

ANDERSON NASCIMENTO DE ARAUJO

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA COM O USO DE CHUVA
ESTIMADA POR SATÉLITE**

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

Orientador: Alexandre Kolodynskie Guetter

**CURITIBA
2006**

Aos meus pais Graça e Barnabel,
e a minha namorada Rafaela,
dedico.

AGRADECIMENTOS

Expresso meus sinceros agradecimentos pela contribuição direta ou indiretamente na concretização desse trabalho:

Aos meus pais Barnabel Marcos de Araujo e Maria das Graças do Nascimento de Araujo por todo incentivo depositado na minha vida acadêmica, e aos meus familiares: irmãos, tios e primos;

À minha namorada Rafaela Suzan Meller, pela compreensão, carinho, amor, companheirismo e confiança que foram fundamentais nessa fase da minha vida;

Ao meu orientador Alexandre Kolodynskie Guetter pelos conselhos, sugestões, esclarecimentos e orientação, não somente no desenvolvimento desta dissertação, mas também durante a minha vida profissional;

Aos professores Augusto José Pereira Filho, Jorge da Silva Centeno e Miriam Rita Moro Mine pela participação na banca de avaliação desta dissertação;

Aos professores do mestrado, em especial ao Prof^o Eloy Kaviski e Prof^o Heinz Dieter Fill, pelas valiosas dicas fornecidas para o desenvolvimento deste trabalho;

Ao pesquisador Robert Joyce da *NOAA* pelas dicas e esclarecimentos com relação ao *CMORPH*;

Aos amigos e colegas do mestrado, por terem compartilhado comigo momentos inesquecíveis de aprendizado, companheirismo e descontração, em especial: Adriana Malinowski, André Nagalli, Breno Marques, Carol Caron, César Jhojy, Dalton Brasil, Diego Baptista, Fábio Kazu, Fernando Weigert, Henrique Luvison, Iuri Nahon, Rafael Tozzi, Ricardo Krauskopf, Samuel Barboza e Thais Ribas.

Ao Instituto Tecnológico SIMEPAR por toda a sua estrutura que foi de extrema importância para o desenvolvimento de todas as etapas desse trabalho, e pelo

fornecimento da bolsa;

Aos colegas de trabalho do SIMEPAR pela ajuda em pontos específicos deste trabalho, em especial: Eduardo Areco, Eduardo de Paula, Fábio Sato, Flávio Deppe, Graziella Buba, Izabeli Langner, Ivonei Lima, José Eduardo Gonçalves, Rafael Cabral e Reinaldo Kneib;

Ao Departamento de Hidráulica e Saneamento, e a Coordenação do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da UFPR pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho;

A Deus por me guiar e me dar forças para superar as dificuldades encontradas.

“Não basta ensinar ao homem uma especialidade, porque se tornará assim uma máquina utilizável e não uma personalidade. É necessário que se adquira um sentimento, senso prático daquilo que vale a pena ser empreendido, daquilo que é belo, do que é moralmente correto.”

Albert Einstein

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE SIGLAS	xviii
LISTA DE SÍMBOLOS	xxii
RESUMO	xxv
ABSTRACT	xxvii
INTRODUÇÃO	2
1 REVISÃO DA LITERATURA	4
1.1 ESTIMATIVA DE CHUVA POR SATÉLITE.....	4
1.1.1 <i>Satélites</i>	5
1.1.2 <i>Técnicas para estimativa de chuva</i>	10
1.1.2.1 Visível e Infravermelho.....	11
1.1.2.2 Microondas	13
1.1.2.3 Múltiplas fontes	16
1.1.3 <i>Algoritmos de estimativa de chuva por satélite</i>	17
1.1.3.1 Hidroestimador	20
1.1.3.2 Produtos <i>TRMM</i>	21
1.1.3.3 <i>CMORPH</i>	24
1.2 USO DE CHUVA ESTIMADA POR SATÉLITE NA MODELAGEM HIDROLÓGICA	31
1.3 INCERTEZAS NA ESTIMATIVA DA CHUVA	33
1.3.1 <i>Incertezas provenientes da chuva medida por pluviômetros</i>	34
1.3.2 <i>Incertezas provenientes da chuva estimada por satélites</i>	34
1.3.3 <i>Impacto da incerteza da chuva na modelagem hidrológica</i>	36
2 METODOLOGIA	38
2.1 ESTATÍSTICAS PARA VALIDAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE CHUVA ..	38
2.1.1 <i>Estatísticas convencionais</i>	38

2.1.2	<i>Estatísticas recomendadas pelo IPWG</i>	38
2.1.2.1	Estatísticas de ocorrência	38
2.1.2.1.1	<i>BIAS</i> da frequência.....	40
2.1.2.1.2	Probabilidade de detecção.....	40
2.1.2.1.3	Probabilidade de falso alerta.....	40
2.1.2.1.4	Discriminante de <i>Hanssen & Kuipers</i>	41
2.1.2.2	Estatísticas quantitativas.....	41
2.1.2.2.1	<i>BIAS</i>	41
2.1.2.2.2	Erro médio.....	42
2.1.2.2.3	Erro médio quadrático.....	42
2.1.2.2.4	Coeficiente de correlação.....	42
2.2	ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA INCERTEZA DA CHUVA ESTIMADA POR SATÉLITES	43
2.2.1	<i>Metodologia</i>	43
2.2.1.1	<i>BIAS</i>	45
2.2.1.2	Desvio padrão.....	47
2.2.1.3	Probabilidade de detecção e falso alerta	49
2.3	ANÁLISE DA INCERTEZA DA CHUVA NA MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	51
2.3.1	<i>Modelo Hidrológico</i>	51
2.3.1.1	Calibração do modelo hidrológico	55
2.3.2	<i>Estimador de estado</i>	55
2.3.2.1	Equações do estimador de estado.....	58
2.3.2.2	Interpretação do estimador de estado	60
2.3.2.3	Calibração do estimador de estado.....	61
2.3.3	<i>Etapas da calibração e simulação</i>	62
3	ÁREA DE ESTUDO	63
3.1	HIDROGRAFIA.....	64
3.2	CLIMA.....	65
3.3	USO DO SOLO.....	66

4	DADOS HIDROLÓGICOS	68
4.1	CHUVA MEDIDA POR PLUVIÔMETROS	68
4.1.1	<i>Descrição dos dados.....</i>	68
4.1.2	<i>Pré-processamento dos dados.....</i>	70
4.1.3	<i>Chuva média na bacia.....</i>	71
4.1.3.1	Inverso do quadrado da distância	71
4.1.3.2	Chuva média ponderada pela área.....	72
4.2	CHUVA ESTIMADA POR SATÉLITE.....	73
4.2.1	<i>Descrição dos dados.....</i>	73
4.2.1.1	Definição da malha sobre a área de estudo	74
4.2.2	<i>Pré-processamento dos dados.....</i>	76
4.2.3	<i>Chuva média na bacia.....</i>	77
4.3	VAZÃO	77
4.3.1	<i>Descrição dos dados.....</i>	77
4.3.2	<i>Pré-processamento dos dados.....</i>	78
4.4	EVAPOTRANSPIRAÇÃO	78
4.4.1	<i>Descrição dos dados.....</i>	78
5	RESULTADOS	79
5.1	ESTATÍSTICAS PARA VALIDAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE CHUVA	79
5.1.1	<i>Estatísticas das séries diárias</i>	79
5.1.1.1	Estatísticas convencionais	79
5.1.1.2	Estatísticas recomendadas pelo <i>IPWG</i>	89
5.1.1.2.1	Estatísticas de ocorrência.....	89
5.1.1.2.2	Estatísticas quantitativas	91
5.1.2	<i>Estatísticas das séries agregadas.....</i>	92
5.1.2.1	Mensal	92
5.1.2.2	Por estação.....	94
5.1.2.3	Anual	96
5.2	ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA INCERTEZA DA CHUVA ESTIMADA POR SATÉLITES	97

5.3 ANÁLISE DA INCERTEZA DA CHUVA NA MODELAGEM	
HIDROLÓGICA.....	100
5.3.1 <i>Sub-bacia de Porto Amazonas</i>	103
5.3.1.1 Modelagem com os dados de pluviômetros	106
5.3.1.2 Modelagem com os dados de satélite.....	106
5.3.2 <i>Bacia do Iguaçu em União da Vitória</i>	109
5.3.2.1 Modelagem com os dados de pluviômetros	112
5.3.2.2 Modelagem com os dados de satélite.....	113
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	116
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119
APÊNDICE 1 – CAMPOS DE CHUVA 03/06/2003 A 10/06/2003 - ÚMIDO	126
APÊNDICE 2 – CAMPOS DE CHUVA 15/03/2003 A 22/03/2003 - NORMAL .	128
APÊNDICE 3 – CAMPOS DE CHUVA 13/08/2004 A 20/08/2004 - SECO	130
APÊNDICE 4 – CALIBRAÇÃO DO ESTIMADOR DE ESTADO.....	132

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 – CARACTERÍSTICAS DOS PRINCIPAIS SATÉLITES USADOS PARA ESTIMATIVA DE CHUVA	8
TABELA 1.2 – NÚMERO DE REVISITAS EM SÃO PAULO/SP DOS SENSORES <i>TRMM</i>	10
TABELA 1.3 – JANELAS ATMOSFÉRICAS DO VISÍVEL AO MICROONDAS .	10
TABELA 1.4 – ALGORITMOS DE ESTIMATIVA DE CHUVA A PARTIR DE SENSORES INFRAVERMELHOS DO INVENTÁRIO <i>IPWG</i>	18
TABELA 1.5 – ALGORITMOS DE ESTIMATIVA DE CHUVA A PARTIR DE SENSORES MICROONDAS DO INVENTÁRIO <i>IPWG</i>	18
TABELA 1.6 – ALGORITMOS DE ESTIMATIVA DE CHUVA A PARTIR DE SENSORES MICROONDAS E INFRAVERMELHOS DO INVENTÁRIO <i>IPWG</i>	18
TABELA 1.7 – ALGORITMOS DE ESTIMATIVA DE CHUVA A PARTIR DE MÚLTIPLAS FONTES DO INVENTÁRIO <i>IPWG</i>	19
TABELA 1.8 – PRODUTOS DE ESTIMATIVA DE CHUVA POR SATÉLITE DO INVENTÁRIO <i>IPWG</i>	20
TABELA 1.9 – DESCRIÇÃO DOS PRODUTOS 3A25, 3A46, 3B42 E 3B43 DE ESTIMATIVA DE CHUVA POR SATÉLITE <i>TRMM</i>	23
TABELA 1.10 –RESULTADOS DO ESTUDO DE NICHOLSON <i>ET AL.</i> (2003)....	24
TABELA 1.11 –SATÉLITES POLARES USADOS NO <i>CMORPH</i>	25
TABELA 1.12 –SATÉLITES GEOESTACIONÁRIOS USADOS NO <i>CMORPH</i>	25
TABELA 1.13 –CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO <i>CMORPH</i>	25
TABELA 2.1 – TABELA DE CONTINGÊNCIA USADA PARA O CÁLCULO DAS ESTATÍSTICAS DE OCORRÊNCIA	39
TABELA 2.2 – NOTAÇÃO DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES DO MODELO HIDROLÓGICO (FASE BACIA)	53
TABELA 2.3 – PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES DO MODELO HIDROLÓGICO (FASE BACIA)	54

TABELA 2.4 – PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES DO MODELO HIDROLÓGICO (FASE CANAL).....	54
TABELA 2.5 – NOTAÇÃO DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES DO MODELO HIDROLÓGICO (FASE CANAL).....	55
TABELA 3.1 – CARACTERÍSTICAS DAS SUB-BACIAS DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA.....	65
TABELA 4.1 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA REDE DE PLUVIÔMETROS DO SIMEPAR.....	68
TABELA 4.2 – LISTA DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS DO SIMEPAR.....	69
TABELA 4.3 – CARACTERÍSTICAS DA ESTIMATIVA DE CHUVA <i>CMORPH</i> NA BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA.....	73
TABELA 4.4 – IDENTIFICAÇÃO DAS ESTAÇÕES DA FIGURA 4.3.....	75
TABELA 4.5 – QUANTIDADE DE PONTOS DE MONITORAMENTO DE CHUVA POR SATÉLITE PARA AS DIVERSAS SUB-BACIAS DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA.....	76
TABELA 4.6 – LISTA DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DO SIMEPAR.....	77
TABELA 5.1 – ESTATÍSTICAS DE CHUVA POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO: CHUVA MÉDIA, MÁXIMA E DESVIO PADRÃO.....	86
TABELA 5.2 – ESTATÍSTICAS DE CHUVA POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO: NÚMERO DE DIAS DE CHUVA, NÚMERO DE DIAS SEM CHUVA E CHUVA ACUMULADA.....	87
TABELA 5.3 – TABELA DE CONTIGÊNCIA: RESULTADOS PARA A BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA E SUB-BACIAS.....	90
TABELA 5.4 – ESTATÍSTICAS DE OCORRÊNCIA DE CHUVA: $BIAS_F$, PROBABILIDADE DE DETECÇÃO E FALSO ALERTA E DISCRIMINANTE DE HANSEN & KUIPERS.....	91
TABELA 5.5 – ESTATÍSTICAS QUANTITATIVAS DE CHUVA: BIAS, ERRO MÉDIO, MÉDIO QUADRÁTICO E COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO.....	92
TABELA 5.6 – ESTATÍSTICAS DE CHUVA MÉDIA MENSAL PARA A BACIA	

DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA.....	94
TABELA 5.7 – ESTATÍSTICAS DE CHUVA MÉDIA POR ESTAÇÃO DO ANO PARA A SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS.....	95
TABELA 5.8 – ESTATÍSTICAS DE CHUVA MÉDIA POR ESTAÇÃO DO ANO PARA A BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA	96
TABELA 5.9 – ESTATÍSTICAS DE CHUVA MÉDIA ANUAL PARA A SUB- BACIA DE PORTO AMAZONAS	96
TABELA 5.10 –ESTATÍSTICAS DE CHUVA MÉDIA ANUAL PARA A BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA.....	96
TABELA 5.11 –PARÂMETROS DO MODELO HIDROLÓGICO 3R CALIBRADOS PARA A SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS E PARA A BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA	101
TABELA 5.12 –PARÂMETROS DO ESTIMADOR DE ESTADO CALIBRADOS PARA A SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS E PARA A BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA	101
TABELA 5.13 –ESTATÍSTICAS DA MODELAGEM DA SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS: MÉDIA, DESVIO PADRÃO, CORRELAÇÃO, MÉDIA RESIDUAL E DESVIO PADRÃO RESIDUAL.....	104
TABELA 5.14 –ESTATÍSTICAS DA MODELAGEM DA BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA: MÉDIA, DESVIO PADRÃO, CORRELAÇÃO, MÉDIA RESIDUAL E DESVIO PADRÃO RESIDUAL	110

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – PERCENTUAL DE TRANSMISSÃO DE ALGUMAS FAIXAS DE COMPRIMENTO DE ONDA NA ATMOSFERA	15
FIGURA 1.2 – EXEMPLO DO PRODUTO HIDROESTIMADOR DE ESTIMATIVA DE CHUVA POR SATÉLITE	21
FIGURA 1.3 – EXEMPLO DO PRODUTO 3B42 DE ESTIMATIVA DE CHUVA POR SATÉLITE DA <i>TRMM</i>	22
FIGURA 1.4 – EXEMPLO DO PRODUTO 3B43 DE ESTIMATIVA DE CHUVA POR SATÉLITE DA <i>TRMM</i>	22
FIGURA 1.5 – EXEMPLO DO PRODUTO <i>CMORPH</i> DE ESTIMATIVA DE CHUVA POR SATÉLITE	26
FIGURA 1.6 – VARREDURAS TÍPICAS DOS SENSORES MICROONDAS USADOS NO PRODUTO <i>CMORPH</i>	26
FIGURA 1.7 – COBERTURA ESPACIAL E FREQUÊNCIA DE OBTENÇÃO DE IMAGENS DOS SATÉLITES GEOESTACIONÁRIOS UTILIZADOS NO PRODUTO <i>CMORPH</i>	27
FIGURA 1.8 – FLUXOGRAMA EXEMPLIFICANDO A GERAÇÃO DO PRODUTO <i>CMORPH</i>	28
FIGURA 1.9 – PROCESSOS DE PROPAGAÇÃO E “ <i>MORPHING</i> ” USADOS PARA A GERAÇÃO DO PRODUTO <i>CMORPH</i>	30
FIGURA 1.10 – REPRESENTAÇÃO COMPARATIVA DA MEDIÇÃO DE CHUVA POR PLUVIÔMETRO E SATÉLITE	33
FIGURA 2.1 – ESTRUTURAÇÃO DOS COMPONENTES DAS FASES BACIA E CANAL DO MODELO 3R.....	52
FIGURA 3.1 – ÁREA DE ESTUDO: BACIA DO RIO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA.....	63
FIGURA 3.2 – TOPOLOGIA DAS SUB-BACIAS PERTENCENTES À BACIA DO RIO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA	64
FIGURA 3.3 – IMAGEM DE SATÉLITE DA BACIA DO RIO IGUAÇU EM	

UNIÃO DA VITÓRIA	67
FIGURA 4.1 – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES HIDROLÓGICAS DO SIMEPAR NO ESTADO DO PARANÁ	69
FIGURA 4.2 – DIMENSÕES E FORMATO DA MATRIZ GLOBAL DE CHUVA ESTIMADA POR SATÉLITE <i>CMORPH</i>	74
FIGURA 4.3 – MALHA DE DISTRIBUIÇÃO DA CHUVA ESTIMADA POR SATÉLITE <i>CMORPH</i> NA BACIA DO RIO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA	75
FIGURA 5.1 – CHUVA MÉDIA DIÁRIA NA SUB-BACIA DE RIO NEGRO POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO	80
FIGURA 5.2 – CHUVA MÉDIA DIÁRIA NA SUB-BACIA DE DIVISA POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO	80
FIGURA 5.3 – CHUVA MÉDIA DIÁRIA NA SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO	81
FIGURA 5.4 – CHUVA MÉDIA DIÁRIA NA SUB-BACIA DE SÃO BENTO POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO	81
FIGURA 5.5 – CHUVA MÉDIA DIÁRIA NA SUB-BACIA DE PONTILHÃO POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO	82
FIGURA 5.6 – CHUVA MÉDIA DIÁRIA NA SUB-BACIA DE SÃO MATEUS DO SUL POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO	82
FIGURA 5.7 – CHUVA MÉDIA DIÁRIA NA SUB-BACIA DE SANTA CRUZ DO TIMBÓ POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO	83
FIGURA 5.8 – CHUVA MÉDIA DIÁRIA NA SUB-BACIA DE UNIÃO DA VITÓRIA POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO	83
FIGURA 5.9 – CHUVA MÉDIA DIÁRIA NA SUB-BACIA DE FLUVIÓPOLIS POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO	84
FIGURA 5.10 – CHUVA MÉDIA DIÁRIA NA BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO	84
FIGURA 5.11 – HISTOGRAMAS DE CHUVA MÉDIA NA BACIA ESTIMADA POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO	85

FIGURA 5.12 – CAMPOS DE CHUVA MÉDIA POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO NA BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA NO DIA 14/02/2003	87
FIGURA 5.13 – CAMPOS DE CHUVA MÉDIA POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO NA BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA NO DIA 15/02/2003	88
FIGURA 5.14 – CHUVA MÉDIA DIÁRIA POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO NOS ANOS DE 2003 E 2004 PARA AS SUB-BACIAS DE RIO NEGRO E DIVISA	88
FIGURA 5.15 – CHUVA MÉDIA DIÁRIA POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO NOS ANOS DE 2003 E 2004 PARA A SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS E BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA	89
FIGURA 5.16 – CHUVA MÉDIA MENSAL POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO PARA A BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA E SUB- BACIAS	93
FIGURA 5.17 – CHUVA MÉDIA POR ESTAÇÃO: SATÉLITE E PLUVIÔMETRO PARA A BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA E SUAS SUB-BACIAS	95
FIGURA 5.18 – RESULTADOS DA ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA INCERTEZA DA CHUVA ESTIMADA POR SATÉLITE: PROBABILIDADES DE DETECÇÃO E FALSO ALERTA.....	97
FIGURA 5.19 – VERIFICAÇÃO DA METODOLOGIA DA ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA INCERTEZA DA CHUVA ESTIMADA POR SATÉLITE NA BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA.....	99
FIGURA 5.20 – CALIBRAÇÃO DO ESTIMADOR DE ESTADO COM OS DADOS DE PLUVIÔMETRO PARA A SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS: RESÍDUO E DESVIO PADRÃO NORMALIZADOS	102
FIGURA 5.21 – CALIBRAÇÃO DO ESTIMADOR DE ESTADO COM OS DADOS	

DE PLUVIÔMETRO PARA A SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS: CORRELAÇÃO E CORRELAÇÃO LAG 1 NORMALIZADAS	103
FIGURA 5.22 – COMPARAÇÕES DAS VAZÕES OBSERVADAS E SIMULADAS NA SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS NO PERÍODO DE 20/07/2003 A 28/10/2003.....	105
FIGURA 5.23 – COMPARAÇÕES DAS VAZÕES OBSERVADAS E SIMULADAS NA SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS NO PERÍODO DE 12/11/2003 A 22/02/2004.....	105
FIGURA 5.24 – SIMULAÇÃO DA SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS OBTIDA PELO MODELO 3R ALIMENTADO COM OS DADOS DE PLUVIÔMETRO	106
FIGURA 5.25 – SIMULAÇÃO DA SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS OBTIDA PELO MODELO 3R ALIMENTADO COM OS DADOS DE SATÉLITE	107
FIGURA 5.26 – PARÂMETROS X_1 , X_2 , X_3 E X_4 DE ARMAZENAMENTO DO MODELO 3R PARA A SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS – DADOS DE SATÉLITE – SEM ESTIMADOR DE ESTADO	108
FIGURA 5.27 – PARÂMETROS X_1 , X_2 , X_3 E X_4 DE ARMAZENAMENTO DO MODELO 3R PARA A SUB-BACIA PORTO AMAZONAS – DADOS DE SATÉLITE – COM ESTIMADOR DE ESTADO.....	109
FIGURA 5.28 – COMPARAÇÕES DAS VAZÕES OBSERVADAS E SIMULADAS NA BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA - 09/01/2003 A 20/03/2003	111
FIGURA 5.29 – COMPARAÇÕES DAS VAZÕES OBSERVADAS E SIMULADAS NA BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA - 29/09/2004 A 30/12/2004.....	111
FIGURA 5.30 – SIMULAÇÃO DA BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA OBTIDA PELO MODELO 3R ALIMENTADO COM OS DADOS DE PLUVIÔMETRO	112

FIGURA 5.31 – SIMULAÇÃO DA BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA OBTIDA PELO MODELO 3R ALIMENTADO COM OS DADOS DE SATÉLITE	113
FIGURA 5.32 – PARÂMETROS X_1 , X_2 , X_3 E X_4 DE ARMAZENAMENTO DO MODELO 3R PARA A BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA – DADOS DE SATÉLITE – SEM ESTIMADOR DE ESTADO	114
FIGURA 5.33 – PARÂMETROS X_1 , X_2 , X_3 E X_4 DE ARMAZENAMENTO DO MODELO 3R PARA A BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA – DADOS DE SATÉLITE – COM ESTIMADOR DE ESTADO	115

LISTA DE SIGLAS

ABR	Abril
AGO	Agosto
AGPI	<i>Adjusted GPI</i>
AIP	<i>Algorithm Intercomparison Program</i>
AMJ	Agência Meteorológica Japonesa
AMSR	<i>Advanced Microwave Scanning Radiometer</i>
AMSU	<i>Advanced Microwave Sounding Unit</i>
ANA	Agência Nacional de Águas
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
CGMS	<i>Coordination Group for Meteorological Satellites</i>
CMA	<i>China Meteorological Agency</i>
CMB	Chuva Média na Bacia
CMORPH	<i>Climate Prediction Center Morphing Method</i>
COPEL	Companhia Paranaense de Energia Elétrica
CPC	<i>Climate Prediction Center</i>
CPTEC	Centro de previsão de tempo e estudos climáticos
CSAV	<i>Cloud system advection vector</i>
CST	<i>Convective-Stratiform Technique</i>
CSU	<i>Colorado State University</i>
DAAC	<i>Distributed Active Archive Center</i>
DESVPAD	Desvio padrão
DEZ	Dezembro
DI	Divisa
DMSP	<i>Defense Meteorological Satellite Program</i>
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
EM	Erro médio
EMQ	Erro médio quadrático

<i>ESSA</i>	<i>Environmental Science Services Administration</i>
<i>EU</i>	<i>Europa</i>
<i>EUA</i>	<i>Estados Unidos da América</i>
<i>EUMETSAT</i>	<i>European Meteorological Satellites</i>
<i>EURAINSAT</i>	<i>European Satellite Rainfall Analysis and Monitoring at the Geostationary Scale</i>
<i>EVTP</i>	<i>Evapotranspiração potencial</i>
<i>FDPC</i>	<i>Função de Distribuição de Probabilidade Condicionada</i>
<i>FEV</i>	<i>Fevereiro</i>
<i>FL</i>	<i>Fluviópolis</i>
<i>FTP</i>	<i>File Transfer Protocol</i>
<i>GMS</i>	<i>Geostationary Meteorological Satellite</i>
<i>GMSRA</i>	<i>GOES Multispectral Rainfall Algorithm</i>
<i>GMT</i>	<i>Greenwich Meridian Time</i>
<i>GOES</i>	<i>Geostationary Operational Environmental Satellites</i>
<i>GPCP</i>	<i>Global Precipitation Climatology Project</i>
<i>GPI</i>	<i>GOES Precipitation Index</i>
<i>GPM</i>	<i>Global Precipitation Mission</i>
<i>GSFC</i>	<i>Goddard Space Flight Center</i>
<i>HK</i>	<i>Discriminante de Hanssen & Kuipers</i>
<i>HPI</i>	<i>High resolution Precipitation Index</i>
<i>HSB</i>	<i>Humidity Sensor for Brazil</i>
<i>INPE</i>	<i>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais</i>
<i>IPWG</i>	<i>International Precipitation Working Group</i>
<i>IQD</i>	<i>Inverso do Quadrado da Distância</i>
<i>IR</i>	<i>Infravermelho</i>
<i>ITOS</i>	<i>Improved TOS</i>
<i>JAN</i>	<i>Janeiro</i>
<i>JUL</i>	<i>Julho</i>
<i>JUN</i>	<i>Junho</i>

<i>LaMMA</i>	<i>Laboratorio per la Meteorologia e la Modellistica Ambientale</i>
Lat	Latitude
Lon	Longitude
MAI	Maio
MAR	Março
<i>METEOSAT</i>	<i>Meteorological Satellite</i>
<i>MODIS</i>	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
<i>MPE</i>	<i>Multi-sensor Precipitation Estimate</i>
<i>MW</i>	Microondas
<i>NASA</i>	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
<i>NCDC</i>	<i>National Climatic Data Center</i>
<i>NCEP</i>	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NDC	Número de dias de chuva
NDO	Número de dias sem chuva
<i>NESDIS</i>	<i>National Environmental Satellite, Data and Information Service</i>
<i>NOAA</i>	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NOV	Novembro
OUT	Outubro
<i>NPD</i>	<i>Normalized Polarization Difference</i>
<i>NRL</i>	<i>National Research Laboratory</i>
<i>NWS</i>	<i>National Weather Service</i>
PA	Porto Amazonas
PD	Probabilidade de detecção de chuva
<i>PERSIANN</i>	<i>Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks</i>
PF	Probabilidade de alarme falso de chuva
<i>PIP</i>	<i>Precipitation Intercomparison Project</i>
PLU	Pluviômetro
PO	Pontilhão
<i>POES</i>	<i>Polar Orbiting Environmental Satellites</i>

<i>PR</i>	<i>Precipitation Radar</i>
<i>RACC</i>	<i>Rain and Cloud Classification</i>
<i>RMS</i>	<i>Root Mean Square</i>
<i>RN</i>	Rio Negro
<i>SANEPAR</i>	Companhia de Saneamento do Paraná
<i>SAT</i>	Satélite
<i>SB</i>	São Bento
<i>SC</i>	Santa Cruz do Timbó
<i>SET</i>	Setembro
<i>SI</i>	<i>Scattering Index</i>
<i>SIMEPAR</i>	Instituto tecnológico SIMEPAR
<i>SM</i>	São Mateus do Sul
<i>SOAS</i>	<i>Statistical Objective Analysis Schemes</i>
<i>SRDC</i>	<i>Surface Reference Data Center</i>
<i>SSM/I</i>	<i>Special Sensor Microwave/Imager</i>
<i>TMI</i>	<i>TRMM Microwave Imager</i>
<i>TOVAS</i>	<i>TRMM Online Visualization and Analysis System</i>
<i>TRAP</i>	<i>Tropical Rainfall Potential</i>
<i>TRMM</i>	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
<i>TSDIS</i>	<i>TRMM Science Data and Information System</i>
<i>UOB</i>	<i>University of Bergen</i>
<i>UTC</i>	<i>Universal Time Coordinated</i>
<i>UV</i>	União da Vitória
<i>VIRS</i>	<i>Visible and Infrared Radiometer System</i>
<i>VIS</i>	Visível
<i>VISSR</i>	<i>Visible Infrared Spin-Scan Radiometer</i>
<i>WCRP</i>	<i>World Climate Research Program</i>
<i>WGNE</i>	<i>Working Group on Numerical Experimentation</i>
<i>WMO</i>	<i>World Meteorological Organization</i>
<i>WWRP</i>	<i>World Weather Research Programme</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{INCR}	Área incremental
A_{TOTAL}	Área total
b	Parâmetro da distribuição uniforme
$BIAS$	Tendenciosidade
$BIAS_f$	Tendenciosidade da frequência
CMB_b	Chuva média na sub-bacia “b”
d_{ij}	Distância da estação “i” ao ponto “j” da malha
$E\{X\}$	Valor esperado da variável X
$E\{Z P\}$	Valor esperado da variável Z dado P
$f_p(P)$	Função densidade de probabilidade da chuva “real” P
$f_y(y)$	Função densidade de probabilidade da variável “y”
$F_y(y)$	Função de distribuição acumulada da variável “y”
$f_{Z P}(Z P)$	Função densidade de probabilidade da chuva estimada por satélite Z condicionada a chuva “real” P
$\vec{g}(t_k)$	Vetor de ponderação no tempo “t _k ”
$g^{-1}(y)$	Função inversa de “y”
i	intensidade da chuva
I_1	Fluxos afluentes ao compartimento “1”
n	Tamanho da amostra
O_1	Fluxos defluentes do compartimento “1”
P	Chuva medida por pluviômetro
$Prob$	Probabilidade
P_A	Probabilidade de alarme falso de cheia
P_D	Probabilidade de detecção de cheia
P_{frente}	Propagação para frente
$P_{i,j}$	Chuva na linha “i”, coluna “j” da malha

P_{tras}	Propagação para trás
p^*	Volume de chuva que causa cheia na bacia
\overline{P}	Chuva média medida por pluviômetro
\overline{P}_i	Chuva média na estação “i”
\overline{P}_j	Chuva média no ponto “j” da malha
QA	Vazão afluente
QD	Vazão defluente
$Q_o(t_k)$	Vazão observada no tempo “ t_k ”
$Q_p(t_k)$	Vazão simulada no tempo “ t_k ”
r	Parâmetro da distribuição exponencial
S	constante
S_1	Armazenamento do reservatório conceitual “1”
t	duração da chuva
T_R	Tempo de recorrência
$\hat{u}(t)$	Erros na entrada do modelo hidrológico
$VAR\{Z P\}$	Variância da variável Z dado P
$W_{b,i,j}$	Peso para a sub-bacia “b”, na linha “i”, coluna “j” da malha
\vec{w}	Vetor de erros das vazões simuladas
X	Estado
$\vec{X}_a(t_k)$	Vetor de previsão de estado no tempo “ t_k ” atualizado
$X_i(t)$	Volume de água no compartimento “i”, no tempo “t”
$\vec{X}_p(t_k)$	Vetor de previsão de estado no tempo “ t_k ” simulado
Z	Chuva estimada por satélite
3R	Rainfall-Runoff-Routing
\mathbf{a}_p	Parâmetro do estimador de estado associado aos parâmetros do modelo hidrológico

\mathbf{a}_U	Parâmetro do estimador de estado associado aos dados de entrada do modelo hidrológico
\mathbf{d}	Intervalo de distribuição da variável aleatória \mathbf{e}
$\hat{\mathbf{q}}$	Erros nos parâmetros do modelo hidrológico
\mathbf{e}	Variável aleatória uniformemente distribuída
\mathbf{m}_X	Média da variável aleatória X
\mathbf{s}^2_X	Variância da variável aleatória X

RESUMO

Atualmente, estão sendo desenvolvidos diversos produtos de estimativa de chuva por satélite. Entre eles, destacam-se os produtos que combinam sensores microondas de satélites polares, com sensores infravermelhos de satélites geoestacionários, sendo suas resoluções espaciais e temporais das mais variadas. Os principais objetivos desse estudo são: (a) validar a estimativa de chuva por satélite *CMORPH* na bacia do rio Iguaçu em União da Vitória, (b) avaliar o impacto das incertezas das estimativas de chuva por satélite em sistemas de alertas de cheias, por meio de análise probabilística para o período 2003-2004, e (c) relatar os resultados do estudo de sensibilidade de modelagem hidrológica em relação ao tipo de dados de entrada (chuva estimada por satélites e medida por pluviômetros), e configuração do modelo hidrológico (somente com assimilação da chuva, ou com a inclusão de um estimador de estado, que assimila a vazão observada, além da chuva). A sensibilidade da estimativa de chuva por satélite com respeito à escala foi analisada para duas bacias: sub-bacia de Porto Amazonas, com área de 3.662 km², monitorada com uma única estação pluviométrica, e a bacia do Iguaçu em União da Vitória, com área de 24.211 km², monitorada com uma rede contendo treze estações pluviométricas. Os principais resultados desse estudo são: (1) as incertezas da estimativa de chuva por satélite *CMORPH* são suficientes para serem usadas como dado de entrada em sistemas de alertas de cheias para bacias maiores do que 1.000 km², na bacia do Iguaçu em União da Vitória; (2) o *CMORPH* registra muito bem a ocorrência de chuva na bacia, embora, superestime sua intensidade, (3) a metodologia da análise probabilística da incerteza da chuva fornece uma boa ferramenta para verificação do uso das estimativas de chuva por satélite em sistemas de alertas de cheias, (4) a resposta do modelo hidrológico depende significativamente do tipo de dado de entrada, (5) os estados do modelo hidrológico variam significativamente em função do dado de entrada; neste estudo em que o produto de satélite teve um viés de superestimar a

chuva média, causou uma saturação mais rápida da bacia e aumentou os picos dos hidrogramas, e (6) a inclusão do estimador de estado no modelo hidrológico atenua as incertezas da estimativa de chuva por satélite, produzindo uma modelagem com qualidade equivalente às obtidas pelo modelo hidrológico quando usa somente dados da rede pluviométrica de superfície.

