Média			Observada			Q4	Z	P
				Q4	QE	Z	V	Bomba	P	Q4	QE	Z			
2002	12	5	8										309.81	352.09	0
2002	12	5	9										294.66	352.09	0
2002	12	5	10										310.25	352.12	0
2002	12	5	11										306.51	352.14	0
2002	12	5	12										306.53	352.18	0
2002	12	5	13										293.6	352.22	0
2002	12	5	14										272.41	352.26	0
2002	12	5	15										295.3	352.28	0
2002	12	5	16										274.12	352.3	0.2
2002	12	5	17										276.9	352.31	0
2002	12	5	18	2.25	72	352.3	4016926	160	0	2.463	72	352.3	4016926	160	0.18
2002	12	5	19	2.13	72	351.683	3189326	160	0	2.566	72	351.683	3190582	160	0.18
2002	12	5	20	2.04	72	351.37	2362294	160	0	2.616	72	351.371	2364634	160	0.18
2002	12	5	21	1.96	72	350.681	1534438	160	0	2.643	72	350.685	1535886	160	0.18
2002	12	5	22	1.88	72	349.707	706294	160	0	2.662	72	349.718	713170	160	0.18
2002	12	5	23	1.81	72	347	0	160	0	2.677	72	347	0	160	0.18
2002	12	6	0	1.74	72	347	0	160	0	2.63	72	347	0	160	0.13
2002	12	6	1	1.67	72	347	0	160	0	2.58	72	347	0	160	0.13
2002	12	6	2	1.61	72	347	0	160	0	2.551	72	347	0	160	0.13
2002	12	6	3	1.55	72	347	0	160	0	2.529	72	347	0	160	0.13
2002	12	6	4	1.49	72	347	0	160	0	2.51	72	347	0	160	0.13
2002	12	6	5	1.44	72	347	0	160	0	2.491	72	347	0	160	0.13
2002	12	6	6	1.39	72	347	0	160	0	2.473	72	347	0	160	0.13
2002	12	6	7	1.33	72	347	0	160	0	2.455	72	347	0	160	0.13
2002	12	6	8	1.29	72	347	0	160	0	2.437	72	347	0	160	0.13
2002	12	6	9	1.24	72	347	0	160	0	2.419	72	347	0	160	0.13
2002	12	6	10	1.20	72	347	0	160	0	2.402	72	347	0	160	0.13
2002	12	6	11	1.15	72	347	0	160	0	2.385	72	347	0	160	0.13
2002	12	6	12	1.11	72	347	0	160	0	2.368	72	347	0	160	0.8
2002	12	6	13	1.07	72	347	0	160	0	2.352	72	347	0	160	0.8
2002	12	6	14	1.03	72	347	0	160	0	2.336	72	347	0	160	0.8
2002	12	6	15	1.00	72	347	0	160	0	2.321	72	347	0	160	0.8
2002	12	6	16	0.96	72	347	0	160	0	2.306	72	347	0	160	0.8
2002	12	6	17	0.93	72	347	0	160	0	2.291	72	347	0	160	0.8
2002	12	6	18	0.90	72	347	0	160	0	2.276	72	347	0	160	0.27

Para visualizar a previsão com resolução diária e horizonte de três dias, o operador deverá clicar sobre o ícone denominado “Tabela ONS”, apresentado na tela de visualização dos resultados da previsão típica.

O resultado apresentado corresponderá ao trecho que está sendo analisado na tela de previsão. São apresentados os valores de vazão afluente prevista em metros cúbicos por segundo, conforme ilustra a Figura A3.4. Essa Tabela poderá ser salva ou impressa.

FIGURA A3.4 TELA DO MÓDULO DE PREVISÃO TÍPICA – TABELA NOS



Data	Valor
07/01/2003	20,12
07/01/2003	15,70
07/01/2003	12,35

A3.3 TELAS DO MÓDULO DE PREVISÃO TÍPICA

Para acessar essa função o usuário deverá clicar no ícone com a letra “S” na tela inicial. Ao acionar este ícone é apresentada a tela do módulo de simulação, apresentada na Figura A3.5, onde o operador escolherá inicialmente a data e hora inicial, a partir da qual se deseja realizar a previsão. Isso será feito na parte superior esquerda da tela. O operador pode optar por qualquer hora entre a data do início de operação do sistema e a hora atual.

Com isso, são apresentados os dados do cenário de previsão de chuva e cenário de operação hidráulica futura para as setenta e duas horas subsequentes à hora escolhida como inicial (período de previsão). Os dados de chuva prevista e operação futura podem ser editados conforme a necessidade do operador, o que ocorre principalmente em função de duas situações:

- (1) Prever os níveis dos reservatórios de acordo com a operação das estruturas hidráulicas.
- (2) Prever a vazão afluente e o nível dos reservatórios para diferentes previsões de chuva.

