

RICARDO KRAUSKOPF NETO

**ATUALIZAÇÃO DE MODELOS CHUVA-VAZÃO- PROPAGAÇÃO
COM ESTIMADORES DE ESTADO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, área de concentração Engenharia Hidrológica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Kolodinskye Guetter

Co-orientadora: Prof^a Dr^a Miriam Rita Moro Mine

Curitiba

2005

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

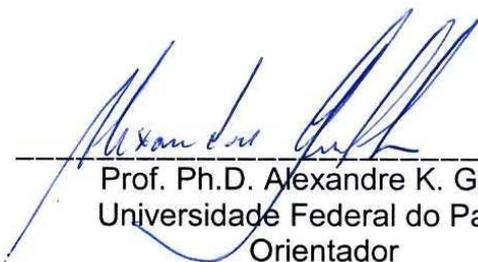
Milhares de livros grátis para download.

TERMO DE APROVAÇÃO
RICARDO KRAUSKOPF NETO

ATUALIZAÇÃO DE MODELOS CHUVA-VAZÃO-PROPAGAÇÃO COM
ESTIMADORES DE ESTADO

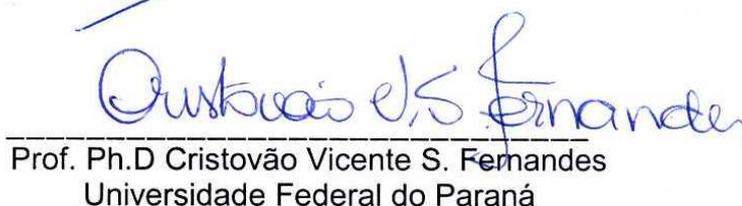
Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos professores:

PRESIDENTE:


Prof. Ph.D. Alexandre K. Guetter
Universidade Federal do Paraná
Orientador


Prof. Dr. Miriam Rita Moro Mine
Universidade Federal do Paraná
Co-Orientador

MEMBROS:


Prof. Ph.D Cristovão Vicente S. Fernandes
Universidade Federal do Paraná


Prof. Mestre Eloy Kaviski
Universidade Federal do Paraná

Curitiba, 6 de outubro de 2005

À minha esposa, Ida Luzia Aguiar Corrêa Krauskopf, que sempre ajudou-me a ser melhor e carregou o maior fardo nesta minha busca da realização de um sonho antigo, quase esquecido e quase abandonado.

À memória do Prof. Dr. Fábio Ramos, que ampliou meu entendimento do que é ser engenheiro para além dos conhecimentos e realizações técnicas.

AGRADECIMENTOS

À Itaipu Binacional, pelo apoio à realização do mestrado;

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Unioeste, por manter-me mentalmente alerta e pelo incentivo à minha formação, para além das regras vigentes;

Aos colegas professores da Unioeste, pela parcela adicional de trabalho que assumiram durante meu afastamento para o curso;

Aos professores do PPGERHA, pela dedicação, pelos conhecimentos e, principalmente, pelo exemplo a ser seguido, como pessoa, professor e profissional;

Aos meus orientadores, Alexandre Kolodinskye Guetter e Miriam Rita Moro Mine, pela confiança em mim depositada e pela paciência demonstrada;

A Helena Maria de Freitas e Claudia Marília Lisicki pelo apoio constante e paciência quase infinita;

A Ida Luzia Aguiar Corrêa Krauskopf, minha esposa, por tudo;

Aos amigos Sérgio Michelloto Braga, Maria Cristina Borba Braga, Nicolas Lopardo, Alessandra Tatiana Villa Lopardo, Fernando Weigert Machado, Dalton Lúcio Brasil Pereira Filho, Silvia Maria Maximiano e Josete de Fátima de Sá, pela amizade e companheirismo que tornaram todo o esforço mais ameno e acrescentaram uma dimensão a mais, a do coração, aos benefícios do mestrado;

Aos meus colegas no “Conselho de Anciãos” de nossa turma, pelo exemplo de dedicação e persistência na busca do novo e do maior;

Aos colegas do curso, que fizeram com que agradeça todos os dias ter começado antes e assim evitado buscar meu lugar na profissão no mesmo espaço que vocês.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiv
RESUMO	xix
ABSTRACT	xx
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ESTRUTURA DO TRABALHO	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 Objetivo Geral	3
1.2.2 Objetivos Específicos	4
1.3 MOTIVAÇÃO	5
1.4 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	7
2 DEFINIÇÕES E CONCEITOS – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO	9
2.1 DEFINIÇÕES.....	9
2.2 O DESENVOLVIMENTO DA HIDROLOGIA	11
2.3 MODELOS.....	18
2.3.1 Definição de Modelo	18
2.3.2 Classificação de Modelos	20
2.3.3 Exemplos de Modelos e Suas Aplicações	25
2.3.4 Tipos de Problemas Associados a Modelos.....	28
2.3.4.1 O problema de identificação.....	30
2.3.4.2 O problema de previsão.....	34
2.3.4.3 O problema de detecção	36
2.3.5 Modelos Operacionais.....	37
2.3.5.1 Adaptabilidade em modelos operacionais	40
3 O MODELO HIDROLÓGICO CHUVA-VAZÃO-PROPAGAÇÃO 3R	44
3.1 INTRODUÇÃO	44
3.2 TRADUÇÃO DE TERMOS ASSOCIADOS AO MODELO.....	46
3.3 DESCRIÇÃO DA FASE BACIA	48
3.3.1 Estrutura da Fase Bacia	48
3.3.2 Variáveis de Estado da Fase Bacia.....	52
3.3.3 Fluxos da Fase Bacia.....	53
3.3.4 Modelo Conceitual da Fase Bacia	56

3.4	DESCRIÇÃO DA FASE CANAL	61
3.5	MODELO CONCEITUAL COMPLETO	64
3.6	PARÂMETROS DO MODELO	66
3.7	INTEGRAÇÃO NUMÉRICA DAS EQUAÇÕES DE ESTADO.....	69
4	O MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO PARA CALIBRAÇÃO	70
5	O ESTIMADOR DE ESTADO	76
5.1	O FILTRO DE KALMAN	78
5.2	O ESTIMADOR DE ESTADO PROPOSTO.....	82
5.2.1	Equações de Propagação de Estado e Covariância.....	83
5.2.2	Equações Atualização de Estado e Covariância	89
5.2.3	Resumo das Equações de Propagação e Atualização	92
5.3	OBTENÇÃO DAS MATRIZES DO ESTIMADOR DE ESTADO.....	93
5.3.1	Equações de Representação e Medição do Sistema.....	93
5.3.2	Obtenção da Matriz F.....	94
5.3.3	Obtenção da Matriz N	95
5.3.4	Obtenção da Matriz M.....	97
5.3.5	Obtenção da Matriz H	98
5.4	MODELO DE VARIÂNCIAS DOS DADOS DE ENTRADA	98
6	A BACIA DE APLICAÇÃO E DADOS ASSOCIADOS	100
6.1	CARACTERIZAÇÃO DA BACIA DO RIO IVAÍ.....	101
6.1.1	Fisiografia.....	101
6.1.2	Clima	103
6.1.3	Geologia , Hidrogeologia e Solos.....	105
6.1.4	Vegetação	106
6.1.5	Hidrologia.....	107
6.2	ESTUDOS ANTERIORES NA BACIA	108
6.3	DEFINIÇÃO DOS POSTOS A UTILIZAR NO MODELO 3R	113
6.4	OBTENÇÃO DAS SÉRIES DE PRECIPITAÇÃO MÉDIA	116
6.5	OBTENÇÃO DAS SÉRIES DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL	127
6.6	OBTENÇÃO DAS SÉRIES DE VAZÕES	130
6.6.1	Composição das Séries de Cotas	130
6.6.2	Definição de Procedimento para Geração de Curva de Descarga	135
6.6.3	Definição das Curvas de Descarga para os Postos Fluviométricos	149
6.6.4	Geração das Novas Séries de Vazão.....	151
6.7	VERIFICAÇÃO CONJUNTA DAS SÉRIES DE PRECIPITAÇÃO E VAZÃO.....	152
7	ORIENTAÇÕES GERAIS PARA CALIBRAÇÃO	153
7.1	MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO	156
7.2	ESTRATÉGIA DE CALIBRAÇÃO MANUAL DO MODELO 3R	160

7.3	ESTIMATIVA INICIAL DE PARÂMETROS.....	165
7.4	RECALIBRAÇÕES DO MODELO 3R.....	175
8	CALIBRAÇÃO DO MODELO 3R.....	176
8.1	APLICATIVO UTILIZADO NA CALIBRAÇÃO	176
8.2	DEFINIÇÃO DO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO	177
8.3	DEFINIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO	178
8.4	OBTENÇÃO E AVALIAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	181
8.5	RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO MODELO 3R	187
9	CALIBRAÇÃO DO ESTIMADOR DE ESTADO	190
9.1	APLICATIVO UTILIZADO NA CALIBRAÇÃO	190
9.2	DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO	191
9.3	ANÁLISE DA CALIBRAÇÃO DO ESTIMADOR	194
10	VALIDAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DO SISTEMA.....	211
10.1	SELEÇÃO DO PERÍODO DE VALIDAÇÃO	211
10.2	APLICATIVO UTILIZADO NA VALIDAÇÃO	212
10.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS DA VALIDAÇÃO.....	213
11	COMENTÁRIOS SOBRE O FUNCIONAMENTO DO ESTIMADOR DE ESTADO	224
12	ALTERAÇÕES DO MODELO 3R.....	237
12.1	ALTERAÇÕES PROPOSTAS E IMPLEMENTADAS	238
12.1.1	Abatimento Excessivo do Hidrograma.....	238
12.1.2	Escoamento de Base	242
12.1.3	Evapotranspiração Potencial	244
12.2	ALTERAÇÕES NAS EQUAÇÕES DE ESTADO	245
12.3	ALTERAÇÕES NO ESTIMADOR DE ESTADO	246
12.3.1	Alterações da Matriz F	247
12.3.2	Alterações da Matriz N.....	247
12.3.3	Alterações da Matriz M.....	248
12.4	VERIFICAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO MODELO	248
13	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	256
	REFERÊNCIAS	260

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CICLO HIDROLÓGICO.....	12
FIGURA 2 – PROCESSO COMPLETO DE IDENTIFICAÇÃO DE MODELOS.	33
FIGURA 3 – PROCESSO USUAL DE IDENTIFICAÇÃO DE MODELOS.	35
FIGURA 4 – ESQUEMA GENÉRICO DE ATUALIZAÇÃO DE MODELOS EM TEMPO ATUAL.....	43
FIGURA 5 – MODELAGEM SEMIDISTRIBUÍDA DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA.....	46
FIGURA 6 – ESTRUTURA DA FASE BACIA DO MODELO SACRAMENTO.....	49
FIGURA 7 – ESTRUTURA DA FASE BACIA DO MODELO SACRAMENTO MODIFICADO.....	50
FIGURA 8 – ESTRUTURA DO MODELO 3R.	51
FIGURA 9 – OPERAÇÕES SOBRE O SIMPLEX UTILIZADAS NO ALGORITMO AMEBA.....	72
FIGURA 10 – EXEMPLO DE DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO AMEBA.....	75
FIGURA 11 – BACIA DO RIO IVAÍ.....	102
FIGURA 12 – ESBOÇO DO PERFIL LONGITUDINAL DO RIO IVAÍ.....	103
FIGURA 13 – HIPSOMETRIA DA BACIA DO RIO IVAÍ.....	104
FIGURA 14 – INTENSIDADE DE USO DO SOLO.....	106
FIGURA 15 – TIPOS DE SOLO NA BACIA DO RIO IVAÍ.....	107
FIGURA 16 – VAZÕES MÉDIAS DIÁRIAS PARA UM PERÍODO NO POSTO NOVO PORTO TAQUARA.....	109
FIGURA 17 – VAZÕES CARACTERÍSTICAS EM NOVO PORTO TAQUARA – 1974 A 2004.....	109
FIGURA 18 – PERMANÊNCIA DE DESVIOS DA SIMULAÇÃO EM NOVO PORTO TAQUARA.....	111
FIGURA 19 – RELAÇÃO SIMULADO X OBSERVADO EM NOVO PORTO TAQUARA.....	111
FIGURA 20 – SUB-BACIAS E ÁREAS DE THIESSEN DO RIO IVAÍ.....	112
FIGURA 21 – RELAÇÃO ENTRE VAZÃO SIMULADA E OBSERVADA EM NOVO PORTO TAQUARA.....	113
FIGURA 22 – LOCALIZAÇÃO DOS POSTOS FLUVIOMÉTRICOS SELECIONADOS.....	115
FIGURA 23 – LOCALIZAÇÃO DOS POSTOS PLUVIOMÉTRICOS SELECIONADOS.....	118
FIGURA 24 – LOCALIZAÇÃO DOS POSTOS EVAPORIMÉTRICOS SELECIONADOS.....	119
FIGURA 25 – REPRESENTAÇÃO DA BACIA DO IVAÍ PARA CÁLCULO DE PRECIPITAÇÃO MÉDIA.....	126
FIGURA 26 – VERIFICAÇÃO DA SIMILARIDADE ENTRE SÉRIES – GRÁFICO DA RELAÇÃO CRUZADA.....	131
FIGURA 27 – VERIFICAÇÃO DA SIMILARIDADE ENTRE SÉRIES – GRÁFICO DE VARIÁVEIS SIMULTÂNEAS.....	132
FIGURA 28 – DISPONIBILIDADE DE COTAS DO POSTO DE NOVO PORTO TAQUARA.....	133
FIGURA 29 – SEÇÕES TOPOBATIMÉTRICAS DO POSTO DE TEREZA CRISTINA.....	138

FIGURA 30 – PORTO PARAÍSO DO NORTE - MEDIÇÕES DE VAZÃO POR PERÍODO.	141
FIGURA 31 – PORTO PARAÍSO DO NORTE - MEDIÇÕES DE VAZÃO MANTIDAS E ELIMINADAS - PERÍODO 1983 A 2004.	141
FIGURA 32 – COMPARAÇÃO DE CURVAS DE DESCARGA DO POSTO DE PORTO PARAÍSO DO NORTE.	142
FIGURA 33 – DEFINIÇÃO INICIAL DA RELAÇÃO DE AJUSTE, ATRAVÉS DE PONTOS DE APOIO.	145
FIGURA 34 – MODIFICAÇÃO DE AJUSTE PELA ALTERAÇÃO GRÁFICA DOS PONTOS DE APOIO.	145
FIGURA 35 – RESULTADO DA DEFINIÇÃO MANUAL DE RELAÇÃO MATEMÁTICA.	146
FIGURA 36 – AJUSTE POR PONTOS DE APOIO DE MÚLTIPLOS TRAMOS DA CURVA DE DESCARGA.	148
FIGURA 37 – ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DE ESCOAMENTO DE BASE.	167
FIGURA 38 – ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DO ESCOAMENTO SUBSUPERFICIAL.	169
FIGURA 39 – VARIAÇÃO DA PERCOLAÇÃO COM O TIPO DO SOLO.	172
FIGURA 40 – BALANÇO MENSAL DE ÁGUA NO SOLO PARA O POSTO DE NOVO PORTO TAQUARA.	178
FIGURA 41 – ESTIMATIVA INICIAL DOS PARÂMETROS DE ESCOAMENTO.	182
FIGURA 42 – CALIBRAÇÃO INICIAL DO POSTO DE TEREZA CRISTINA.	183
FIGURA 43 – DIFICULDADE DE REPRESENTAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO.	185
FIGURA 44 – ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DA VARIÂNCIA DAS VAZÕES OBSERVADAS.	193
FIGURA 45 – NOVO PORTO TAQUARA – (a) DESVIO NORMALIZADO MÉDIO (ADIM.) (b) DESVIO PADRÃO DO DESVIO NORMALIZADO (ADIM.) (c) AUTOCORRELAÇÃO “LAG” 1 DO DESVIO NORMALIZADO (ADIM.) (d) CORRELAÇÃO ENTRE VAZÃO PREVISTA E OBSERVADA (ADIM.)	195
FIGURA 46 – PORTO PARAÍSO DO NORTE – (a) DESVIO NORMALIZADO MÉDIO (ADIM.) (b) DESVIO PADRÃO DO DESVIO NORMALIZADO (ADIM.) (c) AUTOCORRELAÇÃO “LAG” 1 DO DESVIO NORMALIZADO (ADIM.) (d) CORRELAÇÃO ENTRE VAZÃO PREVISTA E OBSERVADA (ADIM.)	196
FIGURA 47 – UBÁ DO SUL – (a) DESVIO NORMALIZADO MÉDIO (ADIM.) (b) DESVIO PADRÃO DO DESVIO NORMALIZADO (ADIM.) (c) AUTOCORRELAÇÃO “LAG” 1 DO DESVIO NORMALIZADO (ADIM.) (d) CORRELAÇÃO ENTRE VAZÃO PREVISTA E OBSERVADA (ADIM.)	197
FIGURA 48 – TEREZA CRISTINA – (a) DESVIO NORMALIZADO MÉDIO (ADIM.) (b) DESVIO PADRÃO DO DESVIO NORMALIZADO (ADIM.) (c) AUTOCORRELAÇÃO “LAG” 1 DO DESVIO NORMALIZADO (ADIM.) (d) CORRELAÇÃO ENTRE VAZÃO PREVISTA E OBSERVADA (ADIM.)	198
FIGURA 49 – EFEITO DO ESTIMADOR DE ESTADO NA VAZÃO INICIAL - NOVO PORTO TAQUARA – VAZÕES BAIXAS.	205
FIGURA 50 – EFEITO DO ESTIMADOR DE ESTADO NA VAZÃO INICIAL - NOVO PORTO TAQUARA – VAZÕES ALTAS.	205
FIGURA 51 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO PARA NOVO PORTO TAQUARA – VAZÕES BAIXAS.	207

FIGURA 52 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO PARA PORTO PARAÍSO DO NORTE – VAZÕES BAIXAS.....	207
FIGURA 53 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO PARA UBÁ DO SUL – VAZÕES BAIXAS.	208
FIGURA 54 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO PARA TEREZA CRISTINA – VAZÕES BAIXAS.	208
FIGURA 55 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO PARA NOVO PORTO TAQUARA – VAZÕES ALTAS.....	209
FIGURA 56 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO PARA PORTO PARAÍSO DO NORTE – VAZÕES ALTAS.....	209
FIGURA 57 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO PARA UBÁ DO SUL – VAZÕES ALTAS.	210
FIGURA 58 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO PARA TEREZA CRISTINA – VAZÕES ALTAS.	210
FIGURA 59 – RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO PARA NOVO PORTO TAQUARA – VAZÕES BAIXAS.....	219
FIGURA 60 – RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO PARA PORTO PARAÍSO DO NORTE – VAZÕES BAIXAS.....	219
FIGURA 61 – RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO PARA UBÁ DO SUL – VAZÕES BAIXAS.	220
FIGURA 62 – RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO PARA TEREZA CRISTINA – VAZÕES BAIXAS.	220
FIGURA 63 – RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO PARA NOVO PORTO TAQUARA – VAZÕES ALTAS.....	221
FIGURA 64 – RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO PARA PORTO PARAÍSO DO NORTE – VAZÕES ALTAS.....	221
FIGURA 65 – RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO PARA UBÁ DO SUL – VAZÕES ALTAS.	222
FIGURA 66 – RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO PARA TEREZA CRISTINA – VAZÕES ALTAS.	222
FIGURA 67 – VAZÃO ATUALIZADA PARA NOVO PORTO TAQUARA – VAZÕES BAIXAS.	223
FIGURA 68 – VAZÃO ATUALIZADA PARA NOVO PORTO TAQUARA – VAZÕES ALTAS.	223
FIGURA 69 – RESULTADOS DO ESTIMADOR EQUIVALENTES AOS DA SIMULAÇÃO.	225
FIGURA 70 – ATUAÇÃO DO ESTIMADOR DE ESTADO A VERIFICAR - TEREZA CRISTINA.....	225
FIGURA 71 – FALHA DA VAZÃO DE MONTANTE - EFEITO DO ESTIMADOR – NOVO PORTO TAQUARA.....	226
FIGURA 72 – X1 - RELAÇÕES ENTRE ESTADOS – PORTO PARAÍSO DO NORTE.....	228
FIGURA 73 – X2 - RELAÇÕES ENTRE ESTADOS – PORTO PARAÍSO DO NORTE.....	228
FIGURA 74 – S1 - RELAÇÕES ENTRE ESTADOS – PORTO PARAÍSO DO NORTE.....	229
FIGURA 75 – S2 - RELAÇÕES ENTRE ESTADOS – PORTO PARAÍSO DO NORTE.....	229
FIGURA 76 – ATUALIZAÇÃO ABSOLUTA DO ESTADO X1 – PORTO PARAÍSO DO NORTE.....	232
FIGURA 77 – ATUALIZAÇÃO RELATIVA DO ESTADO X1 – PORTO PARAÍSO DO NORTE.....	232

FIGURA 78 – ATUALIZAÇÃO ABSOLUTA DO ESTADO X2 – PORTO PARAÍSO DO NORTE.....	233
FIGURA 79 – ATUALIZAÇÃO RELATIVA DO ESTADO X2 – PORTO PARAÍSO DO NORTE.....	233
FIGURA 80 – ATUALIZAÇÃO ABSOLUTA DO ESTADO S1 – PORTO PARAÍSO DO NORTE.....	234
FIGURA 81 – ATUALIZAÇÃO RELATIVA DO ESTADO S1 – PORTO PARAÍSO DO NORTE.....	234
FIGURA 82 – ATUALIZAÇÃO ABSOLUTA DO ESTADO S2 - PORTO PARAÍSO DO NORTE.....	235
FIGURA 83 – ATUALIZAÇÃO RELATIVA DO ESTADO S2 – PORTO PARAÍSO DO NORTE.....	235
FIGURA 84 – EFEITOS DO MÉTODO DE INTEGRAÇÃO EM UM CANAL COM UM TRAMO.....	240
FIGURA 85 – EFEITOS DO MÉTODO DE INTEGRAÇÃO EM CANAL COM DOIS TRAMOS.....	240
FIGURA 86 – MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO DO MODELO 3R – INTEGRAÇÃO EM UM INTERVALO.....	243
FIGURA 87 – MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO DO MODELO 3R – INTEGRAÇÃO EM DIVERSOS INTERVALOS.....	243

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – RELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS DE ESTADO - MODELOS SACRAMENTO, SACRAMENTO MODIFICADO E 3R.	53
TABELA 2 – RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS - MODELOS SACRAMENTO, SACRAMENTO MODIFICADO E 3R.	68
TABELA 3 – PARÂMETROS DO MODELO SACRAMENTO PARA O RIO IVAÍ.....	114
TABELA 4 – POSTOS FLUVIOMÉTRICOS SELECIONADOS PARA A BACIA DO RIO IVAÍ.....	114
TABELA 5 – POSTOS PLUVIOMÉTRICOS SELECIONADOS PARA A BACIA DO RIO IVAÍ.....	117
TABELA 6 – POSTOS EVAPORIMÉTRICOS SELECIONADOS PARA A BACIA DO RIO IVAÍ.....	120
TABELA 7 – DISPONIBILIDADE DE DADOS DOS POSTOS PLUVIOMÉTRICOS PARA A BACIA DO RIO IVAÍ.....	123
TABELA 8 – DISPONIBILIDADE INICIAL DE DADOS PARA OS POSTOS FLUVIOMÉTRICOS DA BACIA DO RIO IVAÍ.....	130
TABELA 9 – DISPONIBILIDADE FINAL DE DADOS FLUVIOMÉTRICOS DA BACIA DO RIO IVAÍ.....	133
TABELA 10 – ÍNDICE DE AUSÊNCIA DE DADOS NAS SÉRIES COMPOSTAS DE COTAS.	134
TABELA 11 – PERÍODOS DE VALIDADE E INFORMAÇÕES GERAIS DAS CURVAS-CHAVE.	150
TABELA 12 – COEFICIENTES DAS EQUAÇÕES POTENCIAIS E POLINOMIAIS DAS CURVAS-CHAVE, NA SEQUÊNCIA DEFINIDA NA TABELA 11.....	151
TABELA 13 – COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS MANUAL E AUTOMÁTICO DE CALIBRAÇÃO.	157
TABELA 14 – EFEITOS DOS PARÂMETROS DO MODELO SACRAMENTO E 3R.....	159
TABELA 15 – ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS C3 E M2.....	172
TABELA 16 – ESTIMATIVA DO PARÂMETRO DE PROPAGAÇÃO EM BACIA/CANAL.....	173
TABELA 17 – FAIXA DE VARIAÇÃO USUAL DOS PARÂMETROS DO MODELO SACRAMENTO E PROPOSTA PARA O MODELO 3R.	174
TABELA 18 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO MODELO 3R.....	188
TABELA 19 – PARÂMETROS INICIAIS PARA CALIBRAÇÃO DO ESTIMADOR DE ESTADO.	199
TABELA 20 – PARÂMETROS CALIBRADOS DO ESTIMADOR DE ESTADO.	199
TABELA 21 – ESTATÍSTICAS DE DESEMPENHO DA CALIBRAÇÃO - NOVO PORTO TAQUARA.....	201
TABELA 22 – ESTATÍSTICAS DE DESEMPENHO DA CALIBRAÇÃO – PORTO PARAÍSO DO NORTE.	202
TABELA 23 – ESTATÍSTICAS DE DESEMPENHO DA CALIBRAÇÃO – UBÁ DO SUL.....	203
TABELA 24 – ESTATÍSTICAS DE DESEMPENHO DA CALIBRAÇÃO – TEREZA CRISTINA.....	204

TABELA 25 – ESTATÍSTICAS DE DESEMPENHO DA VERIFICAÇÃO – NOVO PORTO TAQUARA.....	215
TABELA 26 – ESTATÍSTICAS DE DESEMPENHO DA VERIFICAÇÃO – PORTO PARAÍSO DO NORTE.	216
TABELA 27 – ESTATÍSTICAS DE DESEMPENHO DA VERIFICAÇÃO – UBÁ DO SUL.....	217
TABELA 28 – ESTATÍSTICAS DE DESEMPENHO DA VERIFICAÇÃO – TEREZA CRISTINA.....	218
TABELA 29 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO MODELO 3R – VERSÃO 3R6.....	251
TABELA 30 – ESTATÍSTICAS DE DESEMPENHO DA VERSÃO 3R6 – NOVO PORTO TAQUARA.....	252
TABELA 31 – ESTATÍSTICAS DE DESEMPENHO DA VERSÃO 3R6 – PORTO PARAÍSO DO NORTE.	253
TABELA 32 – ESTATÍSTICAS DE DESEMPENHO DA VERSÃO 3R6 – UBÁ DO SUL.....	254
TABELA 33 – ESTATÍSTICAS DE DESEMPENHO DA VERSÃO 3R6 – TEREZA CRISTINA.....	255

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- 3R – modelo chuva-vazão-propagação, originado de simplificação do modelo Sacramento Modificado
- 3R6 – versão do modelo chuva-vazão-propagação 3R desenvolvida nesta dissertação
- ANA – Agência Nacional de Águas
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
- ArcEGMO - modelo distribuído para análise de disponibilidade hídrica
- CD – meio físico destinado à gravação de dados
- DNAEE – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
- DOS – Sistema operacional para microcomputadores
- DT - Diretoria Técnica da Itaipu Binacional
- FORTTRAN – linguagem de computador destinada a aplicações científicas
- GDH – Gerenciador de Dados Hidrometeorológicos, banco de dados hidrometeorológicos de Itaipu
- Hidroweb – banco de dados hidrometeorológicos da ANA, acessível via internet
- IAPAR – Instituto Agrônomo do Paraná
- IPH II – modelo chuva-vazão- propagação
- Itaipu Binacional – empresa brasileiro/paraguaia responsável pela operação da Usina Hidrelétrica Itaipu
- ModSimLSA - modelo destinado ao gerenciamento de água para irrigação
- NRCS - “National Resources Conservation Service”, USA
- NWS - “National Weather Service”
- NWSRFS – “NWS River Forecasting System”
- ONS – Operador Nacional do Sistema
- OP.DT - Superintendência de Operação da Itaipu Binacional
- OperRes - modelo de simulação de operação de múltiplos reservatórios em tempo real, incluindo balanço hídrico
- OPS.DT - Departamento de Operação de Sistema da Itaipu Binacional
- OPSH.DT - Divisão de Estudos Hidrológicos e Energéticos da Itaipu Binacional
- OPT3 – programa de otimização de parâmetros do NWSRFS
- Preca - modelo hidrológico chuva-vazão, desenvolvido para a Itaipu Binacional
- PREVIVAZM - previsão estocástica de vazões mensais para o controle de enchentes em aproveitamentos do Sistema Elétrico Brasileiro
- SSARR – modelo chuva-vazão-propagação
- Simepar – Sistema Meteorológico do Paraná
- SIPOP - modelo chuva-vazão de previsão de aflúências baseado no modelo conceitual Sacramento Modificado
- SPHSOR - modelo chuva-vazão de previsão de aflúências baseado no modelo conceitual Sacramento Modificado
- Suderhsa – Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Estado do Paraná
- TGNI – consórcio que prestou serviços a Itaipu, formado pelas empresas brasileiras Themag e NTS e paraguaias GCAP e Informática
- WMO – “World Meteorological Organization”

LISTA DE SÍMBOLOS

- α_p – coeficiente de ponderação da parcela da covariância da forçante aleatória atribuível aos parâmetros do modelo
- α_u – coeficiente de ponderação da parcela da covariância da forçante aleatória atribuível aos dados de entrada
- A – área da seção transversal do canal
- $ADIMP$ - fração máxima da área impermeável variável da bacia no modelo Sacramento
- A_{inc} - área da bacia incremental (sub-bacia sendo modelada) no modelo 3R, em km^2
- A_{tot} - área total da bacia na exutória da sub-bacia sendo modelada no modelo 3R, em km^2
- β – 1. parâmetro do modelo de propagação no modelo 3R, em dia^{-1}
2. fator linear da função de propagação em canal no modelo Sacramento Modificado
- β_1 - fração máxima da área impermeável variável da bacia no modelo Sacramento Modificado
- β_2 - fração da área impermeável permanente da bacia no modelo Sacramento Modificado
- BF - escoamento de base no modelo 3R, em mm/dia
- C – coeficiente de Chezy
- C_1 - taxa de drenagem lateral do reservatório da camada superior do solo no modelo 3R, em fração do armazenamento por dia
- C_2 - taxa de drenagem do reservatório da camada inferior do solo no modelo 3R, em fração do armazenamento por dia
- C_3 - define a máxima percolação possível como uma fração de aumento da demanda mínima de percolação ($C_2 X_2^0$) no modelo 3R, adimensional
- C_{FRG} - coeficiente de solo congelado no modelo 3R, adimensional
- C_{p0} - constante do modelo de covariâncias de entrada ou medição do sistema
- C_{p1} - constante do modelo de covariâncias de entrada ou medição do sistema
- C_{PET} – Coeficiente de alteração da evapotranspiração potencial
- C_{PET0} - constante do modelo de covariâncias dos erros da evapotranspiração potencial do sistema
- C_{PET1} - constante do modelo de covariâncias dos erros da evapotranspiração potencial do sistema
- C_{PRECO} - constante do modelo de covariâncias dos erros da precipitação do sistema
- C_{PRECI} - constante do modelo de covariâncias dos erros da precipitação do sistema
- C_{v0} - constante do modelo de covariâncias dos erros de medição do sistema
- C_{v1} - constante do modelo de covariâncias dos erros de medição do sistema
- δ - função Delta de Kronecker
- Δt – intervalo de tempo
- d_1^i - taxa de drenagem do reservatório primário de água gravitacional da camada inferior do solo no modelo Sacramento Modificado
- d_1^s - taxa de drenagem do reservatório suplementar de água gravitacional da camada inferior do solo no modelo Sacramento
- d_u - taxa de drenagem do reservatório de água gravitacional da camada superior do solo no modelo Sacramento Modificado
- ε – 1. máxima fração de aumento da demanda de percolação mínima no modelo Sacramento Modificado
2. fator de majoração do pico do hidrograma de base para definição da capacidade do reservatório inferior de solo do modelo 3R

$\mathbf{e}(t)$ – vetor de erro do estado no instante t
 $\mathbf{e}_u(t)$ – vetor de erro das entradas no instante t
 $\mathbf{e}_\theta(t)$ – vetor de erro dos parâmetros no instante t
 $E[\dots]$ – valor esperado
 ET_1 - evapotranspiração na camada superior do solo no modelo 3R, em mm/dia
 ET_2 - transpiração na camada inferior do solo no modelo 3R, em mm/dia
 \mathbf{f} - função vetorial não-linear. Representa o conjunto de equações que define a variação de estado do modelo
 \mathbf{F} - matriz de sensibilidade aos estados, formada pela derivada da parcial do modelo não linear em relação a cada um dos elementos do vetor de estado \mathbf{x}
 $\mathbf{F}_1(t)$ - matriz de coeficientes do estado na equação vetorial de um sistema linear no instante t
 g – aceleração da gravidade
 $\mathbf{G}_1(t)$ - matriz de coeficientes da forçante aleatória na equação vetorial de um sistema linear no instante t
 GW - escoamento do subsolo no modelo 3R, em mm/dia
 \mathbf{h} - função vetorial não-linear que relaciona o estado, entradas e parâmetros do sistema com fenômenos mensuráveis no protótipo
 $\mathbf{H}(t)$ - matriz que representa a linearização da função \mathbf{h} para o instante t , resultante da expansão em série de Taylor desta função
 $\mathbf{H}_1(t)$ - matriz de coeficientes que relaciona as medidas do protótipo com seu estado, para um sistema linear, no instante t
 INT - escoamento subsuperficial no modelo 3R, em mm/dia
 \mathbf{K} - matriz de ganho de Kalman
 $\mathbf{L}_1(t)$ - matrizes de coeficientes do controle determinístico na equação vetorial de um sistema linear no instante t
 $LZFPFC$ - armazenamento do reservatório primário de água gravitacional da camada inferior do solo no modelo Sacramento
 $LZFPM$ - capacidade do reservatório primário de água gravitacional da camada inferior do solo no modelo Sacramento
 $LZFSC$ - armazenamento do reservatório suplementar de água gravitacional da camada inferior do solo no modelo Sacramento
 $LZFSC$ - armazenamento do reservatório suplementar de água gravitacional da camada inferior do solo no modelo Sacramento
 $LZFSC$ - armazenamento do reservatório suplementar de água gravitacional da camada inferior do solo no modelo Sacramento
 $LZFSC$ - armazenamento do reservatório suplementar de água gravitacional da camada inferior do solo no modelo Sacramento
 $LZFSC$ - armazenamento do reservatório suplementar de água gravitacional da camada inferior do solo no modelo Sacramento
 $LZPK$ - taxa de drenagem do reservatório primário de água gravitacional da camada inferior do solo no modelo Sacramento
 $LZSK$ - taxa de drenagem do reservatório suplementar de água gravitacional da camada inferior do solo no modelo Sacramento
 $LZTWC$ - armazenamento do reservatório de água pelicular da camada inferior do solo no modelo Sacramento
 $LZTWM$ - capacidade do reservatório de água pelicular da camada inferior do solo no modelo Sacramento
 μ - 1. define a fração do escoamento de base que compõe a perda de base no modelo 3R, adimensional
 2. fração do escoamento de base total que compõe a perda de base no modelo Sacramento Modificado
 m - 1. parâmetro do modelo de propagação no modelo 3R, adimensional
 2. expoente da função de propagação em canal no modelo Sacramento Modificado
 \mathbf{M} - matriz de sensibilidade às entradas do modelo, formada pela derivada da parcial do modelo não linear em relação a cada um dos elementos do vetor de entradas \mathbf{u}

- m_1 - 1. expoente da equação do escoamento superficial no modelo 3R, adimensional
 2. expoente do reservatório não-linear de água pelicular da camada superior do solo no modelo Sacramento Modificado
- m_2 - 1. expoente da equação de percolação no modelo 3R, adimensional
 2. expoente do reservatório não-linear de água gravitacional da camada superior do solo no modelo Sacramento Modificado
- m_3 - 1. expoente da equação de transpiração no modelo 3R, adimensional
 2. expoente de transpiração do reservatório não-linear da camada inferior do solo no modelo Sacramento Modificado
- η - resíduo normalizado da vazão
- \mathbf{N} - matriz de sensibilidade aos parâmetros do modelo, formada pela derivada da parcial do modelo não linear em relação a cada um dos elementos do vetor de parâmetros θ
- n_e - número de entradas do modelo do modelo 3R
- n_p - número de parâmetros do modelo do modelo 3R
- n_r - número de tramos de um trecho de canal do modelo 3R
- $p(t)$ - variável de entrada ou de medição no instante t
- $\mathbf{P}(t)$ - matriz de covariância dos erros do estado do sistema no instante t
- $\mathbf{P}(t)^-$ - estimativa “a priori” da matriz de covariância dos erros do estado do sistema no instante t
- $\mathbf{P}(t)^+$ - estimativa “a posteriori” (ajustada) da matriz de covariância dos erros do estado do sistema no instante t
- $PCTIM$ - fração da área impermeável permanente da bacia no modelo Sacramento
- PET - evapotranspiração potencial no modelo 3R, em mm/dia
- P_f - fração da percolação destinada aos reservatórios de água gravitacional da camada inferior do solo no modelo Sacramento Modificado
- $PFREE$ - fração da percolação destinada aos reservatórios de água gravitacional da camada inferior do solo no modelo Sacramento
- PR - percolação do reservatório da camada de solo superior para o da camada inferior no modelo 3R, em mm/dia
- $PREC$ - precipitação no modelo 3R, em mm/dia
- q_0 - contribuição das sub-bacia de montante para o canal no modelo 3R, em m^3/s
- Q - vazão
- $\mathbf{Q}(t)$ - matriz de covariâncias da forçante aleatória do sistema no instante t
- Q_i - vazão no instante i
- Q_{max} - vazão de pico do escoamento de base
- R - raio hidráulico
- $\mathbf{r}(t)$ - vetor de erro do modelo no instante t , definido como diferença entre resultado observado e o simulado pelo modelo
- $\mathbf{R}(t)$ - matriz de covariâncias dos ruídos da medição no protótipo no instante t
- $REXP$ - expoente da equação de percolação no modelo Sacramento
- $RSERV$ - capacidade de água gravitacional da camada inferior do solo indisponível para transpiração no modelo Sacramento
- S_0 - declividade do fundo do canal
- $SARVA$ - fração da bacia coberta por espelhos de água ou alagadiça no modelo Sacramento
- S_f - declividade da linha de atrito
- S_i - armazenamento do subtramo i do tramo de canal no modelo 3R, em mm

SIDE - fração do escoamento de base total que compõe a perda de base no modelo Sacramento
SR - escoamento superficial no modelo 3R, em mm/dia
SSOUT - taxa fixa do aporte total ao canal que compõe a perda de base no modelo Sacramento
 θ - expoente da equação de percolação no modelo Sacramento Modificado
 θ - vetor de parâmetros do modelo 3R
 t - tempo
 t_0 - término do período de precipitação mais significativa em um evento de enchente, em intervalos de tempo
 $\mathbf{u}(t)$ - vetor de entrada determinística do sistema, também denominada controle determinístico no instante t
 $\mathbf{U}(t)$ - matriz de covariância dos erros das entradas do sistema no instante t
 uc - vazão de contribuição da sub-bacia para o canal no modelo 3R, em mm/dia
UZFWC - armazenamento do reservatório de água gravitacional da camada superior do solo no modelo Sacramento
UZFWM - capacidade do reservatório de água gravitacional da camada superior do solo no modelo Sacramento
UZK - taxa de drenagem do reservatório de água gravitacional da camada superior do solo no modelo Sacramento
UZTWC - armazenamento do reservatório de água pelicular da camada superior do solo no modelo Sacramento
UZTWM - capacidade do reservatório de água pelicular da camada superior do solo no modelo Sacramento
 $\mathbf{v}(t)$ - vetor de ruídos brancos associado à medição no protótipo no instante t
VAR(...) - variância
 V_i - descarga do subtramo i do tramo de canal no modelo 3R, em mm/dia
 $V_{\text{Superficial}}$ - volume do escoamento superficial de um evento, em mm
 $\mathbf{w}(t)$ - vetor de entradas aleatórias do sistema, ruído branco denominado função forçante aleatória no instante t
 $\mathbf{W}(t)$ - matriz de covariância dos erros dos parâmetros do sistema no instante t
 x - distância, no sentido do fluxo
 $\mathbf{x}(t)$ - vetor de estado, composto pelas variáveis de estado do modelo no instante t
 $\hat{\mathbf{x}}(t)$ - estimativa do estado do sistema no instante t
 $\hat{\mathbf{x}}(t)^-$ - estimativa “a priori” do estado do sistema no instante t
 $\hat{\mathbf{x}}(t)^+$ - estimativa “a posteriori” (ajustada) do estado do sistema no instante t
 x_1 - armazenamento do reservatório de água pelicular da camada superior do solo no modelo Sacramento Modificado
 x_1^0 - capacidade do reservatório de água pelicular da camada superior do solo no modelo Sacramento Modificado
 x_2 - armazenamento do reservatório de água gravitacional da camada superior do solo no modelo Sacramento Modificado
 x_2^0 - capacidade do reservatório de água gravitacional da camada superior do solo no modelo Sacramento Modificado
 x_3 - armazenamento do reservatório de água pelicular da camada inferior do solo no modelo Sacramento Modificado
 x_3^0 - capacidade do reservatório de água pelicular da camada inferior do solo no modelo Sacramento Modificado
 x_4 - armazenamento do reservatório primário de água gravitacional da camada inferior do solo no modelo Sacramento Modificado
 x_4^0 - capacidade do reservatório primário de água gravitacional da camada inferior do solo no modelo Sacramento Modificado
 x_5 - armazenamento do reservatório suplementar de água gravitacional da camada inferior do solo no modelo Sacramento Modificado

x_5^0 - capacidade do reservatório suplementar de água gravitacional da camada inferior do solo no modelo Sacramento Modificado

x_6 - área impermeável variável em situação de solo saturado no modelo Sacramento Modificado

X_1 - armazenamento do reservatório da camada superior do solo no modelo 3R, em mm

X_1^0 - capacidade do reservatório da camada superior do solo no modelo 3R, em mm

X_2 - armazenamento do reservatório da camada inferior do solo no modelo 3R, em mm

X_2^0 - capacidade do reservatório da camada inferior do solo no modelo 3R, em mm

y - profundidade da lâmina d'água

$\mathbf{z}(t)$ - vetor de valores de grandezas mensuráveis no protótipo no instante t

$ZPERC$ - máxima fração de aumento da demanda de percolação mínima no modelo Sacramento

RESUMO

Modelos hidrológicos de transformação chuva-vazão buscam reproduzir, através de um conjunto de equações matemáticas e procedimentos, as componentes do ciclo hidrológico que se desenvolvem na bacia hidrográfica, próximas ou abaixo da superfície do solo. Quando um modelo hidrológico é utilizado para a tomada de decisão operativa, tem que apresentar alta confiabilidade e grande estabilidade, mesmo atuando em um sistema onde entradas, processamento (o próprio modelo) e saídas apresentam algum desvio da realidade. Estes desvios fazem com que o estado da bacia hidrográfica estimado pelo modelo seja continuamente diferente do estado real, inferido por medidas no protótipo. Aproximar o estado representado pelo modelo do estado real do sistema inferido no início do horizonte de previsão pode melhorar as previsões. Esta aproximação é obtida através de estimadores de estado. Esta dissertação estudou um estimador de estado específico, baseado no Filtro de Kalman Estendido, aplicado ao modelo chuva-vazão 3R, que é uma simplificação do modelo Sacramento, mas com representação no espaço de estado. O modelo 3R com estimador de estado foi aplicado à bacia do rio Ivaí, afluente da margem esquerda do rio Paraná, para verificação de sua efetividade. Os resultados obtidos foram bastante bons, demonstrando claramente a efetividade do estimador de estado estudado para a melhoria consistente dos resultados de previsão.

Palavras-chave: modelos hidrológicos, modelos operacionais, estimador de estado.

ABSTRACT

Rainfall-runoff hydrologic models try to reproduce, through a set of mathematical equations and procedures, the components of the hydrologic cycle that occur in the river basin near or below its surface. When a hydrologic model is used for operational decision making, it must be very reliable and must have high stability, even operating in a system where inputs, process (the model itself) and outputs present some deviation from reality. These deviations make the state of the river basin estimated by the model continuously different from the real state, inferred by measurements in the prototype. To make the state represented by the model closer to the real estate inferred in the beginning of the forecast period can improve the forecast. This approximation is done by state estimators. This work analyzed a specific state estimator, based on Extended Kalman Filter, applied to 3R rainfall-runoff model, a simplification of the Sacramento model formulated in the state space. The 3R model with state estimator was applied to the Ivaí River basin, a left bank tributary of the Paraná River, to test its effectiveness. The results obtained can be considered very good, showing clearly the effectiveness of the studied state estimator to improve consistently the forecast results.

Keywords: hydrologic models, operational models, state estimator.

1 INTRODUÇÃO

1.1 ESTRUTURA DO TRABALHO

Neste Capítulo são apresentadas informações gerais sobre os objetivos e motivação deste trabalho e a forma de seu desenvolvimento.

No Capítulo 2 são apresentados e discutidos os conceitos e definições gerais associados a este trabalho encontrados na literatura, definindo-se os que devem ser utilizados ao longo do texto. Em especial, discute-se a classificação de modelos hidrológicos chuva-vazão-propagação.

No Capítulo 3 é apresentado o modelo hidrológico chuva-vazão-propagação 3R, selecionado para utilização nos estudos. Um dos objetivos deste Capítulo é gerar uma bibliografia detalhada de referência para o modelo, ainda não disponível, seja na literatura nacional ou estrangeira. Por isto, o modelo é apresentado sob diversos pontos de vista (fases, variáveis, fluxos, modelo conceitual e parâmetros), como forma de facilitar uma visão completa do mesmo. A descrição inclui informações sobre o método utilizado para integração das equações de estado do modelo.

No Capítulo 4 é apresentado o método de otimização “downhill simplex method in multidimensions”, implementado para a função de calibração automática de parâmetros do modelo hidrológico 3R. Embora o método não constitua uma novidade, o mérito deste Capítulo é combinar diversas formas de apresentação e exemplos sobre o mesmo, disponíveis em referências bibliográficas distintas, criando uma referência mais completa e de mais fácil entendimento.

No Capítulo 5 o estimador de estado, objeto principal deste estudo, é apresentado e sua aplicação ao modelo hidrológico 3R é desenvolvida. Por tratar-se de uma aplicação especial do Filtro de Kalman, o Capítulo inicia com uma apresentação geral do Filtro, passando-se em seguida para o desenvolvimento do estimador de estado específico. Como complemento, apresenta-se neste Capítulo o modelo de covariâncias

proposto pelos autores do estimador de estado para os dados de entrada e de medição do sistema.

No Capítulo 6 é apresentada a bacia hidrográfica do rio Ivaí, selecionada como bacia de aplicação deste estudo, bem como todo o procedimento adotado para a geração e validação dos dados hidrológicos e meteorológicos utilizados. Apresenta-se também os estudos anteriormente realizados na bacia. Em especial, descreve-se neste Capítulo uma proposta de procedimento para definição de curvas de descarga.

No Capítulo 7 são apresentadas as orientações para a calibração do modelo 3R, incluindo orientações gerais de procedimento de calibração e propostas de obtenção de parâmetros iniciais. Este Capítulo foi desenvolvido tendo como base a literatura disponível para o modelo Sacramento, do qual o modelo 3R é uma simplificação, com orientações e recomendações adaptadas para o novo modelo.

No Capítulo 8 é descrita a calibração do modelo 3R e apresentados os resultados obtidos. Apresenta-se também o aplicativo computacional desenvolvido neste trabalho para calibração manual e automática do modelo 3R e sua execução em simulação pura (sem estimador de estado), ressaltando-se as melhorias introduzidas em relação a versões anteriores do modelo. Merece destaque, neste capítulo, os problemas encontrados na calibração, alguns dos quais identificados como provenientes da própria formulação do modelo, o que gerou sugestões de melhorias em seu modelo conceitual e a elaboração de uma nova versão do modelo, que poderia ser utilizada em estudos futuros.

No Capítulo 9 é descrito o procedimento adotado de calibração do estimador de estado e apresentados e analisados os resultados desta calibração.

No Capítulo 10 é apresentada e analisada a validação da calibração do sistema (calibração do modelo hidrológico e do estimador de estado), realizada pela aplicação do sistema a um período de dados diferente do utilizado para a calibração. O procedimento adotado para definição do período de validação também é apresentado.

No Capítulo 11 são realizadas algumas análises sobre o funcionamento do estimador de estado, como forma de ampliar a visão da sua forma de atuação. Neste Capítulo são analisados os comportamentos dos estados do modelo gerados por simulação pura (aplicação do modelo sem estimador de estado) e por previsão (aplicação do modelo com estimador de estado) e os estados atualizados, gerados pelo estimador.

No Capítulo 12 são apresentados os problemas identificados como causados pelo modelo conceitual do modelo 3R, apresentadas sugestões para a solução destes problemas e gerada uma nova versão do modelo, denominada 3R6, implementando algumas das sugestões apresentadas. Também são registradas as equações que implementam as alterações do modelo conceitual para a nova versão do modelo (novas equações de estado do modelo) e adiantadas, para uso em estudos futuros, as equações que deveriam ser alteradas no estimador de estado para o desenvolvimento da versão do estimador associada à nova versão do modelo.

No Capítulo 13 são apresentadas as conclusões e recomendações geradas por este trabalho.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta dissertação é contribuir para a disseminação do conhecimento do estimador de estado proposto por RAJARAM e GEORGAKAKOS (1987, apud SPERFSLAGE e GEORGAKAKOS, 1996) para o modelo Sacramento Modificado, destinado a atualizar, no instante inicial de cada ciclo de previsão, as variáveis de estado de um modelo chuva-vazão-propagação.

1.2.2 Objetivos Específicos

Constituem os objetivos específicos desta dissertação:

- a) apresentação do papel dos modelos hidrológicos de previsão no gerenciamento de recursos hídricos;
- b) conceituação de modelos hidrológicos e discussão de sua classificação;
- c) estudo do modelo chuva-vazão-propagação 3R, utilizado neste trabalho, associando-o, sempre que possível, ao modelo Sacramento Modificado, do qual é uma simplificação. Geração de material que possa constituir literatura de referência detalhada para o modelo 3R, atualmente inexistente;
- d) compilação das recomendações disponíveis para calibração do modelo Sacramento, e adaptação para uso com o modelo 3R;
- e) apresentação e análise do estimador de estado proposto para o modelo 3R;
- f) definição de método para estabelecimento e revisão de curvas de descarga para os postos hidrométricos a serem utilizados no trabalho;
- g) coleta e consistência de dados hidrometeorológicos da bacia selecionada para aplicação do modelo hidrológico com estimador de estado;
- h) aplicação do modelo 3R com estimador de estado na bacia do rio Ivaí;
- i) recomendações de estudos futuros e melhorias em modelos e processos, baseadas em análise dos resultados obtidos.

1.3 MOTIVAÇÃO

A modelagem hidrológica é atividade bastante complexa, dada a escala associada ao problema e a variabilidade espacial e temporal dos processos envolvidos. Esta variabilidade leva, via de regra, à simplificação do modelo e dos dados utilizados, estes últimos substituídos por valores representativos, geralmente médias espaciais e temporais. As simplificações de modelos e dados, combinadas aos erros cometidos na medição dos fenômenos de interesse, que são, em geral e para o Brasil, precipitação, evaporação e nível/vazão de rios, geram erros nos resultados produzidos por estes modelos.

Modelos hidrológicos operacionais se destinam a apoiar atividades que dependem, com regularidade, de previsões das variáveis hidrológicas, em geral vazão de rios. Dado que as previsões são parte de sistemas de tomada de decisão, erros nestes valores representam menor eficiência nas decisões tomadas, o que se traduz em perdas, geralmente econômicas mas, no pior dos casos, em perda de vidas. Assim, os modelos hidrológicos operacionais devem buscar a minimização dos erros de previsão. Além disto, uma estimativa da incerteza associada às previsões pode enriquecer o processo de tomada de decisão, ponderando a real relevância da informação contida nesta previsão.

Uma das técnicas de reconhecida eficiência para a redução dos erros de previsão de modelos hidrológicos, utilizada há bastante tempo, é a de atualização de variáveis de estado (WMO, 1975), procedimento referenciado na literatura como estimação de estado e que busca fazer com que a vazão resultante do modelo seja a mais próxima possível da vazão observada no protótipo no instante inicial do horizonte de previsão, que é, também, o último instante em que se dispõe de dados observados. Com isto, busca-se eliminar os erros provenientes de todas as fontes possíveis,

acumulados durante o período anterior de previsão, utilizando como base as informações de medições diretas do processo (dados de nível/vazão observados). O agente que realiza a atualização das variáveis de estado é denominado estimador de estado. O estimador de estado mais utilizado em modelos hidrológicos denomina-se Filtro de Kalman Estendido, versão não-linear do Filtro de Kalman, desenvolvido para sistemas lineares. Dado que depende das variáveis de entrada, de estado e de saída de um modelo, um estimador de estado guarda forte relação com o modelo utilizado.

O modelo Sacramento, desenvolvido pelo “National Weather Service” (NWS) dos Estados Unidos, é um dos modelos operacionais há mais tempo em operação e é utilizado como previsor de vazões para uma série de bacias naquele país. É um modelo relativamente simples, mas capaz de representar com eficiência o processo hidrológico. Além disto, é utilizado em várias partes do mundo, tanto para fins de estudo como para gerar previsões operacionais. Em função do seu tempo de utilização, existe um considerável acervo de conhecimentos sobre todos os aspectos do modelo, tanto conceituais como operacionais.

O NWS desenvolveu um sistema de previsão de vazões, o “NWS River Forecasting System” - NWSRFS, composto por uma versão do modelo Sacramento formulada no espaço de estados, denominada modelo Sacramento Modificado, e um estimador de estado proposto por RAJARAM e GEORGAKAKOS (1987, apud SPERFSLAGE e GEORGAKAKOS, 1996). Este estimador, além de ajustar as variáveis de estado no instante inicial de previsão, permite derivar a distribuição de probabilidades das previsões emitidas pelo modelo. O entendimento deste estimador de estado possibilitaria a elaboração de estimadores de estado análogos para outros modelos hidrológicos. O estimador de estado em estudo tem grande divulgação e estudo no exterior mas é pouco conhecido no Brasil, onde não se tem notícia de sua aplicação.

Assim, considera-se o tema de dissertação proposto relevante pelos seguintes motivos:

- a) importância dos modelos hidrológicos operacionais na gestão dos recursos hídricos e pela importância que os estimadores de estado têm para a melhoria das previsões destes modelos;
- b) utilidade comprovada do estimador de estado estudado;
- c) pouca divulgação, no Brasil, do estimador de estado estudado;
- d) possibilidade de, a partir do conhecimento do processo de derivação deste estimador, derivar estimadores para outros modelos.

1.4 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Optou-se, nesta dissertação, pela adoção do modelo chuva-vazão-propagação 3R, que é uma simplificação do modelo Sacramento Modificado. Este modelo foi selecionado por requerer um estimador de estado de menor dimensão que o modelo Sacramento Modificado, facilitando a manutenção do foco do trabalho no entendimento e divulgação das principais idéias do estimador de estado.

Primeiramente, buscou-se, na literatura disponível, o entendimento dos elementos principais associados a este trabalho: modelos hidrológicos chuva-vazão Sacramento, Sacramento Modificado e 3R e seus procedimentos de calibração e dos estimadores de estado desenvolvidos para os dois últimos modelos e seu procedimento de calibração. Este entendimento foi buscado com tripla finalidade: entender o modelo hidrológico 3R de forma a permitir sua programação e/ou a manutenção de programas existentes, permitir a transferência de conhecimentos e experiências, abundantes para os modelos Sacramento e Sacramento Modificado, para o modelo 3R, que teve, até o momento, um número limitado de aplicações, e entender o estimador de estado de modo a permitir sua implementação e/ou a manutenção de programas existentes.

Foi gerada uma nova versão computacional do modelo 3R, para uso nas

etapas de calibração manual e automática do modelo chuva-vazão, projetada segundo os princípios de programação estruturada. A linguagem de programação utilizada foi o Fortran, linguagem de programação da versão original do modelo 3R. Esta versão está preparada para incorporar, em uma futura evolução, a programação das etapas seguintes de utilização do modelo 3R com estimador de estado, que seriam a calibração do estimador e a execução do modelo com estimador de estado.

Os dados básicos utilizados neste trabalho foram pesquisados primeiramente nos bancos de dados hidrometeorológicos disponíveis na Itaipu Binacional (Gerenciador de Dados Hidrometeorológicos - GDH - e Hymos) e, como complementação, nos da Agência Nacional de Águas (ANA), Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Estado do Paraná (Sudersa), Sistema Meteorológico do Paraná (Simepar). A consistência dos dados de precipitação foi realizada com os métodos simplificados tradicionais de inspeção visual, curva duplo-acumulativa e correlação/comparação entre postos próximos. Apenas os valores notadamente errados das séries foram corrigidos. Os valores faltantes não foram preenchidos, sendo apenas desconsiderados os resultados destes dados nas estatísticas de desempenho.

O modelo hidrológico 3R foi calibrado de acordo com a adaptação das recomendações da literatura disponível para o modelo Sacramento.

Os resultados de previsão do modelo utilizando o estimador de estado foram comparados com os resultados do modelo sem este estimador, utilizando-se ferramentas gráficas de visualização e as técnicas estatísticas usuais de comparação de séries.

2 DEFINIÇÕES E CONCEITOS – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO

2.1 DEFINIÇÕES

Boa parte dos conceitos utilizados no texto é de uso corrente em hidrologia. No entanto, decidiu-se concentrar neste tópico específico as definições gerais que se façam necessárias, para uniformizar a interpretação dos conceitos, tornar a leitura do texto principal mais fácil e prover acesso simples a conceitos utilizados em mais de um local do texto. Desta forma, define-se:

a) hidrologia:

- definição ampla: estudo da água na natureza, sua ocorrência, distribuição e circulação, suas propriedades físicas e químicas, seus efeitos no meio ambiente e em todas as formas de vida (RAUDKIVI, 1979; CHOW, 1964);
- definição prática: estudo de precipitação e escoamento, associados a sistemas de recursos hídricos (abastecimento de água, controle de enchentes, etc.) (RAUDKIVI, 1979);

b) ciclo hidrológico:

- é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar, pela gravidade e pela rotação da Terra (SILVEIRA, 1993);
- ciclo fechado, formado pelo armazenamento e movimentação da água na atmosfera, no solo e nos corpos d'água (rios, lagos, mares, oceanos, etc.) e sua interação com os seres vivos;

- c) sistema: "é qualquer estrutura, esquema ou procedimento, real ou abstrato, que, num dado tempo de referência, inter-relaciona-se com uma entrada, causa ou estímulo de energia ou informação, e uma saída, efeito ou resposta de energia ou informação" (DOOGE, 1973, apud TUCCI, 1998);
- d) sistema real: sistema que se quer modelar, seja ele concreto ou abstrato, existente ou imaginado. Sinônimo: protótipo;
- e) componentes do sistema: segundo a Teoria Geral dos Sistemas, um sistema é definido por três componentes: entrada, processamento e saída (PORTO e AZEVEDO, 1997);
- f) estado: variável multidimensional que contém toda a informação relevante sobre o passado do sistema, sendo esta informação necessária para o conhecimento do seu comportamento futuro quando sujeito a uma dada entrada (O'CONNEL, 1980);
- g) fenômeno: "processo que produz uma alteração de estado no sistema" (TUCCI, 1998);
- h) variável: "é um valor que descreve quantitativamente um fenômeno, variando no espaço e no tempo. Ex: vazão" (TUCCI, 1998);
- i) parâmetro: é um valor que caracteriza o comportamento de um sistema, podendo variar no tempo e no espaço (TUCCI, 1998);
- j) modelo:
 - "é a representação do comportamento de um sistema" (TUCCI, 1998);
 - "é a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem de fácil acesso e uso, com a finalidade de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas" (TUCCI, 1998);

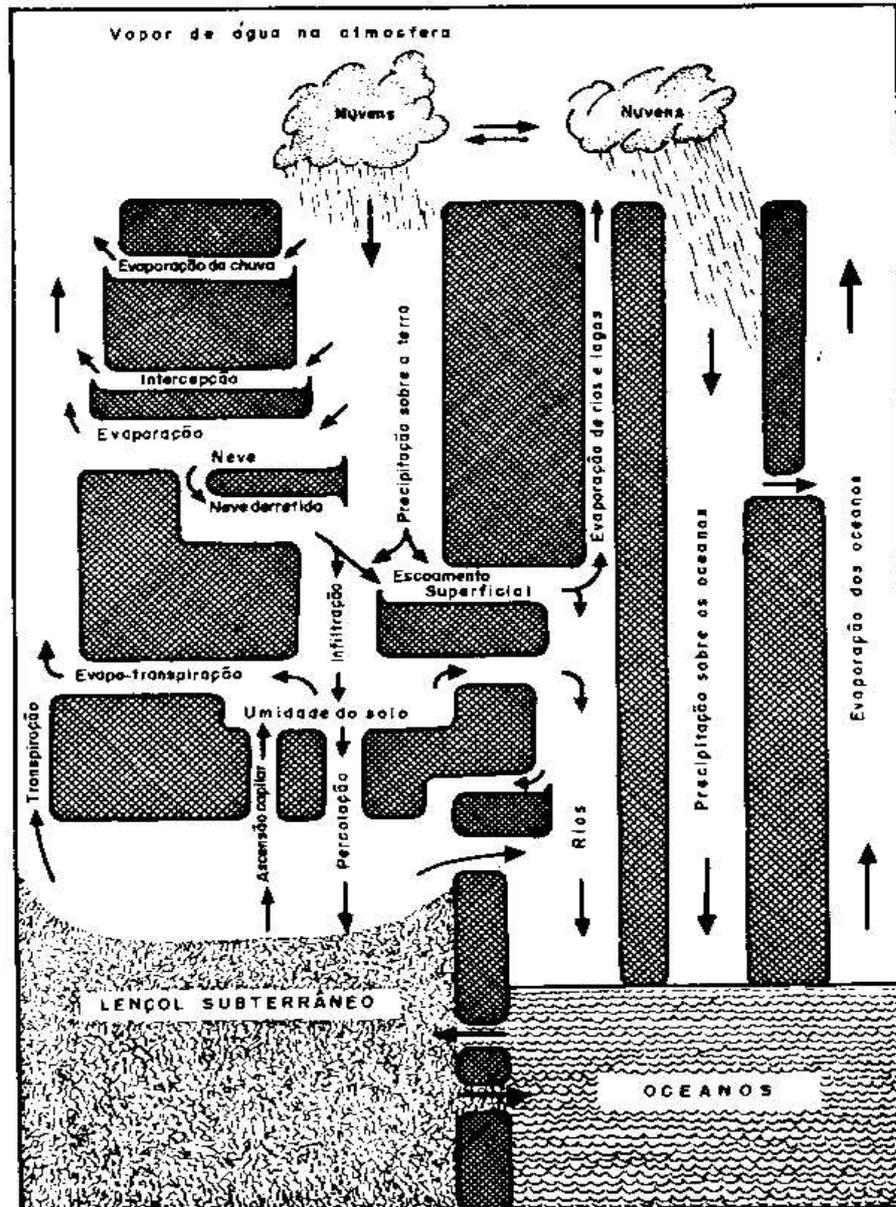
- é a representação simplificada de um sistema (DOOGE, 1968, apud RAUDKIVI, 1998);
- k) bacia hidrográfica: área de captação natural da água de precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, sua exutória (SILVEIRA, 1993);
- l) modelo hidrológico: “é a representação da bacia hidrográfica” (TUCCI, 1998);
- m) simulação: é o processo de utilização De um modelo. Em geral compõe-se de 3 fases: ajuste ou calibração, verificação e previsão (TUCCI, 1998);
- n) sistema de recursos hídricos: conjunto de elementos, naturais ou artificiais, que causam o armazenamento e/ou transporte de água;
- o) sistema de gerenciamento de recursos hídricos: “uma configuração de recursos estruturais (obras de captação, liberação ou controle) e medidas não estruturais que transforma os recursos hídricos em produtos e serviços relacionados à água, e a(s) instituição(ões) que realizam esta transformação” (O’CONNEL, 1980);
- p) protótipo: sistema que se quer modelar, seja ele concreto ou abstrato, existente ou imaginado. Sinônimo: sistema real.

2.2 O DESENVOLVIMENTO DA HIDROLOGIA

A Terra pode ser vista como uma imensa máquina térmica, cuja fonte principal de energia é o sol. Esta fonte provoca uma intensa transferência de massa dos fluidos presentes na hidrosfera, água e ar, de um ponto a outro do globo (RAUDKIVI, 1979). O movimento de fluidos é o gerador do ciclo hidrológico, representado esquematicamente na figura 1. É ele o responsável pela disponibilidade de água doce no interior das massas de terra de nosso planeta, basicamente pelo transporte e

deposição de água evaporada principalmente dos oceanos, fontes permanentes de água para evaporação. Dado que a disponibilidade de água é um dos requisitos necessários para existência de vida, em especial em suas formas mais complexas, este mecanismo é de extrema importância para a configuração da Terra como a conhecemos.

FIGURA 1 – CICLO HIDROLÓGICO.



FONTE: LINSLEY et alli (apud PINTO, 1976)

O processo de ocupação das terras de nosso planeta pelo ser humano sempre esteve associado com a disponibilidade de água, ocorrendo ao longo dos vales de rios, tanto em função de seu uso para consumo como de sua utilização como via de transporte (RAMOS, 1989). Deste muito cedo, esta convivência com os rios deixou patente o comportamento altamente variável destes sistemas naturais de recursos hídricos, que podem gerar tanto falta (secas) como excesso (cheias) significativo de recursos, ambos com efeitos extremamente danosos. A necessidade do entendimento do comportamento dos rios para tentar evitar os danos decorrentes de seus comportamentos extremos promoveu o desenvolvimento da hidrologia. O desenvolvimento da hidrologia como ciência deu-se em fases sucessivas, de aprofundamento e sedimentação do conhecimento, cada uma com uma característica marcante. Segundo CHOW (1964), estas fases podem ser definidas conforme segue:

- a) **período de especulação** (anterior a 1400): caracterizado pela especulação filosófica sobre o ciclo hidrológico e pelo aprendizado gerado com a construção de obras hidráulicas significativas, pelos egípcios, persas, árabes e romanos, entre outros. As primeiras iniciativas em hidrologia que se tem notícia datam de 3.500 a.C., no Egito, quando o estudo do registro sistemático do comportamento do rio Nilo permitiu estimar o comportamento deste rio e adotar medidas de mitigação de suas conseqüências (RAMOS, 1989). Assim, para os egípcios, a convivência com a variabilidade do rio Nilo foi possível pelo simples acompanhamento no tempo de seu comportamento, sem o conhecimento, até onde se sabe, dos fenômenos envolvidos ou explicativos deste comportamento. Também é bastante antiga a tentativa de alterar a disponibilidade natural de água, através da criação de sistemas artificiais de recursos hídricos. Existem registros e evidências físicas da construção, em torno de 3.000 a.C., de barragens de até 15 metros de altura no rio

Nilo, para uso em irrigação (BISWAS, 1972, apud RAMOS, 1989). O romano Marcus Vitruvius, que viveu no Século I, apresentou uma teoria de ciclo hidrológico bastante próxima da atualmente aceita (CHOW, 1964). As primeiras tentativas registradas de abordagem científica da Hidrologia foram realizadas pelos gregos, datando de aproximadamente 500 a.C. (RAMOS, 1989);

- b) **período de observação** (1400 a 1600): neste período (Renascença) prevaleceu a observação como fonte das teorias hidrológicas, ao invés da pura especulação filosófica. Neste período, baseados em observações, Leonardo da Vinci e Bernard Palissy conseguiram um correto entendimento do ciclo hidrológico, principalmente do processo de infiltração da água da chuva e seu retorno à superfície através das nascentes (CHOW, 1964);
- c) **período de medição** (1600 a 1700): somente no século XVII Perrault e Mariotte conseguiram demonstrar, através de medidas de precipitação e vazão de rios, o papel da precipitação como fonte dos volumes escoados em uma bacia (RAMOS, 1989) e Halley mediu a taxa de evaporação e descargas de rios no mar Mediterrâneo, provando que a evaporação dos mares e oceanos poderia ser a fonte geradora de todos os cursos de água (CHOW, 1964; THIMOTTI, 2003). Estas descobertas abriram o caminho para a compreensão do ciclo hidrológico e, portanto, para sua modelagem. Por isto, este período marca o início da hidrologia como ciência (CHOW, 1964);
- d) **período da experimentação** (1700 a 1800): neste período os estudos de hidráulica experimental (Bernoulli, Pitot, Woltman, Smeaton, Borda, Chezy, D'Alambert, etc.) aceleraram significativamente o estudo da hidrologia quantitativa e importantes contribuições para a hidrologia foram feitas, como a identificação do mecanismo de formação das

nascentes e a publicação de um livro sobre rios e correntes (CHOW, 1964);

- e) **período da modernização** (1800 a 1900): o século XIX viu um aprofundamento significativo do período de experimentação iniciado no século anterior, com muitas contribuições para a hidrologia moderna, principalmente na área de águas subterrâneas e medições de vazões. Estas contribuições permitiram consolidar a fundação da hidrologia como ciência. Pode-se citar, entre as contribuições, o estabelecimento da lei de Darcy para escoamento subterrâneo, da equação de Manning para escoamento em canais e da lei de Dalton para a evaporação (CHOW, 1964). Este período é também caracterizado pelo surgimento de vários órgãos encarregados de tratar de informação e previsão hidrológica na Europa (França, Alemanha, Áustria, Suíça, Itália, seguidos de outros países) (THIMOTTI, 2003) e nos Estados Unidos (U.S. Corps of Engineers, U.S. Geological Survey, Weather Bureau) (CHOW, 1964);
- f) **período do empirismo** (1900 a 1930): os esforços para modernização da hidrologia não resultaram em maior fundamentação física para os fenômenos do ciclo hidrológico, apoiando-se, principalmente, em formulações empíricas. Durante este período verificou-se um incremento significativo no desenvolvimento de fórmulas empíricas, com centenas delas sendo propostas. Como as propostas empíricas provaram ser, em sua maioria, soluções ruins para aplicação em problemas práticos, projetos de pesquisa dos fenômenos hidrológicos foram iniciados (CHOW, 1964). Este período marca também o aparecimento de eventos de grande escala para discussão da hidrologia e a criação de entidades internacionais nesta área (CHOW, 1964);

- g) **período de racionalização** (1930 a 1950): neste período os hidrólogos trabalharam para resolver os problemas de hidrologia através de uma análise racional, ao invés de empírica. São exemplos de resultados destes esforços o hidrograma unitário (Shermam - 1932), os hidrogramas coaxiais (Koehler - 1944) e a lei de infiltração (Horton - 1933). Segundo THIMOTTI (2003), estas formulações, mesmo com todas as simplificações envolvidas, representaram grandes contribuições para a representação do ciclo hidrológico e seu uso facilitou o projeto, implantação e operação de sistemas de recursos hídricos artificiais, bem como uma melhor convivência com os sistemas naturais. Por sua facilidade de cálculo e resultados aceitáveis para uma ampla gama de problemas, estes métodos continuam em uso. O período também viu a implantação de um grande número de laboratórios de pesquisa em hidráulica e hidrologia;
- h) **período da teorização** (1950 até hoje): a partir de 1950, a disponibilidade de ferramentas matemáticas, estatísticas, computacionais e de medição, bem como o desenvolvimento da moderna mecânica dos fluídos, permitiram a avaliação dos princípios propostos e o desenvolvimento e teste de abordagens teóricas para os problemas hidrológicos. Como exemplos desta hidrologia teórica temos as análises linear e não-linear de sistemas hidrológicos, a aplicação da termodinâmica à análise da evapotranspiração e a aplicação de técnicas de otimização ao projeto de sistemas de recursos hídricos (CHOW, 1964). Estes desenvolvimentos, em conjunto, permitiram a construção de modelos com a representação integrada de vários componentes do ciclo hidrológico, os modelos de simulação hidrológica (THIMOTTI, 2003).

O crescimento populacional, a concentração da população em grandes cidades e o incremento da utilização da água, tanto pela população como pelos processos produtivos atuais, aumentaram o número sistemas de recursos hídricos. Podem ser citados como usos atuais, o abastecimento humano, geração de energia, irrigação, controle de enchentes, navegação, lazer e pesca. (O'CONNEL, 1980). Uma utilização crescente coloca pressão também crescente sobre os recursos disponíveis, comprometendo, em um processo contínuo, sua disponibilidade, tanto do ponto de vista de quantidade como de qualidade. Com isto, cresce a disputa pelo uso da água, e, por conseqüência, o potencial de conflitos. Exemplo deste tipo de conflito ocorreu na recente crise energética do Sistema Elétrico Brasileiro, quando os interesses da geração de energia colidiram com os interesses da Hidrovia Paraná/Tietê. O Setor Elétrico cogitava, inicialmente, usar toda a água armazenada no reservatório de Ilha Solteira, no rio Paraná, para a geração de energia, o que levaria o reservatório a níveis que impediriam a navegação. Em função do conflito de interesses, esta operação foi descartada (BRAGA, 2002). Os conflitos colocam em evidência a necessidade de desenvolvimento tanto de mecanismos de negociação social como de ferramentas para gerenciar, com a maior efetividade possível, a operação dos sistemas de recursos hídricos. Entre estas ferramentas está um modelo que possa reproduzir o comportamento dos sistemas, tanto em seus componentes naturais (transformação chuva-vazão e trânsito em rios) como nos artificiais (usinas, reservatórios, captações, canais, redes), já que sem ele o estudo e a previsão do comportamento dos sistemas não são possíveis. Assim, um modelo que reproduza o comportamento dos sistemas de recursos hídricos será sempre peça fundamental na sua operação efetiva.

2.3 MODELOS

2.3.1 Definição de Modelo

Uma análise das definições de modelo apresentadas no item j de 2.1 indica que todas elas têm problemas em atender plenamente o que entendemos correntemente como modelo. Como exemplo, a primeira definição exclui maquetes (modelos de representação de formas), a segunda coloca limitação à finalidade dos modelos e a terceira implica na necessidade de simplificação na representação, o que não necessariamente ocorre em todos os modelos. Em função disto, propomos neste trabalho a seguinte definição: modelo é a representação de um sistema que difere do sistema original pelo conjunto de aspectos representados e/ou pela forma de representação destes aspectos.

Desta definição, destacam-se as seguintes características, que se aplicam a todos os modelos:

- a) **intenção**: um modelo é uma reprodução e, portanto, uma criação, um produto. Ele não surge espontaneamente, resultando da aplicação de esforço consciente;
- b) **finalidade**: é uma consequência da intenção. Dado que um modelo é um produto, ele é gerado com uma finalidade. Existe sempre uma motivação para a geração de um modelo;
- c) **limitação**: qualquer sistema é limitado por seu escopo e todo modelo herda automaticamente esta limitação do sistema original. Assim, um modelo representa, necessariamente, uma parte limitada da realidade. Adicionalmente, um modelo não representa necessariamente todos os aspectos de um sistema, mas, geralmente, apenas uma parcela deles;

- d) **existência independente:** o modelo é diferente do sistema reproduzido, apresentando existência independente. Uma vez definido, o modelo existe e tenta reproduzir o sistema original, mesmo que o sistema que lhe deu origem deixe de existir ou ainda não exista;
- e) **representação particular:** a forma de representação do modelo consiste no conjunto de recursos utilizados na descrição dos aspectos a modelar. A forma de representação é uma característica importante do modelo.

Embora descritos de maneira isolada, os aspectos anteriormente citados estão intimamente relacionados com a efetividade de um modelo, ou seja, sua capacidade de atender à sua finalidade. O modelo eficiente é aquele que representa bem os aspectos relevantes do sistema, que foi corretamente identificado, e o faz na forma de representação conveniente para o uso pretendido. Desta forma, em um modelo efetivo, a finalidade (para que o modelo está sendo gerado) condiciona o sistema a ser modelado, os aspectos deste sistema a serem reproduzidos e a forma de representação.

Este trabalho estará centrado em um tipo específico de modelo: o modelo hidrológico. Adotaremos como definição de modelo apresentada por TUCCI (1998), reproduzida no item 1 (ele) de 2.1: “Modelo hidrológico é a representação da bacia hidrográfica”.

Detalhando um pouco mais esta definição, consideraremos como modelo hidrológico àquele que define como sistema de interesse os processos do ciclo hidrológico que ocorrem em uma área definida, a bacia hidrográfica (definição k de 2.1). Ressalta-se que embora estejamos definindo modelo hidrológico como aquele que representa todos os processos do ciclo hidrológico, não é incomum encontrar-se a denominação “modelo” para a representação de cada componente do ciclo hidrológico. Assim, um modelo que represente apenas a percolação de água no solo poderia ser referenciado em outras fontes como modelo hidrológico de percolação.

2.3.2 Classificação de Modelos

As classificações de modelos têm como objetivo antecipar informações sobre os mesmos. Os modelos são classificados em função de uma série de características específicas, que se deseja ressaltar. Diversos esquemas de classificação de modelos podem ser encontrados na literatura, como, por exemplo, TUCCI (1998), O'CONNEL (1980) e CLARKE (1973, apud RAUDKIVI, 1979). De posse das definições das diversas classificações e da definição de modelo, apresentada no item 2.1, propõe-se a seguinte síntese para os principais critérios de classificação:

a) **quanto ao aspecto a ser representado:**

- **modelo de forma:** busca reproduzir apenas a forma do sistema. Ex: maquete;
- **modelo de comportamento ou de processo:** busca reproduzir o comportamento, a parte dinâmica de um sistema. Ex: modelo hidrodinâmico;

b) **quanto ao grau de representação dos aspectos:**

- **modelo simplificado:** os aspectos a serem reproduzidos são descritos com grau de complexidade menor que o do sistema original. Ex: modelo de propagação de onda cinemática. Os modelos podem ser simplificados em relação a:
 - . **comportamento:** o comportamento do sistema é representado de maneira simplificada. Ex: modelo de Muskingum;
 - . **estrutura:** a estrutura do sistema é representada de maneira simplificada. A estrutura do sistema é definida por seus componentes físicos e pela forma como eles se relacionam. Ex: talvegue de um rio em modelo hidrodinâmico;

- **modelo completo:** toda a complexidade dos aspectos sendo modelados é descrita no modelo. Ex: modelo de propagação hidrodinâmico tridimensional;

c) **quanto à forma de representação dos aspectos:**

- **modelo físico:** os aspectos a modelar são reproduzidos por alguma grandeza física, como forma, vazão, nível, tensão, corrente, etc. Os modelos físicos podem ser divididos em dois tipos:
 - . **modelo símile:** o aspecto é reproduzido em forma de representação semelhante à do sistema original, mas em uma escala apropriada. Ex: modelo reduzido de canal;
 - . **modelo analógico:** o aspecto é reproduzido em uma forma de representação diferente, mas que apresente comportamento semelhante ao do sistema original. As grandezas medidas no modelo são diferentes das grandezas do sistema real, mas guardam uma relação de valor. Ex: modelo de propagação de vazão por circuitos elétricos;
- **modelo matemático:** os aspectos são representados por conjuntos de equações matemáticas. Ex: modelo hidrodinâmico. Os modelos matemáticos podem ser divididos em:
 - . **modelo conceitual:** as equações que representam os aspectos da realidade tentam reproduzir os fenômenos geradores destes aspectos e não apenas seu comportamento. Ex: modelo SSARR (BROOKS e DAVIS, 1972);
 - . **modelo empírico:** as equações que representam os aspectos são definidas sem levar em conta seus fenômenos geradores, procurando reproduzir apenas o comportamento destes aspectos. Desta forma, os modelos empíricos são o equivalente matemático

dos modelos analógicos, ou seja, são definidos pela semelhança de resposta com o sistema original. Ex: modelo de propagação por tempo de viagem. No entanto, uma classificação mais esclarecedora quanto a este aspecto para modelos complexos deveria levar em conta a extensão de utilização dos modelos empíricos na formulação do modelo global. Como exemplo, o modelo SSARR, citado na literatura como conceitual, poderia ser classificado como empírico de segunda ordem, já que os componentes modelados são conceituais, mas a formulação dos componentes é empírica;

d) **quanto ao comportamento no tempo:**

- **modelo contínuo:** em um modelo contínuo as saídas estão definidas para todos os instantes do período que o modelo deve representar. Modelos contínuos são, basicamente, os físicos e os matemáticos com entrada contínua (definida como função matemática contínua) e solução analítica. Ex: modelo reduzido de canal. Em geral as formulações matemáticas de um modelo definem um modelo contínuo, que se transforma em discreto quando da sua aplicação/cálculo. Ex: modelo de difusão, cuja formulação na forma diferencial é contínua e sua implementação computacional é discreta;
- **modelo discreto:** em um modelo discreto as entradas, processamento e saídas são definidos apenas para alguns instantes do período a ser representado pelo modelo. Os valores associados a cada um destes instantes representam o valor de uma grandeza naquele instante ou em um período de tempo que inicia ou termina naquele instante. Ex: modelo IPH II (TUCCI, 1998; MINE, 1992);

e) **quanto ao tipo da informação de saída:**

- **modelo determinístico:** modelo que, para um estado definido, relaciona univocamente uma entrada com uma saída. Ou seja, são modelos em que, dados um estado e uma entrada, obtém-se uma única saída. Ex: modelo SSARR (BROOKS e DAVIS, 1972);
- **modelo estocástico:** modelo no qual uma ou mais saídas são variáveis estocásticas. Em um modelo estocástico, dados um estado e uma entrada, obtém-se um conjunto das saídas possíveis. Ex: modelo de previsão de vazões para controle de enchentes do Setor Elétrico (ONS, 2000);

f) **quanto ao tipo de comportamento do processo sendo modelado:**

- **modelo linear:** atende às propriedades de superposição ($f(x+y) = f(x) + f(y)$) e de homogeneidade (se $f(x) = y$, então $f(n x) = n y$). Do ponto de vista matemático, um modelo é linear se os coeficientes da equação diferencial parcial que o define não são função da variável independente. Do ponto de vista estatístico, um modelo é linear quando representado por equação da forma $y = a + b x$, que não atende às propriedades de superposição e homogeneidade. Ex: hidrograma unitário;
- **modelo não-linear:** todo modelo que não atende às condições definidas para um modelo ser linear. Ex: modelo de propagação de Nash;

g) **quanto ao comportamento em operação:**

- **modelo de simulação:** a atualização de variáveis de entrada e/ou parâmetros e/ou variáveis de estado se dá em tempo diferido, ou seja, por procedimento fora do ambiente de operação (O'CONNEL, 1980);

- **modelo adaptativo:** atualiza variáveis de entrada e/ou parâmetros e/ou variáveis de estado durante a operação do modelo (TUCCI, 1998).