Palavras-chave: modelo hidrológico, chuva estimada por satélite, simulação hidrológica, *CMORPH*, sensoriamento remoto, satélite, bacia do Iguaçu.

ABSTRACT

A new generation of satellite rainfall products, combining both microwave and infrared bands, are become available. The current generation of satellite rainfall products combines data from a multiple satellite array. Polar orbiting satellites are equipped with microwave sensors, whereas infrared sensors are placed in geostationary environmental satellites. The objectives of this study are: (a) validation of CMORPH's satellite rainfall estimation product for the Iguaçu Basin in União da Vitória, (b) evaluation the impact of the uncertainties of satellite rainfall estimates on real time flood warning systems, through statistical analysis of daily rainfall for the 2003-2004 period for the Iguaçu Basin in União da Vitória, and (c) reporting the results of a sensitivity study of hydrologic forecasting with respect to both mean area rainfall input data (raingauge and satellite), and hydrologic model design (with and without updating through streamflow assimilation). The sensitivity of satellite rainfall estimation with respect to basin scales was analyzed for two basins: Iguaçu River in Porto Amazonas, which is a 3.662 km² headwater basin monitored with a single hydrologic telemetric station, and Iguaçu River in União da Vitória which is a 24.211 km² basin, monitored with a network of thirteen hydrologic telemetric stations. The main results of this study were: (1) CMORPH's satellite rainfall estimation uncertainties are small enough to be used as input data for flood warning systems for basins larger than 1.000 km² in Southern Brazil; (2) CMORPH's rainfall estimation captures the phase of rainfall events, but overestimates the rainfall peak intensity; (3) the probabilistic analysis of the uncertainties of satellite rainfall estimates provides the parameterization of both flooding detection and false warning, which are pivotal for real time flood warning systems; (4) the deterministic hydrologic model response depends strongly on the uncertainty of rainfall estimates; (5) the hydrologic model states vary significantly with respect to the rainfall input data, since CMORPH's satellite rainfall tend to overestimate rainfall intensity, then the soil layers of the

hydrologic model accumulate the overestimated rainfall, acquiring full storage and enhancing the peak of the simulated hydrographs; (6) the impact of the uncertainties of satellite rainfall estimates on hydrologic forecasting is significantly reduced if an automated state estimator is coupled to the rainfall-runoff-routing model.

Key-words: hydrologic model, satellite rainfall estimates, hydrologic simulation, CMORPH, remote sensing, satellite, Iguacu River.

INTRODUÇÃO

Nas últimas três décadas observaram-se avanços consideráveis no sensoriamento remoto da chuva por meio de satélites ambientais. Esses avanços aumentaram a disponibilidade e qualidade das estimativas de chuva por satélite que passaram da categoria de tema de pesquisa para a categoria de produto operacional disseminado por entidades de hidrologia e meteorologia. Os principais produtos operacionais derivados da chuva estimada por satélite são: (1) distribuição espacial e temporal da chuva em grandes bacias e regiões, amplamente usadas por serviços meteorológicos para o monitoramento e previsão de tempo; e (2) previsão hidrológica em bacias monitoradas com redes esparsas.

Freqüentemente, as bacias estão desprovidas de monitoramento hidrológico com transmissão em tempo real ou então, estão providas com uma rede de monitoramento muito esparsa, dificultando o desenvolvimento da modelagem hidrológica. Por isso, tecnologias de sensoriamento remoto da chuva constituem alternativas para serem usadas em casos de problemas na qualidade e disponibilidade do dado básico. A resolução da Agência Nacional de Águas (ANA) Nº 396 de 1998, que estabelece as condições para implantação, manutenção e operação de redes fluviométricas e pluviométricas para aproveitamentos hidrelétricos, impõe um conjunto mínimo de quatro estações pluviométricas para bacias com área de drenagem entre 5.000 km² e 50.000 km². Portanto, mesmo com uma densidade de apenas uma estação pluviométrica a cada 12.500 km² estar-se-ia satisfazendo a resolução legal. Todavia, a baixa densidade de estações pluviométricas compromete negativamente o desenvolvimento de sistemas de previsão hidrológica que freqüentemente usam a chuva como dado de entrada para modelos do tipo chuva-vazão.

O uso da chuva estimada por satélite como dado de entrada de modelos hidrológicos pode ser uma alternativa para fornecer previsões de vazões em bacias com monitoramento de superfície esparsa e/ou de baixa qualidade. O requisito

principal para que os dados do sensoriamento remoto da chuva possam ser usados na modelagem hidrológica é que haja uma organização institucional para provimento das informações pluviométricas e fluviométricas de superfície e das estimadas por satélites. A organização institucional e a integração dessas informações é um grande desafio, uma vez que tanto as entidades de recursos hídricos como os serviços meteorológicos tendem a absorver a totalidade dos produtos e serviços, tanto os hidrológicos como os meteorológicos. O resultado da inadequação da organização institucional é que os serviços meteorológicos busquem desenvolver e implantar serviços de previsões hidrológicas com equipes desprovidas de hidrólogos e que agências de recursos hídricos também passem a operacionalizar produtos meteorológicos sem a participação de meteorologistas. A eficiência institucional será atingida quando houver a integração de produtos e procedimentos dos serviços meteorológicos e das agências de recursos hídricos.

Alguns dos benefícios dos produtos de satélite integrados com modelos hidrológicos estão associados com as aplicações para: (1) defesa civil no gerenciamento de inundações, e na previsão e alerta de inundações, (2) gerenciamento de sistemas de recursos hídricos com incorporação da estimativa de afluências em reservatórios, e otimização da operação hidráulica.

O desenvolvimento dos produtos de chuva estimada por satélite e de modelos que possam utilizá-los requerem experimentos que combinem medidas de sensoriamento remoto apropriadas, com as tradicionais medidas *in-situ* em regiões que já são bem compreendidas hidrológicamente. A partir daí é que foi escolhida a bacia do Rio Iguaçu como área de estudo. Desde que os modelos hidrológicos sejam desenvolvidos utilizando-se dados de sensoriamento remoto em bacias com monitoramento de superfície adequado, estes possivelmente poderão ser utilizados também em regiões contendo pouco ou nenhum sistema de medição de chuva *in-situ*, em sistemas de previsões de vazões (KOSTER *et al.*, 1999).

O objetivo geral desse trabalho é validar a estimativa de chuva por satélite na

modelagem hidrológica, por meio de um estudo de caso na bacia do Iguazu em União da Vitória. Busca-se, com isso, melhorar a qualidade da modelagem hidrológica com o uso de produtos de satélite integrados com modelos hidrológicos.

As metas estabelecidas são: (1) identificar os produtos de estimativa de chuva por satélite disponíveis no momento, (2) diagnosticar a forma e conteúdo da disseminação da estimativa de chuva por satélite pelas entidades de recursos hídricos e de meteorologia, (3) diagnosticar as diferenças entre as estimativas de chuva por satélite e as medidas em postos pluviométricos, através de análises estatísticas; (4) verificar as incertezas na utilização da chuva estimada por satélite em sistemas de alertas de cheias, por meio de análise probabilística descrita em GEORGAKAKOS (1992); (5) diagnosticar os erros na estimativa de vazões decorrentes do uso da chuva estimada por satélite; e (6) recomendar e diagnosticar o procedimento para redução dos erros na modelagem hidrológica por meio da atualização de estados.

A dissertação está organizada em cinco itens. Inicialmente, o item 1 apresenta a revisão da literatura, destacando os meios pelos quais as estimativas por satélite são geradas, desde a sua recepção nos sensores a bordo dos satélites, até a sua composição em informação final por meio de métodos representados por algoritmos computacionais. Neste item, apresentam-se também os principais fatores que podem acarretar em incertezas na modelagem hidrológica no que diz respeito aos dados pluviométricos, e alguns estudos já realizados acerca do assunto. O item 2 descreve a metodologia empregada, ressaltando além das estatísticas comparativas entre os dados de pluviômetro e satélite, a análise probabilística da incerteza da chuva, e o modelo hidrológico chuva-vazão 3-R. No item 3 é caracterizada a bacia hidrográfica adotada para o estudo de caso da integração da chuva estimada por satélite com a modelagem hidrológica, com destaque para a sua hidrografia, clima e uso do solo. O item 4 descreve os dados hidrológicos utilizados: chuva estimada por satélites, chuva medida por pluviômetros, vazão e evapotranspiração. No item 5, apresentam-se os principais resultados obtidos e, por fim, são apresentadas as conclusões e recomendações.

1 REVISÃO DA LITERATURA

1.1 ESTIMATIVA DE CHUVA POR SATÉLITE

Tradicionalmente, a medição da chuva é feita por meio de pluviômetros e pluviógrafos. Inicialmente, mecânicos e, mais recentemente, eletrônicos, estes instrumentos são utilizados para a estimativa da quantidade de chuva ocorrida em uma bacia hidrográfica, a partir de informações pontuais. Porém, reconhecendo as limitações desses pluviômetros na representação da distribuição espacial da chuva sobre grandes áreas, estão sendo feitos cada vez mais esforços para quantificar a precipitação a partir de sensores a bordo de satélites espaciais.

Uma grande variedade de produtos de estimativa de chuva estão disponíveis na atualidade, e isso tende a aumentar com a chegada da *Global Precipitation Mission (GPM)*, missão internacional que tende a ser lançada pela comunidade por volta de 2010, e vai dispor de um grande número de sensores microondas passivos a bordo dos satélites, possibilitando o desenvolvimento de produtos de chuva global em escalas temporais e espaciais ainda mais refinadas (HOSSAIN *et al.*, 2004). Outro fator marcante no desenvolvimento dos produtos de satélite foi o lançamento, em junho de 2001, da *International Precipitation Working Group (IPWG)*, que é um grupo de trabalho do *Coordination Group for Meteorological Satellites (CGMS)*, copatrocinado pela *World Meteorological Organization (WMO)*. Suas principais finalidades são: (1) desenvolver estimativas de chuva cada vez melhores, e divulgar a sua utilização, (2) melhorar os conhecimentos científicos na área, e (3) desenvolver parcerias internacionais entre as entidades membro (IPWG, 2005).

Os produtos de estimativa de chuva por satélite possuem diversas resoluções temporais e espaciais, e são disseminados, na grande maioria, com livre acesso pelas instituições desenvolvedoras. As metodologias e algoritmos utilizados para a concepção desses produtos estão inseridos no meio científico desde a década de 1980

com estimativas feitas por meio de sensores infravermelhos (ADLER e NEGRI (1988), VICENTE *et al.* (1998) e MORALES e ANAGNOSTOU (2003)), até os dias de hoje com estimativas feitas a partir de sensores microondas (ADLER *et al.* (1994), KUMMEROW *et al.* (1998) e JOYCE *et al.* (2004)). Alguns estudos sobre o uso de dados de satélite na modelagem hidrológica são apresentados em GUETTER *et al.* (1996), GUETTER e GEORGAKAKOS (1997) e TSINTIKIDIS *et al.* (1999), respectivamente, em bacias do Meio-Oeste dos Estados Unidos e no Rio Nilo no Egito. Esses estudos da década de 1990 usaram estimativas de chuva por satélite derivadas de sensores infravermelhos, em satélites geoestacionários.

Nesse capítulo são descritos os principais tipos de satélites e sensores utilizados para estimativa da chuva, bem como as metodologias adotadas para transformação das informações obtidas pelos satélites em dado de chuva operacional, e alguns dos principais produtos disponibilizados pelos centros de pesquisa do mundo.

1.1.1 Satélites

O primeiro satélite artificial foi lançado em 1957. Cerca de três anos depois começou a era dos satélites meteorológicos, criando novas possibilidades de observação do tempo a partir do espaço. Os satélites permitem uma cobertura regular de todo o globo terrestre, o que seria impossível, na prática, com plataformas de superfície. Ao longo das últimas décadas, os satélites têm se confirmado como ferramentas de grande utilidade para aplicações no meio ambiente. Sua capacidade de cobertura temporal e espacial, aliada a recursos de medidas em diversas faixas espectrais, tem propiciado aplicações nas mais diversas áreas do conhecimento. Assim, a cada ano, novos satélites carregando novos sensores são colocados em órbita, tanto para reposição daqueles operacionais que estão no limite de sua vida útil, quanto para conduzir experimentos com novas observações que em alguns casos virão também a se tornar operacionais (MACHADO *et al.*, 2000).

Atualmente, as maiores necessidades do sensoriamento remoto estão no

desenvolvimento de instrumentos que possibilitem a extração de variáveis meteorológicas de forma mais precisa, e também no monitoramento climático. O desenvolvimento da *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)* e o aumento da resolução espectral da nova geração dos satélites da *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)* e *Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES)* permitiram considerável avanço nesta área (MACHADO *et al.*, 2000).

Antes de descrever os principais tipos de satélites é importante apresentar algumas definições básicas ligadas ao sensoriamento remoto. Quanto à fonte de radiação eletromagnética, o sensoriamento remoto é classificado como ativo ou passivo. No caso passivo, a energia utilizada provém de uma fonte natural. No caso ativo, um sistema emite energia em direção ao objeto para depois medir a parcela refletida sobre a sua superfície. A órbita que um satélite descreve pode ser classificada como polar (ou semi-polar), equatorial, geoestacionária ou heliosíncrona. Um satélite que efetua uma órbita polar, se desloca no sentido Norte-Sul em torno da Terra, e o movimento de rotação da Terra causa um deslocamento relativo a projeção do satélite sobre a superfície. Em consequência desse deslocamento, a cada momento a plataforma se encontra acima de um ponto diferente da superfície da Terra. A órbita equatorial é aquela na qual o satélite se desloca num sentido paralelo ao equador. Uma órbita geoestacionária é feita sobre uma trajetória equatorial seguindo um movimento compatível ao da rotação da Terra, ficando, assim, sempre sobre uma mesma região na superfície da Terra. Este tipo de órbita é muito usado em satélites meteorológicos para obter informações de um mesmo local com alta repetitividade temporal. Um pequeno afastamento da órbita polar, em torno de 99 graus, possibilita sincronizar o movimento do satélite com a rotação da Terra, de maneira que o satélite passe aproximadamente à mesma hora solar acima de qualquer ponto no planeta. Desta maneira, as condições de iluminação permanecem aproximadamente constantes para todos os pontos monitorados, então, a órbita passa a ser chamada de heliosíncrona (CENTENO, 2004).

As órbitas dos satélites variam entre 600 e 36.000 km (MACHADO *et al.*, 2000), sendo que os satélites para o estudo dos recursos naturais são os mais baixos, pois quanto menor a altura acima da superfície da Terra, maiores detalhes poderão ser observados usando um mesmo tipo de sensor. A tabela 1.1 apresenta algumas características dos principais satélites que são usados para estimativa de chuva.

No ano de 1997, os EUA juntamente com o Japão lançaram um projeto denominado *TRMM*, com a finalidade de medir a precipitação e a sua variação na região tropical a partir de satélites com órbita de baixa inclinação e altitude. Estima-se que três quartos do calor da atmosfera seja obtido por meio do calor latente associado com a precipitação, e estima-se que dois terços da precipitação global observada está localizada na região tropical, o que demonstra a importância destas variáveis (MACHADO *et al.*, 2000). Os principais sensores a bordo do *TRMM* relacionados com a estimativa da precipitação são: *TRMM Microwave Imager (TMI)*, *Precipitation Radar (PR)* e *Visible and Infrared Radiometer System (VIRS)* (*TRMM*, 2004). Como os instrumentos a bordo dos satélites *TRMM* são amplamente utilizados nos produtos de estimativa de chuva por satélite, suas principais características são descritas na seqüência.

(a) *PR*

O *Precipitation Radar (PR)*, construído pelo Japão, é o primeiro radar a bordo de um satélite. As principais informações obtidas são: a intensidade e distribuição da chuva, o seu tipo (convectiva ou estratiforme), e a altura pluviométrica. Sua resolução horizontal na superfície é da ordem de 4 km, com largura de varredura de 220 km. Uma das características mais importantes do *PR* é a sua eficiência na determinação de perfis verticais da chuva e neve acima da superfície, em uma altura média de 20 km. Ele detecta razoavelmente taxas leves de chuva, da ordem de $0,7 \text{ mm}^{-1}$ (*TRMM*, 2004).

TABELA 1.1 – CARACTERÍSTICAS DOS PRINCIPAIS SATÉLITES USADOS PARA ESTIMATIVA DE CHUVA

Satélite	Tipo de órbita	Principais sensores	Altitude (km)	Resolução Espacial (km)	Operação	Resolução espectral (µm)	Abrangência
<i>GOES</i>	Geoestacionária	<i>VISSR</i>	35.800	1,0 4,0 8,0	<i>NOAA</i>	0,55-0,75 3,80-4,00 10,20-11,20 11,50-12,50 6,50-7,00	1/3 da superfície terrestre
<i>METEOSAT</i>	Geoestacionária	<i>VISSR</i>	35.800	2,5 5,0	<i>EUMETSAT</i>	0,45-1,00 10,50-12,50 5,70-7,10	42% da superfície terrestre
<i>NOAA</i>	Polar	<i>AVHRR</i> <i>AMSU</i>	833	1,10	<i>NOAA</i> <i>NASA</i>	0,58-0,68 0,72-1,00 3,55-3,93 10,30-11,30 11,50-12,50	Global
<i>TERRA/AQUA</i>	Polar	<i>MODIS</i> <i>HSB</i>	705	0,25 0,50 1,00	<i>NASA</i>	36 bandas (0,40-14,40mm)	Global
<i>GMS</i>	Geoestacionária	<i>VISSR</i>	35.800	1,25 5,00	<i>AMJ</i>	0,50-0,750 10,50-11,50 11,50-12,50 6,50-7,50	Hemisfério Norte
<i>TRMM</i>	Polar	<i>TMI</i> <i>VIRS</i> <i>PR</i>	403	2,10 4,30 5,00	<i>NASA</i>	28,04 mm 15,46 mm 14,08 mm 8,11 mm 3,50 mm	Global
<i>DMSP</i>	Polar	<i>SSM/I</i>	850	12,50 25,00	<i>NASA</i>	15,50 mm 13,49 mm 8,11 mm 3,51 mm	Global

Fontes: www.sat.cnpem.br , <http://www.noaa.gov>, <http://trmm.gsfc.nasa.gov> , <http://www.eumetsat.de>, <http://www.goes.noaa.gov> e <http://www.arm.gov/xds/static/gms.htm>

(b) *TMI*

O *TMI* é um sensor de microondas passivo projetado para fornecer informação quantitativa da chuva sobre uma largura de varredura de 780 km na superfície. Por meio da medição da quantidade de energia microondas emitidas pela Terra na atmosfera, o *TMI* é capaz de quantificar o vapor de água, a água precipitável, e a intensidade da chuva na atmosfera. É um instrumento relativamente pequeno que consome pouca energia. Isto, combinado com a boa largura de varredura, faz do *TMI* um dos mais eficientes instrumentos de medição de chuva do *TRMM*. Ele é baseado no projeto do altamente bem sucedido sensor *Special Sensor Microwave Imager (SSM/I)*, operado continuamente pela *Defense Meteorological Satellite Program (DMSP)* desde 1987. O instrumento mede a intensidade da radiação em cinco frequências: 10.7, 19.4, 21.3, 37 e 85.5 Ghz. Estas frequências são similares ao *SSM/I*, exceto que o *TMI* tem um canal adicional 10.7 Ghz projetado para fornecer uma resposta mais linear para altas taxas de chuva comumente observadas na região tropical (*TRMM*, 2004).

(c) *VIRS*

O *VIRS* é um instrumento primário do *TRMM*, pois se trata de um indicador muito indireto de chuva. Outras medidas que são feitas rotineiramente como nos satélites meteorológicos *Polar Orbiting Environmental Satellites (POES)* e *GOES*, são utilizadas em conjunto com o *VIRS*. Ele mede a radiação vindo da Terra em cinco regiões espectrais, alcançando do visível até o infravermelho. São dois os motivos que destacam a inclusão do *VIRS* no pacote de instrumento primários: o primeiro, porque é capaz de delimitar a chuva, e o segundo e mais importante, é que serve como referência para outras medidas feitas utilizando os satélites *POES* e *GOES* (*TRMM*, 2004).

A tabela 1.2 apresenta o número de revisitas em um período de trinta dias

para os sensores a bordo do *TRMM* na cidade de São Paulo.

TABELA 1.2 – NÚMERO DE REVISITAS EM SÃO PAULO/SP DOS SENSORES *TRMM*

Número de revisitas para um período de 30 dias – Satélite <i>TRMM</i>				
Local	Latitude (°)	<i>PR</i>	<i>VIRS</i>	<i>TMI</i>
São Paulo (SP)	-23.58	12	41	42

Fonte: *TRMM* (2004)

1.1.2 Técnicas para estimativa de chuva

O sensoriamento remoto utiliza as faixas do espectro eletromagnético para caracterizar variáveis hidrológicas, como por exemplo, a chuva. A fotografia aérea, localizada na faixa do visível, é a técnica de sensoriamento remoto frequentemente utilizada pelos hidrólogos. Com o tempo, essas técnicas se desenvolveram, e agora incluem a maioria das faixas do espectro (MAIDMENT, 1993).

A tabela 1.3 apresenta a divisão dos espectros em janelas, sendo estes comprimentos de ondas os mais utilizados na prática do sensoriamento remoto.

TABELA 1.3 – JANELAS ATMOSFÉRICAS DO VISÍVEL AO MICROONDAS

Janela	Faixa	Região
1	0,3 – 1,3 μm	visível e infravermelho próximo
2	1,5 -1,8 μm	infravermelho médio
3	2,0 – 2,4 μm	infravermelho médio
4	3,0 – 3,6 μm	infravermelho médio
5	4,2 – 5,0 μm	infravermelho médio
6	8,0 – 14,0 μm	infravermelho distante (termal)
7	> 20 mm	microondas

Fonte: CENTENO (2004)

A energia eletromagnética correspondente aos menores comprimentos de onda está associada à maior quantidade de energia e, por isso, pode ser mais

facilmente medida. No entanto, esses comprimentos de onda são fortemente atenuados na atmosfera, tornando-se pouco aproveitáveis, casos do visível e infravermelho.

Entre as janelas utilizadas no sensoriamento remoto também se encontra a faixa do microondas, cujos comprimentos de onda associados são da ordem do milímetro. Esta parte do espectro apresenta uma característica peculiar, pois é pouco atenuada pela atmosfera, possibilitando a observação da superfície do planeta mesmo em dias com cobertura de nuvens intensas (CENTENO, 2004). No meio meteorológico, observa-se ênfase cada vez maior no uso de sensores microondas, com aplicações tais como: estimativas de precipitação, estimativas de umidade do solo, determinação de perfis verticais de temperatura e umidade atmosférica. Além disso, iniciou-se a utilização de sensores ativos (radares) a bordo de satélites, caso da missão *TRMM*.

1.1.2.1 Visível e Infravermelho

A região visível do espectro compreende uma faixa de cerca de 0,3 a 0,6 μm . Esta faixa recebe o nome em função de agrupar o conjunto de cores que são visíveis ao olho humano. De maneira geral, ela pode ser dividida em regiões correspondentes às cores básicas: vermelho (0,5 a 0,6 μm), verde (0,4 a 0,5 μm) e azul (0,3 a 0,4 μm).

Logo abaixo do azul encontra-se a região do ultravioleta, muito pouco usada no sensoriamento remoto, pois esta energia é fortemente absorvida e espalhada pela atmosfera. Acima do vermelho, os comprimentos de onda recebem o nome de infravermelho. Esta região é muito importante, pois nela é possível detectar alguns fenômenos naturais com muita clareza. O olho humano não é sensível a este tipo de energia, por isso as imagens do infravermelho são obtidas usando sensores ou filmes específicos. O infravermelho pode ser dividido em três grandes faixas:

- a. infravermelho próximo (0,6 a 1,3 μm): Esta faixa também é denominada infravermelho refletido ou fotográfico, uma vez que pode ser captada

- através de filmes fotográficos ou aparelhos ópticos;
- b. infravermelho médio (1,3 a 8,0 μm): Nesta região a reflexão da luz do Sol e a emissão de energia da Terra se confundem;
 - c. infravermelho distante ou emissivo (8,0 a 14,0 μm): Esta região recebe este nome por corresponder aos comprimentos de onda maiores e pelo fato da energia emitida pelos corpos na Terra, sob forma de calor, ser predominante (CENTENO, 2004).

As imagens obtidas por meio dos sensores infravermelho são compostas de energia radiante provenientes da atmosfera, da superfície terrestre, ou da água. A energia do infravermelho pode ser convertida em temperatura, conhecida como temperatura de brilho, por meio da lei de *Stefan-Boltzmann*. As observações de temperatura de brilho podem ser usadas para inferir alturas de topo das nuvens. Baixas temperaturas de brilho implicam em altos topos de nuvem, resultando em grande espessura da nuvem e alta probabilidade de chuva. Altas temperaturas de brilho implicam em topos de nuvem baixos e baixa probabilidade de chuva (MAIDMENT, 1993). É a partir daí que a chuva pode ser estimada a partir do canal infravermelho dos satélites. As células convectivas estão associadas com precipitação na superfície, onde de fato, os sistemas convectivos produzem a maior parte da chuva nos trópicos. Mas na verdade, a relação entre a temperatura de brilho do infravermelho e a chuva é indireta. Além disso, não é possível discriminar a parte convectiva do sistema, da parte estratiforme ou nuvens Cirrus, que são nuvens situadas na alta troposfera (acima de 8 km), que são nuvens muito frias, porém que não precipitam. Mesmo assim, considerando grandes áreas, pode-se obter boas correlações entre a chuva média observada e o índice de chuva média calculada com o sensor infravermelho. Um exemplo de chuva derivada de sensores infravermelhos foi proposto por ARKIN (1979), que encontrou uma relação entre a cobertura das nuvens e os volumes de chuva. O então chamado *GOES Precipitation Index (GPI)* é a porcentagem de *pixels* que possuem temperatura infravermelha inferior que uma

temperatura limite, em um *grid* de $2,5^\circ$, multiplicado por uma taxa de chuva constante de 3 mm^{-1} . Embora esse valor possa variar para diferentes regimes climáticos, o *GPI* é comumente utilizado em estudos climatológicos (ARKIN e MEISNER, 1987; ARKIN e JANOWIAK, 1991).

Outras técnicas foram desenvolvidas para melhorar a relação entre a temperatura do infravermelho e a estimativa de chuva, e a identificação da área de precipitação da nuvem. Entre elas, podem ser citadas: (a) técnicas que variam a temperatura limite de acordo com regiões e estações do ano; (b) técnicas que utilizam radiâncias do canal visível para discriminar as nuvens Cirrus (técnicas bi-espectrais *VIS/IR*); (c) técnicas do ciclo de vida da nuvem, que distinguem a fase de crescimento, responsável pela produção de chuva intensa e a fase dissipativa acompanhado por chuva leve; (d) técnicas que utilizam modelos de nuvem para distinguir as partes convectivas e estratiformes do sistema; e (e) técnicas que utilizam outros tipos de canais infravermelhos, para melhorar a detecção das nuvens Cirrus. Por causa da grande amostragem dos dados e da fraca conexão física com a precipitação na superfície, essas técnicas são mais apropriadas para escalas maiores de tempo e espaço (JOBARD, 2001).

1.1.2.2 Microondas

As técnicas de microondas têm grande potencial para a estimativa da precipitação, visto que, a medida da radiação microondas tem relação direta com a queda da chuva na superfície. A energia do microondas se relaciona com a chuva sob dois aspectos: emissão/absorção e dispersão. Para baixas frequências de microondas (10-37 Ghz), é registrada a emissão termal das gotas de chuva, enquanto que em altas frequências ($> 85 \text{ Ghz}$) é registrada a dispersão da radiação que sobe da superfície terrestre, devido à partículas de gelo na camada de chuva, e topos de sistemas convectivos (JOYCE, 2004). Atualmente, grandes esforços estão sendo feitos para o desenvolvimento de algoritmos de chuva a partir de instrumentos de microondas

passivos (MAIDMENT, 1993).

Os métodos mais simples para a estimativa de chuva a partir de sensores microondas são baseados em regressões estatísticas, utilizando temperaturas de brilho para derivar o índice de chuva. Alguns exemplos desses índices são o *Scattering Index*, proposto por GRODY (1991), e o *Normalized Polarization Difference*, proposto por PETTY (1994).

Existem também métodos mais sofisticados, como por exemplo KUMMEROW e GIGLIO (1994), MUGNAI e SMITH (1988), baseados em algoritmos de inversão com utilização de banco de dados. Para a construção do banco de dados necessita-se de um modelo atmosférico e de nuvem, onde cada perfil vertical de chuva é associado a um conjunto de temperaturas de brilho simulado nas frequências dos canais do radiômetro. O banco de dados deve conter um grande número de perfis de chuva, de modo que seja representativo de todas as situações que possam ser observadas, e devem incluir também a completa variabilidade das condições da superfície, como por exemplo, a temperatura da superfície do mar, a velocidade do vento, a emissividade do solo e a umidade. Redes neurais podem ser usadas para otimizar o procedimento de inversão.