FIGURA A3.5 TELA DE SELEÇÃO DA DATA E HORA INICIAL DA SIMULAÇÃO

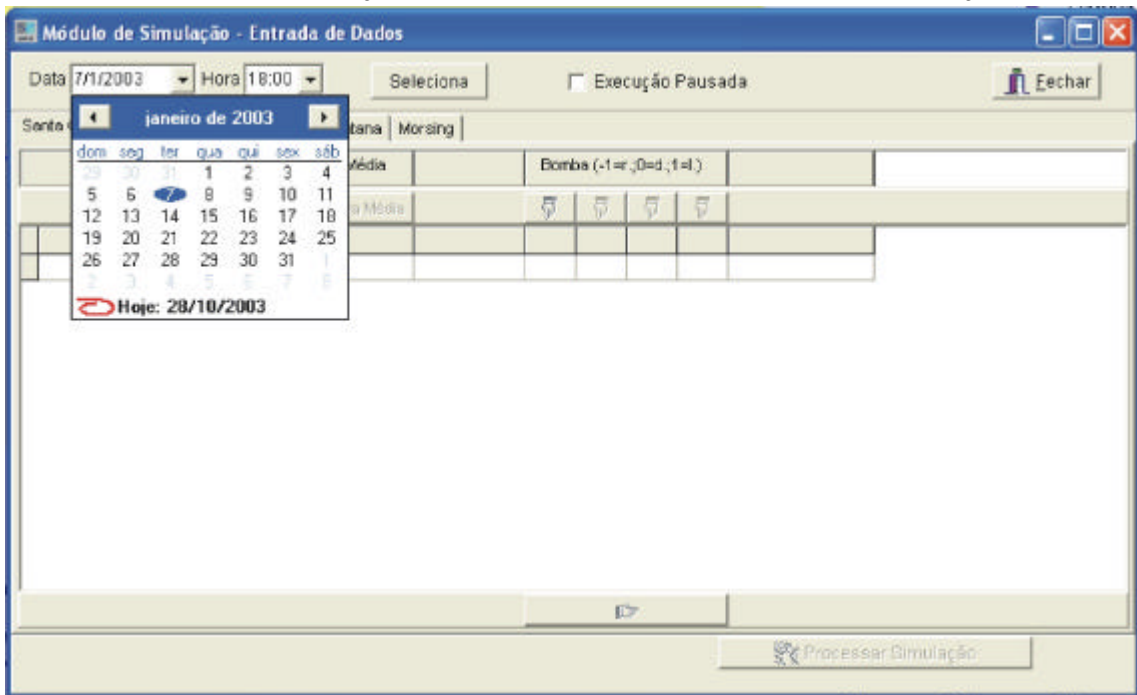
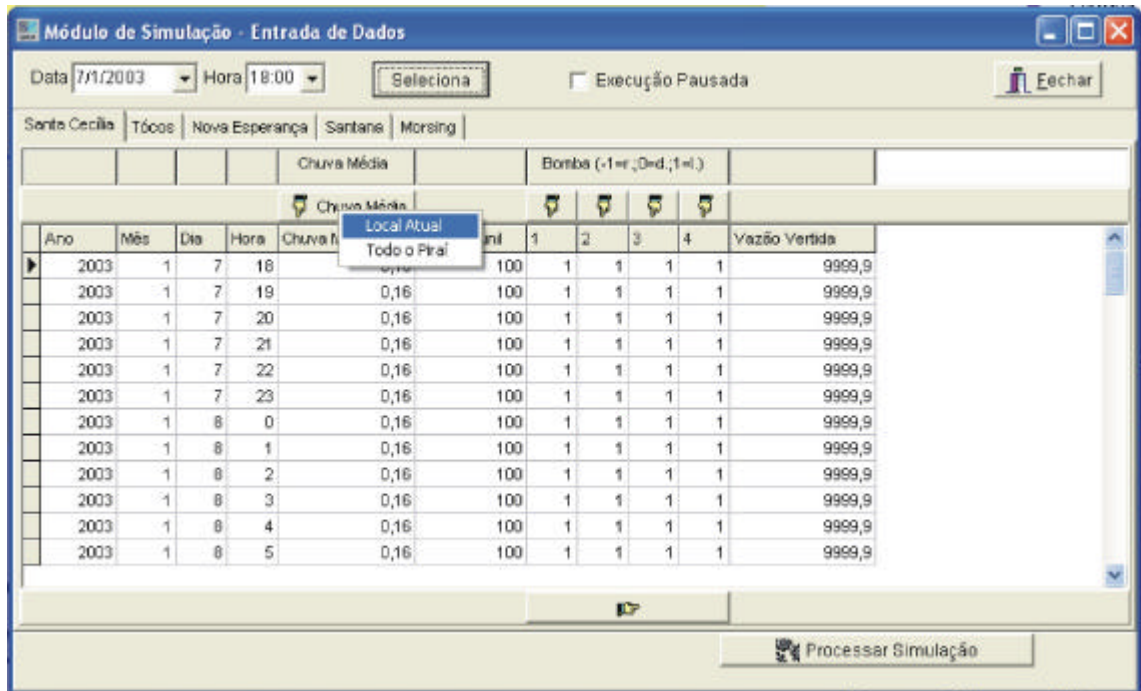


FIGURA A3.6 TELA DO MÓDULO DE SIMULAÇÃO PARA EDIÇÃO DOS DADOS DE CHUVA



Após realizar todas as alterações que considerar pertinente, o usuário deve selecionar o ícone “Processar Simulação” para iniciar os processamentos do modelo de previsão hidrológica e operação hidráulica. Os resultados são apresentados em tela

similar a tela da previsão típica. Nesse caso, a parte do gráfico referente a previsão apresentará somente uma linha para vazão e nível, condizente com o cenário de chuva e operação considerado pelo operador. A tela referente a visualização dos resultados da simulação é similar a tela de visualização dos resultados do módulo de previsão típica, apresentada na Figura A3.2.

Da mesma forma que no módulo de previsão típica, o operador poderá optar por visualizar os dados numéricos. No caso de seção do rio, a tabela apresentará dados de chuva, vazão e nível monitorados e previstos e no caso de reservatórios o sistema apresentará todas as informações utilizadas no cálculo do balanço hídrico do reservatório.

A3.4 TELAS DO MÓDULO DE VALIDAÇÃO

Para acessar essa função o usuário deve clicar no ícone com a letra “M e P” na tela inicial. Desta forma, o usuário acessa a tela correspondente a validação, onde são escolhidas a data e hora da previsão que se deseja analisar. São analisados os resultados do módulo de previsão típica, comparando os dados previstos com os dados monitorados de chuva e vazão.

A análise dos dados pode ser feita de duas formas:

- (1) Análise Gráfica: São plotados os valores do resultado da previsão e os valores observados no mesmo gráfico. Desta forma, observa-se claramente a diferença entre valores observados e previstos para cada intervalo de tempo.
- (2) Tabelas de estatísticas de acerto, selecionadas clicando-se no botão “estatística” na parte superior da tela. A tabela apresenta o erro médio quadrático e a correlação para todos os trechos do SIPOP para as variáveis chuva e vazão. O conjunto de 72 horas de valores previstos foram separados em três grupos de 24 horas, ou seja, são analisadas estatisticamente as previsões para os três dias de previsão separadamente. Isso foi feito pois a

precisão dos resultados do modelo diminui a medida que o horizonte de previsão aumenta.

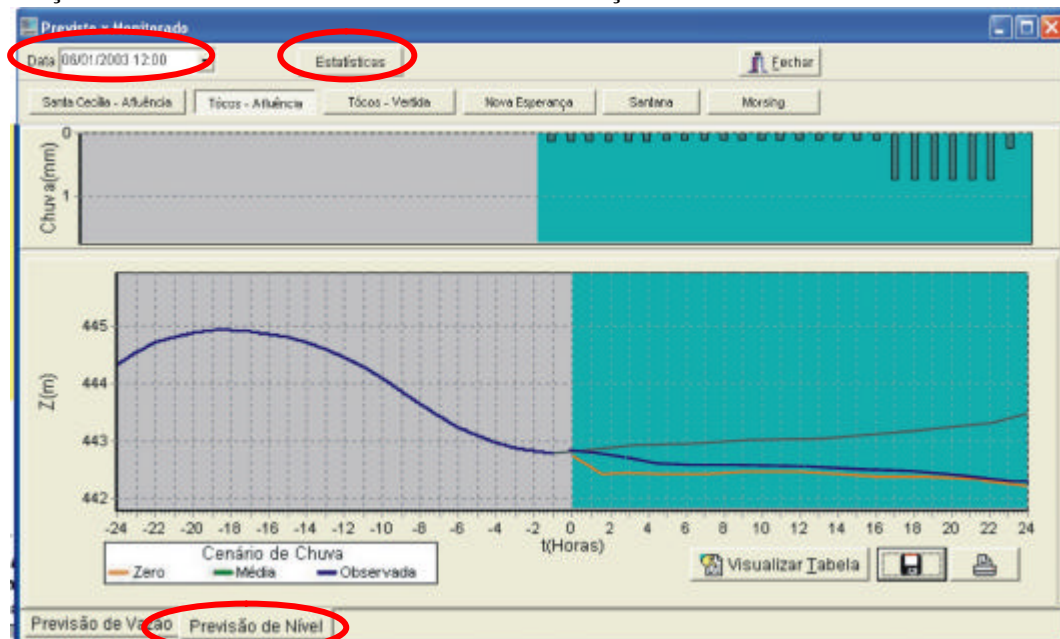
É de grande importância a comparação entre os dados de chuva prevista e monitorada, pois a chuva é o fenômeno forçante do processo hidrológico. Caso a chuva observada e a chuva prevista sejam muito diferentes, o modelo de previsão com certeza não apresentará uma boa correlação entre os resultados da previsão hidrológica e as vazões e níveis monitorados para horizontes de previsão maiores que o tempo de concentração da bacia. Essa análise deve ser feita comparando a chuva de todos os trechos, pois uma diferença muito grande entre chuva prevista e monitorada em trechos a montante, pode causar erro significativo na previsão de vazão e nível nos trechos de jusante.