Especificamente para modelos hidrológicos, podemos propor o seguinte critério adicional de classificação:

h) quanto à discretização da representação espacial:

- **modelo concentrado:** representa uma bacia hidrográfica como um todo;
- **modelo semidistribuído:** representa uma bacia hidrográfica como um conjunto de sub-bacias;
- **modelo distribuído:** representa a bacia hidrográfica como um conjunto de áreas que não constituem, necessariamente, sub-bacias.

Embora o objetivo básico da classificação de um modelo seja adiantar informações sobre ele, o autor considera que, de maneira geral, as classificações têm fronteiras difusas, não claramente definidas, o que diminui significativamente o ganho com sua utilização. Como exemplo, temos a classificação de modelo conceitual e empírico: a representação de um componente do ciclo hidrológico com uma função empírica gera um modelo empírico, mas uma coleção de funções empíricas, cada uma representando um dos componentes do ciclo, gera um modelo conceitual. Além disto, é opinião do autor que todo modelo hidrológico matemático é, sempre, um modelo de comportamento, simplificado ao menos em estrutura, empírico, discreto e estocástico. O modelo será sempre simplificado em estrutura porque não há como reproduzir de forma realista, por exemplo, a miríade de canalículos formados pelo solo, o que geraria um modelo conceitual, devendo este componente ser modelado através de representantes, geralmente componentes homogêneos com propriedades médias. É

empírico porque a complexidade e variabilidade dos processos de fluxos de água e energia na bacia praticamente obrigam a utilização de heurísticas sobre pelo menos parte do processo. E o modelo é de natureza estocástica porque muitos dos dados e propriedades do modelo são representados por valores médios: as variações espacial e temporal dos valores reais que produziram esta média tornam os resultados do modelo automaticamente estocástico. O fato da maioria dos modelos não explicitar a natureza estocástica da resposta não muda esta natureza.

2.3.3 Exemplos de Modelos e Suas Aplicações

Modelos são substitutos dos sistemas reais utilizados na solução de problemas. Assim, são utilizados em situações em que esta substituição é necessária ou vantajosa.

A utilização de modelos é necessária, ou obrigatória, quando o sistema real não pode responder às questões formuladas pelo problema em estudo. Apresentam a condição de uso necessário de modelos:

- a) o estudo de sistemas idealizados: o estudo de sistemas que existem apenas como idéia, como obras em estágio de projeto, somente pode ser feito através de modelos. Os modelos reduzidos de vertedores e canais de fuga em obras de barragens são exemplos de modelos para este tipo de estudo;
- b) a previsão do comportamento de um sistema existente em operações não registradas: nestes casos o comportamento do sistema é que é idealizado, no sentido que ainda não ocorreu, existindo apenas no plano teórico ou ideal. Exemplo deste tipo de problema é o estudo dos efeitos de uma operação de reservatórios diferente da ocorrida, para um evento passado;

- c) A previsão do comportamento de um sistema existente para condições ainda não ocorridas ou não registradas: este caso também trata de comportamento idealizado de um sistema, como, por exemplo, o comportamento de um reservatório à ocorrência da cheia de projeto ou o uso de modelos para o preenchimento de falhas no registro de dados.

A substituição do sistema real por modelos é vantajosa quando resulta em reduções de tempo, custo ou risco. As seguintes atividades apresentam condições de vantagem para uso de modelos :

- a) estudos de situações limites ou críticas: estudos que envolvem limites de uso ou resistência podem implicar em ensaios destrutivos, ou que coloquem em risco pessoas, fauna, flora ou propriedades. Este tipo de estudo somente tem sentido se realizado em modelos, dadas as conseqüências de sua realização no protótipo. Como exemplo, temos o estudo de rompimento de barragens;
- b) estudos do comportamento de sistemas complexos: em sistemas com um conjunto grande de variáveis, pode não ser possível aguardar a ocorrência natural de todas as combinações de variáveis para definir o comportamento global do sistema, bem como nem sempre é possível analisar as conseqüências e inter-relações entre estas variáveis e a resposta do protótipo. Nesta situação a utilização de modelos permite a simulação, em curto espaço de tempo, de uma ampla gama de condições. Exemplo: definição da superfície de rendimento de geradores (curva colina);
- c) estudos de sistemas de alto custo: sistemas que tem alto custo de implantação ou operação e para os quais a definição de alguns parâmetros é importante para o seu sucesso são simulados em modelos. Exemplo: comportamento aerodinâmico de projeto de avião.

Mesmo em uma área restrita, como a de modelos hidrológicos, existe uma gama imensa de modelos, com características particulares e destinados a resolver tipos de problemas distintos. Como exemplo desta diversidade, podemos citar os modelos abaixo, cujas referências foram obtidas, basicamente, dos últimos eventos nacionais de Recursos Hídricos e Meteorologia:

- a) OperRes (MAIA e VILLELA, 2003): modelo de simulação de operação de múltiplos reservatórios em tempo real, incluindo balanço hídrico;
- b) ModSimLSA (CARVALHO et alli, 2003): modelo destinado ao gerenciamento de água para irrigação;
- c) ArcEGMO (ALMEIDA et alli, 2003): modelo distribuído para análise de disponibilidade hídrica;
- d) SPSOR (GUETTER, 1999): modelo chuva-vazão de previsão de aflúências baseado no modelo conceitual Sacramento Modificado;
- e) SIPOP (CUNHA e GUETTER, 2003): modelo chuva-vazão de previsão de aflúências baseado no modelo conceitual Sacramento Modificado;
- f) modelo estocástico (GALVÍNCIO, 2002): modelo ARMA para geração de vazões medias mensais para o alto rio São Francisco;
- g) modelo estocástico (LAURENTIS e TUCCI, 2003): modelo de previsão em tempo real do tipo vazão-vazão com atualização em tempo de operação;
- h) PREVIVAZM (COSTA et alli, 2003): previsão estocástica de vazões mensais para o controle de enchentes em aproveitamentos do Sistema Elétrico Brasileiro;

- i) modelo estatístico (ROCHA et alli, 2002): modelo estatístico para previsão de vazões na bacia do rio Capim;
- j) modelo estatístico (CARDOSO et alli, 2002): modelo estatístico para previsão de vazão trimestral baseado em anomalias de TSM;
- k) modelo estatístico (SOUZA FILHO et alli, 2003): modelo para previsões sazonais e interanuais de vazão por correlação com índices climáticos;
- l) modelo estatístico (GUILHON e CARPIO, 2003): modelo estatístico de previsão de vazões semanais aos reservatórios do Sistema Elétrico Brasileiro;
- m) modelo de redes neurais (SANTOS e PEREIRA FILHO, 2000): redes neurais para previsão de enchentes urbanas usando dados de radar;
- n) modelo de redes neurais (MÜLLER e FILL, 2003): modelo de propagação de vazões baseado em redes neurais;
- o) modelo puramente heurístico: modelo empregado pela Itaipu Binacional no início de funcionamento de sua área de operação, no qual as previsões de vazões eram realizadas pelo previsor (técnico encarregado da previsão), tendo como dados apenas as informações do comportamento ocorrido de alguns postos fluviométricos.

2.3.4 Tipos de Problemas Associados a Modelos

DOOGE (1968, apud RAUDKIVI, 1979) identificou como problemas que podem surgir ao considerar-se o objeto a modelar como um sistema, composto por entrada, processamento e saída:

- a) **problema de identificação:** busca-se obter o processamento do sistema, dadas as entradas e saídas do mesmo. Neste tipo de problema tenta-se definir o mecanismo de transformação das entradas nas saídas. Segundo O'CONNEL (1984), identificação do modelo é a determinação, dentro de limites e a partir das entradas e saídas, de um modelo que é essencialmente equivalente ao sistema sendo modelado. Identificar um modelo seria, então, sinônimo de desenvolvimento ou obtenção de modelos;
- b) **problema de previsão:** neste tipo de problema busca-se obter as saídas de um sistema, definidas suas entradas e processamento. Usualmente, no entanto, o conceito de previsão é associado a um problema mais restrito, de estimativa das saídas de um sistema para tempos futuros específicos ou em determinados intervalos (LETTENMAIER e WOOD, 1993, apud THIMOTTI, 2003);
- c) **problema de detecção:** busca-se obter as entradas do sistema, conhecidos suas saídas e processamento. É o equivalente matemático da obtenção da função inversa. Neste tipo de problema busca-se identificar, a partir das saídas de um sistema, entradas não definidas ou detectadas. Considerando a estrutura dos sistemas hidrológicos, altamente complexos e não lineares, os problemas de detecção tornam-se extremamente complicados. Um dos problemas que podem ser classificados como problema de detecção seria o de, dado o estado no instante inicial de um intervalo e a vazão no instante final, definir qual precipitação geraria a vazão observada.

Em uma formulação mais formal para a mesma discussão (THIMOTTI, 2003), tem-se que todo sistema pode ser representado matematicamente a partir de seus componentes como:

$$y(t) = K x(t) \quad (1)$$

onde:

$x(t)$ - entrada do sistema, representada como série temporal;

$y(t)$ - saída do sistema, representada como série temporal;

K - processamento do sistema, representando o processo de transformação das entradas nas saídas.

A partir deste tipo de apresentação, pode-se definir o problema de identificação como o de definição de K , o de previsão como o de definição de $y(t)$ e o de detecção como o de definição de $x(t)$.

Cada tipo de problema é atacado de forma distinta. Em todo sistema operacional, o problema de identificação está sempre presente e tem que ser resolvido. Na grande maioria destes sistemas, o de previsão também e, em alguns, os três problemas tem que ser encarados.

2.3.4.1 O problema de identificação

BEVEN (2001) apresenta o desenvolvimento/obtenção completo de um modelo para um sistema específico (problema de identificação) não como um processo de passo único, mas de múltiplos passos. Embora BEVEN tenha feito a descrição destes passos direcionada diretamente a modelos hidrológicos, os conceitos serão aqui apresentados como generalizações, com o objetivo de ampliar a sua aplicabilidade. Assim, podem ser consideradas etapas para a identificação de um modelo:

- a) **definição do modelo percebido:** consiste na formação da percepção do modelador de como o sistema real responde às entradas, quais os fenômenos que ocorrem no sistema, como se relacionam e quais os mais

significativos para a intenção pretendida para o modelo final. Dentro da visão de análise de sistemas, parte da definição do modelo percebido pode ser assimilada como de definição do escopo do sistema, ou seja, a definição de suas fronteiras. Chama a atenção que o modelo percebido é um resultado pessoal/individual, limitado tanto pela experiência do modelador como pelo seu conhecimento teórico. Como consequência, os modelos percebidos têm como limite o grau de desenvolvimento de sua área de conhecimento: quanto maior o conhecimento teórico da área de conhecimento maior a possibilidade da definição de um modelo percebido adequado. Talvez estes fatos justifiquem a infinidade de modelos disponíveis, já que cada problema específico apresenta uma particularidade e cada modelador tem uma bagagem distinta de experiências e conhecimentos. O modelo percebido é a abstração de mais alto grau do sistema real;

- b) **definição do modelo conceitual:** o modelo conceitual consiste na descrição, na forma adequada, dos processos identificados no modelo percebido. Assim, para um modelo matemático, por exemplo, os processos identificados no modelo percebido devem ser descritos por conjuntos de relações matemáticas. Dadas a complexidade dos sistemas reais e a finalidade do modelo pretendido (que limita o modelo percebido a apenas alguns aspectos do sistema a modelar), a descrição é, em geral, baseada em hipóteses e simplificações. O modelo conceitual representa uma redução do grau de abstração em relação ao modelo percebido;
- c) **definição do modelo procedural:** consiste na especificação do modelo conceitual como procedimento, na forma adequada para o modelo buscado e para seu objetivo pretendido. Nesta etapa todas as relações entre os processos descritos no modelo conceitual e destes com as entradas e saídas devem estar definidas, bem como a descrição do

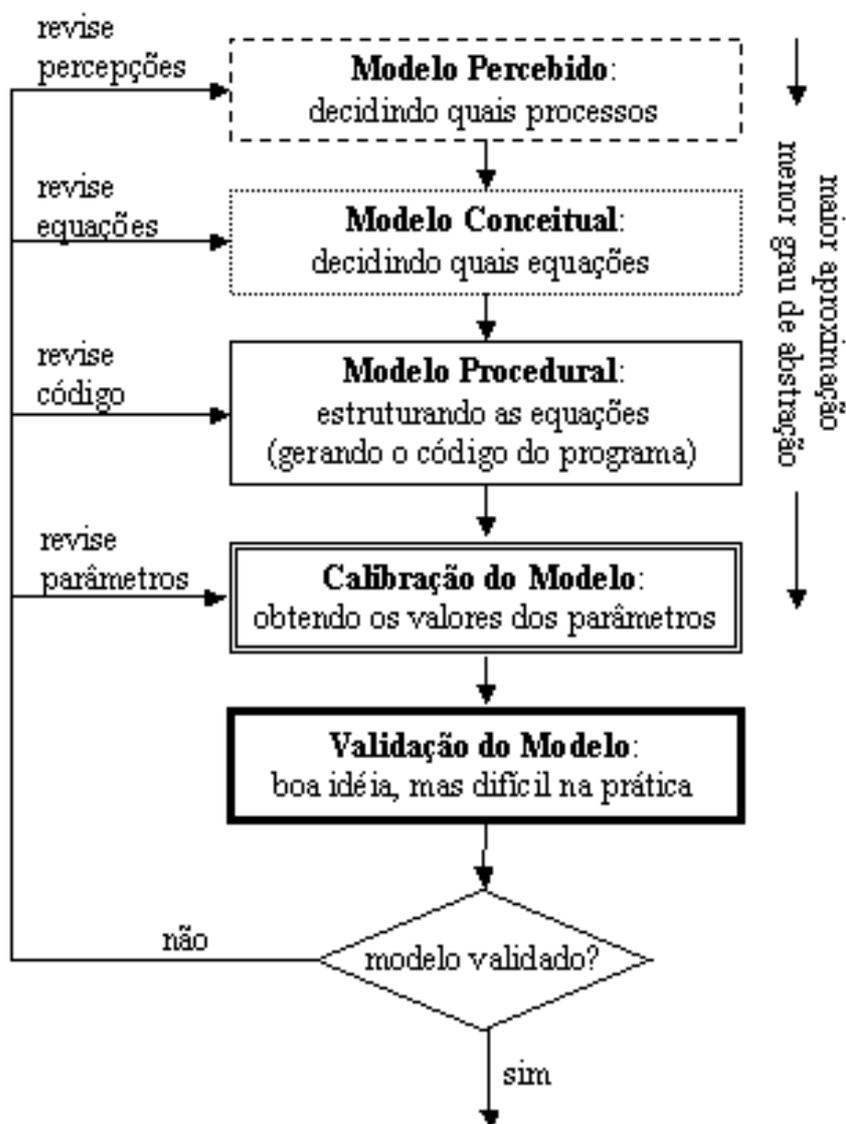
desenvolvimento destas relações no tempo e no espaço. No caso de modelos matemáticos, o modelo procedural pode ter a forma de código para execução em computador. Este modelo é o de mais baixo grau de abstração, mas ainda representa um sistema genérico, ou seja, uma família de sistemas;

- d) **calibração do modelo:** consiste em, a partir do modelo procedural, genérico, definir um modelo específico para o sistema real. No caso de modelos matemáticos, consistiria na definição dos valores dos parâmetros do modelo procedural, de modo que o modelo reproduza, com a maior fidelidade possível, o sistema real. O modelo procedural calibrado é, portanto, o modelo que representa o sistema real;
- e) **validação do modelo:** consiste na avaliação da resposta ou da capacidade preditiva do modelo calibrado obtido. Na etapa de validação, o resultado do modelo é cotejado contra o resultado do sistema real, com o objetivo de definir se há similaridade entre eles, ou seja, se o modelo representa os diversos aspectos do sistema real com a aproximação necessária à sua intenção ou objetivos. Mais uma ressalta-se que a definição de modelo válido é relativa à sua finalidade, não se constituindo em critério absoluto. Um modelo perfeitamente adequado para uma determinada finalidade pode não ser opção válida para outras.

A partir da definição das etapas acima podemos analisar o processo de identificação de modelos como sendo composto da definição de um modelo genérico (modelo procedural), que representa uma família de sistemas similares ao sistema real, e a definição de um modelo específico (modelo calibrado) para o sistema real, que representa este sistema determinado. O modelo genérico é obtido pela geração de um modelo de alto grau de abstração, o modelo percebido, e a redução deste grau de abstração em etapas sucessivas (modelos conceitual e procedural). As etapas de

calibração e validação consistem na definição de um modelo específico para representação do sistema real em estudo, a partir do modelo genérico. Consistem, portanto, na definição, para representar o sistema real, de um dos membros da família definida pelo modelo genérico. A figura 2 representa esquematicamente o processo de identificação de modelos.

FIGURA 2 – PROCESSO COMPLETO DE IDENTIFICAÇÃO DE MODELOS.



Um dos graves problemas de modelagem consiste justamente na definição deste representante, já que, em geral, pode existir mais de um membro da família de sistemas definida pelo modelo genérico que poderia representar um sistema real específico, considerados os dados disponíveis para este sistema. Uma característica positiva para um modelo genérico seria a de guardar uma relação biunívoca com o sistema real, ou seja, que exista um único representante para o sistema real na família definida pelo modelo genérico. Em outras palavras, seria uma característica interessante que a calibração do modelo gerasse sempre um único modelo específico. Para o caso de modelos matemáticos, isto significaria que a calibração do modelo genérico produziria sempre um único conjunto de parâmetros na representação do modelo específico.

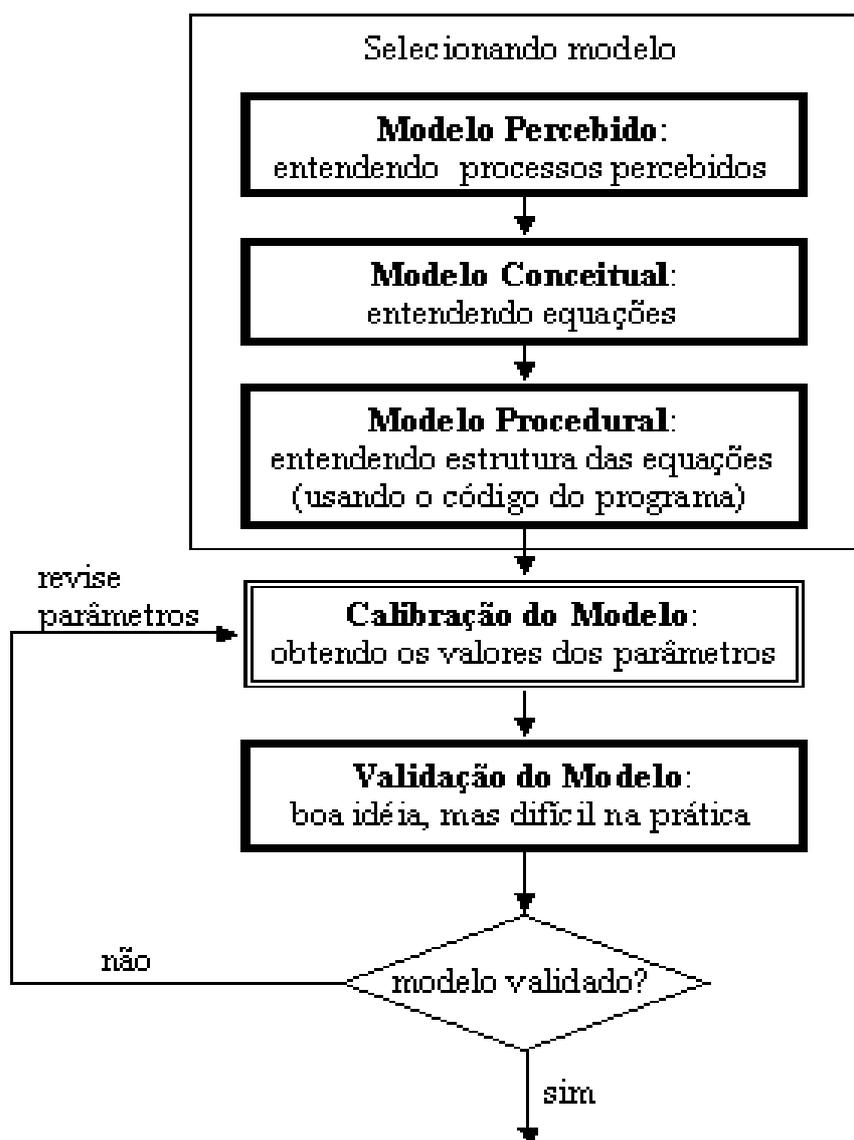
Na prática, nem todas as etapas do processo completo para a identificação de modelos são percorridas. O procedimento mais comum nas áreas de aplicação é a seleção de um modelo genérico previamente definido e sua calibração para aplicação no problema específico sendo tratado. Desta forma, o processo de identificação de modelo fica sensivelmente modificado, com as três primeiras etapas sendo substituídas por uma única, de seleção de um modelo procedural (genérico) já definido e sua calibração e validação, cabendo ao usuário apenas o entendimento dos modelos percebido, conceitual e procedural. O procedimento está representado na figura 3.

2.3.4.2 O problema de previsão

Nos problemas de previsão a entrada e o processamento (modelo de comportamento) do sistema são acessíveis. Isto significa que o problema de identificação foi resolvido e o modelo que representa o componente de processamento do sistema está disponível. Assim, o problema de previsão é, basicamente, de utilização: consiste na utilização, com entradas já disponíveis, do modelo que representa o componente dinâmico (processamento) do sistema. Este tipo de definição

pode cobrir uma ampla gama de situações, como o uso de um modelo hidrológico chuva-vazão para preencher valores faltantes em uma série de vazão observada em uma seção de rio, que não se enquadra no entendimento corrente do que seria previsão.

FIGURA 3 – PROCESSO USUAL DE IDENTIFICAÇÃO DE MODELOS.



FONTE: adaptado de BEVEN (2001)

O conceito de uso corrente de previsão é significativamente mais restrito e consiste, segundo LETTENMAIER e WOOD (1993, apud THIMOTTI, 2003), na estimativa da saída de um sistema em um tempo futuro específico ou em um determinado intervalo. Assim, o conceito de previsão está associado à obtenção de saídas do sistema com características específicas: para um instante ou período de tempo posterior ao instante presente. Este tipo de problema constitui um subconjunto daquele delimitado pela definição genérica de problema de previsão. O conceito em sua forma restrita está associado aos sistemas operacionais, foco de interesse desta dissertação.

O foco dos problemas de previsão está menos nos requisitos específicos deste tipo de problema, como as características necessárias das entradas, e mais nas características do modelo identificado, cuja capacidade preditiva não pode ser avaliada pela sua capacidade de reproduzir um período já registrado. Este problema ocorre com modelos hidrológicos conceituais, os mais usados operacionalmente, que funcionam basicamente como interpoladores, sendo uma incógnita seu comportamento como extrapoladores, ou seja, em situações muito distintas das utilizadas para calibração (GAN e BURGESS, 1990). Apesar disto, não existe ainda forma objetiva de testar quais das características do modelo são limitantes ou inapropriadas em dadas circunstâncias (GAN e BURGESS, 1990), tornando a aplicação destes modelos em operação uma questão de experimentação.

2.3.4.3 O problema de detecção

O problema de detecção consiste na definição das entradas de um sistema, dados as saídas e o processamento do mesmo. Como citado anteriormente, este é um problema análogo à de definição de função inversa e, como este problema, pode ser bastante complicado, inexistindo função inversa na maioria dos casos.

No caso de modelos hidrológicos, a complexidade do sistema modelado implica em grande dificuldade para a solução do problema inverso e, na maioria dos

casos, na impossibilidade de obtenção desta solução. Como exemplo, para o modelo chuva-vazão Sacramento, uma unidade de volume de vazão calculada em um ponto qualquer do sistema é resultado do somatório de 5 fontes de contribuição, que interagem com o canal e entre si. Assim, existe uma variedade de conjuntos de contribuições destas fontes que poderia gerar a unidade de vazão observada, sendo impossível a definição determinística de uma função inversa. É possível, no entanto, a definição desta função inversa em termos probabilísticos.

2.3.5 Modelos Operacionais

Chamou a atenção do autor a falta de bibliografia discutindo especificamente os conceitos associados a modelos operacionais. Em função disto, coletamos os poucos conceitos encontrados e propusemos alguns outros, para que se possa interpretar o restante deste documento com uma base conceitual definida. Os conceitos propostos pelo autor estão apoiados grandemente na sua vivência na área de hidrologia de operação.

Propõe-se definir modelo operacional como modelo de processo destinado a fornecer continuamente resultados, em instantes ou intervalos definidos, ou preparado continuamente para fornecer resultados, na ocorrência de eventos específicos. Os modelos operacionais estão associados a processos de tomada de decisão em sistemas de funcionamento contínuo no tempo, como sistemas hidrelétricos, processos produtivos industriais ou agrícolas, sistema financeiro, etc. O funcionamento destes sistemas é baseado em uma cadeia ininterrupta de decisões, gerada pelas alterações ocorridas em um ambiente mutável, que pode alterar entradas, processos ou saídas do sistema real. Os modelos operacionais tentam prever as conseqüências ou identificar as causas destas mudanças no ambiente, com o objetivo de orientar as medidas a serem tomadas em cada instante de decisão. A definição de modelo operacional é difusa e apresenta duas dimensões: de tempo (quanto maior o intervalo de processamento,

menos se percebe o conceito de modelo operacional) e de tipo de execução (quanto menos automática a execução, menos o modelo é considerado operacional). Prevalece a dimensão de tempo sobre a de automação: modelos que produzem resultados com grande frequência são considerados operacionais, independentemente de seu grau de automação.

A definição adotada não exclui, a priori, nenhum modelo, já que aquele capaz de prover resultados continuamente pode ser usado operacionalmente. Esta pode ser a fonte da falta de discussão conceitual sobre modelos operacionais, que é uma categoria que parece estar mais relacionada ao uso de um modelo que a suas características gerais. Desta forma, uma ampla gama de alternativas de modelos está disponível para a implantação de sistemas operacionais. A WMO (1975) constatou que mesmo em áreas de conhecimento limitadas, como a de modelos hidrológicos utilizados em serviços nacionais de meteorologia, os modelos para uso operacional variam significativamente em estrutura e complexidade. Como todo modelo, os operacionais têm que atender às finalidades para as quais foram criados. A discriminação entre modelos operacionais e não operacionais pode ser feita em função das características de seus resultados, que devem atender a uma série de requisitos, com os principais citados a seguir:

- a) **continuidade:** os resultados de um modelo operacional devem ser gerados continuamente no tempo. Por continuidade temporal entenda-se que o processo de geração dos resultados tem uma vida teórica infinita, sem limitação no tempo;
- b) **abrangência:** os resultados de um modelo operacional devem ter a abrangência necessária para representar o sistema real, nas dimensões de espaço e tempo. Assim, toda a área de interesse e todo o horizonte de interesse devem ser cobertos;

- c) **atualidade:** os produtos de um modelo operacional devem incorporar todos os elementos já ocorridos e registrados até o momento em que estes produtos são gerados. A ordem de grandeza desta proximidade temporal é função de cada problema. Especificamente para o problema de previsão, a disponibilidade de dados de entrada com a atualidade necessária é condição para a utilidade das previsões geradas;
- d) **disponibilidade:** os resultados de um modelo operacional devem estar disponíveis no momento em que são necessários. Modelos operacionais são subsistemas de um sistema maior e o requisito de disponibilidade está associado com o sincronismo entre os diversos subsistemas. O resultado de um modelo operacional tem vida útil, que se extingue com a sua indisponibilidade no momento necessário;
- e) **confiabilidade:** os resultados do modelo operacional devem representar com fidelidade o sistema real, de modo a que possam ser incorporados ao sistema maior, do qual o modelo é parte. Especificamente para o problema de previsão, o conceito de confiabilidade está associado ao de probabilidade, já que não existe modelo hidrológico perfeito. Assim, um resultado é mais confiável que outro se apresenta uma maior probabilidade de ocorrência ou uma menor variância.

Estes requisitos aparecem em algumas recomendações práticas encontradas na literatura. Como exemplo, temos:

- a) WMO (1975): a seleção de modelos operacionais deve levar em conta “a habilidade do modelo ser convenientemente atualizado com base nas condições hidrometeorológicas correntes” (requisito de atualidade e confiabilidade);

b) O'CONNEL (1980): modelos operacionais devem ter como características:

- ser adaptativos, no sentido de que devem atualizar convenientemente seus parâmetros e previsões em tempo atual com a disponibilidade de novos dados (requisito de atualidade e confiabilidade);
- ser capazes de suprir medidas do erro associado com suas previsões (requisito de confiabilidade);
- ser capazes de operar com séries truncadas de dados (requisito de disponibilidade).

Uma das formas de atender aos requisitos de atualidade e confiabilidade é dotar os modelos de alguma capacidade de adaptação a situações cambiantes. Pela sua importância, este recurso será discutido separadamente.

2.3.5.1 Adaptabilidade em modelos operacionais

Entre as características recomendadas para os modelos operacionais encontra-se a de adaptabilidade, que consiste na capacidade de um modelo em reconhecer explicitamente, em tempo de operação, os desvios entre seus resultados e os resultados observados no sistema real em período imediatamente anterior e atuar no sentido de reduzir os desvios de resultados futuros, através de um processo atualização de elementos do modelo. Utilizando os conceitos da Teoria de Sistemas, a característica de adaptabilidade corresponde a um mecanismo de retroalimentação (“feedback”) do sistema. Sua importância pode ser avaliada pelos resultados obtidos pelo estudo patrocinado pela WMO (1975), onde não ficou demonstrada a superioridade dos resultados de um modelo complexo sobre os de um modelo simples, mas dotado de

procedimentos de atualização.

Os procedimentos de atualização, em tempo de operação, de elementos de modelos operacionais são denominados, na literatura, de “procedimentos de atualização em tempo real” (WMO, 1992; BEVEN, 2001). No entanto, com a grande difusão do uso de sistema de supervisão e controle para as mais diversas finalidades, o conceito de tempo real passou a ser associado a sistemas que apresentam uma alta frequência de interação com a realidade, ou seja, cujas entradas, processamento e saídas ocorrem em intervalos de tempo muito pequenos, inferiores ao segundo. Como dificilmente este tipo de interação ocorre em modelos hidrológicos, utilizaremos para eles a denominação alternativa de “procedimentos de atualização em tempo atual”. Estes procedimentos já fazem parte de modelos operacionais de longa data, havendo sido referenciados em trabalhos tão antigos quanto WMO (1975).

Os procedimentos de atualização em tempo atual atuam no sentido de incorporar os desvios observados em resultados passados aos resultados futuros do modelo. Para isto, têm que levar em conta as possíveis fontes destes desvios, identificadas em WMO (1992) como:

- a) **variáveis de entrada:** modelos hidrológicos operacionais utilizam como entrada variáveis medidas ou estimadas (precipitação média em área, evapotranspiração potencial média em área, temperatura média do ar, etc.). Tanto as variáveis medidas como as estimadas podem conter erros, que provocam desvios nos resultados dos modelos;
- b) **modelo:** os modelos hidrológicos operacionais de interesse deste estudo são modelos matemáticos de comportamento, que consistem em um conjunto de equações que envolvem dados, parâmetros e variáveis de estado. O conjunto de equações geralmente representa o sistema real apenas aproximadamente, situação que resulta na presença de erros nos resultados;

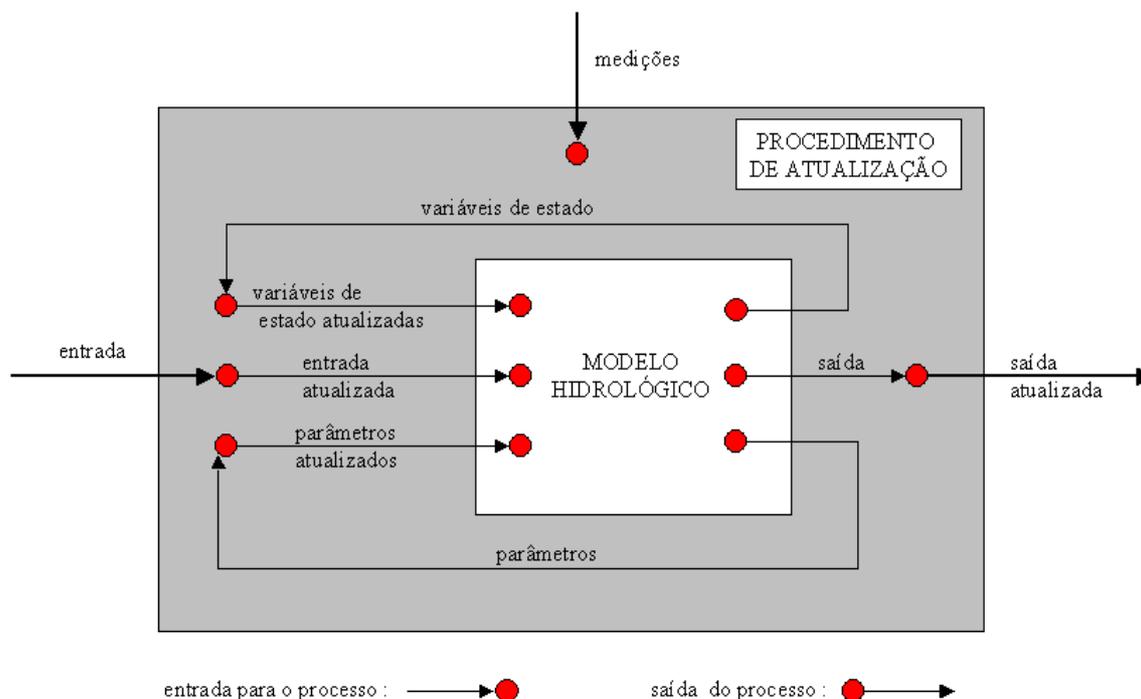
- c) **parâmetros:** os parâmetros, obtidos na etapa de calibração em função de amostras de dados da bacia, podem apresentar erros devidos à amostra utilizada ou a mudanças de comportamento na bacia ao longo do tempo, quando os parâmetros definidos anteriormente perdem sua validade;
- d) **variável de estado:** a variável de estado, que representa a história do sistema, contém a integração, no tempo, de todos os erros associados ao equacionamento, parâmetros e entradas;
- e) **variáveis de saída:** resultado dos modelos hidrológicos operacionais, é, via de regra, vazão ou nível em um ou mais locais, onde se dispõe de medição desta variável no sistema real. A medição da variável no sistema real, que servirá de referência para qualificar o resultado do modelo, também está sujeita a erros.

Todos os componentes do sistema podem apresentar erros: a entrada, o processamento (o modelo, as variáveis de estado e os parâmetros) e a saída, como consequência dos erros anteriores, bem como as medições realizadas no sistema real, que são os representantes do comportamento real do sistema. Portanto, todos eles podem ser objeto de procedimento de atualização. Este procedimento teria como função reduzir os erros dos resultados futuros do modelo em função dos erros/desvios constatados ou potenciais, podendo ainda explicitar os efeitos destes erros nos resultados futuros. Um esquema genérico de procedimentos de atualização em tempo atual é apresentado na figura 4.

Os procedimentos de atualização em tempo atual diferem em função dos elementos que são modificados em um modelo (WMO, 1992). Usualmente os procedimentos são dependentes das características dos modelos operacionais e são desenvolvidos especificamente para cada modelo, dado que cada um apresenta entradas, variáveis de estado e parâmetros distintos, gerando uma grande quantidade de

procedimentos. Como confirmação desta afirmação, o estudo da WMO (1992) apresenta a avaliação de 14 modelos operacionais, cada qual implementando um procedimento de atualização diferente.

FIGURA 4 – ESQUEMA GENÉRICO DE ATUALIZAÇÃO DE MODELOS EM TEMPO ATUAL.



FONTE: adaptado de WMO (1992)

Uma das principais dificuldades no estabelecimento de esquemas de atualização para modelos hidrológicos está na complexidade destes modelos. BEVEN (2001) constata que quanto mais complexo o modelo, mais difícil de estabelecer-se um esquema de adaptação para ele.

Os procedimentos de atualização podem ser automáticos, manuais ou mistos (atualização manual com suporte de recursos automáticos). O estudo da WMO (1992) constatou que a técnica mais utilizada à época para a atualização automática de variáveis de estado representadas por reservatórios conceituais, esquema do modelo Sacramento Modificado, era a do Filtro de Kalman.

3 O MODELO HIDROLÓGICO CHUVA-VAZÃO-PROPAGAÇÃO 3R

3.1 INTRODUÇÃO

Conforme apresentado no item 2.3.5.1, sobre adaptabilidade em modelos operacionais, os esquemas de atualização de modelos em tempo atual dependem do modelo utilizado. Assim, o estudo do procedimento de atualização que será objeto desta dissertação deve iniciar pelo conhecimento do modelo hidrológico associado.

Segundo PECK (1976), o modelo Sacramento, um dos mais conhecidos modelos chuva-vazão-propagação, foi desenvolvido por BURNASH et alli em 1973, no “National Weather Service Sacramento”, Estados Unidos, para uso no “California River Forecast Center”. O Sacramento Modificado (GEORGAKAKOS et alli, 1988) é uma versão do modelo Sacramento, formulada no espaço de estados para permitir a aplicação do estimador de estado que é o objeto deste trabalho. O modelo Sacramento Modificado com estimador de estado é componente do “National Weather Service River Forecast System” (NWSRFS), utilizado para a previsão operacional de vazões em rios nos Estados Unidos (NWS, s.d.). Os modelos Sacramento e Sacramento Modificado são descritos em maiores detalhes em KRAUSKOPF NETO (2004), que compilou uma série de documentos sobre os modelos e sobre recomendações para a sua calibração.

O modelo 3R (“rainfall-runof-routing”) foi concebido como uma simplificação do modelo Sacramento Modificado, sendo destinado à aplicação em problemas onde escalas espacial e temporal maiores (maiores bacias e maiores intervalos de simulação) reduzem a vantagem de uma representação muito detalhada de alguns processos hidrológicos (GUETTER, 2005), mantendo, no entanto, a capacidade de aplicação do estimador de estado associado ao Sacramento Modificado. O modelo 3R pode ser classificado como um modelo hidrológico determinístico, conceitual e

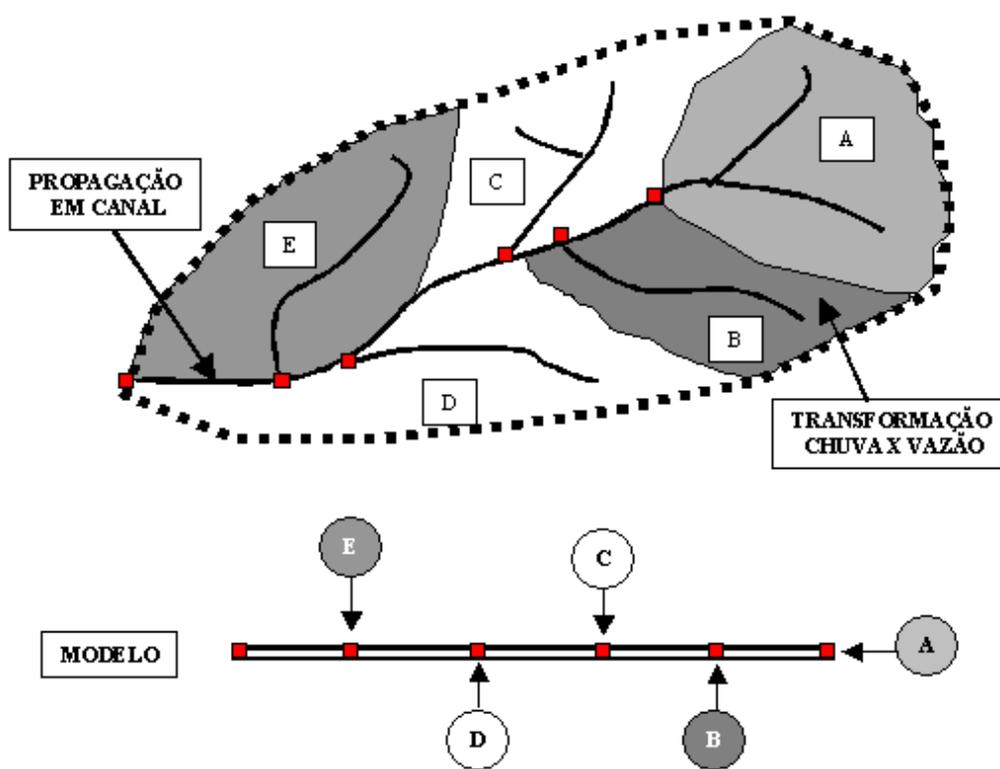
espacialmente semidistribuído. O modelo foi concebido inicialmente como concentrado, para aplicação apenas em bacias de cabeceira (GUETTER et alli, 1996), e posteriormente adaptado para funcionar como semidistribuído. Na versão semidistribuída, é definida uma rede de canais que, ao longo de seu percurso, recebem contribuições de sub-bacias hidrográficas, cada uma simulada pela mesma estrutura da representação concentrada. A figura 5 representa um exemplo de modelagem de uma bacia de forma semidistribuída. Esta alteração no modelo significaria, em tese, a inclusão de um algoritmo adicional de propagação, para representar a propagação em canal. No entanto, com o intuito de simplificar a estrutura do modelo, atribuiu-se ao componente de propagação disponível na fase bacia a responsabilidade de representar, também, a propagação em canal. Com isto, o modelo conta com apenas um esquema de propagação de vazões, compartilhado pelas fases bacia e canal, responsável tanto pela propagação das vazões geradas internamente à cada sub-bacia como pela propagação em canal das contribuições das sub-bacias de montante. Este fato está representado na figura 8, que apresenta a estrutura do modelo 3R.

A literatura nacional registra a utilização dos modelos Sacramento e Sacramento Modificado em algumas aplicações do Setor Elétrico, como em CUNHA e GUETTER (2003) e GAETE (2002a; 2002b). Existe, na literatura nacional, apenas um registro da utilização do modelo 3R, no trabalho de GUETTER (1999), embora o modelo não tenha sido identificado com este nome.

A descrição do modelo 3R a ser apresentada é baseada em GUETTER et alli (1996) e GUETTER et alli (1997), utilizando-se ainda KRAUSKOPF NETO (2004) como literatura de apoio para a referência aos modelos Sacramento e Sacramento Modificado.

Com a finalidade de tentar construir uma imagem a mais completa possível do modelo, ele será descrito segundo vários aspectos: estrutura básica, fluxos gerados, parâmetros, variáveis de estado e principais componentes do modelo conceitual. Nesta descrição, a componente de propagação será descrito na fase canal do modelo.

FIGURA 5 – MODELAGEM SEMIDISTRIBUÍDA DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA.



FONTE: HP (2002)

3.2 TRADUÇÃO DE TERMOS ASSOCIADOS AO MODELO

Em função da grande disponibilidade de literatura a respeito dos modelos Sacramento e Sacramento Modificado, algumas relações que o modelo 3R guarda com aqueles modelos serão apresentadas, como forma de facilitar o seu entendimento. Dado que a grande maioria da bibliografia a respeito dos modelos encontra-se em inglês, que as versões computacionais do modelo mantêm nomes em inglês para as variáveis de estado e parâmetros e que a nomenclatura adotada nos modelos conflita com a atualmente utilizada para descrever alguns fenômenos hidrológicos, optou-se, neste trabalho, por:

- a) traduzir os termos associados aos componentes dos modelos para o português, tentando aproximá-los, o mais possível, à nomenclatura atualmente utilizada, em português, para os fenômenos hidrológicos;
- b) utilizar, no texto, os nomes dos componentes em português, para facilitar o entendimento das descrições do modelo;
- c) manter as referências a nomes de parâmetros e variáveis em inglês, conforme são encontrados na literatura e são referenciados na aplicação do modelo.

Com a finalidade de permitir uma fácil associação entre o termo utilizado em português e sua referência em inglês, apresenta-se a seguir uma relação com a tradução adotada dos termos em inglês.

- a) fase bacia: “land phase”;
- b) fase canal: “channel phase”;
- c) camada inferior do solo: “lower zone”;
- d) camada superior do solo: “upper zone”;
- e) canal: “channel”;
- f) escoamento de base: “base flow”;
- g) escoamento direto: “direct runoff”;
- h) escoamento do subsolo: “groundwater flow”;
- i) escoamento subsuperficial: “interflow”;
- j) escoamento superficial: “surface runoff”;
- k) evaporação: “evaporation”;
- l) evapotranspiração: “evapotranspiration”;

- m) percolação: “percolation”;
- n) perda de base: “subsurface discharge”;
- o) sub-bacia: “segment”;
- p) transpiração: “transpiration”.

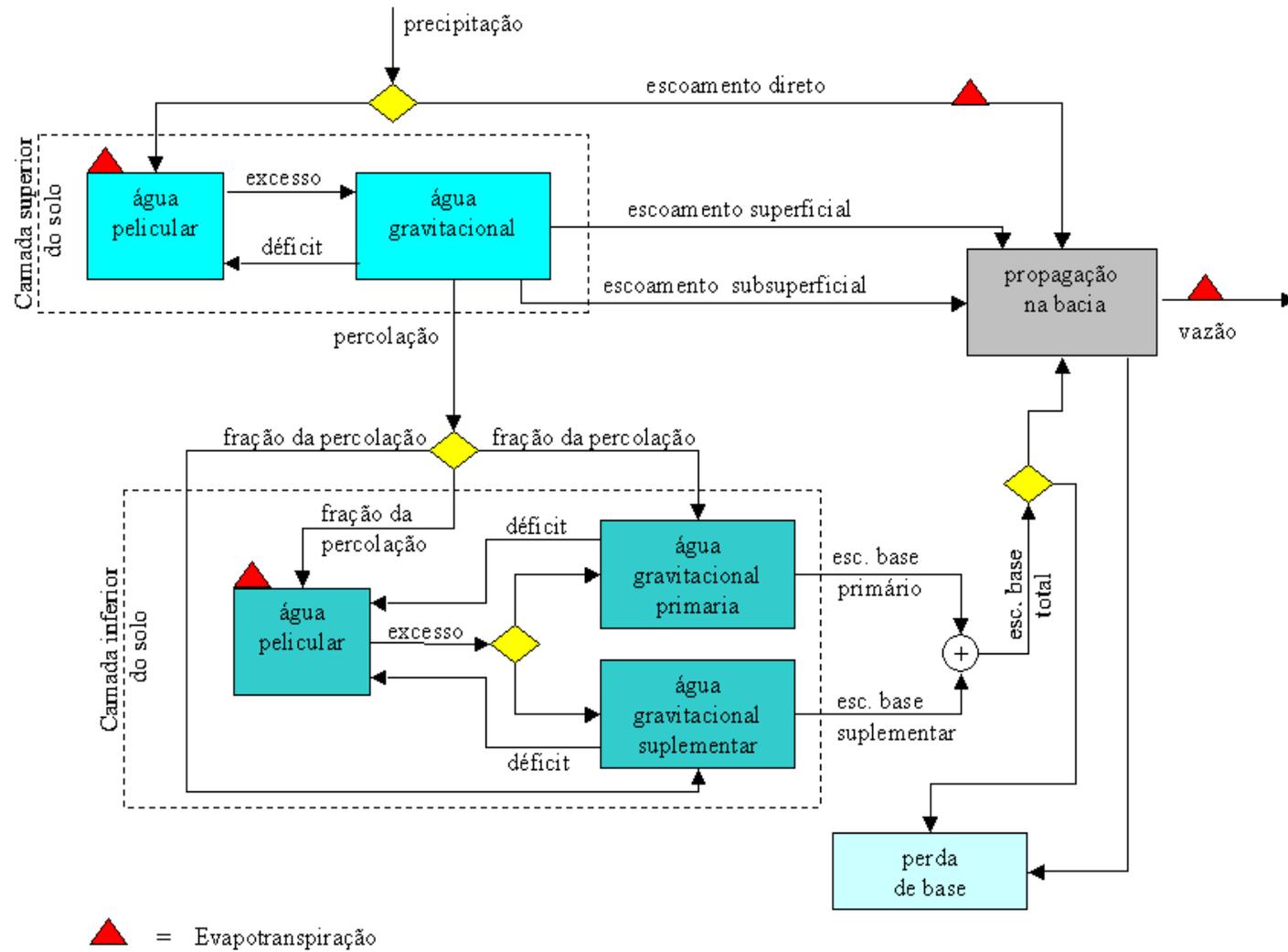
3.3 DESCRIÇÃO DA FASE BACIA

3.3.1 Estrutura da Fase Bacia

A estrutura básica da fase bacia dos modelos Sacramento e Sacramento Modificado, cujo procedimento para cálculo de balanço de água no solo está esquematizado nas figuras 6 e 7, consiste na representação do solo em duas camadas, a superior e inferior, cada qual composta por diversos reservatórios não-lineares, responsáveis pela geração dos fluxos representados nos modelos. Os fluxos provenientes da fase bacia sofrem um processo de propagação (translação e amortecimento) internamente à bacia antes de atingir as calhas dos rios, quando passariam para a fase canal dos modelos (não representada nas figuras 6 e 7), sofrendo aí nova propagação, agora em canal. Ou seja, os modelos Sacramento e Sacramento Modificado implementam duas propagações de seus fluxos: uma na fase bacia e outra na fase canal.

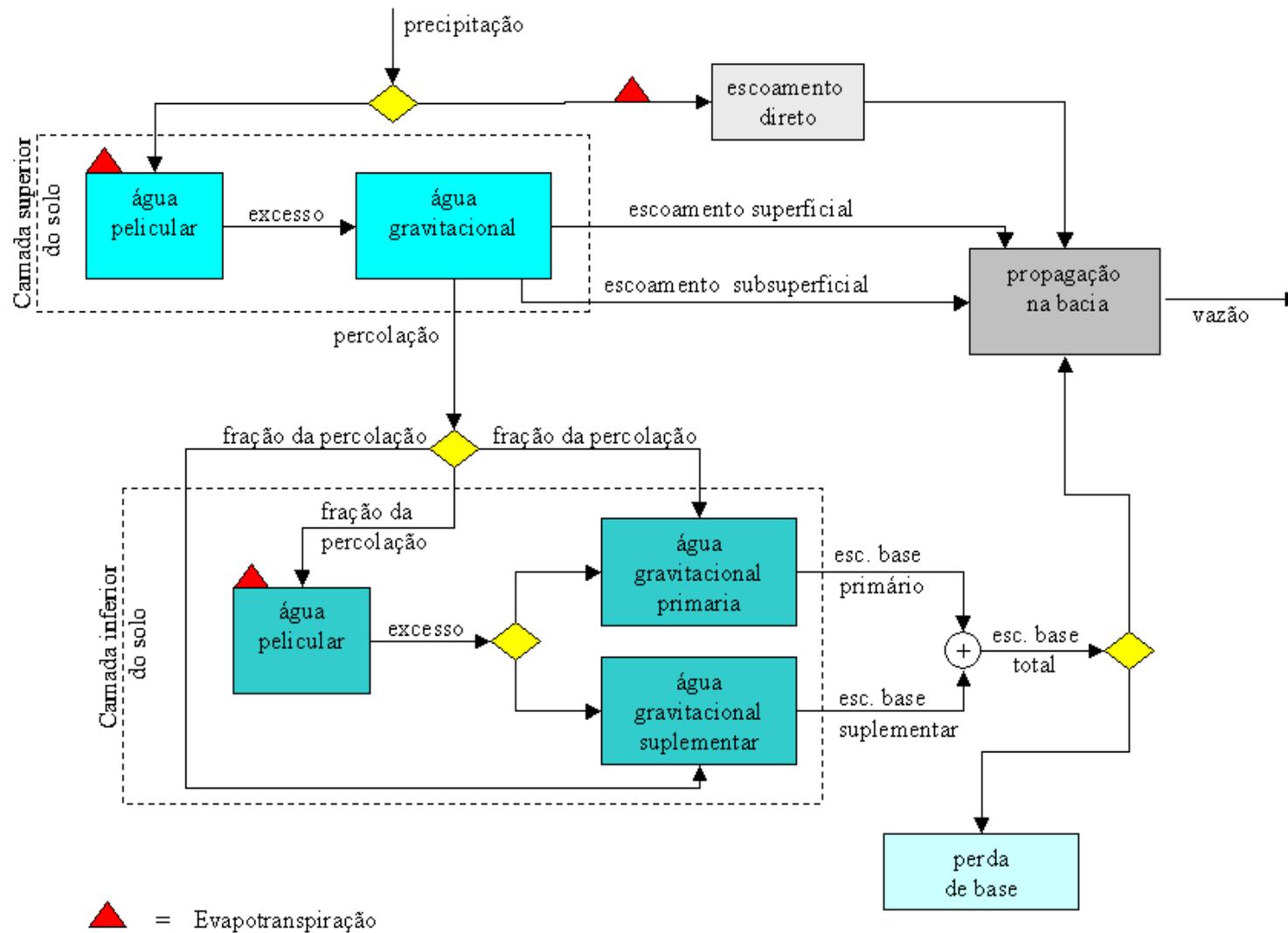
As grandes simplificações em estrutura do modelo 3R em relação aos modelos Sacramento consistem na representação de cada camada de solo por um único reservatório não-linear e na utilização de uma única cascata de reservatórios não-lineares para representar tanto o processo de propagação dos fluxos na fase bacia como a propagação em canal. Estas alterações simplificam sobremaneira a formulação do modelo, mas, por outro lado, diminuem sua capacidade de representação. A estrutura do modelo 3R é apresentada na figura 8.

FIGURA 6 – ESTRUTURA DA FASE BACIA DO MODELO SACRAMENTO.



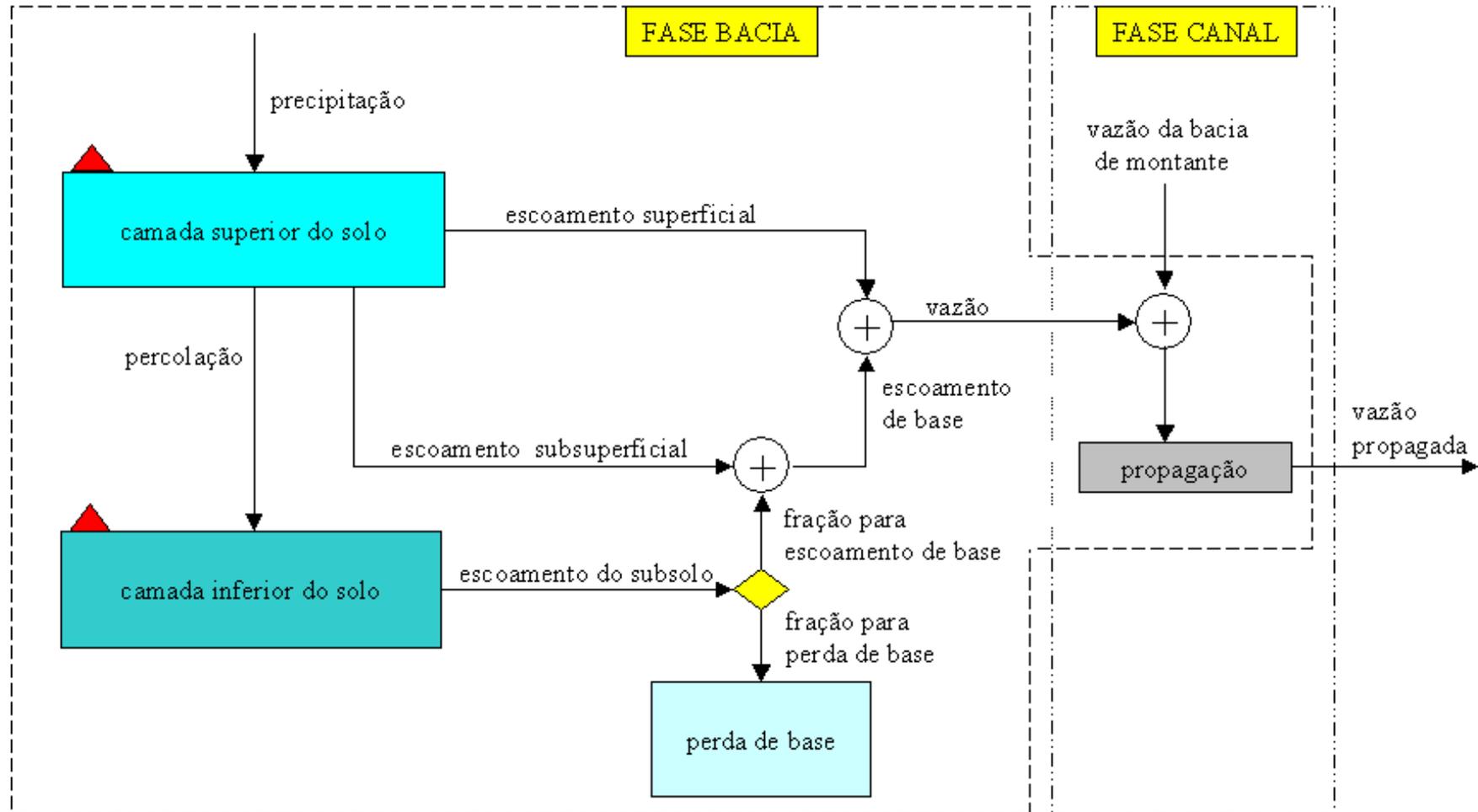
FONTE: adaptado de HP (2002) e PECK (1976)

FIGURA 7 – ESTRUTURA DA FASE BACIA DO MODELO SACRAMENTO MODIFICADO.



FONTE: adaptado de GEORGAKAKOS (1988)

FIGURA 8 – ESTRUTURA DO MODELO 3R.



▲ = Evapotranspiração

A camada superior do solo representa os fenômenos de balanço de água que ocorrem na primeira capa do terreno, incluindo o da interceptação ou abstração inicial. Tenta reproduzir os processos mais dinâmicos da bacia (os de menor tempo de resposta). No modelo 3R, esta camada é modelada por um reservatório não-linear, que denominaremos de reservatório da camada superior de solo, que é responsável pela separação do volume de água que entra no sistema nos volumes que produzirão o escoamento superficial, escoamento subsuperficial, percolação e uma parcela da evapotranspiração. Este reservatório é alimentado pela precipitação e deplecionado pelos fluxos anteriormente citados.

A camada inferior representa o armazenamento subterrâneo e a maior parcela da umidade presente no solo, modelando os fenômenos de variação mais lenta e maior duração no processo hidrológico. Esta camada é representada por um reservatório não-linear, o reservatório da camada inferior do solo, alimentado pela percolação proveniente do reservatório da camada superior e gerando, como fluxos de saída, o escoamento do subsolo e uma parcela da evapotranspiração.

Conforme apresentado anteriormente, a propagação dos fluxos do modelo é de responsabilidade de um único componente, constituído por uma cascata de reservatórios não-lineares, que recebe as contribuições dos fluxos da fase bacia (superficial, subsuperficial e de base) e das sub-bacias de montante e gera a vazão propagada na exutória da sub-bacia.

3.3.2 Variáveis de Estado da Fase Bacia

Constituem variáveis de estado da fase bacia do modelo 3R:

a) associada à camada superior de solo:

- X_1 : armazenamento no reservatório da camada superior de solo, em mm;

b) associada à camada inferior de solo:

- X_2 : armazenamento no reservatório da camada inferior de solo, em mm.

Para efeito de referência e comparação com modelos conhecidos, a tabela 1 apresenta a relação de todas as variáveis de estado do modelo 3R e dos modelos Sacramento e Sacramento Modificado, para as fases bacia e canal. Para informações sobre as variáveis de estado dos modelos Sacramento e Sacramento Modificado, ver KRAUSKOPF NETO (2004).

TABELA 1 – RELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS DE ESTADO - MODELOS SACRAMENTO, SACRAMENTO MODIFICADO E 3R.

	DESCRIÇÃO DA VARIÁVEL DE ESTADO	SIGLA NO MODELO		
		Sacramento	Modificado	3R
CAMADA SUPERIOR	Armazenamento do reservatório de água pelicular	<i>UZTWC</i>	x_1	X_1
	Armazenamento do reservatório de água gravitacional	<i>UZFWC</i>	x_2	
	Área impermeável variável em situação de solo saturado	-----	x_6	-----
CAMADA INFERIOR	Armazenamento do reservatório de água pelicular	<i>LZTWC</i>	x_3	X_2
	Armazenamento do reservatório primário de água gravitacional	<i>LZFPC</i>	x_4	
	Armazenamento do reservatório suplementar de água gravitacional	<i>LZFSC</i>	x_5	
BACIA/ CANAL	Armazenamento no reservatório i da cascata	depende da versão	S_i	S_i

3.3.3 Fluxos da Fase Bacia

Os fluxos da fase bacia do modelo 3R são definidos por unidade de área da sub-bacia, sendo apresentados, assim, como alturas de lâmina de água em mm. Em termos de fluxos de entrada e saída, cada sub-bacia apresenta:

- a) uma entrada: a precipitação média sobre a sub-bacia constitui a única entrada de cada sub-bacia;
- b) três saídas: a água presente em uma sub-bacia pode deixá-la:
 - escoando pela exutória;
 - através de evapotranspiração de água do solo;
 - através da perda de base, mecanismo adicional de perda que contabiliza fluxos para depósitos de solo profundos ou fluxos para fora da bacia que não passam pela exutória.

Os principais fluxos definidos na fase bacia do modelo podem ser assim descritos:

- a) precipitação: único fluxo de entrada para o balanço de água no solo (fase bacia). Para simulações em regiões sujeitas à presença de neve, este fluxo deve incluir as variações negativas (retenção em forma de neve) e positivas (liberação na forma de degelo) no volume precipitado;
- b) o volume precipitado é desagregado nos seguintes fluxos na camada superior do solo:
 - escoamento superficial: consiste na parcela da precipitação que não infiltra no solo ou que retorna, em algum ponto da bacia, à superfície e por ela escoar até atingir o canal. No modelo 3R, é função do grau de armazenamento do reservatório da camada superior do solo;
 - percolação: consiste no fluxo da camada superior do solo para a inferior. A percolação é definida pelo estado de armazenamento nas camadas superior e inferior de solo, com o volume de água armazenado na camada inferior definindo a demanda de percolação e

o da camada superior definindo a disponibilidade de atendimento da demanda;

- escoamento subsuperficial: uma proporção fixa do volume do reservatório de água gravitacional gera este fluxo;
- evapotranspiração: uma parcela da evapotranspiração potencial é atendida pelo reservatório da camada superior do solo. A parcela é definida em função do grau de armazenamento deste reservatório;

c) o volume de água percolado alimenta o reservatório inferior do solo, que gera os seguintes fluxos:

- escoamento do subsolo: representa a depleção do reservatório inferior de solo que se realiza com fluxo na forma líquida. Este fluxo é desmembrado em duas parcelas:
 - . fração para escoamento de base: parcela do escoamento de subsolo que contribui para a vazão na exutória da bacia;
 - . fração para perda de base: parcela do escoamento de subsolo retida em camadas profundas ou que deixa a bacia sem passar pela exutória;
- transpiração: parcela da evapotranspiração potencial não atendida pelo reservatório da camada superior do solo que é atendida pelo reservatório da camada inferior do solo;

d) a agregação do escoamento subsuperficial com a fração para escoamento de base do escoamento do subsolo gera o escoamento de base;

e) a soma dos escoamentos superficial e de base gera a vazão produzida pela bacia, que constitui o aporte à calha do rio. A propagação destes escoamentos gera a vazão propagada, que será transferida para o tramo de rio representado na próxima sub-bacia.

3.3.4 Modelo Conceitual da Fase Bacia

O modelo conceitual, no sentido apresentado no item 2.3.4.1, da fase bacia do modelo chuva-vazão-propagação 3R é apresentado como um conjunto de equações diferenciais ordinárias, o que o torna independente de um intervalo de tempo. O modelo é apresentado como equações que representam as taxas de variação no tempo de cada variável de estado. Isto significa que o modelo é representado no espaço de estados. As variáveis de estado e fluxos são funções do tempo, o que será considerado implícito nas equações apresentadas abaixo. As variáveis de estado e fluxos associados a um instante t são definidos em função dos estado do instante $t-1$. As equações de estado do modelo 3R são:

- **Variação de armazenamento do reservatório da camada superior do solo:**

$$\frac{dX_1}{dt} = PREC - SR - PR - ET_1 - INT \quad (2)$$

onde:

X_1 - armazenamento do reservatório da camada superior do solo, em mm;

t - tempo;

$PREC$ - precipitação, em mm/dia;

SR - escoamento superficial, em mm/dia;

PR - percolação do reservatório da camada de solo superior para o da camada inferior, em mm/dia;

ET_1 - evapotranspiração na camada superior do solo, em mm/dia;

INT - escoamento subsuperficial, em mm/dia.

A variável de estado X_1 está sujeita à seguinte restrição:

$$0 \leq X_1 \leq X_1^0 \quad (3)$$

onde:

X_1^0 - capacidade máxima de armazenamento da camada superior do solo, em mm.

– **Variação de armazenamento do reservatório da camada inferior do solo:**

$$\frac{dX_2}{dt} = PR - ET_2 - GW \quad (4)$$

onde:

X_2 - armazenamento do reservatório da camada inferior do solo, em mm;

t - tempo;

PR - percolação do reservatório da camada de solo superior para o da camada inferior, em mm/dia;

ET_2 - transpiração na camada inferior do solo, em mm/dia;

GW - escoamento do subsolo, em mm/dia.

A variável de estado X_2 está sujeita à seguinte restrição:

$$0 \leq X_2 \leq X_2^0 \quad (5)$$

onde:

X_2^0 - capacidade máxima de armazenamento da camada inferior do solo, em mm.

Os fluxos que compõem as equações (2) e (4) são definidos pelas relações apresentadas a seguir:

– **Escoamento superficial:**

$$SR = PREC \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right)^{m_1} \quad (6)$$

onde:

SR - escoamento superficial, em mm/dia;

$PREC$ - precipitação, em mm/dia;

X_1 - armazenamento do reservatório da camada superior do solo, em mm;

X_1^0 - capacidade do reservatório da camada superior do solo, em mm;

m_1 - expoente da equação do escoamento superficial, adimensional.

– **Percolação:**

$$PR = C_{FRG} C_2 X_2^0 \left[1 + C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2} \right] \frac{X_1}{X_1^0} \quad (7)$$

onde:

PR - percolação do reservatório da camada de solo superior para o da camada inferior, em mm/dia;

C_{FRG} - coeficiente de solo congelado, adimensional;

C_2 - taxa de drenagem do reservatório da camada inferior do solo, em fração do armazenamento por dia;

C_3 - define a máxima percolação possível como uma fração de aumento da demanda mínima de percolação ($C_2 X_2^0$), adimensional;

X_2 - armazenamento do reservatório da camada inferior do solo, em mm;

X_2^0 - capacidade do reservatório da camada inferior do solo, em mm;

m_2 - expoente da equação de percolação, adimensional;

X_1 - armazenamento do reservatório da camada superior do solo, em mm;

X_1^0 - capacidade do reservatório da camada superior do solo, em mm;
 m_1 - expoente da equação do escoamento superficial, adimensional.

– **Evapotranspiração:**

$$ET_1 = PET \frac{X_1}{X_1^0} \quad (8)$$

onde:

ET_1 - evapotranspiração na camada superior do solo, em mm/dia;

PET - evapotranspiração potencial, em mm/dia;

X_1 - armazenamento do reservatório da camada superior do solo, em mm;

X_1^0 - capacidade do reservatório da camada superior do solo, em mm.

– **Escoamento subsuperficial:**

$$INT = C_{FRG} C_1 X_1 \quad (9)$$

onde:

INT - escoamento subsuperficial, em mm/dia;

C_1 - taxa de drenagem lateral do reservatório da camada superior do solo, em fração do armazenamento por dia;

C_{FRG} - coeficiente de solo congelado, adimensional;

X_1 - armazenamento do reservatório da camada superior do solo, em mm.

– **Transpiração:**

$$ET_2 = (PET - ET_1) \left(\frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_3} \quad (10)$$

onde:

ET_2 - transpiração na camada inferior do solo, em mm/dia;

m_3 - expoente da equação de transpiração, adimensional;

ET_1 - evapotranspiração na camada superior do solo, em mm/dia;

PET - evapotranspiração potencial, em mm/dia;

X_2 - armazenamento do reservatório da camada inferior do solo, em mm;

X_2^0 - capacidade do reservatório da camada inferior do solo, em mm.

– **Escoamento do subsolo:**

$$GW = C_2 X_2 \quad (11)$$

onde:

GW - escoamento do subsolo, em mm/dia;

C_2 - taxa de drenagem do reservatório da camada inferior do solo, em fração do armazenamento por dia;

X_2 - armazenamento do reservatório da camada inferior do solo, em mm.

O fluxo de saída da bacia para o canal, denominada vazão, é obtido pela soma do escoamento superficial (equação (6)) com o escoamento de base:

$$uc = SR + BF \quad (12)$$

onde:

uc - vazão de contribuição da sub-bacia para o canal, em mm/dia;

SR - escoamento superficial, em mm/dia;

BF - escoamento de base, em mm/dia.

O escoamento de base é definido pela seguinte relação:

$$BF = \frac{1}{1 + \mu} GW + INT \quad (13)$$

onde:

BF - escoamento de base, em mm/dia;

μ - define a fração do escoamento de base que compõe a perda de base, adimensional;

GW - escoamento do subsolo, em mm/dia;

INT - escoamento subsuperficial, em mm/dia.

3.4 DESCRIÇÃO DA FASE CANAL

A contribuição da sub-bacia sendo modelada (escoamentos superficial e subsuperficial e parte do escoamento do subsolo), resultante do balanço de água no solo, é somada com as contribuições das bacias de montante e alimentam um canal, onde o volume de água sofre um processo de propagação, isto é, é distribuído no tempo e no espaço. Esta distribuição é feita por uma cascata de reservatórios não-lineares, que, segundo GEORGAKAKOS et alli (1988), foi proposto por MEIN et alli (1974) e formulado para o espaço de estados por GEORGAKAKOS e BRÁS (1980, 1982). O resultado da propagação das contribuições da sub-bacia e de montante para o canal gera o fluxo identificado neste trabalho como vazão propagada. A fase canal do modelo 3R está identificada na figura 8.

Na formulação proposta, cada trecho de canal associado a uma sub-bacia é dividido em uma série de tramos, cada um sendo representado pela seguinte relação, com a dependência temporal implícita:

$$V_i = \beta S_i^m \quad (14)$$

onde:

V_i - descarga do tramo i do trecho de canal, em mm/dia;

S_i - armazenamento do tramo i do trecho de canal, em mm;

β - parâmetro do modelo de propagação, comum a todos os tramos do trecho, em dia⁻¹;

m - parâmetro do modelo de propagação, comum a todos os tramos do trecho, adimensional.

Esta formulação leva ao estabelecimento de uma relação cota-vazão unívoca para o trecho, indicativo de um modelo de propagação do tipo onda cinemática. O modelo de onda cinemática é derivado das equações de Saint Vénant (TUCCI, 1998), equações (15) e (16), que representam a conservação de massa e de quantidade de movimento do sistema, respectivamente.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (15)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA(S_0 - S_f) \quad (16)$$

onde:

A – área da seção transversal do canal;

Q – vazão;

t – tempo;

x – distância, no sentido do fluxo;

g – aceleração da gravidade;

y – profundidade da lâmina d'água;

S_0 – declividade do fundo do canal;

S_f – declividade da linha de atrito.

O modelo de propagação de onda cinemática é obtido das equações de Saint Vénant, ignorando-se os efeitos de inércia e pressão na equação (16), de conservação de quantidade de movimento, resultando na seguinte equação simplificada:

$$S_0 = S_f \quad (17)$$

Substituindo S_f pela expressão da equação de Chezy, obtém-se:

$$Q = CA\sqrt{RS_0} \quad (18)$$

onde:

C – coeficiente de Chezy;

R – raio hidráulico.

A equação (18) estabelece uma relação biunívoca entre a vazão e a área da seção, condição equivalente à equação (14), que define uma relação biunívoca da vazão com o volume armazenado no tramo de rio. Esta categoria de modelo é mais recomendada para segmentos de rio com alguma declividade, característica de rios de cabeceira.

Assumindo que todo o volume do aporte ao tramo de canal entra à montante de uma cascata de n_r tramos, representados como reservatórios não-lineares, e aplicando a equação de conservação de massa a cada um destes reservatórios, temos as equações descritivas da fase canal no espaço de estados:

$$\frac{dS_1}{dt} = uc \frac{A_{inc}}{A_{tot}} + q_0 \frac{86,4}{A_{tot}} - \beta(S_1)^m \quad (19)$$

$$\frac{dS_i}{dt} = \beta(S_{i-1})^m - \beta(S_i)^m, \text{ com } i = 2, \dots, n_r \quad (20)$$

onde:

S_j : armazenamento do tramo j do trecho de canal, em mm;

t - tempo;

uc - vazão de contribuição da sub-bacia para o canal, em mm/dia;

q_0 - contribuição das sub-bacia de montante para o canal, em m^3/s ;

A_{inc} - área da bacia incremental (sub-bacia sendo modelada), em km^2 ;

A_{tot} - área total da bacia na exutória da sub-bacia sendo modelada, em km^2 ;

β - parâmetro do modelo de propagação, comum a todos os tramos do trecho, em dia^{-1} ;

m - parâmetro do modelo de propagação, comum a todos os tramos do trecho, adimensional.

As variáveis de estado associadas à fase canal são os valores S_i dos armazenamentos dos reservatórios não-lineares que representam os tramos, que tem a unidade mm.

3.5 MODELO CONCEITUAL COMPLETO

O modelo conceitual do modelo chuva-vazão-propagação 3R para uma sub-bacia consiste no conjunto de $n_r + 2$ equações diferenciais não-lineares de primeira ordem, com n_r sendo o número de tramos (reservatórios) da fase canal, composto, em sua forma sintética, pelas equações 2, 4, 19 e 20, transcritas abaixo:

$$\frac{dX_1}{dt} = PREC - SR - PR - ET_1 - INT \quad (2)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = PR - ET_2 - GW \quad (4)$$

$$\frac{dS_1}{dt} = uc \frac{A_{inc}}{A_{tot}} + q_0 \frac{86,4}{A_{tot}} - \beta(S_1)^m \quad (19)$$

$$\frac{dS_i}{dt} = \beta(S_{i-1})^m - \beta(S_i)^m, \text{ com } i = 2, \dots, n_r \quad (20)$$

Substituindo as expressões apresentadas anteriormente para os componentes das equações de estado acima, obtém-se a formulação detalhada do modelo conceitual no espaço de estados, apresentada nas equações 21 a 24:

$$\begin{aligned} \frac{dX_1}{dt} = & PREC - PREC \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right)^{m_1} - C_{FRG} C_2 X_2^0 \left[1 + C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2} \right] \frac{X_1}{X_1^0} - \\ & - PET \frac{X_1}{X_1^0} - C_{FRG} C_1 X_1 \end{aligned} \quad (21)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = C_{FRG} C_2 X_2^0 \left[1 + C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2} \right] \frac{X_1}{X_1^0} - PET \left(1 - \frac{X_1}{X_1^0} \right) \left(\frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_3} - C_2 X_2 \quad (22)$$

$$\frac{dS_1}{dt} = \left[\frac{1}{1 + \mu} C_2 X_2 + C_{FRG} C_1 X_1 + PREC \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right)^{m_1} \right] \frac{A_{inc}}{A_{tot}} + q_0 \frac{86,4}{A_{tot}} - \beta(S_1)^m \quad (23)$$

$$\frac{dS_i}{dt} = \beta(S_{i-1})^m - \beta(S_i)^m, \text{ com } i = 2, \dots, n_r \quad (24)$$

3.6 PARÂMETROS DO MODELO

Neste item, os parâmetros do modelo são agrupados e apresentados em maior detalhe, com o objetivo de facilitar a referência e o entendimento dos mesmos.

O modelo 3R tem como parâmetros:

a) **associados à camada superior do solo:**

- X_1^0 : capacidade do reservatório da camada superior do solo, em mm. Este parâmetro responde também por toda a abstração inicial presente na bacia, como a que ocorre em depressões, na vegetação e em lagos naturais ou artificiais;
- m_1 : expoente da equação do escoamento superficial, adimensional. Define o escoamento no canal como uma função não-linear da fração utilizada do reservatório da camada superior do solo;
- C_1 : taxa de drenagem do reservatório da camada superior do solo, responsável pela geração do escoamento subsuperficial, em fração do armazenamento por dia;
- C_{FRG} : coeficiente de solo congelado, adimensional. Coeficiente que leva em conta os efeitos do congelamento do solo no processo de produção da vazão;

b) **associados à percolação:**

- C_3 : máxima fração de aumento da demanda mínima de percolação, em fração de volume por dia. Este parâmetro representa o maior valor possível da demanda de percolação, que ocorre em condições de camada inferior de solo seca, apresentado como fração de acréscimo em relação à demanda percolação mínima possível, que ocorre com a camada inferior do solo saturada;

- m_2 : expoente da equação de percolação, adimensional. Define uma relação potencial entre a fração de aumento da demanda mínima, que varia desde zero até C_3 , e a fração não ocupada da camada inferior do solo;

c) **associados à camada inferior do solo:**

- X_2^0 : capacidade do reservatório da camada inferior do solo, em mm;
- C_2 : taxa de drenagem do reservatório da camada inferior do solo, em fração do armazenamento por dia. Esta drenagem gera o escoamento de base;
- m_3 : expoente que define a transpiração da camada inferior do solo como função não-linear da fração ocupada do reservatório da camada inferior do solo, adimensional;
- μ : define a fração do escoamento de base que compõe a perda de base;

d) **associados ao escoamento em canal:** os parâmetros associados à propagação em canal são:

- β : coeficiente de drenagem de cada tramo do trecho de canal, em fração de armazenamento por dia;
- m : expoente que define a relação não-linear entre o armazenamento em cada tramo do trecho de canal e sua descarga, adimensional.

Para efeito de referência e comparação com modelos conhecidos, a tabela 2 apresenta a relação entre os parâmetros do modelo 3R e dos modelos Sacramento e Sacramento Modificado. Para informações sobre os parâmetros dos modelos Sacramento e Sacramento Modificado, ver KRAUSKOPF NETO (2004).

TABELA 2 – RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS - MODELOS SACRAMENTO, SACRAMENTO MODIFICADO E 3R.