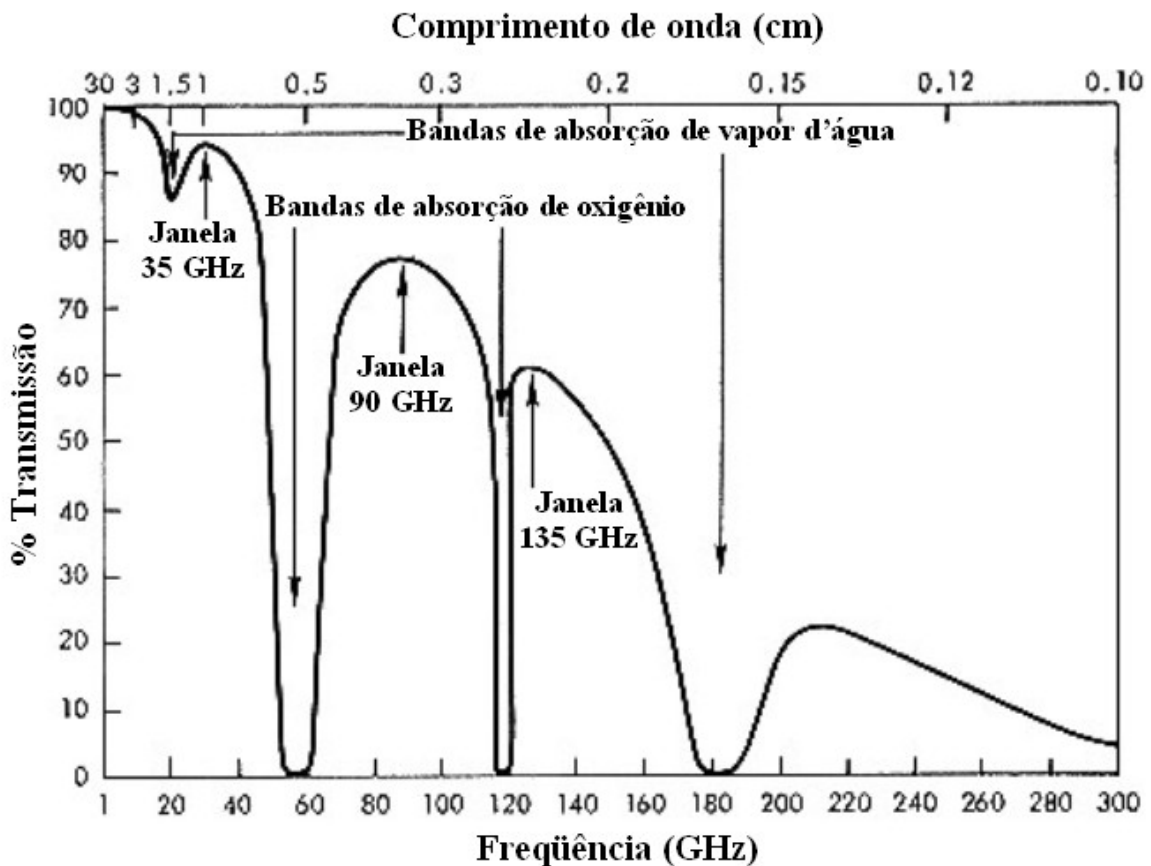
Uma característica importante dos dados de microondas é que os radiômetros são usados somente a bordo de satélites de órbita polar. Por exemplo, um radiômetro a bordo de um satélite polar, com varredura de 1.400 km como o *SSM/I*, pode visualizar somente 60% da superfície do globo dentro de um período de um dia. O intervalo entre duas medidas sucessivas de microondas é excessivo para a alta variabilidade temporal e espacial que caracteriza a chuva, especialmente nos trópicos, sendo assim, alguns produtos de estimativa de chuva por satélite utilizam diversos sensores simultaneamente.

Os métodos de estimativa de chuva por meio de sensores de microondas ativos, como por exemplo o radar, derivam o perfil vertical da taxa instantânea de chuva. As limitações desses métodos são similares às limitações das outras técnicas a

partir do microondas, sendo que a principal se relaciona à pequena cobertura espacial do equipamento. Como exemplo, a varredura do *PR*, a bordo do Satélite *TRMM*, é de 220 km, enquanto que a varredura do radiômetro é de 760 km. Por outro lado, a resolução espacial do radar é melhor, sendo da ordem de 4 km. Um outro problema é a dificuldade na calibração de um radar espacial, contribuindo assim, significativamente, para a incerteza da estimativa da chuva (JOBARD, 2001; JOYCE *et al.*, 2004).

A figura 1.1 ilustra a variação dos percentuais de transmissão da energia através da atmosfera, para os diversos comprimentos de onda, na direção vertical. Nota-se que para maiores comprimentos de onda (microondas), o percentual em uma direção é maior do que para comprimentos de onda infravermelha.

FIGURA 1.1 – PERCENTUAL DE TRANSMISSÃO DE ALGUMAS FAIXAS DE COMPRIMENTO DE ONDA NA ATMOSFERA



Fonte: ULABY *et. al* (1981)

1.1.2.3 Múltiplas fontes

Para melhorar a eficiência da estimativa da chuva, alguns métodos sugerem o uso de dados de múltiplas fontes. Por exemplo, existem métodos que combinam os sensores infravermelhos de satélites geostacionários com sensores microondas de satélites de órbita polar. Dessa junção, é tirado proveito da excelente cobertura espacial e temporal dos sensores infravermelhos e da forte correlação do microondas com a precipitação. Um exemplo de combinação infravermelho/microondas, é o método *Rain and Cloud Classification (RACC)* proposto por JOBARD e DESBOIS (1994), baseado num procedimento de classificação automática. A partir de sensores infravermelhos e microondas de órbitas coincidentes, utiliza-se uma técnica chamada *Dynamic Clustering*, para classificar diferentes tipos de nuvem. A informação microondas permite atribuir uma quantidade de chuva para cada classe, e a informação infravermelha permite a classificação do tipo de nuvem, das quais as intensidades de chuva são derivadas. O método proposto por ADLER *et al.* (1994), conhecido como *Adjusted GPI*, é baseado no índice infravermelho *GPI*, onde a chuva mensal é ajustada por um fator, sendo este, a razão entre a chuva mensal estimada pelo microondas e pelo infravermelho, coincidentes no tempo e espaço. Mais tarde essa técnica passou a incorporar também informações de pluviômetros.

Estimativas de precipitação a partir de satélites e pluviômetros em conjunto, são produzidas operacionalmente pela *TRMM*. Um produto similar que produz estimativas de precipitação com resolução de 1° , com cobertura global, é conhecido como *GPCP-1DD*, disponível desde 1997 até a presente data. Este produto é descrito em HUFFMAN *et al.* (2001).

PEREIRA FILHO *et al.* (2002) compararam a técnica *Convective Stratiform Technique (CST)*, derivada do satélite *TRMM* (sensor *TMI*), com estimativas de chuva a partir de radar e de uma rede de pluviômetros em São Paulo. Na área de cobertura do radar, com cerca de 300 km^2 , foram comparadas estimativas de chuva diárias, nos anos de 2001 e 2002 distribuídas em um *grid* de $4 \times 4 \text{ km}^2$. A partir das incertezas

provenientes das diversas formas de estimativa de chuva, foi concluído desse estudo que nenhum dos três instrumentos são suficientes, em separado, para representar sua alta variabilidade espacial e temporal na área de cobertura do radar, sendo assim, foi recomendada a técnica *Statistical Objective Analysis Schemes (SOAS)* para integração dos três instrumentos de estimativa de chuva.

Algoritmos que utilizam dados de diversas fontes também são desenvolvidos para produzir estimativas de chuva global, em tempo próximo ao real, mesclando informações de sensores infravermelhos e de microondas. O método conhecido como *CMORPH*, usa estimativa de precipitação derivada de satélites de órbita polar exclusivamente, e os sensores infravermelhos para propagar o dado microondas no tempo e espaço entre duas observações consecutivas dos sensores de microondas (JOYCE *et al.*, 2004).

1.1.3 Algoritmos de estimativa de chuva por satélite

Durante as últimas décadas, um grande número de algoritmos para a estimativa de chuva por satélite foram propostos, fazendo-se uso de sensores infravermelhos, microondas passivos ou ativos, e até mesmo uma combinação destes. Hoje em dia, diversos autores propõem algoritmos avançados para produzir estimativa de chuva nas mais diversas escalas de tempo, para satisfazer um número cada vez maior de usuários. As estimativas de chuva por satélites de uma variedade de algoritmos operacionais e semi-operacionais são facilmente obtidos via *web*, e podem ser usados em aplicações meteorológicas, climáticas, hidrológicas, na agricultura, entre outras. As tabelas 1.4 a 1.7 listam os algoritmos de estimativa de chuva operacionais existentes até o momento, constantes no Inventário da *IPWG*.

TABELA 1.4 – ALGORITMOS DE ESTIMATIVA DE CHUVA A PARTIR DE SENSORES INFRAVERMELHOS DO INVENTÁRIO IPWG

Algoritmos baseados em INFRAVERMELHO		
Nome	Instituição	Autor / contato
<i>CMA</i>	<i>China Meteorological Agency (CMA) - China</i>	L. Naimeng
<i>CST</i>	<i>NASA / GSFC - EUA</i>	A. J. Negri
<i>EURAINSAT/A 1.0</i>	<i>EURAINSAT Project - EU</i>	F. J. Tapiador
<i>HPI</i>	<i>EUMETSAT - EU</i>	T. Heinemann
<i>JMAMSC</i>	<i>Japan Meteorological Agency - Japan</i>	N. Ohkawara

Fonte: IPWG (2005)

TABELA 1.5 – ALGORITMOS DE ESTIMATIVA DE CHUVA A PARTIR DE SENSORES MICROONDAS DO INVENTÁRIO IPWG

Algoritmos baseados em MICROONDAS		
Nome	Instituição	Autor / contato
<i>AMSRE near real time global rain rates</i>	<i>NOAA/NESDIS – EUA</i>	R. R. Ferraro
<i>AMSU operational global rain rates</i>	<i>NOAA/NESDIS – EUA</i>	R. R. Ferraro
<i>AMSU global monthly and pentad rainfall</i>	<i>NOAA/NESDIS – EUA</i>	R. R. Ferraro
<i>SSM/I operational global rain rates</i>	<i>NOAA/NESDIS - EUA</i>	R. R. Ferraro
<i>SSM/I global pentad and monthly rainfall</i>	<i>NOAA/NESDIS - EUA</i>	R. R. Ferraro
<i>TRMM HQ (3B40RT)</i>	<i>NASA/GSFC - EUA</i>	G. J. Huffman

Fonte: IPWG (2005)

TABELA 1.6 – ALGORITMOS DE ESTIMATIVA DE CHUVA A PARTIR DE SENSORES MICROONDAS E INFRAVERMELHOS DO INVENTÁRIO IPWG

Algoritmos baseados em MICROONDAS-INFRAVERMELHO		
Nome	Instituição	Autor / contato
<i>CMORPH</i>	<i>NOAA - EUA</i>	R. Joyce
<i>EURAINSAT/B 1.0</i>	<i>EURAINSAT project - EU</i>	C. Kidd
<i>NRL Blended Satellite Technique</i>	<i>Naval Research Laboratory - EUA</i>	F. J. Turk
<i>PERSIANN</i>	<i>University of California Irvine - EUA</i>	K. L. Hsu
<i>PERSIANN-CCS</i>	<i>University of California Irvine - EUA</i>	Yang Hong
<i>TRMM HQ/VAR (3B42RT)</i>	<i>NASA/GSFC - EUA</i>	G. J. Huffman

Fonte: IPWG (2005)

TABELA 1.7 – ALGORITMOS DE ESTIMATIVA DE CHUVA A PARTIR DE MÚLTIPLAS FONTES DO INVENTÁRIO IPWG

Algoritmos baseados múltiplas informações		
Nome	Instituição	Autor / contato
<i>GOES Multispectral Rainfall Algorithm (GMSRA)</i>	<i>NOAA/NESDIS - EUA</i>	M. Ba e A. Gruber
<i>GPCP 1° daily</i>	<i>NASA/GSFC - EUA</i>	G. J. Huffman
<i>GPCP Satellite-gauge combination</i>	<i>NASA/GSFC - EUA</i>	G. J. Huffman
<i>Hydro-estimator for short term (1-6 h) Extreme precipitation</i>	<i>NOAA/NESDIS - EUA</i>	R. Scofield
<i>TRMM var (3B41RT)</i>	<i>NASA/GSFC - EUA</i>	G. J. Huffman
<i>UOB Advection 1.0</i>	<i>University of Birmingham - EUA</i>	C. Kidd
<i>UOB NET 1.0</i>	<i>University of Birmingham - EUA</i>	F. J. Tapiador

Fonte: IPWG (2005)

Muitas das vantagens e limitações das estimativas de chuva por satélites foram estabelecidas por meio de programas de comparação, realizados nas últimas décadas. Entre eles, destacam-se o *Algorithm Intercomparison Program (AIP-1,-2,-3)*, coordenado pela *WCRP*, e o *WetNet Precipitation Projects (PIP-1,-2,-3)*, que realizaram comparações de estimativas de chuva entre diversos produtos e algoritmos.

De modo geral, as técnicas microondas apresentaram uma melhor correlação com os dados de validação, quando comparadas com as técnicas infravermelhas ou técnicas combinadas infravermelho/microondas, para estimativas instantâneas de chuva. Para estimativas mensais, as técnicas combinadas infravermelho/microondas obtiveram melhores resultados que as demais (EBERT e MANTON, 1998). O *AIP-3* destacou grandes vantagens na utilização de dados de diversas fontes para a estimativa de chuva, a partir de informações de microondas e infravermelhas. Outros estudos globais e regionais demonstraram a grande eficiência dos métodos que combinam dados de satélite com dados de pluviômetros (JOBARD, 2001). De maneira geral, as maiores acurácias foram encontradas para chuvas do tipo tropical, convectiva e de verão, e menores acurácias para estratiforme, de latitude média, e de inverno (EBERT,

2004). A tabela 1.8 apresenta os principais produtos de estimativa de chuva constantes no Inventário do *IPWG*.

TABELA 1.8 – PRODUTOS DE ESTIMATIVA DE CHUVA POR SATÉLITE DO INVENTÁRIO IPWG

Instituição	Produto
<i>CSU</i>	<i>Climate Rainfall Data Center</i>
<i>EUMETSAT</i>	<i>Multi-sensor Precipitation Estimate (MPE), experimental</i>
<i>GPCP</i>	<i>GPCP products</i>
	<i>GPCP Geostationary Satellite Precipitation Data Center (GSPDC)</i>
	<i>GPCP Global Precipitation Analysis</i>
<i>LaMMA</i>	<i>Blended MW-IR over Italy and Central Mediterranean</i>
<i>NASA-GSFC</i>	<i>Global Precipitation Analysis</i>
	<i>GPCP-IDD data</i>
	<i>TRMM Data Organized by Data Product Groups</i>
	<i>TRMM Online Visualization and Analysis System (TOVAS)</i>
	<i>TRMM HQ 3B40RT data</i>
	<i>TRMM VAR 3B41RT data</i>
<i>NOAA-NCDC</i>	<i>Analyses of monthly precipitation from satellite and surface measurements</i>
	<i>SSMI Global Gridded Hydrological Products</i>
<i>NOAA-NESDIS</i>	<i>Microwave Surface and Precipitation Products System</i>
	<i>Tropical Rainfall Potential (TRAP)</i>
<i>NOAA-NWS</i>	<i>Climate Prediction Center - Global Precipitation Monitoring</i>
<i>NRL Monterey</i>	<i>Satellite Products</i>
<i>University of Birmingham</i>	<i>EURAINSAT/A 1.0 product</i>
	<i>Infrared and Passive Microwave Matched Rainfall Results</i>

Fonte: *IPWG* (2005)

1.1.3.1 Hidroestimador

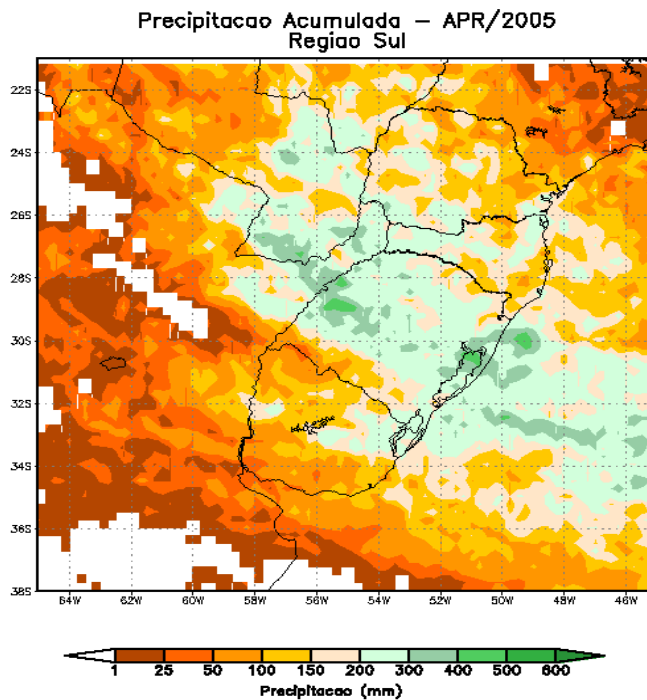
O Hidroestimador, representado na figura 1.2, é um método para estimativa de chuva em tempo real, que utiliza uma relação empírica exponencial entre a precipitação estimada por radar e a temperatura de brilho do topo das nuvens, extraídas do canal infravermelho do satélite *GOES-12*.

Diversas variáveis como água precipitável, umidade relativa, orografia e um ajuste do nível de equilíbrio convectivo para eventos de topos quentes são utilizadas para determinar automaticamente a taxa de chuva. O Hidroestimador usa uma curva

de tendência de temperatura, assumindo precipitação zero para pixel na região de baixa variação espacial, sob a posição que estão as nuvens Cirrus. Assim, são usadas diferentes discriminações para o cálculo de áreas com a presença ou não de chuva e novos ajustes para o efeito da umidade disponível.

O modelo de estimativa de chuva é uma adaptação do método utilizado pela *NESDIS* (VICENTE *et al.*, 1998). Este modelo passou por várias modificações e para ser implementado operacionalmente na divisão de sistemas e satélites ambientais do INPE, foi inteiramente adaptado para as condições e estrutura da precipitação sobre a América do Sul (CPTEC, 2004).

FIGURA 1.2 – EXEMPLO DO PRODUTO HIDROESTIMADOR DE ESTIMATIVA DE CHUVA POR SATÉLITE



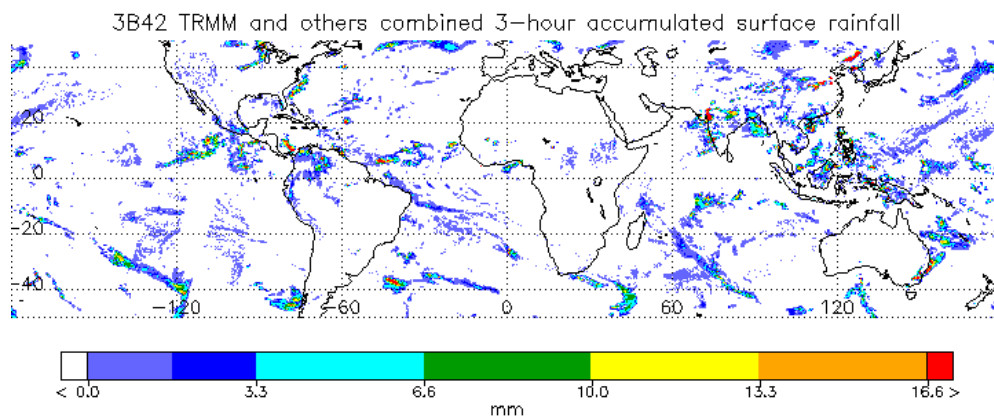
Fonte: CPTEC (2004)

1.1.3.2 Produtos *TRMM*

São diversos os produtos de estimativa de chuva resultantes da missão *TRMM* (KUMMEROW *et al.*, 1998), que são processados pelo *TRMM Science Data and Information System (TSDIS)* e disponibilizados operacionalmente pelo Goddard

Distributed Active Archive System (DAAC). Os produtos 3B42 e 3B43 são apresentados nas figuras 1.3 e 1.4. As estimativas de chuva podem ser fornecidas com resolução espacial de $0,25^\circ$, sobre a banda de latitude 50°N-S , com resolução temporal das mais variadas. Esses produtos utilizam combinações de diferentes fontes com a finalidade de obter estimativas mais precisas de chuva. A tabela 1.9 lista alguns produtos disponíveis da missão *TRMM*.

FIGURA 1.3 – EXEMPLO DO PRODUTO 3B42 DE ESTIMATIVA DE CHUVA POR SATÉLITE DA *TRMM*

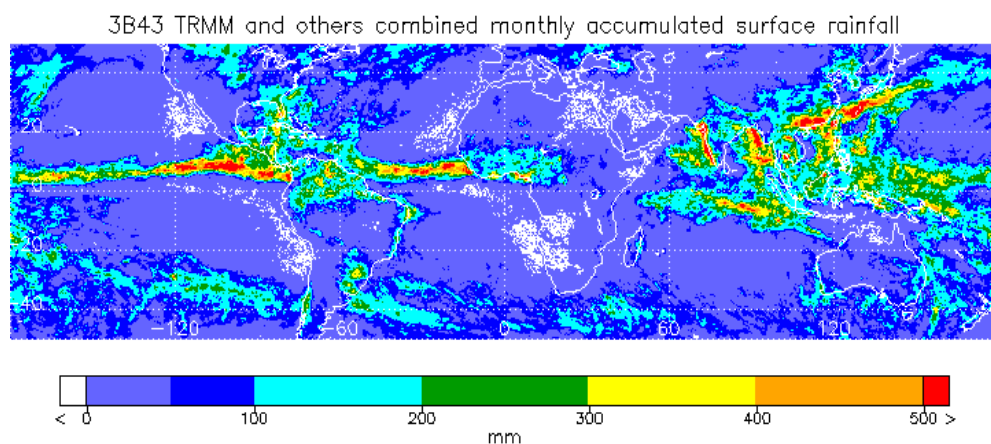


3B42_BR.050630.9.6.BRO

Note: This browse image shows 3-hour accumulated surface rainfall (mm) at 0.5 degree resolution, while its corresponding data file contains 3-hourly rain rate (mm/hr) at 0.25 degree resolution.

Fonte: NASA (2004)

FIGURA 1.4 – EXEMPLO DO PRODUTO 3B43 DE ESTIMATIVA DE CHUVA POR SATÉLITE DA *TRMM*



For Date From 2005/06/01 TO 2005/07/01

Note: This browse image shows monthly accumulated surface rainfall (mm) at 0.5 degree resolution, while its corresponding data file contains monthly rain rate (mm/hr) at 0.25 degree resolution.

Fonte: NASA (2004)

TABELA 1.9 – DESCRIÇÃO DOS PRODUTOS 3A25, 3A46, 3B42 E 3B43 DE ESTIMATIVA DE CHUVA POR SATÉLITE *TRMM*

Produto	Descrição	Data inicial
3A25	Estimativa de chuva mensal estimada pelo <i>Precipitation Radar</i> , com resoluções de 5°x5° ou 0.5° x 0.5°, para a banda de latitude 40° N-S	01/12/97
3A46	Taxa de chuva global mensal, com resolução de 1°x1°, estimada pelo SSM/I	01/01/98
3B42	Taxa de chuva global de 3 horas, a partir de sensores infravermelhos, com resolução de 0,25°x0,25°	01/12/97
3B43	Taxa de chuva global mensal, a partir de sensores infravermelhos, SSM/I e pluviômetros, com resolução de 0,25° x 0,25°	01/01/98

Fonte: NASA (2004)

JOBARD (2001), realizou um estudo comparativo entre diversos produtos de estimativa de chuva, incluindo o 3B42, descrito na tabela 1.9, e dados de redes densas de pluviômetros localizados na África. Esse estudo é apresentado detalhadamente por RAMAGE *et al.* (2000). Como resultado, foram verificados coeficientes de correlação da ordem de 0,72, 0,76 e 0,79 para escalas de cinco, dez e trinta dias, respectivamente, com resolução espacial de 2,5° x 2,5°. Já para a resolução de 1°x1°, os coeficientes aumentaram para 0,79 e 0,86, para escalas de dez e trinta dias respectivamente. Isso demonstra que quanto mais refinada for a escala (1°x1°), maior será a correlação da estimativa de chuva por satélite com a chuva monitorada na superfície, devido a maior amostragem da chuva pelo satélite na região de estudo.

CHOKNGAMWONG e CHIU (2004), compararam os produtos 3B42 e 3B43 com dados de uma rede pluviométrica na Tailândia, numa resolução de 1° x 1°, contendo cerca de dois pluviômetros por ponto de malha. Como resultado, encontraram um viés de 4 mm.mês⁻¹ para o 3B43, e de 28 mm.mês⁻¹ para o 3B42, demonstrando que os produtos que utilizam informações de múltiplas fontes (caso do 3B43), representam melhores estimativas.

NICHOLSON *et al.* (2003), realizaram um estudo de validação de alguns produtos *TRMM* para o ano de 1998, em uma rede altamente densa contendo 920 pluviômetros na África, numa malha com resolução de 2,5°. Os resultados mostraram

que os produtos *TRMM* apresentaram excelente aderência com os dados de superfície para a escala acumulada de cinco meses (maio a setembro) e para o mês de agosto, sendo este o mês mais úmido da série. O erro médio quadrático apresentado foi de 0,6 mm.dia⁻¹ para a resolução de cinco meses e 1 mm.dia⁻¹ para agosto, e o viés foi praticamente nulo. A performance para a resolução espacial de 1° foi excelente para escala de cinco meses e boa para o mês de agosto. Isso demonstra que os diversos produtos de estimativa de chuva listados na tabela 1.10 apresentam grande potencial para a Hidrologia tanto para períodos mais úmidos, quanto para períodos cobrindo diferentes estações do ano.

TABELA 1.10 – RESULTADOS DO ESTUDO DE NICHOLSON *ET AL.* (2003)

Produto	RMS (mm/dia) maio a setembro/1998	RMS (mm/dia) agosto/1998
TRMM combinada	0,7	0,9
TMI	1,6	2,5
PR	1,9	4,5
TMI+PR	2,0	4,5
SSM/I	1,5	2,7

1.1.3.3 *CMORPH*

O *CMORPH* é uma técnica que produz estimativas de chuva global em resoluções temporais e espaciais elevadas. É derivado basicamente de sensores microondas a partir de satélites de órbita polar (tabela 1.11), propagados no tempo e no espaço por meio de sensores infravermelhos (tabela 1.12). As estimativas derivadas do microondas são geradas pelos algoritmos de FERRARO (1997) para o sensor *SSM/I*, FERRARO *et al.* (2000) para o sensor *AMSU-B*, e KUMMEROW *et al.* (2001) para o sensor *TMI*. Uma característica importante desse método é a sua flexibilidade, onde estimativas de precipitação de qualquer fonte a partir do microondas pode ser incorporada, demonstrando o seu grande potencial no futuro onde um número cada vez

maior de satélites de órbita polar estarão em órbita. A tabela 1.13 apresenta as principais características do produto *CMORPH*, e a figura 1.5 ilustra a sua faixa de domínio na superfície da Terra.

TABELA 1.11 – SATÉLITES POLARES USADOS NO *CMORPH*

Satélite	Sensor	Resolução espacial (km)	Frequência (Ghz)	Altitude (km)
<i>TRMM</i>	<i>TMI</i>	4,6 x 6,9	10, 19, 21, 37, 85	402
<i>DMSP F13</i>	<i>SSM/I</i>	13 x 15	19, 22, 37, 85	830
<i>DMSP F14</i>	<i>SSM/I</i>	13 x 15	19, 22, 37, 85	830
<i>DMSP F15</i>	<i>SSM/I</i>	13 x 15	19, 22, 37, 85	830
<i>NOAA 15</i>	<i>AMSU-B</i>	13 x 15	89,150, 183	830
<i>NOAA 16</i>	<i>AMSU-B</i>	13 x 15	89,150, 183	830
<i>NOAA 17</i>	<i>AMSU-B</i>	13 x 15	89,150, 183	830

Fonte: JOYCE *et al.* (2004)

TABELA 1.12 – SATÉLITES GEOESTACIONÁRIOS USADOS NO *CMORPH*

Satélite	Localização do Nadir (no equador)	Comprimento de onda IR (μm)
<i>GOES 8</i>	75°W	10,7
<i>GOES 10</i>	135°W	10,7
<i>Meteosat 7</i>	0°	11,5
<i>Meteosat 5</i>	63°E	11,5
<i>GMS 5</i>	140°E	11,0

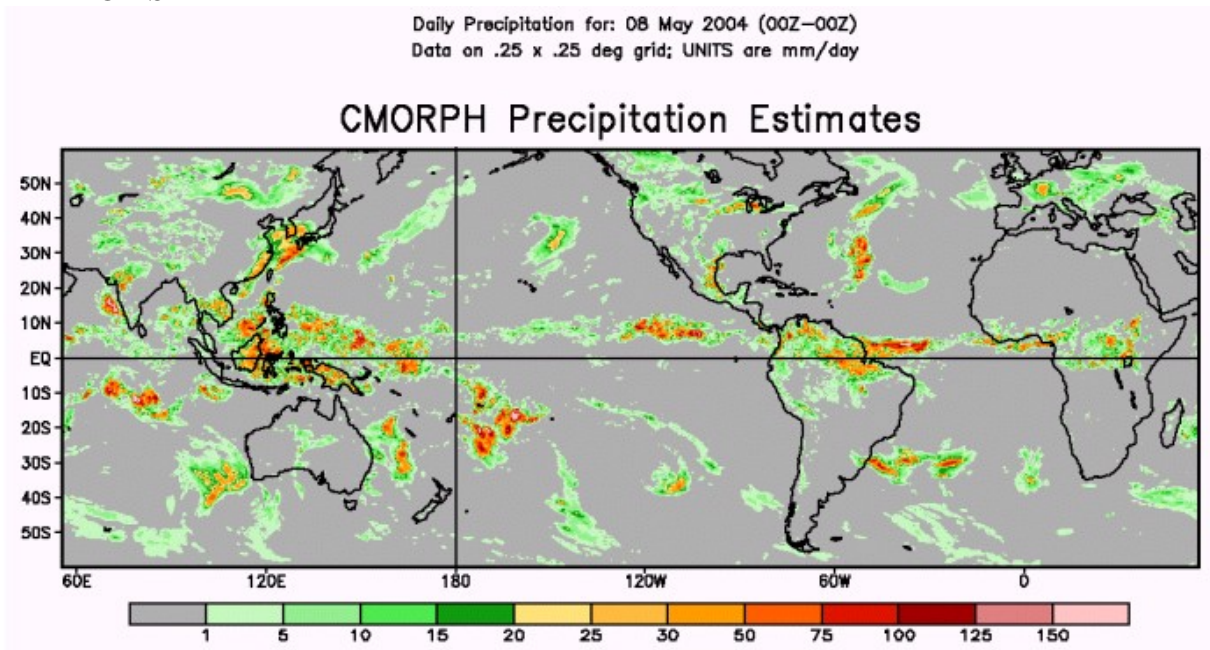
Fonte: JOYCE *et al.* (2004)

TABELA 1.13 – CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO *CMORPH*

Estimativa de chuva por satélite - <i>CMORPH</i>	
Resolução do <i>grid</i>	0,25°
Resolução temporal	30 minutos
Domínio	Global (60N-60S)
Período de registro	Dezembro/2002 - Presente

Fonte: CPC-NOAA (2004)

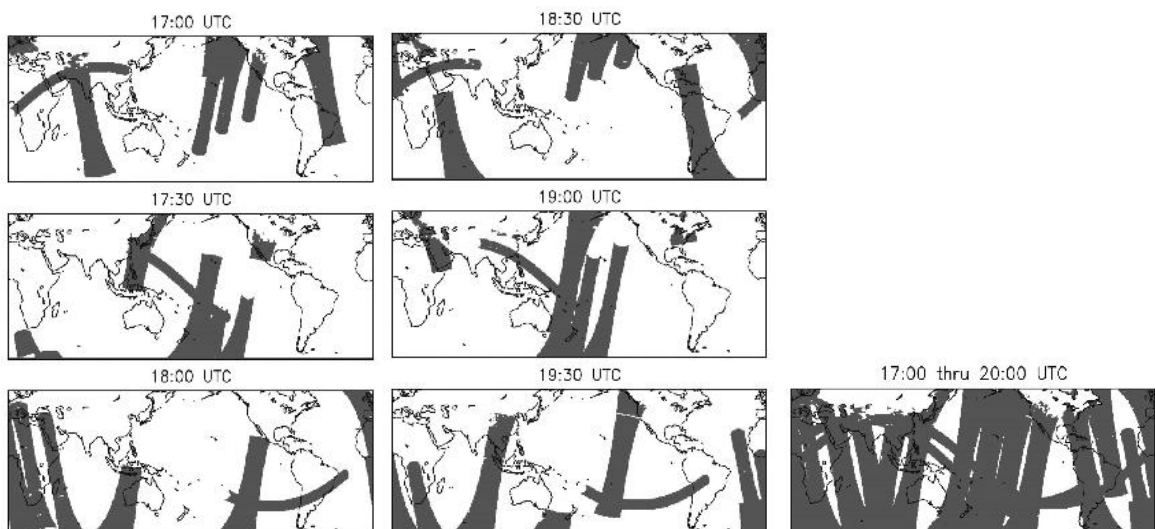
FIGURA 1.5 – EXEMPLO DO PRODUTO *CMORPH* DE ESTIMATIVA DE CHUVA POR SATÉLITE



Fonte: CPC-NOAA (2004)

A figura 1.6 (duas primeiras colunas) ilustra as varreduras dos sete satélites de órbita polar utilizados no *CMORPH*, para períodos de meia-hora consecutivas. Na última coluna é mostrada uma composição de todas as varreduras resultantes em um período de três horas.