Na análise gráfica são comparados os seguintes dados:

- (1) Vazão monitorada e prevista utilizando o cenário de chuva zero;
- (2) Vazão monitorada e prevista utilizando o cenário de chuva média;
- (3) Nível monitorado e previsto utilizando o cenário de chuva zero;
- (4) Nível monitorado e previsto utilizando o cenário de chuva média;
- (5) Chuva observada e cenário de chuva zero;
- (6) Chuva observada e cenário de chuva média.

A tela de análise gráfica é semelhante a tela de visualização dos resultados da previsão típica, com a diferença que os dados monitorados são apresentados para todo o período. O horário que se está analisando é apresentado no canto superior direito da tela. Esta tela pode ser visualizada na Figura A3.7.

FIGURA A3.7 TELA DE VISUALIZAÇÃO DOS RESULTADOS DO MÓDULO DE VALIDAÇÃO – ANÁLISE GRÁFICA PARA VALIDAÇÃO DOS NÍVEIS PREVISTOS



A comparação entre os dados monitorados e previstos também será realizada através do cálculo das funções estatísticas denominadas correlação e erro médio quadrático. O objetivo é fornecer uma ferramenta de análise da qualidade dos resultados do modelo de previsão e dos dados de entrada fornecidos a este (cenários de chuva). Esta análise será realizada para cada trecho de previsão. São calculadas as correlações e os erros médios quadráticos para os seguintes conjuntos de dados:

- (1) Vazão monitorada e prevista utilizando cenário de chuva zero para horizonte de previsão de 0 a 24 horas, 24 a 48 horas, 48 a 72 horas e 0 a 72 horas;
- (2) Vazão monitorada e prevista utilizando cenário de chuva médio para horizonte de previsão de 0 a 24 horas, 24 a 48 horas, 48 a 72 horas e 0 a 72 horas;
- (3) Chuva monitorada e Cenário de chuva zero para horizonte de previsão de 0 a 24 horas, 24 a 48 horas, 48 a 72 horas e 0 a 72 horas;
- (4) Chuva monitorada e Cenário de chuva média para horizonte de previsão de 0 a 24 horas, 24 a 48 horas, 48 a 72 horas e 0 a 72 horas;

A3.5 TELAS DO MÓDULO DE VALIDAÇÃO

Esta função é acessada através do ícone localizado na tela inicial, que apresenta a figura esquemática de um reservatório.

A previsão hidrológica de uma sub-bacia intermediária depende da vazão prevista a montante desta, que corresponde a vazão de contribuição do trecho a montante. Com isso, a previsão de vazão na sub-bacia localizada entre a Usina Hidrelétrica de Funil e a estação telemétrica de Volta Redonda depende da definição da vazão monitorada e da vazão prevista defluente da Usina de Funil sendo, neste caso, a vazão de contribuição para esta bacia.

Os dados de defluencia da Usina Hidrelétrica de Funil não se encontram no banco de dados hidrológico com resolução horária, somente diária. Além disso, não é garantido que estes dados estejam sendo atualizados de acordo com a necessidade do SIPOP. Para resolver este problema, caso esta informação esteja disponível, o operador poderá inseri-la no banco de dados de SIPOP através da interface gráfica do usuário. Para isso, foram criadas duas tabelas no banco de dados que armazenam estes dados, sendo elas:

- (1) VAZAOOBSERVADAFUNIL: Contêm dados de vazão monitorada defluente a Usina Hidrelétrica de Funil com resolução horária e devem ser inseridas no banco pelo operador.
- (2) VAZAOTIPICAFUNIL: Apresenta informações sobre a vazão típica defluente a Usina Hidrelétrica de Funil, no caso definida próxima da vazão mínima de restrição.

A tela utilizada para edição destes dados é apresentada na Figura A3.9. A função de cada ícone e sua descrição é apresentada na tabela 5.2.

FIGURA A3.9 TELA PARA EDIÇÃO DA VAZÃO MONITORADA DEFLUENTE DE FUNIL

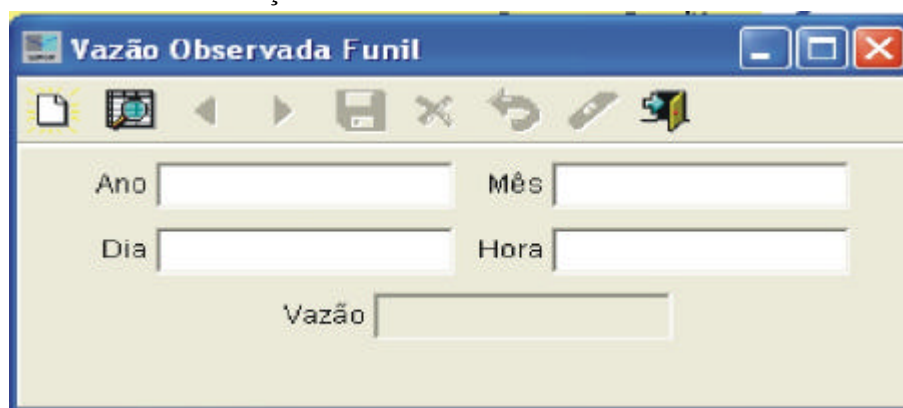











TABELA A3.1 FUNÇÕES E RESPECTIVAS DESCRIÇÕES DOS ÍCONES APRESENTADOS NA TELA DE EDIÇÃO DA VAZÃO DEFLUENTE A FUNIL

ÍCONE	FUNÇÃO	DESCRIÇÃO DA FUNÇÃO
	Inserir	Inserir um novo dados. Para facilitar a edição, ao clicar neste ícone será apresentada ao operador a última data editada por este.
	Selecionar	Seleciona um valor já editado e salvo no banco de dados. Primeiramente o operador deverá editar na tela a data que deseja visualizar e depois clicar sobre o botão selecionar.
	Retroceder	Após a inclusão de mais de um valor este ícone é habilitado e permite que o operador volta aos valores editados anteriormente.
	Avançar	Caso o operador tenha retrocedido nos valores editados, este ícone será habilitado e o operador poderá utilizá-lo para avançar para os próximos valores editados.
	Salvar	Ao editar um novo valor na tela o operador deverá acionar este ícone para salvar este valor no banco de dados.
	Excluir	Ao selecionar um valor do banco de dados o operador deverá acionar este ícone caso deseje excluí-lo.
	Reverter	Volta a última ação do operador.
	Limpar	Limpa os valores da tela, voltando a habilitar somente as opções "Inserir" e "Selecionar".
	Fechar janela	Fecha a tela de edição da vazão defluente a Funil.