	DESCRIÇÃO DO PARÂMETRO	SIGLA NO MODELO		
		Sacramento	Modificado	3R
ESCOAMENTO DIRETO	Fração da área impermeável permanente da bacia	<i>PCTIM</i>	β_2	-----
	Fração máxima da área impermeável variável da bacia	<i>ADIMP</i>	β_1	-----
	Fração da bacia coberta por espelhos de água ou alagadiça	<i>SARVA</i>	-----	-----
CAMADA SUPERIOR DO SOLO	Capacidade do reservatório de água pelicular	<i>UZTWM</i>	x_1^0	X_1^0
	Capacidade do reservatório de água gravitacional	<i>UZFWM</i>	x_2^0	
	Expoente do reservatório não-linear de água pelicular	-----	m_1	-----
	Expoente do reservatório não-linear de água gravitacional	-----	m_2	m_1
	Taxa de drenagem do reservatório de água gravitacional	<i>UZK</i>	d_u	C_1
	Coefficiente de solo congelado	-----	-----	C_{FRG}
PERCOLAÇÃO	Máxima fração de aumento da demanda de percolação mínima	<i>ZPERC</i>	ε	C_3
	Expoente da equação de percolação	<i>REXP</i>	θ	m_2
CAMADA INFERIOR DO SOLO	Capacidade do reservatório de água pelicular	<i>LZTWM</i>	x_3^0	X_2^0
	Capacidade do reservatório primário de água gravitacional	<i>LZFPM</i>	x_4^0	
	Capacidade do reservatório suplementar de água gravitacional	<i>LZFSM</i>	x_5^0	
	Expoente de transpiração do reservatório não-linear	-----	m_3	m_3
	Taxa de drenagem do reservatório primário de água gravitacional	<i>LZPK</i>	d_1'	C_2
	Taxa de drenagem do reservatório suplementar de água gravitacional	<i>LZSK</i>	d_1''	
	Fração da percolação destinada aos reservatórios de água gravitacional	<i>PFREE</i>	P_f	-----
	Capacidade de água gravitacional indisponível para transpiração	<i>RSERV</i>	-----	-----
	Fração do escoamento de base total que compõe a perda de base	<i>SIDE</i>	μ	μ
	Taxa fixa do aporte total ao canal que compõe a perda de base	<i>SSOUT</i>	-----	-----
ESCOAMENTO SUPERFICIAL	Fator linear da função de propagação em canal	-----	β	β
	Expoente da função de propagação em canal	-----	m	m

3.7 INTEGRAÇÃO NUMÉRICA DAS EQUAÇÕES DE ESTADO

A operação do modelo 3R consiste na integração das equações de estado, apresentadas em sua forma sintética e completa no item 3.5, para cada passo de tempo de simulação ou previsão, dados os valores das variáveis de estado no instante inicial e as entradas do modelo no intervalo. Para o modelo 3R, o método de integração empregado é o de Runge-Kutta de 4ª Ordem (PRESS et alli, 1986), o mais popular entre os métodos de Runge-Kutta e que apresenta um erro de truncamento equivalente ao do truncamento da expansão da função em Série de Taylor no termo de 4ª ordem. Para permitir acompanhar o comportamento não-linear das variáveis de estado da bacia ao longo do tempo, principalmente em períodos de precipitação, cada passo de execução do modelo (um dia) é obtido através da integração de um número variável de intervalos. O número de intervalos de integração para cada passo de execução é definido como o maior valor entre um volume máximo de precipitação a integrar em cada intervalo e um número mínimo de intervalos de integração a utilizar em cada passo.

4 O MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO PARA CALIBRAÇÃO

Para o refinamento dos valores dos parâmetros de calibração, foi implementado no modelo 3R o processo de otimização denominado Método de *Descida do Simplex* no Espaço Multidimensional (“downhill simplex method in multidimensions”), também conhecido como Algoritmo Ameba, pela forma como se desenvolve no espaço.

Este método foi desenvolvido por NELDER e MEAD e apresentado no “Computer Journal” em 1965 (PRESS et alli, 1989). Consiste em um método simples, de busca direta, que utiliza somente avaliações da função a otimizar, e não de suas derivadas, para obtenção de resultados. Não é um método eficiente do ponto de vista do número de avaliações da função (e, portanto, do tempo de processamento), mas pode ser o método de preferência, por sua robustez, quando se busca uma rápida implementação em um problema de baixo custo computacional (PRESS et alli, 1989). Em função do pequeno número de parâmetros a ser definido para o modelo 3R, este método pôde ser aplicado.

Dado que no espaço multidimensional não é possível garantir o isolamento de extremos, mínimos ou máximos, da função, os métodos para estes espaços partem de uma estimativa inicial do valor extremo e buscam, explorando o espaço, um caminho que leve ao extremo desejado. O Método de *Descida do Simplex* no Espaço Multidimensional baseia-se na definição inicial e sucessivas avaliações e manipulações de um subespaço do espaço amostral, subespaço este definido por um simplex. Simplex é uma figura geométrica que consiste numa casca de volume não nulo composta, em um espaço N-dimensional, por N+1 pontos (vértices) e todos os segmentos que interconectam estes vértices, as faces que geram, etc. Como exemplos, em duas dimensões um simplex é um triângulo e em três um tetraedro. O método utiliza apenas simplex que delimitam um subespaço finito do espaço N-dimensional, denominados

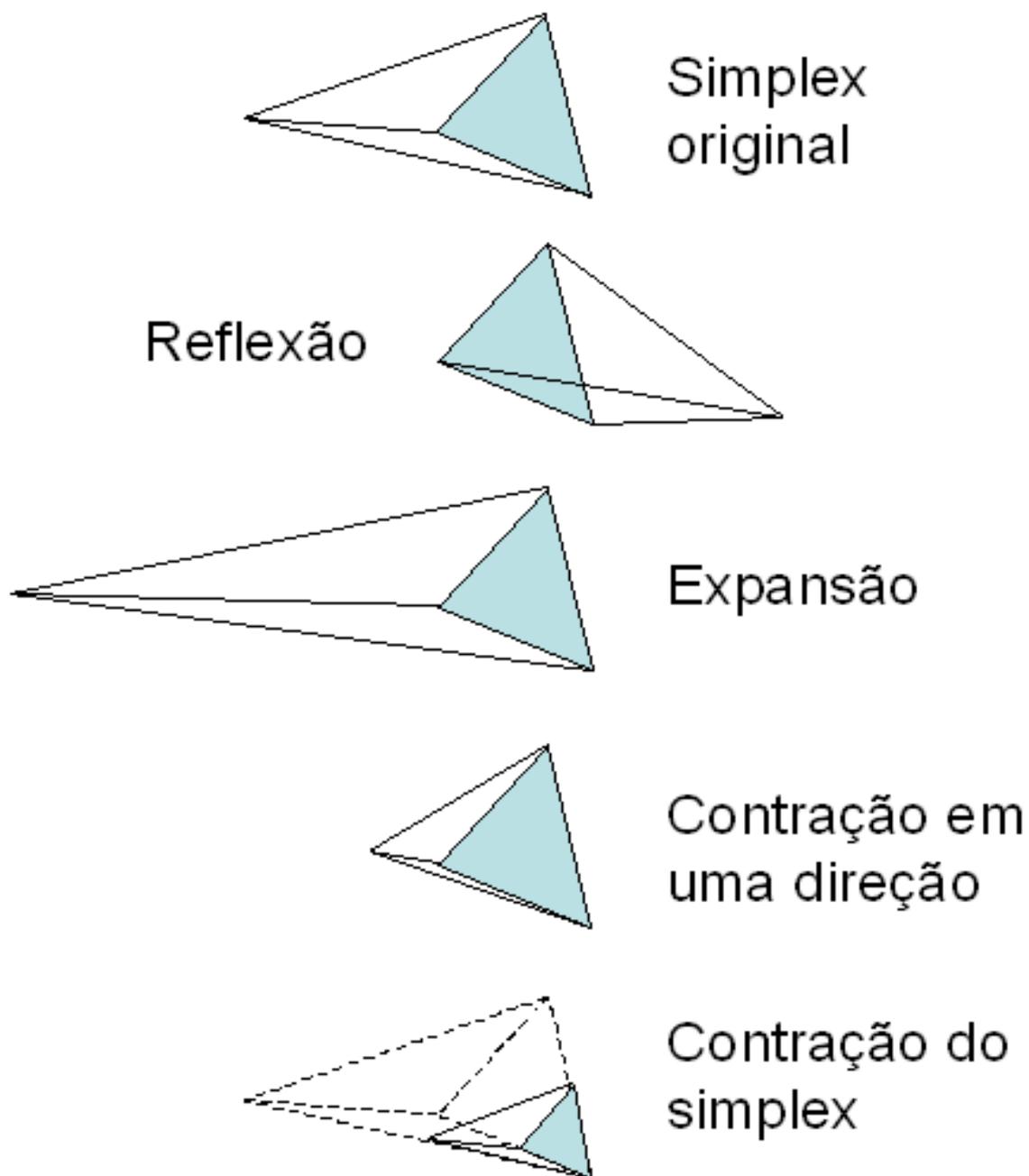
simplex não-degenerados. O método *Simplex* de Programação Linear não guarda nenhuma outra relação com o método em foco que não seja o de utilizar, também, o conceito geométrico do *simplex*.

Uma vez definido, para o espaço de pesquisa, um simplex inicial, o método se desenvolve pela exploração deste espaço e conseqüente movimentação do simplex, movimentação que é feita através da utilização criteriosa de quatro operações que podem ser aplicadas ao simplex:

- a) **reflexão**: consiste na mudança de um vértice do simplex, com o novo ponto estabelecido pela inversão de sentido do vetor definido por este vértice e pelo centro geométrico do conjunto dos N vértices restantes do simplex, com origem no centro geométrico;
- b) **expansão**: consiste na mudança de um vértice do simplex pelo aumento do tamanho do vetor definido por este vértice e pelo centro geométrico do conjunto de N vértices restantes, com origem no centro geométrico;
- c) **contração em uma direção**: consiste na mudança de um vértice do simplex pela diminuição do comprimento do vetor definido por este vértice e o centro geométrico do conjunto de N vértices restantes, com origem no centro geométrico;
- d) **contração do simplex**: ou contração em N dimensões, consiste na redução do simplex em direção a um vértice do mesmo, pela redução dos comprimentos dos N vetores com origem neste vértice, definidos pelos N vértices restantes do simplex.

As operações acima para o espaço tridimensional encontram-se ilustradas na figura 9.

FIGURA 9 – OPERAÇÕES SOBRE O SIMPLEX UTILIZADAS NO ALGORITMO AMEBA.



FONTE: PRESS et alli (1989)

O Algoritmo Ameba aplicado à minimização pode ser assim descrito, em português estruturado:

Defina um simplex inicial no espaço N-dimensional;

Repita até atingir a precisão desejada ou o número permitido de iterações;

Identifique os dois vértices do simplex de maior valor da função a minimizar e o de menor valor;

Realize a reflexão do vértice de maior valor da função, definindo um candidato a novo vértice;

Aceite como vértice do simplex o de menor valor da função entre o vértice original e o candidato;

Se o valor da função no vértice resultante do simplex for menor que o do vértice de menor valor do simplex

Então

Expanda o simplex no vértice resultante, definindo novo candidato a vértice;

Mantenha como vértice do simplex o de menor valor da função entre o vértice resultante e o candidato;

Senão

Se o valor da função no vértice resultante for maior que segundo maior valor de todos os vértices

Então

Contraia o simplex em uma direção no vértice resultante, obtendo novo candidato a vértice

Se o valor da função no candidato a vértice for menor que no vértice resultante

Então

Aceite o candidato a vértice como novo vértice do simplex;

Senão

Contraia o simplex na direção do vértice de menor valor da função;

Senão

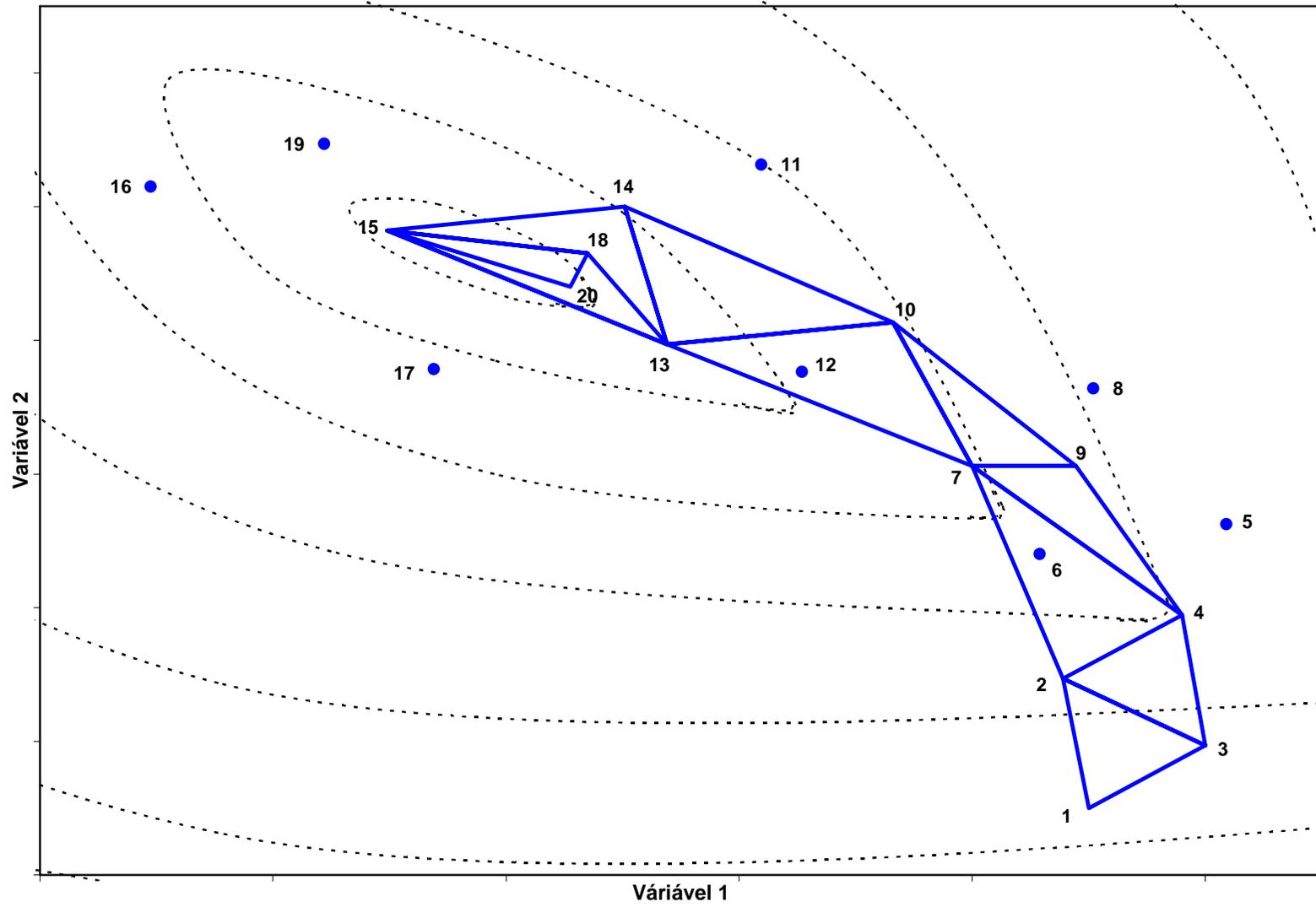
Aceite o vértice resultante como novo vértice do simplex.

O algoritmo para maximização pode ser obtido diretamente desta descrição, apenas buscando manter no *simplex* os vértices com maiores valores da função a maximizar.

O desenvolvimento deste algoritmo para um exemplo simples é apresentado graficamente na figura 10, onde as linhas pontilhadas representam o lugar geométrico dos pontos de igual valor da função a otimizar, cada ponto numerado é um vértice tentado pelo método e as linhas contínuas representam os *simplex* considerados.

A função objetivo utilizada no modelo 3R consiste na soma ponderada de dois termos, compostos pela divisão do desvio padrão dos resíduos (diferença entre o valor simulado e observado) dividido pelo desvio padrão dos dados observados e pelo valor absoluto da divisão da média dos resíduos pela média dos dados observados.

FIGURA 10 – EXEMPLO DE DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO AMEBA.



FONTE: adaptado de OSU (2003)

5 O ESTIMADOR DE ESTADO

Modelos hidrológicos operacionais são, em geral, modelos matemáticos utilizados para prever o comportamento de rios e lagos para algum horizonte de tempo no futuro. Esta previsão, por sua natureza, está sujeita a erros provenientes de diversas fontes. As fontes de erros mais relevantes são:

- a) o modelo conceitual: a definição do modelo conceitual (problema de identificação) implica na necessidade de reconhecer todos os componentes que são relevantes na bacia em estudo e apresentar, para cada um deles, uma formulação matemática, em geral aproximada. A falha em identificar algum componente relevante para a bacia, a identificação de componente não presente, a definição de relações matemáticas inadequadas para representação dos mesmos ou a natureza aproximada destas relações são fontes de erros de previsão;
- b) os valores adotados para os parâmetros do modelo: modelos hidrológicos procuram reproduzir o comportamento de um sistema extremamente complexo e de difícil representação matemática, levando, via de regra, a representações não-lineares. Os parâmetros que definem o comportamento específico de uma bacia são, geralmente, obtidos por calibração, seja manual ou automática, tendo como base uma amostra limitada do comportamento da bacia. Assim, a identificação dos parâmetros está sujeita a incertezas decorrentes de variações amostrais. Adicionalmente, a complexidade e não-linearidade da representação matemática do problema levam à possibilidade da existência de múltiplos conjuntos de parâmetros para representar a mesma amostra, sendo a identificação do conjunto mais representativo uma questão não trivial;

- c) os valores de entrada do modelo: dois tipos de séries temporais de entrada são fornecidos para um modelo chuva-vazão de previsão: medições, por algum método, de fenômenos já ocorridos, representando a história das entradas do sistema, e previsões do comportamento destes fenômenos, representando o comportamento esperado das entradas no horizonte de previsão. Os valores medidos apresentam três tipos de erro: dois estão sempre presentes e dizem respeito à exatidão do processo de medição e ao grau de representatividade do valor medido (grau em que o dado medido representa o fenômeno de interesse) e o terceiro, eventual, diz respeito a erros de medição (leitura incorreta, medidores descalibrados, etc.). Os valores previstos estão sujeitos à incerteza da previsão realizada, que varia grandemente com a variável a ser prevista e com o horizonte de previsão. Assim, embora representando o mesmo fenômeno, os valores medidos e previstos têm comportamento distinto, como geradores de erros de previsão hidrológica;
- d) os valores medidos de saída do modelo: os modelos hidrológicos apresentam como resultado valores associados a um fenômeno mensurável, em geral nível ou vazão de rios ou reservatórios. A comparação entre os valores medidos e os gerados pelo modelo representa o erro do modelo na previsão do comportamento do sistema. Ocorre que as medições de vazões/níveis também estão sujeitas a erros, conforme descrito no item anterior. Assim, os erros de previsão são, também, função dos erros de medição de variáveis no protótipo.

Com a integração no tempo dos erros de todas estas fontes, resultam desvios no valor das variáveis de estado do modelo hidrológico, variáveis estas que representam a história do sistema. Este desvio está presente em cada instante de tempo de previsão. Desta forma, faz sentido, em um modelo operacional, tentar eliminar os

erros presentes nos valores das variáveis de estado antes de realizar-se uma previsão: isto equivale a tentar eliminar dos valores previstos os erros acumulados pelo modelo na representação do passado. As previsões ainda seriam afetadas por possíveis erros de todas as fontes identificadas, mas com efeitos limitados ao horizonte de previsão. Os erros de previsão seriam, desta forma, minimizados, no sentido que incorporariam apenas os erros inevitáveis, relativos ao horizonte de previsão.

Todas as fontes de erros são dependentes do modelo adotado: o modelo conceitual, os valores dos parâmetros, as entradas e as saídas são específicos para cada modelo. Desta forma, as próprias variáveis de estado e os erros nelas acumulados também são função do modelo específico adotado. Isto significa que, se procedimentos ou algoritmos de atualização destinados a eliminar os erros presentes nas variáveis de estado tiverem como base as fontes destes erros, eles serão específicos para o modelo sendo tratado. O procedimento de atualização de variáveis de estado recebe a denominação de estimador de estado. Exemplos de estimadores de estado usualmente utilizados são o Filtro de Kalman e o Filtro de Kalman Estendido (GELB, 1974; WELCH e BISHOP, 2002). O estimador de estado em estudo constitui um aperfeiçoamento de aplicação do Filtro de Kalman Estendido.

5.1 O FILTRO DE KALMAN

O objetivo do Filtro de Kalman, desenvolvido para aplicação em sistemas lineares, é o de estimar o estado real de um sistema a partir de uma estimativa inicial do estado, obtida da aplicação do modelo do sistema, e de medições, no protótipo, de fenômenos que estejam relacionados com o estado real do sistema. Assim, a obtenção da estimativa do estado real de um sistema pelo Filtro de Kalman pressupõe duas etapas:

- a) propagação: dado o estado do sistema no instante t_0 , aplica-se o modelo do sistema para obtenção da estimativa inicial (“a priori”) do estado no instante t_1 , adiante no tempo;
- b) atualização: obtidas as medições no protótipo, para o instante t_1 , das grandezas associadas ao estado real do sistema, as mesmas são utilizadas para corrigir a estimativa ”a priori” do estado no instante t_1 , gerando a estimativa atualizada (estimativa “a posteriori”).

O Filtro de Kalman é responsável pelo processo de atualização das variáveis de estado. No entanto, para que seja possível sua aplicação, o modelo do sistema tem que estar formulado de maneira particular, no espaço de estados, o que condiciona também a etapa de propagação.

O Filtro de Kalman trata o problema de estimação de estado de maneira consistente, no sentido que estima o estado real do sistema a partir de observações do protótipo, mas respeitando a história do sistema (concentrada na estimativa inicial do estado produzida pelo modelo), as relações que definem o comportamento deste sistema (modelo) e as incertezas associadas a todos os seus componentes. Utiliza abordagem Bayesiana (supõe conhecidas as distribuições de probabilidade do estado e das medições realizadas no protótipo e a distribuição condicional de probabilidades do estado dadas as medições) e busca a estimativa de mínima variância para o estado atualizado do sistema que, para sistemas lineares, é o valor esperado do estado, condicionado às medições. Uma das grandes vantagens do Filtro de Kalman é sua recursividade: todo o histórico do sistema está presente na estimativa do estado do sistema para o instante atual, mas de maneira implícita, através da estimativa “a priori” do estado do sistema.

Para que seja possível a aplicação do Filtro de Kalman, é necessário dispor-se, para cada instante, da matriz de covariâncias dos erros dos estados. Em função disto, esta matriz também sofre as etapas de propagação e atualização.

A seguir será feita uma breve apresentação do Filtro de Kalman, como forma introduzir o Filtro de Kalman Estendido, versão não-linear do Filtro, no qual se baseia o estimador de estado em estudo neste trabalho. A descrição do Filtro de Kalman aqui apresentada foi baseada em GELB (1974).

O Filtro de Kalman Contínuo pode ser descrito conforme segue. Tem-se um sistema linear, formulado no espaço de estados como:

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{F}_1(t) \mathbf{x}(t) + \mathbf{G}_1(t) \mathbf{w}(t) + \mathbf{L}_1(t) \mathbf{u}(t) \quad (25)$$

onde:

t - tempo;

$\mathbf{x}(t)$ - vetor de estado, composto pelas variáveis de estado do modelo no instante t ;

$\mathbf{w}(t)$ - vetor de entradas aleatórias do sistema, ruído branco denominado função forçante aleatória, no instante t ;

$\mathbf{u}(t)$ - vetor de entrada determinística do sistema, também denominada controle determinístico, no instante t ;

$\mathbf{F}_1(t)$ - matriz de coeficientes do estado na equação vetorial do sistema linear no instante t ;

$\mathbf{G}_1(t)$ - matriz de coeficientes da forçante aleatória na equação vetorial do sistema linear no instante t ;

$\mathbf{L}_1(t)$ - matrizes de coeficientes do controle determinístico na equação vetorial do sistema linear no instante t .

Para este sistema, é possível associar, em cada instante de tempo, grandezas mensuráveis no protótipo ao estado do sistema, através de um modelo de medição assim descrito:

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{H}_1(t) \mathbf{x}(t) + \mathbf{v}(t) \quad (26)$$

onde:

$\mathbf{z}(t)$ - vetor de valores de grandezas mensuráveis no protótipo no instante t ;

$\mathbf{H}_1(t)$ - matriz de coeficientes que relaciona as medidas do protótipo com seu estado, para sistema linear, no instante t ;

$\mathbf{v}(t)$ - vetor de ruídos brancos associados à medição no instante t .

Considera-se, adicionalmente, as seguintes hipóteses:

a) $\mathbf{w}(t)$ é normalmente distribuído, com média zero e matriz de covariâncias $\mathbf{Q}(t)$;

b) $\mathbf{v}(t)$ é normalmente distribuído, com média zero e matriz de covariâncias $\mathbf{R}(t)$;

c) $\mathbf{w}(t)$ e $\mathbf{v}(t)$ são estatisticamente independentes;

d) $\mathbf{R}^{-1}(t)$ existe.

Dadas as equações e hipóteses acima e a constatação de que não se dispõe dos valores verdadeiros do estado, é possível derivar as equações que propagam o estado e a matriz de covariâncias dos erros do estado e os atualizam utilizando a informação disponível nas medições de grandezas no protótipo, \mathbf{z} . Isto é alcançado buscando-se a estimativa do estado que minimiza a variância dos erros do estado. Aplicando-se o critério da mínima variância, obtêm-se as equações de propagação e atualização do estado (equação (27)) e da matriz de covariância dos erros do estado (equação (28)), que definem o Filtro de Kalman Contínuo:

$$\frac{d\hat{\mathbf{x}}(t)}{dt} = \mathbf{F}_1(t) \hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}(t) [\mathbf{z}(t) - \mathbf{H}_1(t) \hat{\mathbf{x}}(t)] \quad (27)$$

$$\frac{d\mathbf{P}(t)}{dt} = \mathbf{F}_1(t) \mathbf{P}(t) + \mathbf{P}(t) \mathbf{F}_1^T(t) + \mathbf{G}(t) \mathbf{Q}(t) \mathbf{G}^T(t) - \mathbf{K}(t) \mathbf{R}(t) \mathbf{K}^T(t) \quad (28)$$

onde:

$\hat{\mathbf{x}}(t)$ - estimativa do estado do sistema no instante t ;

$\mathbf{P}(t)$ - matriz de covariância do erro do estado no instante t ;

$\mathbf{K}(t)$ - matriz de ganho de Kalman no instante t , definida como:

$$\mathbf{K}(t) = \mathbf{P}(t) \mathbf{H}_1(t) \mathbf{R}^{-1}(t) \quad (29)$$

Em resumo, o Filtro de Kalman busca a utilização das informações disponíveis na história do sistema, presente em seu estado previsto, e em medições de grandezas do protótipo para estimar o estado atual real deste sistema. Ou seja, tenta transferir informações das medições disponíveis para o estado do sistema.

5.2 O ESTIMADOR DE ESTADO PROPOSTO

O estimador de estado para o modelo 3R foi desenvolvido originalmente por RAJARAM e GEORGAKAKOS (1987, apud SPERFSLAGE e GEORGAKAKOS, 1996) para uso com o modelo Sacramento Modificado e será apresentado conforme GEORGAKAKOS et alli (1988). O estimador é baseado no Filtro de Kalman Estendido, aplicação do Filtro de Kalman para sistemas não-lineares (GELB, 1974).

O método, seguindo a linha do Filtro de Kalman, consiste na obtenção de estimativa do estado do sistema e da matriz de covariância dos erros do estado para um instante no futuro (propagação) e na atualização, tanto do estado como da matriz de covariâncias, a partir de medições de fenômenos do protótipo que podem ser associados ao estado do sistema (atualização). Na sequência serão descritos, em seções separadas para facilidade de entendimento, as equações de propagação e de atualização.

5.2.1 Equações de Propagação de Estado e Covariância

O modelo chuva-vazão-propagação 3R, apresentado em detalhes no item 3, pode ser representado, na forma vetorial no espaço de estados e explicitando os componentes de erro presentes no sistema (modelo conceitual, representado pelo estado, entradas e parâmetros), como:

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t); \boldsymbol{\theta}) + \mathbf{w}(t) \quad (30)$$

onde:

t - tempo;

\mathbf{f} - função vetorial não-linear. Representa o conjunto de equações que define a variação de estado do modelo;

$\mathbf{x}(t)$ - vetor de estado, com as variáveis de estado do modelo no instante t . No caso do modelo 3R, as variáveis de estado representam os armazenamentos dos reservatórios que compõem o modelo;

$\mathbf{u}(t)$ - vetor de entrada determinística do modelo, denominado controle determinístico, no instante t ;

$\boldsymbol{\theta}$ - vetor de parâmetros do modelo 3R;

$\mathbf{w}(t)$ - vetor de ruídos brancos associados ao modelo, denominado forçante aleatória, no instante t .

Os vetores \mathbf{f} , $d\mathbf{x}/dt$ e \mathbf{w} têm dimensões $n_r + 2$, relativas às duas variáveis de estado do modelo de balanço de água no solo e aos n_r reservatórios não-lineares que representam o canal. A integração da equação (30) entre os instantes t_{k-1} e t_k fornece o estado do modelo no instante t_k .

O comportamento ao longo do tempo da matriz de covariância dos erros do estado pode ser representado por:

$$\frac{d\mathbf{P}(t)}{dt} = \mathbf{F}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t); \boldsymbol{\theta}) \mathbf{P}(t) + \mathbf{P}(t) \mathbf{F}^T(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t); \boldsymbol{\theta}) + \mathbf{Q}(t) \quad (31)$$

onde:

$\mathbf{P}(t)$ - matriz de covariância dos erros do estado do sistema no instante t ;

\mathbf{F} - matriz de sensibilidade aos estados no instante t , formada pela derivada da parcial de cada uma das equações que formam a função que descreve o comportamento dos estados (equação (30)) em relação a cada um dos elementos do vetor de estados \mathbf{x} . Cada elemento de \mathbf{F} é definido conforme equação (37);

$\mathbf{Q}(t)$ - matriz de covariâncias da forçante aleatória do sistema (vetor \mathbf{w} na equação (30)) no instante t .

A integração da equação (31) entre os instantes t_{k-1} e t_k fornece a matriz de covariâncias dos erros do modelo no instante t_k .

As equações (30) e (31) são a representação perfeita do sistema, no sentido de que se supõe conhecidos seu modelo \mathbf{f} , estado \mathbf{x} , entradas \mathbf{u} , parâmetros $\boldsymbol{\theta}$ e propriedades estatísticas do ruído branco \mathbf{w} , que neste contexto representa a componente puramente aleatória do sistema. Ocorre que esta condição de conhecimento perfeito não existe na prática, onde se tem acesso apenas a aproximações de valores e comportamentos, aproximações estas que são o que se tem disponível para a representação do sistema. Uma dificuldade adicional para aplicação da equação (31) é a definição da matriz de covariâncias de \mathbf{w} , \mathbf{Q} , pois existe pouca informação “a priori” sobre ela. Para tratar estes problemas, RAJARAM e GEORGAKAKOS (1987, apud GEORGAKAKOS et alli, 1988) propuseram a abordagem apresentada a seguir.

Dado que não é possível a representação perfeita de um sistema, o vetor \mathbf{w} da equação (30) representa, na prática, os erros nos resultados do modelo, que podem ser atribuídos, além da componente puramente estocástica do sistema, a erros na estrutura

do modelo (representação dos componentes), nas variáveis de estado, nas entradas e nos parâmetros. Erros no modelo conceitual são difíceis de quantificar, pela inexistência de um “resultado verdadeiro” para comparação. Por isto, usualmente, quando se faz o tratamento dos erros de previsão, o modelo conceitual é considerado verdadeiro. Os erros no modelo são considerados indiretamente, normalmente atribuindo-se aos valores dos parâmetros a responsabilidade de responder pelo efeito destes erros nos resultados, o que também foi feito nesta abordagem (GEORGAKAKOS et alli, 1988). Os erros nas variáveis de estado serão tratados pelas equações de atualização (Filtro de Kalman Estendido), processo que, se eficiente, produzirá desvios pouco significativos em relação aos valores reais. Em função disto, o método proposto supõe que \mathbf{w} está associado, além de à componente puramente estocástica, aos erros devidos aos dados de entrada e à estimativa dos parâmetros do modelo. Esta suposição é representada pela seguinte equação:

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{w}(t) \quad (32)$$

O símbolo “^” indica estimativa ou valor aproximado. Os erros nas variáveis de estado, nas variáveis de entrada e nos parâmetros do modelo podem ser representados, respectivamente, como:

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t) \quad (33)$$

$$\mathbf{e}_u(t) = \mathbf{u}(t) - \hat{\mathbf{u}}(t) \quad (34)$$

$$\mathbf{e}_\theta(t) = \boldsymbol{\theta}(t) - \hat{\boldsymbol{\theta}} \quad (35)$$

Observe-se que a estimativa dos parâmetros do modelo é considerada independente do tempo, refletindo a amostra limitada que geralmente se

dispõe para sua definição e também o reconhecimento da escala de tempo em que as relações que regem a transformação chuva-vazão em uma bacia devem variar. Por outro lado, o valor verdadeiro dos parâmetros foi considerado variável no tempo, como forma de acomodar os erros no modelo conceitual, que se refletem, na prática, na necessidade de um conjunto diferente de parâmetros para representar a bacia em cada instante.

Supondo um modelo perfeito, já que atribuímos os erros oriundos da estrutura do modelo aos parâmetros, a sua expansão em série de Taylor no entorno da melhor estimativa dos vetores de estado, entrada e parâmetros resulta:

$$\begin{aligned} \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t); \boldsymbol{\theta}(t)) = & \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{F}(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{e}(t) + \\ & + \mathbf{M}(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{e}_u(t) + \mathbf{N}(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{e}_\theta(t) \end{aligned} \quad (36)$$

Os vetores de erros foram definidos nas equações (33) a (35). As matrizes \mathbf{F} , \mathbf{M} e \mathbf{N} podem ser vistas como matrizes de sensibilidade do sistema ao estado, entradas e parâmetros, com seus elementos (i, j) definidos como:

$$\left[\mathbf{F}(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \right]_{i,j} = \frac{\partial f_i(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}})}{\partial x_j} \quad (37)$$

$$\left[\mathbf{M}(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \right]_{i,j} = \frac{\partial f_i(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}})}{\partial u_j} \quad (38)$$

$$\left[\mathbf{N}(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \right]_{i,j} = \frac{\partial f_i(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}})}{\partial \theta_j} \quad (39)$$

O lado direito da equação (36) pode ser interpretado como sendo o resultado do modelo real, obtido com as melhores estimativas das variáveis de estado, entradas e parâmetros, corrigido para os erros em cada uma destas estimativas. Dado que a correção dos erros nas variáveis de estado é equivalente à utilização, no modelo, das variáveis “verdadeiras”, a equação (36) pode ser escrita como:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t); \boldsymbol{\theta}) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{M}(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{e}_u(t) + \mathbf{N}(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{e}_\theta(t) \quad (40)$$

A comparação das equações (40) e (32) indica que, para as hipóteses formuladas, o vetor \mathbf{w} pode ser representado pelos dois últimos termos da equação (40). Assume-se, em seguida, a hipótese que os erros dos dados de entrada e dos parâmetros (equações (34) e (35)) são ruídos brancos estatisticamente independentes entre si, com média nula e covariância definida por:

$$\mathbb{E}[\mathbf{e}_u(t) \mathbf{e}_u^T(t')] = \mathbf{U}(t) \delta(t - t') \quad (41)$$

$$\mathbb{E}[\mathbf{e}_\theta(t) \mathbf{e}_\theta^T(t')] = \mathbf{W}(t) \delta(t - t') \quad (42)$$

onde:

$\mathbb{E}[\dots]$ - valor esperado;

δ - função Delta de Kronecker, que apresenta valor zero para toda a extensão do parâmetro, exceto para a origem, quando assume valor unitário;

$\mathbf{U}(t)$ – matriz de covariância dos erros das entradas no instante t ;

$\mathbf{W}(t)$ – matriz de covariância dos erros dos parâmetros no instante t .

Utilizando-se as hipóteses acima, \mathbf{Q} , matriz de covariância de \mathbf{w} , pode ser obtida diretamente como:

$$\mathbf{Q}(t) = \mathbf{M}(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{U}(t) \mathbf{M}^T(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{N}(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{W}(t) \mathbf{N}^T(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \quad (43)$$

A aplicação da equação (43) requer a especificação das matrizes de covariância dos erros das entradas, \mathbf{U} , e dos parâmetros, \mathbf{W} . Estas matrizes podem ser obtidas diretamente de procedimentos de definição estatística dos vetores \mathbf{u} e $\boldsymbol{\theta}$. No

entanto, na indisponibilidade destas estimativas, a experiência dos especialistas com a bacia em estudo pode ser utilizada para estimar apenas a diagonal principal destas matrizes (variância dos erros), deixando-se nulos os elementos fora da diagonal. Como forma de tratar eventuais desvios na especificação das matrizes \mathbf{U} e \mathbf{W} , são introduzidos dois parâmetros livres, α_u e α_p , de ponderação entre os componentes de erro da equação (43), resultando:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}(t) = & \alpha_u \mathbf{M}(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{U}(t) \mathbf{M}^T(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) + \\ & + \alpha_p \mathbf{N}(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{W}(t) \mathbf{N}^T(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \end{aligned} \quad (44)$$

Em notação simplificada, para facilitar a leitura, esta equação torna-se:

$$\mathbf{Q} = \alpha_u \mathbf{M} \mathbf{U} \mathbf{M}^T + \alpha_p \mathbf{N} \mathbf{W} \mathbf{N}^T \quad (45)$$

Para a estimativa dos parâmetros α_u e α_p , um critério a ser adotado poderia ser o de forçar a consistência entre a variância dos erros obtida pela estimativa representada pela equação (44) e a variância observada dos erros. Outra forma de obter estes parâmetros seria propondo funções objetivo, definindo o gráfico destas funções para uma determinada amplitude de variação de parâmetros e definindo, por inspeção dos gráficos, a combinação de parâmetros que resultasse no melhor conjunto de valores para as funções objetivo.

Note-se que o procedimento proposto para o modelo de erros leva em conta, de uma maneira fisicamente consistente, sua característica não-estacionária no tempo, já que, embora as matrizes de covariância das entradas e parâmetros, \mathbf{U} e \mathbf{W} , possam permanecer, por questões práticas, constantes para todos os instantes, as matrizes \mathbf{M} , e \mathbf{N} são dependentes do tempo, variando de acordo com o estado e as entradas do sistema. Esta é, na avaliação de GEORGAKAKOS et alli (1988), a principal contribuição do método proposto. Além disto, a configuração proposta confere ao estimador de estado uma grande robustez (SPERFSLAGE e GEORGAKAKOS, 1996).

A substituição das aproximações desenvolvidas anteriormente nas equações (30) e (31) e da componente aleatória \mathbf{w} por seu valor esperado na equação (30) resulta nas seguintes equações de propagação do estado e de sua matriz de covariância de erros:

$$\frac{d\hat{\mathbf{x}}(t)^-}{dt} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \quad (46)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{P}(t)^-}{dt} = & \mathbf{F}(\hat{\mathbf{x}}(t)^-, \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{P}(t)^- + \mathbf{P}(t)^- \mathbf{F}^T(\hat{\mathbf{x}}(t)^-, \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) + \\ & + \alpha_u \mathbf{M}(\hat{\mathbf{x}}(t)^-, \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{U}(t) \mathbf{M}^T(\hat{\mathbf{x}}(t)^-, \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) + \\ & + \alpha_p \mathbf{N}(\hat{\mathbf{x}}(t)^-, \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{W}(t) \mathbf{N}^T(\hat{\mathbf{x}}(t)^-, \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \end{aligned} \quad (47)$$

Estimativas “a priori” (iniciais), do estado \mathbf{x} do sistema e da matriz \mathbf{P} de covariância dos erros do estado, para o instante t_k , são obtidas por integração, no intervalo t_{k-1} a t_k , das equações (46) e (47). Nestas equações, as estimativas “a priori” são indicadas por um índice superior negativo. As equações (46) e (47) são válidas para o intervalo de integração $t_{k-1} \leq t \leq t_k$.

Em notação simplificada, para facilitar a leitura, as equações (46) e (47) ficam:

$$\frac{d\hat{\mathbf{x}}^-}{dt} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{u}}; \hat{\boldsymbol{\theta}}) \quad (48)$$

$$\frac{d\mathbf{P}^-}{dt} = \mathbf{F} \mathbf{P}^- + \mathbf{P}^- \mathbf{F}^T + \alpha_u \mathbf{M} \mathbf{U} \mathbf{M}^T + \alpha_p \mathbf{N} \mathbf{W} \mathbf{N}^T \quad (49)$$

5.2.2 Equações Atualização de Estado e Covariância

A atualização do estado e da matriz de covariância dos erros do estado é obtida através da aplicação do Filtro de Kalman Estendido, adaptação do Filtro de Kalman para funções não lineares (GELB, 1974; WELCH e BISHOP, 2002). Esta

adaptação é obtida, basicamente, pela linearização das relações envolvidas, através de expansões em série de Taylor, e a aplicação do mesmo procedimento empregado para o desenvolvimento do Filtro de Kalman para sistemas lineares.

Para a utilização do Filtro de Kalman Estendido, devem existir, para o sistema representado pela equação (30), fenômenos mensuráveis que possam ser associados ao estado do sistema. Esta relação pode ser modelada pela equação:

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{h}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t); \boldsymbol{\theta}) + \mathbf{v}(t) \quad (50)$$

onde:

\mathbf{h} - função vetorial não-linear que relaciona o estado, entradas e parâmetros do sistema com fenômenos mensuráveis no protótipo;

$\mathbf{v}(t)$ - vetor de ruídos brancos associado à medição no protótipo no instante t , com matriz de covariância $\mathbf{R}(t)$.

Considerando a disponibilidade real apenas de estimativas de estado, entradas e parâmetros e de impossibilidade de determinação de um valor específico da componente aleatória do sistema \mathbf{v} , que, por isto, é substituído pelo valor esperado da variável, temos como equação operacional de medição:

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \quad (51)$$

No caso do modelo 3R, o fenômeno mensurável é a vazão na exutória da bacia sendo modelada.

A atualização do vetor de estado para um instante t_k é baseada na estimativa “a priori” do estado e na estimativa “a priori” e medição dos fenômenos representados pela equação de medição (50) para este instante, sendo expressa pela seguinte equação:

$$\hat{\mathbf{x}}(t_k)^+ = \hat{\mathbf{x}}(t_k)^- + \mathbf{K}(\hat{\mathbf{x}}(t_k)^-, \hat{\mathbf{u}}(t_k); \hat{\boldsymbol{\theta}}) [\mathbf{z}(t_k) - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}(t_k)^-, \hat{\mathbf{u}}(t_k); \hat{\boldsymbol{\theta}})] \quad (52)$$

onde:

$\hat{\mathbf{x}}(t_k)^+$ - estimativa “a posteriori” (atualizada) do estado do sistema no instante t_k ;

\mathbf{K} - matriz de ganho de Kalman, definida como:

$$\mathbf{K}(\hat{\mathbf{x}}(t_k)^-, \hat{\mathbf{u}}(t_k); \hat{\boldsymbol{\theta}}) = \mathbf{P}(t_k)^- \mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}(t_k)^-, \hat{\mathbf{u}}(t_k); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \left[\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}(t_k)^-, \hat{\mathbf{u}}(t_k); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{P}(t_k)^- \mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}(t_k)^-, \hat{\mathbf{u}}(t_k); \hat{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{R}(t_k) \right]^{-1} \quad (53)$$

onde:

\mathbf{H} – matriz que representa a linearização da função \mathbf{h} , resultante da expansão em série de Taylor desta função, com elementos formados segundo a equação:

$$\left[\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \right]_{i,j} = \frac{\partial h_i(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}})}{\partial x_j} \quad (54)$$

A equação de atualização da matriz de covariância do desvio do estado é:

$$\mathbf{P}(t_k)^+ = \left[\mathbf{I} - \mathbf{K}(\hat{\mathbf{x}}(t_k)^-, \hat{\mathbf{u}}(t_k); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}(t_k)^-, \hat{\mathbf{u}}(t_k); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \right] \mathbf{P}(t_k)^- \left[\mathbf{I} - \mathbf{K}(\hat{\mathbf{x}}(t_k)^-, \hat{\mathbf{u}}(t_k); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}(t_k)^-, \hat{\mathbf{u}}(t_k); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \right]^T + \mathbf{K}(\hat{\mathbf{x}}(t_k)^-, \hat{\mathbf{u}}(t_k); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{R}(t_k) \mathbf{K}^T(\hat{\mathbf{x}}(t_k)^-, \hat{\mathbf{u}}(t_k); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \quad (55)$$

onde:

$\mathbf{P}(t_k)^+$ - estimativa “a posteriori” (atualizada) da matriz de covariância dos erros do estado do sistema, para o instante t_k .

Em notação simplificada, para facilitar a leitura, a equação (53), da matriz de ganho de Kalman, a equação (52), de atualização de estado, e a equação (55), de

atualização da matriz de covariância dos erros do estado, ficam:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T [\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k]^{-1} \quad (56)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k^+ = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k [\mathbf{z}_k - \mathbf{h}_k] \quad (57)$$

$$\mathbf{P}_k^+ = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \mathbf{P}_k^- [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k]^T + \mathbf{K}_k \mathbf{R}_k \mathbf{K}_k^T \quad (58)$$

5.2.3 Resumo das Equações de Propagação e Atualização

As equações de propagação e atualização do sistema serão rerepresentadas aqui, com a finalidade de facilitar a visualização das relações com que se trabalha.

Em sua forma detalhada, as equações de propagação do estado e da matriz de covariância dos erros dos estados são, respectivamente:

$$\frac{d\hat{\mathbf{x}}(t)^-}{dt} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}(t), \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \quad , t_{k-1} \leq t \leq t_k \quad (46)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{P}(t)^-}{dt} = & \mathbf{F}(\hat{\mathbf{x}}(t)^-, \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{P}(t)^- + \mathbf{P}(t)^- \mathbf{F}^T(\hat{\mathbf{x}}(t)^-, \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) + \\ & + \alpha_u \mathbf{M}(\hat{\mathbf{x}}(t)^-, \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{U}(t) \mathbf{M}^T(\hat{\mathbf{x}}(t)^-, \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) + \quad , t_{k-1} \leq t \leq t_k \quad (47) \\ & + \alpha_p \mathbf{N}(\hat{\mathbf{x}}(t)^-, \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{W}(t) \mathbf{N}^T(\hat{\mathbf{x}}(t)^-, \hat{\mathbf{u}}(t); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \end{aligned}$$

A forma detalhada das equações da matriz de ganho de Kalman, de atualização de estado e de atualização da matriz de covariância dos erros do estado é:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}(\hat{\mathbf{x}}(t_k)^-, \hat{\mathbf{u}}(t_k); \hat{\boldsymbol{\theta}}) = & \mathbf{P}(t_k)^- \mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}(t_k)^-, \hat{\mathbf{u}}(t_k); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \\ & \left[\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}(t_k)^-, \hat{\mathbf{u}}(t_k); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{P}(t_k)^- \mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}(t_k)^-, \hat{\mathbf{u}}(t_k); \hat{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{R}(t_k) \right]^{-1} \quad (53) \end{aligned}$$

$$\hat{\mathbf{x}}(t_k)^+ = \hat{\mathbf{x}}(t_k)^- + \mathbf{K}(\hat{\mathbf{x}}(t_k)^-, \hat{\mathbf{u}}(t_k); \hat{\boldsymbol{\theta}}) [\mathbf{z}(t_k) - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}(t_k)^-, \hat{\mathbf{u}}(t_k); \hat{\boldsymbol{\theta}})] \quad (52)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(t_k)^+ = & \left[\mathbf{I} - \mathbf{K}(\hat{\mathbf{x}}(t_k)^-, \hat{\mathbf{u}}(t_k); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}(t_k)^-, \hat{\mathbf{u}}(t_k); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \right] \mathbf{P}(t_k)^- \\ & \left[\mathbf{I} - \mathbf{K}(\hat{\mathbf{x}}(t_k)^-, \hat{\mathbf{u}}(t_k); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}(t_k)^-, \hat{\mathbf{u}}(t_k); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \right]^T + \\ & + \mathbf{K}(\hat{\mathbf{x}}(t_k)^-, \hat{\mathbf{u}}(t_k); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \mathbf{R}(t_k) \mathbf{K}^T(\hat{\mathbf{x}}(t_k)^-, \hat{\mathbf{u}}(t_k); \hat{\boldsymbol{\theta}}) \end{aligned} \quad (55)$$

Estas mesmas equações, em notação simplificada, tomam a forma:

$$\frac{d\hat{\mathbf{x}}^-}{dt} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{u}}; \hat{\boldsymbol{\theta}}) \quad (48)$$

$$\frac{d\mathbf{P}^-}{dt} = \mathbf{F} \mathbf{P}^- + \mathbf{P}^- \mathbf{F}^T + \alpha_u \mathbf{M} \mathbf{U} \mathbf{M}^T + \alpha_p \mathbf{N} \mathbf{W} \mathbf{N}^T \quad (49)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T \left[\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k \right]^{-1} \quad (56)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k^+ = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k \left[\mathbf{z}_k - \mathbf{h}_k \right] \quad (57)$$

$$\mathbf{P}_k^+ = \left[\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \right] \mathbf{P}_k^- \left[\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \right]^T + \mathbf{K}_k \mathbf{R}_k \mathbf{K}_k^T \quad (58)$$

5.3 OBTENÇÃO DAS MATRIZES DO ESTIMADOR DE ESTADO

5.3.1 Equações de Representação e Medição do Sistema

O modelo conceitual do modelo chuva-vazão-propagação 3R é representado pelo conjunto de $n_r + 2$ equações apresentadas em detalhes no item 3.5, equações (21) a (24). Para os desenvolvimentos subseqüentes, por facilidade de notação, estas equações serão referenciadas, respectivamente, como $f_1, f_2, f_3, f_4 \dots f_{nr+2}$.

A equação de medição do modelo (função não-linear \mathbf{h}), que dá o resultado do modelo para a vazão na exutória da bacia, é expressa por:

$$V_i = \beta S_i^m \quad (59)$$

5.3.2 Obtenção da Matriz \mathbf{F}

Para o caso do modelo 3R, a matriz \mathbf{F} é quadrada de dimensão $n_r + 2$ (com n_r sendo o número de tramos da fase canal) e resultante da derivação de cada uma das equações da representação do modelo no espaço de estados em relação às variáveis de estado. É um dos componentes da linearização do sistema para permitir a aplicação do Filtro de Kalman. Constitui medida da sensibilidade do sistema em relação às variáveis de estado. Os componentes não-nulos desta matriz são:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial X_1} = & -m_1 \frac{PREC}{X_1^0} \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right)^{m_1-1} - C_{FRG} C_2 \frac{X_2^0}{X_1^0} \left[1 + C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2} \right] - \\ & - \frac{PET}{X_1^0} - C_{FRG} C_1 \end{aligned} \quad (60)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial X_2} = m_2 C_{FRG} C_2 C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2-1} \frac{X_1}{X_1^0} \quad (61)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial X_1} = C_{FRG} C_2 \frac{X_2^0}{X_1^0} \left[1 + C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2} \right] + \frac{PET}{X_1^0} \left(\frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_3} \quad (62)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial X_2} = -m_2 C_{FRG} C_2 C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2-1} \frac{X_1}{X_1^0} - m_3 \frac{PET}{X_2^0} \left(1 - \frac{X_1}{X_1^0} \right) \left(\frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_3-1} - C_2 \quad (63)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial X_1} = \left[C_{FRG} C_1 + m_1 \frac{PREC}{X_1^0} \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right)^{m_1-1} \right] \frac{A_{inc}}{A_{tot}} \quad (64)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial X_2} = \frac{1}{1 + \mu} C_2 \frac{A_{inc}}{A_{tot}} \quad (65)$$

$$\frac{\partial f_{i+2}}{\partial S_i} = -m\beta(S_i)^{m-1}, \text{ com } i = 1, \dots, n_r \quad (66)$$

$$\frac{\partial f_{i+2}}{\partial S_{i-1}} = m\beta(S_{i-1})^{m-1}, \text{ com } i = 1, \dots, n_r \quad (67)$$

5.3.3 Obtenção da Matriz N

A matriz **N**, que para o modelo 3R tem dimensão $(n_r + 2) \times n_p$ (com n_r sendo o número de tramos da fase canal e n_p o número de parâmetros do modelo), é resultante da derivação de cada uma das equações da representação do modelo no espaço de estados em relação aos parâmetros do modelo. É um dos componentes da linearização do sistema para permitir a aplicação do Filtro de Kalman. Constitui medida da sensibilidade do sistema em relação aos parâmetros. A experiência com o estimador de estado levou à consideração dos parâmetros m e C_{FRG} como constantes para a composição da matriz **N**. Os componentes não-nulos da matriz **N** são:

$$\frac{\partial f_1}{\partial X_1^0} = m_1 \frac{PREC}{X_1^0} \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right)^{m_1} + C_{\text{FRG}} C_2 \frac{X_2^0}{X_1^0} \left[1 + C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2} \right] \frac{X_1}{X_1^0} + \frac{PET}{X_1^0} \frac{X_1}{X_1^0} \quad (68)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial X_2^0} = -C_{\text{FRG}} C_2 \left\{ 1 + C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2-1} \left[1 + (m_2 - 1) \frac{X_2}{X_2^0} \right] \right\} \frac{X_1}{X_1^0} \quad (69)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial C_1} = -C_{\text{FRG}} X_1 \quad (70)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial C_2} = -C_{\text{FRG}} X_2^0 \left[1 + C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2} \right] \frac{X_1}{X_1^0} \quad (71)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial C_3} = -C_{\text{FRG}} C_2 X_2^0 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0}\right)^{m_2} \frac{X_1}{X_1^0} \quad (72)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial m_1} = -PREC \left(\frac{X_1}{X_1^0}\right)^{m_1} \ln\left(\frac{X_1}{X_1^0}\right) \quad (73)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial m_2} = -C_{\text{FRG}} C_2 C_3 X_2^0 \frac{X_1}{X_1^0} \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0}\right)^{m_2} \ln\left(1 - \frac{X_2}{X_2^0}\right) \quad (74)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial X_1^0} = -C_{\text{FRG}} C_2 \frac{X_2^0}{X_1^0} \left[1 + C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0}\right)^{m_2}\right] \frac{X_1}{X_1^0} - \frac{PET}{X_1^0} \frac{X_1}{X_1^0} \left(\frac{X_2}{X_2^0}\right)^{m_3} \quad (75)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_2}{\partial X_2^0} = & C_{\text{FRG}} C_2 \left\{1 + C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0}\right)^{m_2-1} \left[1 + (m_2 - 1) \frac{X_2}{X_2^0}\right]\right\} \frac{X_1}{X_1^0} + \\ & + m_3 \frac{PET}{X_2^0} \left(1 - \frac{X_1}{X_1^0}\right) \left(\frac{X_2}{X_2^0}\right)^{m_3} \end{aligned} \quad (76)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial C_2} = C_{\text{FRG}} X_2^0 \left[1 + C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0}\right)^{m_2}\right] \frac{X_1}{X_1^0} - X_2 \quad (77)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial C_3} = C_{\text{FRG}} C_2 X_2^0 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0}\right)^{m_2} \frac{X_1}{X_1^0} \quad (78)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial m_2} = C_{\text{FRG}} C_2 C_3 X_2^0 \frac{X_1}{X_1^0} \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0}\right)^{m_2} \ln\left(1 - \frac{X_2}{X_2^0}\right) \quad (79)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial m_3} = -PET \left(1 - \frac{X_1}{X_1^0}\right) \left(\frac{X_2}{X_2^0}\right)^{m_3} \ln\left(\frac{X_2}{X_2^0}\right) \quad (80)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial X_1^0} = -m_1 \frac{PREC}{X_1^0} \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right)^{m_1} \frac{A_{\text{inc}}}{A_{\text{tot}}} \quad (81)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial C_1} = C_{\text{FRG}} X_1 \frac{A_{\text{inc}}}{A_{\text{tot}}} \quad (82)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial C_2} = \frac{1}{1 + \mu} X_2 \frac{A_{\text{inc}}}{A_{\text{tot}}} \quad (83)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial m_1} = PREC \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right)^{m_1} \ln \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right) \frac{A_{\text{inc}}}{A_{\text{tot}}} \quad (84)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial \mu} = \frac{1}{(1 + \mu)^2} C_2 X_2 \frac{A_{\text{inc}}}{A_{\text{tot}}} \quad (85)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial \beta} = -(S_1)^m \quad (86)$$

$$\frac{\partial f_{i+2}}{\partial \beta} = (S_{i-1})^m - (S_i)^m, \text{ com } i = 2, \dots, n_r \quad (87)$$

5.3.4 Obtenção da Matriz **M**

A matriz **M**, para o caso do modelo 3R com dimensão $(n_r + 2) \times n_e$ (com n_r sendo o número de tramos da fase canal e n_e o número de dados de entrada do modelo), é resultante da derivação de cada uma das equações da representação do modelo no espaço de estados em relação às variáveis de entrada do modelo. É um dos componentes da linearização do sistema para permitir a aplicação do Filtro de Kalman. Constitui medida da sensibilidade do sistema em relação aos dados de entrada. Os

componentes não-nulos desta matriz são:

$$\frac{\partial f_1}{\partial PREC} = 1 - \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right)^{m_1} \quad (88)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial PET} = -\frac{X_1}{X_1^0} \quad (89)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial PET} = -\left(1 - \frac{X_1}{X_1^0} \right) \left(\frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2} \quad (90)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial PREC} = \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right)^{m_1} \frac{A_{inc}}{A_{tot}} \quad (91)$$

5.3.5 Obtenção da Matriz \mathbf{H}

A matriz linha \mathbf{H} , para o caso do modelo 3R de dimensão $1 \times (n_r + 2)$ (com n_r sendo o número de reservatórios da fase canal), surge da linearização da equação não-linear de medição, \mathbf{h} . É obtida pela derivação da equação de medição em relação a cada uma das variáveis de estado. Assim, o único elemento não-nulo desta matriz é:

$$\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial S_{n_r}} = m\beta (S_{n_r})^{m-1} \quad (92)$$

5.4 MODELO DE VARIÂNCIAS DOS DADOS DE ENTRADA

Assumindo que os erros dos dados de entrada (precipitação e evapotranspiração potencial) e do dado de medição (vazão observada) compõem séries aleatórias não-estacionárias e que guardam proporcionalidade com a ordem de grandeza dos dados, GEORGAKAKOS et alli (1988) propuseram o seguinte modelo

para as variâncias destes erros:

$$\text{VAR}(p(t)) = (C_{p1}p(t) + C_{p0})^2 \quad (93)$$

onde:

$\text{VAR}(\dots)$ - variância;

$p(t)$ - variável de entrada ou de medição;

C_{p0} e C_{p1} - constantes positivas.

Assim, para os dados modelados temos:

$$\text{VAR}(PREC(t)) = (C_{PREC1}PREC(t) + C_{PREC0})^2 \quad (94)$$

$$\text{VAR}(PET(t)) = (C_{PET1}PET(t) + C_{PET0})^2 \quad (95)$$

$$R(t) = \text{VAR}(v(t)) = (C_{v1}v(t) + C_{v0})^2 \quad (96)$$

As formulações acima modelam apenas as variâncias dos processos de medição e cálculo dos dados, não incorporando a variabilidade de previsões destes dados.

6 A BACIA DE APLICAÇÃO E DADOS ASSOCIADOS

A bacia selecionada para aplicação do método de atualização do modelo 3R foi a do rio Ivaí, localizada no Estado do Paraná. Esta seleção deveu-se a:

- a) localização: a bacia se localiza na bacia incremental entre as usinas de Porto Primavera e Itaipu, localizadas no rio Paraná. A bacia do rio Ivaí faz parte do sistema operacional de previsão de aflúncias à Usina Hidrelétrica Itaipu. A figura 11 apresenta um mapa da bacia;
- b) dimensões da bacia: com uma área de drenagem de 36.587 km^2 , a bacia do rio Ivaí é de grandes dimensões, condição freqüente para as bacias munidas de sistemas operacionais de previsão, em especial as de interesse do Setor Elétrico. Isto implica na necessidade de aplicação de modelagem semidistribuída da bacia, condição mais exigente para a aplicação do estimador de estado;
- c) comportamento hidrológico: o rio Ivaí pode ser considerado um rio de grande porte, em termos de média e coeficiente de variação da vazão, de resposta rápida e de comportamento variável ao longo do ano. A aplicação da metodologia a ser estudada nestas condições permitiria a avaliação de seu desempenho em condições bastante difíceis;
- d) disponibilidade de dados: dispõe-se, neste rio, de várias estações, pluviométricas e fluviométricas com período razoável de observação, condição para uma boa calibração e verificação do modelo;
- e) qualidade dos dados: os dados relacionados às estações pluviométricas e fluviométricas deste rio apresentam melhor qualidade e menor número de problemas, quando comparados com os de outras bacias da área incremental entre as usinas de Porto Primavera e Rosana, a montante, e

Itaipu, a jusante;

- f) estudos anteriores: existem estudos de anteriores de Itaipu relacionados com a modelagem hidrológica desta bacia, sendo o último deles a calibração preliminar do modelo Sacramento para toda a bacia incremental de Itaipu. Com isto, espera-se, por um lado, aproveitar a experiência do corpo técnico da Itaipu com a área selecionada e, por outro, dispor de resultados independentes para validação.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA DO RIO IVAÍ

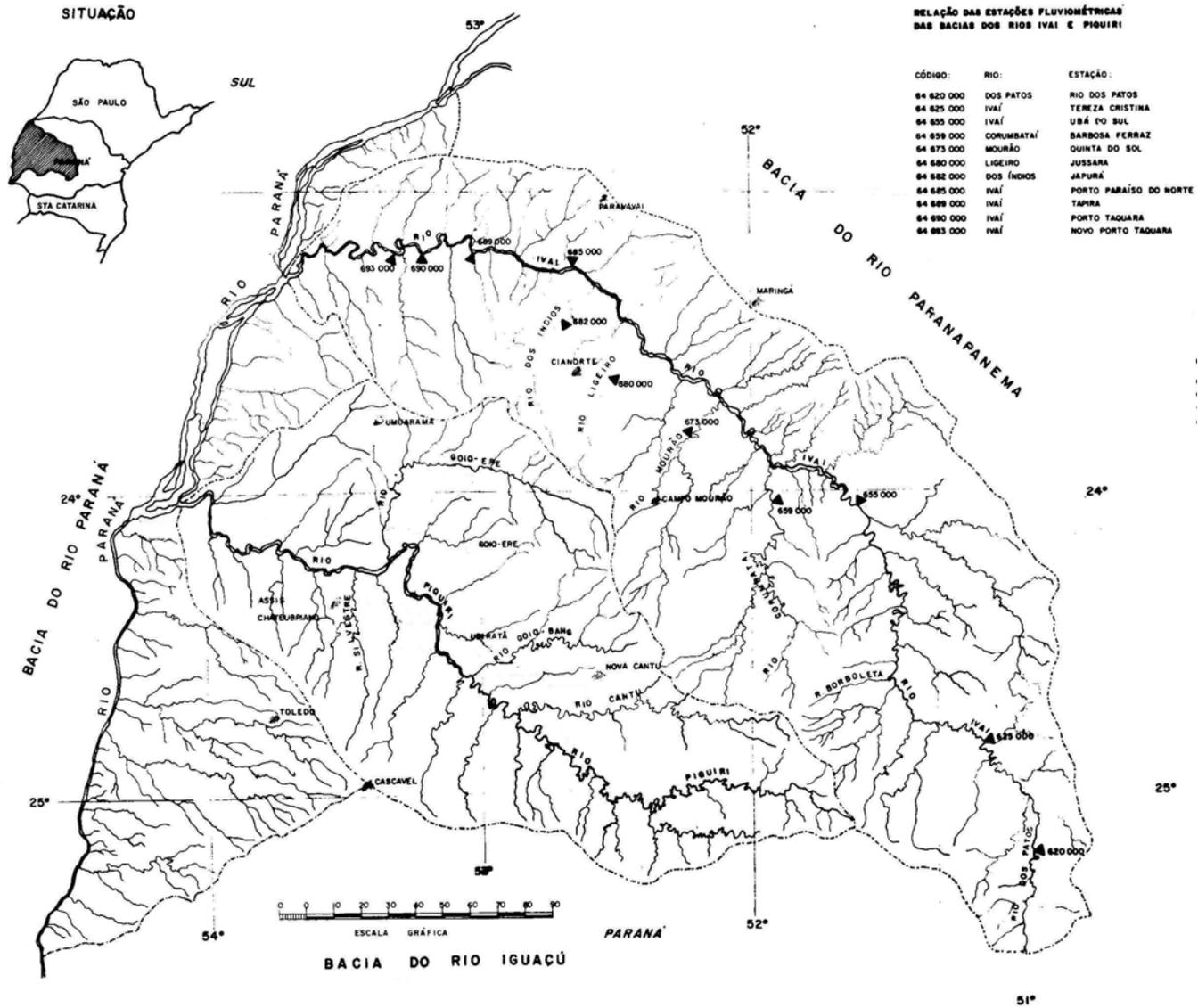
Os dados apresentados neste item foram obtidos, basicamente, de DNAEE (1985). Dados de outras fontes serão referenciados no texto.

6.1.1 Fisiografia

O Ivaí é um rio exclusivamente paranaense, contribuinte da margem esquerda do rio Paraná e pertencente à sub-bacia 64, segundo o sistema nacional de codificação de bacias (ANEEL, 2000a). Recebe este nome a partir da confluência dos rios dos Patos e São João, divisa dos municípios de Prudentópolis e Ivaí. Seus principais afluentes pela margem direita são os rios Alonso, Apucarana e Cambará e, pela margem esquerda, Corumbataí, Mourão, Ligeiro e dos Índios.

Está localizada entre as latitudes 22,5°S e 25,5°S e longitudes 50,5°W e 54,0°W. Desenvolve-se por uma extensão de 786 km no sentido geral noroeste, sendo predominantemente norte no terço superior, noroeste no terço intermediário e oeste no terço final, conforme apresentado na figura 11 (DNAEE, 1985). Tem área de drenagem de 36.587 km², com a estação fluviométrica mais a jusante, Novo Porto Taquara, cobrindo 34.432 km².

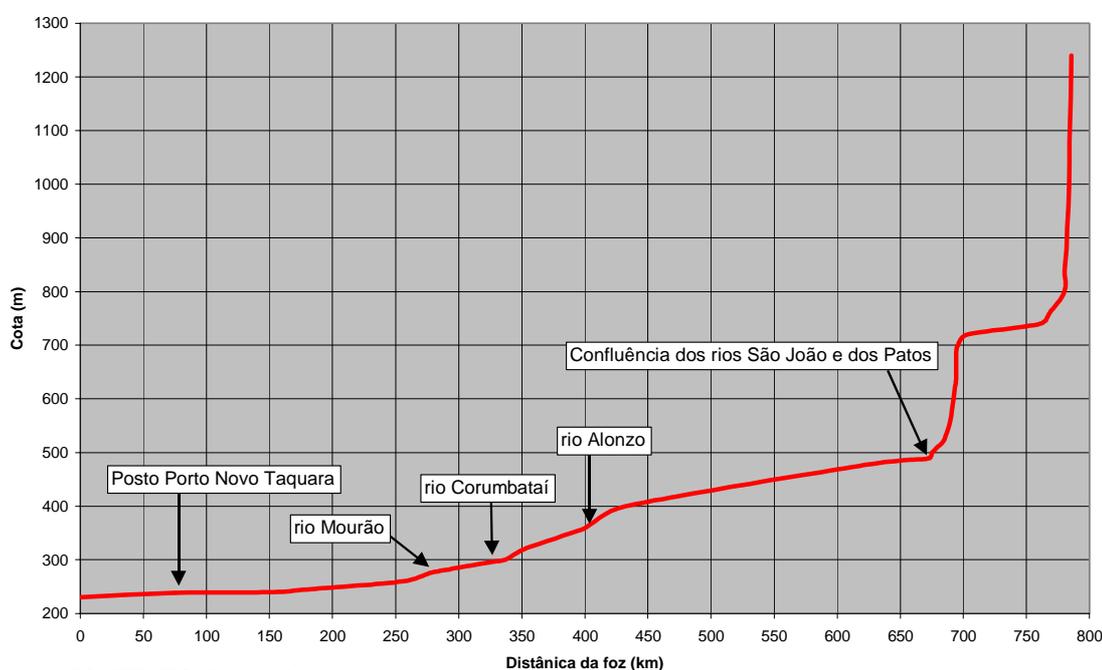
FIGURA 11 – BACIA DO RIO IVAÍ.



FONTE: - DNAEE (1985)

O ponto mais alto da bacia encontra-se na cota 1.240 m (TGNI, 1988). As nascentes do rio dos Patos têm uma altitude aproximada de 800 m, caindo para 500 m 50 km a jusante, na junção do rio São João, apresentando, neste trecho, declividade muito alta. Desta confluência, o rio Ivaí percorre aproximadamente 730 km, atingindo altitude aproximada de 225 m em sua foz. O esboço do perfil longitudinal do rio encontra-se na figura 12 e a hipsometria da bacia na figura 13.

FIGURA 12 – ESBOÇO DO PERFIL LONGITUDINAL DO RIO IVAÍ.

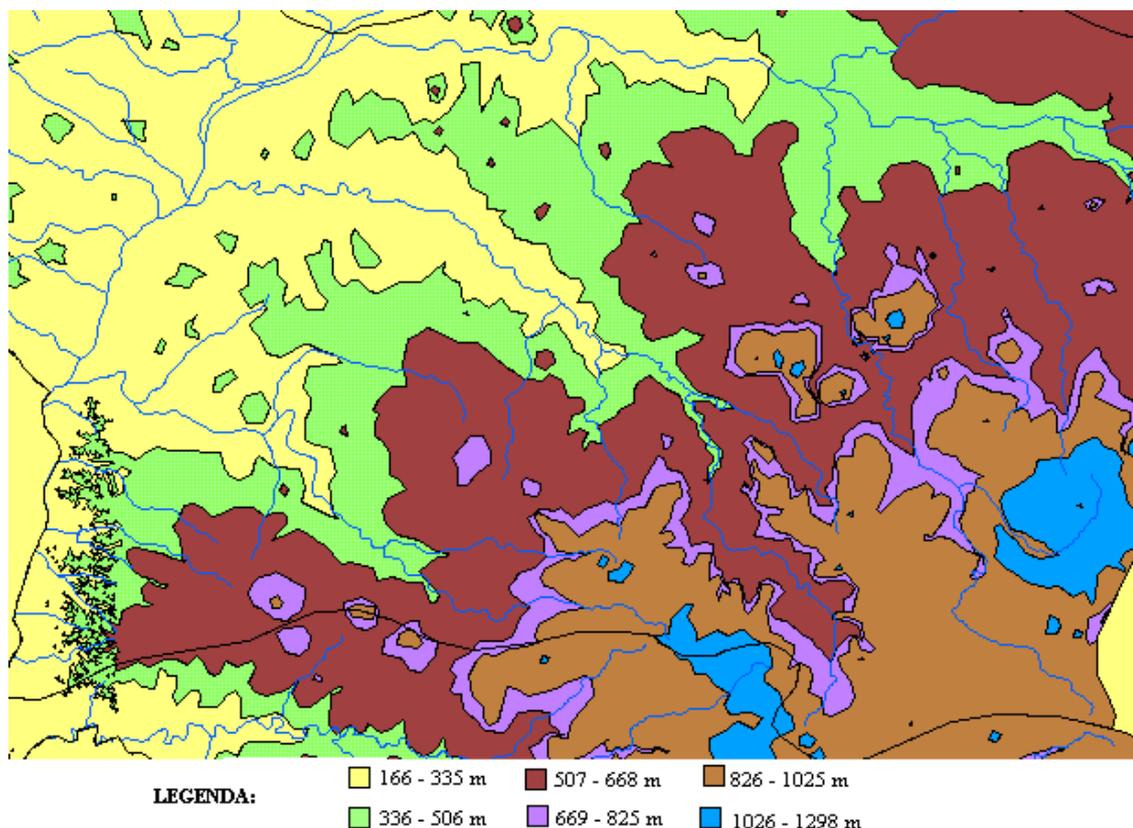


FONTE: TGNI (1988)

6.1.2 Clima

O clima na bacia do rio Ivaí, pode ser classificado, segundo Köppen, em dois tipos principais:

FIGURA 13 – HIPSOMETRIA DA BACIA DO RIO IVAÍ.



FONTE: ANEEL (2000c)

- a) Cfa: clima mesotérmico (temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C) subtropical úmido, sem estação seca, com verões quentes e geadas menos frequentes, com tendência a concentração de chuvas nos meses de verão, apresentando temperatura média do mês mais quente acima de 22°C. É característico dos cursos inferior e médio do rio;
- b) Cfb: clima mesotérmico, subtropical superúmido, sem estação seca, com verões frescos e geadas severas demasiadamente frequentes, apresentando temperatura média do mês mais quente inferior a 22°C. É característico do curso superior do rio.

A média anual de temperaturas varia de valores próximos a 17°C na cabeceira do rio até valores superiores a 22°C em sua foz. A média anual das mínimas varia de 11,5°C na cabeceira até valores acima de 17°C na foz. Já a média das máximas

varia de 24,5°C a valores acima de 28°C, para as mesmas regiões (IAPAR , 1994).

A bacia do Ivaí apresenta precipitações médias anuais entre 1.250 e 1.750 mm, bem distribuídos ao longo do ano, sendo os meses dezembro e novembro os de maior precipitação e os de junho e julho os mais secos.

A evapotranspiração potencial anual varia de 850 mm na cabeceira até valores acima de 1.400 mm no terço inferior do curso (IAPAR , 1994).

Nas estações anemométricas localizadas na bacia e em sua vizinhança prevalecem ventos de leste e de nordeste (IAPAR, 1994).

6.1.3 Geologia , Hidrogeologia e Solos

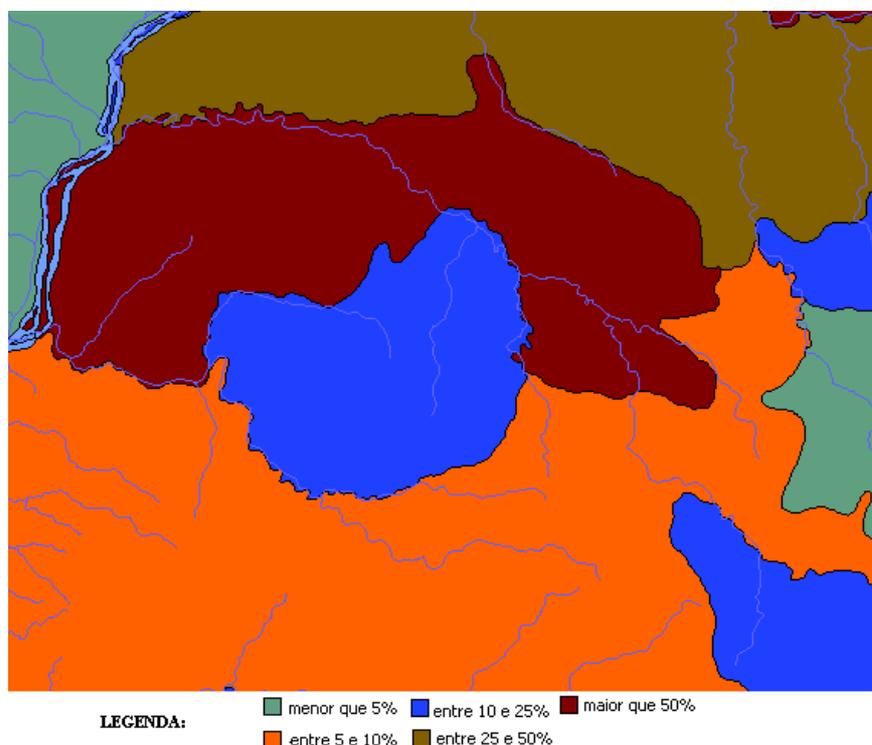
Os terços superior e médio da bacia do rio Ivaí se encontram sobre a formação Serra Geral, que compreende os extensos derrames basálticos da bacia do Paraná. Constata-se a presença de diques e “sills” de diabásio que cortam as rochas desta bacia.

O terço inferior da bacia é recoberto pelos sedimentos de formação continental da formação Caiuá, de origem eólica, porém não mais afetados pelo vulcanismo. Estes sedimentos cobrem o derrame basáltico e são formados por arenitos eólicos e conglomerados, às vezes com cimentos calcíferos e lâminas argilosas. A rede de drenagem epigênica do rio Ivaí é resultado do recobrimento pelos sedimentos da formação Caiuá. Os arenitos do noroeste paranaense são representados por relevos tubulares que ocupam os topos das chapadas interfluviais.

Esta região é extremamente suscetível à erosão, tendo sido constatados graves problemas pela devastação vegetal, expansão desordenada dos centros urbanos e o emprego de tecnologia não compatível com o clima e solo. A intensidade de ocupação do solo, figura 14, serve como parâmetro quantitativo do tipo de ocupação da região. Para a bacia do rio Ivaí este parâmetro indica que a maior parte da bacia apresenta ocupação superior a 50%, com praticamente todo o restante com ocupação

entre 25 e 50%. As áreas com ocupação inferior a 25% encontram-se nas cabeceiras e são caracterizadas por relevo difícil.

FIGURA 14 – INTENSIDADE DE USO DO SOLO.



FONTE: ANEEL (2000b)

A capacidade de conduzir e armazenar água do solo da região é baixa em sua zona de cabeceira e média no restante da bacia (ANEEL, 2000b).

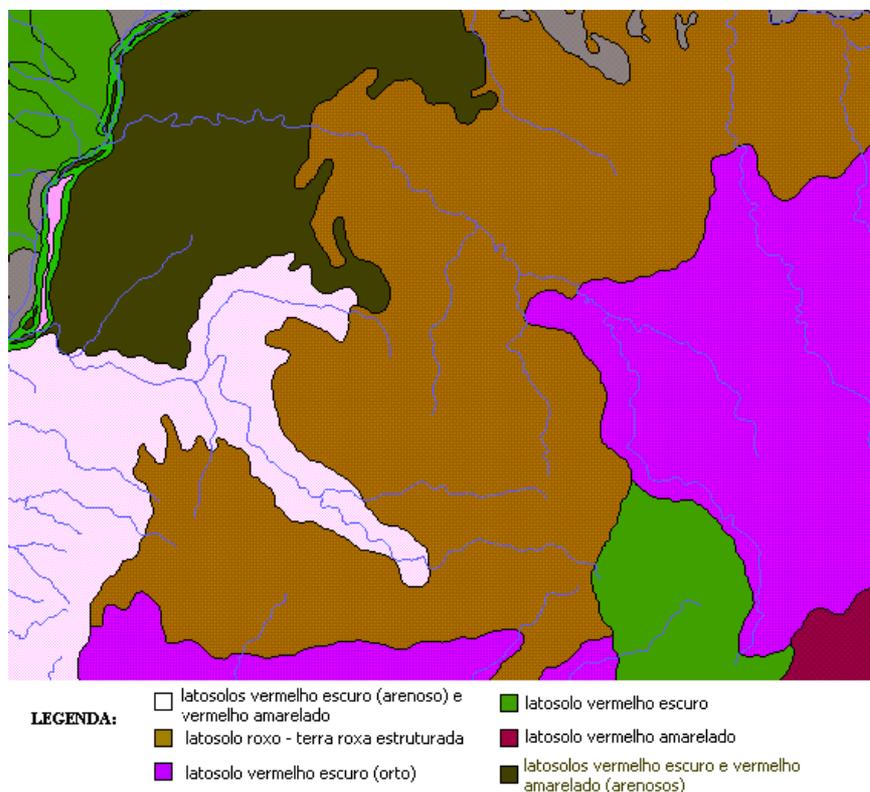
Na região predominam os latossolos, oriundos da decomposição do basalto, com variações de acordo com a região da bacia. A figura 15 apresenta a distribuição aproximada de solos (ANEEL, 2000b).

6.1.4 Vegetação

A cobertura vegetal natural desta bacia é composta por floresta subcaducifólia tropical e floresta subcaducifólia subtropical, sendo constatada uma área mínima de cerrado próxima ao divisor da bacia do rio Piquiri, nas proximidades de

Campo Mourão. No entanto, atualmente as matas foram quase que totalmente substituídas por culturas de soja e trigo.

FIGURA 15 – TIPOS DE SOLO NA BACIA DO RIO IVAÍ.



FONTE: ANEEL (2000b)

6.1.5 Hidrologia

A vazão média mensal do rio Ivaí no posto de Novo Porto Taquara é da ordem de 700 m³/s: ANEEL (2000a) apresenta a média do período 1974/1991 como sendo 727 m³/s, os dados disponíveis no Gerenciador de Dados Hidrometeorológicos (GDH) de Itaipu indicam uma média de 1974 a 2003 de 740 m³/s e a série revisada de vazões, gerada para esta dissertação, indica uma média de 1974 a 2004 de 693 m³/s.

O Ivaí encontra-se na zona de transição entre os regimes hidrológicos do Sul e do Sudeste do Brasil. Assim, embora apresente uma tendência a ocorrerem vazões mais altas de outubro a março e mais baixas de abril a setembro, há uma grande

variabilidade anual de vazões, que permite a ocorrência tanto de eventos significativos de enchente como de seca em praticamente todos os meses do ano. A figura 16 apresenta a série de vazões diárias, revisadas para esta dissertação, para o ano de 1996, escolhido aleatoriamente, do posto Novo Porto Taquara, para exemplificar o comportamento global da bacia. A figura 17 mostra o efeito da variabilidade hidrológica nas estatísticas de vazões, também para a série revisada:

- a) comportamento das mínimas é praticamente homogêneo, indicando a possibilidade da ocorrência de secas ao longo de todo o ano. A vazão mínima mensal varia ao longo do ano entre um máximo de $281 \text{ m}^3/\text{s}$ em março e um mínimo de $173 \text{ m}^3/\text{s}$ em janeiro;
- b) as vazões médias apresentam uma variabilidade um pouco maior e não permitem a caracterização de períodos seco e úmido. A vazão média mensal varia ao longo do ano entre um máximo de $829 \text{ m}^3/\text{s}$ em janeiro e um mínimo de $501 \text{ m}^3/\text{s}$ em agosto;
- c) as vazões máximas apresentam as maiores variações, com a caracterização de dois patamares: um de janeiro a junho, com valores girando em torno de $2.400 \text{ m}^3/\text{s}$ e outro de julho a dezembro, com valores ao redor de $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$. A exceção fica por conta do mês de agosto, com valor de vazão máxima de $1.032 \text{ m}^3/\text{s}$, bastante baixo. A vazão máxima mensal varia ao longo do ano entre um máximo de $2.966 \text{ m}^3/\text{s}$ em junho a um mínimo de $1.032 \text{ m}^3/\text{s}$ em agosto.