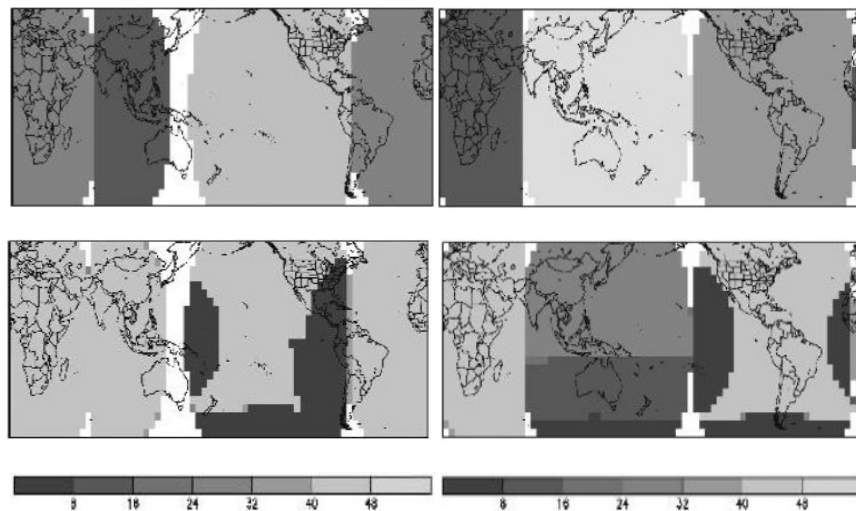
FIGURA 1.6 – VARREDURAS TÍPICAS DOS SENSORES MICROONDAS USADOS NO PRODUTO *CMORPH*



Fonte: JOYCE *et al.* (2004)

A figura 1.7 ilustra a cobertura espacial dos satélites de órbita geoestacionária usados no *CMORPH*, e a frequência de obtenção de cada imagem em um dia. No topo, à esquerda da figura, são representados os satélites *GOES*, *METEOSAT-7* e *METEOSAT-5*, e à direita, *GMS-5*, *GOES* e *METEOSAT-5*. Nas figuras abaixo são ilustrados os números de imagens disponíveis para o domínio dos satélites em um dia, sendo que a frequência diminui das cores mais claras para as mais escuras. A amostragem dos sensores infravermelhos é muito boa para os satélites *METEOSAT* e *GOES* e, em contrapartida, o satélite *GMS-5* fornece cerca de vinte imagens por dia no Hemisfério Sul.

FIGURA 1.7 – COBERTURA ESPACIAL E FREQUÊNCIA DE OBTENÇÃO DE IMAGENS DOS SATÉLITES GEOESTACIONÁRIOS UTILIZADOS NO PRODUTO *CMORPH*



Fonte: JOYCE *et al.* (2004)

Como a resolução espacial e temporal dos satélites de órbita polar ainda não são suficientes para representar adequadamente a faixa de domínio do *CMORPH*, bem como sua escala, são utilizados os sensores infravermelhos, a bordo dos satélites geoestacionários, por meio de matrizes de propagação, com a finalidade de propagar a varredura do microondas no tempo e no espaço. A disponibilidade global do sensor infravermelho a cada meia hora torna-o muito atrativo para ser usado na propagação da chuva derivada dos sensores microondas, produzindo campos espacialmente e

temporariamente mais completos para a faixa de domínio do *CMORPH*.

A resolução temporal dos satélites de órbita geoestacionária é de meia hora, intervalo este usado para geração do *CMORPH*. Baseado na quantidade de satélites disponíveis para estimar a chuva do *CMORPH*, se utiliza uma malha com resolução de $0,0727^\circ$ de latitude e longitude (cerca de 8 km no equador). Essa resolução reduzida é decorrente da necessidade de se representar a propagação dos sistemas de chuva em incrementos de meia hora. Assim, as estimativas de chuva derivadas do microondas (*MW*) são, primeiramente, mapeadas para o ponto da malha mais próximo à varredura, separadamente para cada tipo de satélite, em intervalos de meia hora. Depois disso, é calculada uma malha de chuva média, resultante de todos os satélites de órbita polar. Os nós que não dispõem de dados são preenchidos por meio de uma interpolação com o método do inverso do quadrado da distância, utilizando estimativas próximas ao ponto de malha.

É criada uma malha de apoio semelhante, porém com os dados dos sensores infravermelhos (*IR*), e essa malha é usada para fazer a propagação do microondas. No procedimento de propagação, o dado infravermelho é usado para detectar sistemas de nuvens e determinar os seus deslocamentos. A partir dessas duas variáveis (localização e deslocamento), é que se baseia a propagação da chuva derivada de microondas no tempo e no espaço, por meio de matrizes de propagação. A geração do produto *CMORPH* é representada através do fluxograma na figura 1.8.

FIGURA 1.8 – FLUXOGRAMA EXEMPLIFICANDO A GERAÇÃO DO PRODUTO *CMORPH*



Para o cálculo das matrizes de propagação é utilizado um método para calcular os vetores de advecção do sistema de nuvens, denominado *Cloud System Advection Vector (CSAV)*. Esse método é similar ao *WINDCO* (SMITH e PHILLIPS, 1972), que é um sistema desenvolvido para detectar e estimar o movimentos de nuvens a partir de satélites de órbita geoestacionária. As matrizes de propagação são determinadas a partir de correlações entre imagens sucessivas de satélites geoestacionários, e foi usado um processo de correlação espacial em um *grid* de 5°x5° de latitude e longitude. A correlação é feita entre as temperaturas de brilho infravermelha nas células de um mesmo domínio, em intervalos de tempo consecutivos. Esse processo é repetido em todas as direções, determinando assim, o *CSAV*.

O último processo para a geração do *CMORPH*, referenciado como “*morphing*”, consiste na ponderação das propagações feitas com a chuva derivada dos sensores microondas, levando em consideração o tempo. A figura 1.9 ilustra os processos de propagação e *morphing* usados no *CMORPH*, e pode ser explicado, resumidamente, da seguinte maneira:

(1) O processo de propagação e *morphing* é realizado entre duas imagens consecutivas geradas pela composição dos sensores microondas. Na figura 1.9, essas duas imagens consecutivas são observadas nos horários 03:30 GMT e 05:00 GMT;

(2) Representado na linha “a” da figura 1.9, o dado de satélite derivado dos sensores microondas, para a primeira observação (03:30 GMT), é propagado para frente no tempo $t+0,5h$ (04:00 GMT) e $t+1h$ (04:30 GMT) baseado nos vetores da matriz de propagação;

(3) Representado na linha “b”, um processo semelhante é realizado, porém em sentido inverso, para propagar a partir da segunda observação (05:00 GMT), de trás para frente, usando os mesmos vetores de propagação do item anterior;

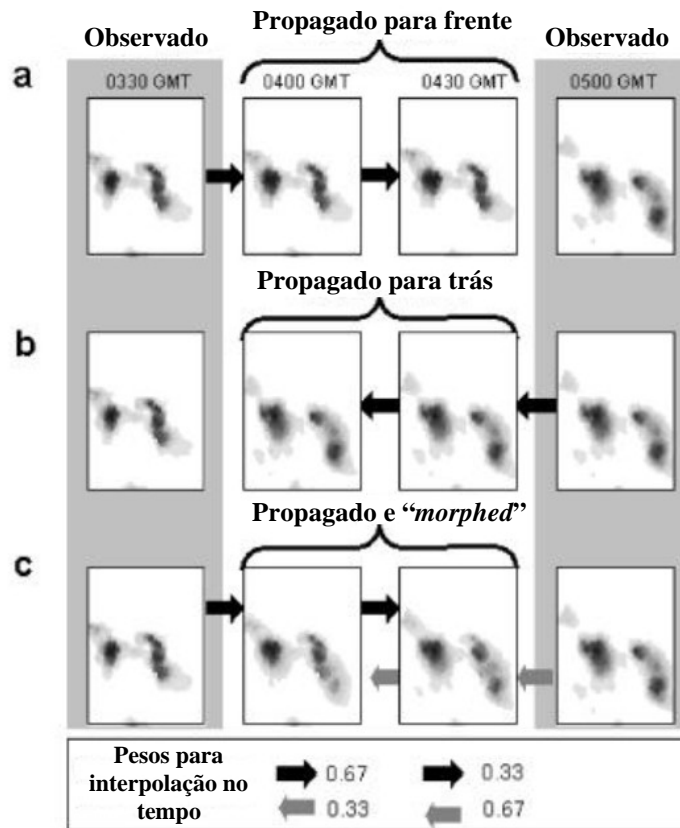
(4) O processo “*morphing*” consiste na aplicação de pesos inversamente

proporcionais aos intervalos de tempo nas duas propagações da chuva, por meio das equações (1.1) e (1.2).

$$Morphing_{\left(t+\frac{1}{2}h\right)} = 0,67 \cdot P_{frente}\left(t + \frac{1}{2}h\right) + 0,33 \cdot P_{trás}\left(t + \frac{1}{2}h\right) \quad (1.1)$$

$$Morphing_{(t+1h)} = 0,33 \cdot P_{frente}(t + 1h) + 0,67 \cdot P_{trás}(t + 1h) \quad (1.2)$$

FIGURA 1.9 – PROCESSOS DE PROPAGAÇÃO E “MORPHING” USADOS PARA A GERAÇÃO DO PRODUTO CMORPH



Fonte: JOYCE *et al.* (2004)

O produto CMORPH é disponibilizado operacionalmente via *ftp* no endereço: ftp://prd.ncep.noaa.gov/pub/precip/global_CMORPH (JOYCE *et al.*, 2004).

1.2 USO DE CHUVA ESTIMADA POR SATÉLITE NA MODELAGEM HIDROLÓGICA

A modelagem hidrológica de grandes bacias hidrográficas apresentou avanços significativos nas últimas décadas, principalmente como resultado de dois fatores: (1) o surgimento do computador, que passou a ser um facilitador dos cálculos associados às grandes bacias, discretizando pequenas unidades hidrológicas, e também com o uso de modelos complexos de simulação hidráulica e hidrológica em tempo real, e (2) avanços nos sensores e na tecnologia da comunicação permitiram o uso de dados hidrometeorológicos em tempo real obtidos em lugares remotos (TSONIS *et al.*, 1996).

Estudos recentes demonstram que o uso de tecnologias de sensoriamento remoto para o gerenciamento de recursos hídricos trazem grandes benefícios. Por exemplo, a cobertura espacial de satélite de uma região permite obter com uma certa exatidão, sem precedências, dados necessários, por exemplo, para utilização em modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão (KOSTER *et al.*, 1999).

TSONIS *et al.* (1996), investigaram o desempenho de estimativas de chuva por satélite derivadas de sensores infravermelhos em previsões de vazões em grandes bacias. Para isso, o modelo de previsão hidrológica do *National Weather Service* (NWS) foi calibrado com os dados de pluviômetro, e foram feitas simulações com os dados de satélite. O estudo concluiu que as diferenças entre a chuva medida por pluviômetros e a chuva estimada por satélite geram diferenças nas vazões calculadas pelo modelo, porém não muito significativas. Isso demonstrou um grande potencial das estimativas por satélite na modelagem hidrológica.

Em 1996, GUETTER *et al.*, usando o mesmo tipo de dado apresentado por TSONIS *et al.* (1996), calibraram um modelo hidrológico chuva-vazão para duas bacias com áreas de drenagem de 3.000 km² e 14.000 km², no Meio-Oeste dos Estados Unidos. Verificou-se nesse trabalho que a acurácia da previsão hidrológica usando os dados de satélite é função da escala da bacia, sendo que apresenta maiores correlações

entre a vazão simulada e a observada para bacias com maiores escalas.

GUETTER e GEORGAKAKOS (1997), avaliaram as incertezas nas previsões de vazões por meio do modelo Sacramento Modificado, usando estimativas diárias de chuva estimada por satélite, para três bacias com áreas variando entre 2.000 km² e 14.000 km², nos Estados Unidos. Concluiu-se desse trabalho que o procedimento de atualização de vazões, por meio de dados de superfície, melhora significativamente o desempenho do modelo hidrológico.

Em 1999, TSINTIKIDIS *et al.*, usaram um método de análise de frequência bi-espectral para estimar a precipitação média diária a partir de imagens do satélite *METEOSAT*, na resolução de três horas, com sensores na faixa do visível e infravermelho, sobre parte da bacia do Rio Nilo (180.000 km²). Foi realizada uma avaliação usando um modelo hidrológico conceitual semi-distribuído com resolução de 1°x1°. As principais conclusões deste estudo foram: (a) a resposta hidrológica da região é muito sensível ao tipo de precipitação usada (pluviômetro ou satélite), e (b) grande sensibilidade hidrológica com relação à variabilidade espacial. Quando é feita a calibração do modelo hidrológico com pluviômetros ou com chuva estimada por satélites, provavelmente diferentes parâmetros devam ser encontrados, requerendo, assim, uma recalibração.

A bacia do Rio Ivaí, localizado na região Sul do Brasil, foi usada para estudos de validação de estimativas de chuva por satélite em ARAUJO e GUETTER (2005a) e também para a análise da incerteza desse tipo de dado na modelagem hidrológica visando a previsão de vazões (GUETTER *et al.*, 2005). Foram concluídos desses estudos que a estimativa de chuva *CMORPH* superestima os campos de chuva média na bacia do Ivaí, e que a atualização de estado do modelo hidrológico diminui significativamente as incertezas das vazões simuladas com as estimativas de chuva por satélite.

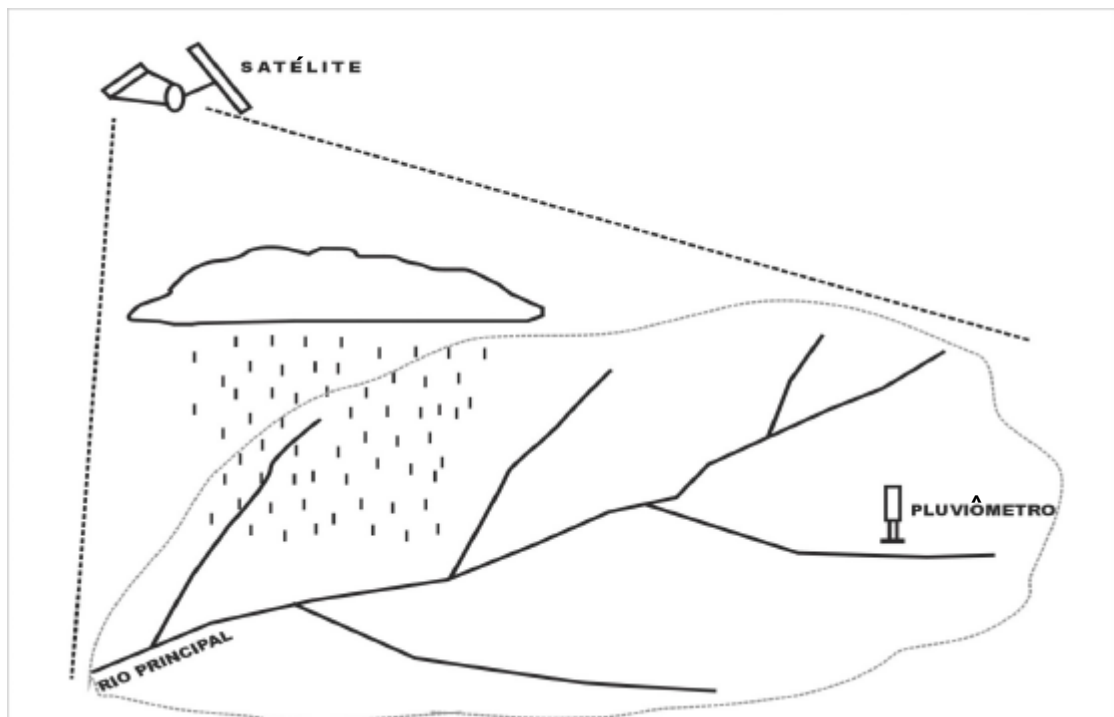
Com todo esse cenário de crescente desenvolvimento dos produtos de estimativas de chuva por satélite, torna-se uma realidade o uso desses dados na

modelagem hidrológica de grandes bacias hidrográficas.

1.3 INCERTEZAS NA ESTIMATIVA DA CHUVA

O monitoramento da chuva, seja por pluviômetros, seja por satélites, ou por qualquer outro meio, está sujeito a erros. Além disso, esses instrumentos podem estar medindo naturezas diferentes do fenômeno da precipitação que está realmente ocorrendo numa região (TUCCI, 1993). Um exemplo disso, pode ser visualizado na figura 1.10, que ilustra o monitoramento de chuva numa bacia hidrográfica por meio de pluviômetro e satélite. Dado um evento isolado de chuva localizado na exutória da bacia, de um lado, o satélite possui grande potencial em registrar a ocorrência desse fenômeno, devido a sua ampla cobertura espacial, e de outro, o pluviômetro, localizado na cabeceira da bacia, não sendo suficiente para monitorar a grande variabilidade espacial da chuva.

FIGURA 1.10 – REPRESENTAÇÃO COMPARATIVA DA MEDIÇÃO DE CHUVA POR PLUVIÔMETRO E SATÉLITE



1.3.1 Incertezas provenientes da chuva medida por pluviômetros

Os pluviômetros registram adequadamente a intensidade da precipitação, embora possuam baixa representatividade espacial, mesmo quando há uma rede densa. Os problemas de representatividade são maiores sob condições de chuvas de origem convectivas e isoladas, pois a precipitação pode ocorrer em áreas pequenas e com forte intensidade, podendo não ser registrada pelo equipamento (CALVETTI *et al*, 2003).

A água coletada por um pluviômetro é somente uma pequena amostra da precipitação que caiu numa certa área. Em geral, os erros aumentam com o aumento da intensidade da precipitação. Inversamente, os erros diminuem com um aumento da densidade da rede de pluviômetros, duração da tempestade, e área da bacia (PONCE, 1989).

A acurácia das informações dos pluviômetros é, também, influenciada por outros fatores. A elevação e a exposição do equipamento são os casos principais. A chuva para ser registrada depende da exposição do instrumento e de seu ângulo de incidência. O vento é provavelmente o mais importante fator na acurácia dos pluviômetros. O movimento do ar ao redor da estação reduz o armazenamento da chuva no instrumento (BRAS, 1990). A magnitude do erro depende intensamente da velocidade do vento, das características locais, do tipo de precipitação, e da temperatura. O monitoramento da chuva é dificultado em uma variedade de locais, tais como em regiões montanhosas, florestas, e em corpos de água (MAIDMENT, 1993).

1.3.2 Incertezas provenientes da chuva estimada por satélites

Para utilização dos produtos de chuva estimada por satélite apropriadamente, é importante se ter uma idéia de sua acurácia e das características dos erros esperados. Diferentes usuários possuem diferentes exigências de acurácia. Na Hidrologia, a preocupação é com a acurácia das estimativas do volume de chuva, bem como a

duração e o início de cada evento.

As estimativas de chuva por satélite são vantajosas pois possuem ampla cobertura espacial, porém, apresentam algumas restrições, entre elas a baixa resolução temporal, para os casos dos sensores microondas. Além disso, o sensoriamento remoto da chuva está sujeito a erros causados por diversos fatores, desde os erros instrumentais, como por exemplo, erros de calibração do equipamento, as medições de ruídos, até a alta complexibilidade e variabilidade na relação de medida dos parâmetros da chuva. As incertezas provenientes da chuva por satélite dependem também de fatores como a localização, estação do ano, ou tipo de chuva, mas estão sempre presentes devido à pequena cobertura dos satélites de órbita polar (JOBARD, 2001; JOYCE *et al.*, 2004).

Os atuais sensores de microondas possuem tempo de revisita máximo da ordem de nove horas sobre os trópicos, porém, esta é uma região do mundo bastante desprovida de monitoramento de chuva. Nestes casos, estimativas de chuva de meia-hora a partir de sensores infravermelhos, podem ser usadas para reduzir potencialmente as incertezas encontradas nos intervalos em que os dados microondas não estão disponíveis. No entanto, a fraca relação entre as observações infravermelhas com os processos da precipitação, estão associados com incertezas significativas em resoluções temporais e espaciais altas (HOSSAIN *et al.*, 2004).

Diversos produtos de estimativa de chuva derivados de satélite são validados sobre os Estados Unidos por meio de estações convencionais da *Climate Prediction Center (CPC)* como referência, que contêm cerca de 7.000 estações (JANOWIAK *et al.*, 2004). Outros programas de validação são listados abaixo (IPWG, 2005):

- a. *IPWG Sponsored Validation*
- b. *AMSR-E Validation Rain Gauge Network in Iowa, USA*
- c. *BoM Weather Forecasting Group*
- d. *IPWG European Comparison*
- e. *NOAA's National Center for Environmental Predictions (NCEP)*

1.3.3 Impacto da incerteza da chuva na modelagem hidrológica

A chuva é uma das mais importantes variáveis hidrológicas, visto que pode ser usada como dado de entrada para diversos tipos de modelos hidrológicos, onde a precisão destes, dependerá, significativamente da precisão da chuva.

As incertezas nas medições da precipitação são, provavelmente, inferiores às incertezas provenientes na calibração do modelo hidrológico (PONCE, 1989). A chuva é apenas uma das diversas incertezas inseridas nos mecanismos que compõem o balanço hídrico do modelo, resultando assim, em um número ainda maior de incertezas na modelagem hidrológica como um todo.

A variabilidade da chuva tem sido um dos grandes responsáveis por incertezas na previsão hidrológica de vazões (DROEGEMEIER *et al.*, 2000). Esta variabilidade, acrescida à natureza não-linear dos processos de transferência de energia e massa que controlam o clima de uma região, prejudicam, em demasia, previsões mais precisas nas mais variadas escalas de tempo. Por isso, a precisão da estimativa de chuva é de grande importância, particularmente para aplicações de modelagem hidrológica (LARSON e PECK, 1974; PECK, 1980).

Segundo MINE (1998), a definição da variabilidade espacial e temporal da chuva é muito importante na resposta hidrológica da bacia hidrográfica. Fatores como velocidade e sentido de deslocamento do temporal, correlação temporal e espacial e considerações de que a chuva é um processo não estacionário, isto é, a média e a variância variam com o tempo em todos os pontos, são fatores relevantes. Preocupações desse tipo devem ser dadas quanto à influências no volume escoado, tempo de pico e vazão de pico. A distribuição espacial da chuva tem influência marcante na forma dos hidrogramas, portanto, melhores resultados estão vinculados a uma maior representatividade da rede pluviométrica.

Na modelagem hidrológica, estudos mostram que a distribuição espacial da chuva deve ser levada em conta em qualquer escala de bacias hidrográficas. Isso influencia não somente nos volumes do escoamento superficial como também nas

vazões de pico, e também no tempo de deslocamento do hidrograma. Além disso, diminui significativamente a incerteza na estimativa dos parâmetros do modelo hidrológico, e conseqüentemente na estimativa dos extremos (ARNAUD *et al.*, 2002).

A *Global Precipitation Mission (GPM)* vai dispor de uma constelação de satélites com sensores de microondas passivos, possibilitando o desenvolvimento de produtos de chuva global em escalas temporais mais refinadas. Tais resoluções propiciarão diversas oportunidades para a redução das incertezas na modelagem hidrológica em bacias com estações pluviométricas esparsas (HOSSAIN *et al.*, 2004).

2 METODOLOGIA

2.1 ESTATÍSTICAS PARA VALIDAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE CHUVA

2.1.1 Estatísticas convencionais

São calculadas estatísticas convencionais para validação da chuva estimada por satélite, tais como: chuva média, chuva máxima, chuva mínima, desvio padrão, número de dias de chuva, número de dias sem chuva, chuva acumulada, gráfico chuva de satélite vs chuva de pluviômetro e histogramas.

2.1.2 Estatísticas recomendadas pelo *IPWG*

São calculadas as estatísticas para validação da chuva estimada por satélite recomendadas pelo *IPWG* por meio do *WWRP/WGNE Joint Working Group on Verification (World Weather Research Programme/Working Group on Numerical Experimentation)* (WWRP/WGNE, 2005).

As estatísticas *IPWG* são divididas em dois grupos: (A) Estatísticas de ocorrência de chuva e (B) Estatísticas quantitativas de chuva. Para avaliação da ocorrência da chuva, são utilizadas as estatísticas: (1) *BIAS* da frequência, (2) Probabilidade de detecção, (3) Probabilidade de falso alerta e (4) Discriminante de *Hanssen & Kuipers*. Já para avaliação dos erros quantitativos de chuva, são utilizadas as estatísticas: (1) *BIAS*, (2) Erro médio, (3) Erro médio quadrático e (4) Coeficiente de correlação.

2.1.2.1 Estatísticas de ocorrência

As estatísticas de ocorrência estão associadas à ocorrência ou não de um

evento de chuva na bacia. Para isso é estabelecido um valor limite, neste caso igual a 1 mm.dia^{-1} , ou seja, para registros de chuva iguais ou superiores a esse valor, é caracterizado como dia chuvoso. Todas as estatísticas referentes a esse item são baseadas numa tabela de contingência (tabela 2.1), que contém a frequência dos eventos chuvosos e de estiagem, para as quatro combinações de concordância entre os dados de satélite e pluviômetro. As combinações são classificadas da seguinte maneira:

- (a) Acerto de chuva: quando o satélite e o pluviômetro registram a ocorrência de chuva na bacia, ou seja, ambos indicam intensidade de chuva igual ou superior a 1 mm.dia^{-1} ;
- (b) Acerto de estiagem: quando o satélite e o pluviômetro não registram a ocorrência de chuva na bacia em um determinado dia;
- (c) Falha: quando o satélite não registra a ocorrência de chuva na bacia, em discordância com o pluviômetro;
- (d) Falso alerta: quando o satélite registra a ocorrência de chuva na bacia, em discordância com o pluviômetro;

TABELA 2.1 – TABELA DE CONTINGÊNCIA USADA PARA O CÁLCULO DAS ESTATÍSTICAS DE OCORRÊNCIA

Tabela de contingência		Rede de pluviômetros	
		Chuva $\geq 1\text{mm}$	Chuva $< 1\text{mm}$
Satélite	Chuva $\geq 1\text{mm}$	Acerto de chuva	Falso alerta
	Chuva $< 1\text{mm}$	Falha	Acerto de estiagem

A tabela de contingência é usada para distinguir quais tipos de erros estão presentes nos dados. Um perfeito sistema só apresentaria o acerto de chuva e o acerto de estiagem, sem a presença de falhas e falsos alertas.

2.1.2.1.1 *BIAS* da frequência

O *BIAS* da frequência ($BIAS_f$) funciona como um indicador de subestimação ou superestimação do número de eventos chuvosos que são corretamente identificados pela estimativa por satélite. Para uma perfeita detecção desses eventos chuvosos, o valor do $BIAS_f$ é igual à unidade. Se o satélite detecta um número menor de eventos chuvosos, então o valor do $BIAS_f$ é menor que a unidade. Da mesma maneira, se o satélite detecta um número maior de eventos chuvosos, o valor do $BIAS_f$ é maior que a unidade.

$$BIAS_f = \frac{\textit{Acerto de chuva} + \textit{Falso alerta}}{\textit{Acerto de chuva} + \textit{Falha}} \quad (2.1)$$

2.1.2.1.2 Probabilidade de detecção

A probabilidade de detecção (PD) representa o percentual em que os dias chuvosos são corretamente identificados pela estimativa de chuva por satélite. Para uma perfeita detecção, o valor de PD deve ser igual a unidade.

$$PD = \frac{\textit{Acerto de chuva}}{\textit{Acerto de chuva} + \textit{falhas}} \quad (2.2)$$

2.1.2.1.3 Probabilidade de falso alerta

A probabilidade de falso alerta (PF) representa o percentual em que os dias de estiagem não são corretamente identificados pela estimativa de chuva por satélite, ou seja, representa o percentual de alarmes falsos de chuva.

$$PF = \frac{\text{Falso alerta}}{\text{Acerto de chuva} + \text{Falso alerta}} \quad (2.3)$$

2.1.2.1.4 Discriminante de *Hanssen & Kuipers*

O discriminante de *Hanssen & Kuipers* (HK), também conhecido como *True skill statistic*, indica a eficiência da estimativa por satélite de separar os eventos chuvosos dos eventos de estiagem. O alcance de HK varia de -1 a 1, sendo que para uma eficiência perfeita, o primeiro termo da direita da equação 2.4 deve ser unitário, e o segundo, nulo. Nesse índice são utilizados todos os elementos da tabela de contingência.

$$HK = \frac{\text{Acerto de chuva}}{\text{Acerto de chuva} + \text{Falhas}} - \frac{\text{Falso alerta}}{\text{Falso alerta} + \text{Acerto de estiagem}} \quad (2.4)$$

2.1.2.2 Estatísticas quantitativas

As estatísticas quantitativas de chuva estão associadas às diferenças nas intensidades dos dados obtidos pelos satélites e pelos pluviômetros.

2.1.2.2.1 *BIAS*

O *BIAS* representa como as estimativas de chuva por satélite (*Z*) se relacionam com as estimativas obtidas pelos pluviômetros (*P*). Valores de *BIAS* maiores que a unidade indicam que, em média, o satélite superestima a chuva obtida pelos pluviômetros, e para valores menores que a unidade, significa que ocorreu uma subestimação.

$$BIAS = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P} \quad (2.5)$$

2.1.2.2.2 Erro médio

O erro médio (EM) representa a diferença média entre as intensidades de chuva por satélite e pluviômetro, e é obtida pela equação 2.6.

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P - Z \quad (2.6)$$

2.1.2.2.3 Erro médio quadrático

O erro médio quadrático (EMQ), avalia o erro através do quadrado das diferenças entre os dados de satélite e pluviômetro. Ele possui maior influência sobre erros de maior magnitude, sendo muito útil nos casos em que grandes erros são indesejáveis.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P - Z)^2} \quad (2.7)$$

2.1.2.2.4 Coeficiente de correlação

O coeficiente de correlação (r), conforme a equação 2.8, representa a associação linear entre as estimativas de chuva por satélite e pluviômetro. O alcance varia de -1 a 1, com perfeita associação igual a unidade.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (P - \bar{P})(Z - \bar{Z})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P - \bar{P})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Z - \bar{Z})^2}} \quad (2.8)$$

2.2 ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA INCERTEZA DA CHUVA ESTIMADA POR SATÉLITES

2.2.1 Metodologia

A metodologia da análise probabilística da incerteza da chuva é descrita por GEORGAKAKOS (1992), onde foi aplicada em previsões de cheias em tempo real, usando estimativas de chuva por radar. O objetivo dessa análise é quantificar as incertezas associadas às estimativas de chuva por satélite através de estruturas probabilísticas, em sistemas de alerta de cheias.

Primeiramente, é idealizado um sistema de alerta de cheias em uma bacia, onde o volume de chuva p^* (para um tempo de recorrência T_R) é considerado como o valor limite de chuva responsável pela ocorrência de enchentes na bacia. Ou seja, nos casos em que o volume da chuva média acumulada na bacia é superior a p^* , um alerta de cheia deve ser feito. A assimilação das estimativas de chuva por satélite em tempo real é utilizada como parâmetro de referência desse sistema.

A análise probabilística da incerteza da chuva por satélite é baseada na chuva “real”, ou seja, a chuva que realmente ocorreu na bacia, e é quantificada por meio das seguintes estatísticas:

(a) *BIAS*: representado pela chuva média na bacia estimada por satélite normalizada pela chuva média “real” \bar{P} , ou seja, $\frac{\bar{Z}}{\bar{P}}$.