**APÊNDICE 4 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO MODELO
HIDROLÓGICO SUB-BACIA DE CABECEIRA 1 E INTERMEDIÁRIA 1**

APÊNDICE 4 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO SUB-BACIA DE CABECEIRA 1 E INTERMEDIÁRIA 1

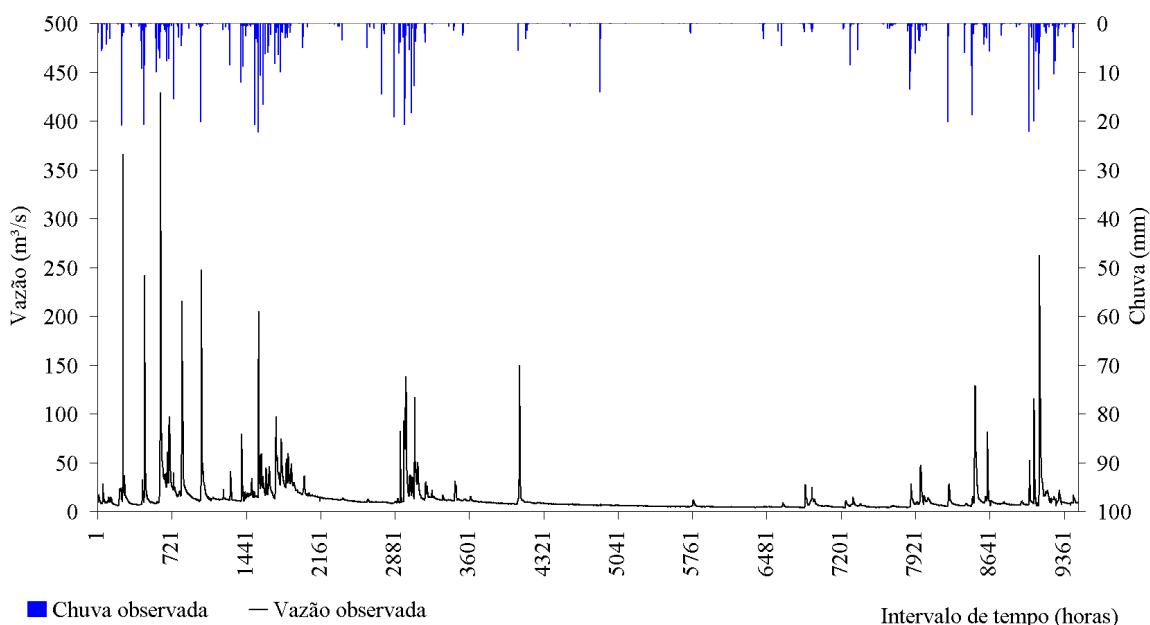
A calibração automática foi realizada para três bacias da área de estudo. No item 6 foi apresentado o resultado para a sub-bacia de cabeceira 2. Neste apêndice serão apresentados os resultados para a sub-bacia de cabeceira 1 e sub-bacia intermediária 1.

A4.1 SUB-BACIA DE CABECEIRA 1

A sub-bacia de cabeceira 1 corresponde a sub-bacia B10 + B11 da área de estudo e abrange uma área de 386,0 km². A exutória da bacia corresponde ao reservatório de Tocos. As principais características desta sub-bacia podem ser verificadas no apêndice 1. A série hidrológica utilizada na calibração pode ser visualizada na Figura A4.1.

FIGURA A4.1 DADOS HIDROLÓGICOS PARA CALIBRAÇÃO – SUB-BACIA CABECEIRA 1

Dados hidrológicos para calibração - sub-bacia de cabeceira 1



A primeira dificuldade encontrada na calibração desta sub-bacia se deve ao fato do volume de chuva observado nos meses secos ser bastante inferior ao volume de

vazão observada, como já mencionado na análise hidrológica das séries apresentada no item 5. Este comportamento é característico de regiões de serra, onde o fluxo de base apresenta condições particulares não consideradas durante a formulação do Modelo de Sacramento. Durante as tentativas de calibração do modelo observou-se que os reservatórios de água secavam antes que o período seco chegasse ao fim. Para contornar este problema, definiu-se um valor de vazão, denominado de vazão de serra, correspondente a contribuição da água subterrânea da serra para o rio. A vazão de serra é somada ao fluxo de base a cada intervalo de tempo, sendo seu valor igual 0,03 mm/hora. Este valor foi estimado através da análise do balanço hídrico da bacia hidrográfica.

A tabela A4.1 apresenta a análise estatística da calibração. As Figuras A4.2, A4.3 e A4.4 fornecem subsídios para análise gráfica da calibração. A Figura A4.2 apresenta os hidrogramas observado e calculado e mostra que o modelo foi capaz de reproduzir a fase do hidrograma e o período de recessão da série, no entanto apresentou problemas para prever a intensidade dos picos de vazão. Este problema é confirmado pela relação de vazão máxima igual a 0,56. O gráfico da Figura A4.3 mostra as curvas de permanência das vazões observadas e calculadas, onde se verifica que a vazão foi subestimada apenas para casos onde a vazão foi bastante elevada. O gráfico da Figura A4.4 apresenta as vazões classificadas observadas versus as calculadas, onde se observa que o erro do modelo aumenta a medida que as vazões também aumentam. Este problema foi provavelmente ocasionado pela baixa qualidade de dados monitorados de vazão, o qual foi obtido através do balanço hídrico do reservatório. Este cálculo envolve um grande número de variáveis, diminuindo a precisão dos dados obtidos. Além disso, o cálculo da chuva média nesta sub-bacia apresenta alto grau de incerteza devido a presença de efeito orográfico.

TABELA A4.1 VERIFICAÇÃO ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO MODELO

ESTATÍSTICAS	CAB. 2
Período de dados utilizados	15/11/2002 a 31/12/2003
FUNK	0,31086
Correlação	0,7856
Media dos resíduos	0,0001
Desvio padrão dos resíduos	11,6360
Resíduo relativo	0,0011
BIAS	-0,0001
Covariância	217,5991
Erro médio quadrático	11,5993
Coefficiente de Nash	61,7323
Relação de Volume	0,9999
Relação de vazões de pico	85,2069
Relação da vazão máxima	56,8677
Relação da duração de cheia	99,7028
Relação da duração de estiagem	87,5650
Media dos valores observados (mm/h)	0,120389
Media dos valores calculados (mm/h)	0,120395
Desvio dos valores observados (mm/h)	0,021705
Desvio dos valores calculados (mm/h)	0,019776