6.2 ESTUDOS ANTERIORES NA BACIA

A bacia do rio Ivaí foi modelada pela Itaipu Binacional em dois estudos, um concluído em 1992 e outro em 2002.

FIGURA 16 – VAZÕES MÉDIAS DIÁRIAS PARA UM PERÍODO NO POSTO NOVO PORTO TAQUARA.

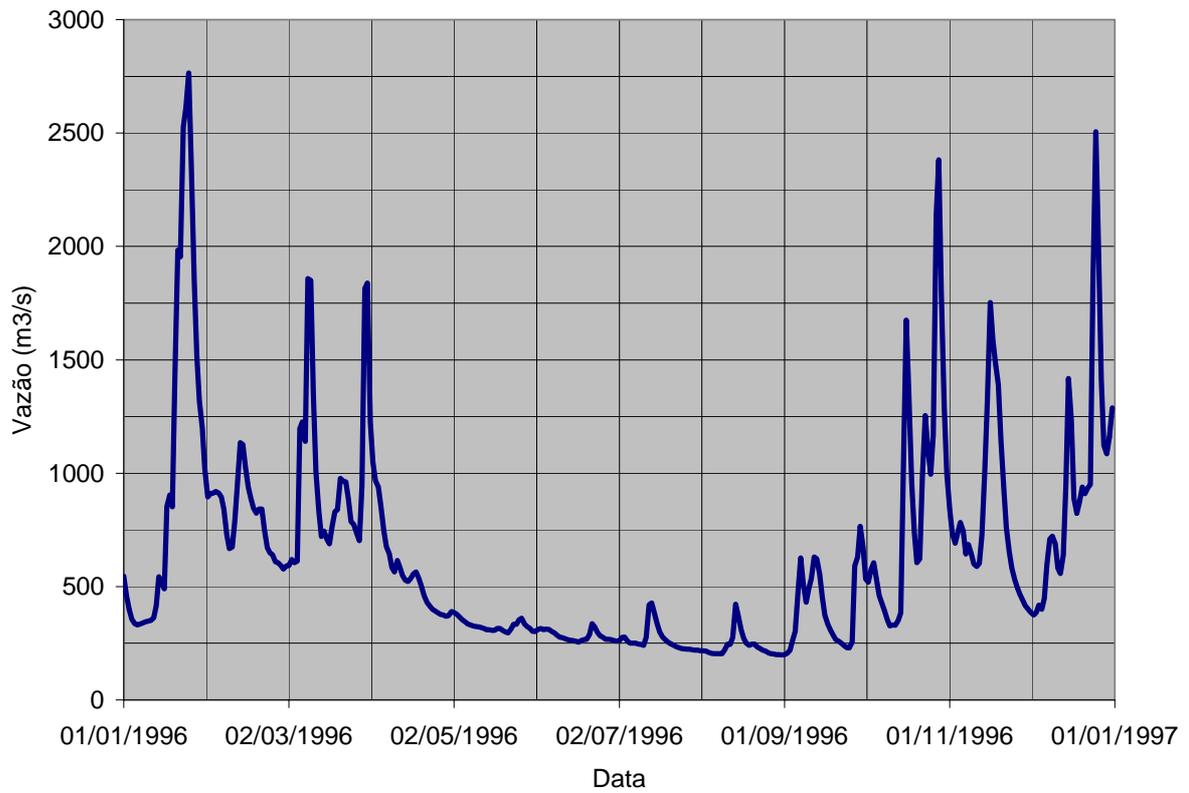
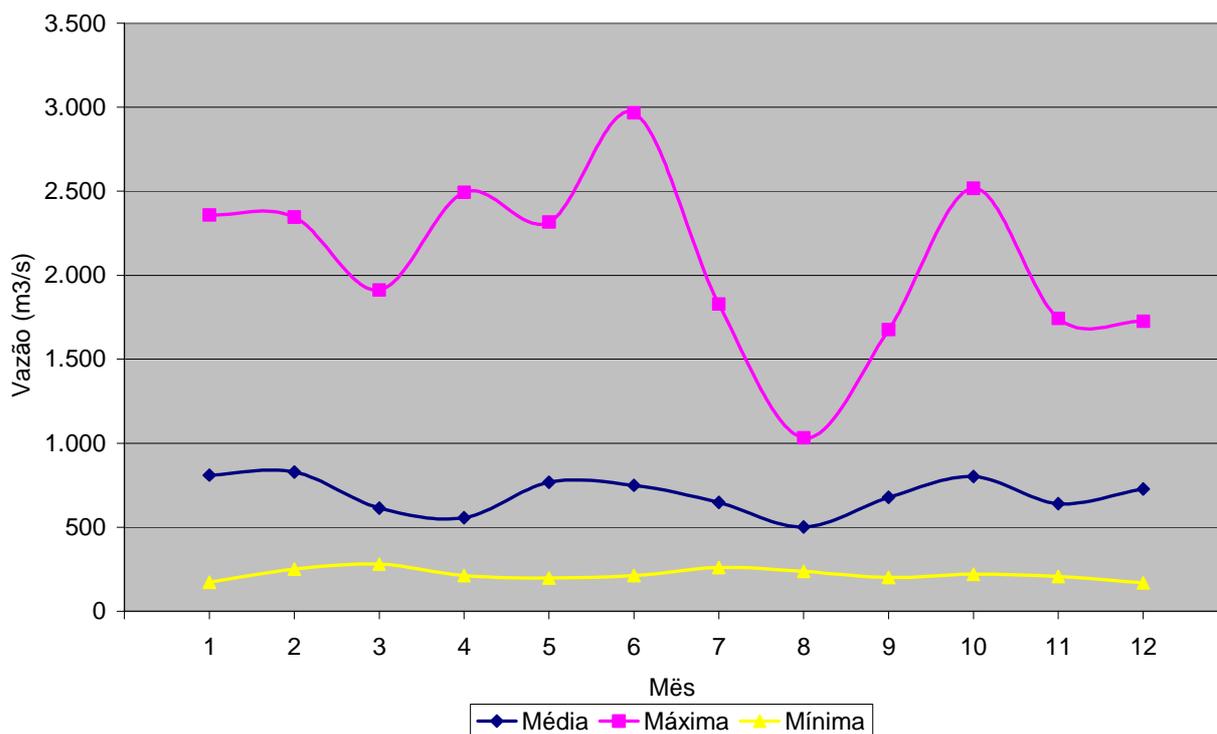


FIGURA 17 – VAZÕES CARARCTERÍSTICAS EM NOVO PORTO TAQUARA – 1974 A 2004.



O estudo concluído em 1992 foi conduzido inicialmente pelo consórcio brasileiro-paraguaio Themag, GCAP, NTS e Informática e resultou no desenvolvimento de um modelo hidrológico chuva-vazão-propagação para aplicação em Itaipu, denominado “Previsión de Caudales” (Preca), e na calibração deste modelo para a incremental de Itaipu (TGNI, 1991), com uma extensão de calibração sendo realizada internamente pela Itaipu (DHID.T, 1992). O modelo Preca utiliza reservatórios para representação dos armazenamentos na bacia e realiza a propagação em canal através de um algoritmo de onda cinemática. Este modelo está em uso operacional até hoje, constituindo-se em uma das ferramentas do sistema de previsão diária de aflúências à Usina de Itaipu. Especificamente para o rio Ivaí, o modelo foi calibrado utilizando 4 postos fluviométricos e 42 pluviométricos, com dados do período 1983 a 1985. Os resultados da calibração do modelo não foram considerados bons. A figura 18 apresenta, para o posto de Novo Porto Taquara, código 64693000, a permanência dos erros percentuais de simulação para o período de calibração e a figura 19 apresenta a relação entre os valores simulados e observados de vazão para o mesmo posto e período. Esta calibração apresentou um desvio médio de 30,4%, um desvio padrão de 30,0% e coeficiente de correlação de 0,92.

Dada a necessidade de atualização tecnológica das suas ferramentas de previsão, já que todo o sistema informático básico disponível foi desenvolvido para o sistema operacional DOS, a Itaipu optou por implementar um novo sistema utilizando soluções disponíveis no mercado. Optou-se pela aquisição de uma série de aplicativos desenvolvidos pela Universidade de Delft, da Holanda, consistindo do banco de dados Hymos, do modelo hidrodinâmico Sobek, que tem alguma integração com o banco de dados, e de uma versão do modelo Sacramento, também com recursos de integração com o banco de dados. Os modelos hidrológico e hidrodinâmico foram calibrados com dados dos anos de 1987 e 1988, e os resultados para a bacia incremental estão resumidos em GAETE (2002c).

FIGURA 18 – PERMANÊNCIA DE DESVIOS DA SIMULAÇÃO EM NOVO PORTO TAQUARA.

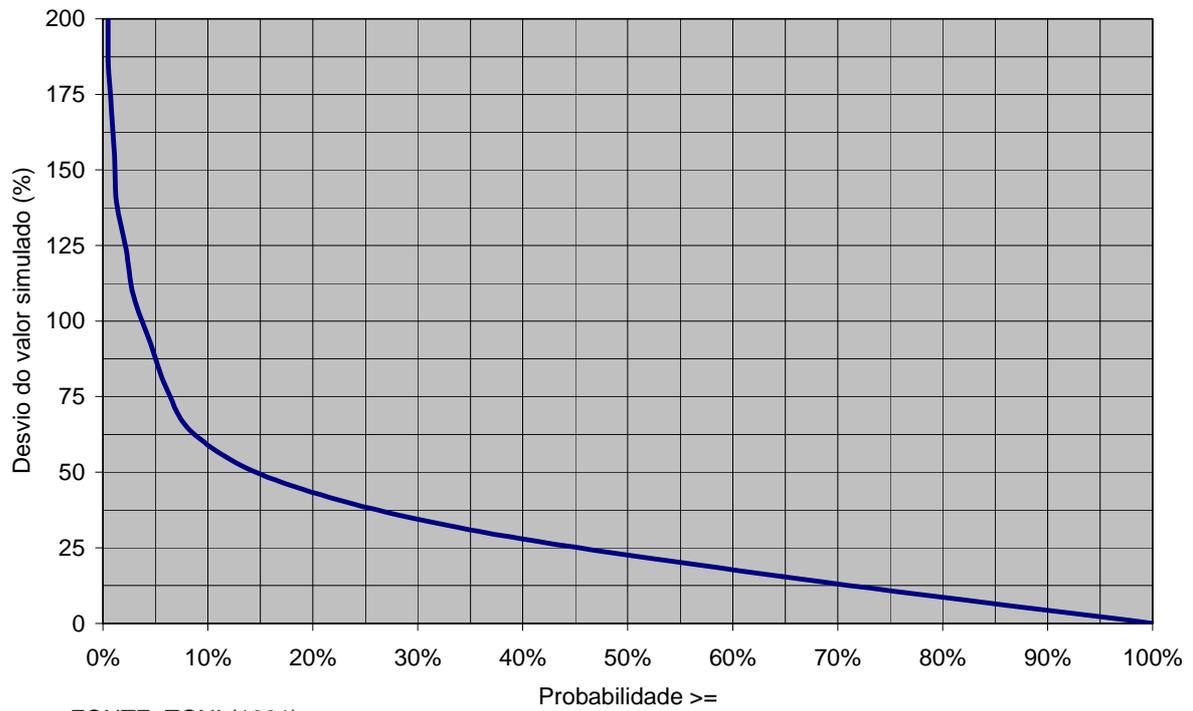
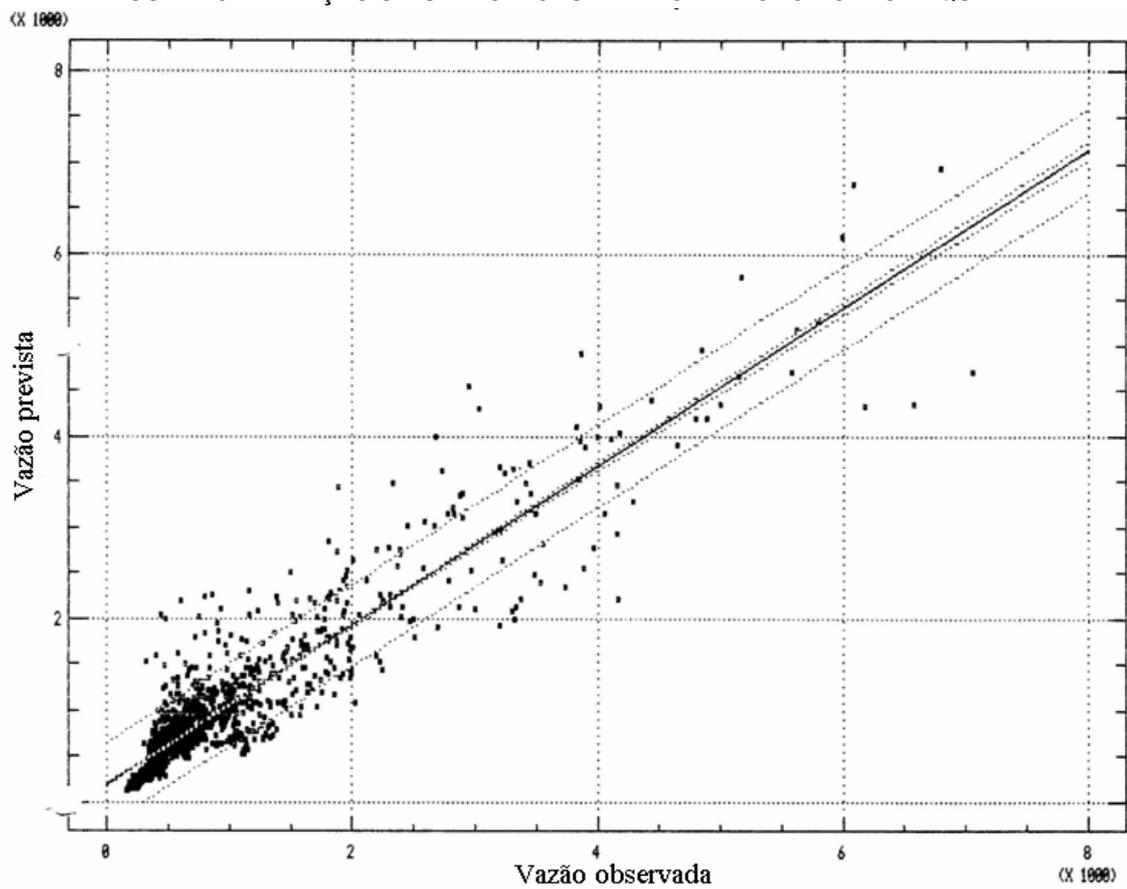
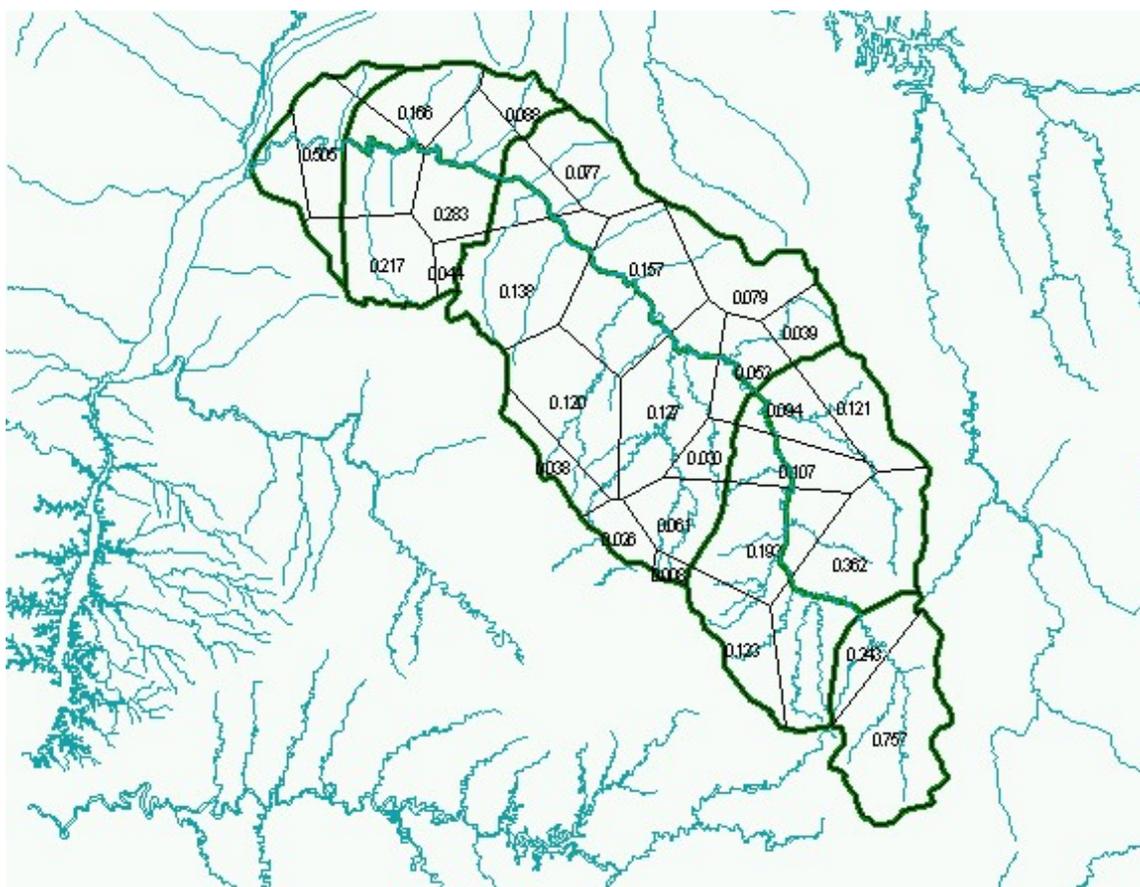


FIGURA 19 – RELAÇÃO SIMULADO X OBSERVADO EM NOVO PORTO TAQUARA.



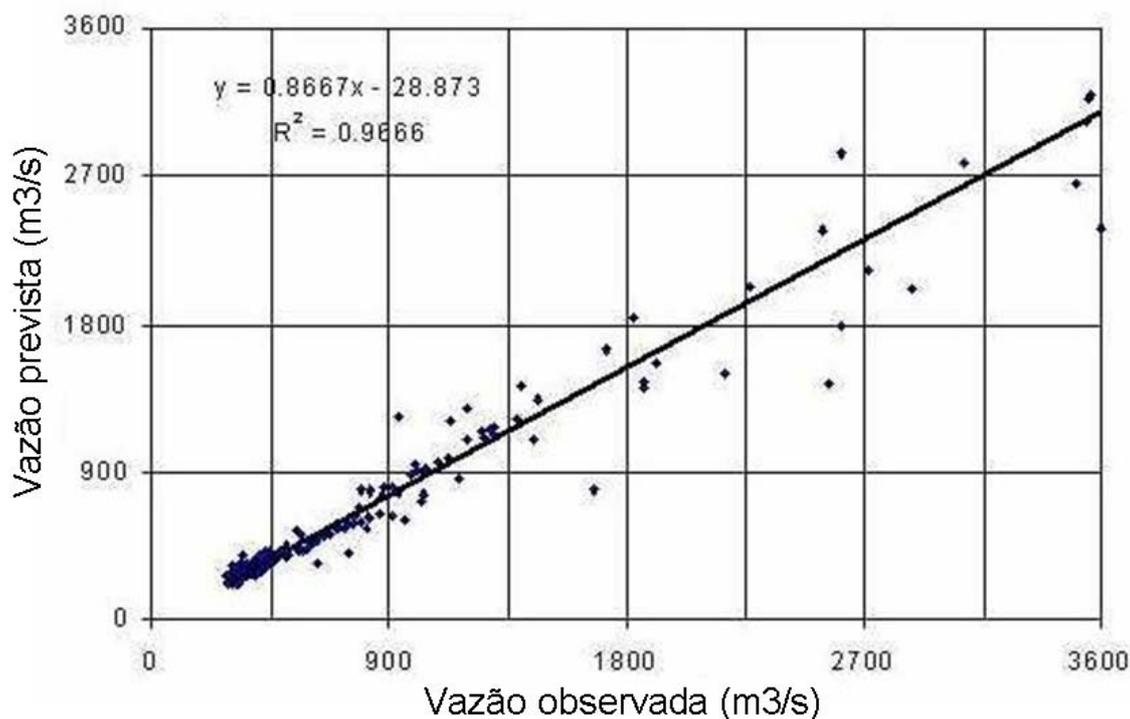
Neste estudo, a bacia do rio Ivaí foi dividida em quatro sub-bacias, definidas pelos postos fluviométricos de Teresa Cristina, Ubá do Sul, Porto Paraíso do Norte e Novo Porto Taquara. Nas três últimas, ainda, as margens esquerda e direita foram modeladas separadamente. Utilizou-se um conjunto de 20 estações pluviométricas para obtenção da chuva média na bacia. As sub-bacias definidas e as áreas dos polígonos de Thiessen da rede pluviométrica encontram-se na figura 20. Em Novo Porto Taquara obteve-se, para o período calibrado, um coeficiente de correlação entre simulado e observado de 0,96. A figura 21 apresenta a comparação entre valores observados e simulados da vazão.

FIGURA 20 – SUB-BACIAS E ÁREAS DE THIESSEN DO RIO IVAÍ.



FONTE: adaptado de GAETE (2002a)

FIGURA 21 – RELAÇÃO ENTRE VAZÃO SIMULADA E OBSERVADA EM NOVO PORTO TAQUARA.



FONTE: GAETE (2002a)

Os parâmetros obtidos nesta calibração estão apresentados na tabela 3.

6.3 DEFINIÇÃO DOS POSTOS A UTILIZAR NO MODELO 3R

O modelo 3R necessita, como dados de entrada, de séries de vazões médias diárias nas exutórias das sub-bacias a simular e séries diárias de precipitação e evapotranspiração potencial médias em área para cada sub-bacia. Neste item será descrito o processo de definição da rede de postos para o cálculo destas séries.

O rio Ivaí não dispõe de um número grande de postos fluviométricos representativos e com histórico significativo de dados. Assim, todos os postos fluviométricos com um período mais extenso de dados foram selecionados para uso neste trabalho. Os postos selecionados estão relacionados na tabela 4, juntamente com algumas de suas características. A disponibilidade de dados nas diversas fonte aparece na tabela 8 e a localização dos postos na bacia é apresentada nas figuras 11 e 22.

TABELA 3 – PARÂMETROS DO MODELO SACRAMENTO PARA O RIO IVAÍ.

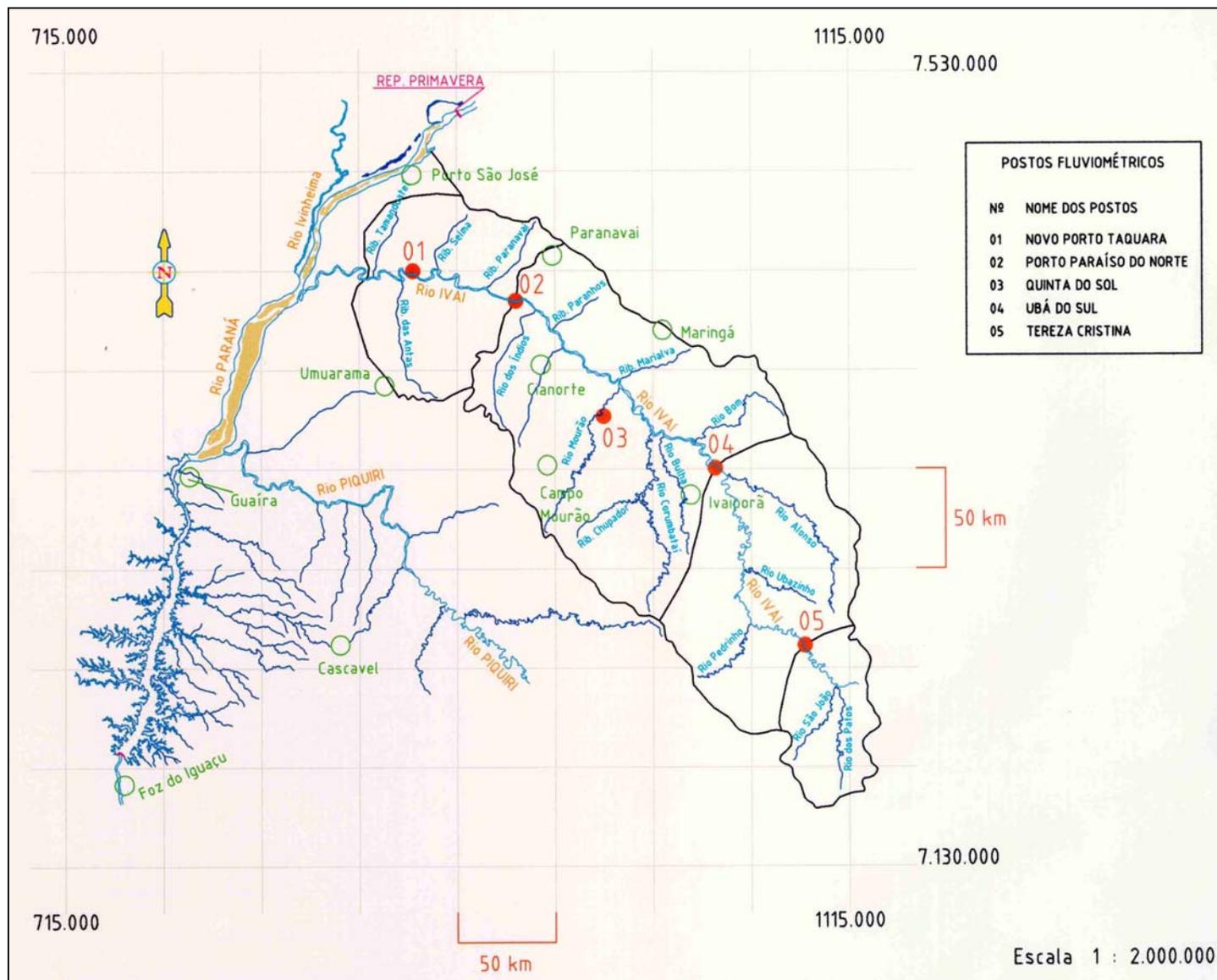
PARÂMETRO	SUB-BACIAS			
	Tereza Cristina	Ubá do Sul	Porto Paraíso do Norte	Novo Porto Taquara
<i>ADIMP</i>	0,29	0,10	0,11	0,12
<i>SARVA</i>	0	0	0	0
<i>PCTIM</i>	0,18	0,12	0,12	0,10
<i>UZTWM</i>	56	38	45	50
<i>UZFWM</i>	50	38	45	50
<i>UZK</i>	0,500	0,700	0,650	0,650
<i>ZPERC</i>	75	85	90	90
<i>REXP</i>	3,8	3,7	3,8	3,6
<i>PFREE</i>	0,15	0,18	0,20	0,20
<i>LZTWM</i>	80	85	90	90
<i>LZFPM</i>	75	70	70	52
<i>LZPK</i>	0,095	0,050	0,078	0,078
<i>LZFSM</i>	75	70	70	52
<i>LZSK</i>	0,019	0,017	0,014	0,014
<i>RSERV</i>	0,20	0,17	0,20	0,20

FONTE: GAETE (2002a)

TABELA 4 – POSTOS FLUVIOMÉTRICOS SELECIONADOS PARA A BACIA DO RIO IVAÍ.

CÓDIGO	NOME	RIO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		ÁREA (km ²)	ALTITUDE (m)
			Lat S (grau)	Lon W (grau)		
64625000	Tereza Cristina	Ivaí	24,83	51,15	3572	550
64655000	Ubá do Sul	Ivaí	24,05	51,62	12701	380
64685000	Porto Paraíso do Norte	Ivaí	23,33	52,67	28427	250
64693000	Novo Porto Taquara	Ivaí	23,20	53,32	34432	240
64673000	Quinta do Sol	Mourão	23,83	52,20	1534	-----

FIGURA 22 – LOCALIZAÇÃO DOS POSTOS FLUVIOMÉTRICOS SELECIONADOS.



Conforme anteriormente mencionado, a Itaipu Binacional implantou um sistema de previsão de vazões baseado no modelo chuva-vazão-propagação Preca, desenvolvido pelo consórcio Themag/GCAP/NTS/Informática (DHID.T, 1992). Este modelo foi calibrado com um conjunto grande de postos pluviométricos, mas somente foi possível ter acesso para uso operacional às informações a uma parte destes postos, que vem sendo usados no processo de previsão de afluências à Itaipu. Considerando que o algoritmo de atualização de variáveis de estado em estudo tem objetivo de subsidiar modelos operacionais e, por isto, deve ser avaliado em situação real de operação, representada no caso pelas informações realmente disponíveis, e que o conjunto inicial de dados pluviométricos já estaria disponível nos bancos de dados de Itaipu, decidiu-se pela adoção da mesma rede de postos atualmente utilizada por Itaipu.

Os postos pluviométricos selecionados estão relacionados na tabela 5, a disponibilidade de dados nas diversas fontes encontra-se na tabela 7 e sua localização na bacia é apresentada na figura 23.

A rede de postos evaporimétricos foi definida com dados publicados por SENTELHAS et alli (1999), selecionando-se todos os postos com medições de evaporação disponíveis dentro ou nas proximidades da bacia do Ivaí. A localização dos postos selecionados é apresentada na figura 24 e suas fontes e disponibilidades relacionados na tabela 6.

6.4 OBTENÇÃO DAS SÉRIES DE PRECIPITAÇÃO MÉDIA

Com a finalidade de manter a coerência entre todas as séries, todas as precipitações diárias foram calculadas como o valor acumulado entre as 7 horas de um dia e as 7 do dia anterior, critério utilizado para a totalização de estações pluviométricas convencionais (com informação de leitorista), onde usualmente dispõe-se de informação apenas às 7 e 17 horas.

TABELA 5 – POSTOS PLUVIOMÉTRICOS SELECIONADOS PARA A BACIA DO RIO IVAÍ.

CÓDIGO	NOME	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		ALTITUDE (m)
		Lat S (grau)	Lon W (grau)	
02253004	Ivinheima (83704)	22,18	53,60	370
02253012	Loanda	22,93	53,13	494
02351008	Apucarana (Fazenda Ubatuba)	23,50	51,53	746
02351010	Londrina	23,32	51,15	566
02351013	Maringá	23,42	51,95	542
02352000	Porto Paraíso do Norte	23,32	52,67	250
02352017	Criação do Estado (Paranavaí)	23,08	52,43	480
02352019	Cianorte	23,67	52,58	530
02353008	Umuarama	23,73	53,28	480
02353050	Zé Roberto	23,93	53,80	340
02451002	Ubá do Sul	24,05	51,62	380
02451011	Barbosa Ferraz	24,05	51,98	420
02451014	Ivaiporã	24,25	51,65	650
02452009	Ubiratã	24,53	52,98	500
02452014	Mamborê	24,28	52,52	750
02452018	Campo Mourão (83783)	24,05	52,37	616
02453000	Balsa do Santa Maria	24,17	53,73	270
02453042	Encantado	24,42	53,65	412
02551006	Guarapuava (83834)	25,40	51,47	1036
02552041	Cantagalo	25,37	52,12	840

FIGURA 23 – LOCALIZAÇÃO DOS POSTOS PLUVIOMÉTRICOS SELECIONADOS.

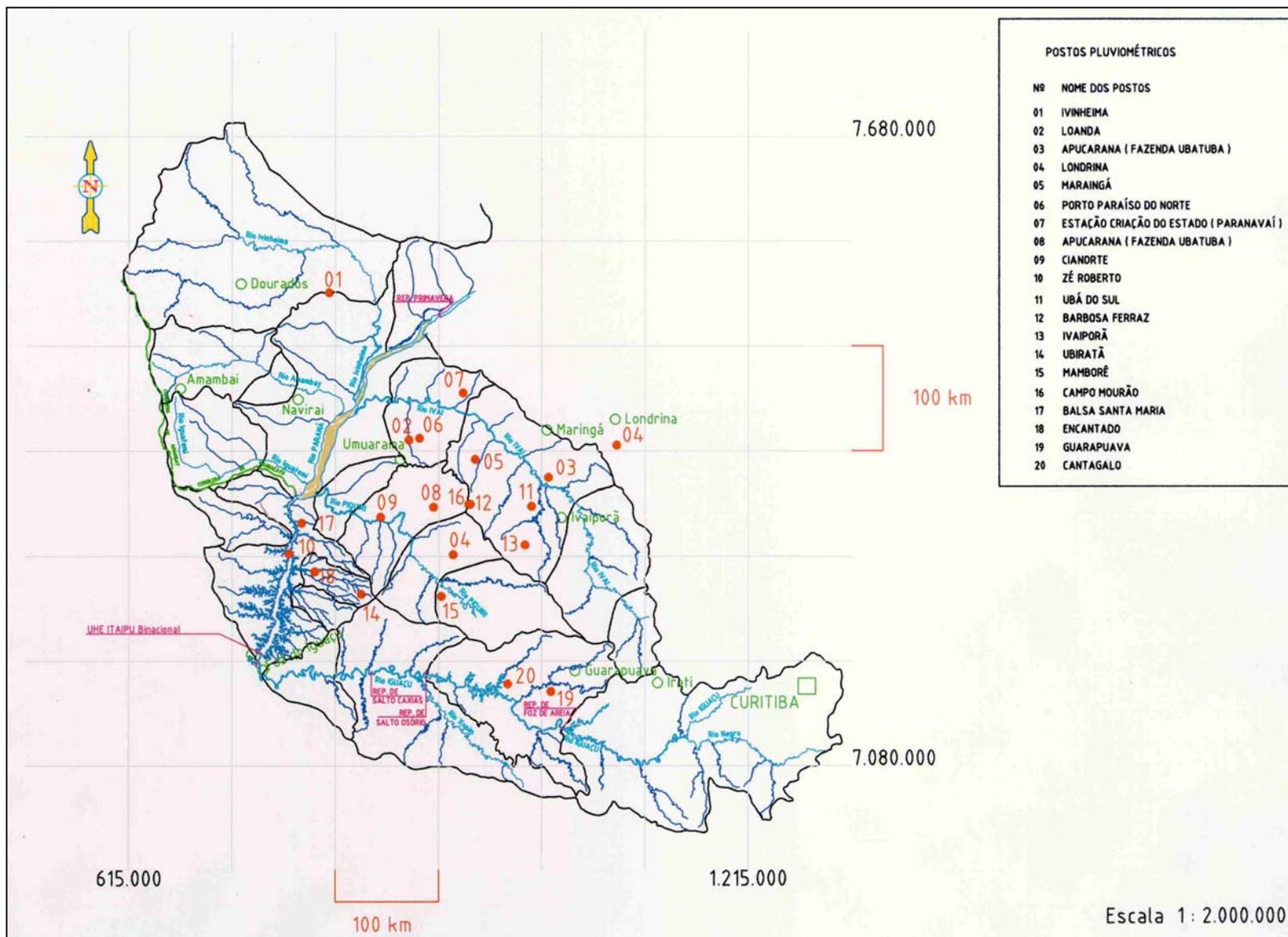


FIGURA 24 – LOCALIZAÇÃO DOS POSTOS EVAPORIMÉTRICOS SELECIONADOS.

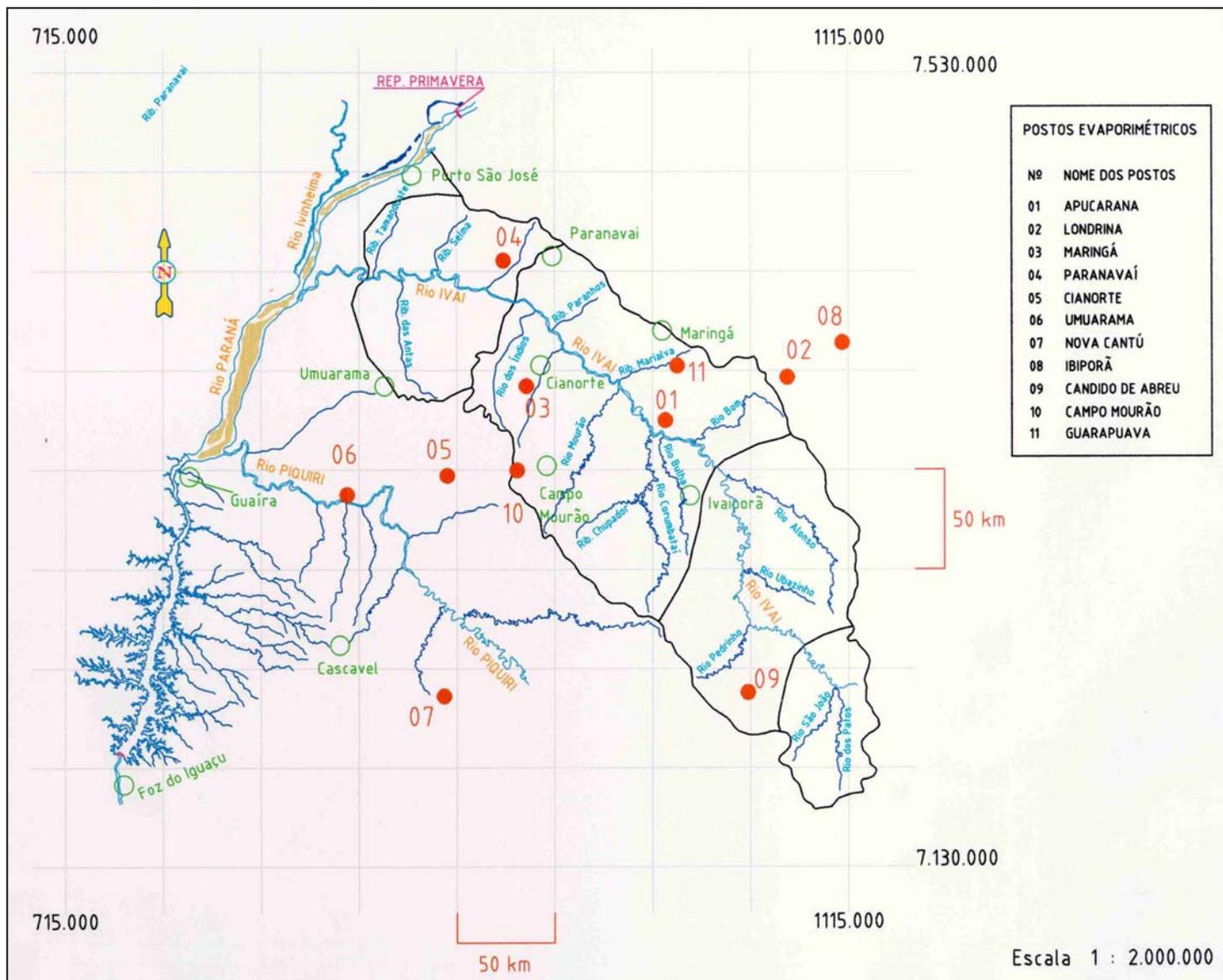


TABELA 6 – POSTOS EVAPORIMÉTRICOS SELECIONADOS PARA A BACIA DO RIO IVAÍ.

NOME	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		ALTITUDE (m)	PERÍODO DE DADOS	
	Lat S (grau)	Lon W (grau)		Início	Fim
Apucarana	23,50	51,53	746	1961	1996
Londrina	23,37	51,17	585	1976	1996
Maringá	23,42	51,95	542	1961	1989
Paranavaí	23,08	52,43	480	1971	1996
Cianorte	23,67	52,58	530	1971	1996
Umuarama	23,73	53,28	480	1971	1996
Nova Cantú	24,67	52,57	540	1972	1996
Ibiporã	23,27	51,01	484	1971	1996
Cândido de Abreu	24,63	51,25	645	1988	1996
Campo Mourão	24,05	52,37	616	1967	1990
Guarapuava	23,35	51,50	1020	1972	1996

As séries de precipitação diárias utilizadas para o cálculo da precipitação média em área foram resultado da composição de dados provenientes de quatro fontes:

- a) dados de postos da Suderhsa: dados de postos operados pela Suderhsa e fornecidos pelo Simepar;
- b) dados de postos do Simepar: dados horários de postos telemétricos operados pelo Simepar e obtidos na página internet da entidade (<http://www.simepar.br/>);
- c) dados disponíveis em Itaipu: dados de postos de diversas entidades, obtidos nos bancos de dados (GDH e Hymos) da Itaipu Binacional;
- d) dados disponíveis na ANA: dados disponíveis no banco de dados Hidroweb, acessível via Internet (<http://hidroweb.ana.gov.br/>).

Primeiramente, as informações de todas as fontes para cada um dos postos foram comparadas, por inspeção visual de gráficos e avaliação de parâmetros estatísticos (média, variância e assimetria), com a finalidade verificar a compatibilidade entre as séries com vistas à sua utilização na composição de uma série mais completa de cada posto e para realizar uma consistência visual, com a correção ou eliminação de dados manifestamente errados. Como resultado desta comparação, concluiu-se que os dados do GDH, Hymos e ANA eram praticamente idênticos, adotando-se os dados do GDH para a continuação dos trabalhos, por ser fonte primária de dados, e desconsiderou-se os dados de Ivaiporã da Suderhsa, por apresentarem comportamento muito distinto dos disponíveis no GDH e dos postos no entorno.

Constatada a possibilidade da composição de dados das diversas fontes, as séries foram obtidas adotando como princípio a valorização da fonte original dos dados e aqueles submetidos a processo de validação mais rigoroso. Com isto, chegou-se ao seguinte critério:

- a) foram adotados, prioritariamente, os dados do Simepar, porque estes dados foram obtidos de dados horários e sofreram um processo de verificação inicial de validade. Além disso, parte dos dados disponíveis em Itaipu para os postos pluviométricos do Simepar foi oriunda de leituras realizadas em gráficos de isoietas gerados por aquela entidade, com a imprecisão que o procedimento acarreta e com a descontinuidade devida ao fato do procedimento não haver sido realizado todos os dias;
- b) os períodos não cobertos pelos postos do Simepar ou com falhas de dados foram preenchidos com dados da Suderhsa, que sofreram um processo de consistência para estudo realizado pelo Simepar;
- c) o restante dos períodos ou as falhas foram preenchidos com dados do GDH, que sofreram apenas inspeção por especialista durante seu processo diário de coleta, sendo corrigidos ou eliminados os dados manifestamente

errados. Embora esta consistência não seja feita de maneira estruturada, ou seja, ainda não está padronizada como procedimento operativo, contato com as pessoas que executam o processo indicou que os dados de cada posto são comparados com dados anteriores do mesmo posto, com dados de postos próximos, geralmente coletados ao mesmo tempo, e olhando os postos pluviométricos das proximidades para detectar, na vazão, os sinais da precipitação.

Para a definição dos períodos válidos para este estudo, ou seja, aquele com informação de precipitação com um mínimo de qualidade, recorreu-se à relação proposta por SCHAAKE (1981, apud SCHAAKE et alli, 2000) para a estimativa da densidade mínima de postos pluviométricos necessária para o cálculo de precipitação média em área com a finalidade de previsão de vazões. Ressalta-se, no entanto, que a expressão utilizada foi verificada apenas para bacias de até 20.000 km². O número mínimo de postos necessários é obtido da relação:

$$N = 0,6 A^{0,3} \quad (97)$$

onde:

N - número de postos pluviométricos necessários;

A - área da bacia, em km².

Para a bacia do rio Ivaí, que tem 34.432 km² em Novo Porto Taquara, último posto pluviométrico existente no rio, obtém-se da aplicação da equação (97) o número de 14 postos (13,78). Assim, definiu-se como períodos válidos para o presente estudo aqueles em que o número de postos disponíveis fosse majoritariamente maior ou igual a 14, colocando-se como critério adicional a disponibilidade de ao menos 10 postos (50% dos 20 postos considerados) em alguns dias ou períodos curtos.

TABELA 7 – DISPONIBILIDADE DE DADOS DOS POSTOS PLUVIOMÉTRICOS PARA A BACIA DO RIO IVAÍ.

NOME	INÍCIO/ FIM	DISPONIBILIDADE			
		GDH/Hymos	ANA	SIMEPAR	SUDERHSA
Ivinheima (83704)	Início	01/09/1966	-----	-----	01/07/1966
	Fim	11/05/2004	-----	-----	31/08/1998
Loanda	Início	14/08/1975	-----	-----	-----
	Fim	02/05/2000	-----	-----	-----
Apucarana (Fazenda Ubatuba)	Início	01/01/1962	-----	02/10/1999	-----
	Fim	10/05/2004	-----	31/12/2003	-----
Londrina	Início	01/01/1954	-----	02/06/1997	-----
	Fim	26/11/2003	-----	31/12/2003	-----
Maringá	Início	01/01/1961	-----	05/10/1998	-----
	Fim	11/05/2004	-----	31/12/2003	-----
Porto Paraíso do Norte	Início	15/03/1953	15/03/1953	-----	01/01/1953
	Fim	11/05/2004	30/06/1998	-----	30/06/1998
Criação do Estado (Paranavaí)	Início	01/09/1974	01/06/1974	02/06/1997	-----
	Fim	11/05/2004	30/04/2003	31/12/2003	-----
Cianorte	Início	01/10/1971	-----	05/04/2002	-----
	Fim	10/05/2004	-----	31/12/2003	-----
Umuarama	Início	01/01/1972	-----	02/06/1997	-----
	Fim	10/05/2004	-----	31/12/2003	-----
Zé Roberto	Início	25/08/1992	-----	-----	-----
	Fim	11/05/2004	-----	-----	-----
Ubá do Sul	Início	17/04/1967	17/04/1976	-----	01/01/1967
	Fim	10/05/2004	30/06/1998	-----	31/08/2001
Barbosa Ferraz	Início	01/08/1992	-----	-----	-----
	Fim	10/05/2004	-----	-----	-----
Ivaiporã	Início	12/10/1955	12/10/1955	-----	01/08/1963
	Fim	31/01/2000	31/05/1998	-----	31/07/2001
Ubiratã	Início	16/04/1965	-----	-----	01/05/1965
	Fim	31/01/2000	-----	-----	30/09/2001
Mamborê	Início	15/04/1965	-----	-----	01/05/1965
	Fim	31/01/2000	-----	-----	30/07/2001
Campo Mourão (83783)	Início	01/01/1961	-----	02/06/1997	01/01/1961
	Fim	10/05/2004	-----	31/12/2003	31/05/2002
Balsa do Santa Maria	Início	01/01/1972	01/01/1972	-----	-----
	Fim	11/05/2004	30/06/1998	-----	-----
Encantado	Início	26/07/1975	-----	-----	-----
	Fim	10/05/2004	-----	-----	-----
Guarapuava (83834)	Início	01/01/1952	-----	02/06/1997	-----
	Fim	10/05/2004	-----	31/12/2003	-----
Cantagalo	Início	28/01/1976	28/01/1976	-----	-----
	Fim	28/11/2001	31/05/1998	-----	-----

Este critério teve como objetivo não descartar períodos com boa quantidade de dados pela presença de eventos esporádicos de indisponibilidade de postos. Desta forma, levando em conta também a disponibilidade de dados fluviométricos, cujo último posto implantado data de meados de 1974, foram definidos para o estudo os períodos de 01/01/1975 a 30/06/1988 e 01/08/1992 a 31/12/2003. Nestes, em 93,75% dos dias há a disponibilidade de ao menos 13 postos pluviométricos e em 90,08% deles há a disponibilidade de ao menos 14 postos. Em todo o período, composto por 9100 dias com observações, há apenas 5 dias em que há 9 postos com dados, 3 onde há 10 e no restante o número de postos é sempre superior a 11. Estes eventos com baixo número de postos ocorrem em períodos em que a maioria dos postos está operacional (disponibilidade de 19 ou 20), o que deve afetar estes dias específicos, mas não todo o período.

Apesar do número global de postos poder ser considerado satisfatório para a bacia do rio Ivaí, o mesmo não pode ser dito de sua distribuição espacial. Do total de 20 postos, 10 encontram-se fora da bacia, sendo que 8 a alguma distância do divisor de águas. Estes postos destinam-se a auxiliar na definição da distribuição espacial da precipitação e a substituir eventuais falhas de informação em postos mais próximos. Dos postos localizados dentro da bacia, 8 concentram-se na sub-bacia intermediária, entre os postos de Ubá do Sul e Porto Paraíso do Norte e 2 na sub-bacia de jusante, entre os postos de Porto Paraíso do Norte e Novo Porto Taquara (vide figura 23). As duas sub-bacias de montante, até o posto de Ubá do Sul estão praticamente descobertas de informação de precipitação. Embora a situação não seja ideal em termos de distribuição de postos, por outro lado constitui situação concreta, vivida pela hidrologia operacional de Itaipu, e também situação onde a utilização de algoritmos de atualização de variáveis de estado pode ser mais vantajosa.

As séries de precipitações do conjunto de postos obtidas anteriormente foram utilizadas para a geração de precipitações médias mensais nas sub-bacias estudadas. A

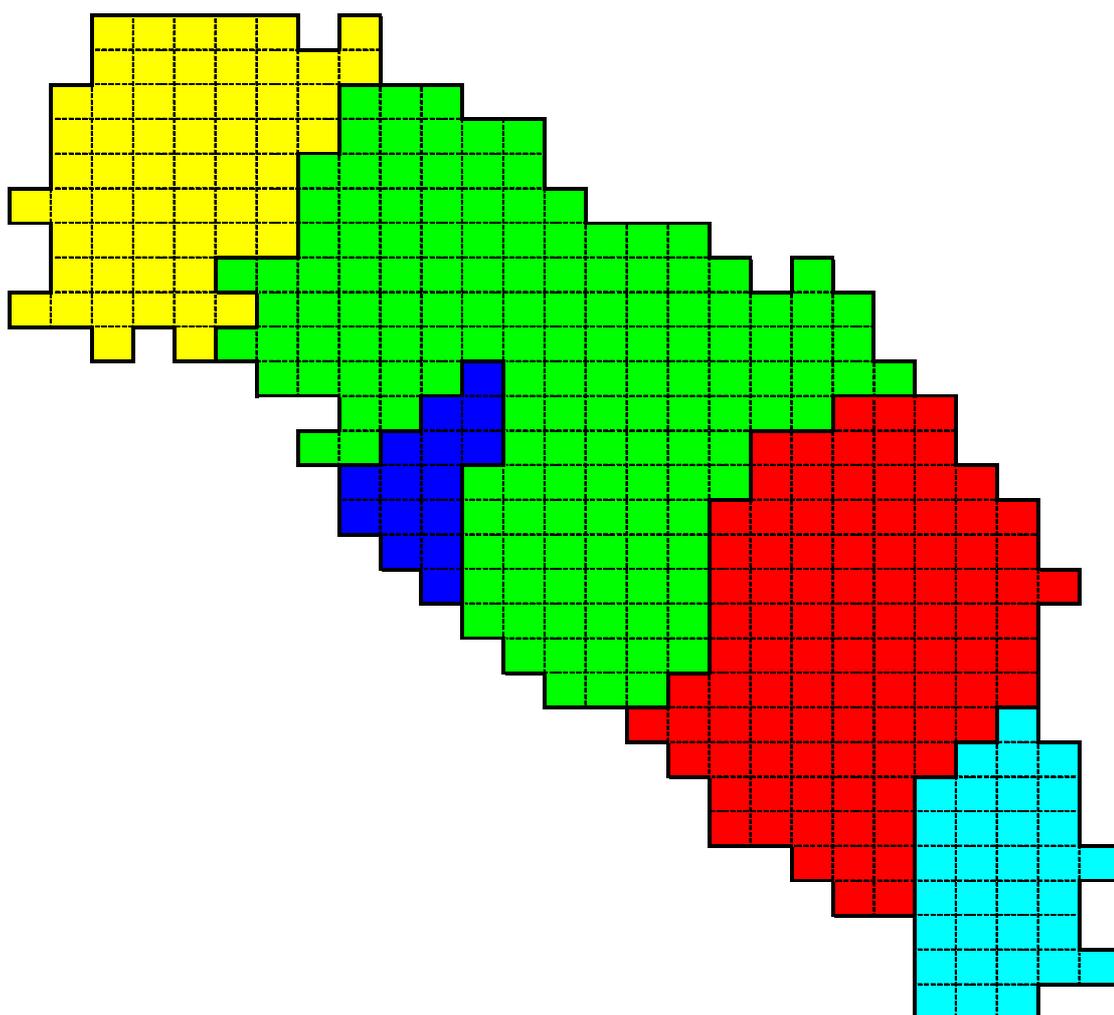
precipitação diária média em área para cada sub-bacia foi definida utilizando-se um aplicativo desenvolvido pelo consórcio Themag/GCAP/NTS/Informática para gerar esta informação em ambiente operacional, ou seja, mesmo em presença de falha de informações de alguns postos, e integrado ao GDH de Itaipu. Este procedimento está descrito em TGNI (1990), e consiste, basicamente, na aplicação de uma versão simplificada do método de Thiessen a cada instante de tempo, com a configuração de postos pluviométricos disponíveis a cada instante. A simplificação do método ocorre na definição da bacia e suas sub-bacias como um conjunto de quadrículas, de dimensão fixa para cada aplicação mas definível pelo usuário, utilizando-se para isto um sistema de coordenadas locais, também definível pelo usuário. A localização dos postos é fornecida no sistema de coordenadas locais. O aplicativo calcula a precipitação média para uma sub-bacia atribuindo a cada uma de suas quadrículas, para cada instante de tempo, a medida do posto pluviométrico disponível mais próximo e calculando a média da precipitação das quadrículas. O sistema não possui nenhum mecanismo de restrição aos postos a serem utilizados para o cálculo das médias, como, por exemplo, para evitar que um posto muito distante de uma quadrícula seja utilizado para definir seu valor de precipitação, o que faz necessário que este controle seja exercido externamente. Neste trabalho, o controle implementado foi o do número mínimo de postos pluviométrico.

Embora a bacia do rio Ivaí já estivesse modelada para a geração de precipitação média no sistema de previsão de vazões em operação em Itaipu, o mesmo teve que ser adaptado, já que o modelo foi gerado toda a bacia incremental de Itaipu, e não apenas para a do Ivaí, e não tem definidas as sub-bacias com exutória nos postos de Quinta do Sol, no rio Mourão, e Tereza Cristina, sub-bacia de cabeceira do Ivaí. Por outro lado, dado que o conjunto de postos pluviométricos utilizados foi mantido, foi possível reutilizar a localização destes postos definida em coordenadas locais. Assim, para a geração da série de precipitações médias diárias na bacia foi necessário montar uma nova configuração de bacia apenas com a bacia do rio Ivaí e incluir nesta

configuração as sub-bacias do rio Mourão e da cabeceira do Ivaí. Um esquema da configuração resultante é apresentado na figura 25.

Para que tanto os dados das novas séries de precipitação como as médias nas novas bacias pudessem ser utilizados sem comprometer os dados já disponíveis, gerados pela operação diária do sistema, foi necessário criar, no GDH, novas variáveis para todos os dados de entrada e saída, importar os dados das novas séries para estas variáveis e, ao final do processo, exportar os dados de precipitação média. Embora o GDH disponha de recursos de importação e exportação de dados, foi necessário gerar um aplicativo que preparasse os dados das novas séries de precipitação no formato aceito pelo banco de dados.

FIGURA 25 – REPRESENTAÇÃO DA BACIA DO IVAÍ PARA CÁLCULO DE PRECIPITAÇÃO MÉDIA.



Gerada a configuração de sub-bacias, criadas as variáveis de entrada e saída no banco de dados e importados os dados das novas séries de precipitação, foram calculadas as precipitações médias diárias em área para as sub-bacias:

- a) do rio Mourão, com o posto de Quinta do Sol como exutória;
- b) de cabeceira do rio Ivaí, com o posto de Tereza Cristina como exutória;
- c) entre os postos de Tereza Cristina, a montante, e Ubá do Sul;
- d) entre os postos de Ubá do Sul e Quinta do Sol, a montante, e Porto Paraíso do Norte;
- e) entre os postos de Porto Paraíso do Norte, a montante, e Novo Porto Taquara.

As séries de precipitação média por sub-bacias resultantes foram consistidas apenas por inspeção visual e por comparação com as séries de vazões, conforme descrito no item 6.7.

Tanto os dados básicos utilizados como os resultantes dos processamentos estão registrados no CD que forma anexo deste documento.

6.5 OBTENÇÃO DAS SÉRIES DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL

O modelo 3R, como de resto grande número de modelos conceituais de transformação chuva-vazão, implementa dois mecanismos básicos de retirada do volume de água precipitada da bacia: o escoamento, como vazão, pela exutória e a retirada pela evapotranspiração. Assim, a evapotranspiração é um componente importante no balanço de volumes da bacia. A formulação do modelo 3R indica a necessidade de disponibilidade de informações de evapotranspiração para cada intervalo de cálculo. No entanto, em termos práticos, três fatos se sobrepõe à

necessidade deste nível de detalhamento dos dados de evapotranspiração:

- a) a evapotranspiração é mecanismo de atuação contínua na bacia e sua importância em termos de balanço de volumes se dá por este fato. Durante eventos de cheias, foco de interesse de muitos sistemas operacionais de previsão, as variações de evapotranspiração não são de ordem a alterar significativamente o balanço de volumes destes eventos;
- b) não existe medição direta de evapotranspiração, já que a mesma depende tanto de condições atmosféricas como da disponibilidade de água no solo e do tipo, localização, extensão e desenvolvimento da cobertura vegetal da bacia. Estas variáveis, no estado atual da arte, não são mensuráveis, para a escala da bacia e para um período curto de tempo. As técnicas de sensoriamento remoto poderão produzir, no futuro, estimativas desta variável a partir de imagens de satélite, ficando em aberto a questão de seu custo e atualidade (disponibilidade para uso operacional). Desta forma, atualmente a informação de evapotranspiração é calculada, para a escala da bacia, apenas por balanço hídrico de longos períodos de dados e ainda tomando o cuidado de adotar-se períodos em que alguma hipótese possa ser feita sobre o volume de água armazenada no solo;
- c) ainda que a evapotranspiração efetivamente ocorrida estivesse disponível para cada instante de cálculo, a sua inclusão nesta forma em sistemas operacionais de previsão implicaria na necessidade de prever esta variável para o horizonte de trabalho do modelo, introduzindo uma complicação adicional.

Em função das razões acima apresentadas (maior importância em longo prazo, pequena influência em eventos de cheia, indisponibilidade operacional da informação e complicação para sua previsão no horizonte de trabalho do modelo), a

informação sobre evapotranspiração para cada instante de cálculo é estimada, por relações matemáticas, a partir da evapotranspiração potencial média de longo período, geralmente mensal. A evapotranspiração potencial é definida como a máxima evapotranspiração que ocorreria na bacia no caso de disponibilidade hídrica ilimitada. É gerada de dados disponíveis em estações meteorológicas, seja por avaliações diretas (tanque evaporimétrico, evaporímetro de Pichet, etc.) seja por relações mantidas com outros dados meteorológicos, como insolação e ventos (relações de Penman, Penman-Monteith, etc.).

Para o presente trabalho, adotou-se como informação básica a evapotranspiração potencial mensal média de longo período calculada por SENTELHAS et alli (1999) aplicando o método de Thornthwaite para um grande número de postos meteorológicos do Brasil. Os períodos de disponibilidade de dados para os postos selecionados para este trabalho (ver item 6.3 para critérios de seleção) estão relacionados na tabela 6.

As evapotranspirações médias em área para cada sub-bacia foram obtidas por área de influência de cada posto (mesmo princípio do método de Thiessen para precipitações), utilizando-se o mesmo aplicativo usado para geração das precipitações médias (vide item 6.4). Para isto, foi necessário definir as coordenadas de todos os postos no sistema de coordenadas locais, criar as variáveis de entrada e saída no GDH, formatar devidamente e importar as variáveis de entrada (evapotranspirações médias mensais de longo termo para cada uma das estações) para este sistema e exportar as variáveis de saída (evapotranspiração média de longo termo e média em área).

Dado o pequeno número de dados de entrada disponíveis e o fato de todas as séries estarem completas e coerentes, temporalmente e entre si, os valores finais de evapotranspiração mensal média em área obtidos não sofreram nenhum tipo de consistência.

Tanto os dados básicos utilizados como os resultantes dos processamentos estão registrados no CD que forma anexo deste documento.

6.6 OBTENÇÃO DAS SÉRIES DE VAZÕES

6.6.1 Composição das Séries de Cotas

Para a obtenção das séries de vazão para este estudo, foram coletados todos os dados de cotas e vazões médias diárias dos postos fluviométricos de interesse disponíveis no Hidroweb (banco de dados hidrometeorológicos da ANA acessível via Internet <http://hidroweb.ana.gov.br>), no GDH (banco de dados hidrometeorológicos operacional da Itaipu Binacional) e no Hymos (banco de dados em implantação em Itaipu, em substituição ao GDH). A disponibilidade de dados nestas fontes é apresentada na tabela 8. Assim como os dados de precipitação, os dados de cotas e vazões médias referem-se às médias das leituras das 7 horas de um dia às 7 horas do dia anterior, exclusive.

TABELA 8 – DISPONIBILIDADE INICIAL DE DADOS PARA OS POSTOS FLUVIOMÉTRICOS DA BACIA DO RIO IVAÍ.

POSTO	DATA	VAZÃO			COTA		
		GDH	Hymos	ANA	GDH	Hymos	ANA
Tereza Cristina	Inicial	07/08/1956	-----	07/08/1956	07/08/1956	07/08/1956	07/08/1956
	Final	31/12/1987	-----	30/09/2002	30/04/2004	30/04/2004	30/11/2001
Ubá do Sul	Inicial	01/01/1968	01/01/1968	01/01/1971	16/04/1967	16/04/1967	01/01/1971
	Final	07/05/2004	06/05/2004	31/12/2002	21/05/2004	06/05/2004	31/12/2002
Porto Paraíso do Norte	Inicial	14/03/1953	14/03/1953	14/03/1953	01/01/1960	01/01/1960	14/03/1953
	Final	07/05/2004	06/05/2004	30/11/2002	21/05/2004	06/05/2004	31/12/2001
Novo Porto Taquara	Inicial	18/07/1974	18/07/1974	18/07/1974	18/07/1974	18/07/1974	18/07/1974
	Final	30/04/2004	30/04/2004	31/10/2002	30/04/2004	30/04/2004	31/12/2001
Quinta do Sol	Inicial	-----	-----	08/08/1974	-----	03/01/2002	08/08/1974
	Final	-----	-----	30/09/2002	-----	30/04/2004	31/12/2001

Inicialmente, as séries de cotas de postos presentes tanto no GDH e como no Hymos foram comparadas, para verificar se no processo de transferência de dados de

uma base para outra houve algum melhoramento nas séries (complemento, consistência, etc.). Esta análise indicou que estas séries são idênticas e, por isto, adotou-se como referência a série do GDH, fonte primária da informação.

Na seqüência, foram comparados, tanto numérica como graficamente, os dados de cota obtidos do GDH e os obtidos da ANA. Este comparação teve como objetivo verificar o grau de similaridade entre os dados das fontes, com vistas à sua utilização para composição de uma série mais completa. Os gráficos básicos utilizados para esta verificação, de plotagem dos dados de uma fonte contra a outra e plotagem simultânea das séries, são ilustrados pelas figura 26 e 27, obtidas para o posto de Tereza Cristina. Verificada a compatibilidade entre as séries, dados das séries da ANA foram utilizados para preencher ou estender as séries de cotas do GDH/Hymos. As séries do GDH/Hymos foram utilizadas como base porque foram as utilizadas para a calibração dos modelos disponíveis em Itaipu (Preca e Sacramento), que permitirá sua comparação com o modelo 3R com atualização de variáveis de estado.

FIGURA 26 – VERIFICAÇÃO DA SIMILARIDADE ENTRE SÉRIES – GRÁFICO DA RELAÇÃO CRUZADA.

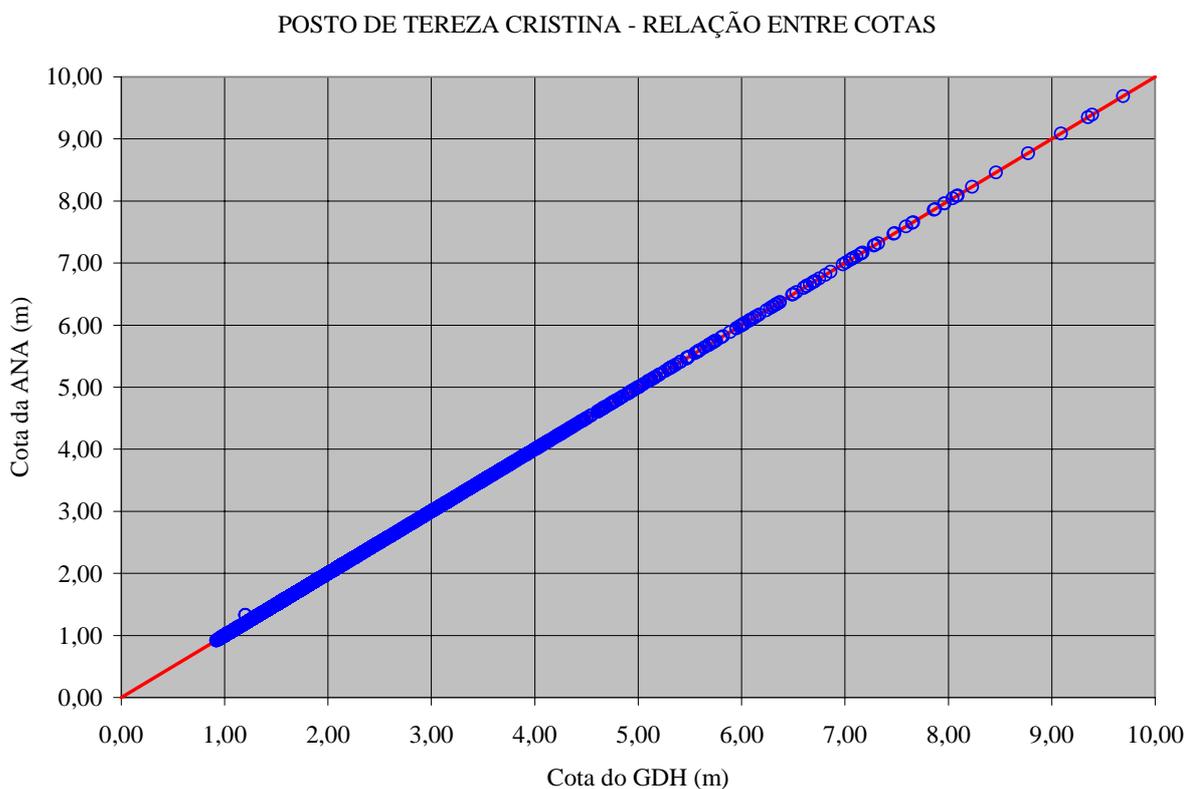
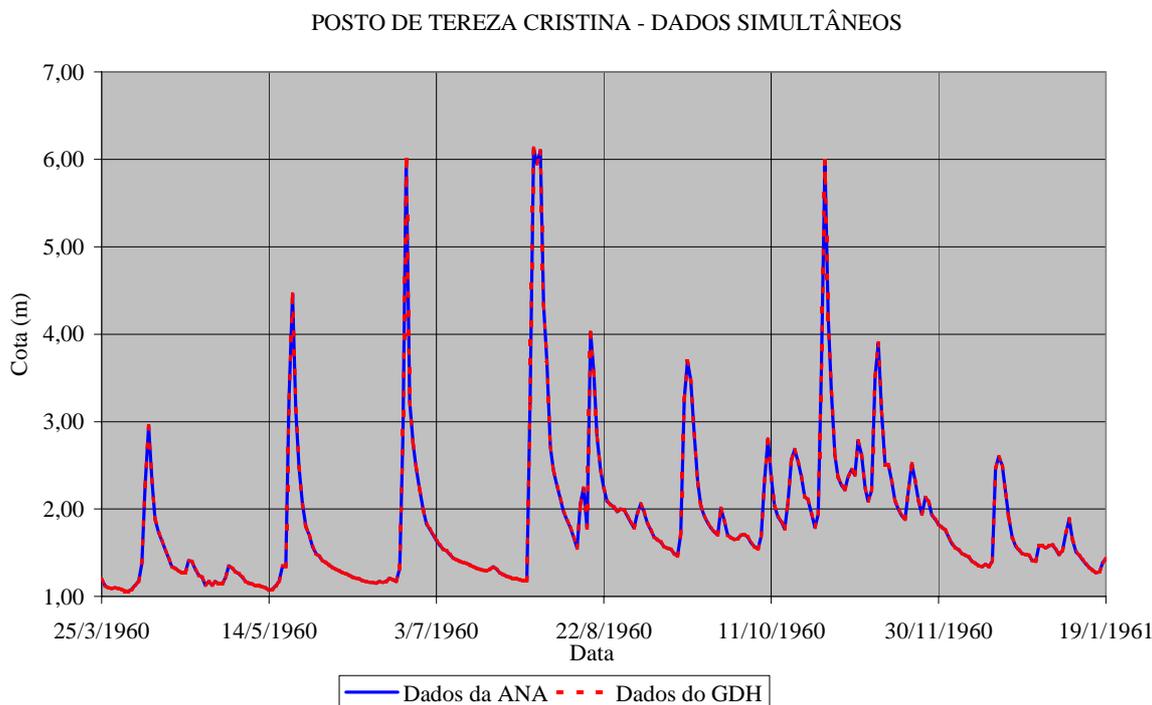


FIGURA 27 – VERIFICAÇÃO DA SIMILARIDADE ENTRE SÉRIES – GRÁFICO DE VARIÁVEIS SIMULTÂNEAS.



Adicionalmente, verificou-se, para todos os postos, a existência de dados presentes nas séries de vazões, mas não nas de cotas. Esta situação pode ser encontrada em séries que sofreram alguma consistência, geralmente realizada sobre dados de vazão. Onde isto ocorreu, os dados de vazão foram transformados em dados de cota, utilizando-se as curvas de descarga disponíveis no início do estudo nas respectivas fontes, e inseridos nas séries de cotas.

O resultado deste processo está ilustrado na figura 28, que mostra a disponibilidade inicial de dados de cota e vazão do GDH e da ANA e a disponibilidade final da série composta para o posto de Novo Porto Taquara. A tabela 9 mostra os períodos finais de dados de cota disponíveis para cada posto e a tabela 10 apresenta o índice de falhas remanescente do processo de complemento das séries de cotas. Nela é possível concluir que o processo de complementação de séries pode ser considerado um sucesso, tendo em vista o pequeno número de falhas de dados remanescente nos respectivos períodos de cada série.

FIGURA 28 – DISPONIBILIDADE DE COTAS DO POSTO DE NOVO PORTO TAQUARA.

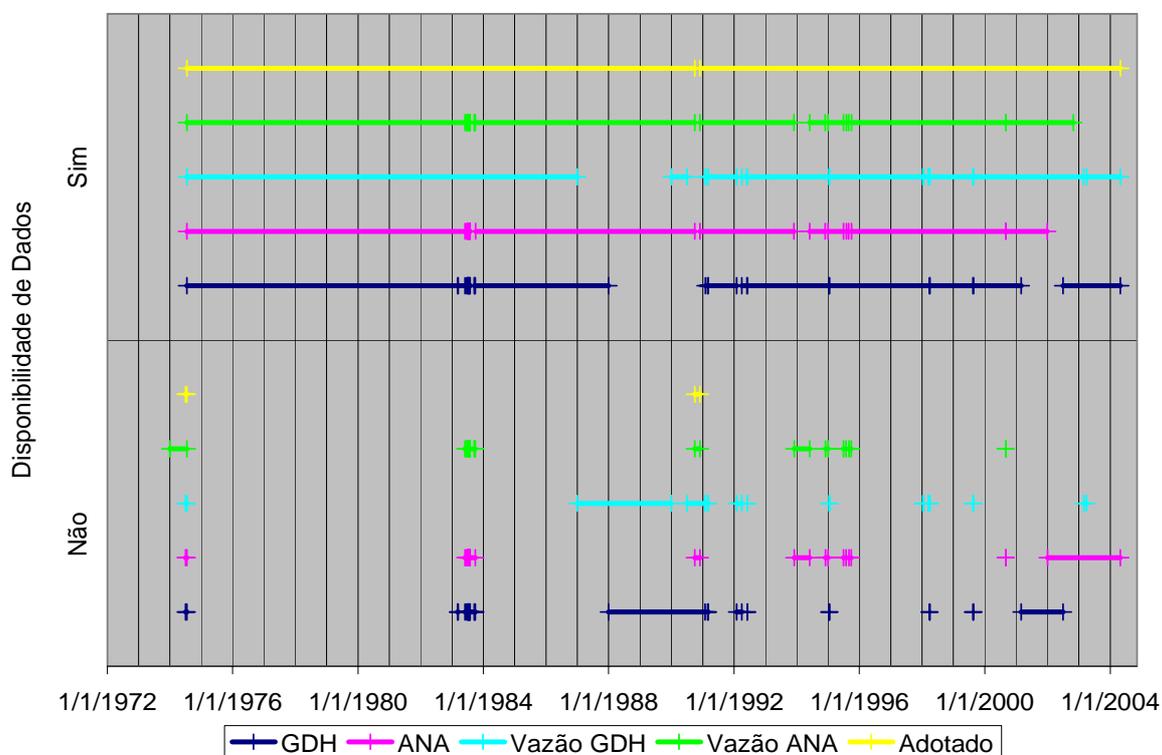


TABELA 9 – DISPONIBILIDADE FINAL DE DADOS FLUVIOMÉTRICOS DA BACIA DO RIO IVAÍ.

POSTO	DISPONIBILIDADE DE COTA	
	Início	Fim
Tereza Cristina	07/08/1956	30/04/2004
Ubá do Sul	16/04/1967	21/05/2004
Porto Paraíso do Norte	14/03/1953	21/05/2004
Novo Porto Taquara	18/07/1974	30/04/2004
Quinta do Sol	08/08/1974	30/04/2004

As séries de cota resultantes do processo de complementação foram submetidas a um processo de inspeção, com a finalidade de realização de uma primeira etapa de consistência visual, olhando-se cada série isoladamente. Neste processo, os

dados inequivocamente errados ou eventuais problemas com a composição das séries foram corrigidos, tomando-se em conta apenas os dados de cota no entorno dos pontos ou trechos problemáticos.

TABELA 10 – ÍNDICE DE AUSÊNCIA DE DADOS NAS SÉRIES COMPOSTAS DE COTAS.

POSTO	DIAS NA SÉRIE	DIAS PRESENTES		DIAS AUSENTES	
		Total	%	Total	%
Tereza Cristina	17.434	17.231	98,84	203	1,16
Ubá do Sul	13.551	13.526	99,82	25	0,18
Porto Paraíso do Norte	18.697	18.697	100,00	0	0,00
Novo Porto Taquara	10.880	10.819	99,44	61	0,56
Quinta do Sol	10.859	10.798	99,44	61	0,56

Numa segunda etapa, os dados de cotas foram verificados por inspeção visual da plotagem simultânea das séries, tanto na discretização diária como na forma de médias móveis de período maior, com duplo propósito:

- a) para consistência das séries de cotas dos postos, pela verificação da compatibilidade de comportamento entre postos, com a eliminação ou correção por especialista dos valores manifestamente errados;
- b) para identificação de mudanças de comportamento nas séries, que podem indicar tanto problemas em períodos contínuos das séries como mudanças na seção de réguas do postos, informações importantes para definir os períodos de validade das curvas-chave.

6.6.2 Definição de Procedimento para Geração de Curva de Descarga

Os postos de fluviométricos de Quinta do Sol e Tereza Cristina não dispunham de relações cota x vazão nos bancos de dados de Itaipu e as medições realizadas nestes postos ainda não haviam sido utilizadas para a verificação das curvas-chave de outras fontes ou definição de novas. Além disto, apesar do assunto ser tratado internamente à Itaipu há alguns anos, o processo para definição de curvas-chave ainda não havia sido padronizado e registrado, sendo realizado por cada funcionário da área de acordo com sua experiência e gosto pessoal. Também não se dispunha de ferramenta que facilitasse a elaboração destas curvas de acordo com um procedimento padrão. Desta forma, tanto as análises a serem realizadas como os resultados registrados em relatórios variavam de acordo com o encarregado de realizar a tarefa. Em função da necessidade de definir curva-chave para dois postos do estudo e de verificar as curvas existentes para o restante dos postos, face às novas medições de vazão disponíveis, foi solicitado pela gerência da Divisão de Estudos Hidrológicos e Energéticos (OPSH.DT) da Itaipu Binacional que uma proposta de método para definição de curva-chave fosse elaborada e testada como parte do trabalho desta dissertação. Esta proposta teria a dupla função de estabelecer um padrão de processamento e análise para as curvas de descarga e de servir de base para a especificação de uma ferramenta de automatização do processo. Apenas como complemento de referência, a OPSH.DT é a área de hidrologia operacional da Itaipu, órgão do Departamento de Operação de Sistema (OPS.DT), Superintendência de Operação (OP.DT), Diretoria Técnica (DT).

O procedimento adotado não apresenta inovações na teoria que embasa a definição de curvas-chave, mas apresenta contribuições na mecânica de implementação dos métodos convencionais e em seu encadeamento que se considera que podem servir para a melhoria do processo.

O procedimento proposto foi elaborado aproveitando-se a bibliografia existente, a experiência do setor de hidrologia de campo da OPSH.DT, tanto no

processo de elaboração das curvas quanto no de medição e cálculo de medição de vazão, e na experimentação da aplicação do processo. Para permitir esta experimentação, o processo foi aplicado para a redefinição das curvas de descarga de todos os postos fluviométricos utilizados neste trabalho.

O processo detalhado de definição de curvas-chave encontra-se em fase de documentação em Itaipu. Na seqüência será apresentado um resumo do procedimento proposto, ressaltando-se o que se considera que possa ser uma contribuição para o tema definição de curvas-chave. O procedimento se desenvolve nos seguintes passos:

a) **levantamento de dados:**

Nesta etapa espera-se como resultado o acesso a todos os dados disponíveis que possam ser úteis para definir curvas de descarga. Estes dados podem ser:

- **convencionais:** informações usualmente utilizadas no processo, como seções topobatimétricas, curvas de descarga anteriores de todas as fontes disponíveis, ficha descritiva do posto, séries de medições de vazão com o maior detalhamento possível (data, local, equipe, equipamento, etc.) e dados de cotas e vazões. Estas informações deveriam estar disponíveis, também, para os postos a montante e jusante do posto sendo avaliado, para que possam servir de fonte de apoio e validação;
- **complementares:** entrevistas com pessoal das equipes de campo e escritório, visita ao posto, entrevista com moradores locais, informações do rio e do trecho onde se localiza o posto. Em função da crônica precariedade das informações convencionais, o procedimento sugerido enfatiza a necessidade de levantar e registrar informações de fontes não convencionais, como única forma de minimizar o impacto das informações inexistentes ou incorretas;

- **derivados:** informações geradas durante o processamento das informações levantadas anteriormente e que devem ser registradas e utilizadas, como: análise das séries iniciais de cotas, análise das séries iniciais de vazão, análise das seções topobatimétricas disponíveis, derivação de curvas de descarga a partir dos dados de cota e vazão;

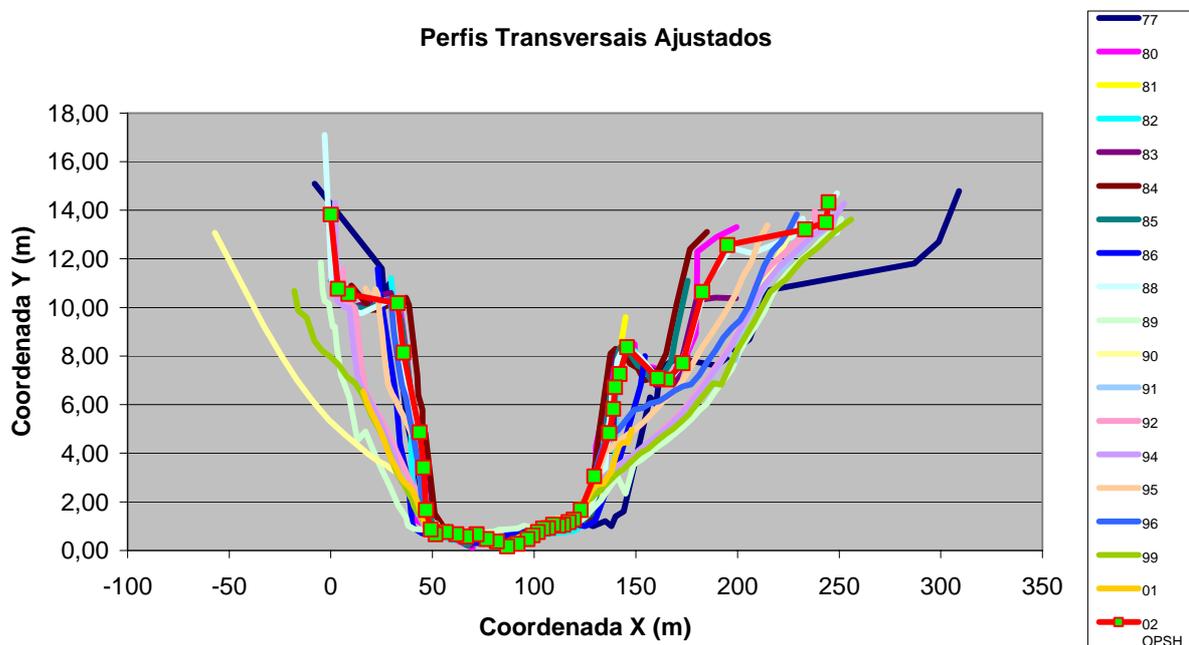
b) **verificação das seções topobatimétricas:**

Esta etapa do processo tem como objetivos identificar perfis transversais válidos e seu período de validade, definir características geométricas válidas para cada período e identificar datas de possíveis mudanças de seções, que podem gerar alterações nos resultados das séries de cotas e vazões, de medições de descarga e de curvas-chave.