(b) Desvio padrão: refere-se ao desvio padrão da chuva estimada por satélite

normalizada pela chuva média “real” \bar{P} , ou seja, $\frac{\text{Desvio padrão}}{\bar{P}}$.

(c) Probabilidade de detecção (P_D): refere-se à probabilidade da não ocorrência de um evento de cheia na bacia, condicionado ao acerto das estimativas por satélite, ou seja, dado que o satélite não tenha acusado nenhum evento de cheia na bacia, qual a probabilidade dessa informação ser verdadeira.

$$P_D = \text{Prob}(P < p^* \mid Z < p^*) \quad (2.9)$$

(d) Probabilidade de alarme falso (P_A): refere-se à probabilidade da não ocorrência de um evento de cheia na bacia, condicionado à falha das estimativas de satélite, ou seja, dado que o satélite tenha acusado um evento de cheia na bacia, qual a probabilidade dessa informação ser falsa.

$$P_A = \text{Prob}(P < p^* \mid Z \geq p^*) \quad (2.10)$$

Assim, são analisadas duas situações, a primeira em que o satélite indica corretamente o regime normal de chuvas na bacia, sem ocorrência de cheias (P_D), e a segunda em que o satélite comete um erro, indicando um alarme falso de cheia (P_A). Para o cálculo analítico das estatísticas descritas acima, são assumidas as seguintes hipóteses para a chuva estimada por satélite e pluviômetro:

(a) Admite-se que a chuva “real” segue uma distribuição exponencial de parâmetro r (em unidades de chuva), conforme equação 2.11;

$$f_p(P) = r \cdot e^{-r \cdot P} \quad (2.11)$$

(b) Admite-se uma medida de erro para a estimativa de chuva por satélite conforme a equação 2.12, de modo que o dado de satélite sempre superestime a chuva “real”. Na equação, S é uma constante e e , uma variável aleatória de média zero, uniformemente distribuída sobre o intervalo $[-d, +d]$, conforme equação 2.13.

$$Z = P \cdot 10^{Se} \quad (2.12)$$

$$f_e(e) = \frac{1}{2d} \quad (2.13)$$

Todas as estatísticas são calculadas no intervalo de distribuição do erro da chuva estimada por satélite, ou seja, $[-d, +d]$.

2.2.1.1 BIAS

As equações 2.14 a 2.25 apresentam o desenvolvimento analítico para o cálculo do *BIAS* das estimativas de chuva em d . A média de uma variável aleatória contínua, neste caso a chuva, é representada pelo seu valor esperado, conforme equação 2.14 (DEVORE, 2000).

$$m_x = E[X] = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) dx \quad (2.14)$$

Como a estimativa de chuva por satélite (Z) se relaciona com a chuva “real” na equação 2.12, o cálculo do valor esperado deve ser explicitado na forma condicionada, conforme a equação 2.15 (DEVORE, 2000).

$$E\{Z|P\} = \int_{-\infty}^{\infty} z \cdot f_{z|p}(z|P) dz \quad (2.15)$$

A partir da distribuição derivada de probabilidade (equações 2.16 e 2.17), sendo $y = g(x)$ e $x = g^{-1}(y)$, e utilizando a regra de *Leibniz* (equação 2.18), pode-se determinar $f_{Z|P}$, na equação 2.19.

$$F_y(y) = \frac{d}{dy} [F_x(g^{-1}(y))] \quad (2.16)$$

$$f_y(y) = \frac{d}{dy} [F_x(g^{-1}(y))] = \frac{d}{dy} \left[\int_{-\infty}^{g^{-1}(y)} f_x(x) dx \right] \quad (2.17)$$

$$f_y(y) = \frac{dg^{-1}(y)}{dy} \cdot f_x(g^{-1}(y)) \quad (2.18)$$

$$f_{Z|P}(Z|P) = \left| \frac{dg^{-1}(z)}{dz} \right| f_e(g^{-1}(z)) \quad (2.19)$$

A resolução da equação 2.19 é feita a partir da equação 2.12, pela representação do erro da estimativa de satélite, resultando na equação 2.20. Derivando a equação 2.20, obtém-se a equação 2.21.

$$e = \frac{1}{S} \log\left(\frac{Z}{P}\right) = \frac{1}{S \cdot \ln 10} \ln\left(\frac{Z}{P}\right) = g^{-1}(Z) \quad (2.20)$$

$$\frac{dg^{-1}(Z)}{dZ} = \frac{1}{S \cdot \ln 10} \cdot \frac{1}{Z} \quad (2.21)$$

Substituindo as equações 2.13 e 2.21 em 2.19, obtém-se a equação 2.22.

$$f_{Z|P}(Z|P) = \left(\frac{1}{Z \cdot S \cdot \ln 10} \right) \left(\frac{1}{2d} \right) \quad (2.22)$$

Inserindo a equação 2.22 em 2.15, e por meio do desenvolvimento pelas equações 2.23 e 2.24, é obtida a expressão que calcula a variação do *BIAS* das estimativas de chuva em função de \mathbf{d} , representada na equação 2.25.

$$E\{Z|P\} = \frac{1}{\ln 10} \int_{P_{10^{S(-d)}}}^{P_{10^{S(d)}}} Z \frac{1}{Z.S.2.\mathbf{d}} dZ \quad (2.23)$$

$$E\{Z|P\} = \frac{1}{S.\ln 10} \left(\frac{1}{2\mathbf{d}} \right) P.[10^{S(d)} - 10^{S(-d)}] \quad (2.24)$$

$$\frac{E\{Z|P\}}{\bar{P}} = \frac{1}{S.\ln 10} \left(\frac{1}{2\mathbf{d}} \right) [10^{S(d)} - 10^{S(-d)}] = \text{BIAS} \quad (2.25)$$

Na equação 2.25, supondo a constante S igual a um, são calculados os valores da estimativa média de satélite normalizada pela chuva “real” \bar{P} , em função de \mathbf{d} , representando o *BIAS*. O valor adotado de S igual a unidade se refere apenas à adimensionalização do erro representado por \mathbf{e} , sendo que S representa um fator de escala entre o erro \mathbf{e} e a razão entre as estimativas de chuva derivados da equação 2.12.

2.2.1.2 Desvio padrão

As equações 2.26 a 2.32 apresentam o desenvolvimento analítico para o cálculo do desvio padrão da estimativa de chuva em função de \mathbf{d} . O desvio padrão é calculado na forma de variância, onde a sua representação para uma variável aleatória contínua é apresentada na equação 2.26 (DEVORE, 2000).

$$\mathbf{s}_x^2 = \text{VAR}\{X\} = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mathbf{m})^2 . f(x) dx = E[(X - \mathbf{m})^2] \quad (2.26)$$

Como a estimativa de chuva por satélite (Z) se relaciona com a chuva “real” na equação 2.12, o cálculo da variância também é explicitado na forma condicionada, conforme a equação 2.27 (DEVORE, 2000).

$$VAR\{Z|P\} = \int_{-\infty}^{\infty} (z - E\{Z|P\})^2 \cdot f_{z|p}(z|P) dz = E\{Z^2\} - (E\{Z|P\})^2 \quad (2.27)$$

Desenvolvendo a equação 2.27, obtém-se a equação 2.28, e integrando em relação à Z , obtém-se a equação 2.29.

$$VAR\{Z|P\} = \int_{-\infty}^{\infty} Z^2 f(Z|P) dz - (E\{Z|P\})^2 \quad (2.28)$$

$$VAR\{Z|P\} = \int_{P \cdot 10^{S(-d)}}^{P \cdot 10^{S(d)}} \frac{Z^2}{Z \cdot S \cdot \ln 10 (2d)} dZ - (E\{Z|P\})^2 \quad (2.29)$$

As equações 2.30 e 2.31 representam o desenvolvimento da equação 2.29. A equação 2.32 fornece a expressão que calcula o desvio padrão da chuva estimada por satélite normalizada pela chuva “real” (\bar{P}).

$$VAR\{Z|P\} = \frac{Z^2}{4 \cdot d \cdot S \cdot \ln 10} \left[\int_{P \cdot 10^{S(-d)}}^{P \cdot 10^{S(d)}} - \left(\frac{1}{2 \cdot d \cdot S \cdot \ln 10} \right)^2 P^2 (10^{S(d)} - 10^{S(-d)})^2 \right] \quad (2.30)$$

$$VAR\{Z|P\} = \frac{P^2 [10^{2S(d)} - 10^{2S(-d)}]}{4 \cdot d \cdot S \cdot \ln 10} - \left(\frac{P}{2 \cdot d \cdot S \cdot \ln 10} \right)^2 [10^{2S(d)} - 10^{2S(-d)} - 2] \quad (2.31)$$

$$\frac{DESVPAD\{Z|P\}}{\bar{P}} = \left\{ \frac{10^{2Sd} - 10^{-2Sd}}{4dS \ln 10} - \left(\frac{1}{2dS \ln 10} \right)^2 [10^{2Sd} + 10^{-2Sd} - 2] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.32)$$

Na equação 2.32, supondo a constante S igual a 1, são calculados os valores do desvio padrão da estimativa de satélite normalizada pela chuva “real”, em função de d .

2.2.1.3 Probabilidade de detecção e falso alerta

O cálculo das probabilidades de detecção e alarme falso (equações 2.9 e 2.10), é feito a partir das equações 2.11 e 2.12, que representam respectivamente, a distribuição exponencial de probabilidades da chuva “real” e a relação de erro entre as estimativas de chuva.

A equação 2.33 representa a função acumulada da distribuição exponencial da chuva “real”, com o parâmetro r igual a p^* .

$$F_p(P) = 1 - e^{-p^*P} \quad (2.33)$$

Da equação 2.12 é obtida a relação entre Z e P , e fazendo $S=1$, obtém-se a equação 2.35.

$$\log \frac{Z}{P} = S \cdot e \quad (2.34)$$

$$\log Z = \log P + e \quad (2.35)$$

A partir daí a solução é feita por simulações, utilizando o método de Monte Carlo. O método de Monte Carlo consiste na realização de simulações com a função de distribuição de probabilidade e a relação de erro (equações 2.11 e 2.12), utilizando como argumento um número “ n ” de números aleatórios gerados entre 0 e 1, para

representar as probabilidades, e fazendo com que a simulação se repita por “k” vezes. Com isso são obtidas diferentes amostras aleatórias, cada uma de tamanho “n”. Para cada situação, calcula-se a função de distribuição de probabilidade condicionada, e constrói-se um histograma com os resultados para o intervalo de 0 a 1. Por meio desse histograma que é fornecida a distribuição aproximada da amostragem estatística, onde quanto maior o valor de “k”, maior é a aproximação com o valor real (DEVORE, 2000). O procedimento para o cálculo de P_D e P_A segue os seguintes passos:

- (a) Geração de um número aleatório entre 0 e 1;
- (b) Na equação 2.33, fazendo a probabilidade $F_P(P)$ igual ao número aleatório gerado no item anterior, obtém-se o valor de P;
- (c) Na equação 2.35, com o valor de P obtido no item anterior, calcula-se Z no primeiro intervalo de distribuição do erro e , isto é, em d ;
- (d) Para o cálculo de P_D :
 - (d1) Verifica se o valor calculado de P é inferior a um p^* arbitrado. Se positivo, registra a ocorrência;
 - (d2) Verifica se o valor calculado de Z é inferior ao mesmo p^* arbitrado no item anterior. Se positivo, registra a ocorrência;
- (e) Repetição dos itens “a” até “d2” por “n” vezes (100.000 vezes, neste caso);
- (f) A probabilidade P_D é calculada a partir da relação entre os valores acumulados obtidos nos itens “d1” e “d2”.

O mesmo procedimento é feito para o cálculo da probabilidade de falso alerta, porém o item “d2” é substituído por “d2’ ”:

- (d2’) Verifica se o valor calculado de Z é igual ou superior ao mesmo p^* arbitrado no item anterior. Se positivo, registra a ocorrência.

2.3 ANÁLISE DA INCERTEZA DA CHUVA NA MODELAGEM HIDROLÓGICA

2.3.1 Modelo Hidrológico

Para análise da incerteza da chuva na modelagem hidrológica, é utilizado o modelo hidrológico 3R (*Rainfall-Runoff-Routing*), descrito em GUETTER *et al.* (1996). Este modelo é uma adaptação do modelo Sacramento Modificado (GEORGAKAKOS *et al.*, 1988), em operação no NWS dos EUA.

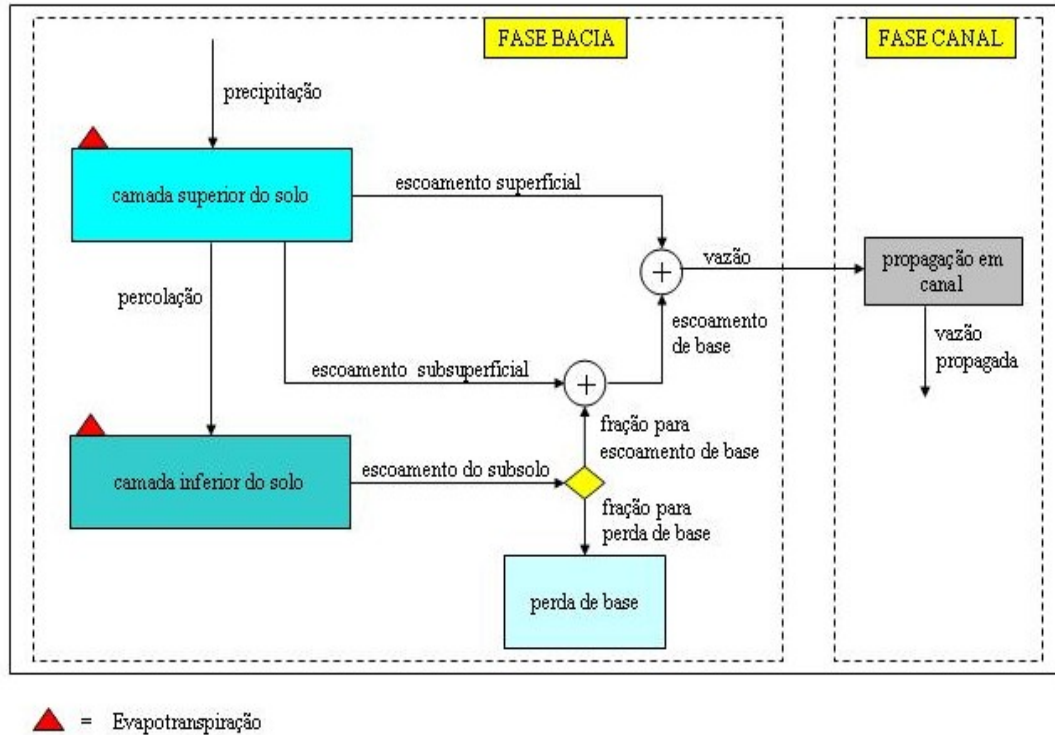
No início, o 3R era classificado como um modelo conceitual e concentrado, sendo apropriado para aplicações em bacias de cabeceira. Posteriormente, o modelo passou a ser classificado como semi-distribuído, com a incorporação de um algoritmo de propagação de vazões, do tipo onda cinemática. Ele possui como dados de entrada a chuva e a evapotranspiração médias na bacia, e como dado de saída, a vazão total no canal.

Os componentes que contribuem para produção da vazão total de saída do modelo são: escoamento superficial, escoamento sub-superficial (através das camadas superiores do solo), e escoamento subterrâneo (ver figura 2.1). O modelo subdivide a bacia em duas zonas: superior e inferior. A zona superior simula a água armazenada nas camadas superiores do solo, disponível para evapotranspiração, percolação, escoamento superficial, e escoamento sub-superficial. A zona inferior simula o armazenamento de água subterrânea.

O 3R difere do modelo de Sacramento, basicamente, por permitir apenas um compartimento de solo em cada zona (PECK, 1976, BAE e GEORGAKAKOS, 1992), e utiliza a mesma função de percolação não-linear para transferência de água da zona superior para a zona inferior. As equações governantes do modelo são mostradas nas equações 2.36 a 2.44, sendo que 2.36 e 2.37 se referem às equações de estado e 2.38 a 2.44, as equações de fluxo, ambas da fase bacia. As tabelas 2.2 e 2.3 apresentam as

notações das equações e a descrição de seus parâmetros.

FIGURA 2.1 – ESTRUTURAÇÃO DOS COMPONENTES DAS FASES BACIA E CANAL DO MODELO 3R



Fonte: KRAUSKOPF NETO ET AL. (2005)

$$\frac{dX_1}{dt} = P - SR - PC - ET_1 - I \quad (2.36)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = PC - ET_2 - GW \quad (2.37)$$

$$SR = P \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right)^{m_1} \quad (2.38)$$

$$I = c_1 X_1 \quad (2.39)$$

$$ET_1 = PET \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right) \quad (2.40)$$

$$PC = c_2 X_2^0 \left[1 + c_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2} \right] \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right) \quad (2.41)$$

$$ET_2 = (PET - ET_1) \left(\frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_3} \quad (2.42)$$

$$GW = c_2 X_2 \quad (2.43)$$

$$BF = \left(\frac{1}{1+m} \right) GW + I \quad (2.44)$$

TABELA 2.2 – NOTAÇÃO DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES DO MODELO HIDROLÓGICO (FASE BACIA)

Símbolo	Definição	Unidade
X_1	Armazenamento na camada superior do solo	mm
X_2	Armazenamento na camada inferior do solo	mm
P	Precipitação	mm.dia ⁻¹
SR	Escoamento superficial	mm.dia ⁻¹
PC	Percolação	mm.dia ⁻¹
ET_1	Evaporação real	mm.dia ⁻¹
I	Escoamento sub-superficial	mm.dia ⁻¹
ET_2	Transpiração	mm.dia ⁻¹
GW	Escoamento subterrâneo	mm.dia ⁻¹
PET	Evapotranspiração potencial	mm.dia ⁻¹

Um modelo de propagação cinemática em canal é utilizado para distribuir no tempo a vazão produzida no canal pelo componente hidrológico do 3R. Uma cascata contendo dois reservatórios conceituais é usada para simular o escoamento de uma rede de corrente natural. Esse modelo é baseado na formulação originalmente proposta por MEIN *et al.* (1974) e levado para a forma de espaço de estado por GEORGAKAKOS e BRAS (1982). O modelo de propagação em canal contém dois parâmetros que definem a relação entre o armazenamento e a vazão de saída de cada

reservatório conceitual. Supondo que os reservatórios sejam lineares, assim, o modelo de propagação requer a calibração de apenas um parâmetro, conhecido como a . As equações de propagação cinemáticas são mostradas nas equações 2.45 e 2.46, onde X representa o armazenamento do reservatório conceitual (mm) e a é o coeficiente de propagação (por dia), conforme as notações nas tabelas 2.4 e 2.5.

$$\frac{dX_3}{dt} = (SR + BF) - a(X_3)^m \quad (2.45)$$

$$\frac{dX_4}{dt} = a(X_3)^m - a(X_4)^m \quad (2.46)$$

TABELA 2.3 – PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES DO MODELO HIDROLÓGICO (FASE BACIA)

Símbolo	Definição	Unidade
X_1^0	Capacidade de armazenamento na camada superior do solo	mm
X_2^0	Capacidade de armazenamento na camada inferior do solo	mm
m_1	Expoente da função de escoamento superficial	Adim.
c_1	Coefficiente de recessão do escoamento sub-superficial	dia ⁻¹
c_2	Coefficiente de recessão do escoamento de base	dia ⁻¹
c_3	Taxa de drenagem da camada inferior do solo, em fração do armazenamento por dia	Adim.
m_2	Expoente da função de percolação	Adim.
m_3	Expoente da função de transpiração proveniente da camada inferior do solo	Adim.
m	Fração do escoamento de base para recarga do aquífero	Adim.

TABELA 2.4 – PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES DO MODELO HIDROLÓGICO (FASE CANAL)

Símbolo	Definição	Unidade
a	Coefficiente linear do modelo de propagação	Adim.
m	Expoente do modelo de propagação	Adim.

TABELA 2.5 – NOTAÇÃO DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES DO MODELO HIDROLÓGICO (FASE CANAL)

Símbolo	Definição	Unidade
X_3	Armazenamento no primeiro reservatório conceitual de propagação de vazão	mm
X_4	Armazenamento no segundo reservatório conceitual de propagação de vazão	mm
SR	Escoamento superficial	mm.dia ⁻¹
BF	Escoamento de base do canal	mm.dia ⁻¹

As duas equações anteriores são integradas numericamente para cada intervalo de tempo por meio do processo de Runge-Kutta de quarta ordem (KRAUSKOPF NETO *et al.*, 2005). Informações detalhadas sobre o modelo 3R são encontradas em GUETTER *et al.* (1996).

2.3.1.1 Calibração do modelo hidrológico

A calibração do modelo 3R é feita a partir de um procedimento automático que visa encontrar um conjunto ótimo de parâmetros do modelo. O procedimento é conhecido como *Downhill Simplex* (PRESS *et al.*, 1986) e tem sido usado extensivamente para calibração de modelos hidrológicos conceituais (BAE e GEORGAKAKOS, 1992). O processo de calibração consiste na execução do modelo para um conjunto arbitrário de parâmetros e, posteriormente, comparando as vazões diárias simuladas com as observadas. Mudanças nos valores dos parâmetros são efetuadas para reduzir um índice a ser minimizado. Ambos, a média residual e o erro médio quadrático das observações e simulações, são minimizadas pelo ajuste do conjunto de parâmetros.

2.3.2 Estimador de estado

Os objetivos do componente de atualização do estimador de estado são: (1)

correção dos estados da fase bacia do modelo hidrológico (X_1 , X_2) e da fase canal (X_3 e X_4), com a assimilação das vazões observadas, e (2) estimativa dos erros da simulação de vazão. O estimador de estado aplicado nessa dissertação foi estudado por KRAUSKOPF NETO *et al.* (2005).

O tratamento dado aos diversos erros, para que se possa atualizar os estados do modelo com base nas observações de vazão, é o fundamento do componente de atualização. O modelo hidrológico conceitual é expresso por equações diferenciais, de forma que ele tenha aplicação geral. O modelo hidrológico 3R se caracteriza pela conservação de massa nos vários compartimentos (camadas superior e inferior do solo, e armazenamentos no canal). A equação diferencial típica para um compartimento individual é:

$$\frac{dX_i}{dt} = I_1(t) + I_2(t) + \dots + O_1(t) + O_2(t) + \dots \quad (2.47)$$

Onde $X_i(t)$ é o volume de água no compartimento i no tempo t ; $I_1(t)$ e $I_2(t)$, representam fluxos afluentes ao compartimento; e $O_1(t)$ e $O_2(t)$ representam os fluxos defluentes. Para o exemplo da camada superior do solo (equação 2.47), há somente um único componente I representando a chuva média na bacia, e há quatro componentes de saída (O_1 , O_2 , O_3 e O_4) que são escoamentos superficial e subsuperficial, percolação e evaporação.

A minimização dos erros da simulação de vazões, é efetuada com a atualização dos estados do modelo, assimilando-se observações de vazão em tempo real. O algoritmo que efetua o processo de minimização atua como um “estimador de estado”, e a estimativa dos erros de simulação também está integrada na sua formulação.

A atualização do vetor de estado X no tempo t_k , quando a observação $Q_0(t_k)$ se encontra disponível, é expressa pela equação 2.48, onde os subscritos “a” e “p” indicam os valores atualizados e simulados no tempo t_k , respectivamente. O vetor

$\bar{g}(t_k)$ pondera os erros de simulação do passo anterior, quando o dado da vazão observada já estiver disponível, com a magnitude dos estados modelados para produzir a estimativa do vetor de estado atualizado que será usado no próximo passo de simulação.

$$\vec{X}_a(t_k) = \vec{X}_p(t_k) + \bar{g}(t_k) [\mathcal{Q}_o(t_k) - \mathcal{Q}_p(t_k)] \quad (2.48)$$

A atualização com a equação 2.48 é estruturada com a dependência linear do estado $X_a(t_k)$ e da observação $Q_o(t_k)$. O vetor de ponderação $g(t_k)$ depende da formulação dos componentes do modelo hidrológico, dos erros esperados para os parâmetros do modelo e nos erros esperados para as observações de chuva, vazão e evapotranspiração potencial. A atualização segue a simulação dos estados do modelo $X_p(t_k)$ e da vazão $Q_o(t_k)$ no tempo t_k , e irá produzir uma estimativa atualizada do estado, $X_a(t_k)$ no tempo t_k para ser usada como condição inicial para o próximo ciclo da seqüência de simulação/atualização.

Os valores da função $g(t_k)$ dependem do conhecimento dos erros esperados para as observações e para os parâmetros do 3R. Portanto, o processo de atualização é formulado com um procedimento que permite considerar os avanços tecnológicos no monitoramento e as melhoras na calibração do 3R de forma explícita. Por exemplo, as estimativas “a priori” do grau de confiança na chuva média na bacia, proveniente de uma rede telemétrica esparsa, podem ser alterados se a rede de monitoramento for adensada, ou então se forem usadas outras técnicas para estimativa da chuva na bacia (satélites, radares meteorológicos, e combinações otimizadas de múltiplas fontes). Com o avanço tecnológico no monitoramento da chuva se espera um aumento no grau de confiança na chuva observada, que serve de entrada para o modelo 3R. Com o aumento no grau de confiança das observações basta recalibrar os parâmetros do estimador de estado associados com a incerteza da estimativa de chuva para se continuar usando o sistema de simulação hidrológica com as novas tecnologias de

monitoramento.

A forma do estimador de estado implementado na atualização do modelo $3R$ é significativamente diferente das implementações típicas de estimadores lineares (p.ex., filtro de Kalman). A formulação adotada produz um estimador de estado que é função de dois parâmetros lineares associados com as incertezas dos dados de entrada e dos parâmetros do modelo chuva-vazão-propagação. Os parâmetros lineares propiciam um meio objetivo de se considerar os melhoramentos introduzidos tanto na estimativa dos dados de entrada, quanto na estimativa dos parâmetros do modelo.

2.3.2.1 Equações do estimador de estado

Os erros nas vazões simuladas de um modelo, representados pelo vetor \vec{w} , podem ser atribuídos a erros nas variáveis de estado, nas entradas $\hat{u}(t)$ e nos parâmetros do modelo hidrológico $\hat{\mathbf{q}}$, indicados na equação 2.49. O símbolo “^” indica valores estimados com incertezas para as variáveis de entrada e para os parâmetros do modelo.

$$\frac{d\vec{X}(t)}{dt} = \vec{f}[\vec{X}(t), \hat{u}(t); \hat{\mathbf{q}}] + \vec{w}(t) \quad (2.49)$$

Observa-se que a estimativa dos parâmetros do modelo é considerada independente do tempo, refletindo a amostra limitada que geralmente se dispõe para definição dos parâmetros hidrológicos. Supondo que $\vec{f}[\vec{X}(t), \hat{u}(t); \hat{\mathbf{q}}]$ seja um modelo perfeito, sendo atribuídos os eventuais erros na formulação do modelo aos seus parâmetros, a sua expansão em série de Taylor no entorno da melhor estimativa dos vetores de estado, entrada e parâmetros resulta na equação 2.50.

$$\begin{aligned} \vec{f}[\vec{X}(t), \hat{u}(t); \hat{\mathbf{q}}] &= \vec{f}[\hat{X}(t), \hat{u}(t); \hat{\mathbf{q}}] + \vec{F}[\hat{X}(t), \hat{u}(t); \hat{\mathbf{q}}]\vec{e}(t) \\ &+ \vec{M}[\hat{X}(t), \hat{u}(t); \hat{\mathbf{q}}]\vec{e}_u(t) + \vec{N}[\hat{X}(t), \hat{u}(t); \hat{\mathbf{q}}]\vec{e}_q(t) \end{aligned} \quad (2.50)$$

Os vetores de resíduos são $\vec{e}(t)$, $\vec{e}_u(t)$, $\vec{e}_q(t)$, e os elementos (i, j) das matrizes F, M e N são definidos nas equações 2.51, 2.52 e 2.53.

$$F \left[\hat{X}(t), \hat{u}(t); \hat{q} \right]_{i,j} = \frac{\partial f_i \left[\hat{X}(t), \hat{u}(t); \hat{q} \right]}{\partial X_j} \quad (2.51)$$

$$M \left[\hat{X}(t), \hat{u}(t); \hat{q} \right]_{i,j} = \frac{\partial f_i \left[\hat{X}(t), \hat{u}(t); \hat{q} \right]}{\partial u_j} \quad (2.52)$$

$$N \left[\hat{X}(t), \hat{u}(t); \hat{q} \right]_{i,j} = \frac{\partial f_i \left[\hat{X}(t), \hat{u}(t); \hat{q} \right]}{\partial q_j} \quad (2.53)$$

O lado direito da equação 2.50 pode ser interpretado como sendo o resultado do modelo real, corrigindo os erros em cada uma das estimativas das variáveis de estado, entradas e parâmetros. Dado que a correção dos erros nas variáveis de estado seja equivalente à utilização, no modelo, das variáveis “verdadeiras”, a equação 2.50 pode ser escrita como:

$$\vec{f} \left[\vec{X}(t), \vec{u}(t); \hat{q} \right] = \vec{f} \left[\vec{X}(t), \hat{u}(t); \hat{q} \right] + \vec{M} \left[\hat{X}(t), \hat{u}(t); \hat{q} \right] \vec{e}_u(t) + \vec{N} \left[\hat{X}(t), \hat{u}(t); \hat{q} \right] \vec{e}_q(t) \quad (2.54)$$

A comparação das equações 2.49 e 2.54 indica que, para as hipóteses formuladas, o vetor $\vec{w}(t)$ pode ser representado pelos dois últimos termos da equação 2.54. Assume-se, em seguida, a hipótese de que os erros dos dados de entrada e dos parâmetros sejam ruídos estatisticamente independentes entre si.

Estimativas iniciais “a priori”, do estado do sistema (\vec{X}) e da matriz de covariância dos desvios do estado (P), para o instante t_k , são obtidas por integração, no intervalo t_{k-1} a t_k , das equações de propagação dos erros, resultando nas equações 2.55 e 2.56, onde estimativas “a priori” são indicadas por um índice superior negativo.

$$\frac{d\bar{X}(t)^-}{dt} = \bar{f}[\bar{X}(t)^-, \hat{u}(t); \hat{\mathbf{q}}] + \bar{w}(t) \quad (2.55)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP(t)^-}{dt} = & F[\bar{X}(t)^-, \hat{u}(t); \hat{\mathbf{q}}]P(t)^{-1} + P(t)^{-1}F^T[\bar{X}(t)^-, \hat{u}(t); \hat{\mathbf{q}}] + \\ & + \mathbf{a}_u M[\bar{X}(t)^-, \hat{u}(t); \hat{\mathbf{q}}]U(t)M^T[\bar{X}(t)^-, \hat{u}(t); \hat{\mathbf{q}}] + \\ & + \mathbf{a}_p N[\bar{X}(t)^-, \hat{u}(t); \hat{\mathbf{q}}]W(t)N^T[\bar{X}(t)^-, \hat{u}(t); \hat{\mathbf{q}}] \end{aligned} \quad (2.56)$$

2.3.2.2 Interpretação do estimador de estado

A principal virtude deste modelo de estimador de estado é que com a modelagem dos erros esperados no monitoramento dos dados de entrada (chuva, vazão e evapotranspiração potencial) e nos parâmetros do modelo hidrológico 3R, se possa maximizar o desempenho do modelo hidrológico, por meio da calibração dos parâmetros \mathbf{a}_u (parâmetro associado aos dados de entrada) e \mathbf{a}_p (parâmetro associado à formulação do modelo hidrológico). Quanto mais próximos de zero forem \mathbf{a}_u e \mathbf{a}_p , menores são os erros nos dados de entrada e nos parâmetros do modelo hidrológico. Todavia, se os meios tecnológicos de monitoramento dos dados de chuva forem inadequados, isto é, com incerteza significativa, então o parâmetro de \mathbf{a}_u será um número bem maior do que zero (por exemplo $\mathbf{a}_u = 10$). Interpretação análoga se aplica ao parâmetro \mathbf{a}_p , se por exemplo, o modelo 3R for calibrado com os dados de chuva de uma rede densa de pluviômetros e for usado com os dados de chuva estimada por satélite (que superestima a intensidade da chuva), então a formulação e parâmetros do modelo hidrológico não serão adequados para processar o excesso da estimativa de chuva na reprodução correta dos processos de percolação, evaporação, escoamentos superficial, sub-superficial e de base. Neste caso o parâmetro \mathbf{a}_p se afastará de zero, e será um número que maximizará as incertezas admissíveis na formulação do modelo hidrológico, de forma a maximizar a “correção” dos estados e a simulação da vazão.