FIGURA A4.2 HIDROGRAMAS E PLUVIOGRAMA OBSERVADOS E HIDROGRAMA CALCULADO DA SUB-BACIA DE CABECEIRA 1

Hidrograma e pluviograma da sub-bacia de cabeceira 1

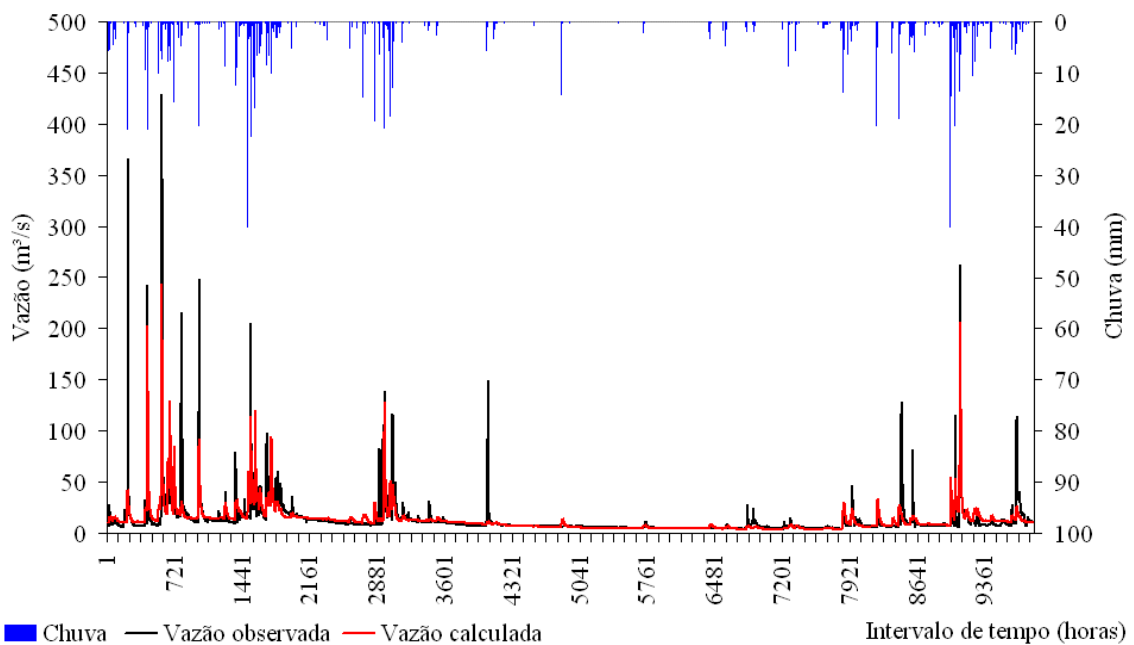


FIGURA A4.3 CURVA DE PERMANÊNCIA DA SUBBACIA CABECEIRA 1

Permanência das vazões - Subbacia Cabeceira 1

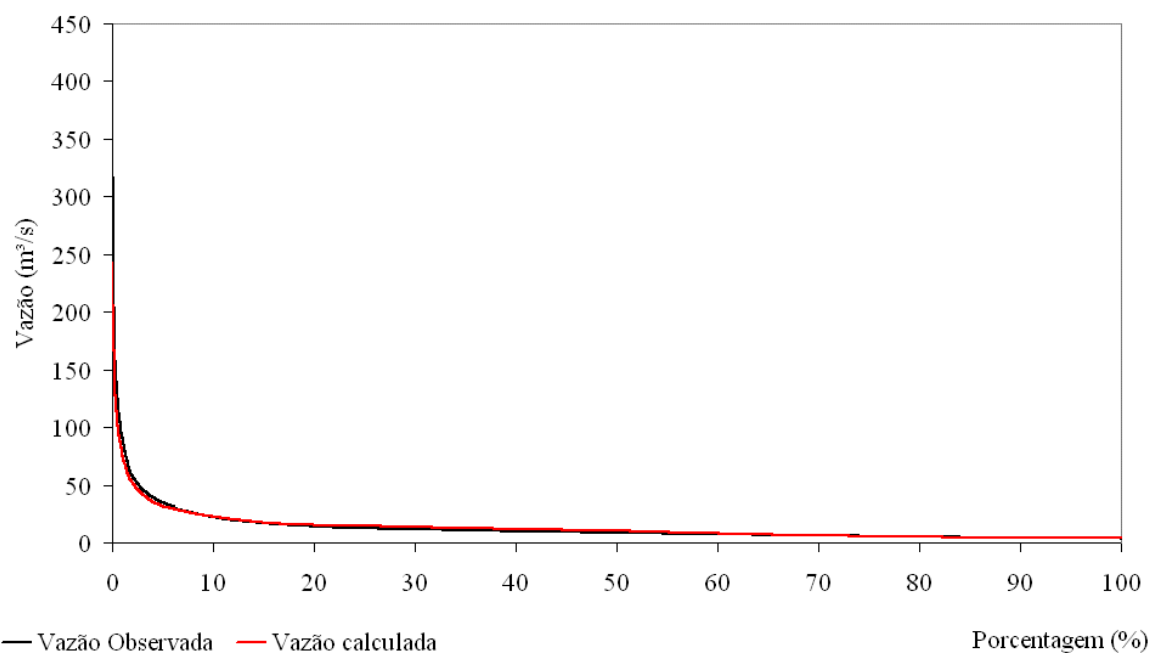
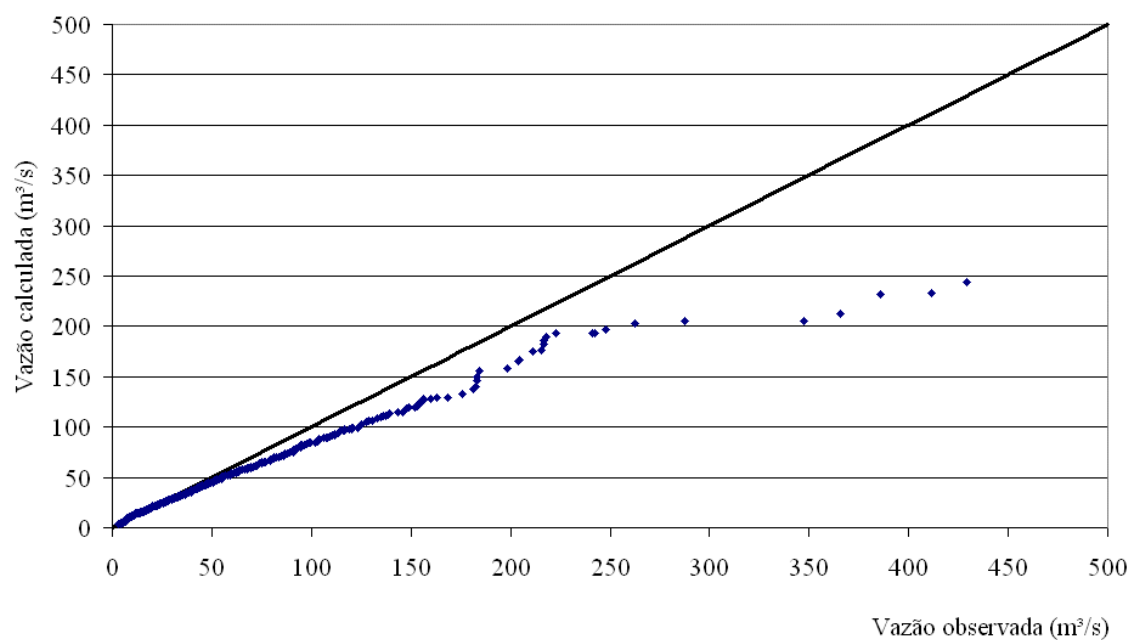