Espera-se, como resultados desta etapa, a definição de uma seção representativa para cada período do histórico do posto, cálculo das características geométricas básicas (cota, largura, perímetro e área) e derivadas (raio hidráulico, $SR^{1/2}$, $R^{2/3}$) destas seções e indicativos de datas para mudanças de curvas de descarga em função das mudanças das seções, recomendações para a realização de trabalhos de campo e solicitações de novos levantamentos de campo, como, por exemplo, extensão do levantamento topográfico até a cota máxima de extrapolação.

Como ilustração do processo, apresenta-se na figura 29 as seções topobatimétricas disponíveis para o posto de Tereza Cristina, onde podem ser identificados dois tipos de seção, representados pelas medições de 1994 da Agência Nacional de Águas (ANA) e de 2002 da OPSH.DT. Os procedimentos propostos foram formalizados provisoriamente em uma planilha de cálculo, de nome “Base Verificacao Perfil.xls”, que dispõe, como recurso de automação, de macros para plotagem de todos os perfis e cálculo das tabelas de elementos geométricos;

FIGURA 29 – SEÇÕES TOPOBATIMÉTRICAS DO POSTO DE TEREZA CRISTINA.



c) verificação das medições de vazão:

Nesta etapa do processo propõe-se a inspeção de todos os dados disponíveis de medição de vazão, com os objetivos de identificar problemas com as medições, equipamentos, processos ou fontes envolvidos, eliminar das etapas seguintes do processo aquelas consideradas não confiáveis (com grande discrepância, sem justificativa, com o conjunto de dados) e definir períodos de validade para o estabelecimento de curvas de descarga.

O procedimento de eliminação busca retirar dos processos seguintes aquelas medições de vazão que não seriam levadas em conta no caso de realização de um ajuste manual, ou seja, o procedimento força a explicitação, por parte do profissional, das medições que ele considerou relevantes para a definição das curvas-chave e quais desconsiderou, tornando, também, mais viável a utilização posterior de métodos de ajuste de curvas. Registra-se que esta proposta causou forte reação da equipe de Itaipu,

não acostumada a explicitar decisões subjetivas tomadas ao longo do processo.

Esclarece-se que a eliminação de medições deve ser aplicada apenas para faixas de medições em que haja volume suficiente de dados para permitir identificar uma medição com problemas e nunca onde os dados são raros, como usualmente ocorre para as vazões mais altas. Como resultados esperados desta etapa temos: conjunto de medições a ser usado para definição das curvas de descarga, recomendação dos períodos para os quais é necessário definir curvas de descarga distintas, recomendação de verificação de medições específicas, recomendações para melhorias dos procedimentos de campo e de escritório e recomendações de verificação de equipamentos.

Os procedimentos propostos foram formalizados provisoriamente em uma planilha de cálculo, de nome “Base Verificacao Medicoes.xls”, que dispõe, como recurso de automação, de macros para plotagem de conjuntos de dados por período e para ajuste de referência de cotas de levantamentos topobatimétricos de seções, para permitir plotagem de comparação. Este processo é realizado com forte utilização de gráficos, forma também de apresentação dos resultados. São gerados e utilizados no processo os seguintes gráficos:

- relações cota x área da seção e cota x área da medição;
- relação área da seção x área da medição;
- relação cota x vazão para todas as medições, classificadas por fonte, por tipo de medição, por aparelho, por sentido (ascendente ou descendente) e intensidade (fraca ou forte) da variação de vazão no rio no período que antecede e segue a medição (variação anterior e posterior);
- relações cota x velocidade da medição e cota x velocidade média;
- por intervalos de datas: relações cota x vazão, cota x área da medição, vazão x área da medição e da seção, vazão x velocidade, calculada pela área da medição pela e área da seção;

- relação cota x vazão, identificando as medições mantidas e eliminadas;
- relação cota x vazão identificando as medições mantidas, para cada período distinto identificado para as curvas de descarga.

Como ilustração, apresenta-se, para Porto Paraíso do Norte, as figuras 30, de medições de vazão por período, e 31, de medições eliminadas e mantidas;

d) verificação das curvas-chave existentes:

O objetivo desta etapa é de analisar todas as curvas-chave disponíveis, de todas as fontes e em suas diversas formas (tabelas ou equações), inclusive aquelas que puderem ser derivadas das séries de cotas e vazões disponíveis para o posto, e selecionar aquelas que devem ser utilizadas nas etapas posteriores de elaboração ou revisão das curvas-chave.

O processo busca a eliminação de curvas redundantes e as com erros manifestos, como forma de reduzir o volume de informação a ser utilizado nas outras etapas. A obtenção das curvas-chave a partir dos dados tem o objetivo de verificar a aplicação efetiva, às séries de cotas, das relações disponíveis em forma de tabelas e equações, tanto em termos de valores da relação cota x vazão como em termos de período de validade de cada relação, ou de deduzir as relações utilizadas para geração das séries de vazão quando as relações cota x vazão não estiverem disponíveis. Em ambas as condições, a análise efetuada mostrou-se útil no presente trabalho, já que conseguiu-se reproduzir curvas de descarga de postos dos bancos de dados de Itaipu em que dispunha-se somente de dados de cotas e vazões, mas não as relações que geraram estas vazões, conseguiu-se identificar a utilização de uma curva-chave, em um período de dados de um posto, diferente da informada pela entidade responsável e conseguiu-se identificar, em mais de um posto, diferença entre o período de validade das curvas de descarga e sua efetiva aplicação para geração das séries de vazão.

FIGURA 30 – PORTO PARAÍSO DO NORTE - MEDIÇÕES DE VAZÃO POR PERÍODO.

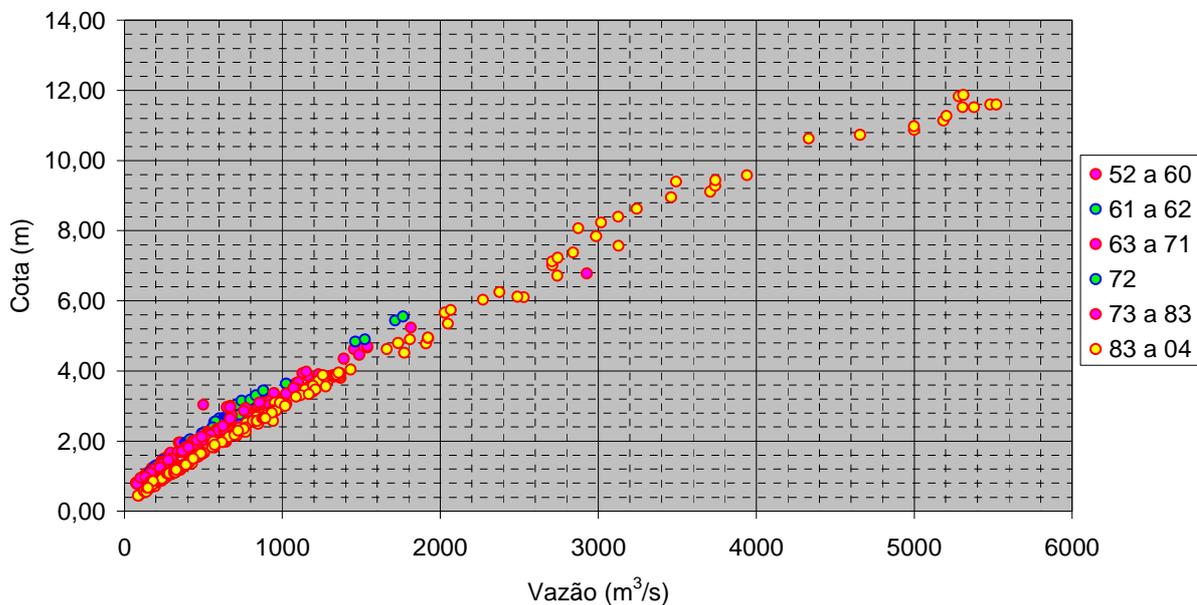
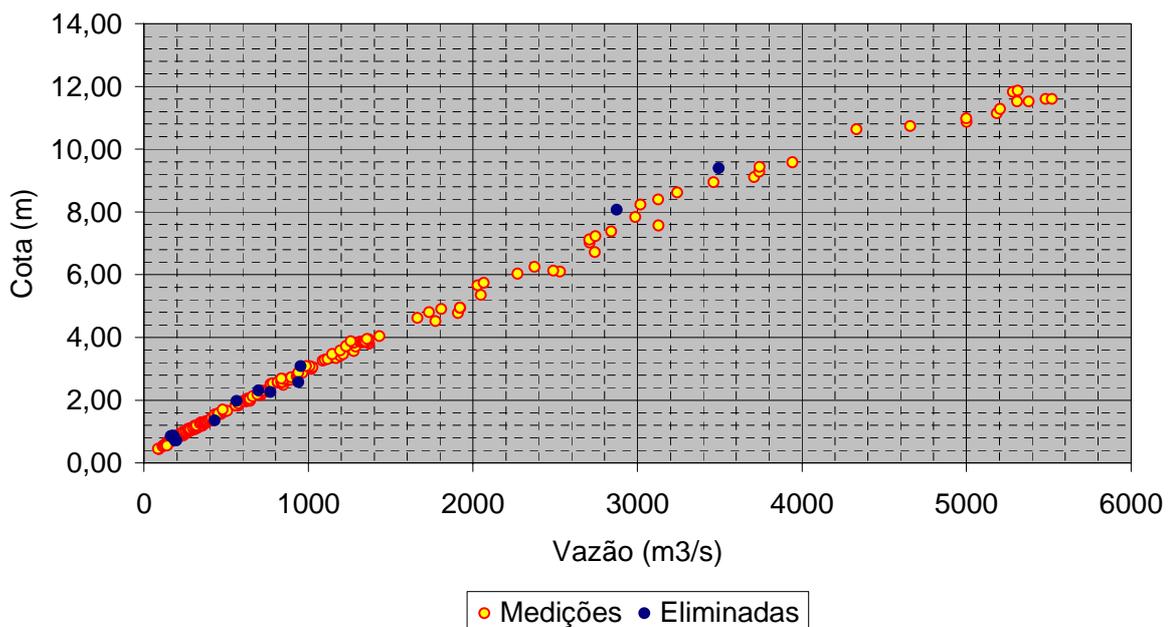


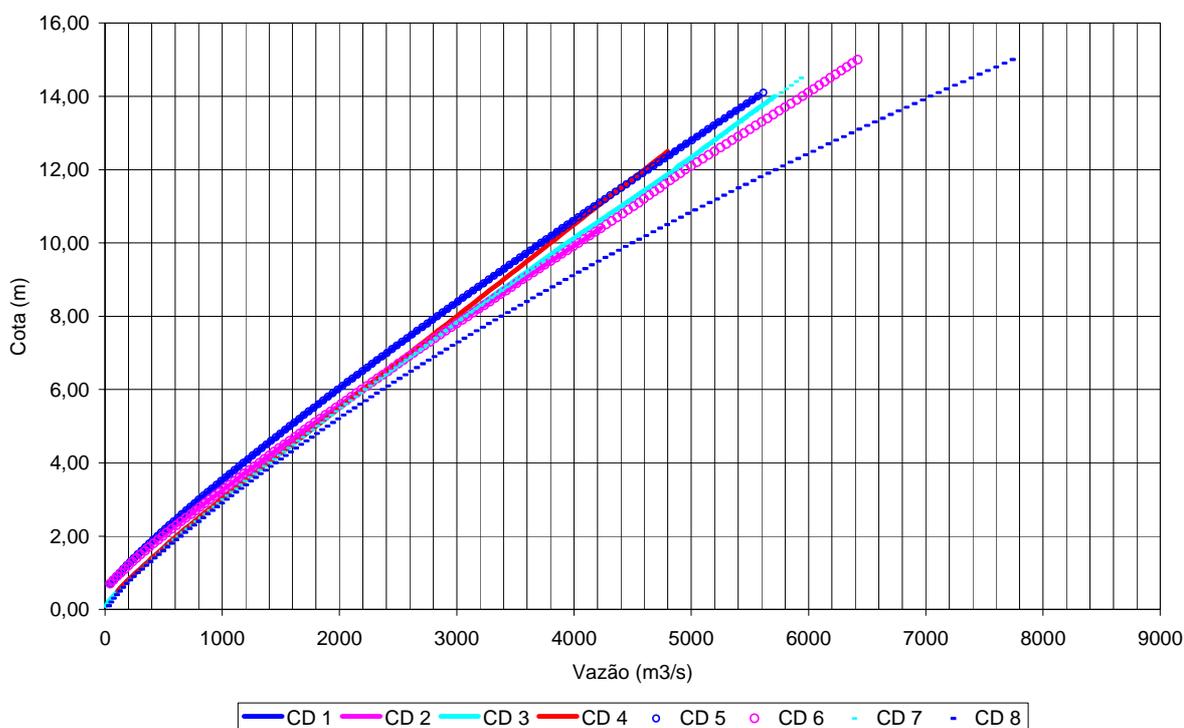
FIGURA 31 – PORTO PARAÍSO DO NORTE - MEDIÇÕES DE VAZÃO MANTIDAS E ELIMINADAS - PERÍODO 1983 A 2004.



Nesta análise também foi possível identificar os postos que sofreram processo parcial de consistência (consistência de vazões, mas não das cotas correspondentes). Os procedimentos para obtenção das curvas-chave a partir dos dados necessitaram do emprego em alto grau de intervenção humana e mostraram-se mais difíceis que o inicialmente suposto, em função dos erros nos dados e complexidade de combinações de curvas-chave. Assim, o tema mostrou-se promissor para maiores investigações.

Uma das análises que deve ser feita nesta etapa é a de compatibilidade dos períodos de validade das curvas disponíveis e aqueles identificados a partir dos dados de medição de vazão. Períodos muito discrepantes entre si devem gerar uma revisão das avaliações efetuadas. Os procedimentos propostos foram formalizados provisoriamente em uma planilha de cálculo, de nome “Base Verificacao CD.xls”, que dispõe, como recurso de automação, de macro para definição de pares únicos da relação cota x vazão e do período em que este par é encontrado na série de dados. A figura 32 apresenta exemplo da análise das curvas de descarga disponíveis.

FIGURA 32 – COMPARAÇÃO DE CURVAS DE DESCARGA DO POSTO DE PORTO PARAÍSO DO NORTE.



e) extrapolação das curvas-chave:

Esta etapa tem o objetivo de obter as extrapolações inferior e superior da curva de descarga para cada período identificado como representado por uma curva distinta. No processo, é realizada uma verificação mais detalhada dos dados de medição.

Obtém-se como resultado desta etapa a proposta de extrapolação superior e inferior para cada curva-chave identificada (diversos períodos). Os métodos empregados foram os tradicionais, conforme apresentado em JACCON e CUDO (1989) e SANTOS et alli (2001): logarítmica, Stevens, área x velocidade e área x velocidade por composição de seção. O resultado desta etapa é a definição das extrapolações superior e inferior das curvas. As sugestões de melhoria do processo propostas nesta etapa dizem respeito apenas à forma de implementação e utilização destes métodos e podem ser assim resumidas:

- definição das relações potenciais ($y = a x^b$) na escala decimal, e não na escala logarítmica, conforme processamento tradicional. A sugestão deve-se ao fato da mudança de escala distorcer a importância relativa dos desvios, dando um peso maior para os desvios em valores menores. A manutenção da escala decimal permite um controle melhor dos desvios das relações definidas. Os recursos atuais de computação permitem prescindir da utilização da escala logarítmica para tratar o problema, o que não ocorria quando do processamento manual dos dados;
- utilização, quando conveniente ou necessário, de esquema de definição de relações representativas de conjuntos de dados por um procedimento intermediário entre o ajuste matemático de funções e o traçado puramente manual da relação, que consiste na definição manual de funções matemáticas, descrito em mais detalhes adiante;

- como recomendações práticas: se possível, realizar a extrapolação superior e inferior de forma a cobrir toda a faixa de medições, como forma de obtenção de uma primeira aproximação da curva-chave; definir cotas de extrapolação com valores superiores aos já observados, com a finalidade de evitar problemas no uso operacional das curvas-chave; utilizar medições de postos de jusante ou montante trasladadas, quando a diferença de faixa de cobertura das medições é muito grande.

No procedimento de ajuste manual de relações matemáticas, as relações são estabelecidas definindo-se tramos de ajuste, cada um deles com uma formulação matemática (polinomial, exponencial, potencial, logarítmica, etc.) determinada univocamente por um conjunto de pontos, denominados pontos de apoio. Por exemplo, um polinômio de 3º grau é definido univocamente por quatro pontos, uma equação potencial por dois, etc. Os pontos de apoio e as funções definidas por eles são graficadas sobre o conjunto de dados a representar e a relação é alterada deslocando-se, diretamente no gráfico, os pontos de apoio. Este procedimento foi implementado utilizando-se recurso disponível na planilha de cálculo Excel, de alterar valores de pontos em gráficos através de seleção e arraste. Quando as relações necessitam da definição de um valor de escala (como a cota h_0 , de referência, para a aproximação potencial de curvas-chave) o valor é definido por tentativas, com o auxílio de macros específicas desenvolvidas para cada gráfico e função. O processo é ilustrado para o posto de Porto Paraíso do Norte. Na figura 33, uma função potencial é definida para a extrapolação inferior da curva de descarga através de pontos de apoio (losangos vermelhos). A figura 34 ilustra o deslocamento gráfico (selecionar e arrastar) do ponto de apoio à esquerda para melhorar a representatividade da função e na figura 35 aparece o resultado final do processo

FIGURA 33 – DEFINIÇÃO INICIAL DA RELAÇÃO DE AJUSTE, ATRAVÉS DE PONTOS DE APOIO.

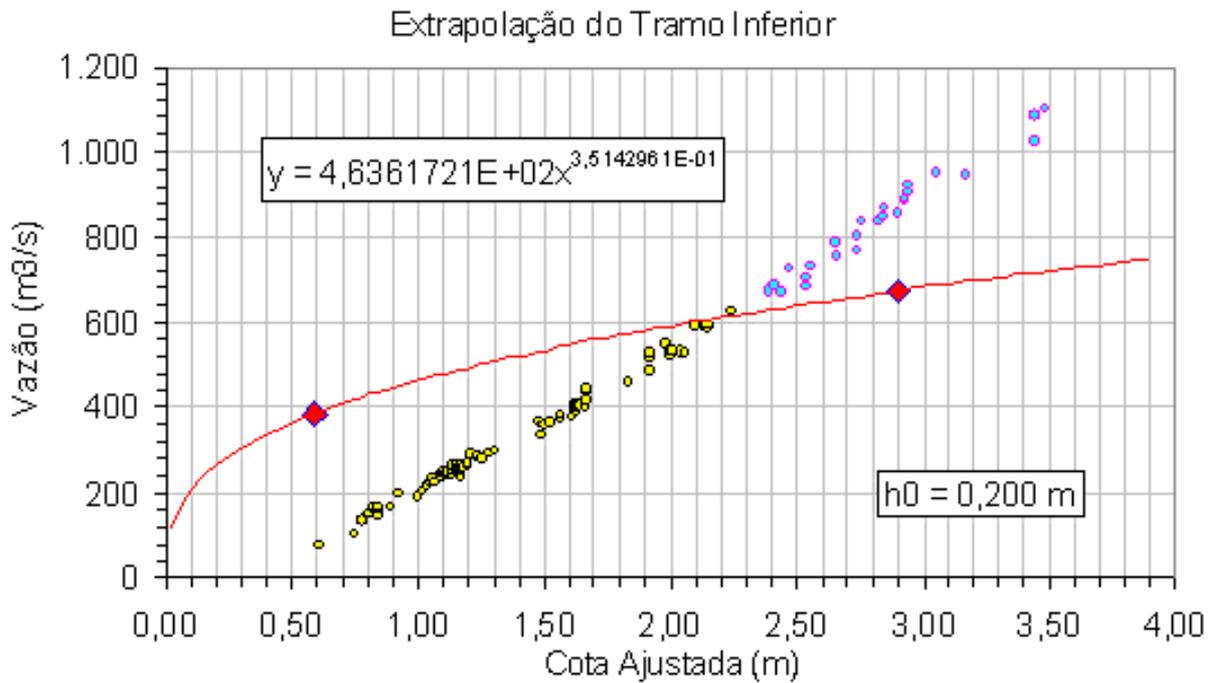


FIGURA 34 – MODIFICAÇÃO DE AJUSTE PELA ALTERAÇÃO GRÁFICA DOS PONTOS DE APOIO.

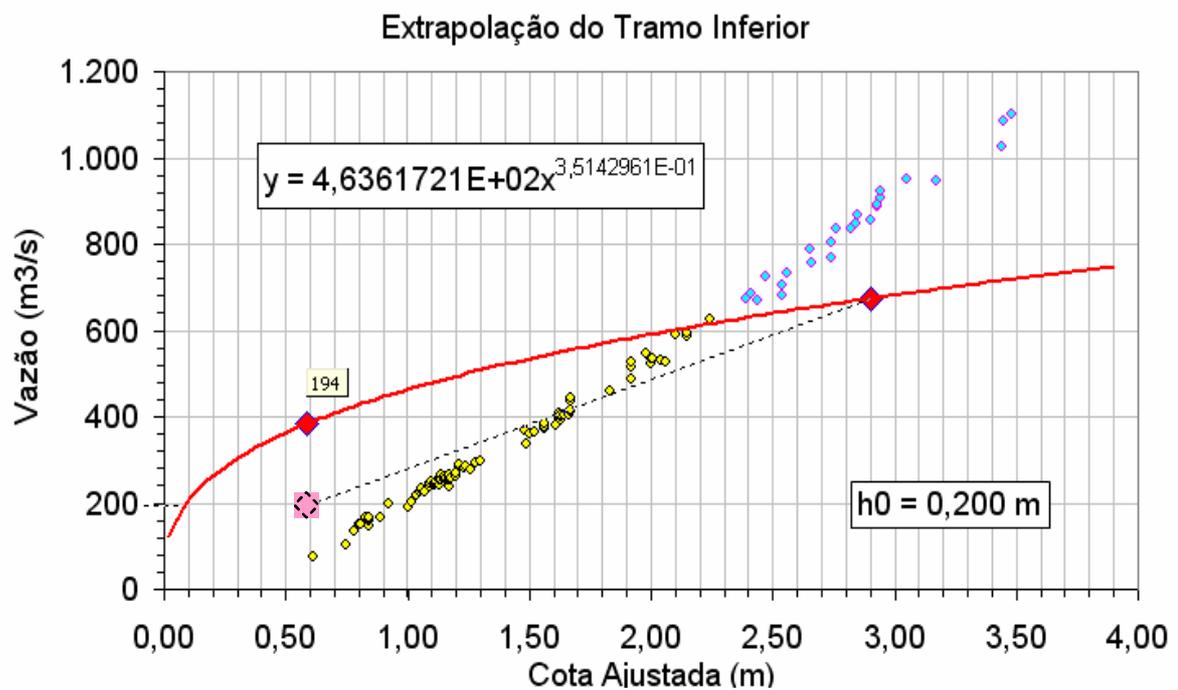
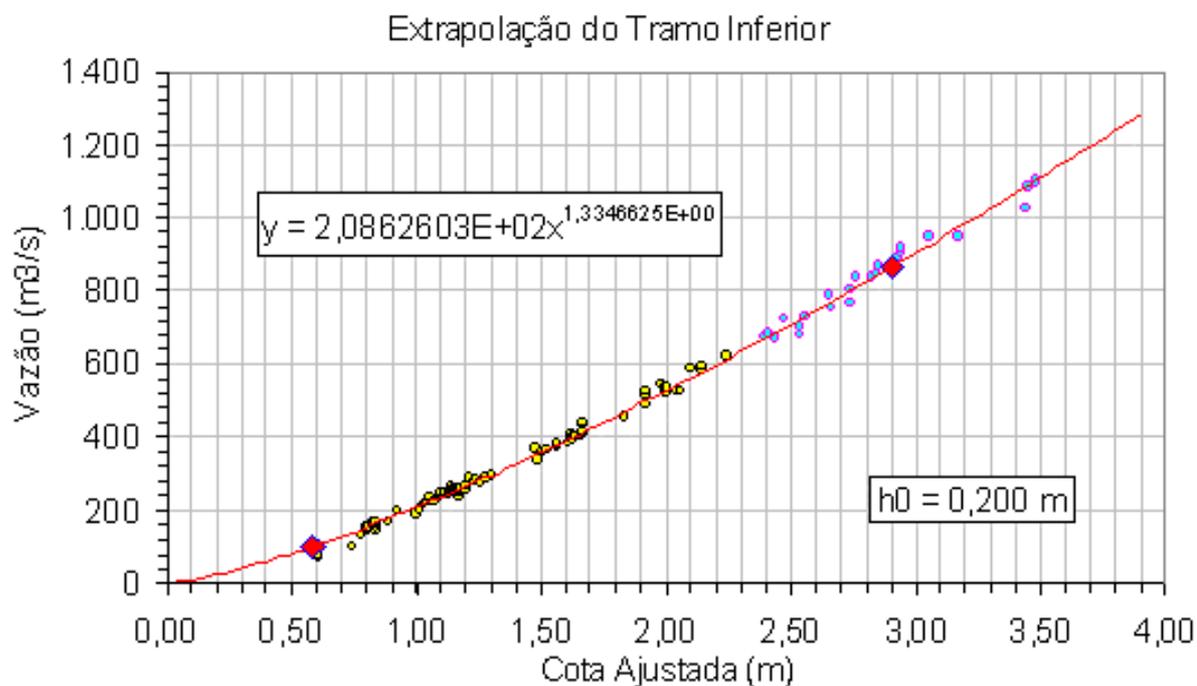


FIGURA 35 – RESULTADO DA DEFINIÇÃO MANUAL DE RELAÇÃO MATEMÁTICA.



Os procedimentos citados foram implementados de forma provisória em planilha de cálculo de nome “Base Extrapolação CD.xls”, que dispõe, como recurso de automatização de tarefas, de macros pra o cálculo dos elementos geométricos da seção para aplicação do método área x velocidade por seção composta e para o ajuste dos fatores de escala h_0 para as relações potenciais dos diversos problemas.

f) definição das curvas-chave:

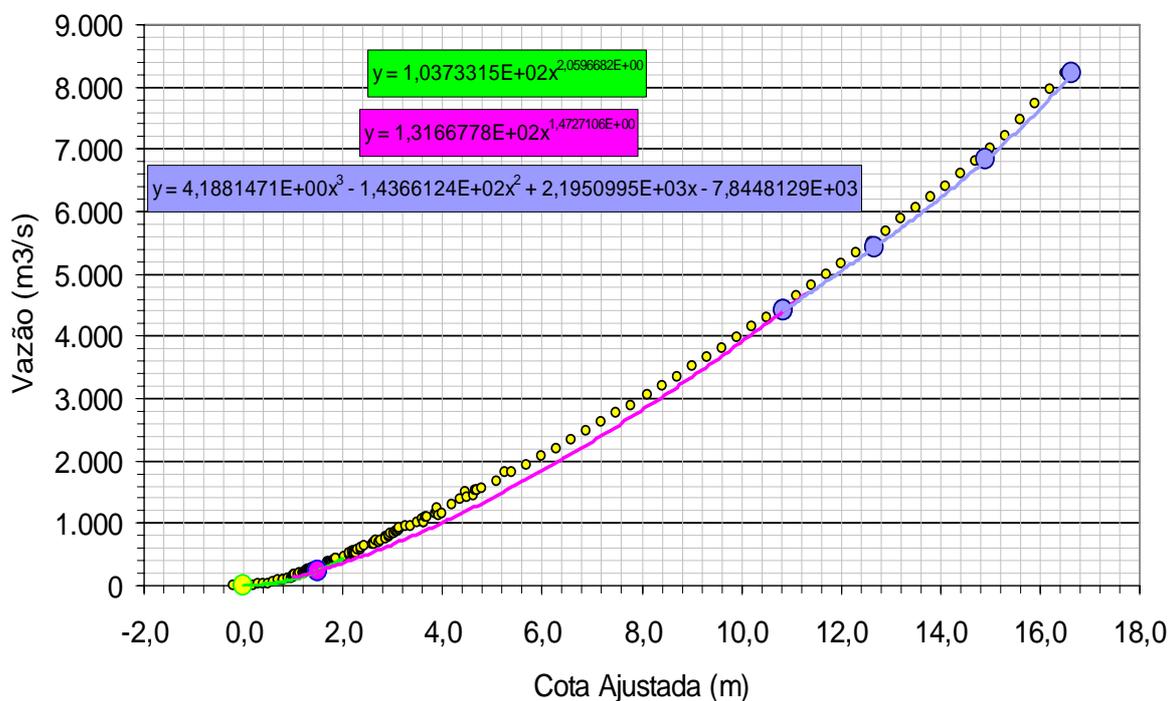
Esta etapa, final do processo, tem como objetivo obter a curva-chave para cada período identificado. Além das curvas-chave, espera-se como resultados desta etapa a recomendação de necessidades de dados, levantamentos ou processos novos. As atividades desenvolvidas nesta etapa são:

- análise conjunta de todos os dados disponíveis: curvas-chave, extrapolações, medições para cada um dos períodos definidos, com decisão sobre manter as curvas-chave existentes ou substituí-las;
- definição de uma representação global (uma única função) para a curva-chave, por ajuste por mínimos quadrados ou ajuste manual por pontos de apoio (conforme descrito no anteriormente), de função potencial ou polinomial. Este ajuste é realizado utilizando-se todos os dados de medição e dados obtidos das extrapolações superior e inferior. Tem como objetivo uma primeira exploração do formato da curva, permitindo uma estimativa do número de tramos que podem ser necessários para bem representar a relação cota x vazão e de ter disponível uma representação única da curva, no caso de necessidade para alguma aplicação, como, por exemplo, de otimização, que pode ter dificuldades de manejar funções por partes;
- definição de curva-chave por tramos e verificação da melhora do resultado geral, cuidando sempre de definir o menor número possível de tramos. Também nesta etapa são utilizados os dados de medição de vazão e extrapolações superior e inferior, já definidas. Na divisão por tramos da representação, devem ser tomados cuidados para garantir a continuidade da função no ponto de intersecção entre os tramos e, se possível, também a continuidade da tangente. No caso de uso de ajuste por mínimos quadrados, isto pode ser alcançado pelo uso de mínimos quadrados condicionados, onde incorpora-se na definição do problema as condições que se quer atender. Se o ajuste for realizado manualmente, por pontos de apoio, a metodologia garante a continuidade da função. A aproximação das tangentes de tramos consecutivos pode ser conseguida graficando-se ambos os tramos com um trecho de superposição e verificando visualmente a semelhança da declividade das funções no ponto de

intersecção entre os tramos. O processo é ilustrado pela figura 36, para o posto de Porto Paraíso do Norte;

- realização de análises do ajuste de conjunto para toda a curva, em termos, no mínimo, de desvios absolutos e relativos e do coeficiente de determinação, r^2 ;
- para a aplicação na bacia do rio Ivaí, a extrapolação do último posto da cascata, Novo Porto Taquara, foi verificada por balanço de volumes com os postos de jusante, para períodos de vazões altas. Embora o procedimento adotado tenha sido particular para o rio Ivaí, a metodologia de obtenção de curvas-chave deve, em algum momento, incorporar considerações de definição e análise conjunta de curvas-chave para todos os postos de um sistema de rios, o que não foi feito.

FIGURA 36 – AJUSTE POR PONTOS DE APOIO DE MÚLTIPLOS TRAMOS DA CURVA DE DESCARGA.



Os procedimentos delineados acima foram implantados, de forma preliminar, no arquivo de planilha de cálculo “Base Definicao CD.xls”, que dispõe, como recurso de automação de tarefas, de macros para definição interativa do fator de escala h_0 para

relações potenciais, tanto para o ajuste de uma única função como para o ajuste de várias, no ajuste por tramos, e para a geração da tabela equivalente (tabela que produz, por interpolação linear e para uma dada precisão, os mesmos resultados da equação matemática).

6.6.3 Definição das Curvas de Descarga para os Postos Fluviométricos

Conforme apresentado anteriormente, foram redefinidas todas as curvas-chave dos postos fluviométricos a serem utilizados neste trabalho, como forma de aplicar e validar o procedimento de definição de curvas-chave que está sendo proposto à Itaipu. O procedimento final proposto, que será analisado internamente à Itaipu antes de ser implantado em definitivo, evoluiu a partir das dificuldades encontradas na sua aplicação a cada posto. Como resultado geral do processo, foram definidas 9 curvas-chave para o conjunto dos postos de estudo, com os períodos de validade e informações gerais de cada uma apresentados na tabela 11. A representação matemática de cada curva encontra-se na tabela 12, onde as funções matemáticas são apresentadas na mesma ordem de postos que as informações da tabela 11. O formato geral das equações potencial e polinomial adotadas para as curvas-chave é, respectivamente:

$$Q = a_0 (h - h_0)^{a_1} \quad (98)$$

$$Q = a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + a_3 h^3 + a_4 h^4 \quad (99)$$

onde:

Q - vazão, em m³/s;

h - cota, em m;

$h_0, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$: parâmetros das equações.

TABELA 11 – PERÍODOS DE VALIDADE E INFORMAÇÕES GERAIS DAS CURVAS-CHAVE.

ORDEM	POSTO	VALIDADE		r ² GERAL ⁽¹⁾	TRAMO	COTA (m)	
		Início	Fim			Início	Fim
1	Tereza Cristina	1956	-----	0,99987	1	0,726	4,72
2					2	4,73	14,00
3	Ubá do Sul	1967	1973	Formulação do período 1988 a -----.			
4		1974	1987	0,99967	1	0,25	3,50
5					2	3,51	9,00
6		1988	-----	0,99988	1	0,10	1,60
7					2	1,61	9,00
8	Quinta do Sol	1974	-----	0,99977	1	1,256	2,29
9					2	2,30	5,40
10	Porto Paraíso do Norte	1952	1960	0,99987	1	-0,20	1,30
11					2	1,31	10,65
12					3	10,66	16,50
13		1961	06/1973	0,99993	1	-0,25	0,80
14					2	0,81	10,20
15					3	10,21	16,50
16		07/1973	07/1983	Formulação do período 1952 a 1960.			
17		08/1983	-----	0,99963	1	-0,440	1,21
18					2	1,22	16,00
19		Novo Porto Taquara	1974	1981	0,99528	1	-1,12
20	2					1,89	12,98
21	3					12,99	16,88
22	1982		-----	0,99969	1	-1,00	2,00
23					2	2,01	13,50
24					3	13,51	17,00

(1) Coeficiente de Determinação Geral, considerando os desvios de todos os trechos da curva de descarga.

TABELA 12 – COEFICIENTES DAS EQUAÇÕES POTENCIAIS E POLINOMIAIS DAS CURVAS-CHAVE, NA SEQUÊNCIA DEFINIDA NA TABELA 11.

ORDEM	TIPO	COEFICIENTES					
		h_0	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
1	Pot	0,7260	46,411165	1,5744619			
2	Pol	-4,2000	1,813712	2,4781448			
3							
4	Pot	0,2500	186,54194	1,7798334			
5	Pot	1,4000	550,89724	1,3679286			
6	Pot	0,1000	122,51291	2,2087376			
7	Pol	-----	-17,148734	-62,259025	181,93116	-12,574639	0,38530215
8	Pot	1,2560	118,31184	1,599212			
9	Pot	0,0000	18,973956	2,2751194			
10	Pot	-0,2012	103,73315	2,0596682			
11	Pot	0,3000	239,50934	1,2464931			
12	Pol	-----	-7408,9404	2137,7989	-141,13327	4,1881471	
13	Pot	-0,2530	78,001317	2,3354677			
14	Pot	0,2200	185,23332	1,3663343			
15	Pol	-----	347,63963	184,91412	19,802672		
16							
17	Pot	-0,4400	120,59507	2,0849725			
18	Pol	-----	-27,433724	275,45506	27,084541	-1,8298377	0,066369478
19	Pol	-----	42,006219	91,288766	66,904666	7,695113	-8,1835246
20	Pol	-----	64,094045	148,4211	15,62178	0,099427831	
21	Pol	-----	24267,834	-3665,0792	167,05145		
22	Pol	-----	32,000000	75,62064	63,427369	11,623205	-8,1835246
23	Pol	-----	46,508294	144,67617	15,585986	0,099427831	
24	Pol	-----	24710,049	-3705,1716	167,05145		

6.6.4 Geração das Novas Séries de Vazão

Com as novas curvas de descarga foram geradas novas séries de vazões para todos os postos. Cada série de vazão foi inspecionada visualmente por plotagem simultânea dos hidrogramas para verificar a compatibilidade entre as séries geradas e para eliminar, uma vez mais, valores considerados espúrios. Os resultados foram

considerados aceitáveis, sendo possível identificar vários eventos em que houve necessidade de intervenção para corrigir os dados disponíveis, inclusive um resultante da composição de séries de cotas.

6.7 VERIFICAÇÃO CONJUNTA DAS SÉRIES DE PRECIPITAÇÃO E VAZÃO

As séries de precipitação e vazão foram inspecionadas visualmente por plotagem simultânea, com a finalidade de realizar uma última verificação dos dados, agora olhando também os sinais da relação chuva x vazão. O objetivo deste procedimento foi realizar uma última consistência no conjunto de dados, corrigindo ou eliminando os dados manifestamente errados. A introdução dos dados de precipitação permitiu identificar alguns eventos em que não havia compatibilidade entre os sinais de precipitação e vazão ou entre vazão de postos consecutivos. Estes eventos foram corrigidos nas séries de vazão, levando-se em conta, principalmente, os dados de postos de jusante do posto analisado. As séries resultantes desta última consistência foram as utilizadas no restante dos estudos.

7 ORIENTAÇÕES GERAIS PARA CALIBRAÇÃO

Não foi encontrada, na literatura, nenhuma recomendação sobre o processo de calibração diretamente relacionada ao modelo 3R. No entanto, existe material considerável sobre a calibração do modelo Sacramento, que deu origem aos modelos Sacramento Modificado e 3R. Assim, neste item tentaremos adaptar as recomendações de calibração do modelo Sacramento de forma a serem úteis no processo de calibração do 3R.

Este item foi desenvolvido principalmente sobre os trabalhos de LARSON (2003) e ANDERSON (2002), em função da larga experiência do “National Weather Service” com o problema da calibração de modelos hidrológicos operacionais em geral e com o modelo Sacramento em especial. Os conteúdos destes trabalhos foram complementados com contribuições de HP (2002) e PECK (1976).

Conforme citado anteriormente, no item 2.3.4.1, a calibração de um modelo pode ser definida como o processo de seleção do modelo específico para reproduzir o comportamento de um sistema, dada a família de modelos representada pelo modelo procedural. Consiste na definição dos parâmetros que fazem com que o modelo reproduza o comportamento específico do sistema sendo representado. A calibração é a penúltima etapa na abordagem passo-a-passo usualmente adotada para modelar sistemas de recursos hídricos.

Segundo ANDERSON (2002), devem ser buscados três objetivos básicos no processo de calibração:

- a) **boa concordância do comportamento do modelo com o comportamento observado do sistema:** o modelo é o substituto do sistema real para a finalidade a que se destina. Desta forma, um modelo somente pode ser considerado como representante de um sistema se reproduzir com alguma fidelidade seu comportamento. No caso deste

objetivo não ser atingido, a utilização do modelo proposto deve ser descartada;

- b) **os parâmetros devem reproduzir o comportamento esperado de cada componente:** cada componente de um sistema apresenta comportamento geral característico, que é representado por formulações matemáticas definidas no modelo conceitual. O seu comportamento específico é definido pelo valor dos parâmetros do modelo. Ocorre que a formulação matemática proposta pode não ser restrita, isto é, ela pode representar comportamentos diferentes do esperado para o componente sistema, dependendo dos valores de seus parâmetros. Um exemplo disto é o modelo de percolação, representado pela equação (7). O parâmetro m_2 poderia assumir, em tese, qualquer valor, mas para que a equação reproduza o comportamento esperado do componente seu valor deve ser definido como maior ou igual a um. O mesmo é válido para relações e proporções que devem existir entre parâmetros. A manutenção dos parâmetros dentro dos limites de representação esperados, mesmo com piora nos resultados do período de calibração, é que aumenta a probabilidade do modelo reproduzir situações futuras distintas das detectadas no período de calibração, propriedade fundamental para modelos operacionais;
- c) **a variação dos valores dos parâmetros entre áreas deve ser realista:** a variação dos parâmetros entre áreas adjacentes ou próximas deve ser realista e justificada por variações detectáveis na fisiografia, clima ou resposta hidrológica da bacia. Este objetivo, além de lógico do ponto de vista físico, facilita o acompanhamento e entendimento de variações operacionais e atualizações de variáveis de estado que ocorrem durante a operação do modelo.

No estabelecimento dos objetivos a serem atingidos com a calibração, ANDERSON (2002) deixa claro que a consistência conceitual e espacial dos parâmetros definidos não pode ser sacrificada para a obtenção de um “bom ajuste”, no sentido convencional de reprodução dos valores observados. A não observância destes objetivos pode fazer com que o comportamento em extrapolação do modelo (essencial para modelos de previsão) seja prejudicado pela busca de um melhor comportamento em interpolação, ou seja, na reprodução do comportamento observado do sistema.

LARSON (2003) aponta que uma boa calibração permite estimar o comportamento probabilístico da previsão gerada pelo modelo. Para além das questões puramente técnicas, LARSON ressalta que **“a calibração desenvolve a familiaridade daquele que a realiza com os dados, modelo e parâmetros, constituindo uma etapa muito importante na formação de um previsor hidrológico efetivo, que será mais capaz na aplicação operacional dos modelos”**.

Toda calibração começa pela análise dos dados que serão utilizados, incluindo tanto os dados de entrada para o modelo como os valores observados a serem reproduzidos. No caso do modelo 3R aplicado a climas tropicais e temperados, precipitação e evapotranspiração potencial são os dados de entrada e a vazão nos postos fluviométricos de interesse o dado observável que deve ser simulado pelo modelo. A calibração somente pode ter sucesso se os dados utilizados apresentarem um mínimo de qualidade que permita derivar o comportamento da bacia através deles. Também, a análise inicial dos dados permite ao calibrador formar uma primeira idéia do comportamento da bacia e elaborar uma primeira avaliação de quais fenômenos hidrológicos são importantes na bacia modelada.

Para que o processo de calibração possa ter sucesso, recomenda-se que estejam disponíveis séries longas de dados, com um mínimo de 10 anos de extensão, e representando uma grande variedade de condições hidrológicas, para evitar-se o efeito de interpolação, já referido. No entanto, períodos de dados com 20 anos ou mais de extensão trazem maior confiança na definição dos parâmetros (SCHAAKE et alli,

2000). Se a calibração deve ser feita em várias bacias ou sub-bacias próximas, é interessante que o período de dados adotado para esta finalidade seja comum a todas elas (LARSON, 2003; ANDERSON, 2002). Além disto, a série disponível deve ser dividida em dois períodos, com um sendo utilizado para a calibração e outro para a validação do modelo. O período de validação deveria conter situações hidrológicas bastante variadas e, se possível, distintas das do período de calibração, para que se possa verificar a capacidade de extrapolação do modelo calibrado (ANDERSON, 2002).

Embora a condição ideal seria a de eliminar, na calibração, a maior parte dos desvios entre os valores simulados e observados, há que se ter em mente que isto, para modelos hidrológicos, ainda não é possível, e que alguns dos desvios são causados pela própria estrutura do modelo ou pelos dados disponíveis para utilização. Por exemplo, são típicas, em modelos hidrológicos, a subestimação das vazões maiores, causada pela utilização de valores médios em área de precipitação, que mascaram o efeito de precipitações localizadas, e a superestimação do escoamento de base em situações de seca, quando, em realidade, nem toda a bacia contribui para a geração deste fluxo (ANDERSON, 2002). Dado que a presença de desvios é esperada, devem ser estabelecidos critérios que permitam quantificar os desvios cometidos, de modo a ter-se quantitativos de definição e comparação da bondade de um ajuste.

7.1 MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO

Existem, basicamente, dois métodos de calibração (LARSON, 2003; ANDERSON, 2002):

- a) **manual**: onde o ajuste dos parâmetros é realizado manualmente, por um indivíduo, por tentativa e erro, até que os valores simulados reproduzam satisfatoriamente os observados;

- b) **automático**: onde o ajuste é realizado sem intervenção do indivíduo, utilizando algum método de otimização. Uma técnica automática de otimização consiste de dois componentes principais: um algoritmo de busca, responsável por pesquisar o espaço dos parâmetros em busca da melhor solução, e um critério de otimização ou função objetivo, relação que gera um número que permite quantificar, em termos relativos, a qualidade de cada solução avaliada.

Uma comparação de características destes dois métodos é apresentada na tabela 13.

TABELA 13 – COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS MANUAL E AUTOMÁTICO DE CALIBRAÇÃO.

CALIBRAÇÃO MANUAL	CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA
Ênfase na representação dos componentes do processo	Ênfase no ajuste global do modelo aos dados
Requer bom conhecimento da base do modelo físico	Trata o modelo físico como se estivesse realizando uma regressão não-linear
Altamente exigente com os recursos humanos	Baixa solicitação de recursos humanos
Utiliza vários critérios de desempenho	Utiliza um pequeno número de critérios estatísticos
Menos afetado pela qualidade dos dados	Sensível à qualidade dos dados
Requer suporte computacional, principalmente gráfico	Requer método de otimização robusto
Gera parâmetros que tem probabilidade de produzir simulações confiáveis em eventos futuros	Gera parâmetros com valores com desempenho incerto para a simulação de eventos futuros

FONTE: ANDERSON (2002)

A principal dificuldade da utilização do método de calibração automática reside em que este desconhece o modelo sendo tratado e avalia a qualidade do ajuste por um número reduzido de critérios, em geral insuficientes para captar a

complexidade do comportamento dos hidrogramas. Desta forma, a aplicação direta de técnicas de otimização leva a resultados que privilegiam a boa representação da série utilizada na calibração (interpolação), sem levar em conta o significado dos parâmetros ou o desempenho do modelo em presença de situações hidrológicas diferentes das de calibração. Para tentar contornar estas dificuldades, têm-se proposto esquemas como a aplicação de limites aos valores dos parâmetros e geração de vários conjuntos de parâmetros, para permitir uma escolha entre eles (ANDERSON, 2002). No entanto, parece que as tentativas de aplicação direta do método automático de calibração a modelos hidrológicos não se mostraram frutíferas até o momento. LARSON (2003) afirma que “os procedimentos de otimização automática não são substitutos para o processo de calibração manual” e que “é indubitável que um conjunto razoável de parâmetros somente pode ser obtido por calibração manual”. ANDERSON (2002) afirma, baseado na sua experiência pessoal de anos, que os métodos de otimização não podem ser utilizados para atingir o segundo e terceiro objetivos do processo de calibração, apresentados na introdução do capítulo 7. No entanto, estas constatações não significam o descarte do método automático, apenas sua desqualificação como método único e não supervisionado a ser aplicado ao problema. A experiência tem mostrado que resultados muito melhores são obtidos calibrando o modelo primeiro manualmente e utilizando-se um otimizador após um ajuste razoável haver sido obtido (LARSON, 2003). Esta filosofia está implementada no NWSRFS, onde o software “Automatic Parameter Optimization Program” (OPT3) foi desenvolvido para refinar as estimativas de parâmetros feitas por calibração manual do modelo Sacramento Modificado (LARSON, 2003).

A experiência até o momento parece indicar a necessidade da realização da calibração manual de modelos hidrológicos conceituais. Esta calibração, obtida por ajustes interativos nos parâmetros do modelo, é completamente dependente do conhecimento do responsável pela calibração da função sendo modelada e de como isolar os efeitos de cada parâmetro (ANDERSON, 2002). Em modelos complexos, esta

identificação é importante para garantir a eficiência do processo de calibração. Como exemplo, LARSON (2003) identificou, para o modelo Sacramento, os parâmetros que afetam mais fortemente cada componente de fluxo do modelo, apresentados na tabela 14. Para um modelo como o 3R, mais simples e com poucos parâmetros, esta relação é mais facilmente obtível, tanto por inspeção do modelo conceitual como pela realização de algumas iterações do processo de calibração. No entanto, como informação inicial de referência, acrescentou-se à tabela 14 os parâmetros do modelo 3R equivalentes aos do Sacramento.

TABELA 14 – EFEITOS DOS PARÂMETROS DO MODELO SACRAMENTO E 3R.

FLUXO	PARÂMETROS QUE AFETAM O FLUXO	
	Sacramento	3R
Declividade da recessão	<i>LZPK, LZSK</i>	C_2
Escoamento de base	<i>LZPK, LZSK, LZFPM, LZFSM, PFREE, SIDE, RIVA, PCTIM</i>	C_2, X_2^0, μ
Percolação	principais: <i>LZFSM, ZPERC, REXP</i> secundários: <i>LZFPM, LZTWM, UZFWM, LZSK</i>	C_2, m_2, X_1^0, X_2^0
Escoamento rápido	<i>UZFWM, UZK, ADIMP</i>	C_1, X_1^0
Evapotranspiração	<i>UZTWM, LZTWM, EVTP</i>	X_1^0, X_2^0, PET

FONTE: adaptado de LARSON (2003)

ANDERSON (2002) apresenta como recomendações gerais para o processo de calibração manual:

- a) **realizar grandes variações nos parâmetros:** o tempo de calibração é reduzido quando se experimenta variações razoáveis nos parâmetros, porque é mais fácil detectar que foi cometido um excesso e reduzir a estimativa que aproximar o valor do parâmetro com pequenas variações;
- b) **escolher parâmetros em função de um conjunto de eventos:** a definição de parâmetro do modelo deve basear-se em um conjunto de

eventos, nunca em um só, pois erros aleatórios presentes em todos os eventos podem comprometer o resultado;

- c) **alterar primeiramente os parâmetros com grandes erros:** a calibração deve concentrar-se, primeiramente, na eliminação dos grandes desvios provocados por parâmetros incorretos. Somente no caso dos valores simulados não apresentarem desvios muito grandes em relação ao observado é que se pode avaliar a real contribuição de cada parâmetro para a formação da vazão simulada;
- d) **revisar resultados anteriores:** deve manter-se registrados resultados anteriores de calibração, como orientação para pequenas alterações de parâmetros e para manter clara a trajetória de calibração já percorrida, revisando-os periodicamente;
- e) **utilizar indicadores quantitativos:** deve dispor-se de valores e índices quantitativos que forneçam subsídios para o processo de calibração. Entre eles podemos citar: desvios totais e sazonais de previsão, médias de valores observados e previstos sobre vários intervalos e vazões e erros acumulados;
- f) **usar escalas adequadas de visualização:** quando se utilizam gráficos como ferramentas de apoio, a detecção visual de problemas na calibração ou o grau de qualidade atingido somente é possível com o uso de escalas adequadas para os componentes sendo calibrados. Por exemplo, a detecção dos componentes de escoamento de base são melhor visualizados numa escala mono-log.

7.2 ESTRATÉGIA DE CALIBRAÇÃO MANUAL DO MODELO 3R

A calibração manual é a base para a obtenção da calibração de um modelo hidrológico e consiste em um procedimento iterativo, de tentativa e erro, bastante

exigente em termos de recursos humanos e completamente dependente destes recursos. Assim, o procedimento pode ter sucesso ou falhar, ser rápido ou demorado, de acordo com o desempenho do calibrador (pessoa que realiza a calibração). Para aumentar as chances de sucesso e diminuir o tempo da atividade, é interessante que a experiência ganha no processo de calibração do modelo seja resumida em orientações gerais destinadas a melhorar a sua eficiência. Isto foi feito pelo NWS e por pessoal a ele ligado para o modelo Sacramento, derivando estratégias e orientações de calibração. Dada a sua similaridade com o modelo Sacramento, estas estratégias serão adaptadas para o modelo 3R. No entanto, embora as recomendações gerais possam ser aplicadas diretamente sem maiores preocupações, as referências aos parâmetros e seus efeitos podem não ser traduzíveis diretamente para o modelo 3R, devendo ser verificadas e validadas pela prática.

ANDERSON (2002) recomenda que, para atingir-se os objetivos apresentados no item 7 para o processo, seja adotada a seguinte estratégia para a calibração de sub-bacias próximas em um modelo semidistribuído com várias sub-bacias:

- a) **começar com sub-bacia de cabeceira com os melhores dados e complicação mínima:** começa-se com as sub-bacias que, em tese, apresentam melhores chances de serem calibradas com qualidade, ou seja, com pequena presença de problemas nos dados e nas características da bacia. A calibração deve ter como objetivo definir os parâmetros que darão o melhor resultado possível para o comportamento em extrapolação do modelo. A calibração das bacias de cabeceira é importante porque seus resultados servirão de base para a calibração das outras. Por isto, o processo deve ser conduzido com a maior atenção possível, geralmente exigindo a maior parte do tempo dedicado à tarefa de calibração;

- b) **prosseguir com outras áreas com pouco ruído:** prossegue-se o processo com as áreas que apresentam bons dados e poucas complicações, como bacias de cabeceira que disponham de reservatórios com boa definição do hidrograma de entrada ou bacias de intermediárias com contribuição bem definida. A sua contribuição natural nestas bacias deve ser determinada retirando dos dados de vazão os efeitos antrópicos ou a parcela de vazão propagada de bacias a montante, com a calibração procedendo como indicado no item anterior. Médias de vazão devem ser utilizadas para verificar se o processo de obtenção da contribuição natural produziu resultados satisfatórios. Os parâmetros das bacias já calibradas devem servir de base para esta calibração, sendo mudados o mínimo possível e apenas para refletir diferenças claramente definidas nas séries ou nas características da bacia, nunca meramente para melhorar a concordância com os dados observados. A calibração destas áreas pode ser feita rápida e facilmente, uma vez identificados os parâmetros que afetam cada porção do hidrograma e, portanto, identificados os parâmetros que claramente tem que ser alterados;
- c) **definir parâmetros para as áreas restantes:** é deixada para o final do processo a calibração de áreas onde não é possível definir claramente a contribuição natural, devido a incertezas geradas pelas ações antrópicas ou excesso de ruído na série de vazões, após retirada a contribuição propagada das bacias de montante. Os parâmetros destas áreas devem ser definidos a partir dos parâmetros de áreas próximas e semelhantes, com ajustes mínimos para corrigir desvios, se isto for possível, dado o quadro da bacia.

Para a calibração de uma bacia específica, seja em um modelo concentrado ou uma das sub-bacias do modelo semidistribuído, SMITH (2000, apud LARSON,

2003) e ANDERSON (2002) recomendam a seguinte estratégia:

- a) **obter parâmetros iniciais razoáveis:** a estimativa de parâmetros iniciais razoáveis é fundamental para o sucesso, qualidade e rapidez do processo de calibração;
- b) **remover os grandes erros nos parâmetros:** os grandes erros de parâmetros causam, em geral, grandes desvios em volume. A estimativa inicial de parâmetros não deve gerar erros de volume superiores a 10% em relação ao observado. Este objetivo deve ser buscado em primeiro lugar porque grandes desvios em alguns parâmetros mascaram o papel dos outros parâmetros na geração do valor simulado. Os problemas mais comuns encontrados e suas soluções são:
 - erros na taxa de percolação, gerando muito escoamento superficial e subsuperficial e pouco de base ou vice-versa. Solução: alterar o parâmetro C_2 proporcionalmente ao valor original;
 - erros no escoamento superficial. Solução: alterar parâmetro X_1^0 ;
- c) **obter uma simulação razoável do escoamento de base:** como os escoamentos superficial e subsuperficial dependem da taxa de percolação, obter uma simulação razoável do escoamento de base resulta em uma melhor definição dos parâmetros daqueles escoamentos. Além disto, os componentes do escoamento de base têm comportamento mais facilmente identificável no hidrograma. Deve-se buscar a representação do comportamento geral do escoamento, deixando os refinamentos para etapas posteriores;
- d) **ajustar a capacidade dos reservatórios das camadas de solo:** deve ser verificada a ordem de grandeza dos reservatórios das camadas de solo superior e inferior do modelo, representadas pelos parâmetros X_1^0 e X_2^0 . Estes parâmetros controlam a temporização do processo de geração de

escoamento superficial e subsuperficial e a dimensão do déficit de umidade que ocorre no solo com a evapotranspiração;

- e) **ajustar os parâmetros do escoamento rápido:** na seqüência, os parâmetros que afetam principalmente o escoamento rápido (superficial e subsuperficial) devem ser ajustados. Estes parâmetros são basicamente: X_1^0 , para separação entre superficial e subsuperficial, C_1 para a temporização do escoamento subsuperficial e C_3 e m_3 para a percolação. O ajuste dos parâmetros de percolação não deve ser feito individualmente, mas em conjunto, olhando o formato da curva que se deseja;
- f) **fazer os ajustes finais:** nesta etapa devem ser tratados os parâmetros ainda não considerados e feitos os refinamentos nos parâmetros já obtidos. Esta etapa tipicamente inclui:
- ajustar os tempos de pico principais, modificando os parâmetros do algoritmo de propagação;
 - ajustar a estimativa de evapotranspiração potencial, obtida principalmente levando em conta variações sazonais no uso do solo e cobertura vegetal em áreas de agricultura;
 - ajustar a função de percolação para acertar o tempo entre enchentes, mudando o parâmetro X_2^0 proporcionalmente ao seu valor original.

Existem situações para as quais não é possível obter estimativas razoáveis para os parâmetros e elas devem ser reconhecidas para que não seja dispendido esforço inútil em sua calibração. Como exemplo, em regiões úmidas o grau de umidade do solo não varia muito, o que faz com que um conjunto grande de valores de C_3 e m_3 possa representar igualmente bem a percolação.

Quando se realiza a calibração de bacias de jusante, é necessário definir a contribuição exclusivamente da bacia sendo estudada para a vazão na exutória. Para isto, é necessário retirar, dos dados observados, a contribuição das bacias de montante.

Isto é conseguido subtraindo-se dos valores observados de vazão a propagação das vazões das bacias de montante. Este processo nem sempre gera séries de vazão razoáveis, quando é necessário adotar outra abordagem. Para o processo de calibração do modelo, a propagação é feita utilizando os dados observados de montante, mas na verificação devem ser usadas as previsões geradas para estes dados.

7.3 ESTIMATIVA INICIAL DE PARÂMETROS

LARSON (2003), ANDERSON (2002) e PECK (1976) enfatizam a importância de uma boa estimativa inicial de parâmetros do modelo para a obtenção de valores representativos para a bacia e para diminuir o tempo necessário para a obtenção destes parâmetros. Isto significa que a experiência acumulada entre o trabalho de referência, apresentado por PECK em 1976, e os mais recentes confirmou a importância de uma boa estimativa inicial de parâmetros para o sucesso do processo de calibração.

A melhor estimativa para parâmetros iniciais de uma bacia é obtida a partir dos parâmetros de uma bacia de cabeceira próxima, similar, de boa qualidade e já calibrada, fazendo-se o mínimo de ajustes, justificáveis por características particulares da bacia. Estes ajustes não devem ter o único objetivo de melhorar a concordância do simulado com o observado (comportamento em interpolação), sob pena de perder-se a consistência espacial dos parâmetros da bacia (LARSON, 2003; ANDERSON, 2002). Se não existe bacia que sirva de referência para os parâmetros, os mesmos devem ser obtidos dos dados disponíveis (ANDERSON, 2002), usualmente dados fisiográficos (solo, relevo, vegetação, dimensões, etc.), climáticos ou séries temporais de precipitações, vazões e temperaturas (principalmente para modelos de regiões com presença de neve) (LARSON, 2003). Para o escoamento em canais, a orientação não se aplica: o processo de calibração tem que ser executado diretamente em cada trecho do canal, pela dificuldade de estabelecer-se critérios de similaridade para os mesmos

baseados somente nos dados usualmente disponíveis (ANDERSON, 2002).

Para o modelo Sacramento, de onde o modelo 3R foi derivado, as tentativas de associar dados fisiográficos com seus parâmetros focam, principalmente, na utilização de dados de solo. A tentativa mais recente de derivar, “a priori”, valores iniciais para os parâmetros do Sacramento a partir de dados de solo é de KOREN et alli (2000), que desenvolveram procedimentos de estimativa de cinco parâmetros de capacidade de armazenamento (*UZTWM*, *UZFWM*, *LZTWM*, *LZFSM* e *LZFPM*, equivalentes a X_1^0 e X_2^0 no modelo 3R) a partir de dados do “National Resources Conservation Service” (NRCS) dos Estados Unidos sobre propriedades estimadas do solo (porosidade, capacidade de campo, ponto de murchamento, profundidade do solo) e no “Soil Conservation Service Curve Number”. Cinco parâmetros adicionais podem ser estimados a partir de relações empíricas: *UZK*, *LZPK*, *LZSK*, *ZPER*, *REXP*, e *PFREE*. Estes parâmetros guardam a seguinte correspondência com os parâmetros no modelo 3R: *UZK* é equivalente a C_1 , *LZPK* e *LZSK* são equivalentes a C_2 , *ZPER* a C_3 , *REXP* a m_2 e *PFREE* não tem correspondência no modelo 3R. No entanto, ANDERSON (2002) ressalta que, pelo fato dos parâmetros dependerem de vários outros fatores além do tipo de solo, algumas hipóteses adotadas no trabalho de KOREN et alli (2000) podem não ser válidas para todas as regiões.

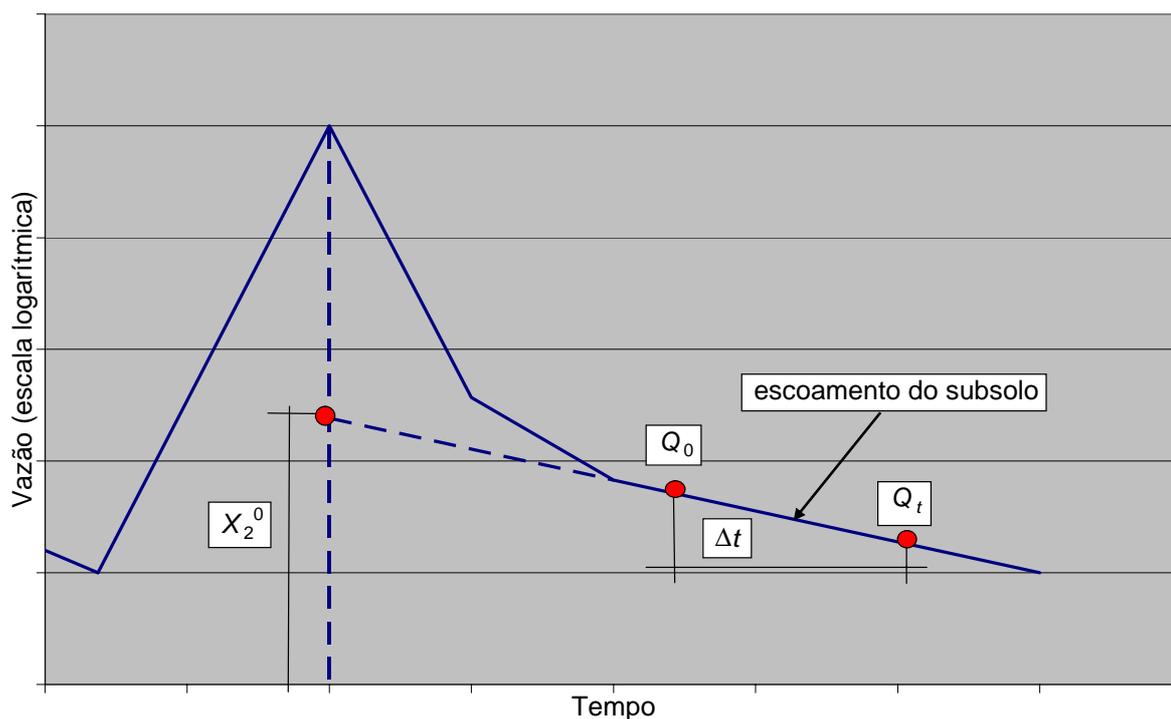
A estimação de parâmetros a partir de séries temporais baseia-se, principalmente, nas características das séries de vazões. Assim, para a estimativa correta dos parâmetros iniciais para a bacia, é importante a identificação dos tipos de escoamento presentes nos eventos utilizados para a calibração (ANDERSON, 2002). As orientações para a obtenção de parâmetros iniciais para o modelo 3R a partir de séries temporais, que serão apresentadas a seguir, foram adaptadas das orientações desenvolvidas para o modelo Sacramento, principalmente no trabalho de ANDERSON (2002), o de maior envergadura e mais recente. Contribuições de outros autores serão referenciadas no texto, quando apareçam. A seqüência de apresentação das orientações segue a seqüência de obtenção de parâmetros recomendada, expressa na estratégia de

calibração de uma bacia. Assim, propõe-se como estimativas iniciais para os parâmetros:

a) C_2 :

O parâmetro C_2 , que controla o escoamento do reservatório da camada inferior do solo, é identificado a partir dos períodos de recessão prolongada da série de vazões. Pelo seu comportamento característico, o escoamento de base gera uma reta aproximada quando a série de vazões é representada em escala semilogarítmica. A figura 37 ilustra o comportamento esperado da recessão e os dados necessários para obtenção da estimativa do parâmetro, conforme descrito a seguir.

FIGURA 37 – ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DE ESCOAMENTO DE BASE.



FONTE: HP (2002)

Para a obtenção da estimativa de C_2 , seleciona-se dois pontos, identificados como Q_0 e Q_t , distantes de um intervalo de tempo Δt no hidrograma, em trecho de recessão mais prolongada e com pouca chuva, e aplica-se a equação abaixo, derivada

da equação do reservatório linear e da equação da continuidade:

$$C_2 = \frac{1}{\Delta t} \left[1 - \left(\frac{Q_t}{Q_0} \right)^{1/t} \right] \quad (100)$$

b) X_2^0 :

O parâmetro X_2^0 , relativo à capacidade máxima do reservatório da camada inferior do solo, é estimado a partir do hidrograma da bacia. É obtido extrapolando-se o período de recessão que segue um período úmido, retrocedendo-se até o pico do hidrograma. Neste ponto, referenciado na fórmula como Q_{\max} , a contribuição ao escoamento de base é considerada máxima para o evento, servindo como base para a estimativa da capacidade máxima do reservatório, obtida pela equação 101. O parâmetro ε , que varia de 0,10 a 0,25, é incluído para levar em conta que dificilmente o reservatório de solo é totalmente preenchido. A figura 37 ilustra o processo.

$$X_2^0 = \frac{(1 + \varepsilon)Q_{\max}}{C_2} \quad (101)$$

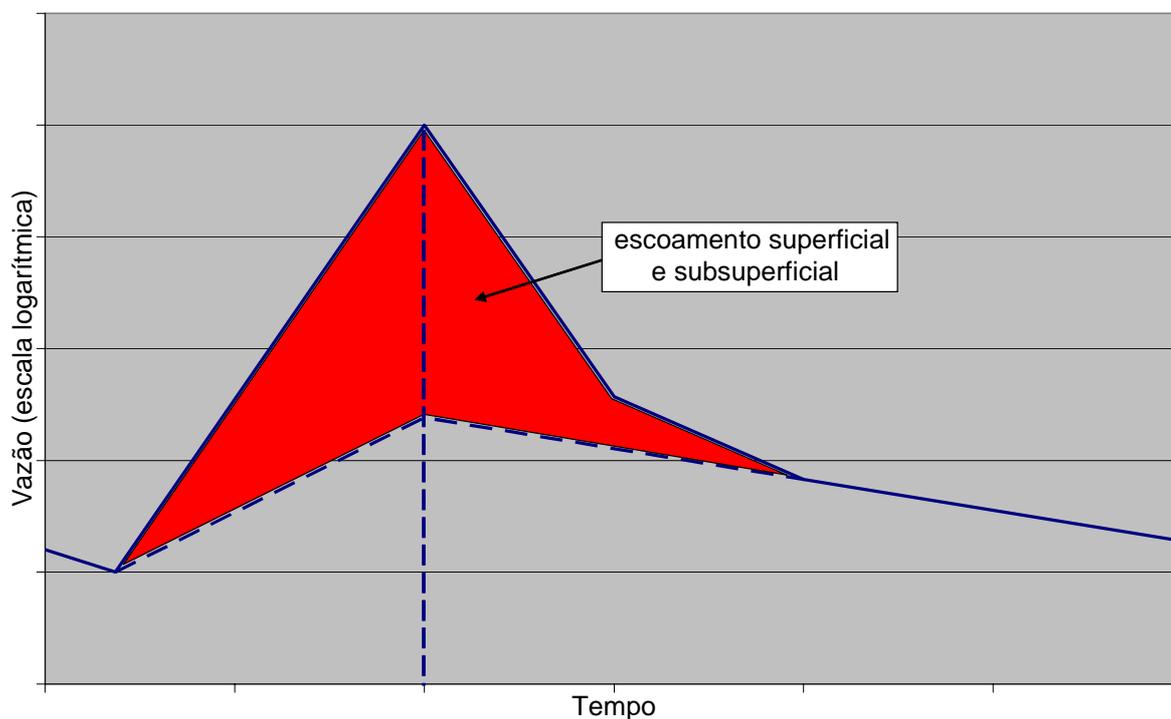
O parâmetro pode também ser estimado pela diferença de contribuição de base antes e depois de um período úmido.

As estimativas obtidas para os parâmetros do escoamento do subsolo podem ser comparadas com as faixas de valores esperados para a demanda mínima de percolação (C_2 X_2^0), apresentadas na tabela 15.

c) C_1 e X_1^0 :

Os parâmetros C_1 e X_1^0 , que definem o escoamento subsuperficial, podem ser obtidos pela análise dos hidrogramas resultantes da eliminação do escoamento de base do hidrogramas de enchente, processo ilustrado na figura 38. As estimativas dos parâmetros são obtidas de forma análoga a C_2 e X_2^0 .

FIGURA 38 – ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DO ESCOAMENTO SUBSUPERFICIAL.



FONTE: HP (2002)

Os valores esperados do parâmetro UZK , equivalente a C_1 no modelo 3R, geralmente variam de 0,15 a 1,00 (HP, 2002), com valores de referência recomendados variando de 0,30 (ANDERSON, 2002) a 0,40 (HP, 2002). No entanto, estes valores são aplicados a um reservatório parcial, de capacidade menor que o utilizado no modelo 3R. Assim, levando em conta as estimativas de volume do reservatório da camada superior do solo obtidas a partir das capacidades esperadas de armazenamento dos reservatórios do modelo Sacramento, obtém-se que o valor de C_1 deve variar entre 0,06 e 0,17.

A alternativa de estimar o parâmetro UZK do modelo Sacramento a partir da textura do solo (medida pela relação entre capacidade de campo e porosidade) ainda não apresenta resultados razoáveis. Portanto, o mesmo se aplica ao parâmetro C_1 .

Espera-se que o parâmetro X_1^0 varie de 35 a 200 mm. Sua estimativa pode ser tentada a partir de dados do solo, tendo em mente os valores assim obtidos são,

geralmente, superestimados. Estas estimativas têm que ser utilizadas com cuidado, já que estudos indicam que os reservatórios de solo do modelo Sacramento, do qual foi derivado o modelo 3R, não representam unicamente a capacidade de armazenamento, mas refletem também as características do escoamento (GAN e BURGESS, 1990).

d) m_1 :

Estimativa do parâmetro m_1 pode ser obtida para eventos isolados de enchentes que geraram escoamento superficial. Adota-se como simplificação que o reservatório da camada superior do solo está vazio no início do evento e cheio no final do período de precipitação mais significativa, que variou proporcionalmente ao total precipitado no intervalo anterior e que a função de percolação pode ser bem representada por três termos da expansão em série do termo potencial da equação 6. Assume-se também que é possível definir o volume de água escoado superficialmente. Com estas considerações, o valor de m_1 pode ser estimado para um evento como:

$$m_1 = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (102)$$

com:

$$a = \sum_{i=2}^{t_0} PREC_i \left(\frac{\sum_{j=1}^{i-1} PREC_j}{\sum_{k=1}^{t_0} PREC_k} - 1 \right)^2 \quad (103)$$

$$b = \sum_{i=2}^{t_0} PREC_i \left(\frac{\sum_{j=1}^{i-1} PREC_j}{\sum_{k=1}^{t_0} PREC_k} - 1 \right) \left(2 - \frac{\sum_{j=1}^{i-1} PREC_j}{\sum_{k=1}^{t_0} PREC_k} - 1 \right) \quad (104)$$

$$c = \sum_{i=2}^{t_0} PREC_i - V_{\text{Superficial}} \quad (105)$$

onde:

m_1 - parâmetro da função de percolação, adimensional;

$PREC_i$ - precipitação no intervalo i , em mm;

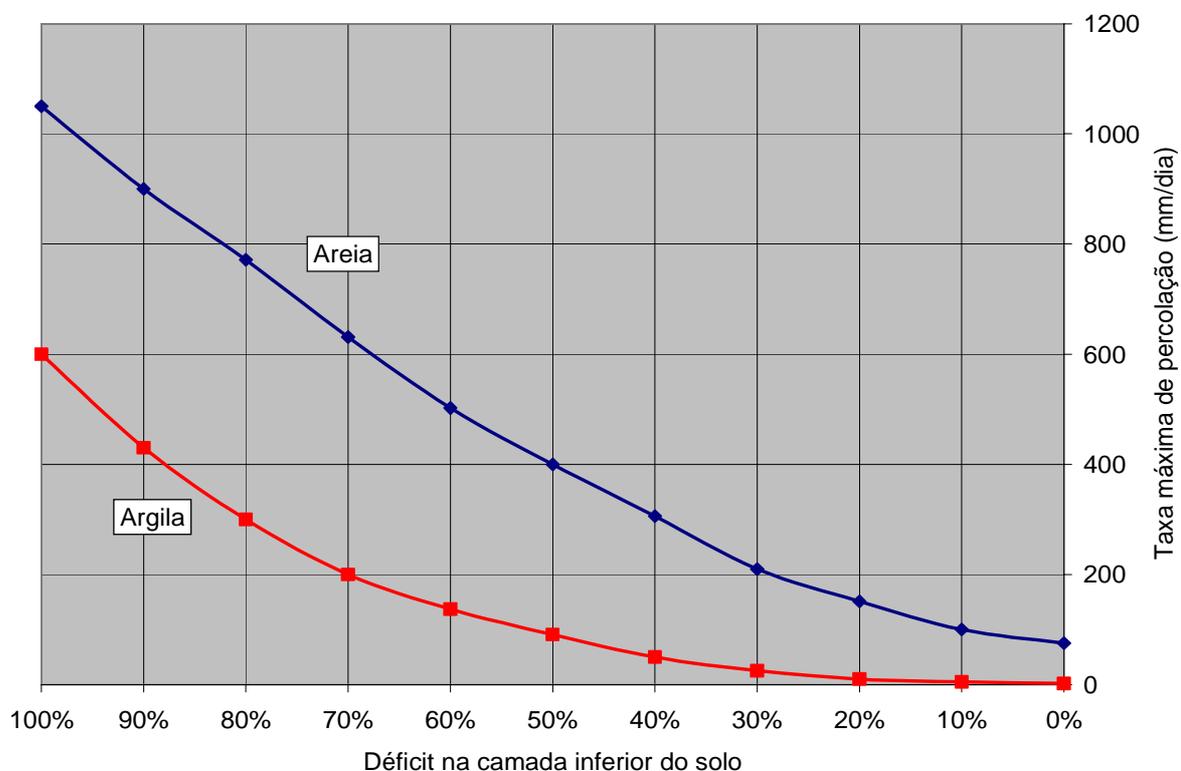
t_0 - término do período de precipitação mais significativa, em intervalos de tempo;

$V_{\text{Superficial}}$ - volume do escoamento superficial do evento, em mm.

e) C_3 e m_2 :

A estimativa dos parâmetros de percolação deve ser feita em conjunto, buscando-se reproduzir o comportamento esperado da função, e não se buscando a definição dos parâmetros individualmente (ANDERSON, 2002; HP, 2002; PECK, 1976). Este comportamento é função do tipo de solo, conforme ilustrado na figura 39, onde a curva associada ao solo arenoso apresenta maiores valores e menores variação e curvatura que a gerada por solo argiloso. No entanto, as características do hidrograma são indicativas da permeabilidade do solo e podem influenciar nas estimativas iniciais dos parâmetros. Os valores destes parâmetros obtidos diretamente de calibração não apresentam uma relação clara com o tipo de solo porque, nos eventos maiores de cheia, os valores de déficit da camada inferior do solo observados são geralmente baixos. Em termos práticos, isto significa que a maior contribuição de percolação se dá em torno uma pequena faixa de demanda de percolação, próxima ao ponto de percolação mínima. Tanto a faixa estreita de variação como a proximidade do ponto de mínima percolação fazem com que uma grande gama de parâmetros possa representar adequadamente o comportamento da percolação no trecho em que ela é mais significativa. Valores de referência para os parâmetros, obtidos de considerações lógicas, encontram-se na tabela 15.

FIGURA 39 – VARIAÇÃO DA PERCOLAÇÃO COM O TIPO DO SOLO.



FONTE: ANDERSON (2002)

TABELA 15 – ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS C_3 E m_2 .

TIPO DE SOLO	CARACTERÍSTICA DO HIDROGRAMA	ESTIMATIVAS DE C_3 E m_2
Argila	Escoamento superficial freqüente Pouco escoamento de base (max. de 1 mm/dia) $C_2 X_2^0$ ⁽¹⁾ : 2 a 4 mm/ dia	C_3 : 1,50 a 3,00 m_2 : 2,50 a 3,50
Silte	Escoamento superficial nos eventos maiores Escoamento de base moderado (max. de 2 mm/dia) $C_2 X_2^0$ ⁽¹⁾ : 4 a 8 mm/dia	C_3 : 0,40 a 1,50 m_2 : 1,80 a 2,50
Areia	Sem escoamento superficial ou só nos maiores eventos Escoamento de base considerável (max. > 2.5 mm/dia) $C_2 X_2^0$ ⁽¹⁾ : superior a 8 mm/dia	C_3 : 0,20 a 0,40 m_2 : 1,40 a 1,80

FONTE: ANDERSON (2002)

(1) Demanda mínima de percolação.

Além dos valores e orientações acima, obtidos da literatura do modelo Sacramento, é possível tentar obter os parâmetros da percolação utilizando as séries deste fluxo definidas para o cálculo de C_1 .

f) μ :

μ modela a parcela do escoamento do subsolo que não atinge o canal. O valor inicial desta perda deve ser zero. A necessidade de adoção de um valor diferente deve ser avaliada apenas no final do processo de calibração (ANDERSON, 2002).

g) C_{FRG} :

O coeficiente de solo congelado somente tem função em regiões sujeitas a este tipo de efeito. Nas regiões temperada e tropical, o parâmetro deve ser mantido no seu valor neutro, que é igual à unidade.

h) β :

O coeficiente de propagação na bacia/canal, β , pode ser estimado a partir do tempo decorrido entre o centro do período de maior precipitação e o pico do hidrograma. A tabela 16 abaixo apresenta o tempo para pico do hidrograma de um pulso de precipitação.

TABELA 16 – ESTIMATIVA DO PARÂMETRO DE PROPAGAÇÃO EM BACIA/CANAL.

Tempo para pico (dia)	β (dia ⁻¹)
11,0	0,05
7,5	0,10
6,0	0,15
4,0	0,20
3,0	0,30
2,0	0,40
1,5	0,50
1,0	0,70

i) Evapotranspiração potencial :

A evapotranspiração potencial representa a demanda máxima de evapotranspiração no modelo. O procedimento de obtenção da estimativa inicial da evapotranspiração potencial varia de acordo com a fonte que se utiliza para calculá-la. No entanto, quando este parâmetro é derivado exclusivamente de dados meteorológicos, as estimativas devem ser ajustadas para levar em conta as variações sazonais que ocorrem na bacia, em termos de cobertura do solo e desenvolvimento da vegetação, principalmente em áreas de agricultura.

A tabela 17 apresenta a faixa usual de variação dos valores de alguns parâmetros do modelo Sacramento segundo ANDERSON (2002) e as respectivas adaptações dos parâmetros correspondentes propostas para utilização com o modelo 3R. Para o modelo Sacramento, valores fora da faixa usual podem ocorrer, mas deve haver evidências sólidas que estes valores sejam necessários. Os valores propostos para o modelo 3R têm que ser validados com os resultados de futuras aplicações.