A calibração dos parâmetros, \mathbf{a}_u e \mathbf{a}_p , do modelo de estimador de estado

busca minimizar as diferenças entre as vazões observadas e simuladas e maximizar as correlações entre as duas séries de vazões. O par de parâmetros do estimador de estado pode ser interpretado de forma análoga a um conjunto de dois botões de um rádio que permite a sintonia fina de uma estação, reduzindo os ruídos tanto graves quanto os agudos que haveriam na transmissão do sinal. Quanto maiores forem os valores de \mathbf{a}_u e \mathbf{a}_p estimados na calibração, então maior peso é dado na incerteza do dado e na formulação do processo físico, em detrimento do valor determinístico do registro. Por exemplo, para uma chuva de 20 mm.dia^{-1} e \mathbf{a}_u igual a 0,5, então a incerteza da chuva variaria entre $[19 \text{ mm.dia}^{-1}$ e $21 \text{ mm.dia}^{-1}]$; mas se \mathbf{a}_u for igual a 5, então a incerteza da chuva variaria entre $[10 \text{ mm.dia}^{-1}$ e $30 \text{ mm.dia}^{-1}]$, de forma que a banda de incerteza seja até maior do que a magnitude da chuva estimada.

2.3.2.3 Calibração do estimador de estado

A calibração do estimador de estado consiste na definição dos parâmetros \mathbf{a}_u e \mathbf{a}_p da equação 2.56, que corresponde à propagação da matriz de covariâncias dos desvios do modelo. Todavia, a calibração de \mathbf{a}_u e \mathbf{a}_p requer a estimativa prévia de: (1) desvio padrão dos estados, (2) desvio padrão dos parâmetros e (3) parametrização das incertezas nos dados de chuva, vazão e evapotranspiração potencial.

O procedimento de calibração adotado foi o de avaliar o comportamento de diversas funções de medição do desempenho do modelo (funções objetivo) no espaço dos valores de \mathbf{a}_u e \mathbf{a}_p e definir um ponto neste espaço para o qual o conjunto das funções apresente o melhor comportamento global. As funções objetivo selecionadas para a calibração do estimador de estado foram: desvio normalizado, desvio padrão normalizado, coeficiente de correlação e coeficiente de correlação “lag 1” dos resíduos normalizados.

Dadas as incertezas dos dados e do modelo, a avaliação dos melhores parâmetros não é feita para valores pontuais, e sim para regiões ótimas. Para permitir esta avaliação são construídos gráficos de isolinhas para as distintas funções objetivo,

conforme ilustrado na figura 5.18 e Apêndice 4.

2.3.3 Etapas da calibração e simulação

A sensibilidade do modelo hidrológico é avaliada em função de três elementos: o tipo de dado de chuva (rede pluviométrica ou por satélite), configuração do modelo hidrológico (somente com assimilação de chuva, ou com a inclusão de um estimador de estado) e a escala da bacia (uma bacia de cabeceira, no rio Iguaçu em Porto Amazonas, com área de 3.662 km², e em União da Vitória, com área de 24.211 km²). Após a calibração do modelo hidrológico com a chuva média resultante da rede pluviométrica, e a calibração do estimador de estado para ambas estimativas de chuva por satélite e pluviômetro, são feitas simulações, resultando em quatro combinações possíveis para as duas bacias:

- (a) modelo hidrológico sem atualização de estado usando chuva estimada por pluviômetros como dado de entrada;
- (b) modelo hidrológico sem atualização de estado usando chuva estimada por satélite;
- (c) modelo hidrológico com atualização de estado usando chuva estimada por pluviômetros; e
- (d) modelo hidrológico com atualização de estado usando chuva estimada por satélite.

3 ÁREA DE ESTUDO

Para o estudo de caso do impacto das estimativas de chuva por satélite na modelagem hidrológica, foi adotada a bacia do Rio Iguaçu, no trecho entre as nascentes e União da Vitória, ilustrado na figura 3.1. A bacia é monitorada por uma rede de estações hidrológicas operadas telemetricamente pelo Instituto Tecnológico SIMEPAR.

FIGURA 3.1 – ÁREA DE ESTUDO: BACIA DO RIO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA



O Rio Iguaçu nasce na Serra do Mar, nas vizinhanças de Curitiba, e se desenvolve no sentido Leste-Oeste. As suas nascentes estão em elevação superior a 900 m e permanecem em elevações superiores a 600 m até o seu trecho médio, onde foi construída a Barragem de Foz do Areia. A última queda deste rio se denomina Cataratas do Iguaçu, com 82 m de altura, localizada a 23 km da confluência com o Rio Paraná, sendo um importante contribuinte na sua margem esquerda drenando uma área total de 69.373 km². Desta área, 80,4% localiza-se no Estado do Paraná, 16,6% no

Estado de Santa Catarina e 3% na Argentina.

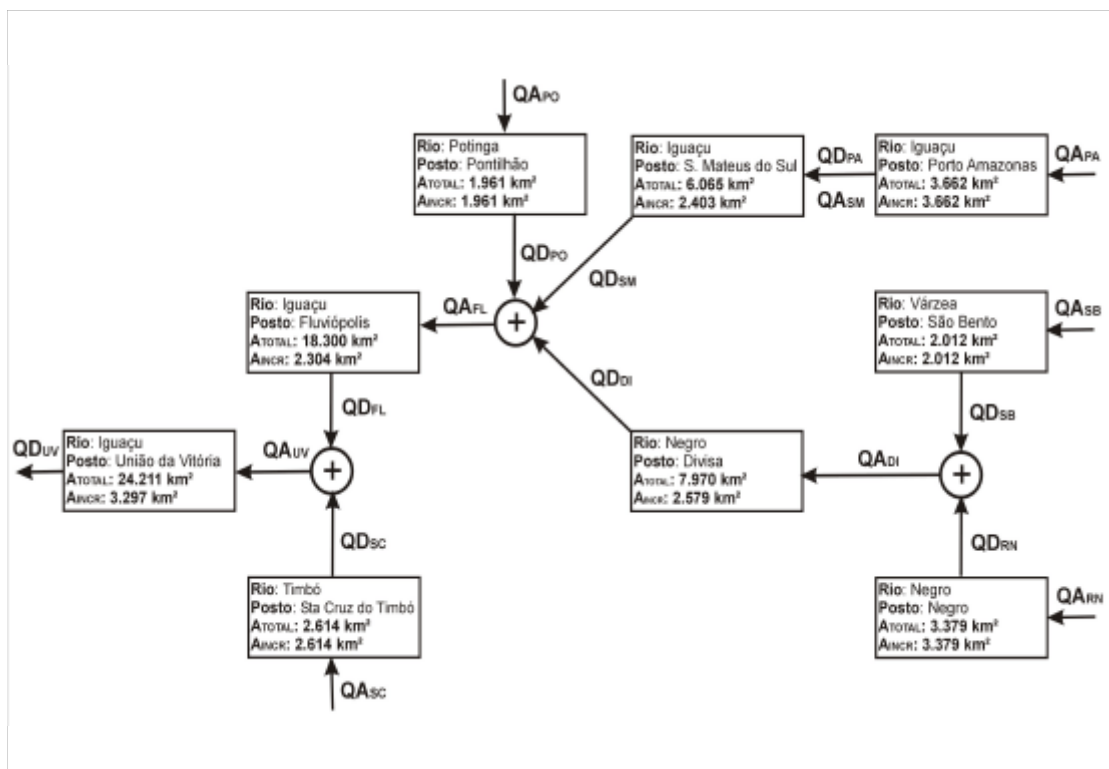
De acordo com o critério de divisão por bacias hidrográficas do Inventário das estações fluviométricas do DNAEE (1987), a sub-bacia do Iguazu pertence à bacia do Rio Paraná, e está compreendida entre 24° 50' e 27° 00' de latitude Sul (S) e 49° 00' e 54° 30' de longitude Oeste (W).

A seleção da bacia do rio Iguazu em União da Vitória para um estudo de viabilidade do uso de novas tecnologias de monitoramento da chuva e de modelagem hidrológica produz um paradigma para outras bacias de interesse do setor elétrico e de recursos hídricos para o gerenciamento de reservatórios e controle de cheias.

3.1 HIDROGRAFIA

A região de estudo apresenta uma grande malha afluyente à calha principal do rio Iguazu, onde os tributários de interesse neste estudo estão representados de forma topológica na figura 3.2. Na figura, QA significa a vazão afluyente a cada sub-bacia e QD, a vazão defluente.

FIGURA 3.2 – TOPOLOGIA DAS SUB-BACIAS PERTENCENTES À BACIA DO RIO IGUAZU EM UNIÃO DA VITÓRIA



Desta maneira, a bacia é dividida em nove sub-bacias cujas principais características são apresentadas na tabela 3.1.

TABELA 3.1 – CARACTERÍSTICAS DAS SUB-BACIAS DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA

Sub-bacia	Rio	Estado	Área Total (km ²)	Área Incremental (km ²)
Porto Amazonas	Iguaçu	PR	3.662	3.662
São Mateus do Sul	Iguaçu	PR	6.065	2.403
Pontilhão	Potinga	PR	1.961	1.961
São Bento	Rio da Várzea	PR	2.012	2.012
Fluviópolis	Iguaçu	PR	18.300	2.304
Divisa	Negro	PR	7.970	2.579
Rio Negro	Negro	PR	3.379	3.379
Santa Cruz do Timbó	Timbó	SC	-	2.614
União da Vitória	Iguaçu	PR	24.211	3.297

Fonte: ANEEL (2001)

3.2 CLIMA

O estado do Paraná apresenta dois regimes climáticos diferentes, onde nas regiões Norte, Oeste, Sudoeste e Leste é do tipo sub-tropical, com verão quente e estação chuvosa no trimestre dezembro-janeiro-fevereiro, enquanto que as regiões Sul e Central apresentam um clima temperado, com verão ameno e estação seca e fria no trimestre junho-julho-agosto (NIMER, 1979).

Vários sistemas meteorológicos atuam ou passam pelo Paraná durante todas as estações do ano. Os sistemas frontais de latitudes médias, que estão associados ao escoamento ondulatório de grande escala, se deslocam pela região Sul do Brasil atingindo o Paraná (OLIVEIRA, 1986), são os principais sistemas meteorológicos atuantes durante todo ano, com pequena variação sazonal (LEMONS e CALBETE, 1996). No verão esses sistemas ao ingressarem sobre a região Sul, e atingirem o estado do Paraná, associam-se a um sistema de baixa pressão em superfície sobre o

Paraguai, conhecido como Baixa do Chaco, intensificando e provocando o aumento da quantidade de precipitação sobre o Paraná, principalmente sobre as regiões Oeste, Sudoeste e Norte.

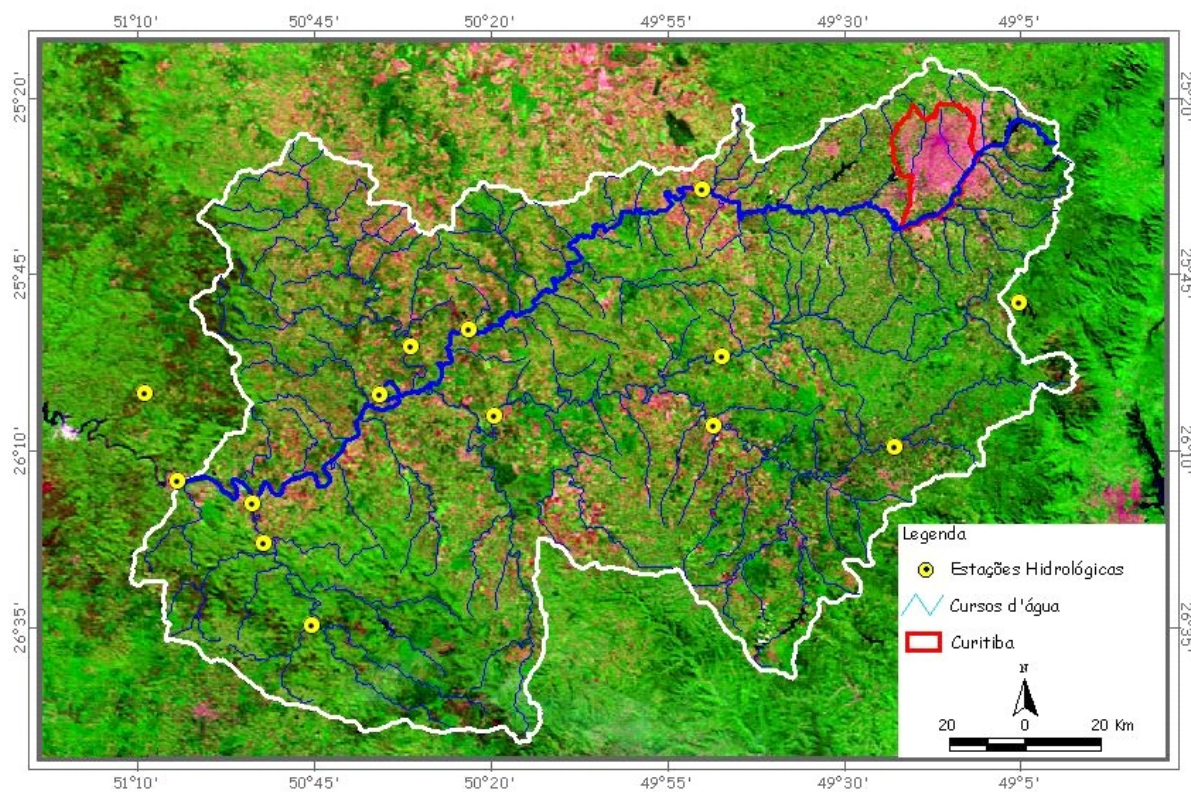
No verão, além das frentes frias, atuam de forma marcante sobre o estado os sistemas convectivos de mesoescala, que são sistemas com uma escala de grandeza menor que a dos sistemas frontais e tempo de vida mais curto. Apesar destes sistemas terem, tanto tempo de vida quanto tamanhos menores do que de um sistema frontal, as chuvas associadas a eles geralmente são intensas. O complexo convectivo de mesoescala (GUEDES e DIAS, 1984; VELASCO e FRITSCH, 1987; SILVA DIAS, 1996), é o principal sistema responsável pelas chuvas intensas, acarretando muitas vezes em enchentes, e estão sempre associados a muitas descargas elétricas atmosféricas, fortes rajadas de vento e até tornados.

3.3 USO DO SOLO

A SANEPAR realizou a identificação do uso do solo na bacia do Iguazu, com base em análise de imagens de satélite dos anos de 1990 e 1994. Cerca de 38% da área da bacia é utilizada na lavoura e 18% na pastagem. Mais da metade de sua área é utilizada para agricultura, distribuindo-se por toda a sua extensão. Áreas com florestas naturais e reflorestamentos abrangem em torno de 14% e 2%, respectivamente. Essas informações foram obtidas em PLANO DIRETOR DO IGUAÇU (2004).

A figura 3.3 apresenta uma imagem do satélite TERRA, sensor MODIS, em abril de 2005. Destaca-se a predominância de área com vegetação em toda a bacia, e a mancha urbana do município de Curitiba delimitado pela linha vermelha.

FIGURA 3.3 – IMAGEM DE SATÉLITE DA BACIA DO RIO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA



4 DADOS HIDROLÓGICOS

Os dados hidrológicos utilizados nesta dissertação são: chuva estimada por satélite, chuva medida por pluviômetros, vazão e evapotranspiração. Foi adotada a escala diária pois nessa unidade a estimativa de chuva por satélite apresenta uma amostra significativa de varreduras microondas e também porque a chuva nessa escala é requerida como dado de entrada em um grande número de aplicações hidrológicas.

4.1 CHUVA MEDIDA POR PLUVIÔMETROS

4.1.1 Descrição dos dados

Os dados de chuva estimados na superfície foram obtidos a partir da rede telemétrica de estações hidrológicas do SIMEPAR, as quais coletam chuva em intervalos de 15 minutos. O modelo dos pluviômetros é *SUTRON*, modelo 5600-0420, cujas principais características técnicas são descritas na tabela 4.1.

TABELA 4.1 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA REDE DE PLUVIÔMETROS DO SIMEPAR

Tipo	<i>Tipping Bucket</i> - Modelo 5600-0420-2
Sensibilidade	1 basculamento por 0.2 mm
Resolução	0.2 mm
Tamanho do orifício (coleta)	diâmetro = 210 mm
Precisão	2% para intensidade de 50 mm.h ⁻¹
Limite máximo horário	150 mm/h com 7% de erro
Tamanho do equipamento	diâmetro = 210 mm altura = 462 mm
Peso	2,5 kg
Limite de temperatura (operação)	0 °C a 60 °C

Fonte: MANUAL DO SUTRON (1993)

A localização das estações pluviométricas, no estado do Paraná, é

apresentada na figura 4.1, e sua descrição, na tabela 4.2.

FIGURA 4.1 – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES HIDROLÓGICAS DO SIMEPAR NO ESTADO DO PARANÁ



Fonte: SIMEPAR (2004)

TABELA 4.2 – LISTA DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS DO SIMEPAR

Estação	Código ANEEL	Rio	UF	Lat (°)	Lon (°)	Área (km ²)	Início
Porto Amazonas	65035001	Iguaçu	PR	-25 33	-49 53	3662	05/97
São Mateus do Sul	65060001	Iguaçu	PR	-25 52	-50 23	6065	05/97
Pontilhão	65208001	Potinga	PR	-25 55	-50 33	1961	05/97
São Bento	65155001	Várzea	PR	-25 56	-49 47	2012	09/97
Fluviópolis	65220001	Iguaçu	PR	-26 02	-50 35	18300	05/97
Palmital do Meio	65415001	Palmital	PR	-26 02	-51 09	323	05/97
Divisa	65175001	Negro	PR	-26 05	-50 19	7970	09/97
Rio Negro	65100001	Negro	PR	-26 06	-49 48	3379	10/97
Fragosos	65090001	Negro	PR	-26 09	-49 23	800	05/97
Foz do Timbó	65300000	Timbó	SC	-26 17	-50 53	-	05/97
Santa Cruz do Timbó	65295001	Timbó	SC	-26 23	-50 52	-	05/97
União da Vitória	65310001	Iguaçu	PR	-26 14	-51 04	24211	05/97
Foz do Cachoeira	65260001	Timbó	SC	-26 35	-50 45	-	05/97

Fonte: ANEEL (2001)

4.1.2 Pré-processamento dos dados

A chuva estimada por pluviômetros foi processada, resumidamente, por meio das seguintes etapas:

(a) Código de falhas: Os dados falhos do banco de dados, como por exemplo, chuva negativa, foram preenchidos com o código de falhas - 999.99;

(b) Uniformização temporal: As séries de chuva medida por pluviômetros foram convertidas para o horário *GMT*, ficando em acordo com a série estimada por satélite;

(c) Agregação diária: Os dados com resolução de 15 minutos obtidos do banco de dados foram reduzidos para a escala diária, de acordo com os seguintes critérios:

(c1) Se pelo menos 20% da quantidade de dados no período de um dia apresentarem falhas, o dado diário é preenchido com o código de falhas - 999.99;

(c2) Se um número inferior a 20% da quantidade de dados no período de um dia apresentarem falha, o dado de quinze minutos é acumulado em dado diário.

(d) Cálculo da chuva média na bacia;

(e) Limite superior diário: As intensidades de chuva superiores a 110 mm.dia⁻¹, valor obtido por meio das equações de chuvas intensas da região (SEMARH/SUDERHSA, 1998 – equações 4.1 e 4.2), para um tempo de recorrência de dez anos, foram substituídos pelo código de falhas -999.99. Essa substituição é feita para remover alguns casos isolados de erros grosseiros nas séries provenientes dos pluviômetro, que comprometeriam a análise da série como um todo.

$$i = \frac{1039,68}{(t+10)^{0,799}} T_r^{0,171} \quad (\text{Município de Guarapuava}) \quad (4.1)$$

$$i = \frac{959,18}{(t+9)^{0,789}} T_r^{0,177} \quad (\text{Município de Teixeira Soares}) \quad (4.2)$$

4.1.3 Chuva média na bacia

A chuva média na bacia para os dados de pluviômetros é calculada por meio de dois métodos:

- (a) Método do inverso do quadrado da distância;
- (b) Média ponderada pela área.

4.1.3.1 Inverso do quadrado da distância

O método Inverso do quadrado da distância (IQD) é frequentemente utilizado pelo departamento de hidrologia do *NWS* para o cálculo de chuva média na bacia, em sistemas de previsões de cheias em tempo real. Ele é bastante robusto para implementações computacionais, e considera uma grade regular na bacia, estimando a chuva média por meio dos pontos dessa malha.

A partir da definição da malha na bacia do Iguazu em União da Vitória, determina-se quais estações se encontram dentro dos limites das sub-bacias, e então a distância entre cada uma delas aos pontos da grade é calculada. Assim, a chuva no *j*-ésimo ponto da malha é calculada utilizando as equações 4.3 e 4.4 (MAIDMENT, 1993).

Por meio do método inverso do quadrado da distância foi possível gerar uma matriz de chuva média na bacia do Iguazu em União da Vitória com os pluviômetros, equivalente à matriz do produto *CMORPH*.

$$\bar{P}_j = a \sum_{i=1}^n d_{ij}^{-2} P_i \quad (4.3)$$

$$a = \left(\sum_{i=1}^n d_{ij}^{-2} \right)^{-1} \quad (4.4)$$

Onde:

\bar{P}_j : Chuva média no ponto “j” da malha;

\bar{P}_i : Chuva na estação “i”;

d_{ij} : Distância da estação “i” ao ponto “j” da malha.

4.1.3.2 Chuva média ponderada pela área

Após calculada a chuva média na bacia pelo método Inverso do quadrado da distância para cada ponto da malha, a chuva média resultante nas diversas sub-bacias é estimada por meio de uma média ponderada por pesos relativos às suas áreas, conforme a equação 4.5. Assim, a ponderação é feita em função da área da célula ocupada pela bacia.

$$CMB_b = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=m} P_{i,j} \cdot W_{bi,j}}{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=m} W_{bi,j}} \quad (4.5)$$

Onde:

CMB_b : Chuva média na sub-bacia “b”;

$P_{i,j}$: Chuva na linha “i”, coluna “j” da malha;

$W_{bi,j}$: Pesos para a sub-bacia “b”, na linha “i”, coluna “j” da malha

4.2 CHUVA ESTIMADA POR SATÉLITE

4.2.1 Descrição dos dados

A chuva estimada por satélite utilizada nessa dissertação consiste no produto *CMORPH*, disponibilizado operacionalmente pelo *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)* da *NOAA*. O *CMORPH* foi selecionado entre diversos outros produtos de acordo com os seguintes fatores: (a) pelo fato de ser baseado em sensores microondas de diversos satélites de órbita polar, (b) pelo fato de já estar sendo testado há algum tempo nos EUA e Austrália, (c) pelo fato das suas resoluções espacial e temporal serem apropriadas para a área de estudo, e (d) pela sua operacionalidade na distribuição e atualização dos dados. A estimativa de chuva *CMORPH* possui resolução temporal diária e espacial de $0,25^\circ$ (cerca de 25 km). As principais características do produto de chuva usado neste trabalho é apresentada na tabela 4.3.

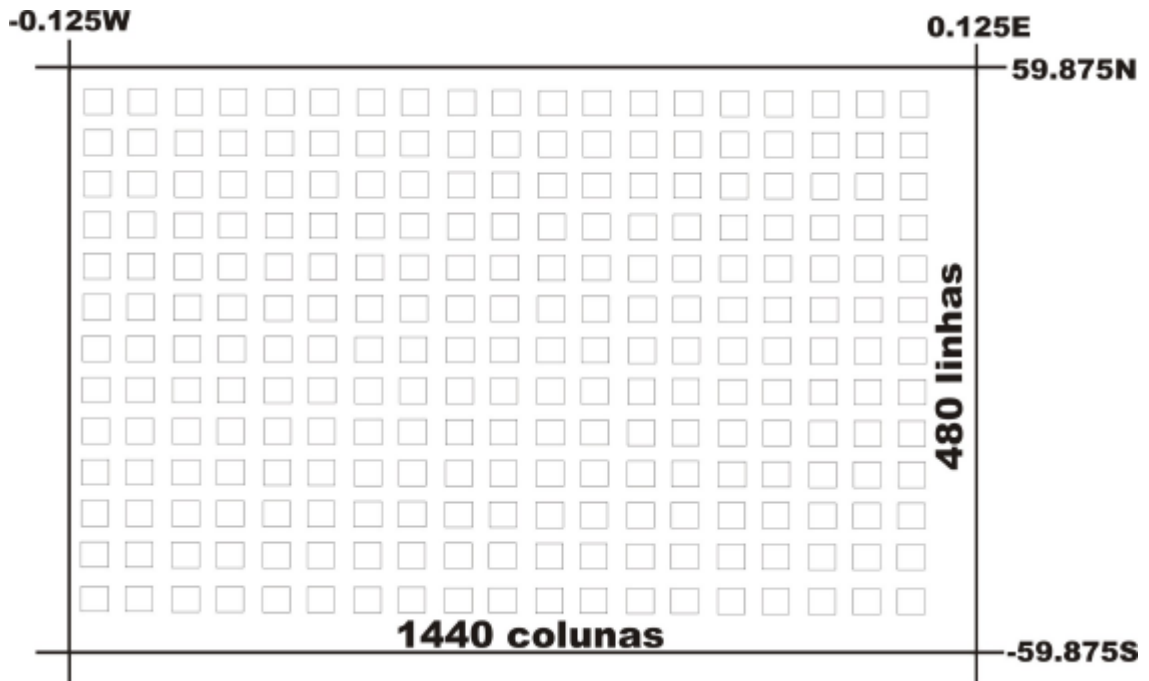
TABELA 4.3 – CARACTERÍSTICAS DA ESTIMATIVA DE CHUVA *CMORPH* NA BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA

Estimativa de chuva por satélite <i>CMORPH</i>	
Resolução espacial	0,25° (cerca de 25 km)
Resolução temporal	diária
Domínio	Bacia do Iguaçu em União da Vitória
Período	01/01/2003 – 31/12/2004

A estimativa de chuva *CMORPH* é disponibilizada no formato binário “*big_endian*”, contendo dois registros: *comb* e *cmorph*. O primeiro refere-se à chuva derivada somente dos sensores microondas, e o segundo refere-se à chuva derivada do método *CMORPH* propriamente dito. Cada registro contém uma matriz diária de dimensão 1440 x 480, orientada a partir do par de coordenadas (0.125 E; 59.875 N), com acréscimos na latitude e longitude de $0,25^\circ$ até (-0,125 W; -59.875 S). A figura 4.2 apresenta as dimensões da matriz global *CMORPH*. A agregação diária dos dados

ocorre no período de 00:00 a 23:59, no horário *GMT*.

FIGURA 4.2 – DIMENSÕES E FORMATO DA MATRIZ GLOBAL DE CHUVA ESTIMADA POR SATÉLITE *CMORPH*



4.2.1.1 Definição da malha sobre a área de estudo

A malha na bacia do Iguaçu em União da Vitória (figura 4.3) foi definida em acordo com as características do dado de satélite, resultando assim, em uma matriz de dimensões 7 x 10, com pares de coordenadas nas extremidades em (-51.125 W; -25.375 S) e (-48.875 W; -26.875 S).

Na figura 4.3, o valor percentual descrito em cada trecho formado pela intersecção da sub-bacia com a malha, corresponde à razão entre a área do trecho e a área de um ponto da malha ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$). Por exemplo, se uma célula estiver completamente preenchida por um trecho de área de uma sub-bacia, então o valor será de 100%. Esses pesos são utilizados posteriormente no cálculo da chuva média na bacia.

TABELA 4.4 – IDENTIFICAÇÃO DAS ESTAÇÕES DA FIGURA 4.3

n°	Estação	n°	Estação	n°	Estação
1	Fragosos	6	São Mateus do Sul	11	Foz do Timbó
2	São Bento	7	Pontilhão	12	União da Vitória
3	Rio Negro	8	Fluviópolis	13	Palmital do Meio
4	Porto Amazonas	9	Foz do Cachoeira		
5	Divisa	10	Santa Cruz do Timbó		

FIGURA 4.3 – MALHA DE DISTRIBUIÇÃO DA CHUVA ESTIMADA POR SATÉLITE CMORPH NA BACIA DO RIO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA



A quantidade de valores de chuva (pontos da malha) para cada sub-bacia é representado na tabela 4.5.

TABELA 4.5 – QUANTIDADE DE PONTOS DE MONITORAMENTO DE CHUVA POR SATÉLITE PARA AS DIVERSAS SUB-BACIAS DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA

Sub-bacia	Quantidade de pontos
Rio Negro	13
Porto Amazonas	13
Santa Cruz do Timbó	11
Fluviópolis	11
União da Vitória	11
São Bento	10
Pontilhão	9
Divisa	9
São Mateus do Sul	7
Iguaçu em União da Vitória	56

4.2.2 Pré-processamento dos dados

A chuva estimada por satélite *CMORPH* foi processada, resumidamente, por meio das seguintes etapas:

- a. Conversão para o formato *ASCII*: Como a matriz de chuva global *CMORPH* é disponibilizada em formato binário, houve a necessidade da conversão para o formato *ASCII*;
- b. Recorte espacial da chuva da matriz global: É feito o recorte espacial da chuva para as nove sub-bacias, e também para a bacia do Iguaçu em União da Vitória;
- c. Uniformização de unidades: A chuva estimada por satélite é convertida da unidade mm.h^{-1} (formato do dado original) para mm.dia^{-1} ;
- d. Cálculo da chuva média na bacia: A chuva média na bacia é calculada pelo método da média ponderada pela área;
- e. Limite superior diário: As intensidades superiores a 110 mm.dia^{-1} , valor obtido por meio da equação de chuvas intensas da região, são substituídos

pelo código de falhas -999.99, procedimento idêntico ao realizado com os dados dos pluviômetros.

4.2.3 Chuva média na bacia

Para o cálculo da chuva média na bacia foi utilizado o método da média ponderada pela área.

4.3 VAZÃO

4.3.1 Descrição dos dados

Os dados de vazão foram obtidos a partir dos registros de nível de água da rede de estações telemétricas do SIMEPAR (tabela 4.6), e das suas curvas de descarga correspondentes. As estações possuem resolução temporal de quinze minutos e abrangem o período entre os dias 01/01/2003 e 31/12/2004.

TABELA 4.6 – LISTA DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DO SIMEPAR

Código SIMEPAR	Estação	Latitude	Longitude	Município	UF
25334953	Porto Amazonas	-25,55	-49,88	Porto Amazonas	PR
25525023	São Mateus do Sul	-25,87	-50,38	São Mateus do Sul	PR
25555031	Pontilhão	-25,92	-50,52	São Mateus do Sul	PR
25564947	São Bento	-25,93	-49,78	Lapa	PR
26025035	Fluviópolis	-26,03	-50,58	São Mateus do Sul	PR
26055019	Divisa	-26,08	-50,32	São Mateus do Sul	PR
26064948	Rio Negro	-26,10	-49,80	Rio Negro	PR
26105047	Foz do Timbó	-26,17	-50,78	Irineópolis	PR
26125049	Santa Cruz do Timbó	-26,20	-50,82	Irineópolis	PR
26145104	União da Vitória	-26,23	-51,10	União da Vitória	PR

Fonte: SIMEPAR (2004)

4.3.2 Pré-processamento dos dados

Os dados foram processados, resumidamente, por meio das seguintes etapas:

- (a) Código de falhas: Os valores com falhas, como por exemplo, nível de água negativo, foram preenchidos com o código de falha -999.99;
- (b) Uniformização temporal: As séries de nível foram convertidas do horário *GMT-3* para o horário *GMT*, ficando da mesma maneira que os dados de chuva;
- (c) Curva de descarga: Os dados de nível foram convertidos em vazão por meio de suas respectivas curvas de descargas.