FIGURA A4.4 VAZÕES CLASSIFICADAS CALCULADAS VERSUS OBSERVADAS SUBBACIA DE CABECEIRA 1

Vazões classificadas - Sub bacia 1

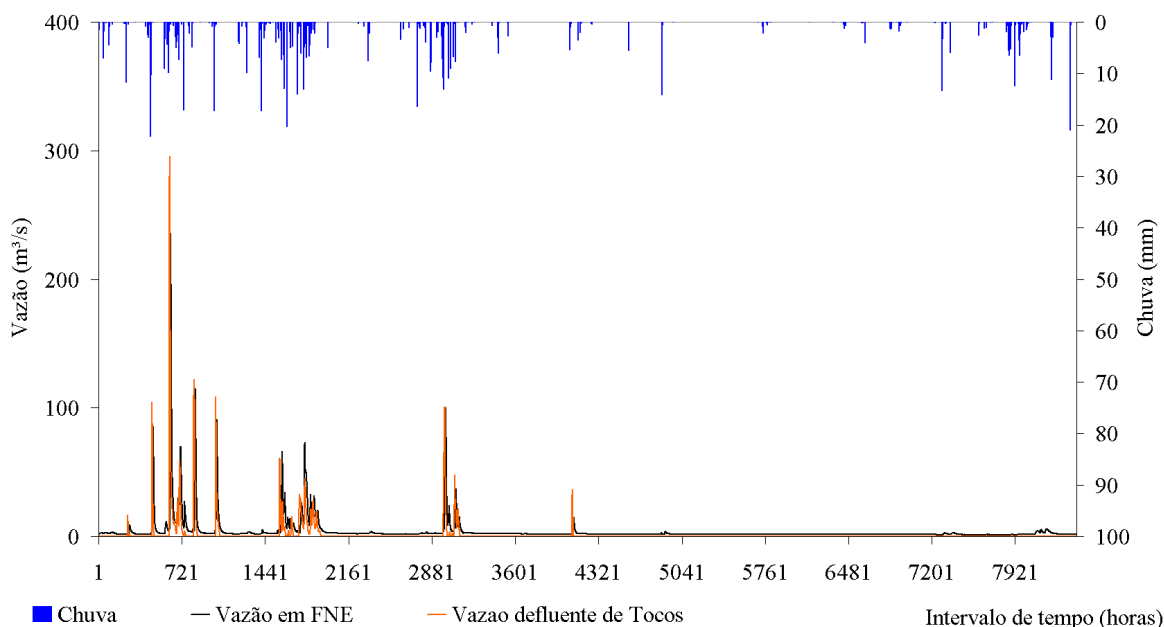


A4.2 SUB-BACIA INTERMEDIÁRIA 1

A sub-bacia intermediária 1 corresponde a sub-bacia B12 da área de estudo e abrange uma área de 218,0 km². A exutória da bacia corresponde a estação telemétrica de Fazenda Nova Esperança. As principais características desta sub-bacia podem ser verificadas no apêndice 1 e a série hidrológica utilizada na calibração pode ser visualizada na Figura A4.5.

FIGURA A4.5 DADOS HIDROLÓGICOS PARA CALIBRAÇÃO - SUB-BACIA INTERMEDIÁRIA 1

Dados hidrológicos para calibração - Sub-bacia Intermediária 1



Como esta bacia é intermediária a previsão de vazão deve levar em consideração a contribuição da bacia de montante, sendo neste caso igual a vazão vertida pelo vertedoro livre de Tocos. Vale ressaltar que raramente a cota do reservatório de Tocos atinge a crista do vertedor, ou seja, na maior parte do tempo o vertimento é igual a zero, só ocorrendo vertimentos durante eventos extremos de cheia. De qualquer forma, a consideração desta vazão é de grande importância, pois corresponde a principal contribuição à estação de Fazenda Nova Esperança durante os eventos de cheia. Em uma primeira tentativa foi aplicado o modelo de propagação de

reservatórios lineares, no entanto este não apresentou bons resultados devido a vazão propagada ser igual a zero na maior parte do tempo. Optou-se então pela aplicação de um modelo de translação da onda de cheia baseada em uma equação de regressão múltipla, sendo as variáveis independentes as vazões que ocorreram 8, 9, 10 e 11 horas antes do intervalo de tempo que se pretende prever a vazão. Estes dados foram escolhidos por representarem aproximadamente o tempo de viagem entre o reservatório de Tocos e a estação de Fazenda Nova Esperança, estimado através da análise do hidrograma. A equação final de translação da contribuição da vazão de montante é:

$$QE(t) = 0,50 \times Q(t - 11) - 0,21 \times Q(t - 10) + 0,07 \times Q(t - 09) + 0,49 \times Q(t - 8)$$

Sendo:

$QE(t)$ = Vazão na exutória da bacia devido a contribuição de montante (mm/hora);

$Q(t)$ = Vazão vertida pelo vertedoro livre de Tocos (mm/hora).

A vazão $QE(t)$ foi somada a vazão gerada na bacia incremental entre Tocos e Fazenda Nova Esperança. A tabela A4.2 apresenta os dados estatísticos para análise da calibração e as Figuras A4.6, A4.7 e A4.8 fornecem subsídios para análise gráfica. No gráfico da Figura A4.6 observa-se que o modelo foi capaz de reproduzir a fase do hidrograma, o período de recessão e as subidas do hidrograma, mesmo quando estas ocorreram devido a contribuição da bacia de montante. Os gráficos das Figura A4.7 e A4.8 confirmam o mesmo resultado.

TABELA A4.1 VERIFICAÇÃO ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO MODELO

ESTATÍSTICAS	CAB. 2
Período de dados utilizados	15/11/2002 a 31/10/2003
FUNK	0,13774
Correlação	0,9613
Media dos resíduos	-0,0074
Desvio padrão dos resíduos	3,0450
Resíduo relativo	-0,1848
BIAS	0,0074
Covariância	112,6845
Erro médio quadrático	0,0273
Coefficiente de Nash	92,8022
Relação de Volume	100,1848
Relação de vazões de pico	100,3161
Relação da vazão máxima	103,2769
Relação da duração de cheia	106,9507
Relação da duração de estiagem	106,8182
Media dos valores observados (mm/h)	0,065883
Media dos valores calculados (mm/h)	0,065883
Desvio dos valores observados (mm/h)	0,182430
Desvio dos valores calculados (mm/h)	0,175227