TABELA 17 – FAIXA DE VARIAÇÃO USUAL DOS PARÂMETROS DO MODELO SACRAMENTO E PROPOSTA PARA O MODELO 3R.

SACRAMENTO			3R		
Parâmetro	Limite Inferior	Limite Superior	Parâmetro	Limite Inferior	Limite Superior
<i>LZPK</i>	0,001	0,015	C_3	0,001	0,20
<i>LZSK</i>	0,03	0,20			
<i>LZFPM</i>	40	600	X_2^0	120	1200
<i>LZFSM</i>	15	300			
<i>LZTWM</i>	75	300			
<i>UZK</i>	0,20	0,50	C_1	0,06	0,17
<i>UZTWM</i>	25	125	X_1^0	35	200
<i>UZFWM</i>	10	75			
<i>ZPERC</i>	20	300	C_2	20	300
<i>REXP</i>	1,4	3,5	m_2	1,4	3,5

FONTE: ANDERSON (2002)

7.4 RECALIBRAÇÕES DO MODELO 3R

Uma vez que o modelo para uma bacia ou conjunto de bacias esteja calibrado e colocado em operação, inicia-se um processo contínuo de avaliação de seu desempenho. Pequenos desvios nas previsões emitidas são esperados e tratados em esquemas como o do estimador de estado que estudado. No entanto, quando o desempenho do modelo não atende às finalidades a que o modelo se destina, pode ser necessária uma maior intervenção no processo, iniciando-se com uma recalibração do modelo.

As recalibrações podem ser de dois tipos:

- a) **baseadas na avaliação do usuário:** resultam do processo de monitoramento e avaliação, tanto do desempenho do modelo como do sistema que o modelo deve representar. Justificam uma recalibração do modelo, o aumento da experiência da equipe com o processo de calibração, a constatação de comportamento inadequado do modelo em certas circunstâncias e mudanças físicas ou climáticas no sistema real (bacia hidrográfica);
- b) **obrigatórias:** algumas situações obrigam reavaliação de calibrações. Entre elas podemos citar as mudanças de modelo hidrológico, mudanças dos dados observados (consistência, reanálise, etc.), implementação de alteração no modelo vigente, como novos métodos para melhorar seus resultados ou a introdução de novos pontos de previsão.

8 CALIBRAÇÃO DO MODELO 3R

8.1 APLICATIVO UTILIZADO NA CALIBRAÇÃO

O código do modelo 3R utilizado no processo de calibração foi desenvolvido pelo autor, em FORTRAN, a partir do estudo do modelo conceitual e do método de otimização anteriormente apresentados e dos códigos disponíveis para simulação e para calibração automática de parâmetros, operações antes realizadas com aplicativos distintos. Podemos citar como ganhos oriundos da nova versão do modelo:

- a) facilidade operacional: a utilização de um único aplicativo na realização do processo de calibração tanto manual como automática permite maior agilidade, por reduzir o tempo de aprendizagem e por permitir o compartilhamento de todos os arquivos de entrada;
- b) flexibilidade de controles e parâmetros: alguns parâmetros e controles, fixos no código na versão anterior, foram transformados em parâmetros de entrada, dando maior flexibilidade ao aplicativo;
- c) ampliação do número de parâmetros para otimização: foi aumentado o número de parâmetros incluídos no processo de calibração automática. Na versão anterior do aplicativo, nem todos os parâmetros do modelo eram considerados pelo processo de otimização. Na versão desenvolvida, apenas o número de tramos do canal, o volume máximo de precipitação por intervalo de integração e o número mínimo de intervalos de integração não são considerados pelo processo de otimização;
- d) possibilidade de seleção de parâmetros a otimizar: implementou-se a possibilidade de seleção dos parâmetros do modelo a serem considerados no processo de otimização. Isto permite a utilização do aplicativo para a definição de ótimos locais ajustando-se parâmetros específicos;

- e) possibilidade de múltiplas simulações: desenvolveu-se a possibilidade de obtenção, em uma única execução, de múltiplas simulações (simulações com diferentes conjuntos de parâmetros), o que facilita tanto o processo de calibração manual como análise de sensibilidade;
- f) melhorias da versão anterior: foram implementadas algumas melhorias conceituais em relação às versões anteriores, como a verificação de consistência de fluxos e estados no momento de sua obtenção e não de sua utilização, o que garante que todos os estados e fluxos gerados pelo modelo sejam sempre consistentes.

Do ponto de vista da implementação computacional, o novo código foi gerado utilizando-se o paradigma da Programação Estruturada. Apresenta uma modularização mais simples, um maior grau de comentários no código e nomes de variáveis mais significativos (de mais fácil leitura) que os códigos originais.

A versão executável do aplicativo utilizado encontra-se em CD anexo a esta dissertação. O código-fonte do aplicativo pode ser obtido com o autor ou seus orientadores.

8.2 DEFINIÇÃO DO PERÍODO DE CALIBRAÇÃO

Os dados básicos obtidos permitiram gerar séries inicialmente aceitáveis para todos os postos de precipitação e vazão para o período de 01/01/1975 a 31/12/2003. Estas séries foram analisadas utilizando-se um modelo simplificado de balanço mensal de água no solo. Avaliando-se os resultados obtidos, identificou-se o período de 1994 a 2003 como apresentando valores de vazão, precipitação e evapotranspiração relativamente compatíveis entre si para todas as sub-bacias a modelar. Por isto, este período foi eleito como período de estudo. Este processo é importante porque a tentativa de aplicação de modelo precipitação-vazão para conjuntos de dados

inconsistentes deve resultar em fracasso. A figura 40 ilustra, para a bacia incremental do posto de Novo Porto Taquara, as informações geradas pelo procedimento e indica a relativa homogeneidade de comportamento identificado no período de estudo selecionado e as grandes variações detectadas nos outros períodos, indicativas de problemas com os dados.

FIGURA 40 – BALANÇO MENSAL DE ÁGUA NO SOLO PARA O POSTO DE NOVO PORTO TAQUARA.



8.3 DEFINIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO

A literatura a respeito do modelo Sacramento indica, como procedimento mais adequado de calibração, um processo de três passos:

- a) estimativa inicial dos parâmetros da bacia, a partir da aplicação, aos dados disponíveis, de métodos simplificados;
- b) melhoria da estimativa inicial dos parâmetros por calibração manual;

- c) refinamento do conjunto de parâmetros obtidos pela aplicação de um algoritmo de otimização.

O processo de estimativa inicial de parâmetros é particular de cada modelo, pois depende do seu modelo conceitual. Para a estimativa inicial de parâmetros do modelo 3R propôs-se, nesta dissertação, os métodos apresentados no capítulo 7.

A calibração manual consiste na busca, por tentativa e erro, dos parâmetros que melhor representem o comportamento de longo prazo da bacia, ou seja, por alterações sucessivas dos valores dos parâmetros, de acordo com estudos de análise de sensibilidade destes parâmetros e utilizando-se da experiência e sensibilidade da pessoa responsável pela calibração (calibrador). Este processo é importante porque, pela aplicação do conhecimento e discernimento do calibrador, incorpora-se aos parâmetros definidos qualidades que são difíceis de serem conseguidas com os algoritmos de otimização, como razoabilidade física e compatibilidade entre os parâmetros e com parâmetros de bacias próximas. Também, é bastante difícil para um processo de otimização considerar e ponderar os múltiplos aspectos que caracterizam uma boa concordância entre o observado e o simulado, como tempo e valor de pico, declividade de ascensão e recessão dos hidrogramas de cheia, recessão do escoamento de base, volume escoado, velocidade de resposta à chuva, etc. Além disto, é bastante difícil para estes métodos ponderar a validade de determinados períodos dos dados observados e descartá-los na busca dos melhores parâmetros, o que é feito sem maiores problemas pelo calibrador.

O método de otimização implementado no modelo 3R para a calibração dos parâmetros é descrito no capítulo 4.

No entanto, a aplicação do procedimento indicado para a calibração da bacia em questão não apresentou bons resultados em função dos seguintes motivos:

- a) a estimativa inicial dos parâmetros mostrou-se mais difícil que o esperado, pela complexidade das inter-relações entre os parâmetros e destes com o comportamento do modelo, mesmo para um modelo relativamente simples como o 3R;
- b) as calibrações resultantes do procedimento automático (otimizador) mostraram-se inadequadas para representar o comportamento geral das bacias modeladas. As simulações obtidas por este tipo de procedimento apresentaram um comportamento muito mais suave que o observado na bacia e a tendência do otimizador em anular um dos reservatórios de solo, seja pela anulação de sua saída, seja pela definição de parâmetros que tornam esta saída praticamente constante. Uma das possíveis causas deste tipo de resultado poderia ser a função objetivo utilizada, que não guarda relação com as características que seriam observadas por um especialista durante a calibração manual. Assim, uma das sugestões para desenvolvimentos futuros seria o desenvolvimento de funções objetivo que refletissem melhor a percepção do especialista humano da qualidade de um ajuste.

Desta forma, para este estudo o procedimento geral foi adaptado para:

- a) definição de estimativas iniciais apenas para os parâmetros básicos dos escoamentos subsuperficial e de base (C_1 e C_2), por serem de mais fácil identificação e por já estabelecerem uma base para a definição dos outros parâmetros;
- b) definição de um caso base por otimização, cujos parâmetros (se possível, após análise de sua razoabilidade) e estatísticas (função objetivo, coeficiente de correlação e estatísticas dos desvios) servirão de referência para a calibração manual e sua avaliação;

- c) calibração manual da bacia, levando em conta as estimativas iniciais de parâmetros, os resultados da calibração automática e a avaliação do especialista da qualidade do ajuste e da razoabilidade física dos parâmetros da bacia e de sua variação entre bacias, em função dos dados disponíveis de características (topografia, vegetação, solo, etc.).

A estimativa dos parâmetros C_1 e C_2 foi feita para todo o período de dados disponível (1975 a 2003) e de maneira gráfica, utilizando procedimento implementado em planilha eletrônica. No procedimento desenvolvido, as vazões são plotadas em escala logarítmica e duas retas são ajustadas, manualmente, aos trechos de hidrograma selecionados para representar os fluxos de base e subsuperficial, de maneira semelhante à adotada para o ajuste de curvas de descarga. A configuração definida graficamente é traduzida em valores na planilha eletrônica e a série destas avaliações é armazenada. A vantagem do procedimento é que permite, de maneira rápida e eficiente, gerar um grande número de estimativas dos parâmetros, possibilitando a visualização de sua estabilidade e faixa de variação de valores. Como exemplo, para o posto de Porto Paraíso do Norte foram realizadas estimativas de C_1 e C_2 para 26 eventos diferentes no prazo de aproximadamente 1 hora. O procedimento para o posto de Porto Paraíso do Norte é ilustrado na figura 41.

8.4 OBTENÇÃO E AVALIAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DE REFERÊNCIA

Adotando-se as recomendações de calibração anteriormente apresentadas, buscou-se a definição de uma calibração de referência, para orientar os valores dos parâmetros adotados para as bacias próximas. Para isto, iniciou-se a calibração pela bacia de montante, com exutória em Tereza Cristina. Apesar de tempo e esforços significativos terem sido empregados no processo, a calibração resultante não apresentou bons resultados. O valor máximo do coeficiente de correlação obtido foi

bastante baixo, da ordem de 0,69, mesmo com o uso da calibração automática, que, em teoria, apresentaria valor para esta estatística da ordem do maior possível. Identificou-se os dados de precipitação como a causa provável do baixo desempenho. Pela baixa densidade de postos, a precipitação na bacia de Tereza Cristina é praticamente a precipitação do posto de Guarapuava, que se encontra em uma região mais baixa e fora da bacia (30 km do divisor). Simulação realizada utilizando como precipitação para toda a bacia de Tereza Cristina apenas as leituras do posto de Guarapuava não indicou diferença significativa em relação à simulação utilizando a precipitação média calculada. Analisando-se os dados, fica clara a não correspondência, no geral, dos eventos de precipitação com os dados de vazão disponíveis. A figura 42 ilustra a situação descrita acima, tanto em termos da não representatividade da precipitação como da pequena diferença entre simulação com a precipitação média e com a precipitação do posto de Guarapuava.

FIGURA 41 – ESTIMATIVA INICIAL DOS PARÂMETROS DE ESCOAMENTO.

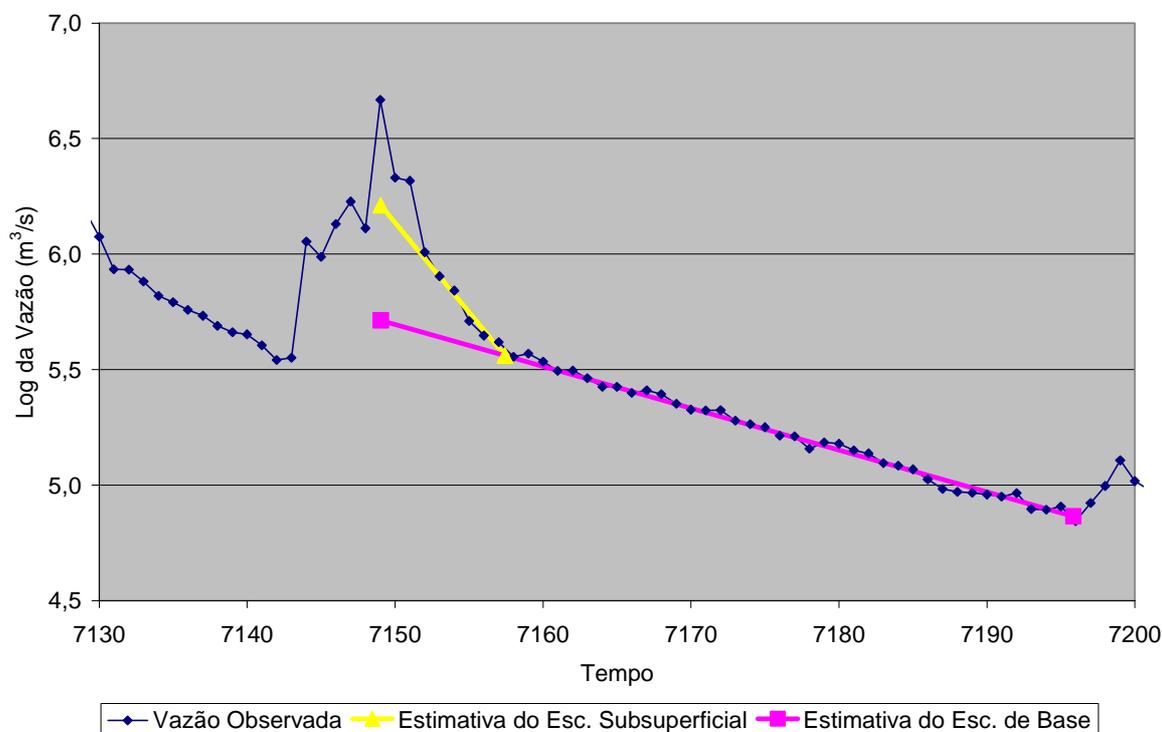
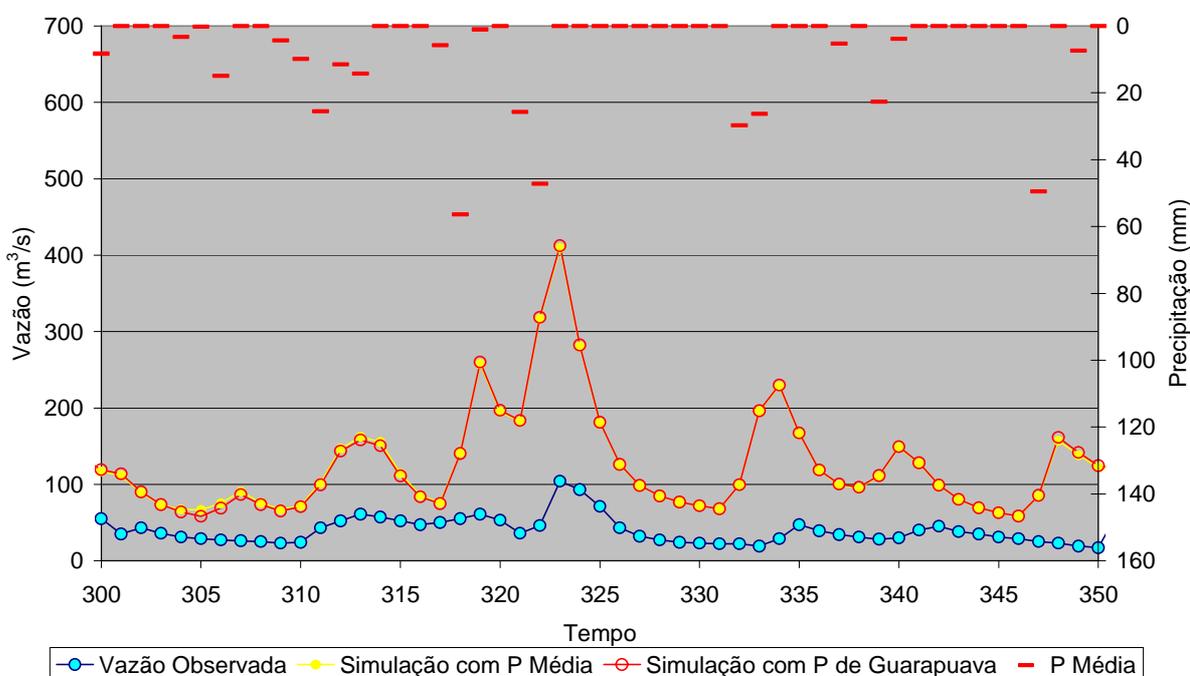


FIGURA 42 – CALIBRAÇÃO INICIAL DO POSTO DE TEREZA CRISTINA.



Além deste fato e da impressão obtida da inspeção visual dos dados, dois motivos adicionais contribuem para atribuir-se a dificuldade de calibração à precipitação:

- a) os dados de vazão do posto são compatíveis com os dados do posto de jusante;
- b) em teste realizado para o período de 05/07/2002 a 31/12/2003, com resultados da calibração automática do modelo 3R para a precipitação média na bacia e para a precipitação representada unicamente pelo posto de Tereza Cristina, constatou-se que o coeficiente de correlação aumentou significativamente com o uso da precipitação apenas do posto de Tereza Cristina, passando de 0,66 para a 0,80. A série de Tereza Cristina foi

obtida do Sistema de Telemetria Hidrometeorológica (STH) de Itaipu, sistema que iniciou sua operação em meados de 2002.

Em função do desempenho da calibração da bacia de Tereza Cristina, adotou-se como nova bacia de referência a sub-bacia Ubá do Sul/Quinta do Sol – Porto Paraíso do Norte. A escolha deveu-se a três motivos:

- a) o posto de Porto Paraíso do Norte é o mais antigo da bacia, apresentando, portanto, séries mais longas e mais trabalhadas e uma maior atenção na operação do posto;
- b) a sua sub-bacia incremental é a maior da bacia em estudo, o que aumenta a importância relativa da transformação chuva-vazão para a obtenção de bons resultados de simulação;
- c) a sub-bacia apresenta melhor densidade de pluviômetros que as outras sub-bacias do estudo.

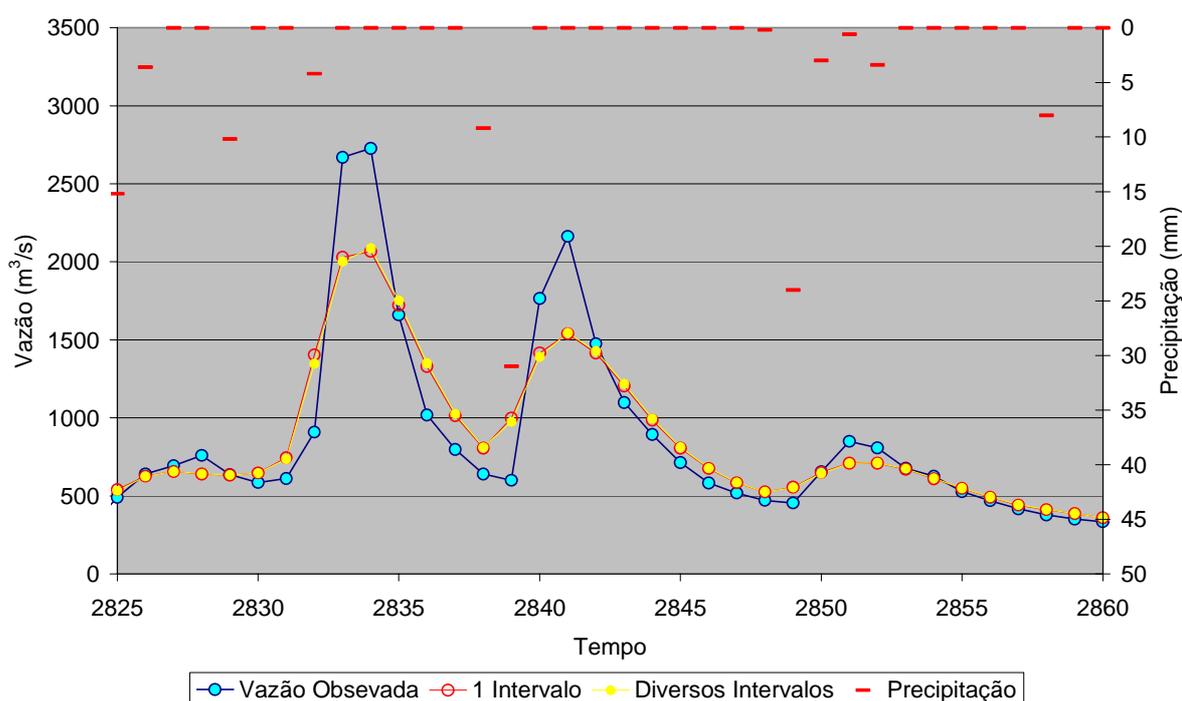
O processo de calibração do modelo 3R para a sub-bacia de Porto Paraíso do Norte também apresentou suas dificuldades, que são apresentadas resumidamente a seguir, em ordem de importância:

- a) o modelo 3R apresentou dificuldade em reproduzir o comportamento hidrológico geral da bacia em estudo, gerando sempre hidrogramas com maior abatimento (mais suaves e de menor pico) que os observados, conforme já citado anteriormente. Este tipo de resultado é ilustrado na figura 43;
- b) a hipótese adotada para o comportamento da evapotranspiração no modelo 3R, de proporcionalidade da evapotranspiração real com o grau de armazenamento dos reservatórios de solo, mostrou-se inadequada para a

região, onde a evapotranspiração real é praticamente igual à evapotranspiração potencial. Assim, a hipótese adotada implica na consideração de uma disponibilidade de água no sistema maior que a observada;

- c) avaliações dos fluxos gerados pelo modelo indicaram pequenas descontinuidades (“degraus”) no fluxo de base, causadas por variação brusca da evapotranspiração do reservatório inferior de solo. A evapotranspiração oriunda do reservatório de base é função do saldo da evapotranspiração do reservatório superior. Como este apresenta grandes variações, a evapotranspiração do reservatório de base varia de acordo.

FIGURA 43 – DIFICULDADE DE REPRESENTAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO.



Para o primeiro problema, do abatimento excessivo do hidrograma, não conseguiu-se uma solução aceitável por calibração, pois mesmo a escolha de parâmetros e controles do modelo que forçassem uma reposta mais intensa, como a

integração em um único intervalo para cada passo de cálculo de simulação, mostrou-se ineficiente para resolver este problema, por não apresentar o efeito desejado ou por provocar um adiantamento do hidrograma simulado em relação ao observado. A utilização da calibração automática intensifica o problema, porque converge para soluções com grande abatimento. Assim, aceitou-se este comportamento do modelo como condicionante do problema, definindo-se, também, por priorizar a calibração manual da bacia, mesmo com perdas nas estatísticas de desempenho da calibração.

Para o segundo problema, a redução da evapotranspiração real causada pela hipótese de proporcionalidade da evapotranspiração com o armazenamento foi contraposta pela incorporação, no código destinado à calibração e simulação, do parâmetro C_{PET} , constante multiplicativa da evapotranspiração potencial. A implementação do modelo 3R foi adaptada para que a rotina de otimização aceitasse este parâmetro adicional. Em termos de volume, esta alternativa mostrou-se bastante eficiente, mas os fatores de multiplicação da evapotranspiração apresentaram-se desconfortavelmente grandes, conforme pode ser visto na tabela 18, de parâmetros obtidos da calibração.

O terceiro problema não foi atacado nesta etapa, por ser considerado de segunda ordem, ou seja, apresentar baixo impacto no resultado geral do modelo.

O primeiro e o terceiro problemas citados foram analisados com um pouco mais de detalhe e geraram sugestões para alterações do modelo 3R, conforme apresentado no capítulo 12.

Durante o processo de calibração, o resultado de cada calibração realizada, seja automática ou manual, foi inspecionado para a consistência dos parâmetros, fluxos e estado resultantes. O resultado obtido pode ser considerado satisfatório, dadas as limitações apresentadas. O resultado obtido pela calibração manual tem estatísticas piores que o resultado do processo de otimização, mas representa um pouco melhor o comportamento hidrológico da bacia. Os parâmetros e estatísticas de calibração são apresentados no próximo item, junto com os parâmetros das outras sub-bacias.

8.5 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO MODELO 3R

A calibração de cada sub-bacia foi realizada considerando-se como conhecidas a precipitação, a evapotranspiração potencial e a vazão de entrada na sub-bacia, ou seja, a vazão das sub-bacias de montante. Tomando-se como base a calibração da bacia incremental Ubá do Sul/Quinta do Sol-Porto Paraíso do Norte, definiu-se os parâmetros das outras sub-bacias. Os parâmetros obtidos e as estatísticas de desempenho para cada sub-bacia são apresentados na tabela 18.

Conforme esperado pelas avaliações anteriores, a calibração das bacias de montante, onde a precipitação apresentou baixa representatividade, mostrou resultados bastante ruins. No entanto, pelo processo de calibração adotado buscou-se a obtenção de parâmetros do modelo para estas sub-bacias que, se não são os melhores possíveis, ao menos guardam alguma proximidade com o comportamento da bacia, condição que pode ser importante para o sucesso da aplicação do estimador de estado.

A partir dos dados da tabela 18 é possível verificar que os resultados das calibrações melhoram sensivelmente de montante para jusante, partindo de valores de coeficiente de correlação entre valores previstos e observados inaceitavelmente baixos em Tereza Cristina (0,668) para valores bons em Novo Porto Taquara (0,976). Esta melhora pode ser creditada, em parte, à significância da parcela de contribuição da vazão de montante para a vazão total na exutória da bacia, já que, embora a situação apresente uma clara melhora para jusante, há indicativos que mesmo para as sub-bacias de jusante a precipitação utilizada não foi a mais representativa dos processos de vazão. Esta observação foi apresentada com ressalvas porque a contribuição exclusiva da fase bacia para a vazão total na exutória foi estimada a partir da diferença entre vazões de montante e jusante da bacia, o que causa séries com bastante ruído e de leitura difícil.

Em todas as bacias observou-se o fenômeno do abatimento excessivos dos hidrogramas, o que fez com que o modelo fosse virtualmente incapaz de reproduzir as vazões de pico nas enchentes. Inspeção visual realizada nos resultados da calibração de

Novo Porto Taquara, a de melhor desempenho global, indicou que as vazões de pico dos hidrogramas foram subestimadas em 76 (79,2%) dos 96 eventos com pico superior a 1.000 m³/s, incluindo todos os maiores eventos.

TABELA 18 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO MODELO 3R.

		POSTO				
		Tereza Cristina	Ubá do Sul	Porto Paraíso do Norte	Novo Porto Taquara	
PARÂMETRO	X_1^0	100,00	100,00	200,00	250,00	
	X_2^0	450,00	550,00	650,00	850,00	
	C_1	0,010	0,012	0,012	0,012	
	C_2	0,006	0,008	0,008	0,008	
	C_3	4,00	4,00	4,00	3,50	
	m_1	1,00	0,80	1,30	1,30	
	m_2	2,20	2,20	2,20	2,00	
	m_3	1,30	1,30	1,50	1,00	
	m	1,00	1,00	1,00	1,00	
	β	1,00	1,00	1,00	1,00	
	μ	0,00	0,00	0,00	0,00	
	C_{FRG}	1,00	1,00	1,00	1,00	
	C_{PET}	4,00	4,00	6,50	2,80	
	Nº Tramos	2	2	2	2	
	Volume de Integração	200,0	200,0	200,0	200,0	
Nº Mínimo de Intervalos	1	1	1	1		
ESTATÍSTICA	Observ.	Média	89,736	299,289	618,189	722,824
		Desv. Padrão	128,234	365,241	583,224	618,777
	Previsto	Função Obj.	0,550787	0,375116	0,318228	0,160889
		Coef. Correl.	0,66853	0,84701	0,89353	0,97605
		Média	88,122	302,248	625,778	741,549
	Resíduo	Desv. Padrão	115,52	312,443	531,327	589,962
		Média	-1,614	2,958	7,590	18,725
	Desv. Padrão	99,911	194,178	262,072	135,351	

Embora a calibração das bacias de montante tenha apresentado um resultado ruim, que, em princípio, dificultaria sua utilização prática, para o estudo em questão esta situação mostra-se vantajosa, por permitir avaliar os ganhos possíveis de previsão com a aplicação do estimador de estado a bacias com qualidades distintas de resultados de calibração.

9 CALIBRAÇÃO DO ESTIMADOR DE ESTADO

9.1 APLICATIVO UTILIZADO NA CALIBRAÇÃO

Utilizou-se, para a calibração do estimador de estado, o aplicativo anteriormente disponível, programado em FORTRAN, com as seguintes alterações:

- a) utilização em sub-bacias intermediárias: dado que o aplicativo original foi desenvolvido para utilização em bacias de cabeceira, o código do aplicativo foi adaptado para que as equações de estado e as equações do estimador de estado incorporassem a informação da afluência da bacia de montante;
- b) flexibilidade de controles e parâmetros: alguns parâmetros e controles, fixos no código na versão original, foram transformados em parâmetros de entrada, dando maior flexibilidade ao aplicativo;
- c) melhorias da versão anterior: foram implementadas algumas melhorias conceituais em relação à versão anterior, como a verificação de consistência de fluxos e estados no momento de sua obtenção e não de sua utilização, o que garante que todos os estados e fluxos gerados pelo modelo sejam sempre consistentes.

Não foi possível, no prazo disponível, a criação de um único aplicativo que permitisse a realização de todas as etapas de implementação de um sistema de previsão com estimador de estado: simulação sem estimador de estado, calibração automática do modelo, calibração manual do estimador de estado, simulação com estimador de estado. Este aplicativo certamente auxiliaria em estudos futuros utilizando o modelo 3R e seu estimador de estado; por isto, sugere-se que o mesmo seja desenvolvido em trabalhos futuros.

Em função da mínima intervenção realizada no aplicativo de calibração do estimador de estado, não incluiu-se no código o parâmetro C_{PET} , criado para permitir a melhoria do balanço de volumes de longo período do modelo 3R. Ao invés disto, majorou-se os dados de entrada da evapotranspiração potencial do valor de C_{PET} definido na calibração, o que leva a praticamente aos mesmos resultados da incorporação do parâmetro.

A versão executável do aplicativo utilizado encontra-se em CD anexo a esta dissertação. O código-fonte do aplicativo pode ser obtido com o autor ou seus orientadores.

9.2 DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO

A calibração do estimador de estado consiste na definição dos parâmetros α_U e α_P da equação de propagação da matriz de covariâncias dos desvios do modelo, representada pela equação (47) em sua forma geral e (49) em notação simplificada.

Embora existam técnicas estatísticas mais elaborada para a definição destes parâmetros, conforme apresentado em RAJARAM e GEORGAKAKOS (1987, apud GEORGAKAKOS et alli, 1988), o procedimento mais simples é o de avaliar o comportamento de diversas funções de medição de desempenho do modelo (funções objetivo) no espaço dos valores de α_U e α_P e definir, a critério do especialista, um ponto neste espaço para o qual o conjunto das funções apresente o melhor comportamento global possível. Dadas as incertezas de dados e modelos, a avaliação dos melhores parâmetros não é feita para valores pontuais, mas para regiões ótimas. Para permitir esta avaliação, são construídos gráficos de isolinhas para as distintas funções objetivo, conforme ilustrado no gráfico 45.

As funções objetivo utilizadas na versão atual do aplicativo para calibração do estimador de estado são o valor esperado, desvio padrão e coeficiente de correlação serial “lag” 1 dos resíduos normalizados de vazões e o coeficiente de correlação entre

vazões prevista e observada. O resíduo normalizado é definido como:

$$\eta(t) = \sqrt{\mathbf{r}^T(t) (\mathbf{H}(t) \mathbf{P}(t)^- \mathbf{H}^T(t) + \mathbf{R}(t))^{-1} \mathbf{r}(t)} \quad (106)$$

onde:

$\eta(t)$ - resíduo normalizado da vazão;

t - instante de tempo;

$\mathbf{r}(t)$ - erro do modelo, definido como diferença entre resultado observado e o simulado pelo modelo;

$\mathbf{H}(t)$ - matriz de sensibilidade da equação de observação, definida conforme a equação (54);

$\mathbf{P}(t)^-$ - matriz de covariância “a priori” (antes da atualização de estado) dos desvios dos estados do modelo.

A obtenção destes resultados somente é possível após a definição das seguintes informações, que podem ter impacto no desempenho do estimador:

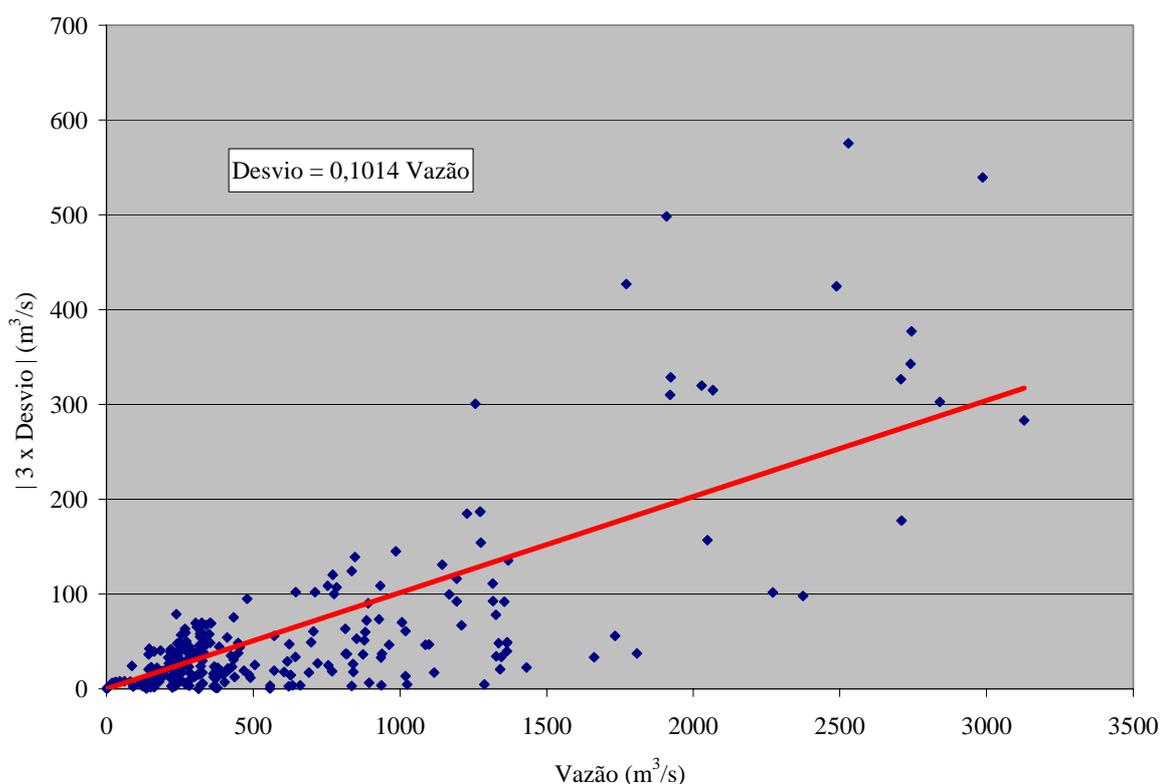
- a) raiz quadrada da diagonal principal da matriz inicial de covariâncias dos desvios dos estados do modelo, \mathbf{P} , correspondente aos desvios padrão dos erros dos estados;
- b) raiz quadrada da diagonal principal da matriz de covariância dos parâmetros do modelo, \mathbf{N} , correspondente aos desvios padrão dos valores dos parâmetros;
- c) parâmetros C_{p0} e C_{p1} do modelo de variâncias (ver item 5.4) da precipitação, evapotranspiração potencial e vazão observada.

Os desvios padrão dos erros dos estados (matriz \mathbf{P} inicial) são definidos pelo especialista, guardando relação com os estados iniciais fornecidos. Este procedimento

simplificado é aceitável porque que **P** deve convergir para uma situação consistente com o sistema modelado após algum tempo de simulação.

Os desvios padrão dos valores dos parâmetros são definidos pelo especialista, levando em conta as informações qualitativas sobre a importância absoluta e relativa dos parâmetros na bacia sendo modelada, coletadas durante o processo de calibração, em especial na calibração manual.

FIGURA 44 – ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DA VARIÂNCIA DAS VAZÕES OBSERVADAS.



Os parâmetros do modelo de variância da precipitação e da evapotranspiração potencial foram estimados pelo especialista, tendo em conta as análises de qualidade dos dados descrita em itens anteriores e da avaliação do parâmetro C_{PET} , de majoração da evapotranspiração potencial. Os parâmetros do modelo da variância da vazão observada foram estimados a partir dos coeficientes da regressão linear entre a vazão e o triplo do módulo dos desvios entre as medições de vazão e as curvas de descargas

definidas para os postos, conforme ilustrado na figura 44. Os valores de todos os desvios foram multiplicados por 3 como uma tentativa de aproximar a variação de 3 desvios padrão. Julgou-se necessário realizar esta multiplicação em função do pequeno número de medições no tramo superior, que dificultaria a definição da variabilidade nesta região.

Os valores definidos para a diagonal principal da matriz inicial de covariância dos desvios dos estados (**P**), para a diagonal principal da matriz de covariância dos parâmetros (**N**) e para os parâmetros dos modelos de variância encontram-se resumidos na tabela 19. De posse destes valores iniciais, foram geradas as figuras 45 a 48, utilizadas para definição dos parâmetros α_U e α_P , pelo procedimento simplificado de seleção dos valores por especialista através de inspeção dos resultados de múltiplas funções objetivo, conforme descrito anteriormente neste item. Os parâmetros selecionados são indicados nos gráficos e encontram-se listados na tabela 20.

9.3 ANÁLISE DA CALIBRAÇÃO DO ESTIMADOR

As tabelas 21 a 24 apresentam, para cada uma das sub-bacias estudadas, algumas estatísticas de desempenho para a previsão um passo a frente do modelo 3R, para o período de calibração (1994 a 2003), tanto para o conjunto total de resultados como para os quartis de vazão observada.

O estimador de estado mostrou-se eficiente na geração de vazões iniciais de previsão próxima aos valores observados. Isto pode ser comprovado pelo coeficiente de correlação entre vazões observadas e resultantes da atualização de estado, que mesmo para o pior caso de simulação (sub-bacia de Tereza Cristina) atingiu valores da ordem de 0,98. Este fato pode ser visualizado nas figuras 49 e 50, correspondentes à sub-bacia de Novo Porto Taquara e relativas aos dois períodos de dados tomados para ilustrar as análises sobre a calibração do estimador de estado.

FIGURA 45 – NOVO PORTO TAQUARA – (a) DESVIO NORMALIZADO MÉDIO (ADIM.) (b) DESVIO PADRÃO DO DESVIO NORMALIZADO (ADIM.) (c) AUTOCORRELAÇÃO “LAG” 1 DO DESVIO NORMALIZADO (ADIM.) (d) CORRELAÇÃO ENTRE VAZÃO PREVISTA E OBSERVADA (ADIM.).

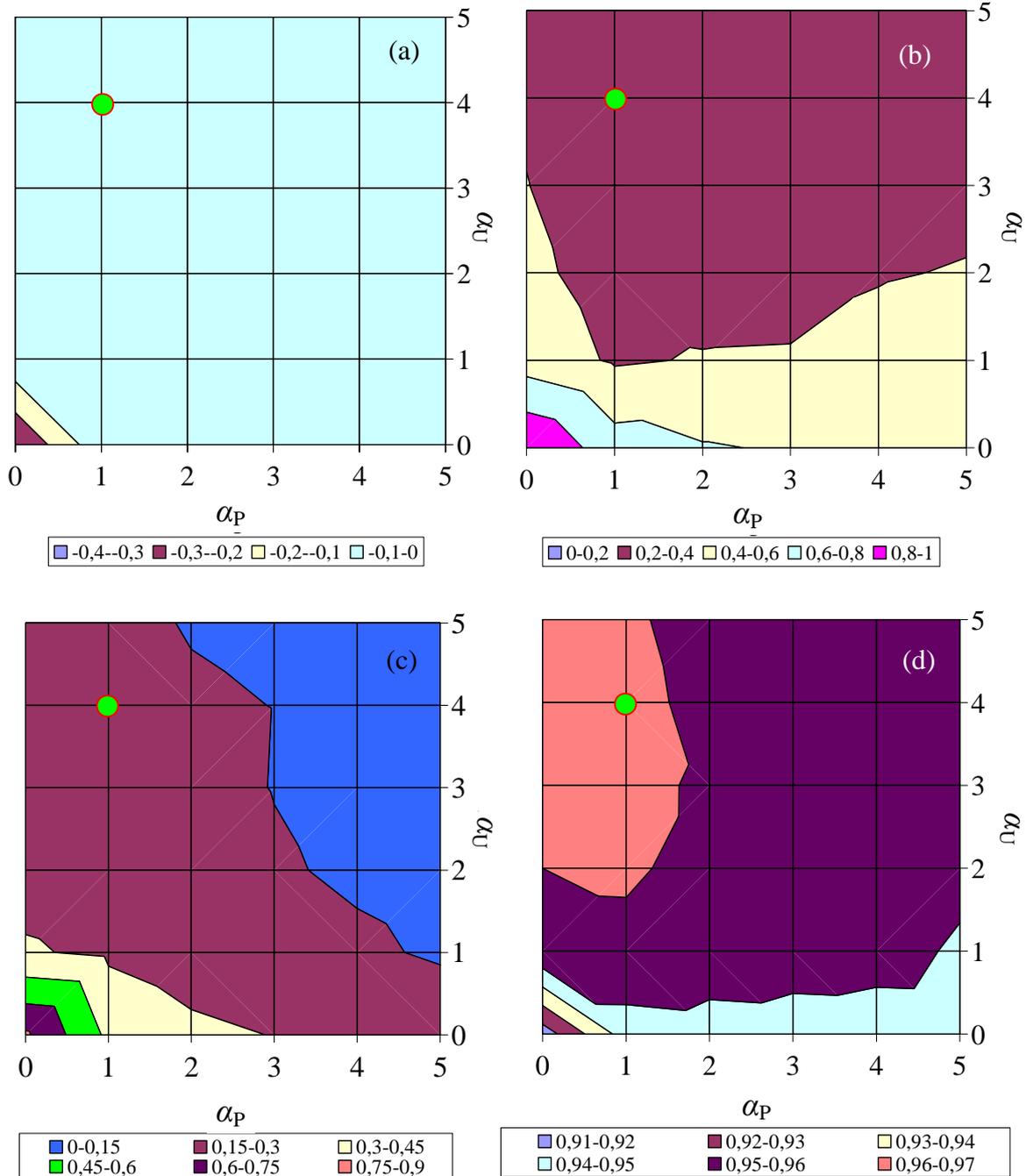
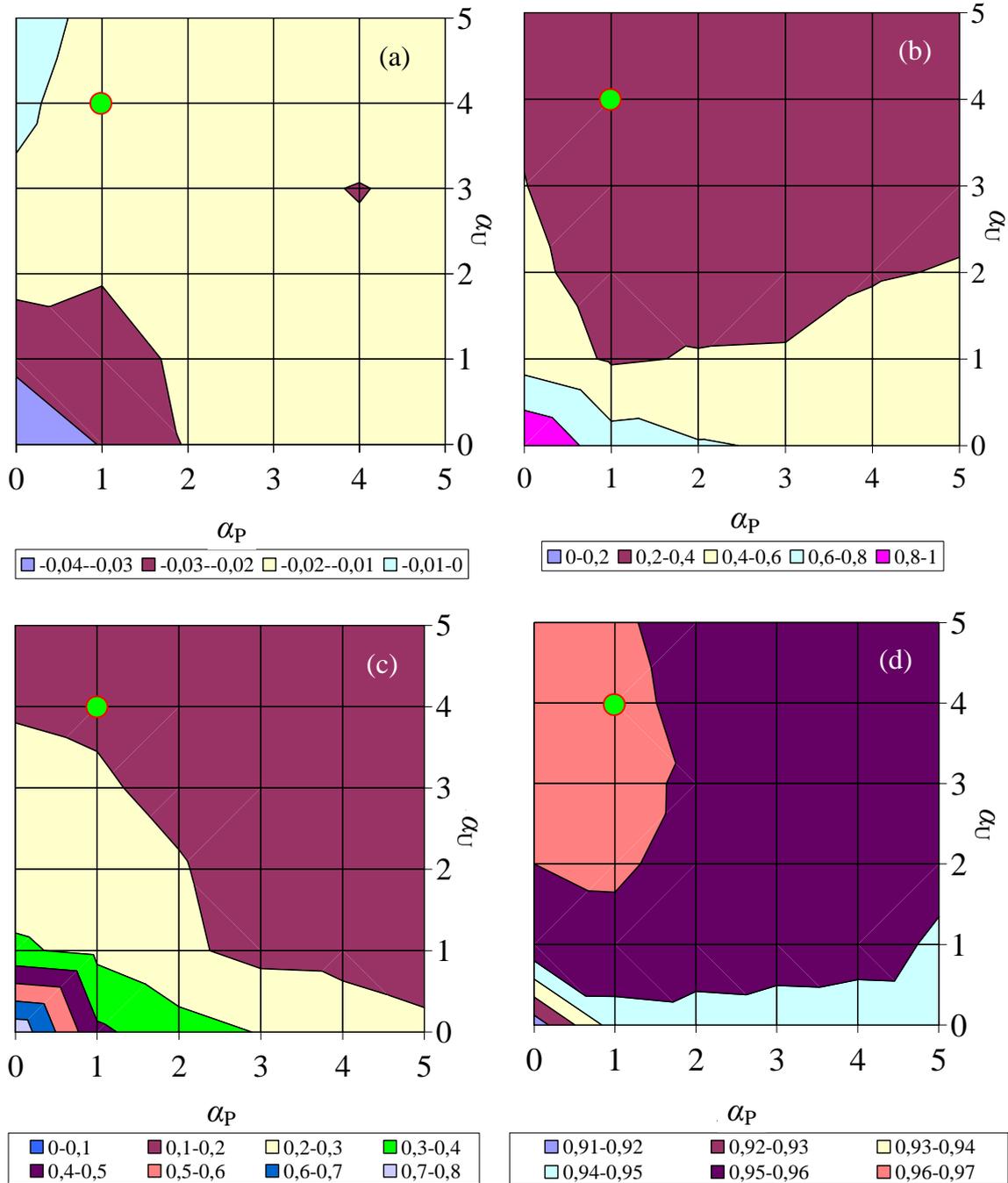


FIGURA 46 – PORTO PARAÍSO DO NORTE – (a) DESVIO NORMALIZADO MÉDIO (ADIM.) (b) DESVIO PADRÃO DO DESVIO NORMALIZADO (ADIM.) (c) AUTOCORRELAÇÃO “LAG” 1 DO DESVIO NORMALIZADO (ADIM.) (d) CORRELAÇÃO ENTRE VAZÃO PREVISTA E OBSERVADA (ADIM.).



● - Parâmetros selecionados

FIGURA 47 – UBÁ DO SUL – (a) DESVIO NORMALIZADO MÉDIO (ADIM.) (b) DESVIO PADRÃO DO DESVIO NORMALIZADO (ADIM.) (c) AUTOCORRELAÇÃO “LAG” 1 DO DESVIO NORMALIZADO (ADIM.) (d) CORRELAÇÃO ENTRE VAZÃO PREVISTA E OBSERVADA (ADIM.).

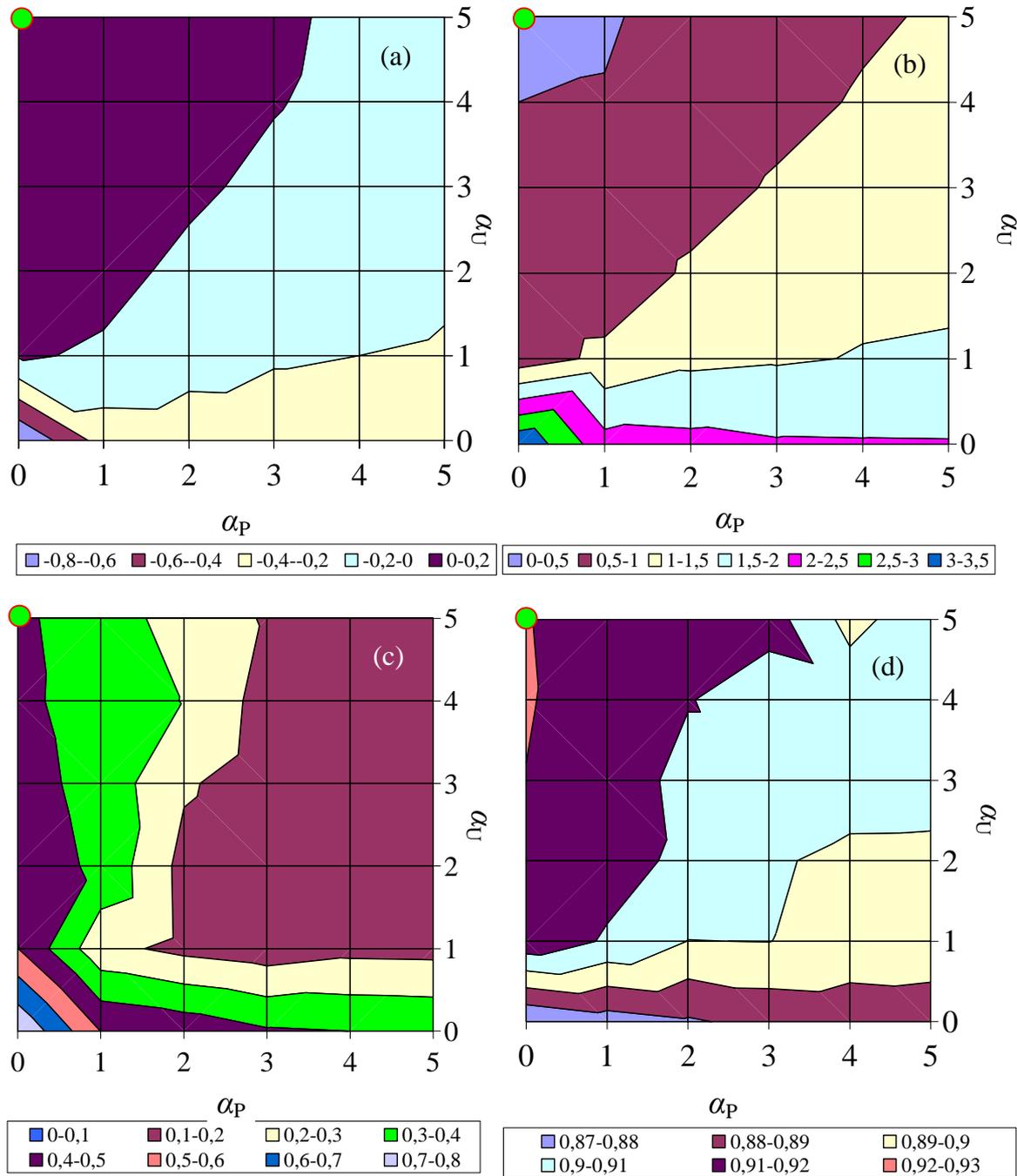


FIGURA 48 – TEREZA CRISTINA – (a) DESVIO NORMALIZADO MÉDIO (ADIM.) (b) DESVIO PADRÃO DO DESVIO NORMALIZADO (ADIM.) (c) AUTOCORRELAÇÃO “LAG” 1 DO DESVIO NORMALIZADO (ADIM.) (d) CORRELAÇÃO ENTRE VAZÃO PREVISTA E OBSERVADA (ADIM.).

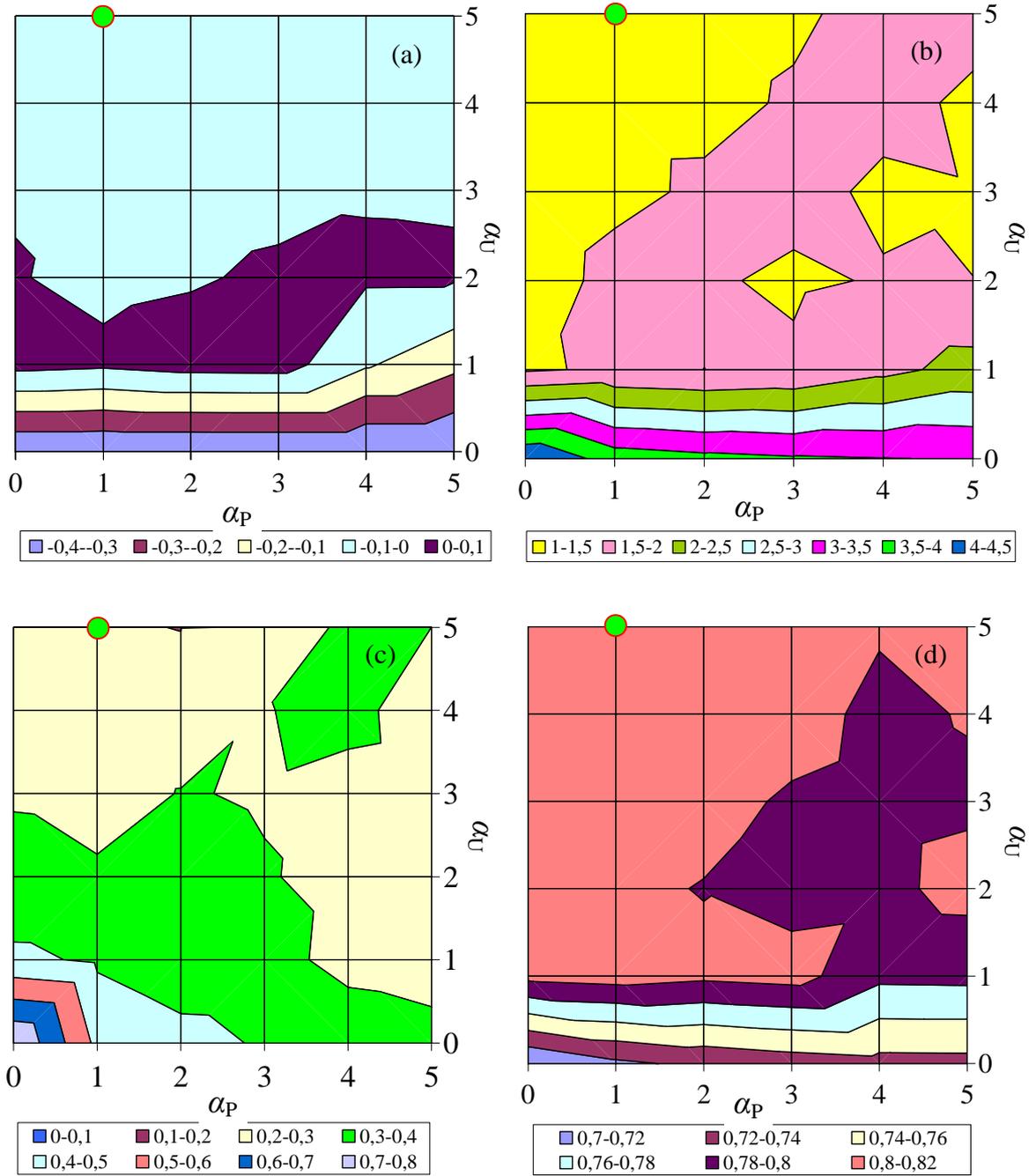


TABELA 19 – PARÂMETROS INICIAIS PARA CALIBRAÇÃO DO ESTIMADOR DE ESTADO.

		Tereza Cristina	Ubá do Sul	Porto Paraíso do Norte	Novo Porto Taquara
P	X_1	20,0	20,0	20,0	20,0
	X_2	5,0	10,0	40,0	40,0
	S_1	0,10	0,20	0,50	0,50
	S_2	0,10	0,20	0,50	0,50
N	X_1^0	10,0	10,0	20,0	20,0
	X_2^0	10,0	10,0	20,0	20,0
	C_1	0,001	0,002	0,002	0,002
	C_2	0,001	0,001	0,001	0,001
	C_3	0,50	0,50	1,00	1,00
	m_1	0,40	0,40	0,40	0,40
	m_3	0,30	0,30	0,30	0,30
	B	0,20	0,20	0,20	0,20
μ	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	
VARIÂNCIA	C_{Q1}	0,10	0,10	0,10	0,10
	C_{Q0}	0,10	0,10	0,10	0,10
	C_{PREC1}	0,60	0,40	0,20	0,20
	C_{PRECO}	0,50	0,50	0,50	0,50
	C_{PET1}	3,00	3,00	3,00	3,00
	C_{PET0}	0,50	0,50	0,50	0,50

TABELA 20 – PARÂMETROS CALIBRADOS DO ESTIMADOR DE ESTADO.

POSTO	PARÂMETRO	
	α_U	α_P
Novo Porto Taquara	4	1
Porto Paraíso do Norte	4	1
Ubá do Sul	5	0
Tereza Cristina	5	1

A consistência da atualização de estado poderia ser avaliada olhando-se os resultados do sistema para horizontes de previsão maiores que um dia: a hipótese é que se o modelo mantiver um comportamento fisicamente coerente nos passos seguintes de previsão, após a atualização de estado, isto indicaria que o processo de atualização levou o sistema a um estado coerente para a bacia e a condição hidrológica vigente. Dado que estes estudos não foram realizados nesta dissertação, recomenda-se que sejam efetuados em trabalhos futuros.

Para o período de calibração, o estimador de estado conseguiu melhorar o desempenho do sistema para o horizonte de previsão de um dia, para todas as sub-bacias avaliadas. Isto é verdade tanto quando se avalia os dados globais, relativos a toda a série, como os dados dos quartis. Os valores baixos do coeficiente de correlação observado em alguns quartis são resultado de um número pequeno de desvios muito grandes, que degradam a estatística.

No entanto, verifica-se pelo valor esperado e desvio padrão dos desvios que esta degradação não reflete o caso geral. Dado que se está avaliando o estimador de estado, o ganho relativo da estatística é mais importante que seu valor absoluto. Por isto, não foram elaboradas estatísticas expurgadas destes resultados muito ruins.

O ganho relativo de desempenho do sistema em relação ao resultado da simulação pura (sem estimador de estado) é inversamente proporcional à qualidade da resposta do simulador, ou seja, quanto pior os resultados da simulação, maior o ganho relativo que o estimador de estado introduz no sistema. Por exemplo, tomando apenas os dados globais das sub-bacias, o estimador de estado aumentou o coeficiente de correlação entre vazões observadas e previstas de 0,97605 para 0,98351, aumento de 0,00746 ou 0,76%, enquanto que o coeficiente de correlação de Tereza Cristina passou de um valor de 0,66753 em simulação pura para 0,80952 com estimador de estado, aumento de 0,14199 ou 21,27%.

TABELA 21 – ESTATÍSTICAS DE DESEMPENHO DA CALIBRAÇÃO - NOVO PORTO TAQUARA.

		Vazão (m ³ /s)		Desvios (m ³ /s)		Coef. de Correlação
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
GERAL	Q Obs. ⁽¹⁾	722,82	618,78	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	741,55	589,96	18,73	135,35	0,97605
	Q Prev. ⁽³⁾	725,28	600,55	2,45	112,20	0,98351
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	722,30	613,53	-0,53	29,31	0,99890
1° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	285,42	46,66	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	281,57	61,41	-3,85	25,94	0,92057
	Q Prev. ⁽³⁾	281,65	51,04	-3,77	14,14	0,96204
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	282,22	48,16	-3,20	5,86	0,99285
2° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	435,37	48,00	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	456,39	65,94	21,02	38,85	0,81242
	Q Prev. ⁽³⁾	440,93	56,60	5,56	25,13	0,89740
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	435,94	49,90	0,56	9,53	0,98181
3° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	664,03	89,74	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	706,49	118,96	42,46	69,51	0,81369
	Q Prev. ⁽³⁾	678,51	105,16	14,48	51,15	0,87401
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	666,85	91,35	2,82	15,32	0,98585
4° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	1506,48	792,14	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	1521,75	683,46	15,27	255,30	0,95072
	Q Prev. ⁽³⁾	1500,02	738,72	-6,46	215,95	0,96259
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	1504,18	776,17	-2,30	55,26	0,99772

(1) Vazão observada

(2) Vazão resultante do modelo sem estimador de estado

(3) Vazão resultante do modelo com estimador de estado

(4) Vazão resultante dos estados atualizados (valor "a posteriori" da vazão)

TABELA 22 – ESTATÍSTICAS DE DESEMPENHO DA CALIBRAÇÃO – PORTO PARAÍSO DO NORTE.

		Vazão (m ³ /s)		Desvios (m ³ /s)		Coef. de Correlação
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
GERAL	Q Obs. ⁽¹⁾	618,19	583,22	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	627,67	532,11	9,49	235,98	0,914491
	Q Prev. ⁽³⁾	623,15	568,32	4,96	161,93	0,960781
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	615,91	575,67	-2,28	32,16	0,998544
1° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	204,56	44,33	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	245,39	62,33	40,83	47,26	0,654445
	Q Prev. ⁽³⁾	216,26	50,57	11,70	23,64	0,884025
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	206,86	43,92	2,30	4,71	0,994344
2° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	349,46	44,75	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	382,45	92,63	32,99	81,79	0,469681
	Q Prev. ⁽³⁾	363,67	65,94	14,21	46,92	0,703046
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	349,92	44,68	0,46	6,98	0,987801
3° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	558,21	85,95	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	592,87	171,68	34,66	149,89	0,487719
	Q Prev. ⁽³⁾	575,72	121,55	17,52	85,00	0,714914
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	557,22	86,09	-0,99	12,63	0,989223
4° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	1360,53	742,48	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	1289,98	666,69	-70,54	427,53	0,821178
	Q Prev. ⁽³⁾	1336,93	725,02	-23,59	306,26	0,913163
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	1349,63	731,01	-10,90	61,67	0,996618

(1) Vazão observada

(2) Vazão resultante do modelo sem estimador de estado

(3) Vazão resultante do modelo com estimador de estado

(4) Vazão resultante dos estados atualizados (valor "a posteriori" da vazão)

TABELA 23 – ESTATÍSTICAS DE DESEMPENHO DA CALIBRAÇÃO – UBÁ DO SUL.

		Vazão (m ³ /s)		Desvios (m ³ /s)		Coef. de Correlação
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
GERAL	Q Obs. ⁽¹⁾	299,29	365,24	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	301,05	311,12	1,76	198,28	0,83990
	Q Prev. ⁽³⁾	296,51	319,48	-2,78	143,96	0,92016
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	295,67	357,74	-3,62	35,71	0,99533
1° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	70,16	16,42	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	114,33	67,92	44,16	65,37	0,27290
	Q Prev. ⁽³⁾	84,71	41,48	14,55	37,03	0,45439
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	71,58	16,44	1,42	2,41	0,98921
2° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	130,00	21,22	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	172,05	98,57	42,05	96,36	0,21073
	Q Prev. ⁽³⁾	149,06	55,93	19,07	50,36	0,43908
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	130,82	21,41	0,82	4,14	0,98121
3° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	243,98	48,42	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	267,19	139,79	23,21	136,41	0,24212
	Q Prev. ⁽³⁾	264,53	93,60	20,55	82,29	0,47822
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	242,25	48,23	-1,73	10,78	0,97511
4° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	747,49	493,46	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	646,14	424,48	-101,35	331,32	0,74932
	Q Prev. ⁽³⁾	682,61	420,28	-64,87	258,05	0,85237
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	732,64	485,61	-14,85	68,97	0,99020

(1) Vazão observada

(2) Vazão resultante do modelo sem estimador de estado

(3) Vazão resultante do modelo com estimador de estado

(4) Vazão resultante dos estados atualizados (valor “a posteriori” da vazão)

TABELA 24 – ESTATÍSTICAS DE DESEMPENHO DA CALIBRAÇÃO – TEREZA CRISTINA.

		Vazão (m ³ /s)		Desvios (m ³ /s)		Coef. de Correlação
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
GERAL	Q Obs. ⁽¹⁾	89,74	128,23	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	88,12	115,52	-1,61	99,91	0,66853
	Q Prev. ⁽³⁾	90,04	121,09	0,31	77,13	0,81007
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	88,87	124,74	-0,87	25,27	0,98041
1° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	15,15	3,83	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	34,41	31,08	19,26	30,75	0,14674
	Q Prev. ⁽³⁾	21,53	18,28	6,38	17,68	0,25869
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	15,92	8,08	0,77	7,31	0,42664
2° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	31,10	5,68	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	51,58	42,90	20,47	42,70	0,10111
	Q Prev. ⁽³⁾	40,22	23,41	9,12	22,64	0,25450
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	31,54	8,46	0,44	6,58	0,62998
3° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	63,36	14,87	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	77,17	65,91	13,82	65,15	0,16333
	Q Prev. ⁽³⁾	74,82	46,39	11,47	43,42	0,35362
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	63,84	22,25	0,48	16,52	0,67002
4° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	246,07	175,77	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	186,98	178,04	-59,08	167,55	0,55155
	Q Prev. ⁽³⁾	220,59	175,34	-25,47	141,20	0,67656
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	240,97	169,69	-5,10	46,22	0,96481

(1) Vazão observada

(2) Vazão resultante do modelo sem estimador de estado

(3) Vazão resultante do modelo com estimador de estado

(4) Vazão resultante dos estados atualizados (valor "a posteriori" da vazão)

FIGURA 49 – EFEITO DO ESTIMADOR DE ESTADO NA VAZÃO INICIAL - NOVO PORTO TAQUARA – VAZÕES BAIXAS.

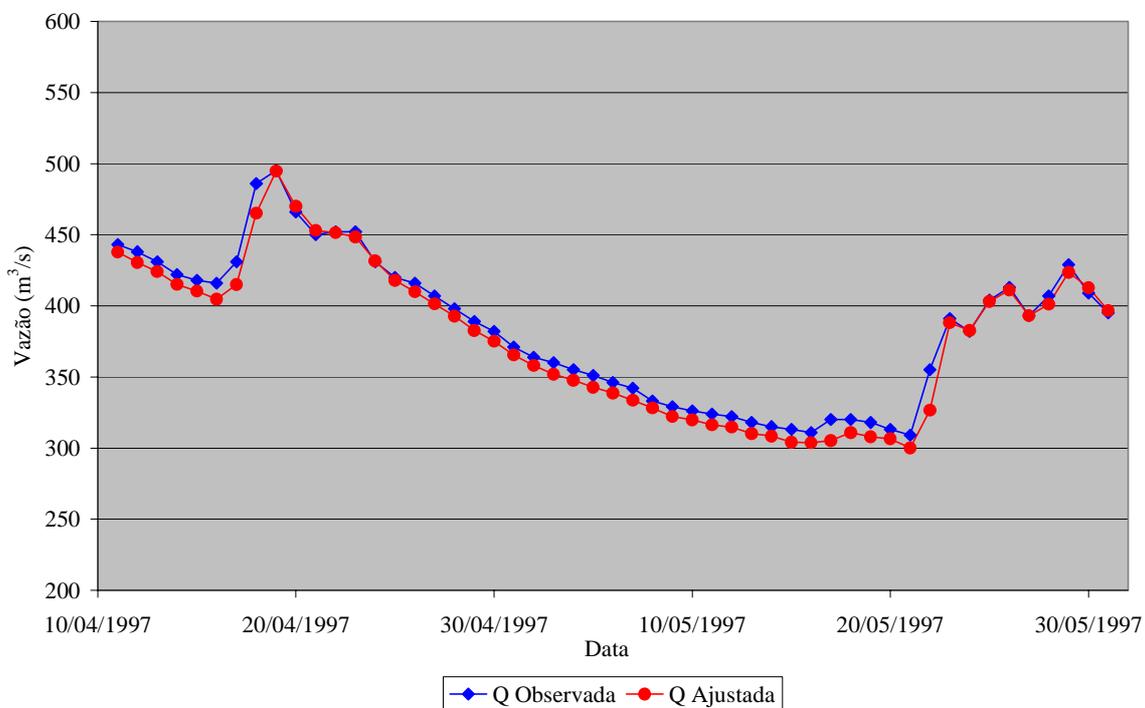
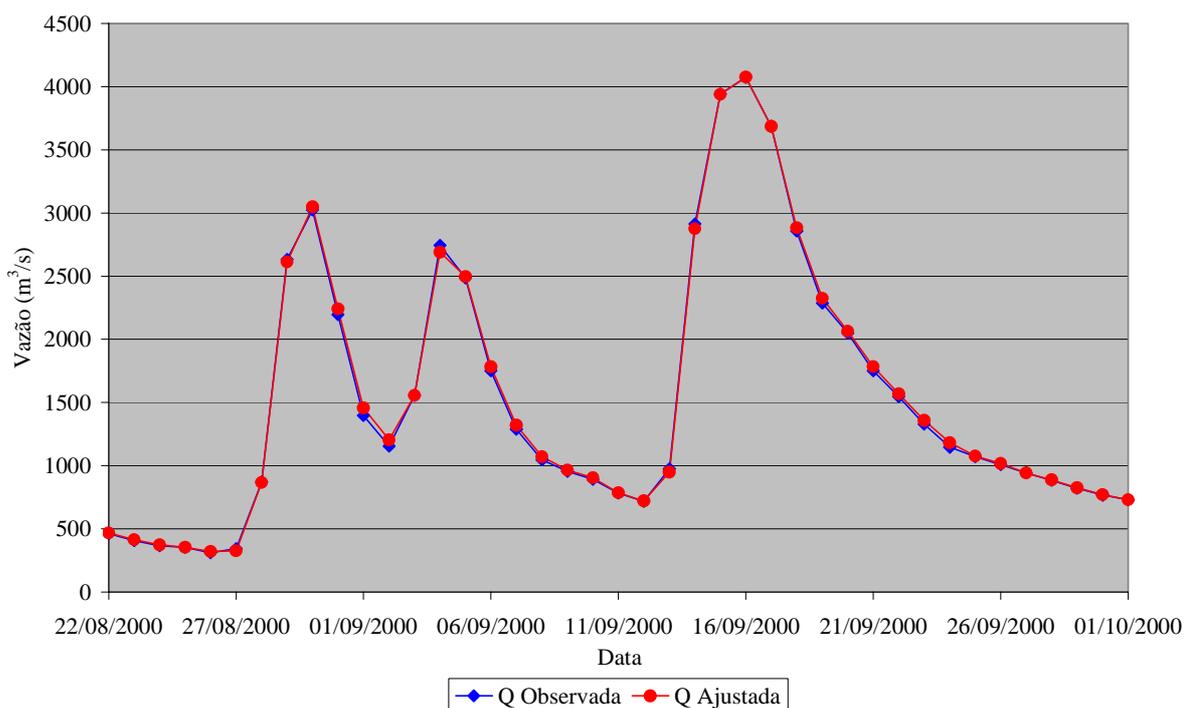


FIGURA 50 – EFEITO DO ESTIMADOR DE ESTADO NA VAZÃO INICIAL - NOVO PORTO TAQUARA – VAZÕES ALTAS.



Os resultados da aplicação do sistema são ilustrados pelas figuras 51 a 58, que apresentam os mesmos dois períodos, um com vazões baixas e outro com vazões altas, para as quatro sub-bacias estudadas. Estas figuras são ilustrativas dos ganhos obtidos com a aplicação do estimador de estado, para o período de calibração. A legenda destas figuras tem a mesma interpretação que as referências das tabelas 21 a 24.

O maior ganho do processo para a previsão de um passo, na opinião do autor, é a recuperação da similaridade de comportamento entre o hidrograma observado e o previsto pelo sistema, principalmente para as enchentes mais significativas, cujo hidrograma simulado sofre um abatimento excessivo causado pela formulação do modelo hidrológico, conforme apresentado no capítulo 12. Picos de enchentes e taxas de ascensão e recessão dos hidrogramas têm uma representação melhor nos resultados obtidos com a aplicação do estimador de estado, comportamento que, se mantido para horizontes de previsão maiores que um dia, deve ter impactos positivos na confiança dos usuários nos resultados do sistema.

FIGURA 51 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO PARA NOVO PORTO TAQUARA – VAZÕES BAIXAS.

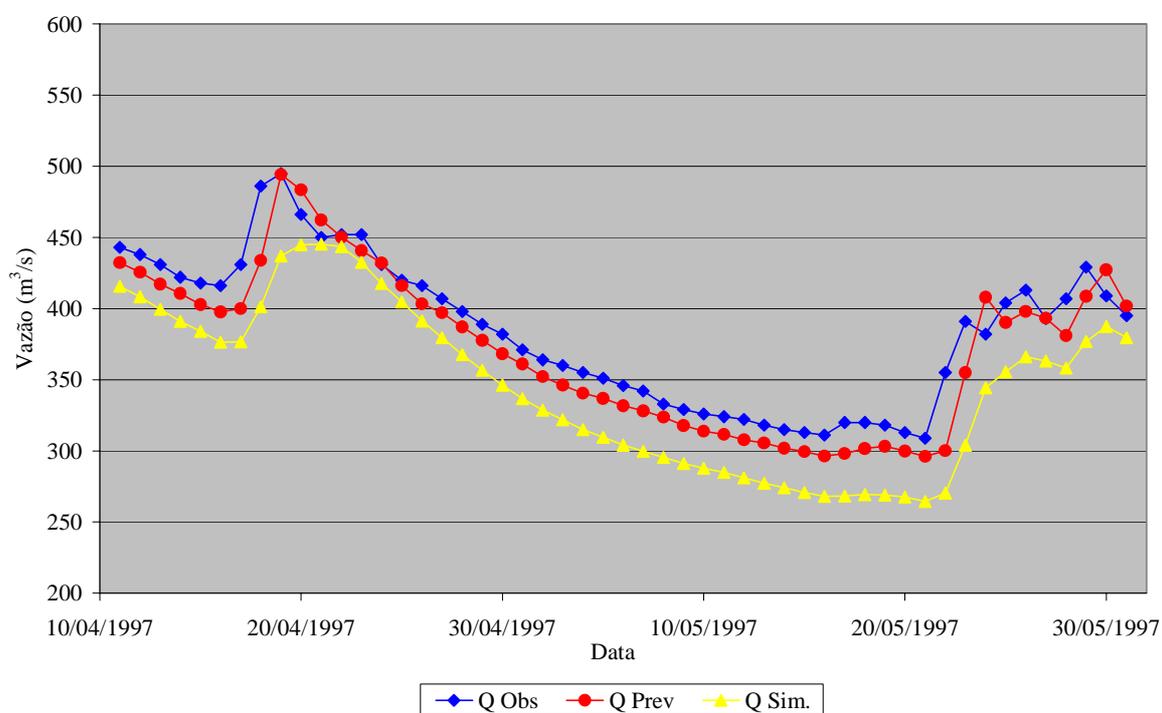


FIGURA 52 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO PARA PORTO PARAÍSO DO NORTE – VAZÕES BAIXAS.

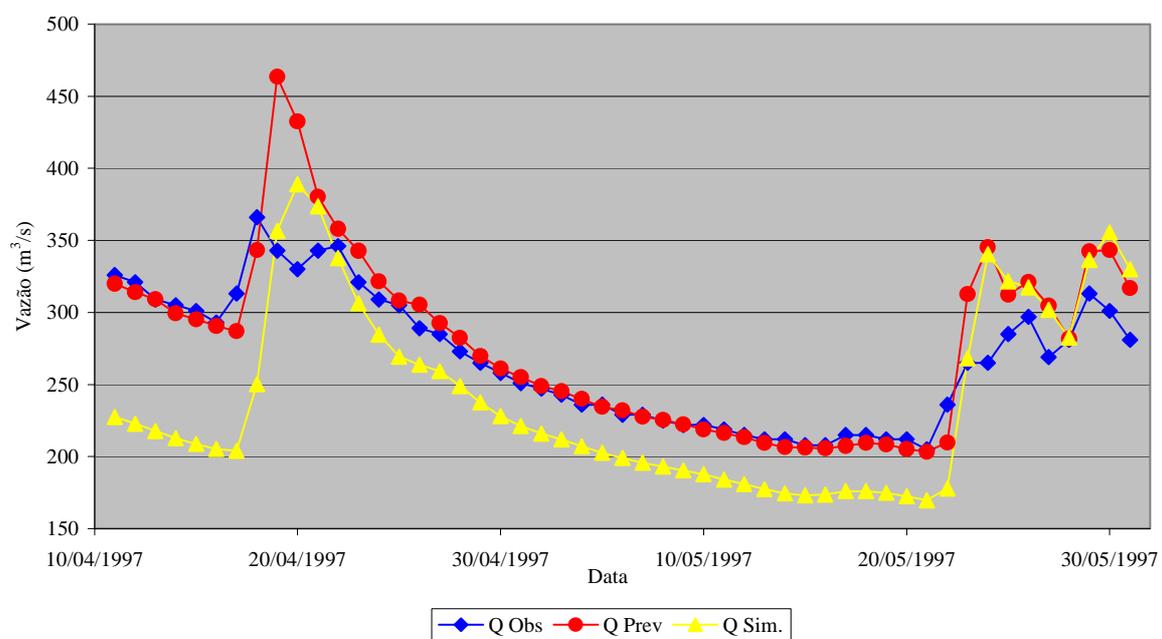


FIGURA 53 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO PARA UBÁ DO SUL – VAZÕES BAIXAS.

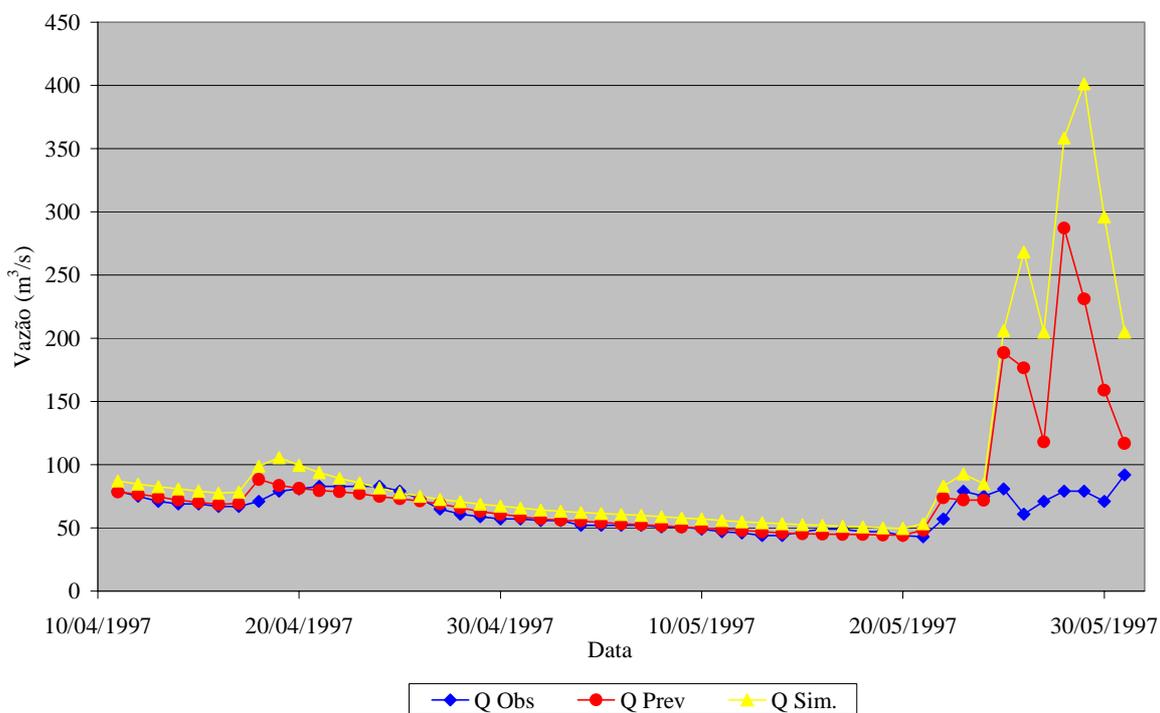


FIGURA 54 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO PARA TEREZA CRISTINA – VAZÕES BAIXAS.