4.4 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

4.4.1 Descrição dos dados

A evapotranspiração potencial (EVTP) usada nesse trabalho foi obtida do trabalho de GEORGAKAKOS *et al.* (1997), onde foi calculada a partir do método de Penman. Para cada sub-bacia, a EVTP média é calculada seguindo o método do Inverso do quadrado da distância, a partir das estações meteorológicas: Pinhais, Lapa, Teixeira Soares, Guarapuava e Palmas.

5 RESULTADOS

5.1 ESTATÍSTICAS PARA VALIDAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE CHUVA

5.1.1 Estatísticas das séries diárias

5.1.1.1 Estatísticas convencionais

As figuras 5.1 a 5.10 apresentam as seqüências diárias de chuva média na bacia para as nove sub-bacias e para a bacia do Iguazu em União da Vitória, no período 2003-2004. Observa-se que a chuva média na bacia estimada por satélite apresenta picos mais elevados que a estimada pelos pluviômetros, porém os dois tipos de dados se encontram em fase em praticamente todo o período. Outra observação deve ser feita nos períodos de estiagem, onde o dado estimado por satélite aponta uma concordância muito satisfatória com o dado obtido por pluviômetros. As seqüências de chuva para todas as sub-bacias apresentam um formato bastante semelhante, isso pelo fato de estarem localizadas em regiões próximas umas das outras, diferindo mais significativamente nas intensidades dos picos.

Os histogramas da chuva média diária na bacia por satélite e pluviômetro são apresentados na figura 5.11. As maiores freqüências são observadas no primeiro intervalo de classe (1 a 5 mm.dia⁻¹), reduzindo bruscamente no intervalo de 5 a 10 mm.dia⁻¹, e gradativamente nas demais classes. Observam-se maiores freqüências de chuva por satélite para as intensidades superiores a 50 mm.dia⁻¹. Já para menores intensidades de chuva, nas classes próximas à inicial (1 a 5 mm.dia⁻¹), as freqüências se assemelham bastante. De maneira geral, as freqüências para os dois tipos de dados apresentaram-se de forma proporcional, confirmando que toda a gama de intensidades de chuva é muito parecida para a chuva estimada por satélite e pluviômetros.

FIGURA 5.1 – CHUVA MÉDIA DIÁRIA NA SUB-BACIA DE RIO NEGRO POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO

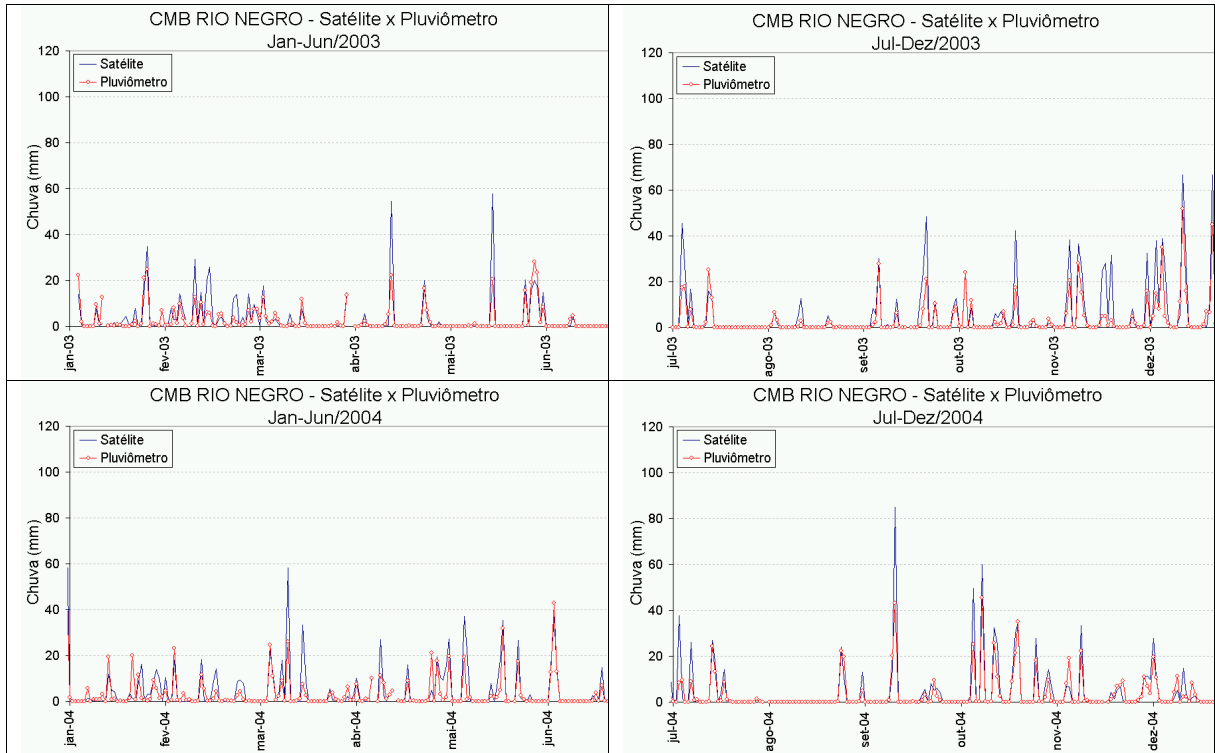


FIGURA 5.2 – CHUVA MÉDIA DIÁRIA NA SUB-BACIA DE DIVISA POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO

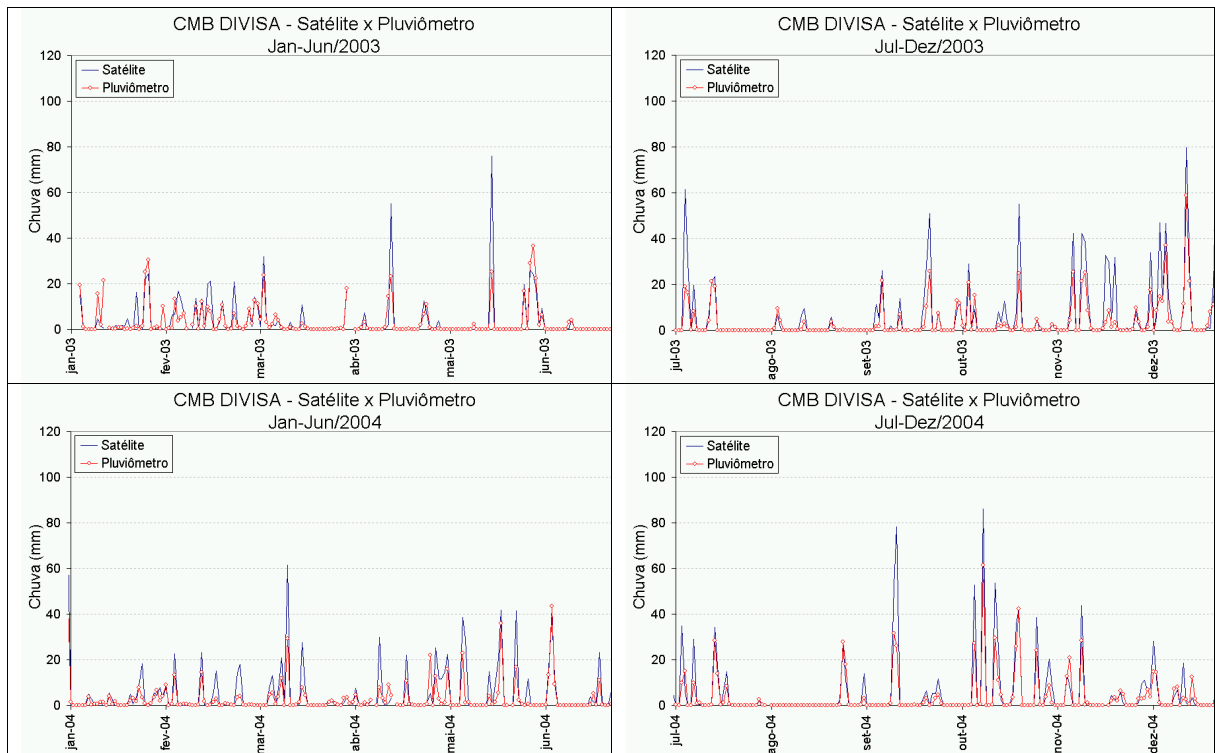


FIGURA 5.3 – CHUVA MÉDIA DIÁRIA NA SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO

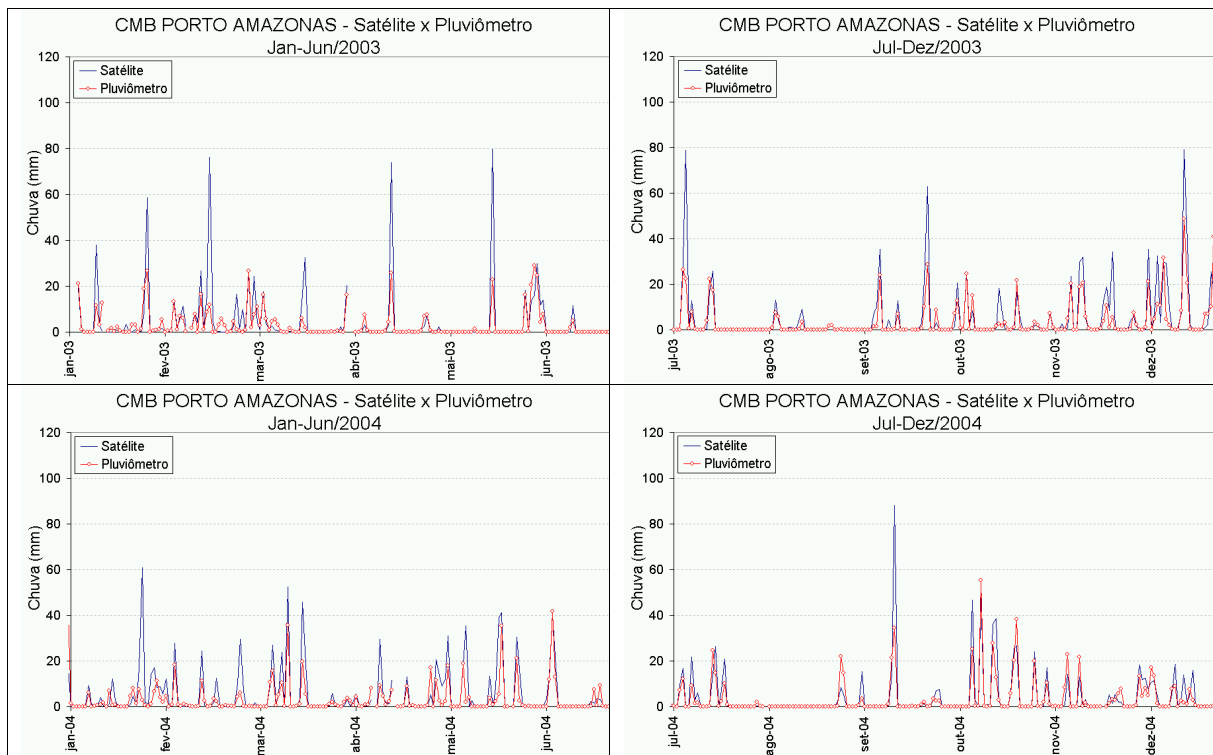


FIGURA 5.4 – CHUVA MÉDIA DIÁRIA NA SUB-BACIA DE SÃO BENTO POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO

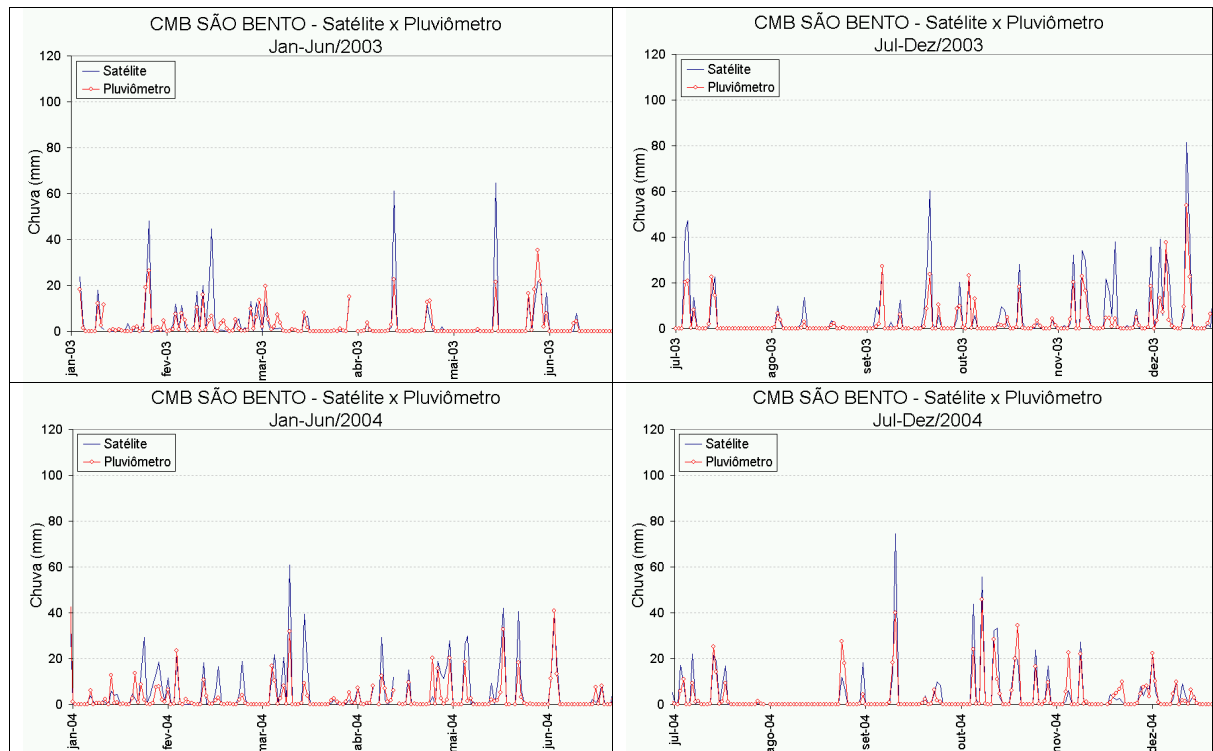


FIGURA 5.5 – CHUVA MÉDIA DIÁRIA NA SUB-BACIA DE PONTILHÃO POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO

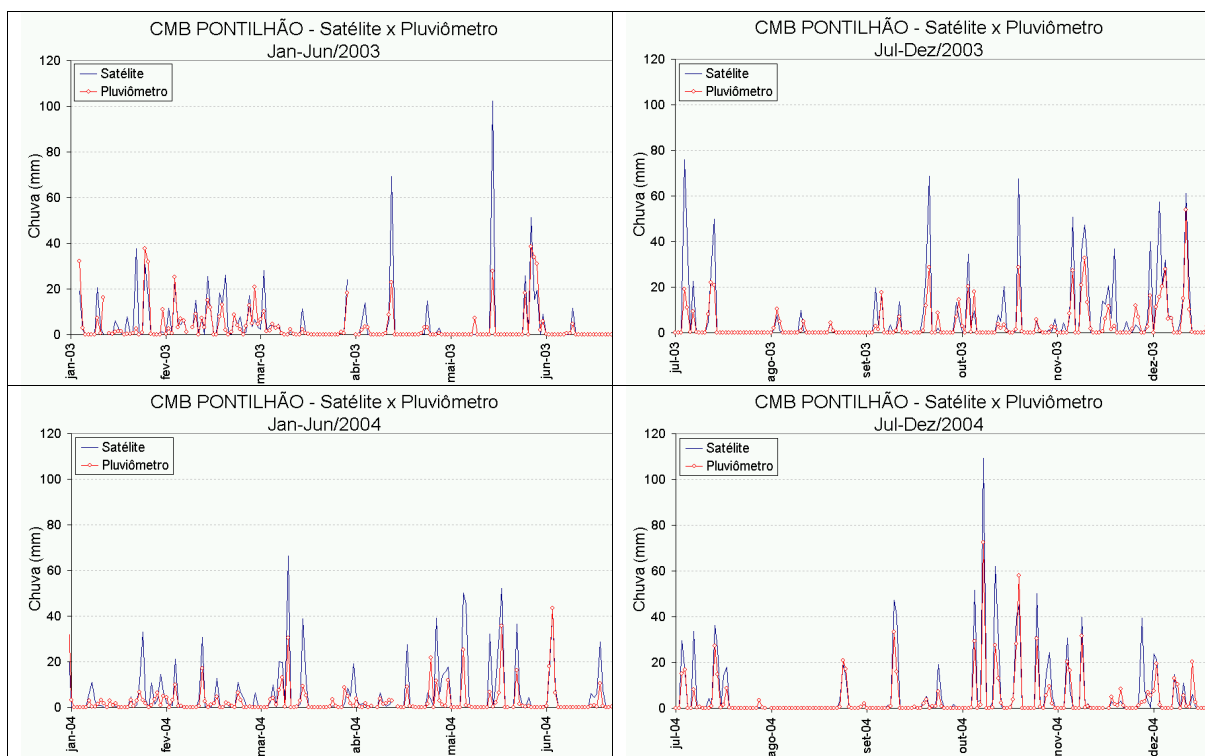


FIGURA 5.6 – CHUVA MÉDIA DIÁRIA NA SUB-BACIA DE SÃO MATEUS DO SUL POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO

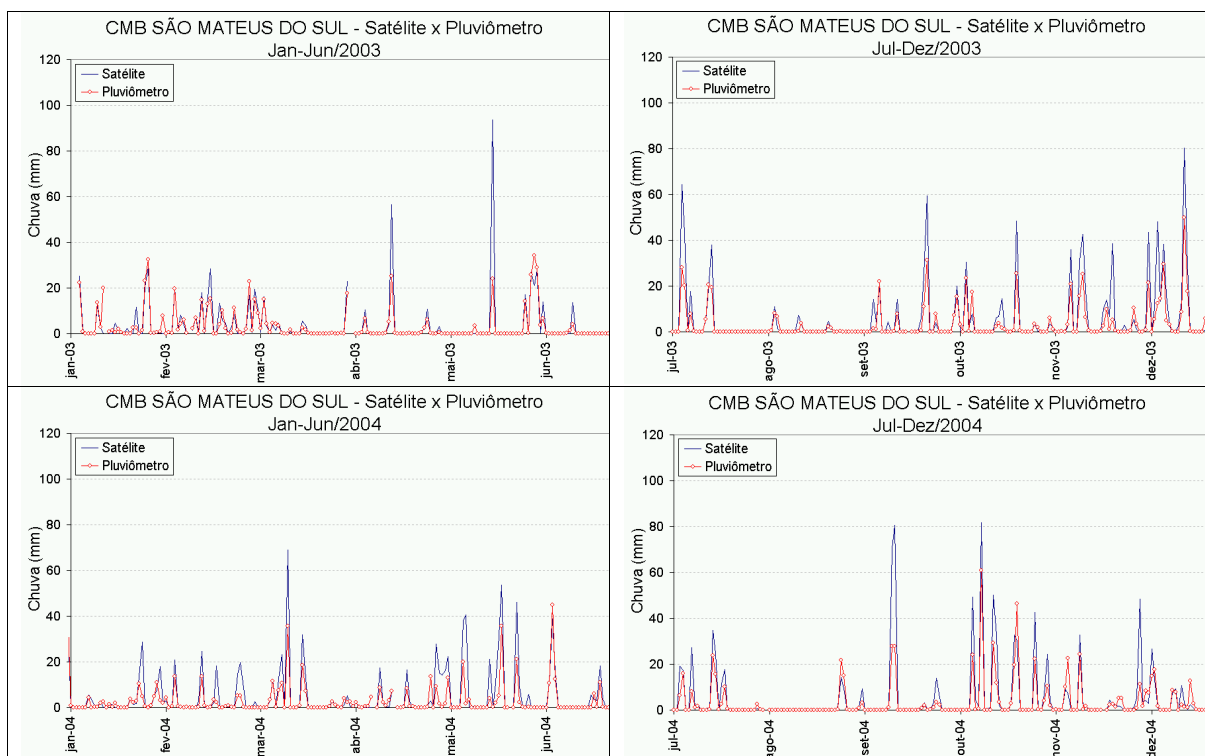


FIGURA 5.7 – CHUVA MÉDIA DIÁRIA NA SUB-BACIA DE SANTA CRUZ DO TIMBÓ POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO

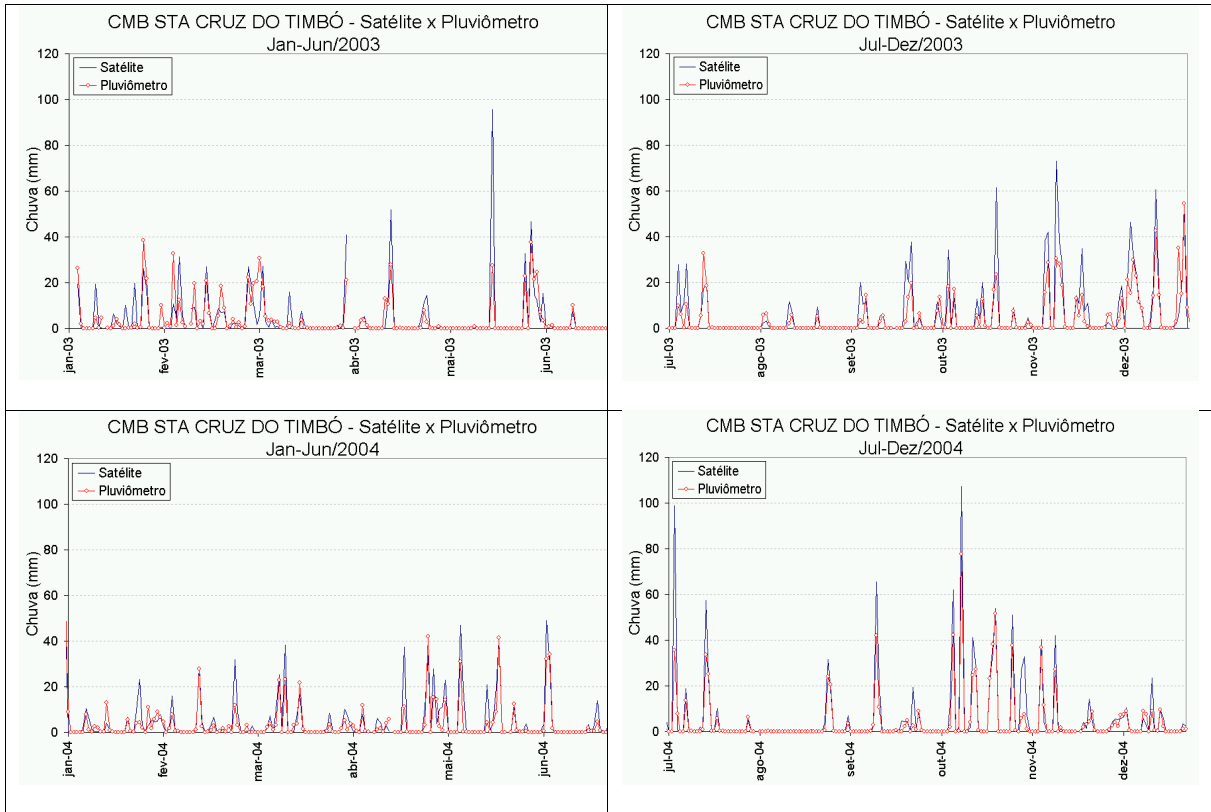


FIGURA 5.8 – CHUVA MÉDIA DIÁRIA NA SUB-BACIA DE UNIÃO DA VITÓRIA POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO

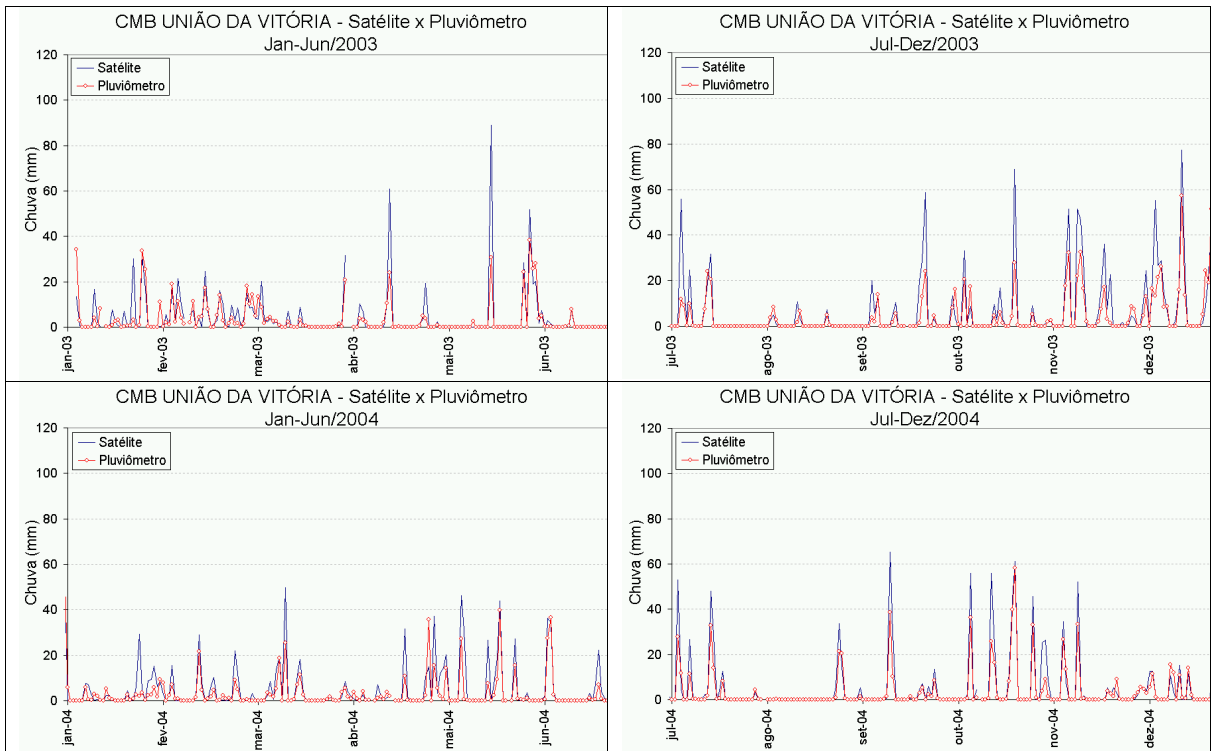


FIGURA 5.9 – CHUVA MÉDIA DIÁRIA NA SUB-BACIA DE FLUVIÓPOLIS POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO

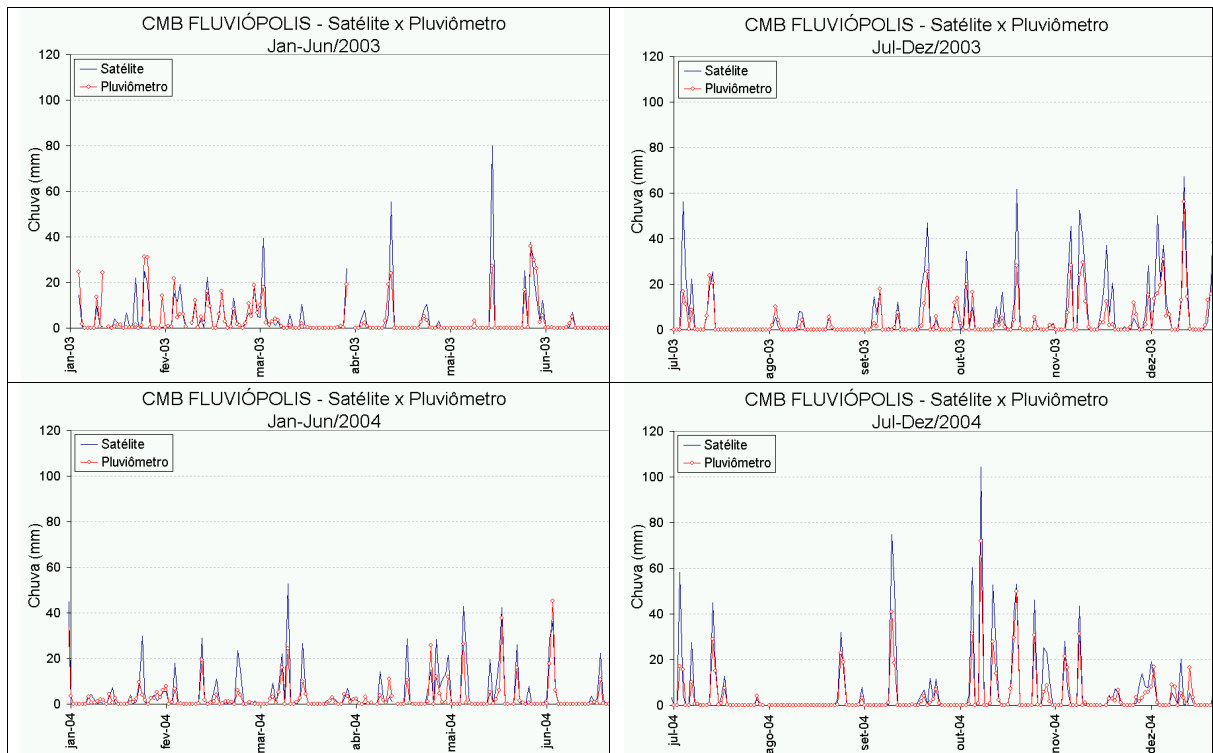


FIGURA 5.10 – CHUVA MÉDIA DIÁRIA NA BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO

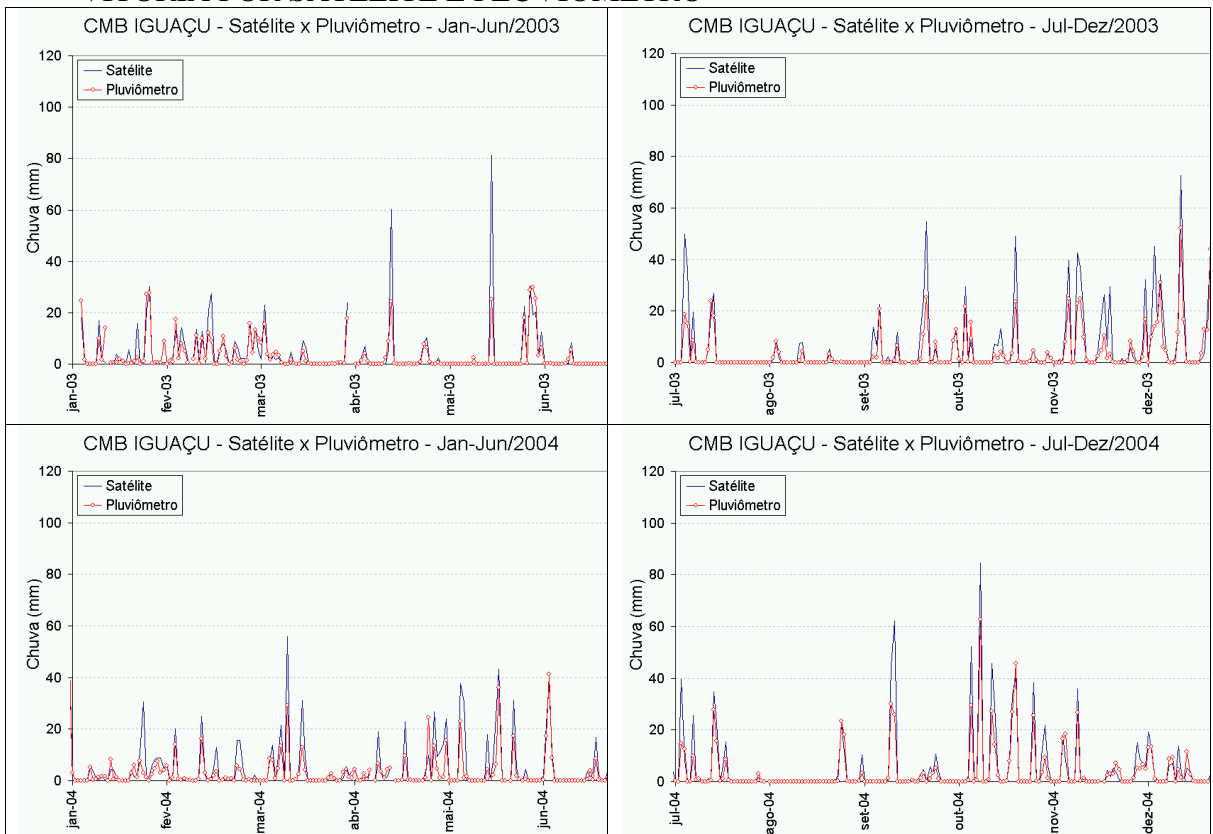
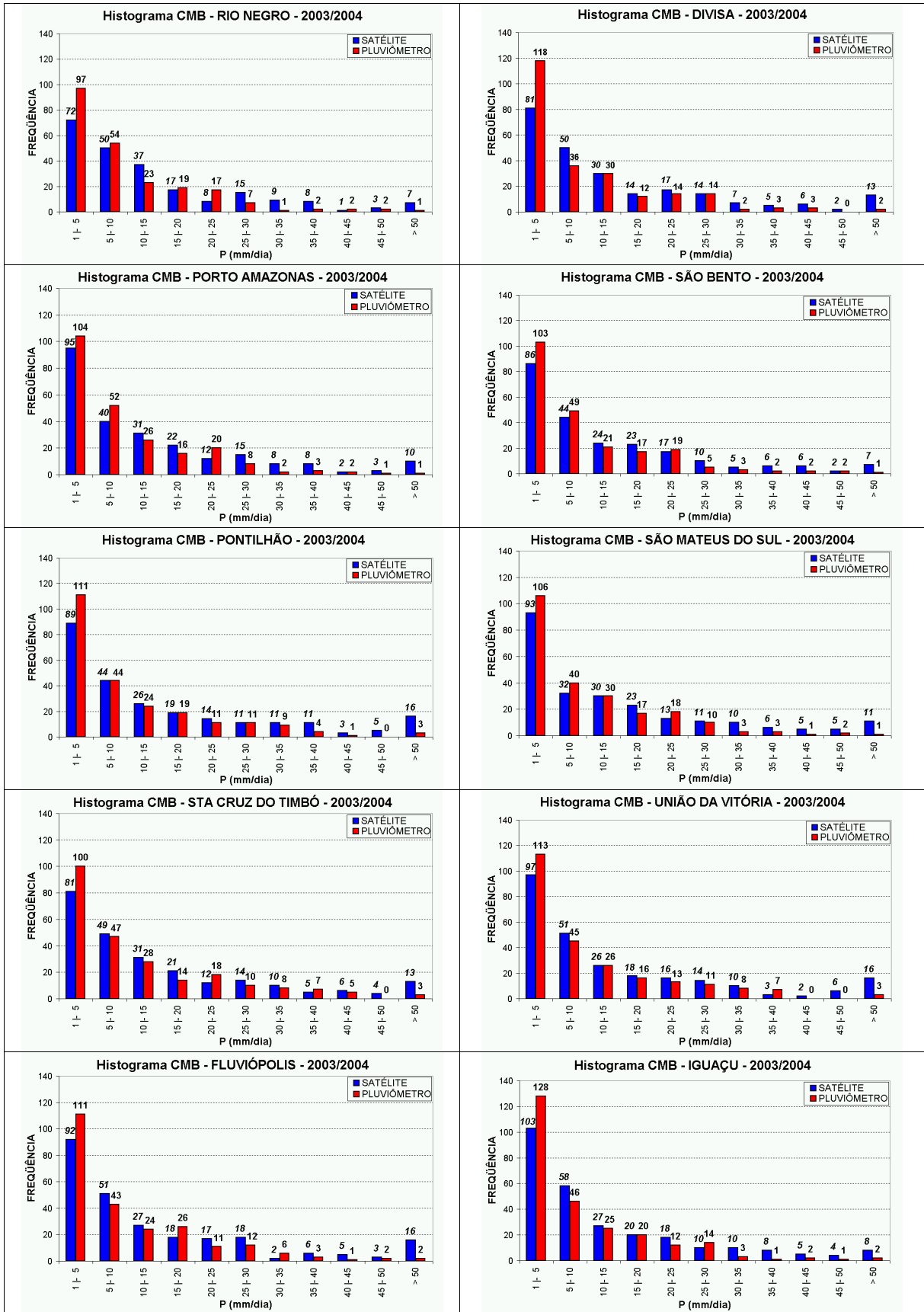


FIGURA 5.11 – HISTOGRAMAS DE CHUVA MÉDIA NA BACIA ESTIMADA POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO



Os valores médios diários, máximos diários, bem como os desvios padrões (tabela 5.1) apresentaram-se sempre superiores para a chuva média na bacia estimada pelo satélite. Em média, observam-se diferenças de 1,60 mm.dia⁻¹, 30 mm.dia⁻¹ e 4 mm.dia⁻¹, respectivamente, para a média, máximo e desvio padrão, sendo sempre maiores as estimativas por satélite.