FIGURA A4.6 HIDROGRAMAS E PLUVIOGRAMA OBSERVADOS E HIDROGRAMA CALCULADO DA SUB-BACIA DE CABECEIRA 1

Hidrograma e pluviograma da sub-bacia Intermediária 1

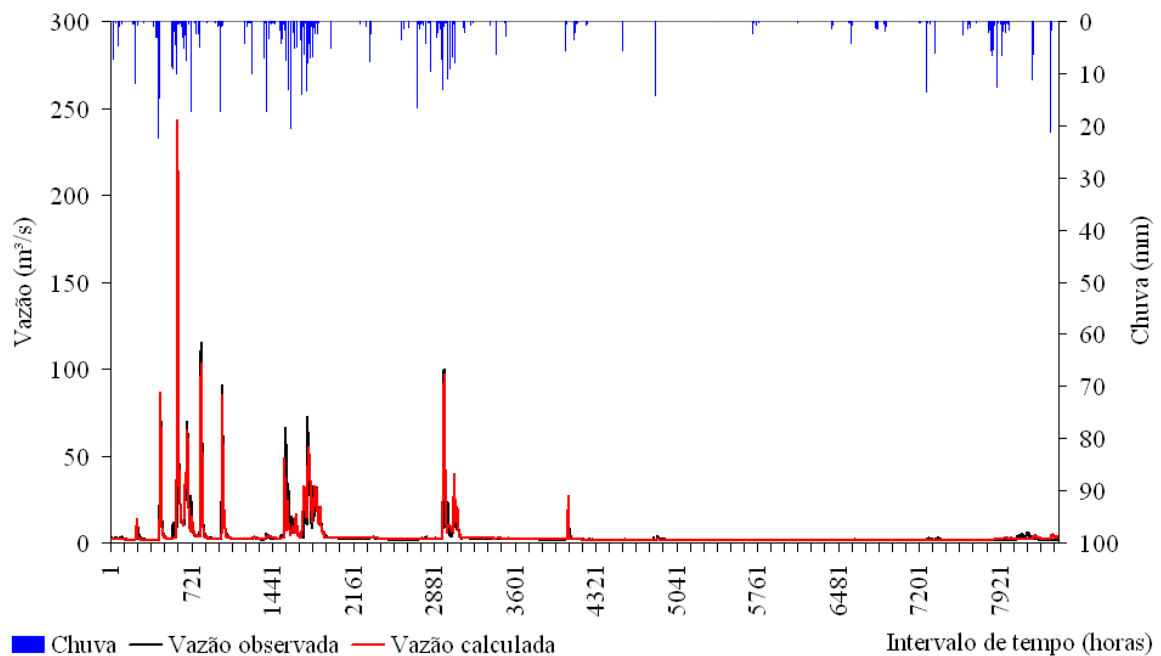


FIGURA A4.7 CURVA DE PERMANÊNCIA DA SUBBACIA CABECEIRA 1

Permanência das vazões - Subbacia Intermediária 1

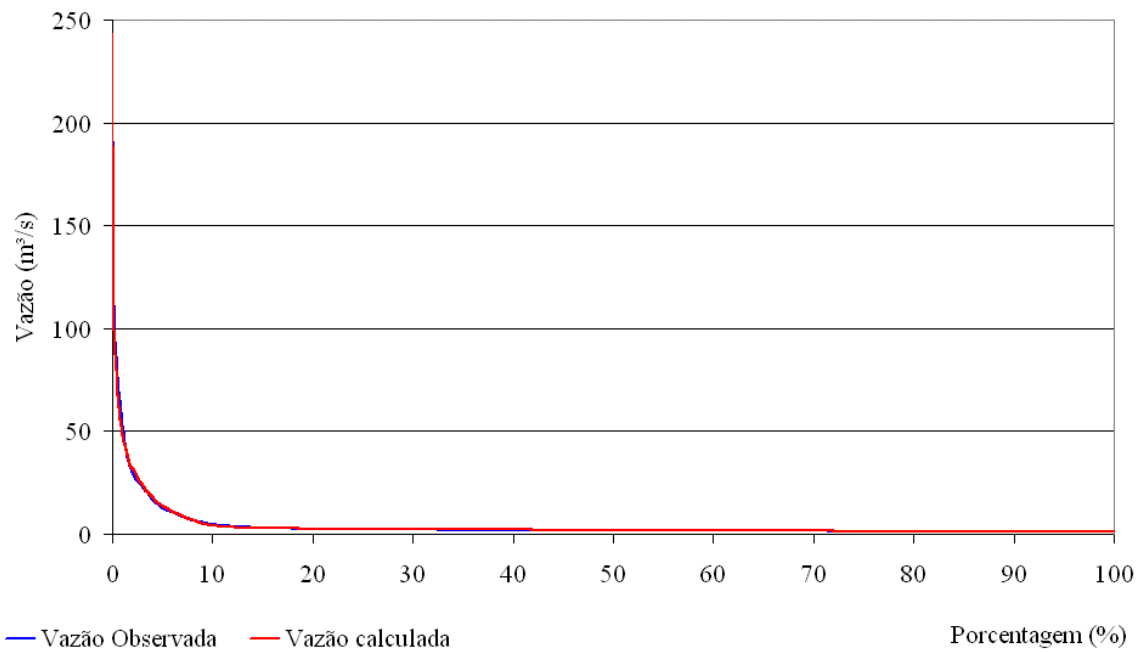
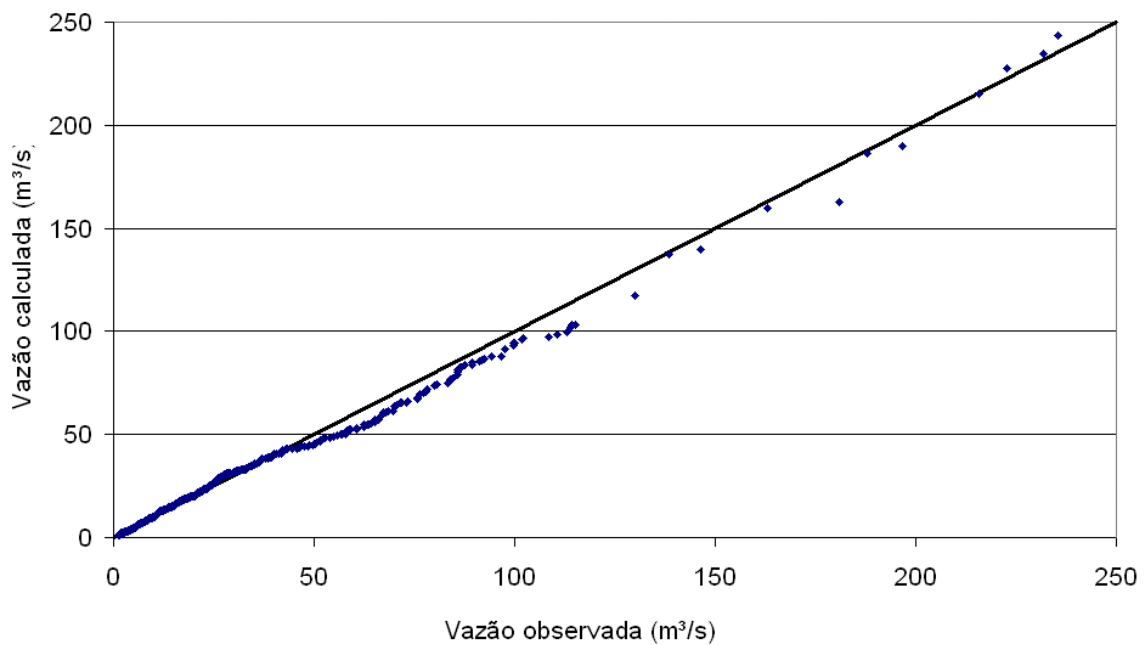