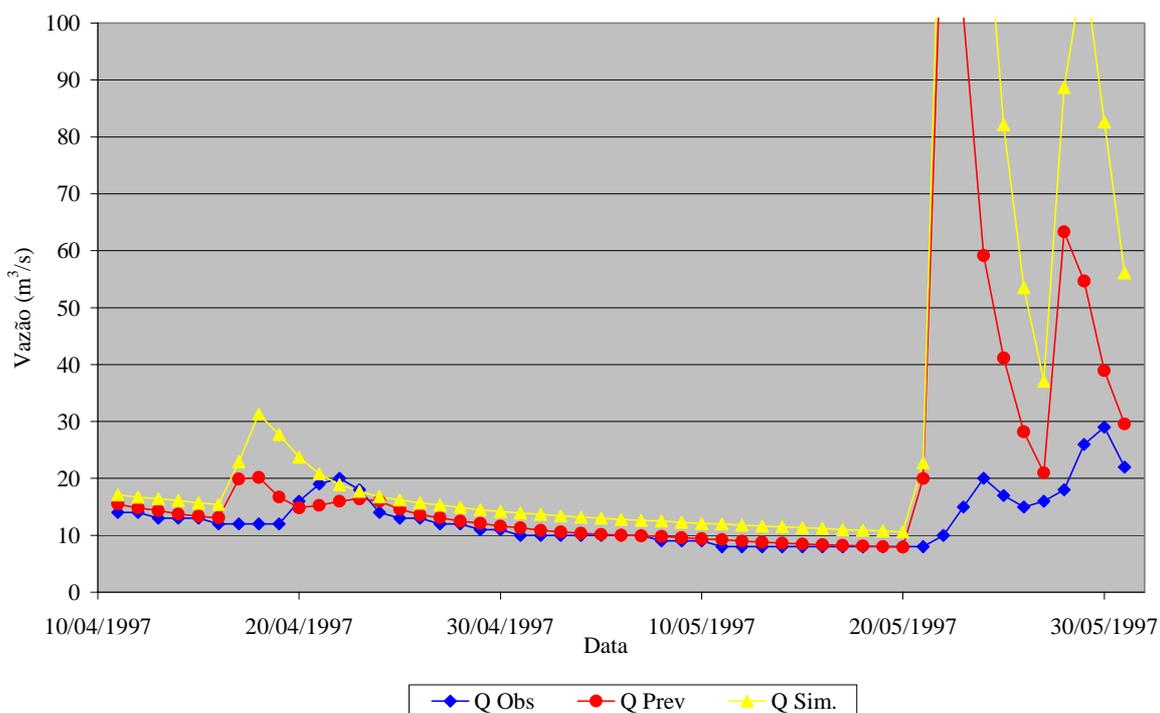


FIGURA 55 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO PARA NOVO PORTO TAQUARA – VAZÕES ALTAS.

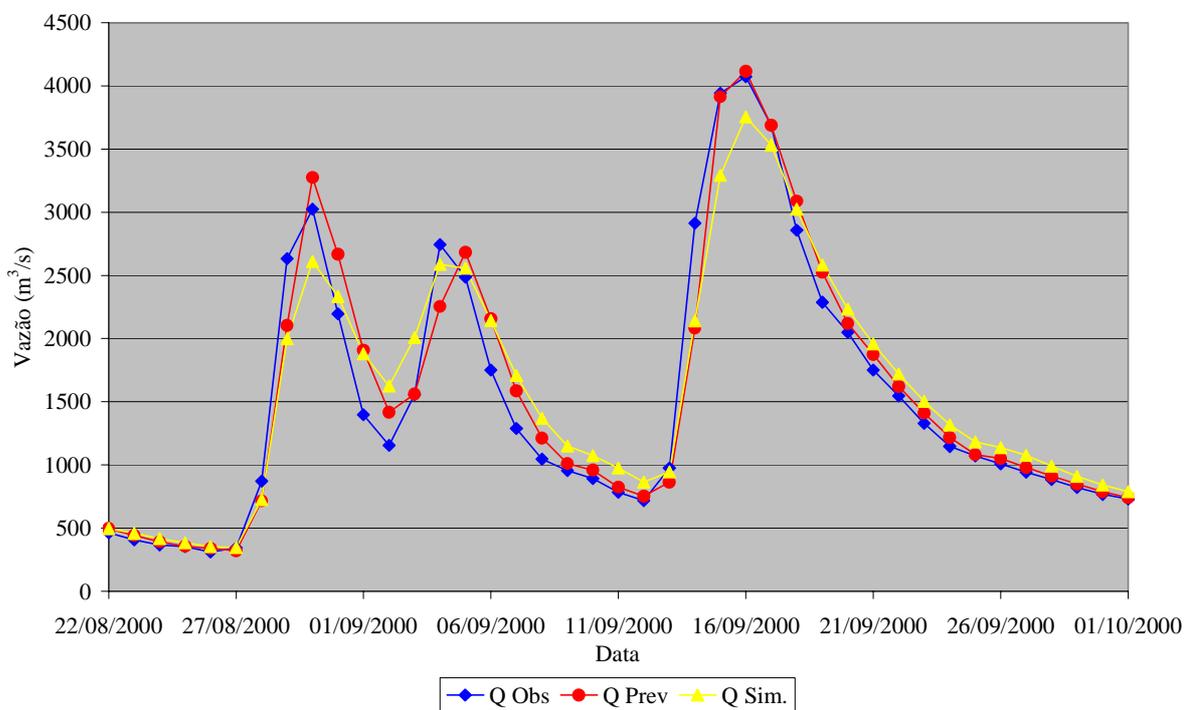


FIGURA 56 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO PARA PORTO PARAÍSO DO NORTE – VAZÕES ALTAS.

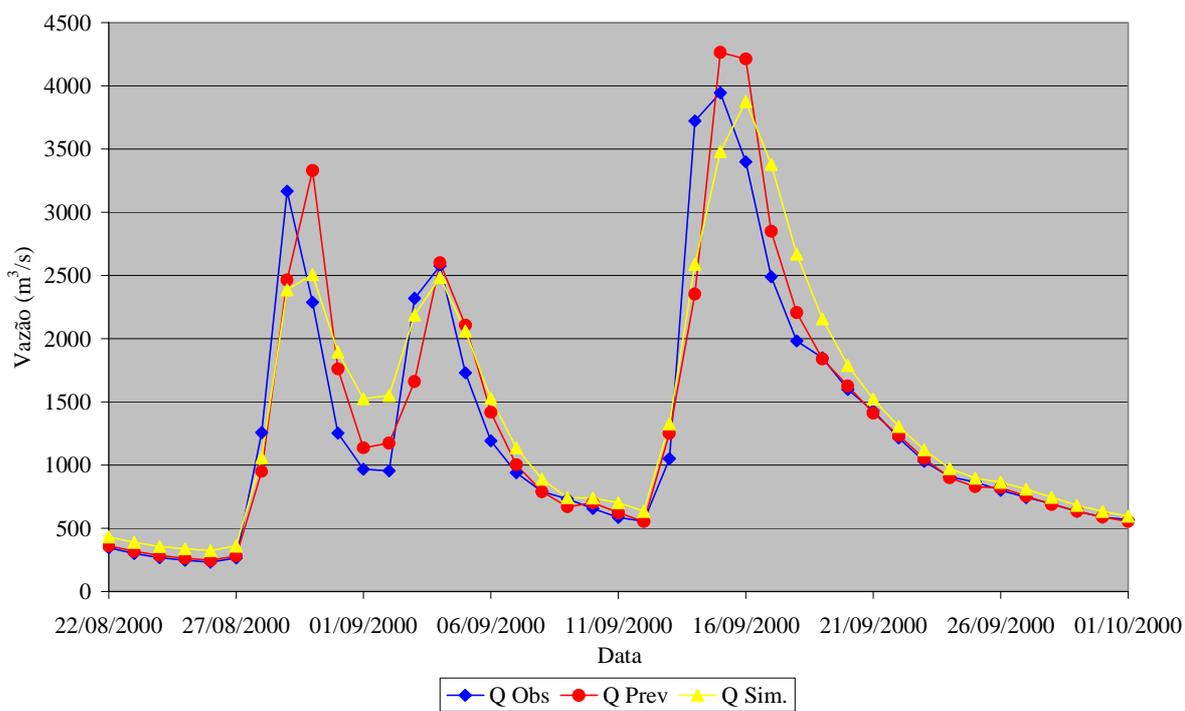


FIGURA 57 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO PARA UBÁ DO SUL – VAZÕES ALTAS.

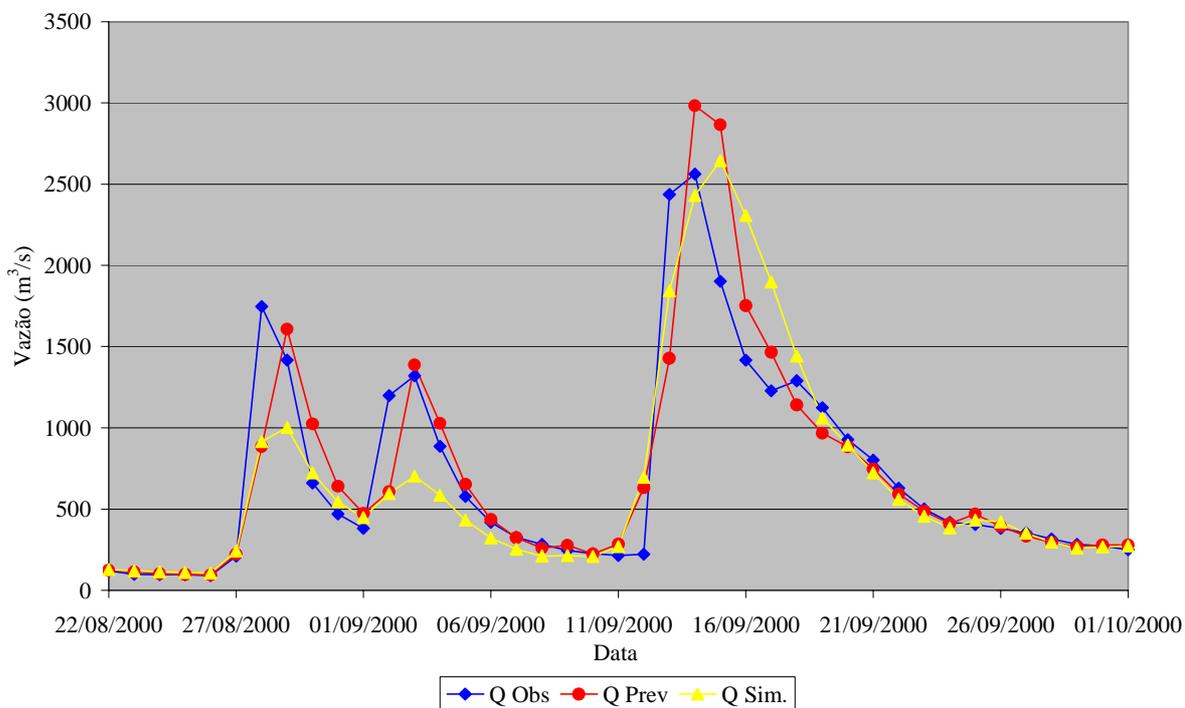
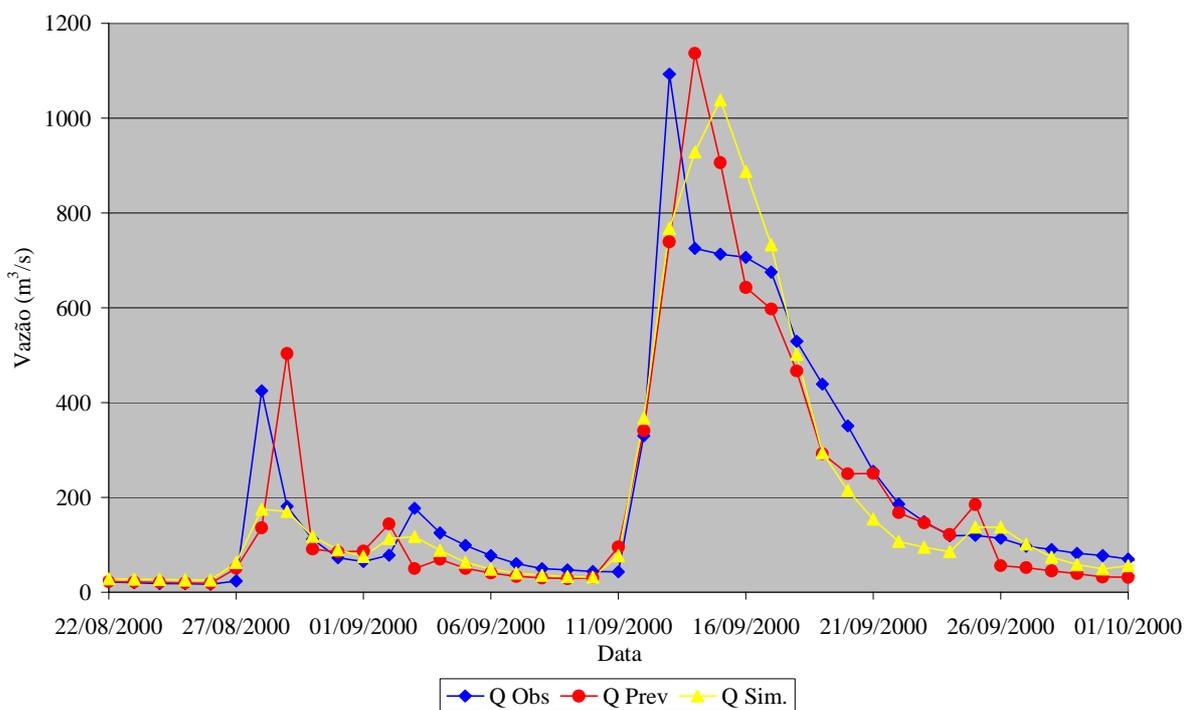


FIGURA 58 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO PARA TEREZA CRISTINA – VAZÕES ALTAS.



10 VALIDAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DO SISTEMA

O objetivo principal da fase de validação do modelo é tentar verificar se o sistema específico, ou seja, o modelo procedural com os parâmetros definidos para a bacia sendo modelada, apresenta resultados satisfatórios quando lhe são apresentados dados diferentes daqueles utilizados para a calibração. A fase de validação é, em última análise, uma simulação da aplicação operacional do modelo específico. Constitui etapa fundamental do processo de modelagem, já que vai decidir pela adequação ou não do sistema para a finalidade a que se destina.

10.1 SELEÇÃO DO PERÍODO DE VALIDAÇÃO

Definiu-se o período de 1981 a 1990 para a validação do modelo. A escolha deveu-se aos seguintes motivos:

- a) proximidade com o período de calibração: o período selecionado é praticamente contíguo ao período de calibração. A proximidade dos períodos tem a intenção de evitar variabilidades de longo prazo na bacia, como modificações antrópicas e períodos de comportamento hidrológico muito diferenciado, efeitos constatados na bacia incremental de Itaipu para período anterior a 1970 (MÜLLER, KRÜGER e KAVISKI, 1997);
- b) tamanho do período: o período selecionado apresenta a mesma dimensão do utilizado na calibração, sendo, portanto, suficiente para que os resultados não sejam demasiadamente afetados por variações amostrais;
- c) representatividade hidrológica: o período apresenta uma grande variabilidade hidrológica, com períodos de baixas afluências e diversos eventos significativos de enchente, o que permite avaliar o desempenho do sistema em situações extremas e também em situações de transição;

- d) consistência entre bacias: a avaliação de balanço mensal de umidade do solo, um dos critérios utilizados para definir o período de calibração, indicou que, embora o comportamento do balanço de umidade do solo seja diferente daquele do período de calibração, os comportamentos das bacias são coerentes entre si;
- e) verificação da robustez da solução: dado que o balanço mensal de água no solo no período de validação apresenta comportamento diferenciado daquele do período de calibração, um bom desempenho do sistema neste período seria um indicativo de robustez da solução proposta.

10.2 APLICATIVO UTILIZADO NA VALIDAÇÃO

O aplicativo utilizado para a validação da calibração foi obtido através de uma adaptação do código do aplicativo destinado à calibração do estimador de estado. Com a adaptação realizada, o aplicativo gera, simultaneamente, para cada instante de simulação, vazões e estados para: previsão um passo a frente sem estimador de estado (simulação pura), previsão um passo a frente com estimador de estado e atualização de estado.

Ressalte-se que os resultados de simulação obtidos por este aplicativo podem diferir em algo dos obtidos com o aplicativo desenvolvido para a calibração do modelo hidrológico, por pequenas diferenças de implementação entre os códigos, como tipo e extensão de validação de estados e critérios de inclusão de resultados nas estatísticas de desempenho. No entanto, teste realizado para o posto de Porto Paraíso do Norte indicou que as diferenças ocorridas entre os dois aplicativos para o período de calibração não foram significativas, apresentando resultado praticamente idênticos.

10.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA VALIDAÇÃO

As tabelas 25 a 28 apresentam os resultados da aplicação do sistema ao período de verificação. Da análise destas tabelas é possível concluir que o estimador de estado melhorou os resultados para a previsão de um dia de alcance, para todas as sub-bacias, tanto no caso global como para cada um dos quartis analisados. Como no caso da calibração, a melhora relativa maior ocorreu para os casos em que a simulação pura (sem estimador de estado) apresentou os piores resultados. Também como no caso da calibração, a presença de alguns valores de coeficiente de correlação baixo podem ser atribuídos a uma proporção pequena de desvios muito grandes entre a observação e a vazão prevista. Como exemplo, o coeficiente de correlação para o segundo quartil da sub-bacia de Ubá do Sul aumenta de valor da ordem de 0,54 para 0,98 com a desconsideração de apenas um elemento da série, em uma amostra que dimensão de aproximadamente 900 valores.

Da comparação com as tabelas 21 a 24, correspondentes aos resultados da calibração, constata-se que não houve degradação de desempenho, tanto para a simulação (uso apenas do modelo chuva-vazão) como para a previsão (utilização do modelo chuva-vazão com estimador de estado). Os coeficientes de correlação gerais apresentam praticamente os mesmos valores, o valor esperado dos desvios é baixo e da mesma ordem de grandeza e o desvio padrão dos desvios apresenta valores da mesma ordem de grandeza para ambos os casos.

As figuras 59 a 66 apresentam, como forma de ilustração, para todas as sub-bacias, os mesmos dois eventos; um de vazões baixas e outro de vazões altas. O evento de vazões baixas ilustra, principalmente para as bacias de Ubá do Sul e Tereza Cristina, os problemas já detectados nas séries de precipitação e a melhoria das previsões introduzida pelo estimador de estado. Para este evento, onde existe a presença de uma precipitação que não tem resposta correspondente nas vazões, apesar do resultado de previsão não poder ser considerado bom, o estimador de estado diminui

aproximadamente pela metade os desvios. Para o evento de vazões altas, o estimador conseguiu conferir ao hidrograma previsto uma forma semelhante ao do observado, eliminando o abatimento excessivo do hidrograma previsto gerado por simulação. Isto não é válido para Tereza Cristina, onde também é constatada uma incompatibilidade entre dados de precipitação e vazão.

As figuras 67 e 68 apresentam as vazões resultantes das atualizações promovidas pelo estimador de estado. É possível perceber que o estimador atuou corretamente na atualização das vazões iniciais de previsão.

As legendas das figuras 59 a 66 tem a mesma interpretação das referências das tabelas 25 a 28.

Do exposto acima, é possível concluir que o sistema proposto funcionou a contento na fase de validação, indicando sua utilidade para uso operacional.

TABELA 25 – ESTATÍSTICAS DE DESEMPENHO DA VERIFICAÇÃO – NOVO PORTO TAQUARA.

		Vazão (m ³ /s)		Desvios (m ³ /s)		Coef. de Correlação
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
GERAL	Q Obs. ⁽¹⁾	707,24	662,04	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	678,13	607,86	-29,11	184,22	0,96148
	Q Prev. ⁽³⁾	697,46	628,74	-9,79	130,98	0,98072
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	701,65	648,38	-5,59	45,79	0,99777
1º QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	241,23	45,13	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	232,13	62,00	-9,10	36,40	0,81411
	Q Prev. ⁽³⁾	237,62	46,54	-3,61	11,81	0,96725
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	238,48	45,56	-2,75	5,22	0,99341
2º QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	384,02	43,60	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	388,05	79,84	4,03	70,36	0,47761
	Q Prev. ⁽³⁾	388,72	56,06	4,69	33,94	0,79609
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	382,87	44,83	-1,16	10,88	0,97009
3º QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	601,06	87,55	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	585,38	156,75	-15,68	131,92	0,54036
	Q Prev. ⁽³⁾	602,33	103,27	1,27	56,07	0,83979
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	599,25	88,70	-1,81	16,45	0,98267
4º QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	1520,99	841,46	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	1428,80	747,54	-92,20	317,43	0,92692
	Q Prev. ⁽³⁾	1480,58	777,40	-40,41	244,75	0,95735
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	1504,84	813,75	-16,16	86,35	0,99512

(1) Vazão observada

(2) Vazão resultante do modelo sem estimador de estado

(3) Vazão resultante do modelo com estimador de estado

(4) Vazão resultante dos estados atualizados (valor "a posteriori" da vazão)

TABELA 26 – ESTATÍSTICAS DE DESEMPENHO DA VERIFICAÇÃO – PORTO PARAÍSO DO NORTE.

		Vazão (m ³ /s)		Desvios (m ³ /s)		Coef. de Correlação
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
GERAL	Q Obs. ⁽¹⁾	602,01	686,04	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	564,97	555,82	-37,04	231,07	0,95222
	Q Prev. ⁽³⁾	592,42	634,16	-9,59	166,53	0,97122
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	597,66	671,38	-4,35	36,89	0,99876
1° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	161,33	48,04	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	188,53	63,21	27,19	48,00	0,65856
	Q Prev. ⁽³⁾	169,57	53,52	8,23	24,61	0,88810
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	163,36	47,76	2,02	7,23	0,98863
2° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	291,07	39,71	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	313,81	75,59	22,74	65,88	0,49167
	Q Prev. ⁽³⁾	304,24	51,49	13,18	33,35	0,76194
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	293,03	39,89	1,96	8,94	0,97478
3° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	486,86	81,17	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	470,39	136,09	-16,47	119,77	0,48720
	Q Prev. ⁽³⁾	489,34	107,70	2,48	76,88	0,70215
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	483,70	81,09	-3,16	19,50	0,97112
4° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	1436,94	922,53	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	1259,94	706,40	-177,00	401,84	0,91195
	Q Prev. ⁽³⁾	1375,97	830,16	-60,97	312,64	0,94175
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	1419,16	896,94	-17,78	67,66	0,99763

(1) Vazão observada

(2) Vazão resultante do modelo sem estimador de estado

(3) Vazão resultante do modelo com estimador de estado

(4) Vazão resultante dos estados atualizados (valor "a posteriori" da vazão)

TABELA 27 – ESTATÍSTICAS DE DESEMPENHO DA VERIFICAÇÃO – UBÁ DO SUL.

		Vazão (m ³ /s)		Desvios (m ³ /s)		Coef. de Correlação
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
GERAL	Q Obs. ⁽¹⁾	304,34	432,06	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	355,36	402,80	51,03	229,73	0,85083
	Q Prev. ⁽³⁾	318,49	403,78	14,15	176,32	0,91319
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	302,36	422,80	-1,98	31,15	0,99758
1° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	54,38	20,83	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	113,03	65,35	58,65	61,03	0,36033
	Q Prev. ⁽³⁾	70,91	42,18	16,54	34,73	0,57319
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	56,23	20,90	1,85	2,02	0,99530
2° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	113,82	17,64	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	194,20	123,19	80,38	122,09	0,13366
	Q Prev. ⁽³⁾	145,80	72,38	31,98	70,53	0,22500
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	116,07	30,84	2,25	25,92	0,54260
3° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	221,22	50,90	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	297,59	179,12	76,37	173,91	0,24280
	Q Prev. ⁽³⁾	253,93	106,79	32,71	93,91	0,47615
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	220,37	50,44	-0,85	6,70	0,99131
4° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	816,70	607,96	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	805,76	549,65	-10,95	393,23	0,77372
	Q Prev. ⁽³⁾	792,19	556,37	-24,51	325,34	0,84747
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	805,71	591,99	-10,99	54,79	0,99618

(1) Vazão observada

(2) Vazão resultante do modelo sem estimador de estado

(3) Vazão resultante do modelo com estimador de estado

(4) Vazão resultante dos estados atualizados (valor "a posteriori" da vazão)

TABELA 28 – ESTATÍSTICAS DE DESEMPENHO DA VERIFICAÇÃO – TEREZA CRISTINA.

		Vazão (m ³ /s)		Desvios (m ³ /s)		Coef. de Correlação
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
GERAL	Q Obs. ⁽¹⁾	86,00	142,98	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	94,65	120,44	8,65	103,04	0,70649
	Q Prev. ⁽³⁾	87,55	133,76	1,54	81,83	0,82716
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	86,09	144,54	0,09	32,03	0,97524
1° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	11,12	3,59	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	35,66	35,85	24,54	35,18	0,23594
	Q Prev. ⁽³⁾	17,97	19,88	6,85	19,14	0,29276
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	11,90	11,15	0,78	10,41	0,35885
2° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	26,04	5,42	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	54,92	46,30	28,88	45,93	0,12808
	Q Prev. ⁽³⁾	35,69	23,79	9,65	23,10	0,23850
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	26,53	8,50	0,49	6,97	0,57521
3° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	55,84	13,88	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	79,81	70,81	23,97	69,22	0,21100
	Q Prev. ⁽³⁾	65,40	36,43	9,56	33,10	0,41904
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	56,08	16,15	0,24	8,14	0,86366
4° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	251,01	210,22	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	208,21	177,21	-42,80	175,45	0,60147
	Q Prev. ⁽³⁾	231,12	201,60	-19,89	155,47	0,71573
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	249,85	215,25	-1,16	62,27	0,95744

(1) Vazão observada

(2) Vazão resultante do modelo sem estimador de estado

(3) Vazão resultante do modelo com estimador de estado

(4) Vazão resultante dos estados atualizados (valor “a posteriori” da vazão)

FIGURA 59 – RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO PARA NOVO PORTO TAQUARA – VAZÕES BAIXAS.

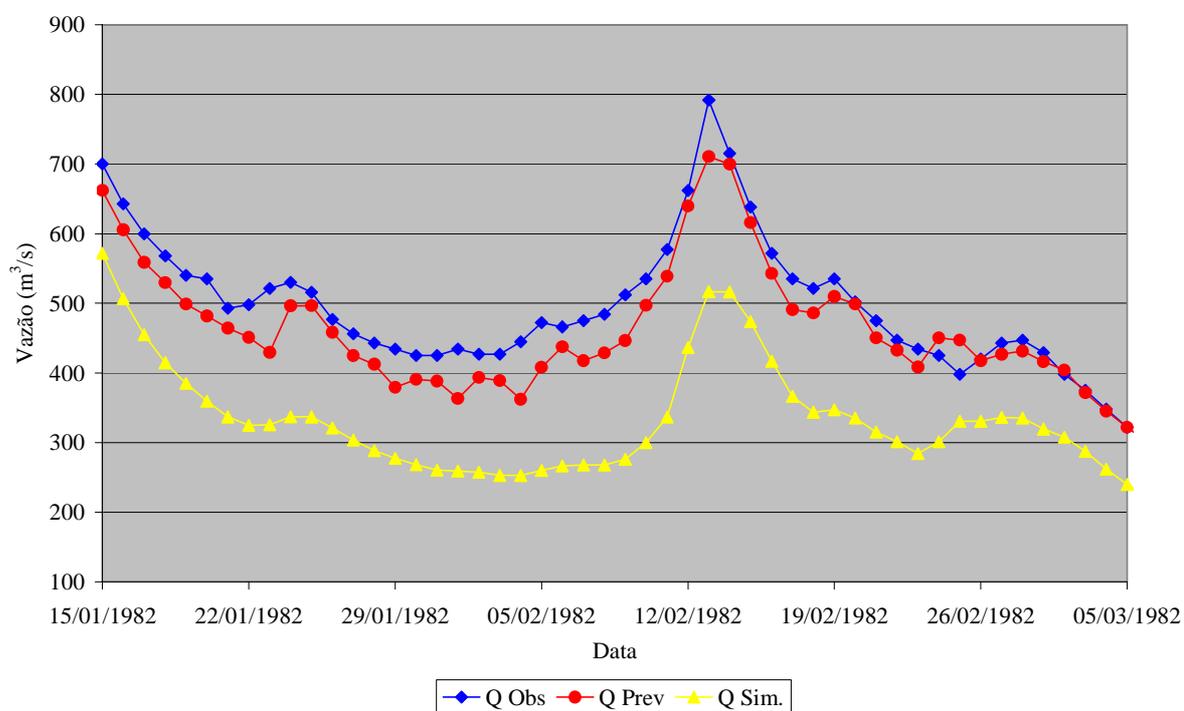


FIGURA 60 – RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO PARA PORTO PARAÍSO DO NORTE – VAZÕES BAIXAS.

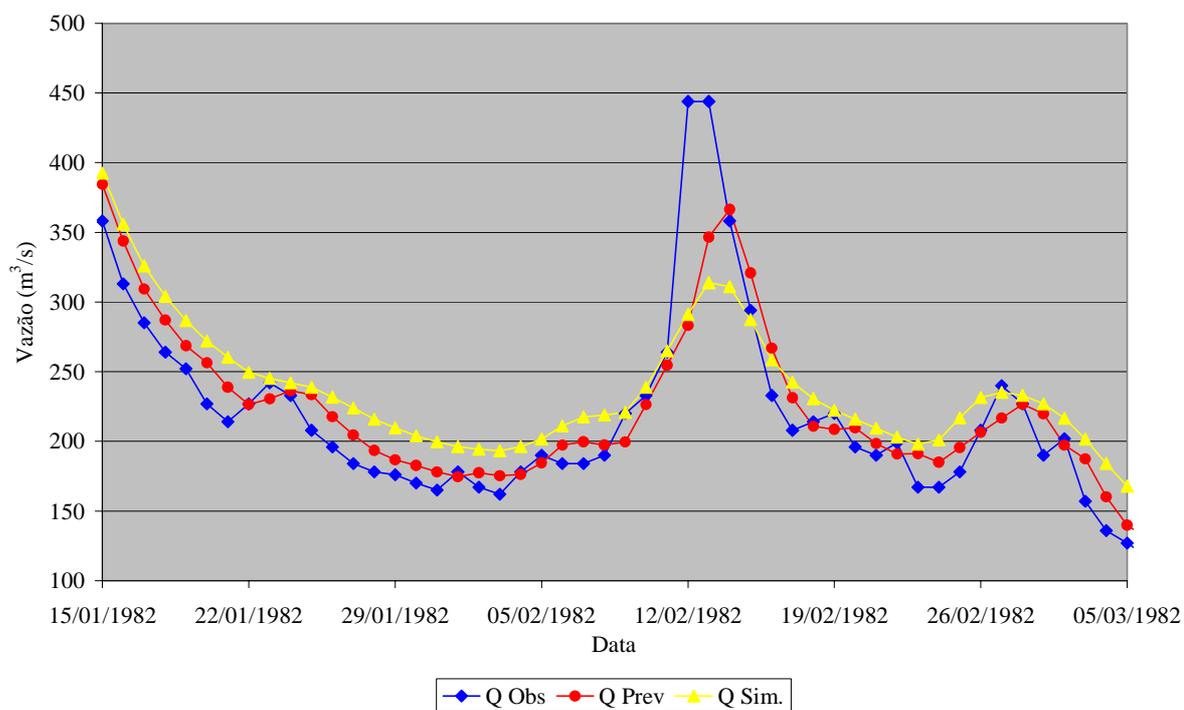


FIGURA 61 – RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO PARA UBÁ DO SUL – VAZÕES BAIXAS.

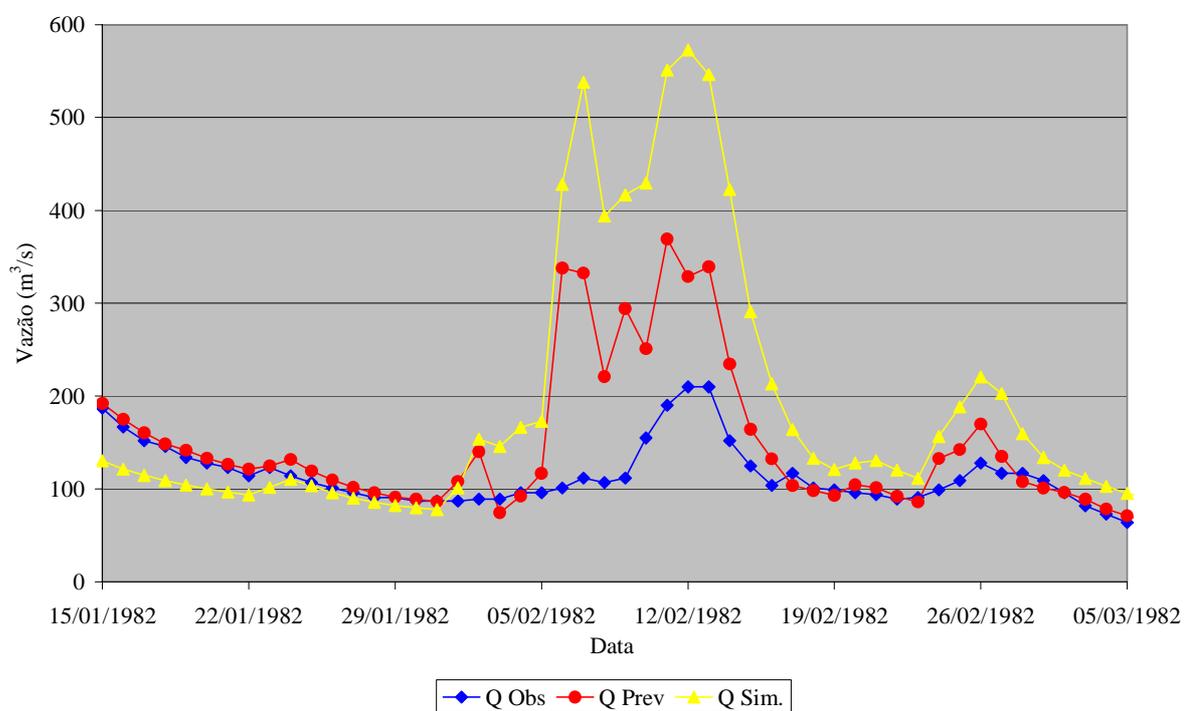


FIGURA 62 – RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO PARA TEREZA CRISTINA – VAZÕES BAIXAS.

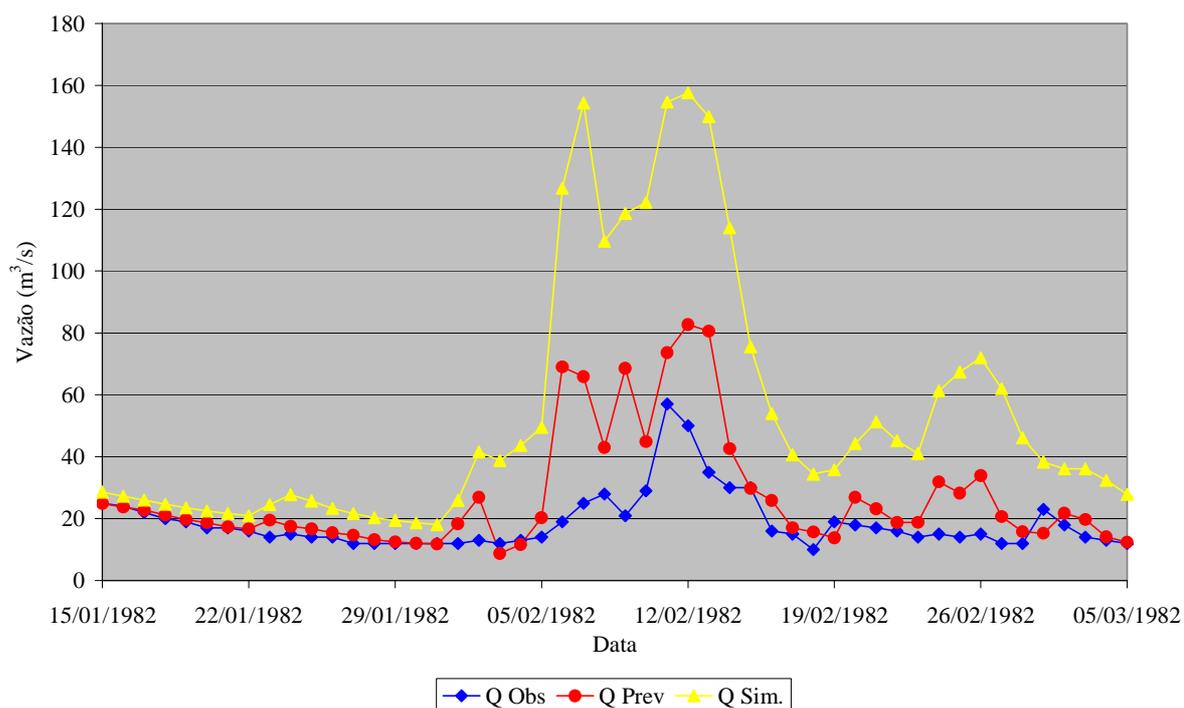


FIGURA 63 – RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO PARA NOVO PORTO TAQUARA – VAZÕES ALTAS.

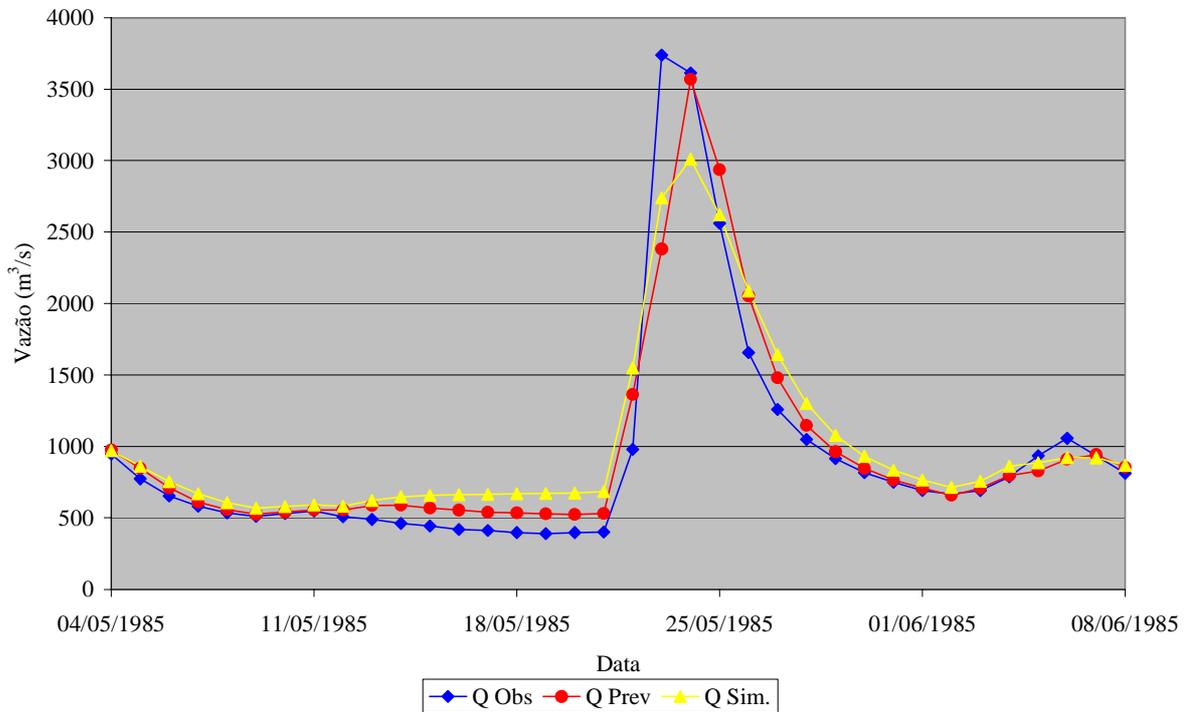


FIGURA 64 – RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO PARA PORTO PARAÍSO DO NORTE – VAZÕES ALTAS.

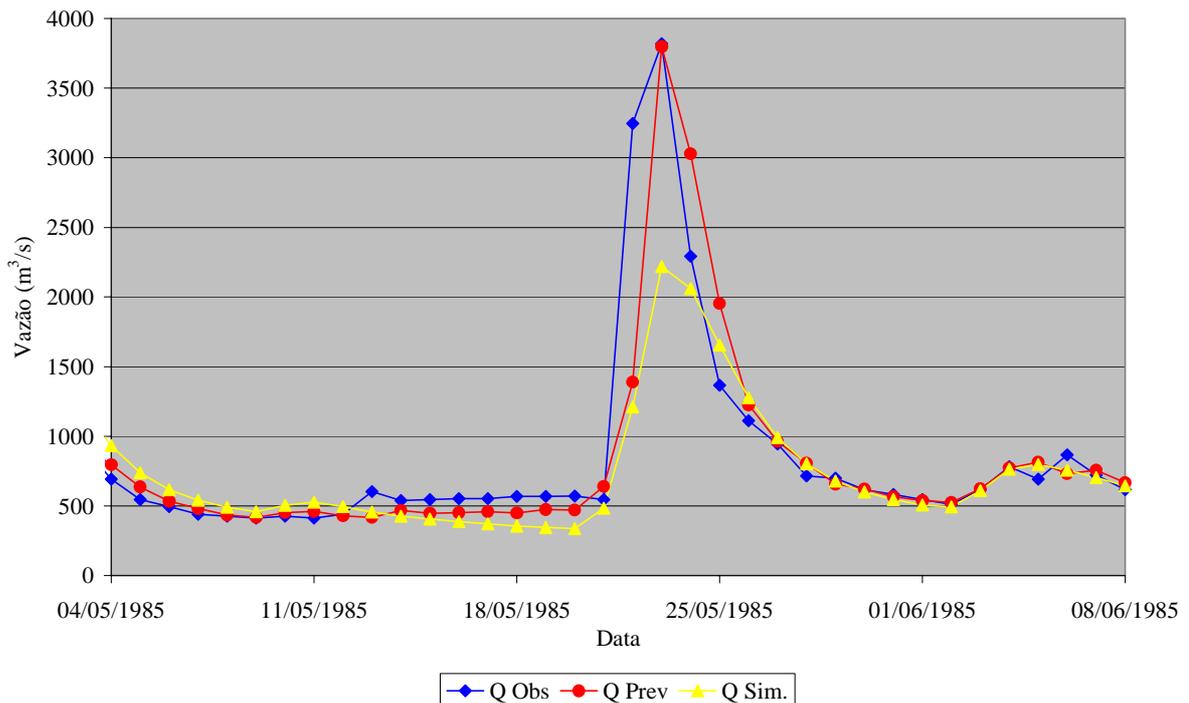


FIGURA 65 – RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO PARA UBÁ DO SUL – VAZÕES ALTAS.

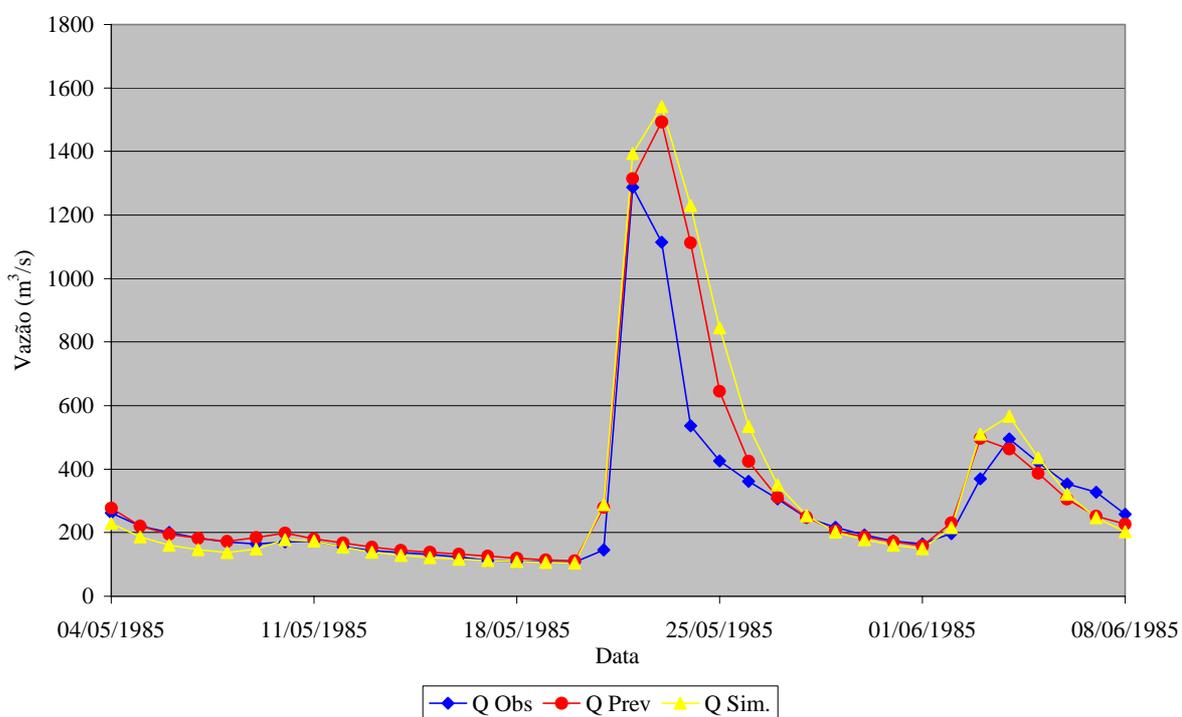


FIGURA 66 – RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO PARA TEREZA CRISTINA – VAZÕES ALTAS.

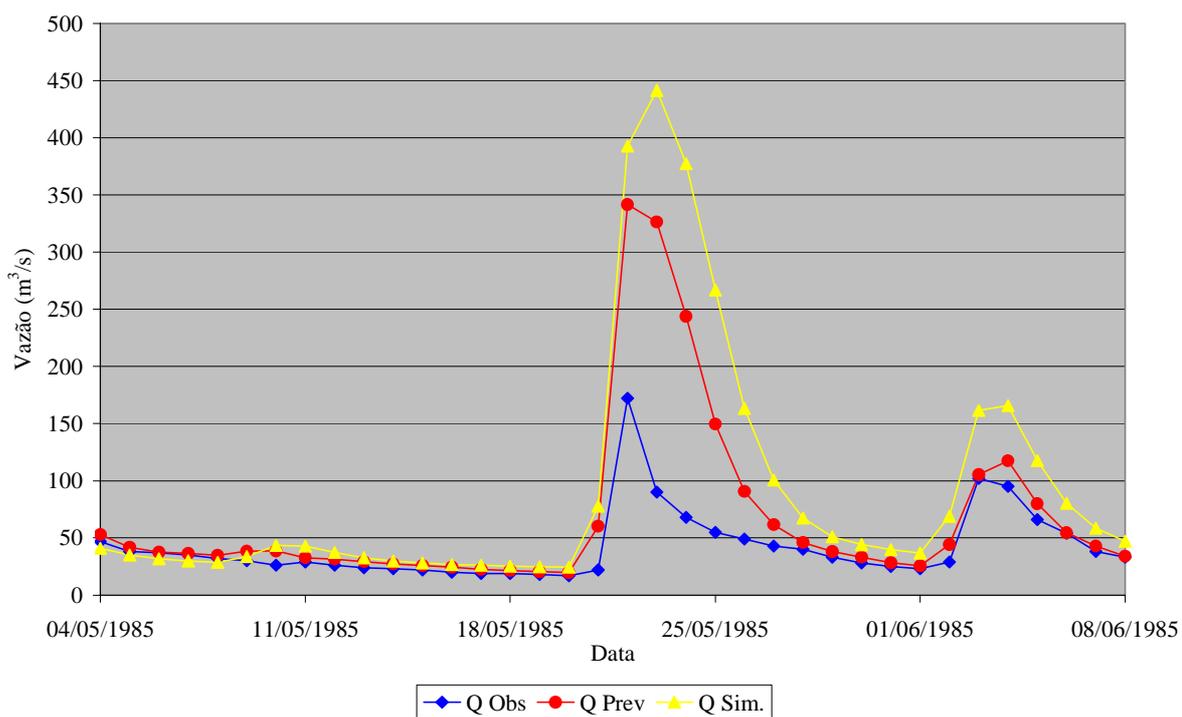


FIGURA 67 – VAZÃO ATUALIZADA PARA NOVO PORTO TAQUARA – VAZÕES BAIXAS.

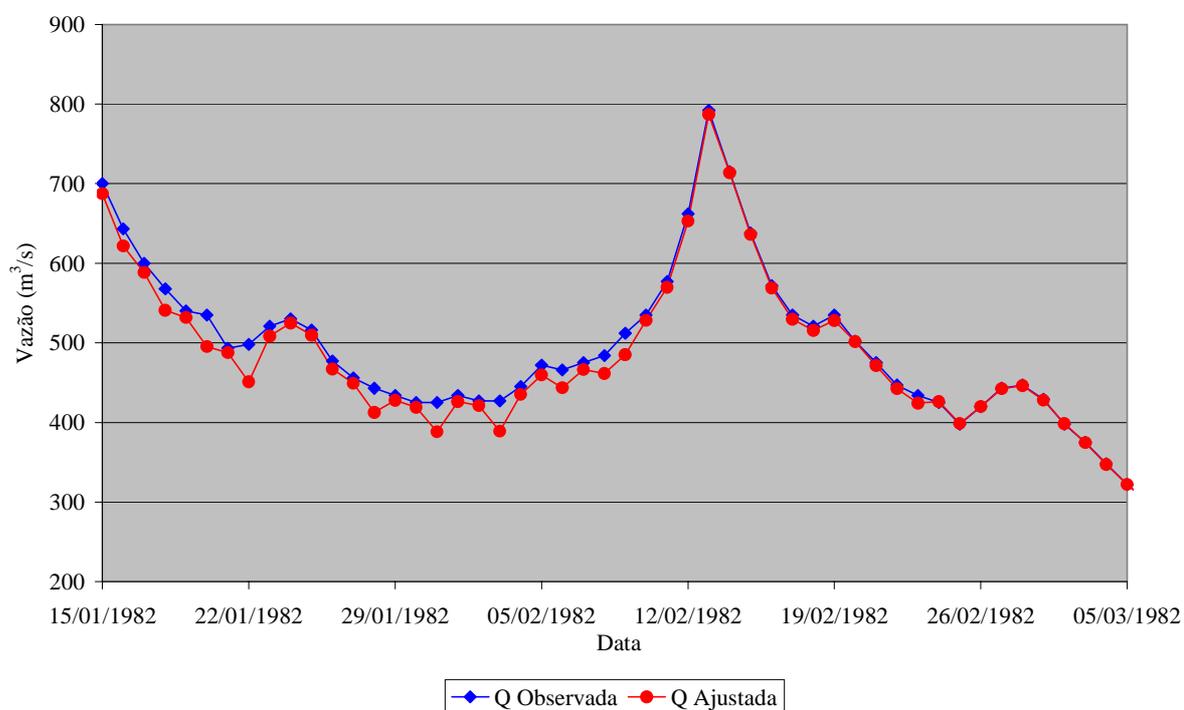
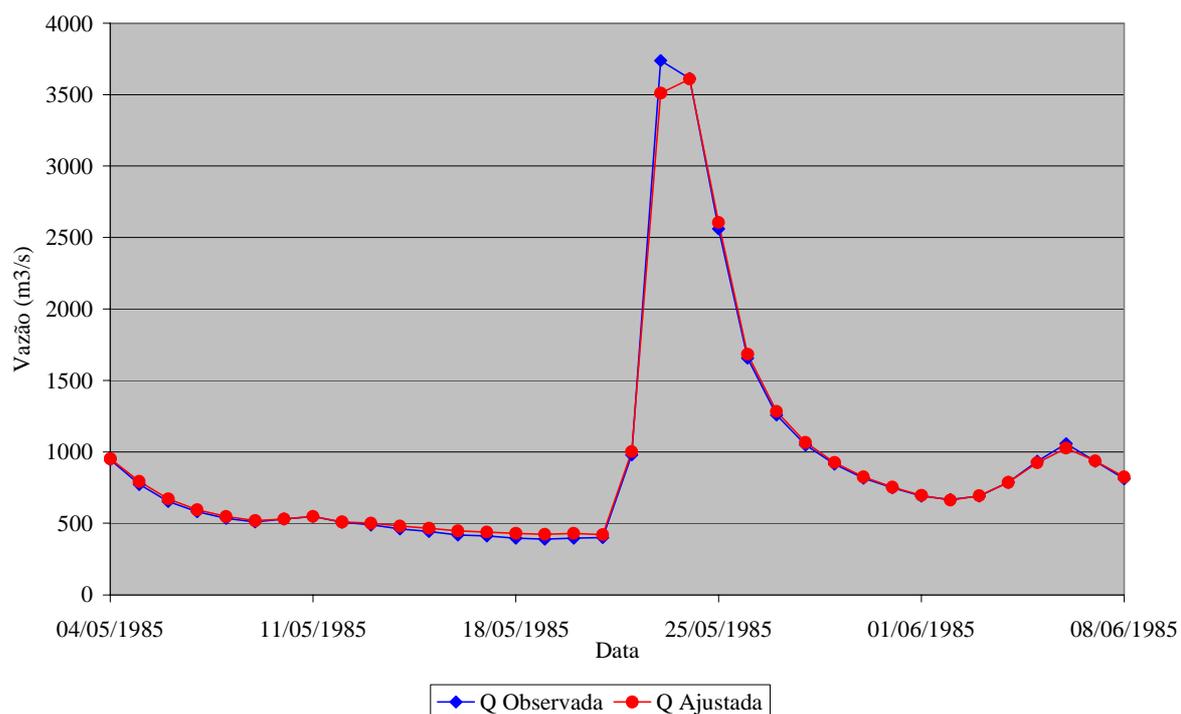


FIGURA 68 – VAZÃO ATUALIZADA PARA NOVO PORTO TAQUARA – VAZÕES ALTAS.



11 COMENTÁRIOS SOBRE O FUNCIONAMENTO DO ESTIMADOR DE ESTADO

Este item tem como objetivo principal apresentar alguns comentários e dados sobre o comportamento observado do estimador de estado.

A maior melhora relativa provocada pelo estimador de estado ocorreu para os casos em que a simulação pura (sem estimador de estado) apresentou os piores resultados. Esta característica é positiva, mas esperada, pois é justamente nos casos em que o resultado inicial disponível não é bom que existe maior espaço para melhoraria.

Uma das características que pode ser considerada extremamente positiva deste estimador de estado é sua robustez. Inspeção visual realizada para todo o período de calibração e todo o período de verificação em todas as sub-bacias indicou que, se em alguns eventos o sistema com estimador de estado não conseguiu melhora sensível em relação ao resultado da simulação, como ilustrado pelas figuras 65 e 69, por outro lado não conseguiu-se detectar nenhum evento em que o sistema tenha, de maneira contínua, piorado este resultado. Quando se observa um período de alguns dias, a tendência geral do sistema é de melhorar os resultados de previsão, conforme expresso pelas estatísticas descritas, apresentando alguns poucos valores piores que os da simulação. E, via de regra, a piora nos valores é pequena, a ponto de não chamar a atenção em uma inspeção visual. Estas constatações podem ser comprovadas pela inspeção do material digital que compõe anexo deste trabalho.

Embora a verificação da consistência dos estados gerados pelo estimador possa ser realizada com mais segurança olhando-se o comportamento das previsões para horizonte superior a 1 dia, a análise dos resultados obtidos neste estudo apontam para o fato que os estados gerados pelo estimador são consistentes, já que o hidrograma de vazões previstas não apresenta anomalias de comportamento.

FIGURA 69 – RESULTADOS DO ESTIMADOR EQUIVALENTES AOS DA SIMULAÇÃO.

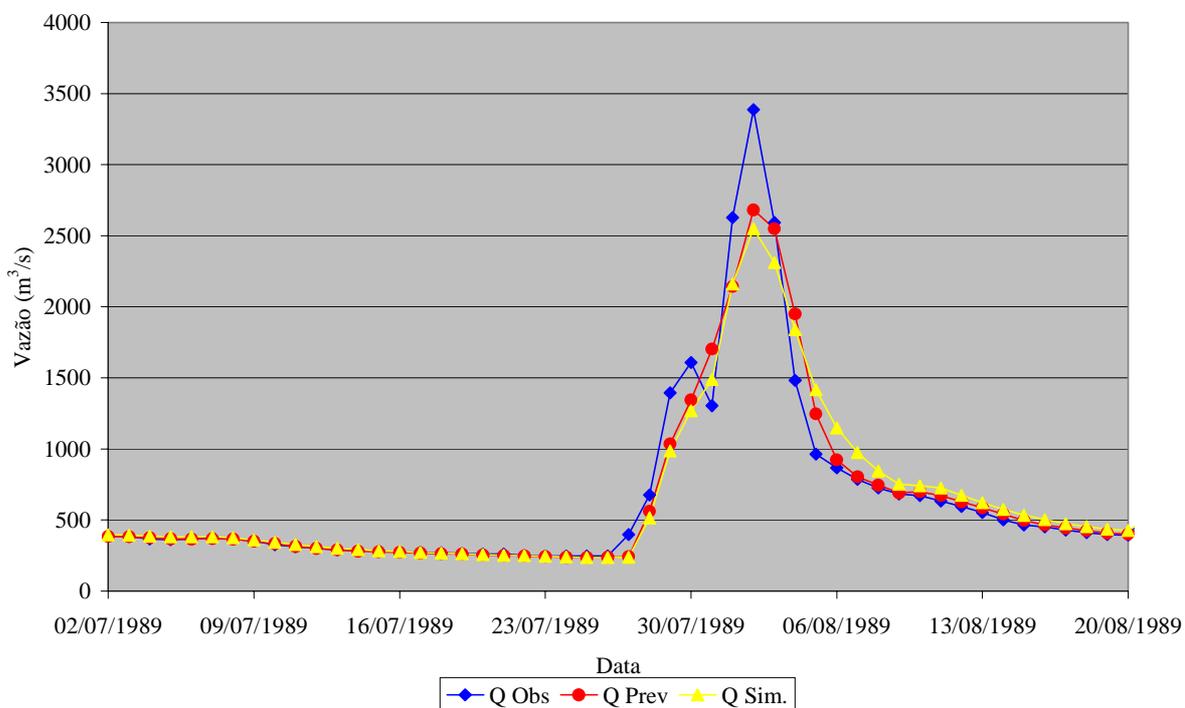
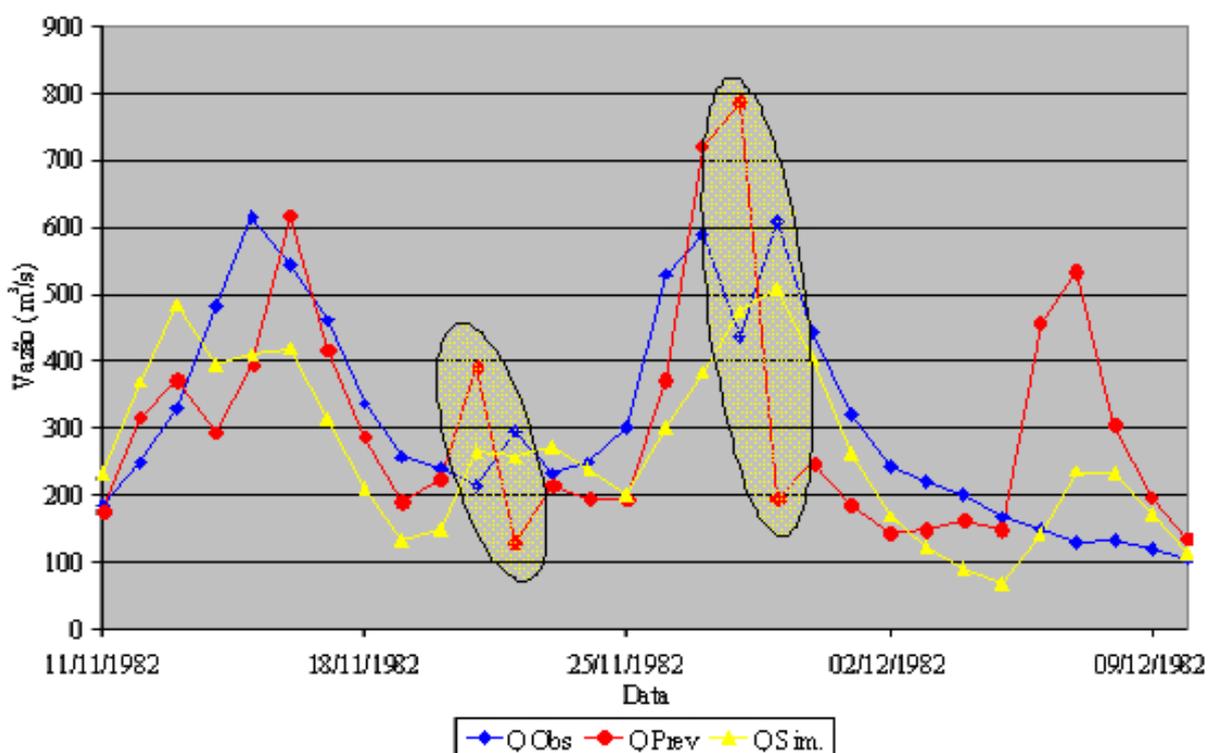
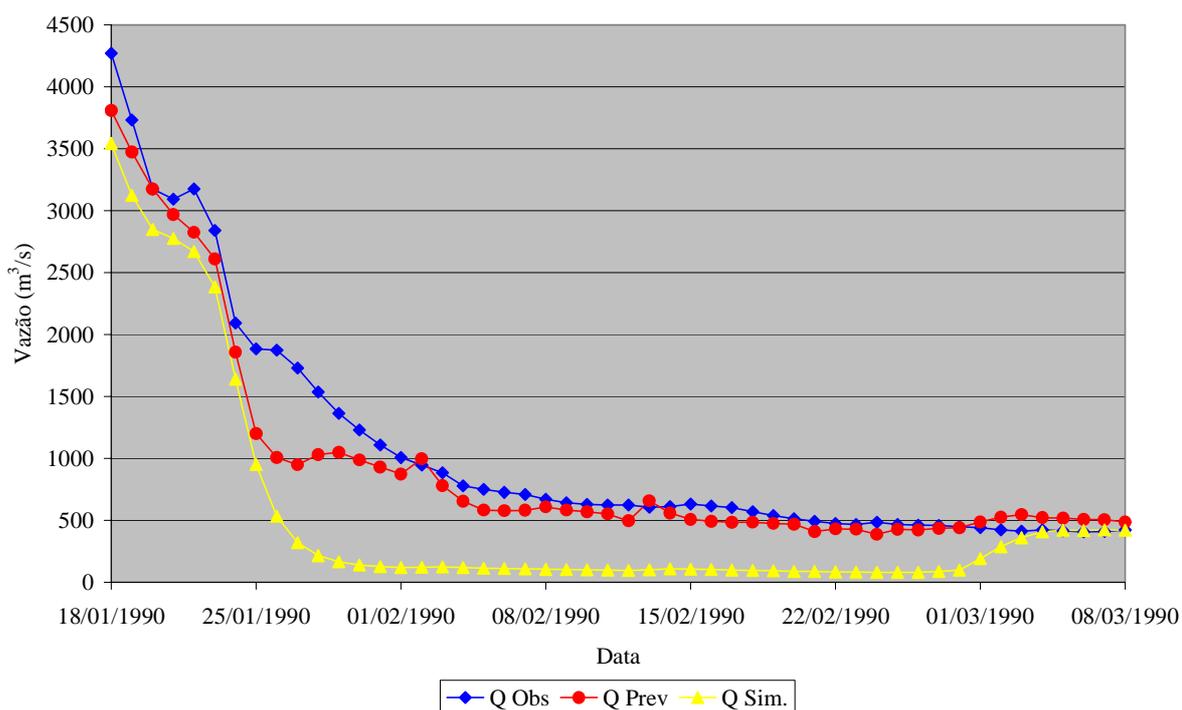


FIGURA 70 – ATUAÇÃO DO ESTIMADOR DE ESTADO A VERIFICAR - TEREZA CRISTINA.



Encontrou-se, em toda a série, apenas alguns raros eventos em que os resultados obtidos do sistema apresentaram um comportamento que mereça análise, como os casos indicados na figura 70. Sugere-se que a causa deste comportamento seja analisada em outro estudo.

FIGURA 71 – FALHA DA VAZÃO DE MONTANTE - EFEITO DO ESTIMADOR – NOVO PORTO TAQUARA.



Outro ponto que merece destaque é a capacidade de adaptação aos dados de vazão observada que o estimador confere. Os efeitos positivos desta capacidade podem ser vistos no caso ilustrado na figura 71 para Novo Porto Taquara, onde o estimador de estado compensou, na previsão, a falta de informação da afluência de montante. No entanto, casos como este e o da figura 59 ilustram a necessidade da manutenção da garantia da qualidade dos dados de vazão observada utilizados, sob pena do estimador promover a degradação da qualidade da previsão. Neste caso, o estimador promoveu a aproximação entre o valor simulado e observado da vazão em Novo Porto Taquara para um período em que os valores de vazão de montante e jusante não apresentavam

compatibilidade. No caso da figura 71, se a incompatibilidade entre dados de montante e jusante fosse causada pelos dados da vazão observada de Novo Porto Taquara e não da afluência de montante, o estimador estaria contribuindo para degradar a resposta do sistema. Por isto, pode ser uma boa idéia, em sistemas operacionais de previsão, disponibilizar ao usuário ambas informações, da simulação pura e da previsão com estimador de estado. Se o modelo chuva-vazão-propagação estiver calibrado razoavelmente, a informação da simulação pode ser útil para identificar problemas nos dados de entrada, seja de vazão ou de precipitação.

Com relação ao comportamento do estimador de estado, as figuras 72 a 75 apresentam, para o período de verificação da sub-bacia de Porto Paraíso de Norte, relações entre os estados gerados apenas pelo modelo chuva-vazão-propagação (caso identificado como simulação), para previsão um passo a frente com modelo e estimador de estado (indicado como previsão) e o estado resultante da atualização de estado pelo estimador (identificado como atualização). Da análise destas figuras é possível verificar que:

- a) a estimador de estado tem maior efeito nos reservatórios de solo (X_1 e X_2). Esta conclusão vem da maior dispersão observada na relação entre os estados de simulação e de previsão para estes estados. Verifica-se que esta variação é muito significativa para o armazenamento na camada inferior do solo, X_2 ;
- b) por outro lado, a menor dispersão da relação entre os estados de armazenamento de solo (X_1 e X_2) de previsão e atualização indica que o estimador de estado gera, em previsão, estados mais próximos aos “reais” (estados esperados em função da vazão observada) que a simulação. Em especial, chama a atenção a pequena dispersão da relação para X_2 ;

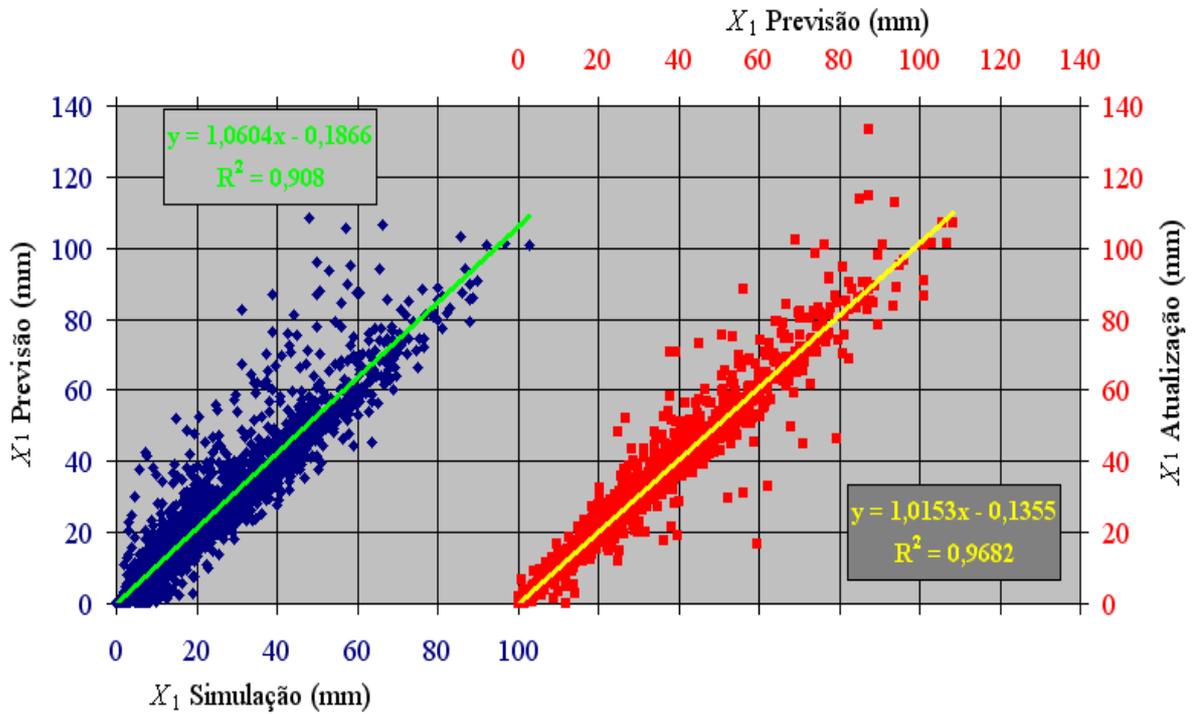
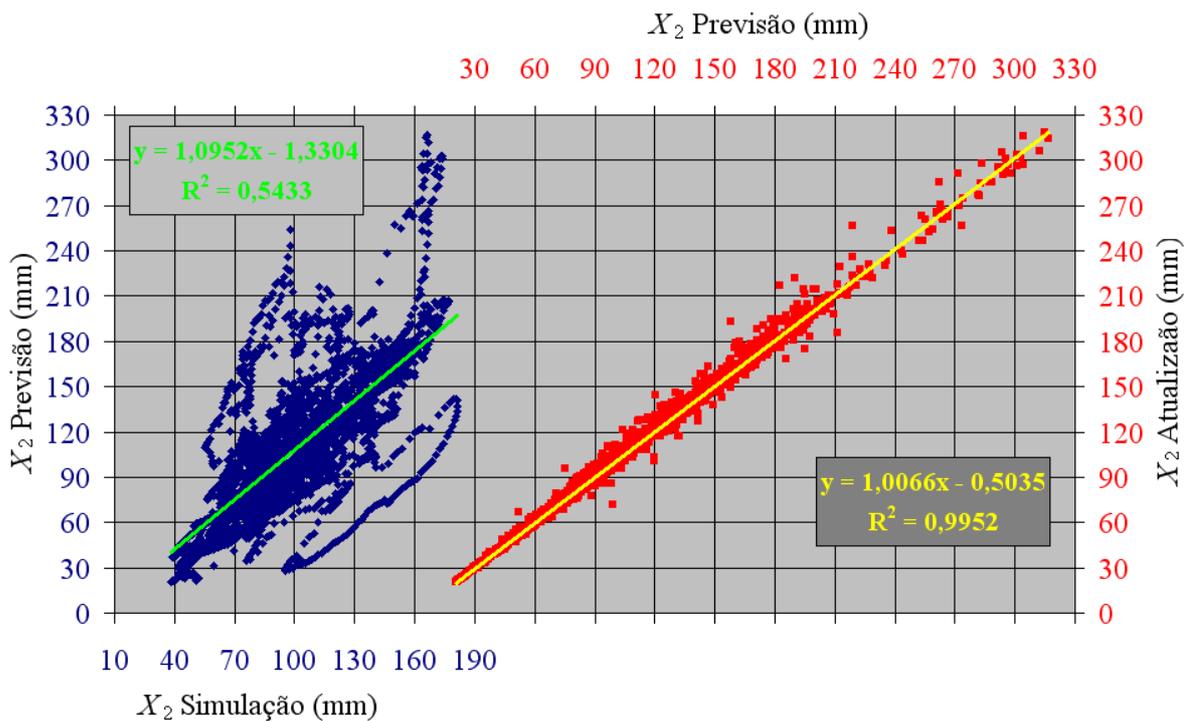
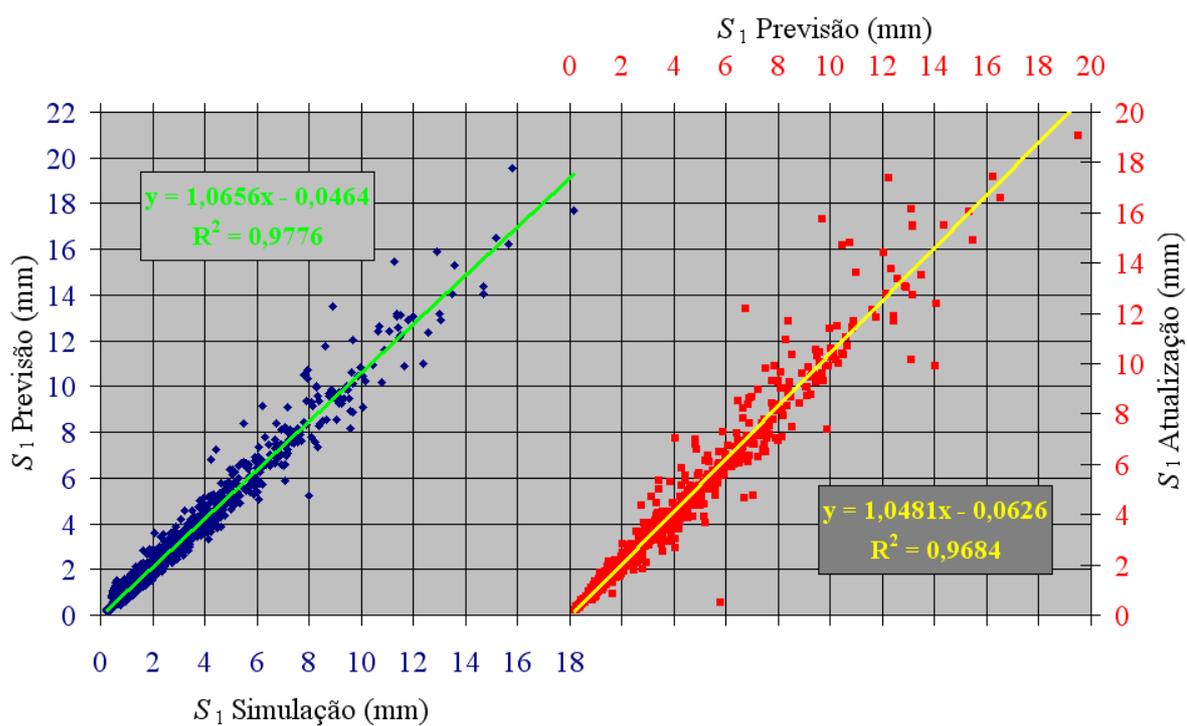
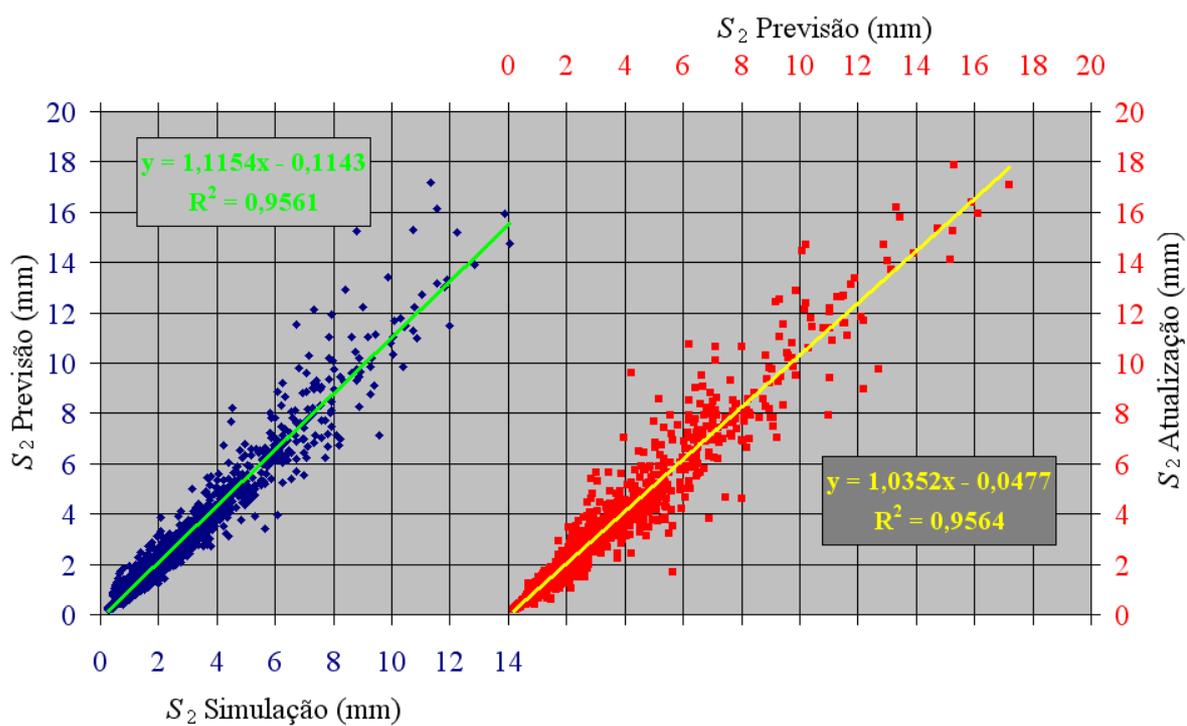
FIGURA 72 – X_1 - RELAÇÕES ENTRE ESTADOS – PORTO PARAÍSO DO NORTE.FIGURA 73 – X_2 - RELAÇÕES ENTRE ESTADOS – PORTO PARAÍSO DO NORTE.

FIGURA 74 – S_1 - RELAÇÕES ENTRE ESTADOS – PORTO PARAÍSO DO NORTE.FIGURA 75 – S_2 - RELAÇÕES ENTRE ESTADOS – PORTO PARAÍSO DO NORTE.

- c) os resultados de simulação dos tramos de canal (S_1 e S_2) são menos afetados pelo estimador de estado. Ressalta-se a pouca dispersão da relação entre os estados de simulação e de previsão para o primeiro tramo (S_1). Isto pode ser causado tanto por uma atuação menos intensa do estimador nestes estados como por uma dependência relativamente maior destes estados dos dados de entrada – resultado da fase bacia e afluência de montante – que dos valores anteriores dos estados. Dado o valor unitário do coeficiente de propagação, β , para a fase canal, esta hipótese é razoável;
- d) os valores dos coeficientes angulares das retas de regressão entre os estados de simulação e previsão parecem validar a calibração do modelo. Os valores próximos à unidade indicam que o valor estado da simulação é uma boa aproximação do valor esperado do estado de previsão, para toda a faixa de variação do estado;
- e) o mesmo ocorre com a relação entre os estados de previsão e atualização, ou seja, o valor do estado de previsão é uma boa estimativa do valor esperado do estado da atualização. Em conjunto, ambas as condições parecem indicar que o sistema não introduz tendência nos estados do modelo em relação aos estados da simulação;
- f) a maior variabilidade relativa das relações entre estados de previsão e atualização da camada superior do solo e do último tramo da fase canal (X_1 e S_2) e a menor dispersão da mesma relação para o armazenamento da camada inferior do solo e para o primeiro tramo de canal (X_2 e S_1) pode ser indicativo de uma atuação maior do estimador nos componentes de resposta maior e mais rápida do sistema.

Os gráficos 76 a 83 apresentam a distribuição de frequências das variações absolutas e relativas de estados para o período de validação da bacia de Porto Paraíso do Norte, com os valores das abscissas representando os limites superiores das classes. Da análise destes dados é possível concluir que:

- a) em termos de valores absolutos, as variações nos estados provocadas pelo estimador têm a mesma ordem de grandeza para os dois reservatórios de solo e para os dois tramos da fase canal. Para os reservatórios de solo a grande maioria das variações (82,3% para X_1 e 76,7% para X_2) encontra-se na faixa de ± 2 mm, enquanto que a maioria das variações nos tramos do canal (89,4% para S_1 e 82,0% para S_2) varia na faixa de $\pm 0,2$ mm. Assim, a alteração de estados é uma ordem de grandeza maior para os reservatórios de solo. Esta constatação é consistente com a observação da maior atuação do estimador nos reservatórios de solo;
- b) o efeito das atualizações dos tramos da fase canal na vazão deve ser maior, em função dos parâmetros do modelo chuva-vazão-propagação que regem a produção de vazão nos reservatório e nos tramos;
- c) a diferença de variabilidade entre componentes semelhantes (reservatórios de solo e tramos de canal), constatada na análise das figuras 72 a 75, não pode ser explicada pela ordem de grandeza das variações, que é semelhante para componentes semelhantes. Assim, a diferença de variabilidade deve decorrer da maneira como o estimador aplica estas variações aos diferentes componentes. De acordo com as figuras de variação relativa, a maior parte das variações de X_1 representa variações relativas de $\pm 20\%$, enquanto que para X_2 de apenas $\pm 2\%$. No entanto, para os tramos de canal a distribuição das variações absolutas e relativas são aproximadamente iguais, não ajudando a explicar a diferença de variabilidade constatada.

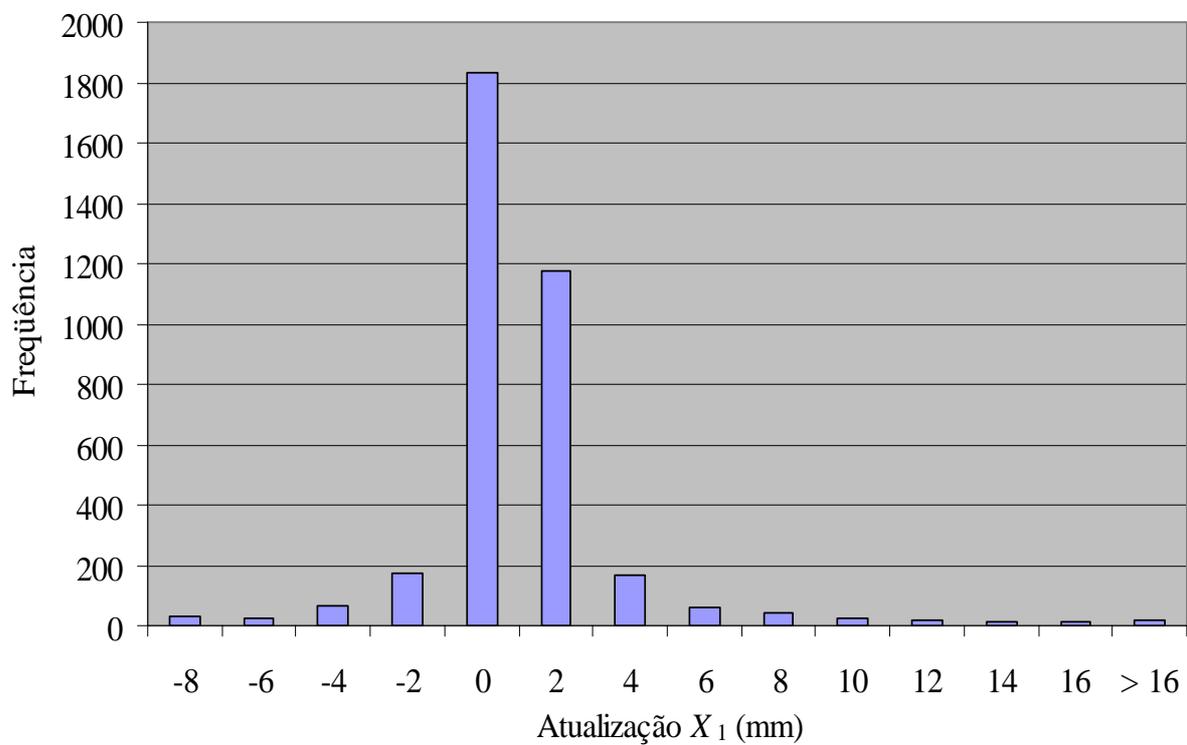
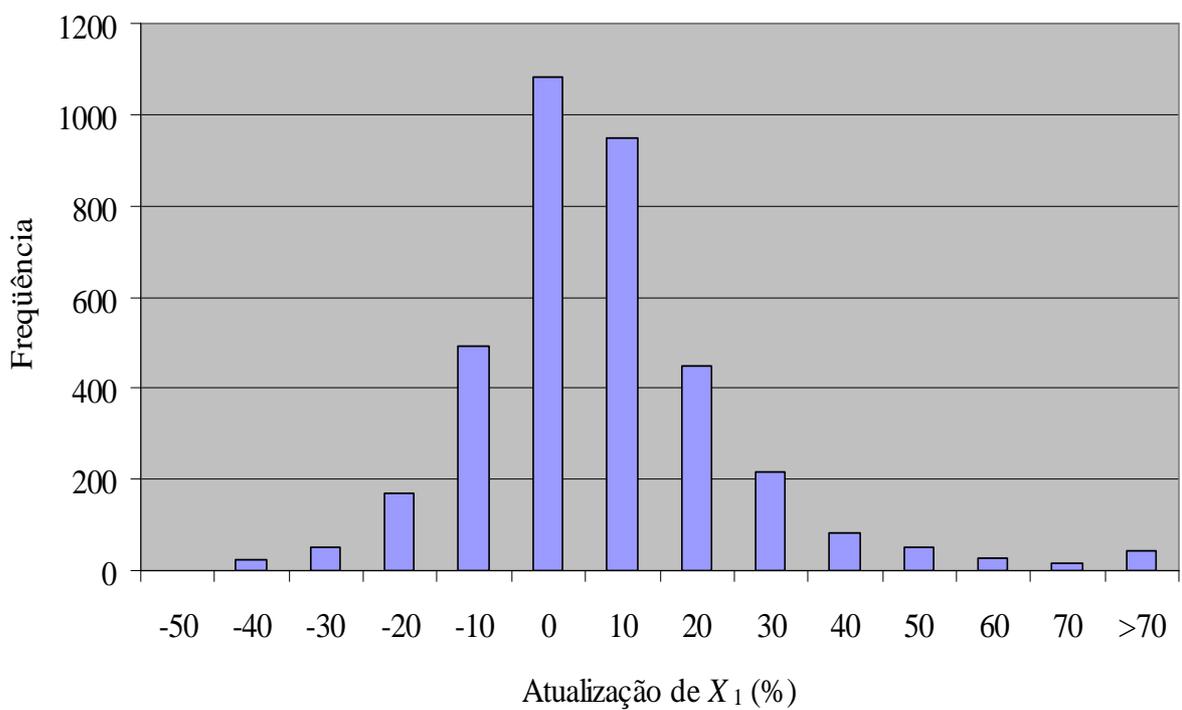
FIGURA 76 – ATUALIZAÇÃO ABSOLUTA DO ESTADO X_1 – PORTO PARAÍSO DO NORTE.FIGURA 77 – ATUALIZAÇÃO RELATIVA DO ESTADO X_1 – PORTO PARAÍSO DO NORTE.

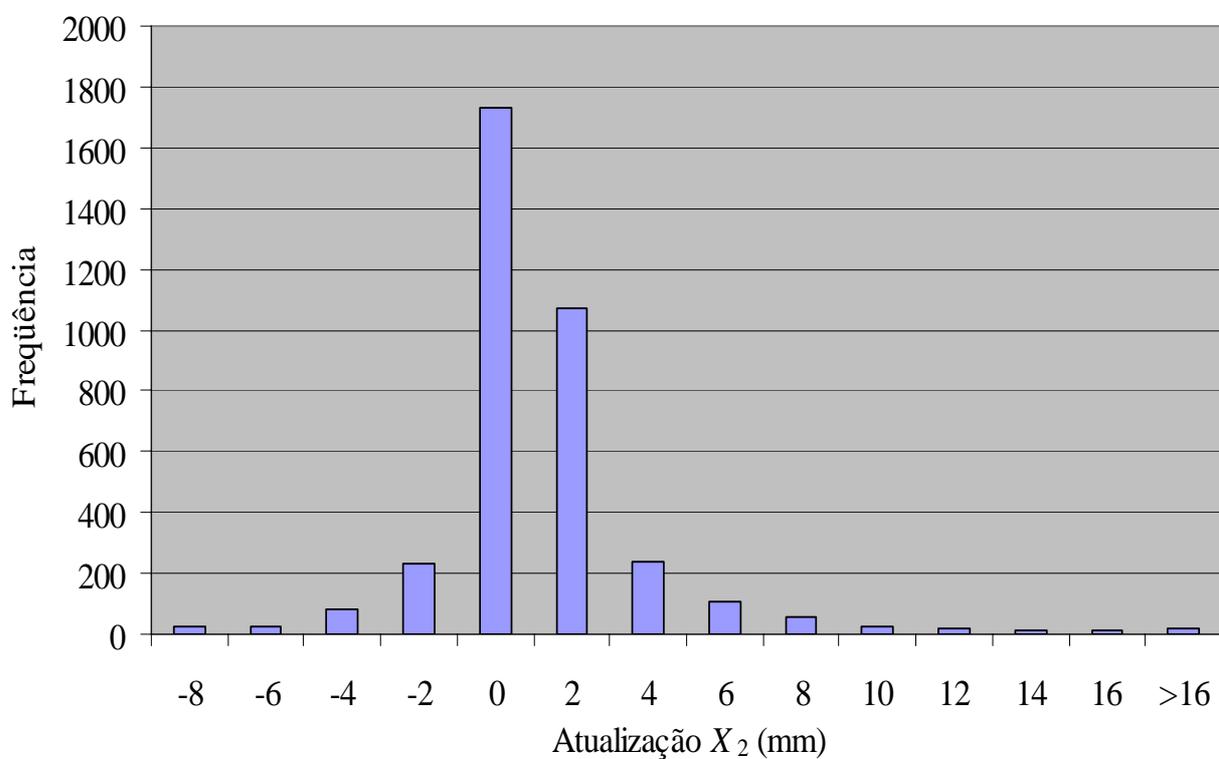
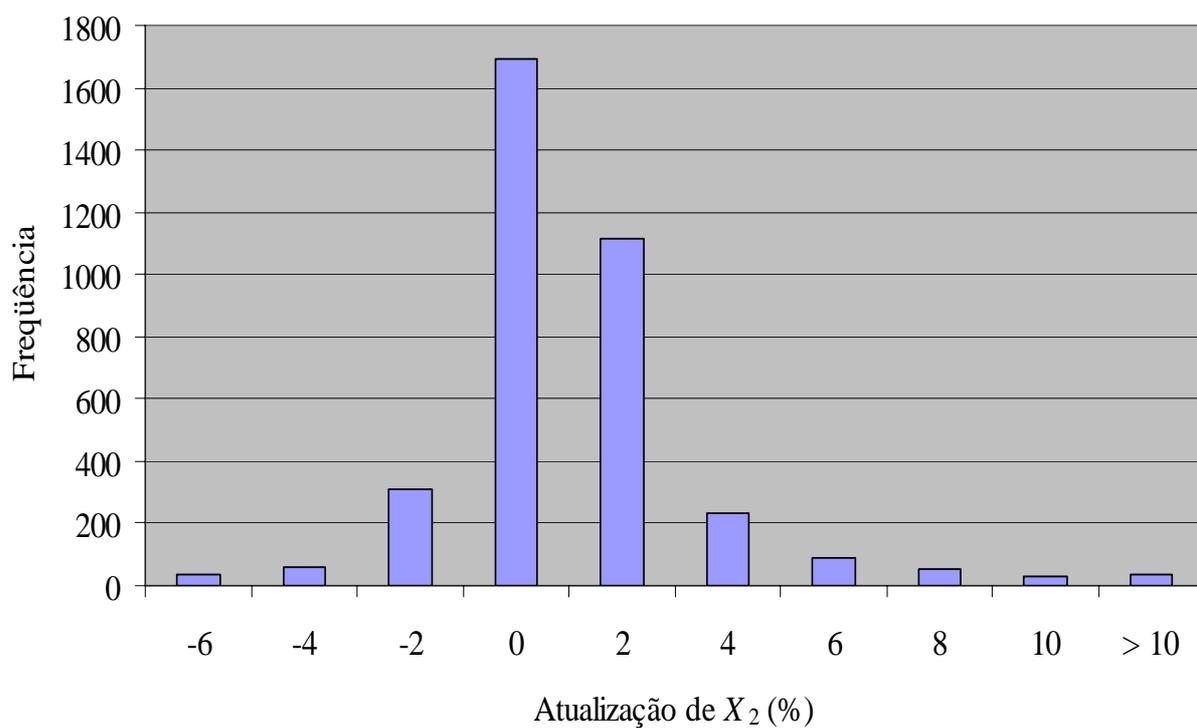
FIGURA 78 – ATUALIZAÇÃO ABSOLUTA DO ESTADO X_2 – PORTO PARAÍSO DO NORTE.FIGURA 79 – ATUALIZAÇÃO RELATIVA DO ESTADO X_2 – PORTO PARAÍSO DO NORTE.

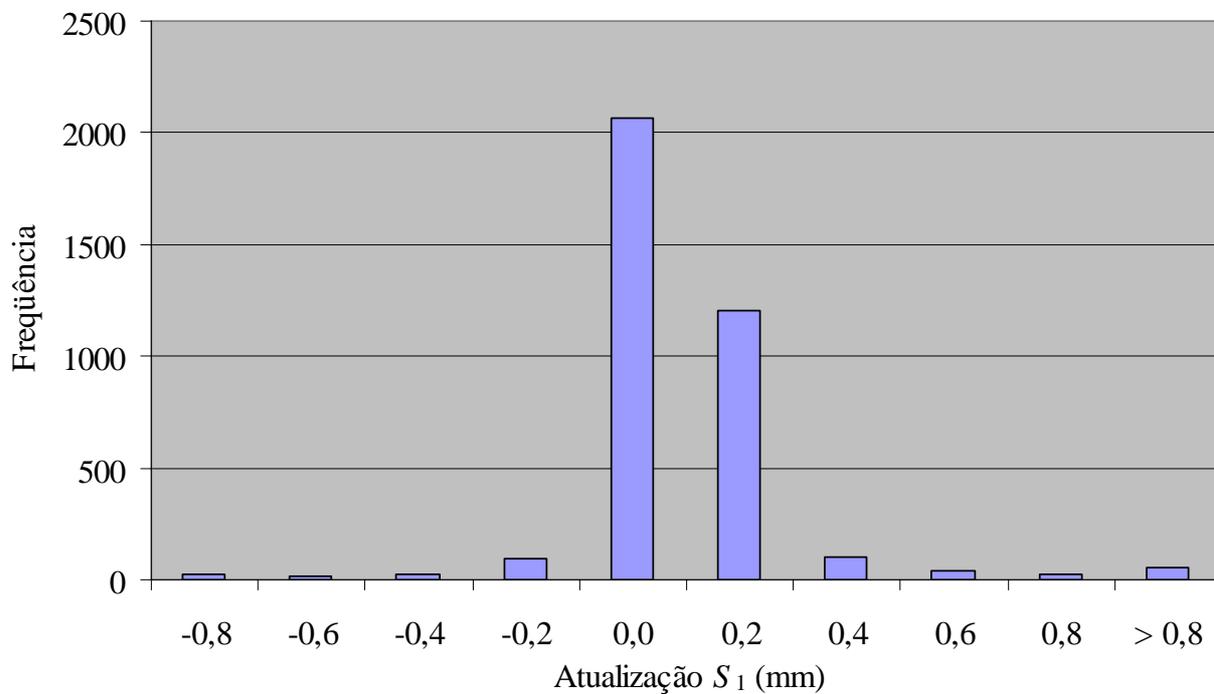
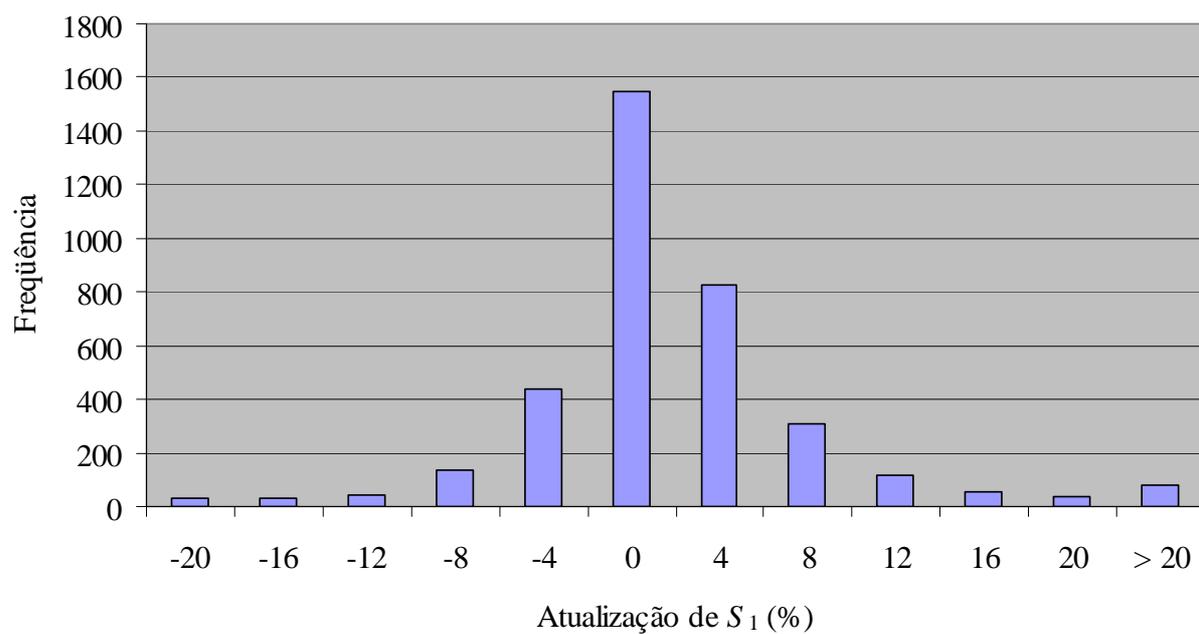
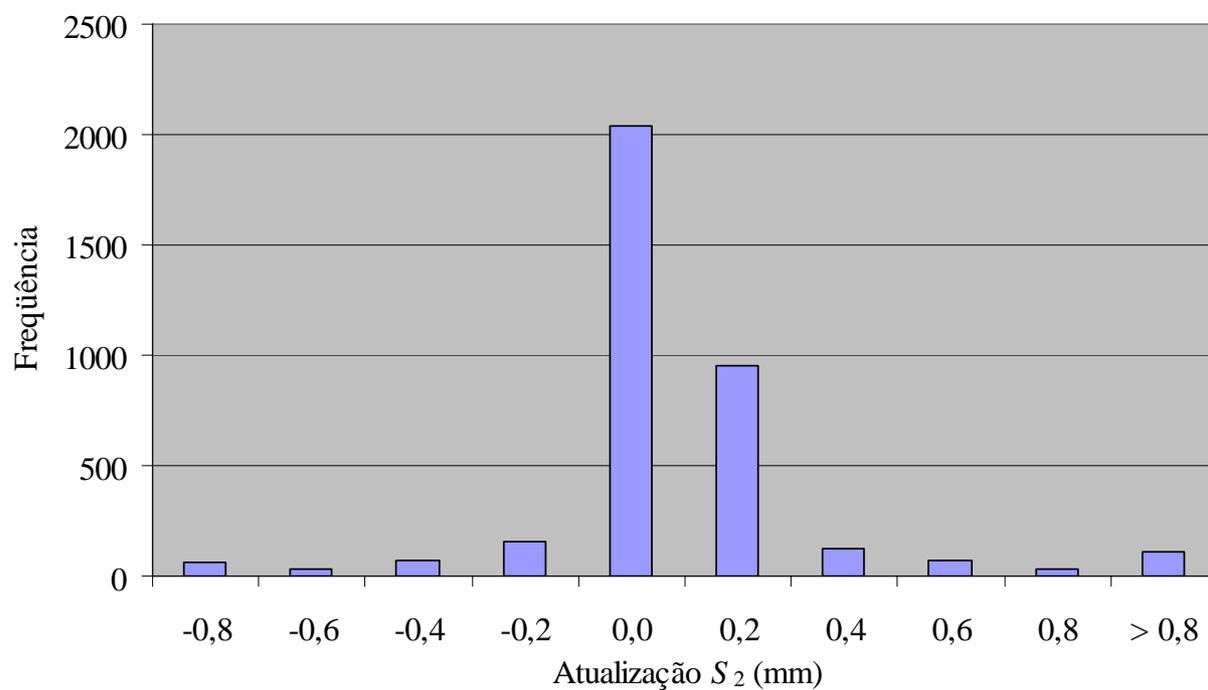
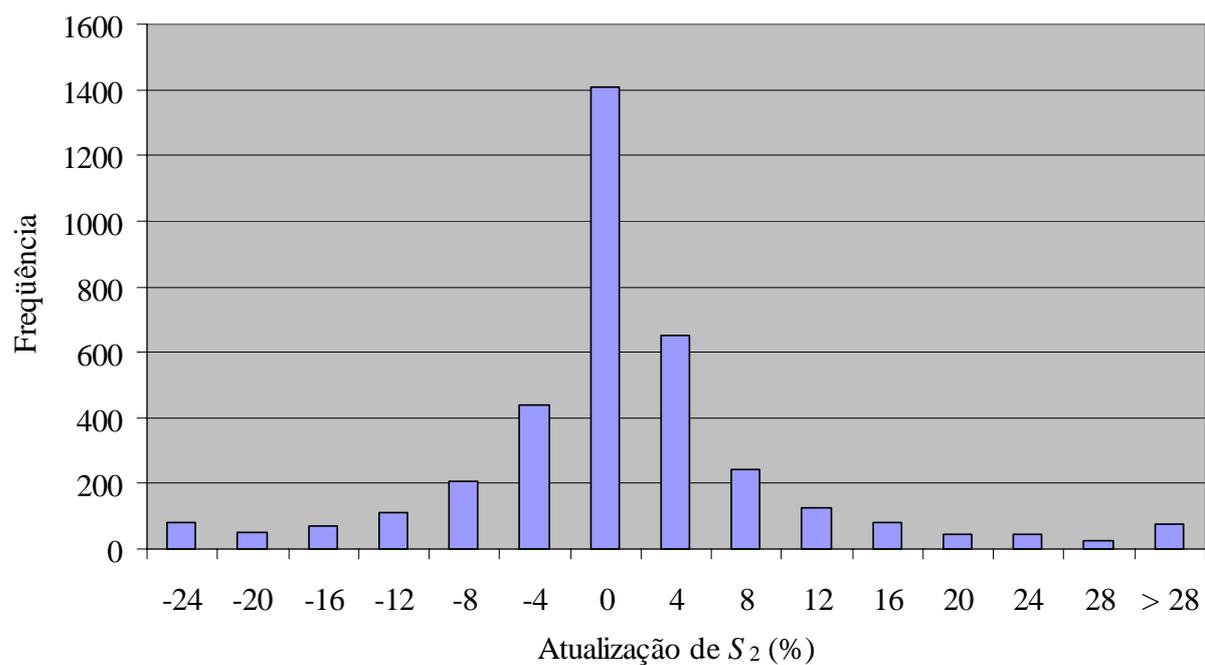
FIGURA 80 – ATUALIZAÇÃO ABSOLUTA DO ESTADO S_1 – PORTO PARAÍSO DO NORTE.FIGURA 81 – ATUALIZAÇÃO RELATIVA DO ESTADO S_1 – PORTO PARAÍSO DO NORTE.

FIGURA 82 – ATUALIZAÇÃO ABSOLUTA DO ESTADO S_2 - PORTO PARAÍSO DO NORTE.FIGURA 83 – ATUALIZAÇÃO RELATIVA DO ESTADO S_2 – PORTO PARAÍSO DO NORTE.

As análises acima são apenas uma tentativa de visão inicial do comportamento do estimador, necessitando aumentar sua abrangência e profundidade.

Merecem um estudo mais detalhado:

- a) a forma como o estimador atua nos estados;
- b) como seu comportamento é influenciado pelos parâmetros do modelo chuva-vazão-propagação, pelas matrizes de covariância e pelos modelos de covariância dos dados de entrada;
- c) que condições causam o comportamento anômalo constatado para uns poucos valores de previsão.

Além disto, após identificar como cada um dos componentes do sistema afeta o resultado geral de previsão, sugere-se pesquisar, para utilização operacional do modelo, uma forma de incorporar ao sistema informações adicionais disponíveis durante a operação, como, por exemplo, a avaliação qualitativa que os operadores geralmente têm da qualidade dos dados disponíveis. Esta informação poderia alimentar, por exemplo, os modelos de covariância do sistema.

12 ALTERAÇÕES DO MODELO 3R

Durante o processo de calibração do modelo 3R, constatou-se a presença de três problemas no modelo, apresentados a seguir, resumidamente e em ordem de importância:

- a) **abatimento excessivo dos hidrogramas:** os hidrogramas gerados pelo modelo apresentaram um abatimento maior que o observado nos dados;
- b) **evapotranspiração insuficiente:** a evapotranspiração real calculada pelo modelo mostrou-se insuficiente para fechar o balanço de volumes da bacia;
- c) **descontinuidade no fluxo de base:** observou-se, na fase final da recessão de alguns hidrogramas de enchentes, descontinuidades nos fluxos de base.

Na tentativa de melhorar o desempenho do modelo 3R, permitindo a geração de hidrogramas de maior similaridade com os hidrogramas observados, as possíveis causas de cada um destes problemas foram levantadas e foram propostas alterações do modelo destinadas a eliminá-las. A implementação de algumas destas propostas gerou uma nova versão do modelo 3R. As análises efetuadas e soluções propostas são apresentadas a seguir. Ressalte-se no entanto, que, via de regra, as alterações no modelo para adequá-lo a novas condições implicam no aumento de sua complexidade, seja pelo aumento do número ou complexidade de componentes ou do número de parâmetros.

12.1 ALTERAÇÕES PROPOSTAS E IMPLEMENTADAS

12.1.1 Abatimento Excessivo do Hidrograma

Conforme já indicado no item 8.4, durante o processo de calibração, todas as tentativas de aproximar o comportamento hidrológico da bacia com alterações de parâmetros do modelo falharam. Identificou-se duas possíveis causas para este comportamento: dependência da resposta temporal das fases bacia e canal (modeladas juntas, com uma cascata de reservatórios) e o método de integração das equações diferenciais utilizado (método de Runge-Kutta de 4ª ordem).

A dependência entre a resposta temporal das fases bacia e canal tem duas causas: a integração, no mesmo número de intervalos por passo, das equações diferenciais de ambas as fases e a inserção da contribuição da fase bacia no ponto de montante da fase canal. Levanta-se, como hipótese, que estes problemas surgiram na adaptação do modelo 3R, inicialmente concebido para utilização exclusivamente em bacias de cabeceira, para aplicação em bacias intermediárias, onde aparece uma contribuição das bacias de montante, cujo tempo de trânsito no canal é independente do tempo associado ao processo de transformação chuva-vazão da fase bacia.

Analisando-se a primeira causa, tem-se que a integração das equações diferenciais do modelo, incluindo as da fase canal, se dá em passo diário, com o número de intervalos de integração em um dia sendo definido pelo maior valor entre um número mínimo de intervalos por passo e um volume máximo de precipitação que pode entrar no sistema por intervalo. Esta integração por múltiplos intervalos é equivalente à modelagem da fase canal com um número maior de tramos que o especificado inicialmente, produzindo um maior abatimento do hidrograma. Este maior abatimento impede a boa modelagem de bacias com resposta rápida, como a que é objeto deste estudo. Identificou-se como fonte deste problema a tentativa de tratar uma modelagem hidrológica (cascata de reservatórios) como uma modelagem do fenômeno

físico. Na modelagem hidrológica, o comportamento geral esperado do escoamento (translação e amortecimento) é reproduzido pelos parâmetros do modelo. Para o modelo proposto para a fase canal, de cascata de reservatórios, a alteração destes parâmetros prejudica a representatividade do modelo. A solução para este problema seria a definição de intervalos de integração distintos para as fases bacia e canal, com a fase canal sendo integrada em apenas um intervalo por passo.

Para a segunda causa, a inserção dos volumes gerados pela fase bacia no ponto de montante da fase canal implica na fixação de um único tempo de resposta para as duas fases, o que geralmente não corresponde à realidade. Isto obriga o calibrador a escolher o tempo de uma das fases como mais representativo, o que, em termos práticos, transforma a contribuição da outra fase em ruído na resposta da bacia, já que está, necessariamente, fora de sincronismo. Como exemplo, para a bacia de Porto Paraíso do Norte, foi constatado que a mais alta correlação da vazão observada na exutória com a contribuição de montante apresenta “lag” 2, enquanto que a máxima correlação com a precipitação apresenta “lag” 3, indicando que os processos de propagação da vazão de montante e de transformação chuva-vazão-propagação da fase bacia têm tempos de resposta diferentes. Para este caso específico, como o volume da contribuição de montante é mais significativo que o da sub-bacia, prevaleceu na calibração final o tempo associado à propagação da vazão de montante. A solução sugerida para este problema seria a de possibilitar a inserção de qualquer uma das contribuições (bacia ou montante) em qualquer ponto (inicial, intermediário ou final) da cascata de reservatórios que representa a fase canal.

O efeito do método de integração na resposta da fase canal é ilustrado nas figuras 84 e 85, que mostram a resposta do trecho de canal para um hidrograma de entrada de pulso quadrado partindo de $100 \text{ m}^3/\text{s}$, subindo para $200 \text{ m}^3/\text{s}$ por dois passos de tempo e reduzindo-se novamente para $100 \text{ m}^3/\text{s}$.

FIGURA 84 – EFEITOS DO MÉTODO DE INTEGRAÇÃO EM UM CANAL COM UM TRAMO.

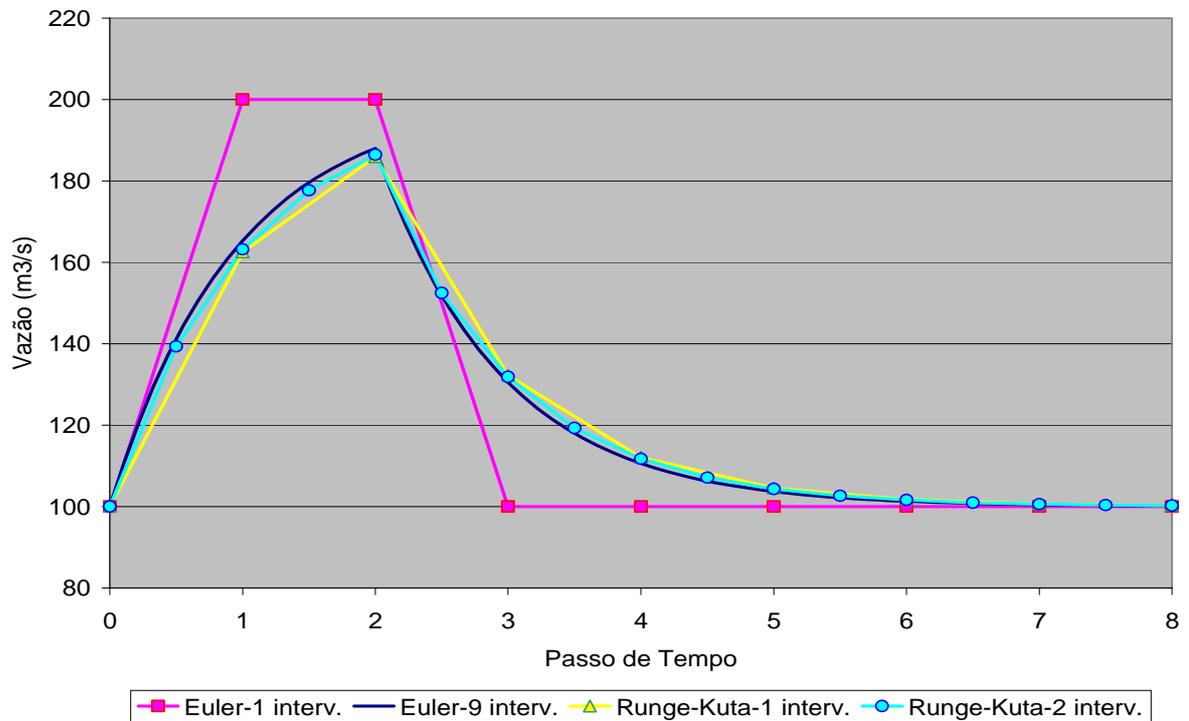
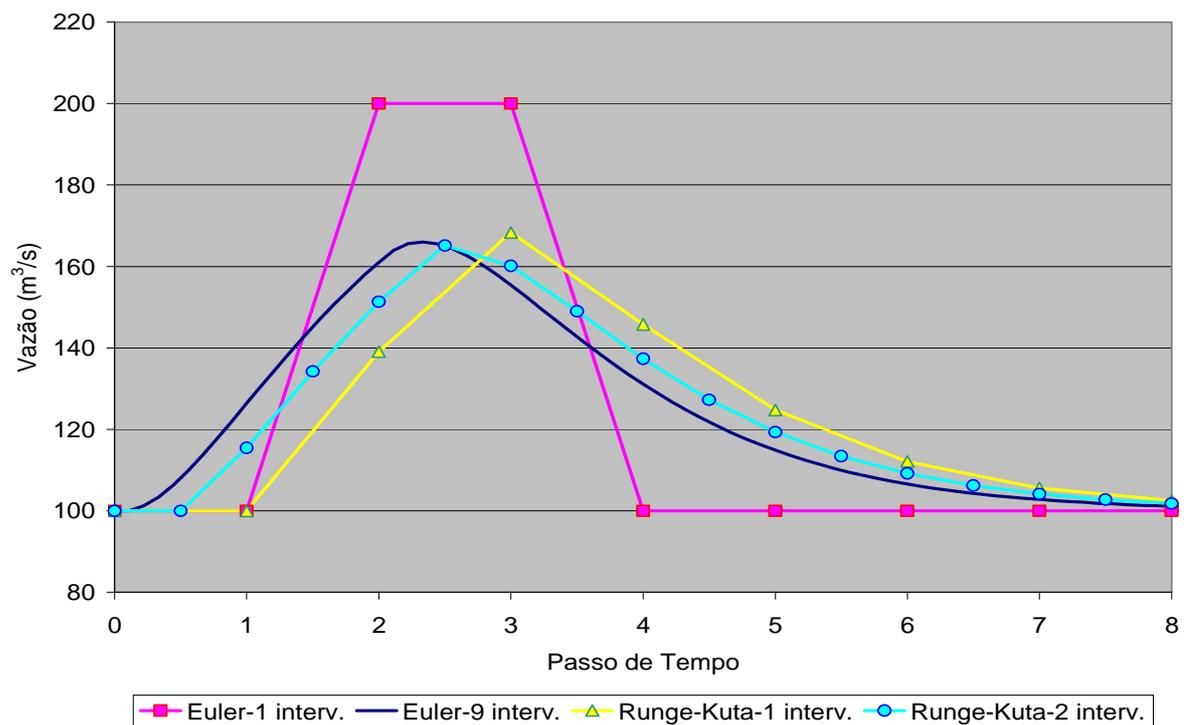


FIGURA 85 – EFEITOS DO MÉTODO DE INTEGRAÇÃO EM CANAL COM DOIS TRAMOS.



A figura 84 apresenta a resposta da fase canal para um tramo de reservatório linear sem abatimento ($\beta = 1$) com integração pelo método de Euler com um e nove intervalos de integração por passo de simulação e pelo método de Runge-Kutta de 4ª ordem para um e dois intervalos. A figura 85 apresenta os mesmos casos para um canal representado com dois tramos.

A análise das figuras mostra que o método de Runge-Kutta, conforme esperado, por ser um método de maior ordem, é equivalente à utilização de um método mais simples, como o de Euler, com um número muito maior de intervalos de integração por passo. Isto significa que mesmo adotando-se uma representação para os tramos de canal que, em teoria, não provocaria abatimento do hidrograma, este abatimento é introduzido na resposta do sistema pelo método de integração. Sugere-se como hipótese que a causa deste fenômeno é que o método de integração de mais alta ordem pesquisa a superfície da função que representa a equação de estado na direção de integração, com efeito equivalente à aplicação de um método de menor ordem em múltiplos intervalos de integração. Esta integração influencia o amortecimento associado ao modelo de propagação da mesma forma que a integração em múltiplos intervalos, descrita anteriormente. As soluções para este problema poderiam ser a troca do método de propagação ou a troca do método de integração por um método de menor ordem.

Avaliados os impactos que as alterações propostas poderiam ter na implementação computacional do modelo hidrológico e principalmente em seu estimador de estado, optou-se por explorar, na nova versão do modelo 3R, a substituição do método de integração, adotando-se o método mais simples possível, método de Euler, que consiste, basicamente, na aceitação das declividades no ponto inicial do intervalo de integração como representativas da corda da função no intervalo. No entanto, sugere-se que outros estudos avaliem a implementação das outras recomendações sugeridas, que podem ser importantes para a obtenção de uma versão mais flexível do modelo 3R.

A substituição executada melhorou a capacidade de representação do modelo 3R para a bacia em estudo, conforme apresentado na figura 86, e não alterou significativamente os resultados obtidos quando adotam-se parâmetros para o modelo que implicam na sua integração com um grande número de intervalos de integração (ver figura 87). Os resultados das figuras 86 e 87 foram obtidos por calibração automática de parâmetros da bacia de Porto Paraíso do Norte para o período completo de calibração e com os mesmos parâmetros iniciais, forçando-se, para a simulação da figura 86, a integração em um único intervalo (fornecendo como parâmetros um intervalo de integração a cada 200 mm de precipitação, com, no mínimo, um intervalo de integração) e, para a simulação da figura 87, a integração com um número grande de intervalos (volume de integração de 2 mm de precipitação, com, no mínimo, três intervalos de integração). Em função dos resultados obtidos, aceitou-se, nesta nova versão, o Método de Euler como método de integração, em substituição ao método de Runge-Kutta.

12.1.2 Escoamento de Base

A descontinuidade do escoamento de base foi tratada com a inversão da ordem de prioridade de evapotranspiração na formulação do modelo. Na versão original do modelo, uma parte da evapotranspiração potencial é atendida prioritariamente pelo armazenamento da camada superior do solo, de forma linearmente proporcional à parcela utilizada do armazenamento máximo desta camada (equação (8)). A evapotranspiração potencial não atendida pela camada superior passa a demandar a camada inferior. Parte desta demanda é atendida, com esta parte sendo definida por uma relação não linear com o armazenamento relativo da camada inferior do solo (equação (10)).

FIGURA 86 – MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO DO MODELO 3R – INTEGRAÇÃO EM UM INTERVALO.

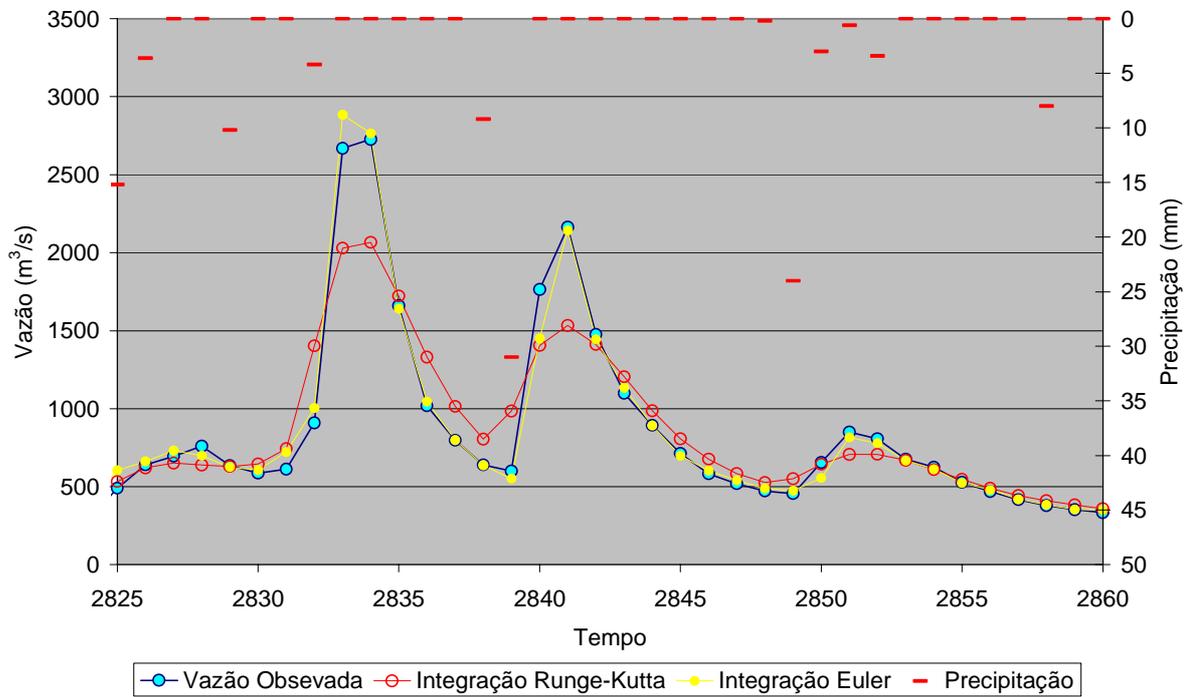
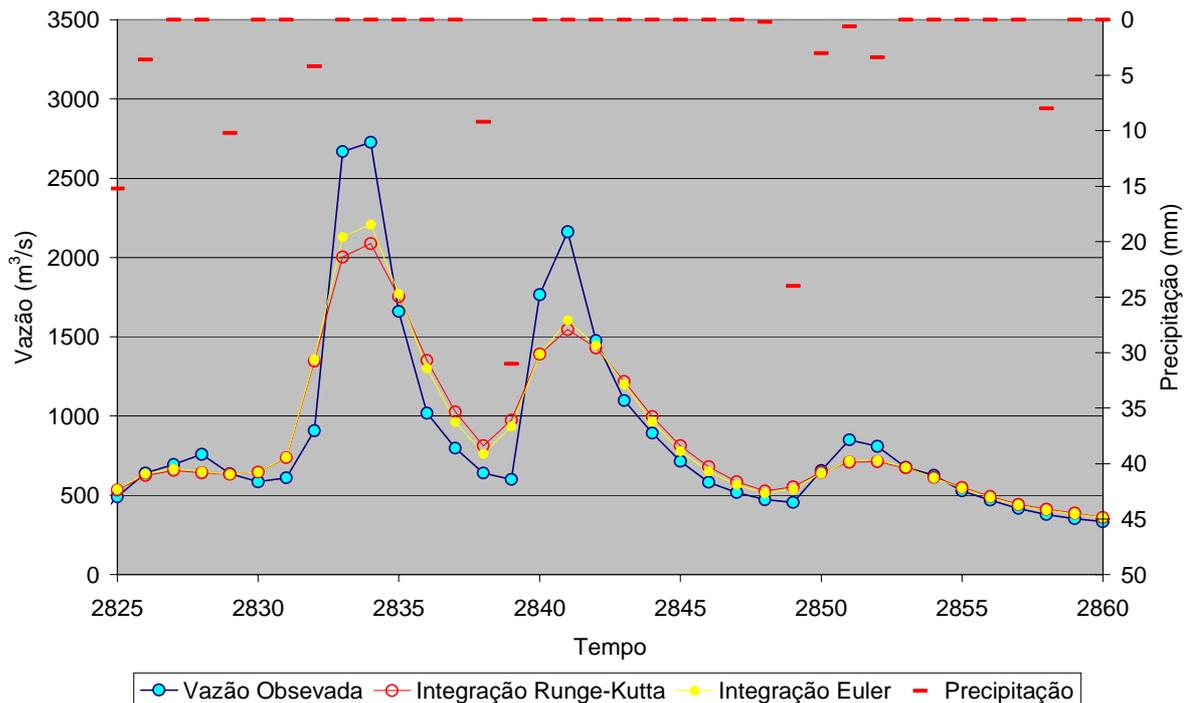


FIGURA 87 – MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO DO MODELO 3R – INTEGRAÇÃO EM DIVERSOS INTERVALOS.



No procedimento proposto, a evapotranspiração potencial passa a demandar primeiramente o reservatório inferior do solo, com o saldo demandando o reservatório superior.

Do ponto de vista teórico, a alteração proposta é justificável, já que se, para a bacia em estudo, que é úmida (tem grande disponibilidade hídrica), a evapotranspiração real aproxima a potencial, os fenômenos de maior persistência associados à evapotranspiração, como a evapotranspiração do reservatório inferior, devem ter uma importância relativa maior na bacia que os eventos associados a episódios isolados, caso do reservatório de solo superior, cujo comportamento guarda grande correlação com os eventos de precipitação. Para a bacia em estudo, outro ponto que justifica teoricamente a alteração é a pequena profundidade de solo, principalmente na metade superior da bacia, que tornaria a transpiração do reservatório inferior mais efetiva.

Do ponto de vista prático, a alteração proposta resolve o problema da descontinuidade do escoamento de base, por tornar contínua a abstração de água do reservatório inferior do solo devida à evapotranspiração. Além disto, não compromete em princípio, o balanço relativo de evapotranspiração entre as camadas de solo, já que é possível, através da escolha de parâmetros, fazer a evapotranspiração da camada inferior tão pequena quanto se queira. Com isto, o fato da parcela de evapotranspiração da camada inferior ser computada primeiro não implica, necessariamente, em fazê-la maior, para o período completo de simulação, que a gerada pela configuração original do modelo.

12.1.3 Evapotranspiração Potencial

Duas soluções foram inicialmente tentadas para eliminar o déficit de evapotranspiração presente nas simulações em função da hipótese adotada pelo modelo da proporcionalidade da evapotranspiração com o estado de armazenamento das

camadas de solo:

- a) eliminação da dependência entre a evapotranspiração da camada superior e seu estado de armazenamento, o que implica em demandar a camada superior de solo de todo o saldo de evapotranspiração não atendida pela camada inferior;
- b) transformação da dependência da evapotranspiração da camada superior em uma relação não linear, pela inclusão de um expoente para a expressão do armazenamento relativo (parcela utilizada do armazenamento máximo).

A avaliação das alternativas indicou que mesmo a adoção da primeira, que pode ser considerada como o limite da segunda alternativa, o déficit de evapotranspiração do modelo não foi atendido. Isto implica na necessidade de manutenção do coeficiente multiplicativo para a evapotranspiração potencial, C_{PET} , anteriormente introduzido, de forma a permitir fechar o balanço de massas para o período de estudos. Este coeficiente multiplicativo foi considerado como uma constante para as equações de estado do modelo 3R, de forma a não aumentar a complexidade do estimador de estado. Pelo mesmo motivo, adotou-se a primeira alternativa para buscar o aumento da evapotranspiração real, já que a mesma não implica na introdução de um novo parâmetro, o que tem impactos no estimador de estado. No entanto, recomenda-se que a segunda alternativa seja estudada e implantada em outros estudos, já que amplia a capacidade de representação do modelo.

12.2 ALTERAÇÕES NAS EQUAÇÕES DE ESTADO

As alterações propostas para o modelo 3R, apresentadas nos itens acima implicam na mudança das equações (8) e (10) do modelo para:

$$ET_1 = C_{PET} PET \left[1 - \left(\frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_3} \right] \quad (107)$$

$$ET_2 = C_{PET} PET \left(\frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_3} \quad (108)$$

onde:

C_{PET} - fator de multiplicação da evapotranspiração potencial, adimensional;
outros elementos - anteriormente definidos.

Com isto, as equações de estado para as camadas de solo são alteradas para:

$$\begin{aligned} \frac{dX_1}{dt} = & PREC - PREC \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right)^{m_1} - C_{FRG} C_2 X_2^0 \left[1 + C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2} \right] \frac{X_1}{X_1^0} - \\ & - C_{PET} PET \left[1 - \left(\frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_3} \right] - C_{FRG} C_1 X_1 \end{aligned} \quad (109)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = C_{FRG} C_2 X_2^0 \left[1 + C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2} \right] \frac{X_1}{X_1^0} - C_{PET} PET \left(\frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_3} - C_2 X_2 \quad (110)$$

12.3 ALTERAÇÕES NO ESTIMADOR DE ESTADO

As alterações propostas nas equações de estado do modelo 3R provocam as alterações no estimador de estado registradas nos próximos itens. Embora estas alterações não tenham sido implementadas, ficam aqui registradas para uso em estudos posteriores.

12.3.1 Alterações da Matriz \mathbf{F}

As alterações nas equações de estado provocam as seguintes alterações nas equações da matriz \mathbf{F} do estimador de estado:

$$\frac{\partial f_1}{\partial X_1} = -m_1 \frac{PREC}{X_1^0} \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right)^{m_1-1} - C_{FRG} C_2 \frac{X_2^0}{X_1^0} \left[1 + C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2} \right] - C_{FRG} C_1 \quad (111)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial X_2} = m_2 C_{FRG} C_2 C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2-1} \frac{X_1}{X_1^0} + m_3 C_{PET} \frac{PET}{X_2^0} \left(\frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_3-1} \quad (112)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial X_1} = C_{FRG} C_2 \frac{X_2^0}{X_1^0} \left[1 + C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2} \right] \quad (113)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial X_2} = -m_2 C_{FRG} C_2 C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2-1} \frac{X_1}{X_1^0} - m_3 C_{PET} \frac{PET}{X_2^0} \left(\frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_3-1} - C_2 \quad (114)$$

12.3.2 Alterações da Matriz \mathbf{N}

As alterações nas equações de estado provocam as seguintes alterações nas equações da matriz \mathbf{N} do estimador de estado:

$$\frac{\partial f_1}{\partial X_1^0} = m_1 \frac{PREC}{X_1^0} \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right)^{m_1} + C_{FRG} C_2 \frac{X_2^0}{X_1^0} \left[1 + C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2} \right] \frac{X_1}{X_1^0} \quad (115)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial X_2^0} = & -C_{FRG} C_2 \left\{ 1 + C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2-1} \left[1 + (m_2 - 1) \frac{X_2}{X_2^0} \right] \right\} \frac{X_1}{X_1^0} \\ & - m_3 C_{PET} \frac{PET}{X_2^0} \left(\frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_3} \end{aligned} \quad (116)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial m_3} = C_{PET} PET \left(\frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_3} \ln \left(\frac{X_2}{X_2^0} \right) \quad (117)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial X_1^0} = -C_{FRG} C_2 \frac{X_2^0}{X_1^0} \left[1 + C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2} \right] \frac{X_1}{X_1^0} \quad (118)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_2}{\partial X_2^0} = & C_{FRG} C_2 \left\{ 1 + C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2-1} \left[1 + (m_2 - 1) \frac{X_2}{X_2^0} \right] \right\} \frac{X_1}{X_1^0} \\ & + m_3 C_{PET} \frac{PET}{X_2^0} \left(\frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_3} \end{aligned} \quad (119)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial m_3} = -C_{PET} PET \left(\frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_3} \ln \left(\frac{X_2}{X_2^0} \right) \quad (120)$$

12.3.3 Alterações da Matriz **M**

As alterações nas equações de estado provocam as seguintes alterações nas equações da matriz **M** do estimador de estado:

$$\frac{\partial f_1}{\partial PET} = -C_{PET} \left[1 - \left(\frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_3} \right] \quad (121)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial PET} = -C_{PET} \left(\frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_3} \quad (122)$$

12.4 VERIFICAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO MODELO

A nova versão do modelo, nomeada provisoriamente como 3R6, por ser a 6ª formulação do modelo, de 8 tentadas, foi calibrada para as mesmas bacias e períodos

definidos para este trabalho. Os parâmetros obtidos na calibração são apresentados na tabela 29. Avaliando-se os resultados obtidos, é possível concluir que a calibração da versão 3R6 apresentou melhores resultados que a do modelo original, tendo melhor desempenho para as estatísticas de coeficiente de correlação e valor esperado e desvio padrão dos desvios. Também, em função da eliminação do comportamento linear da evapotranspiração real com o grau de armazenamento da camada superior do solo, os coeficientes de multiplicação da evapotranspiração potencial, C_{PET} , resultaram bem menores, atingindo um valor máximo de 1,4.

As tabelas 30 a 33 apresentam extensões das tabelas 25 a 28, utilizadas na verificação da calibração do estimador de estado, com a inclusão dos resultados das simulações com a nova versão do modelo. A análise destas tabelas indica que a nova versão do modelo tem desempenho intermediário entre a versão original e os resultados com o estimador de estado. Isto é verdade para o coeficiente de correlação onde os resultados da nova versão apresentaram resultados intermediários, para todas sub-bacias e todos os casos avaliados, tanto para os valores obtidos para o conjunto total de resultados como para os quartis. Com relação às estatísticas dos desvios, a tendência do comportamento é a mesma, com o valor esperado e desvio padrão dos desvios via de regra apresentando valores intermediários entre o resultado da versão anterior, com e sem estimador de estado.

No entanto, a principal evolução da nova versão, na opinião o autor, foi a sua capacidade de representar mais de perto as características dos hidrogramas observados, dado o seu potencial de impacto no desempenho do sistema para horizontes maiores que um dia. Esta melhora de representação é exemplificada na figura 86, onde as taxas de ascensão e recessão e tempo e vazão de pico foram melhor reproduzidas na nova versão.

Dado que a nova versão do modelo melhora, na etapa de calibração, o desempenho da versão anterior, cria-se a expectativa de que a implementação do estimador de estado para esta nova versão possa produzir resultados um pouco

melhores que os obtidos até agora, para as bacias em estudo. Esta implementação foi realizada, apresentando, no entanto, resultados que foram considerados insatisfatórios, se comparados com os obtidos com a versão anterior. Credita-se este comportamento insatisfatório a algum erro no desenvolvimento teórico ou na implementação do estimador de estado, erro não localizado até a conclusão deste trabalho. Por isto, os resultados obtidos não foram incluídos nesta dissertação.

Dado o potencial de melhoria de resultados, sugere-se que tanto as alterações do modelo sugeridas e não implementadas como o novo modelo conceitual sejam tema de estudos futuros.

TABELA 29 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO MODELO 3R – VERSÃO 3R6.

		POSTO				
		Tereza Cristina	Ubá do Sul	Porto Paraíso do Norte	Novo Porto Taquara	
PARÂMETRO	X_1^0	150,00	150,00	250,00	250,00	
	X_2^0	500,00	500,00	900,00	1400,00	
	C_1	0,025	0,025	0,025	0,010	
	C_2	0,006	0,008	0,008	0,004	
	C_3	4,00	4,00	4,00	3,50	
	m_1	0,80	0,70	2,00	1,60	
	m_2	2,50	2,50	2,20	2,00	
	m_3	0,80	0,60	0,60	0,80	
	m	1,00	1,00	1,00	1,00	
	β	0,90	1,00	1,00	0,95	
	μ	0,00	0,00	0,00	0,00	
	C_{FRG}	1,00	1,00	1,00	1,00	
	C_{PET}	1,30	0,95	1,40	0,90	
	Nº Tramos	2	2	2	2	
	Volume de Integração	200,0	200,0	200,0	200,0	
Nº Mínimo de Intervalos	2	2	1	1		
ESTATÍSTICA	Observ.	Média	89,736	299,289	618,189	722,824
		Desv. Padrão	128,234	365,241	583,224	618,777
	Previsto	Função Obj.	0,542726	0,369313	0,291469	0,14375
		Coef. Correl.	0,68841	0,85640	0,91151	0,97923
		Média	91,089	301,910	623,862	720,982
		Desv. Padrão	120,984	345,118	549,656	621,157
	Resíduo	Média	1,353	2,620	5,673	-1,843
		Desv. Padrão	98,594	191,327	240,552	126,394

TABELA 30 – ESTATÍSTICAS DE DESEMPENHO DA VERSÃO 3R6 – NOVO PORTO TAQUARA.

		Vazão (m ³ /s)		Desvios (m ³ /s)		Coef. de Correlação
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
GERAL	Q Obs. ⁽¹⁾	722,82	618,78	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	741,55	589,96	18,73	135,35	0,97605
	Q Prev. ⁽³⁾	725,28	600,55	2,45	112,20	0,98351
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	722,30	613,53	-0,53	29,31	0,99890
	Q 3R6 ⁽⁵⁾	720,98	621,16	-1,84	126,39	0,97923
1° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	285,42	46,66	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	281,57	61,41	-3,85	25,94	0,92057
	Q Prev. ⁽³⁾	281,65	51,04	-3,77	14,14	0,96204
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	282,22	48,16	-3,20	5,86	0,99285
	Q 3R6 ⁽⁵⁾	269,82	55,23	-15,60	18,30	0,94930
2° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	435,37	48,00	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	456,39	65,94	21,02	38,85	0,81242
	Q Prev. ⁽³⁾	440,93	56,60	5,56	25,13	0,89740
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	435,94	49,90	0,56	9,53	0,98181
	Q 3R6 ⁽⁵⁾	432,56	57,58	-2,81	30,12	0,85251
3° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	664,03	89,74	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	706,49	118,96	42,46	69,51	0,81369
	Q Prev. ⁽³⁾	678,51	105,16	14,48	51,15	0,87401
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	666,85	91,35	2,82	15,32	0,98585
	Q 3R6 ⁽⁵⁾	667,68	105,35	3,65	51,58	0,87216
4° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	1506,48	792,14	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	1521,75	683,46	15,27	255,30	0,95072
	Q Prev. ⁽³⁾	1500,02	738,72	-6,46	215,95	0,96259
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	1504,18	776,17	-2,30	55,26	0,99772
	Q 3R6 ⁽⁵⁾	1513,87	779,52	7,39	244,32	0,95179

(1) Vazão observada

(2) Vazão resultante do modelo sem estimador de estado

(3) Vazão resultante do modelo com estimador de estado

(4) Vazão resultante dos estados atualizados (valor "a posteriori" da vazão)

(5) Vazão da versão 3R6 sem estimador de estado

TABELA 31 – ESTATÍSTICAS DE DESEMPENHO DA VERSÃO 3R6 – PORTO PARAÍSO DO NORTE.

		Vazão (m ³ /s)		Desvios (m ³ /s)		Coef. de Correlação
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
GERAL	Q Obs. ⁽¹⁾	618,19	583,22	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	627,67	532,11	9,49	235,98	0,91449
	Q Prev. ⁽³⁾	623,15	568,32	4,96	161,93	0,96078
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	615,91	575,67	-2,28	32,16	0,99854
	Q 3R6 ⁽⁵⁾	625,61	549,76	7,43	213,98	0,93035
1° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	204,56	44,33	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	245,39	62,33	40,83	47,26	0,65445
	Q Prev. ⁽³⁾	216,26	50,57	11,70	23,64	0,88402
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	206,86	43,92	2,30	4,71	0,99434
	Q 3R6 ⁽⁵⁾	218,92	68,77	14,36	44,32	0,77586
2° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	349,46	44,75	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	382,45	92,63	32,99	81,79	0,46968
	Q Prev. ⁽³⁾	363,67	65,94	14,21	46,92	0,70305
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	349,92	44,68	0,46	6,98	0,9878
	Q 3R6 ⁽⁵⁾	381,13	87,56	31,67	72,87	0,55637
3° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	558,21	85,95	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	592,87	171,68	34,66	149,89	0,48772
	Q Prev. ⁽³⁾	575,72	121,55	17,52	85,00	0,71491
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	557,22	86,09	-0,99	12,63	0,98922
	Q 3R6 ⁽⁵⁾	604,81	155,19	46,60	127,52	0,57011
4° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	1360,53	742,48	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	1289,98	666,69	-70,54	427,53	0,82118
	Q Prev. ⁽³⁾	1336,93	725,02	-23,59	306,26	0,91316
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	1349,63	731,01	-10,90	61,67	0,99662
	Q 3R6 ⁽⁵⁾	1297,60	703,79	-62,93	390,50	0,85552

(1) Vazão observada

(2) Vazão resultante do modelo sem estimador de estado

(3) Vazão resultante do modelo com estimador de estado

(4) Vazão resultante dos estados atualizados (valor "a posteriori" da vazão)

(5) Vazão da versão 3R6 sem estimador de estado

TABELA 32 – ESTATÍSTICAS DE DESEMPENHO DA VERSÃO 3R6 – UBÁ DO SUL.

		Vazão (m ³ /s)		Desvios (m ³ /s)		Coef. de Correlação
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
GERAL	Q Obs. ⁽¹⁾	299,29	365,24	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	301,05	311,12	1,76	198,28	0,83990
	Q Prev. ⁽³⁾	296,51	319,48	-2,78	143,96	0,92016
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	295,67	357,74	-3,62	35,71	0,99533
	Q 3R6 ⁽⁵⁾	300,77	343,63	1,48	195,56	0,84950
1° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	70,16	16,42	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	114,33	67,92	44,16	65,37	0,27290
	Q Prev. ⁽³⁾	84,71	41,48	14,55	37,03	0,45439
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	71,58	16,44	1,42	2,41	0,98921
	Q 3R6 ⁽⁵⁾	92,15	64,12	21,98	60,65	0,33338
2° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	130,00	21,22	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	172,05	98,57	42,05	96,36	0,21073
	Q Prev. ⁽³⁾	149,06	55,93	19,07	50,36	0,43908
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	130,82	21,41	0,82	4,14	0,98121
	Q 3R6 ⁽⁵⁾	156,33	98,75	26,33	96,07	0,23212
3° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	243,98	48,42	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	267,19	139,79	23,21	136,41	0,24212
	Q Prev. ⁽³⁾	264,53	93,60	20,55	82,29	0,47822
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	242,25	48,23	-1,73	10,78	0,97511
	Q 3R6 ⁽⁵⁾	267,58	150,28	23,60	145,36	0,26121
4° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	747,49	493,46	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	646,14	424,48	-101,35	331,32	0,74932
	Q Prev. ⁽³⁾	682,61	420,28	-64,87	258,05	0,85237
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	732,64	485,61	-14,85	68,97	0,99020
	Q 3R6 ⁽⁵⁾	681,98	472,61	-65,51	334,82	0,76059

(1) Vazão observada

(2) Vazão resultante do modelo sem estimador de estado

(3) Vazão resultante do modelo com estimador de estado

(4) Vazão resultante dos estados atualizados (valor "a posteriori" da vazão)

(5) Vazão da versão 3R6 sem estimador de estado

TABELA 33 – ESTATÍSTICAS DE DESEMPENHO DA VERSÃO 3R6 – TEREZA CRISTINA.

		Vazão (m ³ /s)		Desvios (m ³ /s)		Coef. de Correlação
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
GERAL	Q Obs. ⁽¹⁾	89,74	128,23	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	88,12	115,52	-1,61	99,91	0,66853
	Q Prev. ⁽³⁾	90,04	121,09	0,31	77,13	0,81007
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	88,87	124,74	-0,87	25,27	0,98041
	Q 3R6 ⁽⁵⁾	91,09	120,98	1,35	98,59	0,68841
1° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	15,15	3,83	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	34,41	31,08	19,26	30,75	0,14674
	Q Prev. ⁽³⁾	21,53	18,28	6,38	17,68	0,25869
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	15,92	8,08	0,77	7,31	0,42664
	Q 3R6 ⁽⁵⁾	29,38	28,67	14,23	28,26	0,17221
2° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	31,10	5,68	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	51,58	42,90	20,47	42,70	0,10111
	Q Prev. ⁽³⁾	40,22	23,41	9,12	22,64	0,25450
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	31,54	8,46	0,44	6,58	0,62998
	Q 3R6 ⁽⁵⁾	49,74	42,25	18,64	41,80	0,14567
3° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	63,36	14,87	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	77,17	65,91	13,82	65,15	0,16333
	Q Prev. ⁽³⁾	74,82	46,39	11,47	43,42	0,35362
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	63,84	22,25	0,48	16,52	0,67002
	Q 3R6 ⁽⁵⁾	81,90	64,46	18,54	63,55	0,17622
4° QUARTIL	Q Obs. ⁽¹⁾	246,07	175,77	-----	-----	-----
	Q Sim. ⁽²⁾	186,98	178,04	-59,08	167,55	0,55155
	Q Prev. ⁽³⁾	220,59	175,34	-25,47	141,20	0,67656
	Q Ajust. ⁽⁴⁾	240,97	169,69	-5,10	46,22	0,96481
	Q 3R6 ⁽⁵⁾	200,62	183,71	-45,45	170,19	0,55249

(1) Vazão observada

(2) Vazão resultante do modelo sem estimador de estado

(3) Vazão resultante do modelo com estimador de estado

(4) Vazão resultante dos estados atualizados (valor "a posteriori" da vazão)

(5) Vazão da versão 3R6 sem estimador de estado

13 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Pelos trabalhos desenvolvidos nesta dissertação é possível concluir:

- a) o estimador de estado estudado tem como características teóricas positivas:
 - atua em todas as variáveis de estados do sistema, respeitando, no entanto, as relações estabelecidas pelo modelo chuva-vazão-propagação;
 - leva em conta, de maneira explícita, variabilidades e incertezas de todos os componentes do problema: dados, modelo e variáveis de estados;
- b) o estimador apresentou bons resultados para as sub-bacias e períodos em que foi aplicado:
 - melhorou o desempenho do sistema em previsão, tanto para os casos em que a calibração obteve bons resultados quanto para os casos em que a qualidade dos dados disponíveis impossibilitou uma boa calibração;
 - apresentou desempenho equivalente para os períodos de calibração e verificação;
 - para a previsão com horizonte de um dia, apresentou comportamento robusto, pois:
 - . obteve bom desempenho na atualização de estados, pois as vazões provenientes dos estados atualizados aproximaram bem as vazões observadas;
 - . gerou estados atualizados consistentes, pois as vazões geradas a partir destes estados apresentaram comportamento equivalente ao da vazão observada;

- . não degradou os resultados obtidos pela simulação, não sendo constatado nenhum período onde o resultado com o estimador de estado apresentasse resultado pior que o da simulação;
- c) o modelo hidrológico chuva-vazão-propagação 3R demonstrou ser um modelo de relativamente fácil utilização e calibração. A versão atual do modelo sofre de alguns problemas, parte deles decorrentes das adaptações realizadas para utilizá-lo para sub-bacias intermediárias, já que foi desenvolvido originalmente para bacias de cabeceira. No entanto, o mesmo apresenta potencial de melhora, como pode ser constatado pelo desempenho da nova versão desenvolvida neste trabalho, nas qual se realizaram apenas umas poucas alterações;
- d) embora as recomendações de carácter geral sobre calibração do modelo 3R tenham provado sua utilidade no decorrer do trabalho, as metodologias sugeridas para estimativa inicial de parâmetros para o modelo 3R não se mostraram efetivas;
- e) a calibração automática do modelo 3R não mostrou-se útil, em parte pelas função objetivo utilizada não representar a contento a multiplicidade de aspectos que são analisados pelo especialista quando da avaliação da qualidade de uma calibração;
- f) a classificação de modelos hidrológicos ainda apresenta espaço para desenvolvimento. Merece cuidado especial a definição mais criteriosa de modelo “caixa-preta” e modelo “baseado na física”;
- g) o uso do procedimento proposto de modelagem de relações por definição manual de função matemática demonstrou, nos trabalhos realizados, ser uma alternativa viável aos métodos usuais, de graficação manual ou ajuste matemático, por ter um grau razoável de flexibilidade, mas garantindo, ao mesmo tempo, uma representação matemática exata para a relação definida;

- h) não é incomum a disponibilidade de séries de dados de cota e vazão de um posto mas não das curvas de descarga que geraram a série de vazões. A tarefa de estabelecer as curvas de descarga válida para cada período de tempo a partir dos dados mostrou-se como não trivial.

Em função disto, recomenda-se:

- a) prosseguir com o estudo do estimador de estado, principalmente focando o seu desempenho em horizontes de previsão maiores de 1 dia. Sugere-se também estudar em detalhes de funcionamento do estimador, principalmente no que se refere à sensibilidade ao modelo, dados e parâmetros. Estes estudos teriam o duplo objetivo, de aumentar a confiança no uso do estimador e permitir a melhoria de sua calibração e uso;
- b) submeter o estimador de estado a um teste no Brasil, com sua aplicação em algum ambiente operacional de previsão;
- c) estudar, para a aplicação em ambiente operacional, mecanismos de introdução no sistema de informações qualitativas sobre dados e modelos, usualmente disponível com os operadores dos sistemas de previsão, como forma de melhorar o seu desempenho em casos específicos;
- d) estudar e implementar melhorias sugeridas no modelo 3R, em especial na propagação da fase bacia e na fase canal;
- e) posteriormente à melhoria do modelo 3R, desenvolver o estimador de estado associado à nova versão do modelo;
- f) estudar novas formas de estimativa inicial dos parâmetros do modelo 3R;
- g) desenvolver ferramenta que facilite a estimativa inicial de parâmetros para o modelo 3R, preferencialmente baseada em interface gráfica;

- h) estudar, para uso em calibração automática do modelo chuva-vazão-propagação, novas funções objetivo, que representem melhor a percepção do especialista do que constitui um bom resultado de calibração;
- i) incentivar a discussão de classificações e definições sobre modelos hidrológicos e estudo dos possíveis impactos das classificações e definições atuais nas áreas de aplicação e desenvolvimento;
- j) utilizar a técnica de definição manual de função matemática como solução de compromisso entre a definição puramente gráfica e a puramente matemática de relações;
- k) desenvolver procedimento e ferramenta para obtenção de curvas de descarga a partir de séries cotas e vazões disponíveis.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, T. et alli (2003). Análise de disponibilidade hídrica usando o modelo hidrológico ArcEGMO: estudo de caso Seebach, Alemanha. **Anais do XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**. São Paulo: ABRH. Formato: CD.

ANDERSON, E. (2002). Calibration of conceptual hydrologic models for use in river forecasting. **NWS Hydrologic Research Laboratory**. Consulta na internet em 20/12/2003. Disponível em: hydrology.nws.noaa.gov/oh/hrl/calb/calibration1102/main.htm.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2000a). **Série estudos e informações hidrológicas e energéticas – Água – Atlas hidrológico do Brasil**. Brasília: Aneel. Formato: CD.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2000b). **Série estudos e informações hidrológicas e energéticas – Água – Bacia do Prata**. Brasília: Aneel. Formato: CD.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2000c). **HIDROGEO - Sistema de informações georeferenciadas de energia e hidrologia – Bacia do rio Paraná**. Brasília: Aneel. Formato: CD.

BEVEN, K. J. (2001). **Rainfall-runoff models – The primer**. Midsomer Norton: John Willey & Sons.

BRAGA JR, B. P. F. (2002). Redefinindo prioridades no uso da água. **Gazeta Mercantil**, São Paulo: 05/02/2002.

BROOKS, K. N.; DAVIS, E. M. (1972). **Program description and user manual for SSARR model**. Portland: U.S. Army Engineer Division.

CARDOSO, A. da et alli (2002). Previsão estatística de vazão trimestral na bacia do rio Uruguai baseada em anomalias de TSM. **Anais do XII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**. Foz do Iguaçu: Sbmec. Formato: CD.

CARVALHO, M. A. de et alli. (2003). Sistema de suporte à decisão para alocação de água em projetos de irrigação. **Anais do XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**. São Paulo: ABRH. Formato: CD.

CHOW, V. T. Hydrology and its development. In: CHOW, V. T. (org.) et alli (1964). **Handbook of Applied Hydrology**. New York: Mcgraw-Hill.

COSTA, F. da S. et alli (2003). Modelos estocásticos de previsão de vazões mensais - PREVIVAZM. **Anais do XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**. São Paulo: ABRH. Formato: CD.

CUNHA, L. K. da; GETTER, A. K. (2003). Sistema integrado de previsão hidrológica e operação hidráulica em tempo real para o rio Pirai. **Anais do XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**. São Paulo: ABRH. Formato: CD.

DHID.T – DIVISÃO DE HIDROLOGIA DA ITAIPU BINACIONAL (1992). **Evaluación del previsor del Simpreva**. Relatório interno. Foz do Iguacu: Itaipu Binacional.

DNAEE - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (1985). **Boletim fluviométrico série F-6.03 – Bacias dos rios Ivaí, Piquiri e Paraná**. Brasília: DNAEE.

GAETE, P. E., A. (2002a). **Modelo hidrológico – hidrodinâmico aguas arriba de Itaipu – Informe preliminar**. Relatório de projeto. Foz do Iguacu: Itaipu Binacional.

GAETE, P. E., A. (2002b). **Modelo hidrológico – hidrodinâmico aguas abajo de Itaipu - modelo Sacramento en los ríos Iguacú, Monday y en la cuenca incremental del río Paraná – Informe preliminar**. Relatório de projeto. Foz do Iguacu: Itaipu Binacional.

GAETE, P. E., A. (2002c). **Implantación del modelo hidrológico – hidrodinâmico de Itaipu – Informe final**. Relatório de projeto, referência interna 2666.50.15405.E.R0. Foz do Iguacu: Itaipu Binacional..

GALVÍNCIO, J. D. (2002). Uso de modelos autoregressivos e de médias móveis para geração de vazões médias mensais na bacia hidrográfica do alto São Francisco. **Anais do XII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**. Foz do Iguacu: Sbmec. Formato: CD.

GAN, T. Y.; BURGESS, S. J. (1990). An assessment of a conceptual rainfall-runoff model's ability to represent the dynamics of small hypothetical catchments. 1. Models, model properties in experimental design. **Water Resources Research** (xerox).

GELB, A. (org.) (1974). **Applied optimal estimation**. Cambridge: MIT Press.

GEORGAKAKOS, K. P.; BRAS, R. L. (1980). **A statistical linearization approach to real time nonlinear flood routing**. Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics Report no. 256. Cambridge: MIT.

GEORGAKAKOS, K. P. et alii (1988). **On improved operational hydrologic forecasting of streamflow**. IIHR Report no. 525. Iowa City: University of Iowa.

GEORGAKAKOS, K. P.; SMITH, G. F. (1990). On improved operational hydrologic forecasting: results from WMO Real-Time Forecasting Experiment. **Journal of Hydrology**, 114, 17-45.

GUETTER, A. K. et alii (1996). Hydrologic applications of satellite data: 2. Flow simulation and soil water estimates. **Journal of Geophysical Research**, Vol. 101, no D21, 26.527-26.538.

GUETTER, A. K.; GEORGAKAKOS, K. P. (1997). Uncertainty in the prediction of streamflow by real-time prediction models using satellite rainfall estimates. **Proceedings** of the 13th CONFERENCE ON HYDROLOGY. Long Beach: American Meteorological Society.

GUETTER, A. K. (1999). Sistema de previsão hidrológica para suporte à operação dos reservatórios da bacia do Rio Iguazu. **Anais** do XV SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Foz do Iguazu: CIGRE-Brasil.

GUETTER, A. K. (2005). **Comunicação pessoal**.

GUILHON, L. G. F.; CARPIO, L. G. T. (2003). Modelo heurístico para previsão de vazões naturais médias semanais em usinas hidrelétricas usando chuva equivalente. **Anais** do XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. São Paulo: ABRH. Formato: CD.

HP - HYDROLOGY PROJECT (2002). **How to do hydrological data validation using hydrological models**. Nova Delhi: Universidade de Delft (apostila).

IAPAR - INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ (1994). **Cartas climáticas do Estado do Paraná**. Londrina: IAPAR.

JACCON, G.; CUDO, K. J. (1989). **Curva-chave – Análise e traçado**. Brasília: DNAEE.

KOREN, V. I. et alli (2000). Use of soil property data in the derivation of conceptual rainfall-runoff model parameters. **Proceedings** of the 15th CONFERENCE ON HYDROLOGY. Long Beach: AMS.

KRAUSKOPF NETO, R. (2004). **Descrição e orientações de calibração dos modelos hidrológicos chuva - vazão Sacramento e Sacramento Modificado**. Relatório técnico. Foz do Iguazu: Itaipu Binacional.

LARSON, L. W. (2003). Introduction to the National Weather Service River Forecast System (NWSRFS). **Hydrologic Forecasting Course**. Kansas City: NOAA/WMO. Consulta realizada na Internet, em data de 23/12/2003. Informação disponível em: www.nws.noaa.gov/iao/site/InternationalHydrologyCourseCD2/NWSRFSLarson/NWSRFS.html.

LAURENTIS, D. G.; TUCCI, C. E. M. (2003). Modelo de previsão de vazões em tempo real. **Anais** do XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. São Paulo: ABRH. Formato: CD.

MAIA, A. G.; VILLELA, S. M. (2003). Aplicação do modelo de operação de reservatórios OperRes à bacia do rio Paraguaçu na Bahia. **Anais** do XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. São Paulo: ABRH. Formato: CD.

MINE, M. R. M. (1998). **Método determinístico para minimizar o conflito entre gerar energia e controlar cheias**. Tese de doutorado, UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre (xerox).

MÜLLER, I. I.; KRÜGER, C. M.; KAVISKI, E. (1997). **Projeto HG 94 – Análise das séries temporais contribuintes à Usina Hidrelétrica de Itaipu – Sumário Executivo**. Curitiba: CEHPAR.

MÜLLER, M.; FILL, H. D. (2003). Redes neurais aplicadas na propagação de vazões. **Anais do XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**. São Paulo: ABRH. Formato: CD.

NWS – NATIONAL WEATHER SERVICE (s.d.a). NWSRFS overview. **NWS RIVER FORECAST SYSTEM (NWSRFS) INTERNATIONAL USERS WORKSHOP** (2003). Kansas City: NOAA/WMO. Consulta na Internet realizada em 21/12/2003. Disponível em: www.nws.noaa.gov/iao/site/pdf/Manual.pdf.

NWS – NATIONAL WEATHER SERVICE (s.d.b). **NWSRFS user manual documentation – Release number 69**. Consulta na Internet em 21/12/2003. Disponível em: hydrology.nws.noaa.gov/oh/hrl/nwsrfs/users_manual/htm/xrfsdochtm.htm.

O'CONNEL, P. E. (org) et alli (1980). **Proceedings of the INTERNATIONAL WORKSHOP ON REAL-TIME HYDROLOGICAL FORECASTING AND CONTROL**. Wallingford: Institute of Hydrology.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA (2000). **Procedimentos de rede – Módulo 9 – Hidrologia Operacional**. Consulta na internet em 10/12/2003. Disponível em: www.ons.org.br/ons/procedimentos/index.htm.

OSU – OREGON STATE UNIVERSITY (2003). **CH4990 – Computer programming for engineers – Internet Course**. Consulta na internet em 10/12/2003. Disponível em: oregonstate.edu/instruct/ch490/lessons/lesson10.htm.

PECK, E. L. (1976). **Catchment modeling and initial parameter estimation for the National Weather Service River Forecast Systems**. Washington, D.C.: NOAA.

PINTO, N. L. de S. Introdução. In: PINTO, N. L. de S. et alli (1976). **Hidrologia básica**. São Paulo: Edgard Blücher.

PORTO, R. L. L.; AZEVEDO, L. G. T. Sistemas de suporte à decisão aplicados a problemas de recursos hídricos. In: PORTO, R. L. L. (org.) et alli (1997). **Técnicas quantitativas para gerenciamento de Recursos Hídricos**. Porto Alegre: ABRH-UFR.

PRESS, W. H. et alli (1986). **Numerical recipes in Fortran 77: the art of scientific computing**. Cambridge: Cambridge University Press.

RAMOS, F. Hidrologia. In: RAMOS, F. et alli (1989). **Engenharia Hidrológica**. Rio de Janeiro: ABRH-UFRJ.

RAUDKIVI, A. J. (1979). **Hydrology – An advanced introduction to hydrological processes and modeling**. Londres: Pergamon Press.

ROCHA, E. J. P. da et alli (2002). Aplicação de modelo estatístico de previsão hidrométrica na bacia do rio Capim em Badajós. **Anais do XII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**. Foz do Iguaçu: Sbmnet. Formato: CD.

SANTOS, C. C.; PEREIRA FILHO, A. J. (2000). Modelagem hidrológica utilizando redes neurais artificiais em bacias urbanas. **Anais do XI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**. Rio de Janeiro: Sbmnet. Formato: CD.

SANTOS, I. dos et alli (2001). **Hidrometria Aplicada**. Curitiba: Lactec.

SCHAAKE, J. et alli (2000). Criteria to select basins for hydrologic model development and testing. **Proceedings of the 15th CONFERENCE ON HYDROLOGY**. Long Beach: AMS.

SENTELHAS, P. C. et alli (1999). **Balances hídricos climatológicos do Brasil**. São Paulo: Esalg/USP. Formato: CD.

SILVEIRA, A. L. L. da. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, Carlos Eduardo Morelli (org.) et alli (1993). **Hidrologia**. São Paulo: ABRH-USP.

SMITH, M. B. et alli (2000). Evaluation of the advantages of the continuous SAC-SMA model over an event API model. **Proceedings of the 15th CONFERENCE ON HYDROLOGY**. Long Beach: AMS.

SOUZA FILHO, F. de A. de et alli (2003). Modelo de previsão de vazões sazonais e interanuais. **Anais do XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**. São Paulo: ABRH. Formato: CD.

SPERFSLAGE, J. E.; GEORGAKAKOS, K. P. (1996). **Implementation and testing of the HSF operation as part of the National Weather Service River Forecast System (NWSRFS)**. HRC Technical Report no 1. San Diego: HRC.

TGNI – CONSÓRCIO THEMAG, GCAP, NTS e INFORMÁTICA (1988). **Sistema de Control Hidrometeorológico – Caracterización fisiográfica del área de estudio**. Relatório de projeto, referência interna 2013.50.7038.E.R0A. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional.

TGNI – CONSÓRCIO THEMAG, GCAP, NTS e INFORMÁTICA (1990). **Red pluviométrica mínima operacional**. Relatório de projeto. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional.

TGNI – CONSÓRCIO THEMAG, GCAP, NTS e INFORMÁTICA (1991). **Sistema de Control Hidrometeorológico – Modelo de transformación precipitación a caudal a nivel horario**. Relatório de projeto, referência interna 2013.50.7046.E.R0A. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional.

THIMOTTI, T. C. M. (2003). **Concepção e avaliação de um sistema de previsão de vazões de longo termo**. Dissertação de mestrado, UFMG, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio-Ambiente e Recursos Hídricos, Belo Horizonte (xerox).

TUCCI, C. E. M. (1998). **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: ABRH-UFRGS.

WELCH, G.; BISHOP, G. (2002). An introduction to Kalman filter. **University of North Carolina at Chapel Hill**. Consulta na internet em 22/11/2003. Disponível em: www.cs.unc.edu/~welch/kalman/kalman_filter/kalman.html.

WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (1975). **Intercomparison of conceptual models used in operational hydrological forecasting**. Operational Hydrology – Report n° 7. Genebra: WMO.

WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (1992). **Simulated real-time intercomparison of hydrological models**. Operational Hydrology – Report n° 38. Genebra: WMO.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)