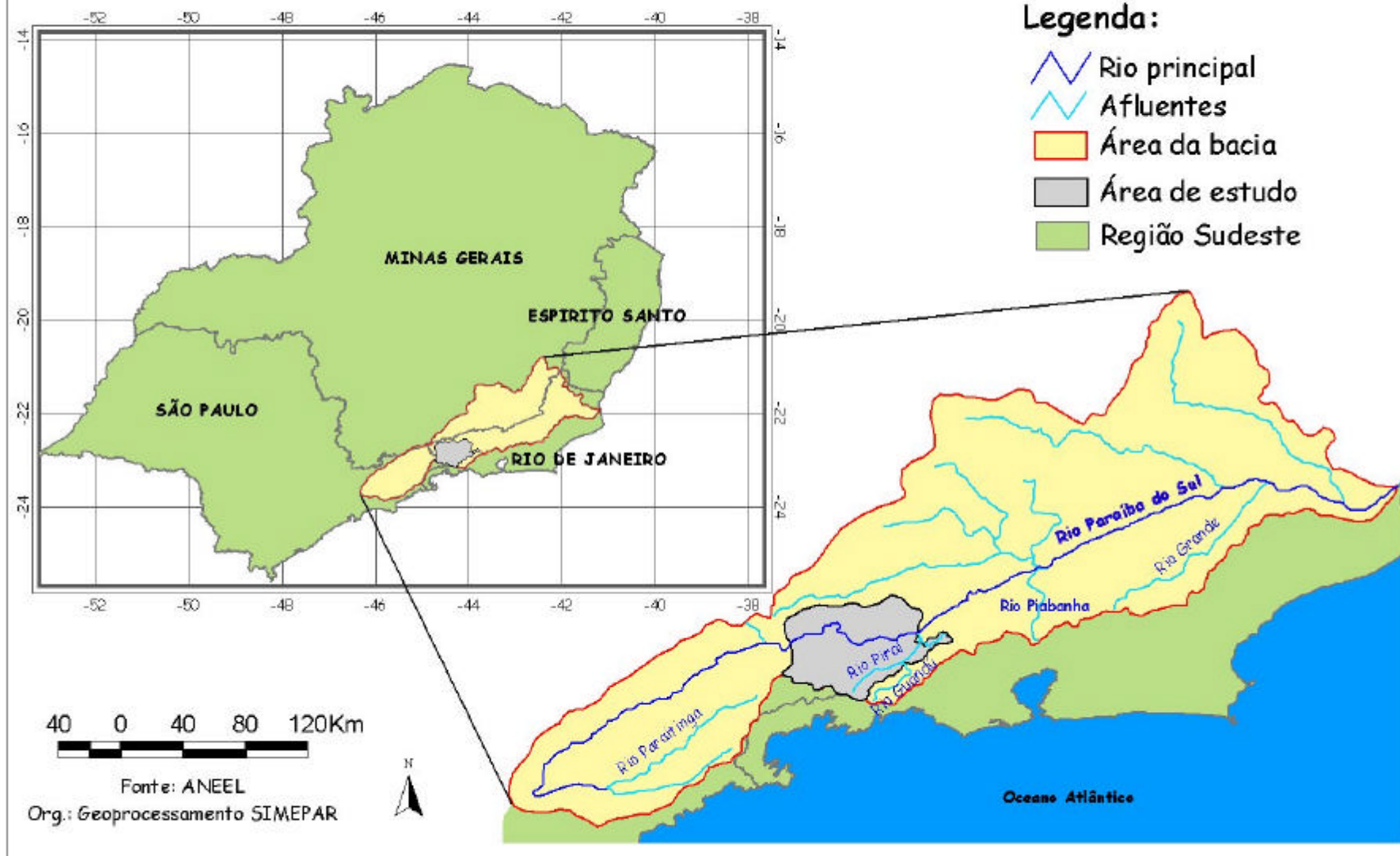
FIGURA A4.8 VAZÕES CLASSIFICADAS CALCULADAS VERSUS OBSERVADAS SUBBACIA DE CABECEIRA 1

Vazões classificadas - Sub-bacia Intermediária 1



APÊNDICE 5 – MAPAS DA ÁREA DE ESTUDO

Mapa 01: Localização da Bacia do Paraíba do Sul e da área de estudo



Mapa 02: Área do Sistema Hidráulico da Light



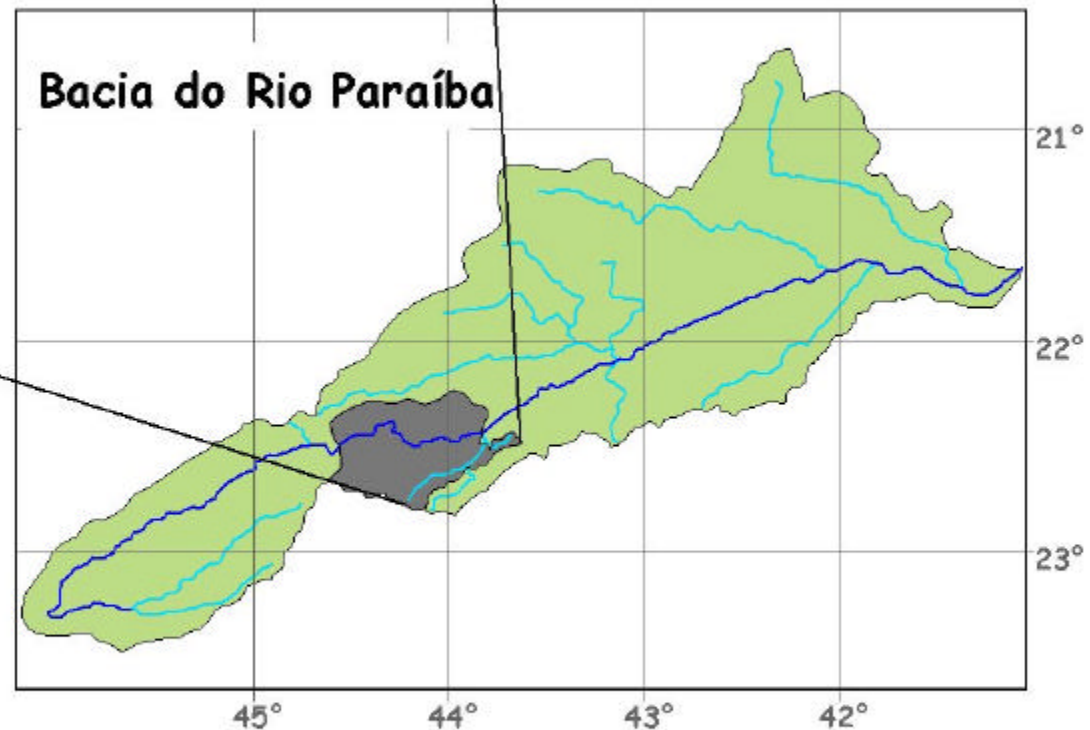
4 0 4 8 12 Km
 Fonte: ANEEL
 Org.: Geoprocessamento SIMEPAR

Legenda:

- Estações Telemétricas
- Sedes municipais
- ▲ Reservatórios
- ▲ Usinas
- ~ Rio Paraíba do Sul
- ~ Afluentes
- Limite das Bacias

Trechos

- Funil - Santa Cecília
- Cabeceira - Morsing
- Nova Esperança - Santana
- Tócos - Nova Esperança
- Cabeceira- Tócos



Mapa 03: Hipsometria da Bacia do Paraíba do Sul

Legenda:

Relevo

0 - 50
50 - 100
100 - 150
150 - 200
200 - 250
250 - 300
300 - 350
350 - 400
400 - 450
450 - 500
500 - 600
600 - 700
700 - 800
800 - 900
900 - 1000
1000 - 1100
1100 - 1200
1200 - 1300
1300 - 1400
1400 - 1500
1500 - 2000
2000 - 3000
3000 - 4000

▲ Reservatórios
▲ Usinas
— Rio principal
— Afluentes
□ Área de estudo
□ Área da bacia do Paraíba do Sul

Fonte: ANEEL
Org.: Geoprocessamento SIMPAR