TABELA 5.1 – ESTATÍSTICAS DE CHUVA POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO: CHUVA MÉDIA, MÁXIMA E DESVIO PADRÃO

Bacia	Média (mm.dia ⁻¹)		Máximo (mm.dia ⁻¹)		Desvio Padrão (mm.dia ⁻¹)	
	SAT	PLU	SAT	PLU	SAT	PLU
Divisa	4,98	3,25	86,02	61,59	11,70	7,47
Fluviópolis	5,21	3,48	104,41	71,89	12,07	7,92
Porto Amazonas	4,88	3,20	88,04	55,50	11,53	7,04
Pontilhão	5,62	3,46	109,28	72,57	13,07	7,95
Rio Negro	4,43	3,07	84,94	51,81	10,21	6,88
São Bento	4,35	3,05	81,53	53,83	10,33	6,98
Santa Cruz do Timbó	5,35	3,94	107,21	77,56	12,56	8,85
São Mateus do Sul	5,06	3,24	93,56	60,73	12,08	7,33
União da Vitória	5,30	3,55	88,88	58,24	12,00	7,96
Iguaçu em UV	5,02	3,37	84,46	62,85	11,05	7,35

A tabela 5.2 apresenta os totais acumulados, o número de dias de chuva (NDC) e o número de dias sem chuva (ND0) de satélite e pluviômetro, nos anos de 2003 e 2004. Para o cálculo do NDC e ND0, foi adotado o valor de 1 mm.dia⁻¹ como sendo o limite de ocorrência ou não de chuva no dia. Esse valor é devido à precisão do equipamento e também foi adotado na validação da chuva estimada por satélites feita pelo *CPC/NOAA* (JANOWIAK *et al.*, 2004). A análise do número de dias de chuva, indica grande concordância entre os dados, sendo que para a bacia do Iguaçu em União da Vitória, registrou-se chuva em 37,1% dos dias e para o pluviômetro, 34,6%. Para a chuva diária acumulada nos dois anos (2003 e 2004) nota-se uma diferença média de cerca de 1200 mm entre a chuva estimada por satélite e pluviômetro, sendo que para a sub-bacia de Pontilhão, a diferença chegou a cerca de 1600 mm e para a sub-bacia de São Bento, 930 mm. Esses valores excessivos ocorrem

devidos à superestimativa da chuva por satélite já na escala diária, o que acarreta em grandes diferenças para a agregação nos dois anos.

As figuras 5.12 e 5.13 ilustram os campos de chuva estimada por satélite (à direita) e pluviômetro (à esquerda), na malha da bacia do Iguaçu em União da Vitória, para dois dias típicos da série (com chuva moderada): 14/02/2003 e 15/02/2003. Destaca-se a grande equivalência entre os dados para intensidades de chuva inferiores a 10mm.dia⁻¹. Os campos de chuva para outros períodos da série são apresentados nos apêndices 1, 2 e 3, para situações normal, seco e úmido.

TABELA 5.2 – ESTATÍSTICAS DE CHUVA POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO: NÚMERO DE DIAS DE CHUVA, NÚMERO DE DIAS SEM CHUVA E CHUVA ACUMULADA

Bacia	Número de dias de chuva		Número de dias sem chuva		Chuva Acumulada 2003-2004 (mm)	
	SAT	PLU	SAT	PLU	SAT	PLU
Divisa	239	234	479	484	3573	2336
Fluviópolis	255	241	463	477	3740	2498
Porto Amazonas	246	235	472	483	3503	2298
Pontilhão	247	237	471	481	4033	2483
Rio Negro	227	225	491	493	3180	2207
São Bento	229	224	489	494	3120	2188
Santa Cruz do Timbó	246	238	472	480	3844	2825
São Mateus do Sul	239	230	479	488	3633	2327
União da Vitória	258	242	459	475	3804	2542
Iguaçu em UV	271	253	447	465	3607	2417

FIGURA 5.12 – CAMPOS DE CHUVA MÉDIA POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO NA BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA NO DIA 14/02/2003

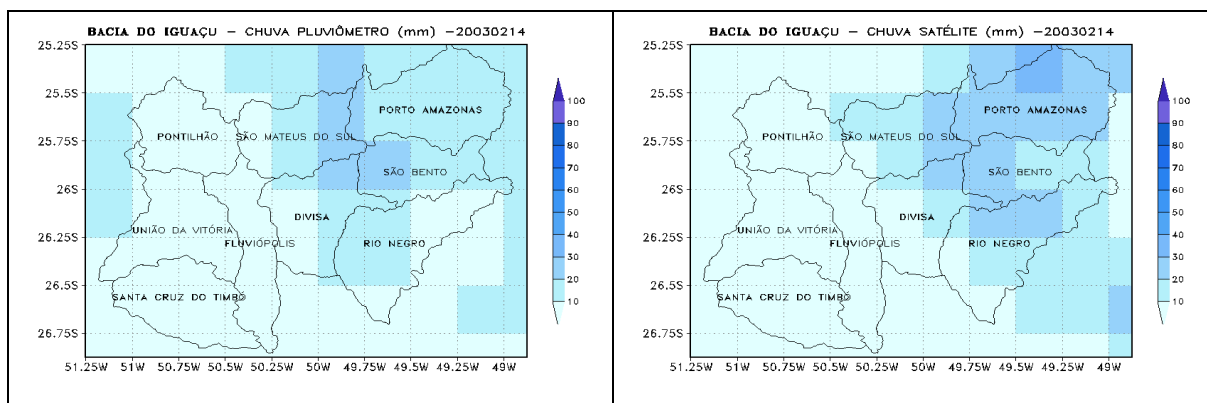
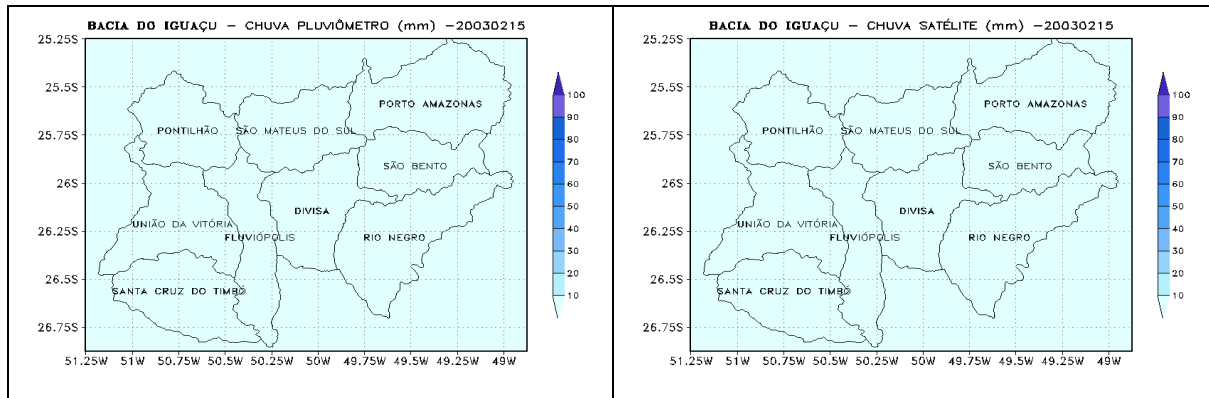


FIGURA 5.13 – CAMPOS DE CHUVA MÉDIA POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO NA BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA NO DIA 15/02/2003



As figuras 5.14 e 5.15 apresentam os gráficos de intensidade de chuva de satélite plotados num eixo, contra as intensidades de pluviômetro, para as sub-bacias de Rio Negro, Divisa, Porto Amazonas e para a bacia do Iguazu em União da Vitória. De modo geral, as menores intensidades de chuva são as que apresentam maior similaridade entre os dados de satélite e pluviômetro. Para maiores intensidades de chuva, acima de $20 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$, observa-se uma maior dispersão entre os dados.

FIGURA 5.14 – CHUVA MÉDIA DIÁRIA POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO NOS ANOS DE 2003 E 2004 PARA AS SUB-BACIAS DE RIO NEGRO E DIVISA

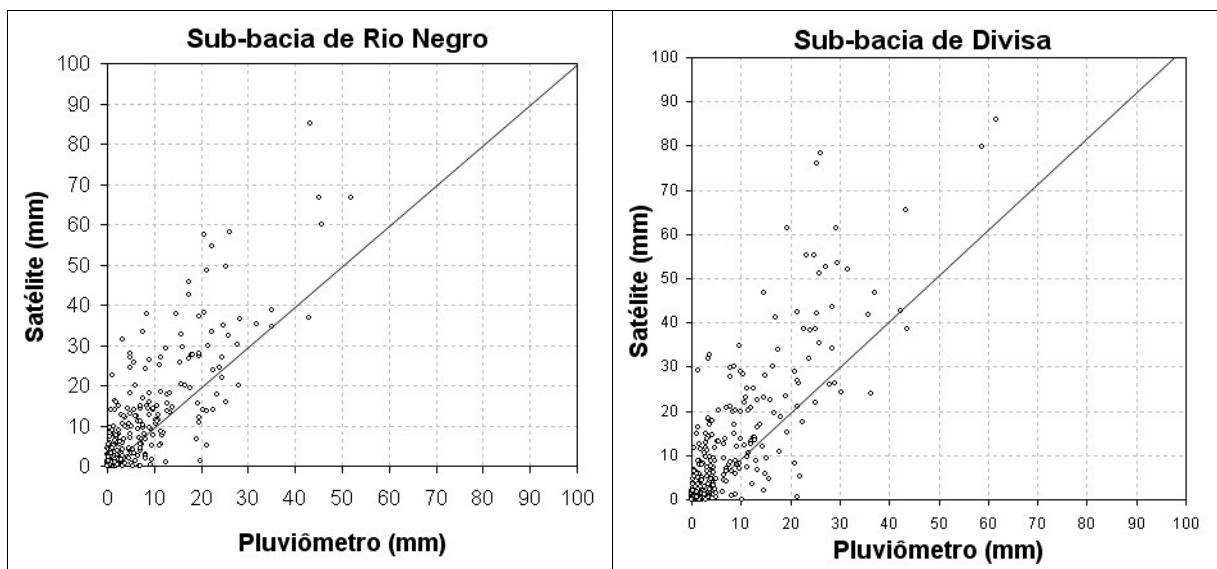
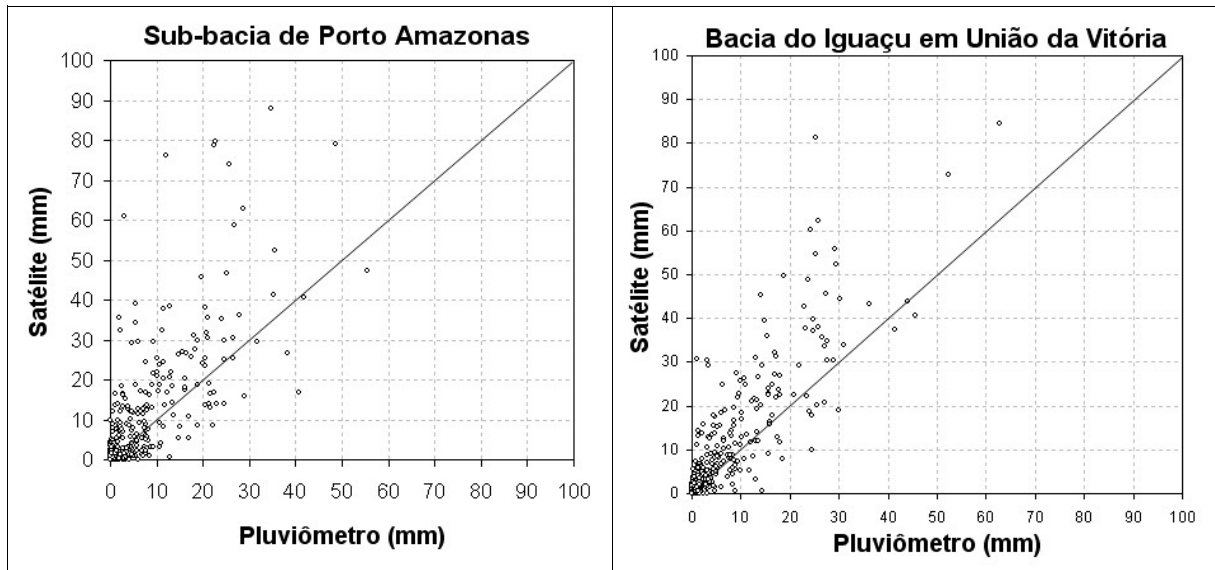


FIGURA 5.15 – CHUVA MÉDIA DIÁRIA POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO NOS ANOS DE 2003 E 2004 PARA A SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS E BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA



5.1.1.2 Estatísticas recomendadas pelo *IPWG*

5.1.1.2.1 Estatísticas de ocorrência

As tabelas 5.3 e 5.4 apresentam as estatísticas de ocorrência de chuva, recomendadas pelo *IPWG*. Nota-se na tabela de contingência (tabela 5.3) um grande número de casos com acerto de chuva e estiagem, sendo 91% de acerto para a bacia do Iguaçu em União da Vitória, e variando de 86% para a sub-bacia de Pontilhão, e para a 92% sub-bacia de Divisa.

TABELA 5.3 – TABELA DE CONTIGÊNCIA: RESULTADOS PARA A BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA E SUB-BACIAS

Bacia	Acerto de estiagem	Acerto de chuva	Falha	Alarme falso
Divisa	454	209	25	30
Fluviópolis	434	212	29	43
Porto Amazonas	436	199	36	47
Pontilhão	434	202	35	47
Rio Negro	455	189	36	38
São Bento	453	189	35	41
Santa Cruz do Timbó	443	211	29	35
São Mateus do Sul	449	201	30	38
União da Vitória	434	218	24	41
Iguaçu em UV	424	231	23	40

Na tabela 5.4 são apresentados os resultados das estatísticas de ocorrência: $BIAS_f$, probabilidade de detecção (PD), probabilidade de falso alerta (PF), e discriminante de *Hanssen & Kuipers* (HK).

O $BIAS_f$ superior à unidade indica que a estimativa de chuva por satélite identifica um número maior de casos de dias de chuva do que a obtida por pluviômetros, porém, essa diferença é relativamente pequena pois os valores são muito próximos à unidade. Essa conclusão também é tirada da tabela 5.2, através das estatísticas de número de dias de chuva.

A probabilidade de detecção indica que cerca de 85% a 90% dos eventos chuvosos foram adequadamente indicados pela estimativa de chuva por satélite. Já a probabilidade de falso alerta indica que para 13 a 19% dos eventos chuvosos, o satélite efetuou um alarme falso. Essas probabilidades demonstram a boa confiabilidade das estimativas de satélite em registrar a ocorrência de chuva e estiagem na bacia, para a escala diária.

O discriminante de *Hanssen & Kuipers* (HK), em média de 0,80 para as várias sub-bacias, indica que as estimativas de satélite foram, em média, 80% capazes

de separar os eventos de chuva dos eventos de estiagem.

TABELA 5.4 – ESTATÍSTICAS DE OCORRÊNCIA DE CHUVA: $BIAS_f$, PROBABILIDADE DE DETECÇÃO E FALSO ALERTA E DISCRIMINANTE DE HANSEN & KUIPERS

Sub-Bacia	$BIAS_f$	Probabilidade de detecção	Probabilidade de falso alerta	Discriminante de Hansen & Kuipers
Divisa	1,02	0,89	0,13	0,83
Fluviópolis	1,06	0,88	0,17	0,79
Porto Amazonas	1,05	0,85	0,19	0,75
Pontilhão	1,05	0,85	0,19	0,75
Rio Negro	1,01	0,84	0,17	0,76
São Bento	1,03	0,84	0,18	0,76
Santa Cruz do Timbó	1,02	0,88	0,14	0,81
São Mateus do Sul	1,03	0,87	0,16	0,79
União da Vitória	1,07	0,90	0,16	0,81
Iguaçu em UV	1,07	0,91	0,15	0,82

5.1.1.2.2 Estatísticas quantitativas

A tabela 5.5 apresenta os resultados das estatísticas quantitativas de chuva. O $BIAS$ indica que, em média, as estimativas de chuva por satélite superestimam de 36% a 53% a chuva estimada por pluviômetro, para as diversas bacias. O erro médio, que representa a diferença média entre as intensidades da chuva estimada por satélite e pluviômetro, apresentando sempre o sinal negativo, indica que o dado de satélite sempre apresentou maiores intensidades que o dado de pluviômetro, para todas as sub-bacias. Para a bacia do Iguaçu em União da Vitória, o erro médio foi de $-1,66 \text{ mm.dia}^{-1}$ e $-1,68 \text{ mm.dia}^{-1}$ para a sub-bacia de Porto Amazonas. O erro médio quadrático avalia o erro através do quadrado das diferenças entre os dados de satélite e pluviômetro, por isso são observados valores elevados para as diversas sub-bacias, da ordem de 6 mm. Os coeficientes de correlação apresentaram bons valores, variando de 0,79 para a sub-bacia de Porto Amazonas até 0,89 para a bacia do Iguaçu em União da Vitória. Com

relação às escalas das nove sub-bacias, não foram apresentadas melhorias nas correlações obtidas entre as chuvas, isto sendo verificado apenas com relação à escala da bacia do Iguazu em União da Vitória (área de 24.211 km²), onde nota-se uma correlação maior do que nos demais casos.

TABELA 5.5 – ESTATÍSTICAS QUANTITATIVAS DE CHUVA: BIAS, ERRO MÉDIO, MÉDIO QUADRÁTICO E COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO

Bacia	<i>BIAS</i>	Erro médio	Erro médio quadrático	Coefficiente de correlação
Divisa	1,53	-1,72	6,59	0,87
Fluviópolis	1,50	-1,73	6,69	0,87
Porto Amazonas	1,52	-1,68	7,59	0,79
Pontilhão	1,62	-2,16	8,28	0,82
Rio Negro	1,44	-1,36	5,68	0,86
São Bento	1,43	-1,30	6,06	0,83
Santa Cruz do Timbó	1,36	-1,42	6,91	0,86
São Mateus do Sul	1,56	-1,82	7,15	0,86
União da Vitória	1,49	-1,76	6,71	0,87
Iguazu em UV	1,49	-1,66	5,92	0,89

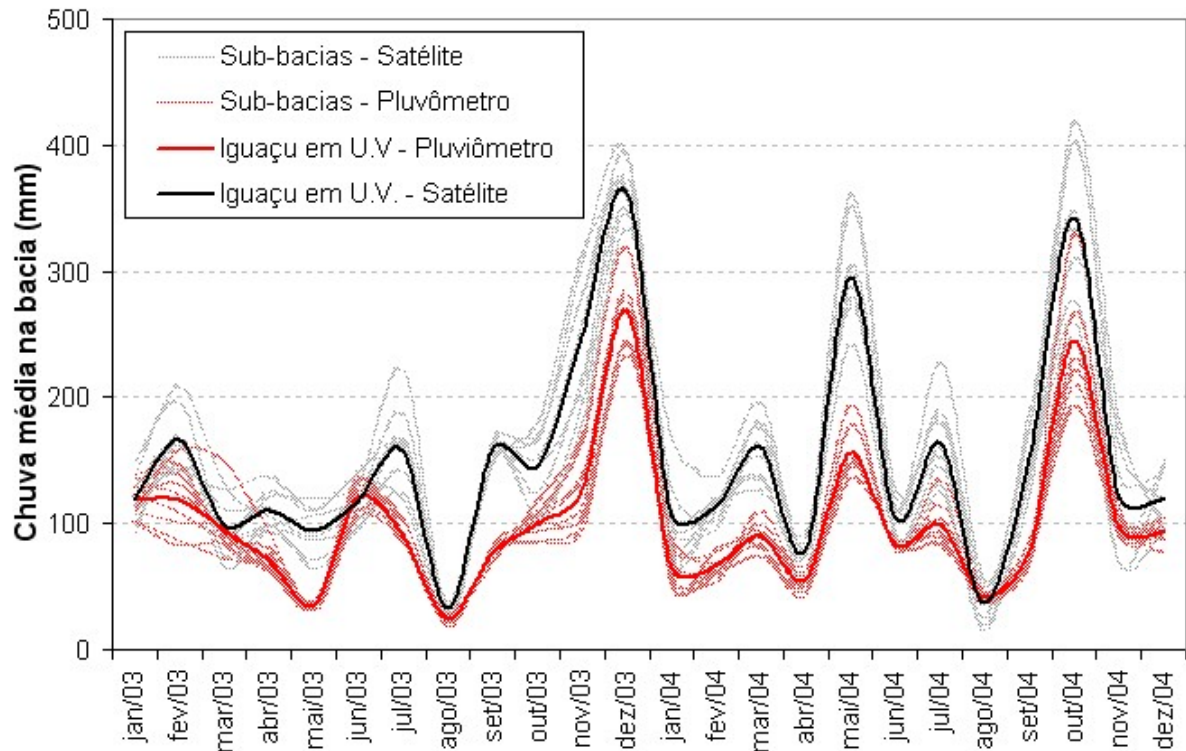
5.1.2 Estatísticas das séries agregadas

5.1.2.1 Mensal

A chuva média na bacia, estimada por pluviômetro e satélite, acumulada por mês é ilustrada na figura 5.16. As cores mais escuras representam a chuva média para a bacia do Iguazu em União da Vitória e, as mais claras, para as diversas sub-bacias. Nota-se que a chuva média na bacia do Iguazu em União da Vitória ficou próxima à média obtida entre todas as outras sub-bacias em conjunto. Foi observada também

uma mesma tendência entre todas as seqüências de chuva acumulada mensal, sendo evidenciado apenas nas intensidades, resultantes da superestimativa da chuva por parte do satélite na escala diária.

FIGURA 5.16 – CHUVA MÉDIA MENSAL POR SATÉLITE E PLUVIÔMETRO PARA A BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA E SUB-BACIAS



A tabela 5.6 apresenta as estatísticas de chuva mensal de satélite e pluviômetro para a bacia do rio Iguaçu em União da Vitória: número de dias de chuva (NDC), chuva acumulada mensal e chuva média mensal.

TABELA 5.6 – ESTATÍSTICAS DE CHUVA MÉDIA MENSAL PARA A BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA

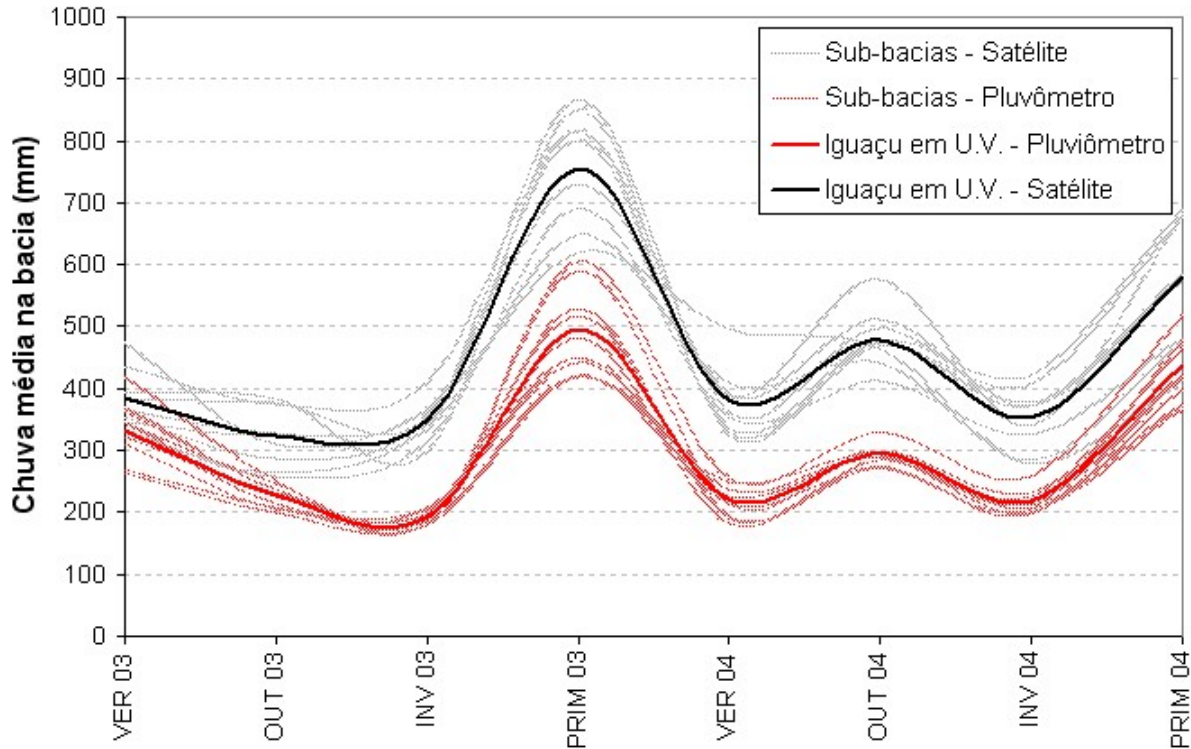
Mês	Número de dias de chuva (NDC)		Chuva Acumulada (mm.mês ⁻¹)		Chuva média (mm.dia ⁻¹)	
	SAT	PLU	SAT	PLU	SAT	PLU
JAN/03	10	12	118.57	118.71	11.86	9.89
FEV/03	21	18	166.24	119.33	7.92	6.63
MAR/03	15	15	98.90	94.90	6.59	6.33
ABR/03	7	8	110.71	70.45	15.82	8.81
MAI/03	3	3	94.55	35.35	31.52	11.78
JUN/03	7	8	117.98	120.80	16.85	15.10
JUL/03	7	6	158.07	90.73	22.58	15.12
AGO/03	6	6	32.76	24.34	5.46	4.06
SET/03	10	8	158.31	77.88	15.83	9.73
OUT/03	12	11	146.28	100.58	12.19	9.14
NOV/03	14	14	247.63	125.66	17.69	8.98
DEZ/03	19	17	361.98	268.54	19.05	15.80
JAN/04	17	17	106.08	64.64	6.24	3.80
FEV/04	11	11	115.27	66.93	10.48	6.08
MAR/04	11	10	160.92	90.23	14.63	9.02
ABR/04	14	13	78.91	55.27	5.64	4.25
MAI/04	14	14	294.56	155.82	21.04	11.13
JUN/04	10	5	105.12	82.71	10.51	16.54
JUL/04	11	10	163.98	98.90	14.91	9.89
AGO/04	3	2	37.11	42.11	12.37	21.05
SET/04	9	9	151.61	77.11	16.85	8.57
OUT/04	13	9	342.66	244.74	26.36	27.19
NOV/04	11	12	120.45	98.05	10.95	8.17
DEZ/04	16	15	118.46	93.11	7.40	6.21

5.1.2.2 Por estação

A figura 5.17 apresenta a chuva média na bacia acumulada por estação do ano (Verão, Primavera, Outono e Inverno), sendo definidas as estações: Verão: janeiro, fevereiro e março, Outono: abril, maio e junho, Inverno: julho, agosto e setembro, e Primavera: outubro, novembro e dezembro. Nesta figura, da mesma maneira que para o caso mensal, as cores mais escuras representam a chuva média na bacia do Iguazu em União da Vitória e as mais claras para as diversas sub-bacias. Nota-se que a CMB para a bacia do Iguazu em União da Vitória ficou também próxima da média entre todas as chuvas das sub-bacias em conjunto. Nessa escala também foi observada uma mesma tendência para as seqüências de chuva, sendo que

na Primavera de 2003 e 2004 observou-se um volume maior de chuva e, em consequência disso, uma maior diferença entre os dados de satélite e pluviômetro nessa estação.

FIGURA 5.17 – CHUVA MÉDIA POR ESTAÇÃO: SATÉLITE E PLUVIÔMETRO PARA A BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA E SUAS SUB-BACIAS



São apresentadas nas tabelas 5.7 e 5.8 as estatísticas de chuva estimadas por satélite e pluviômetro, por estação do ano, para a sub-bacia de Porto Amazonas e para a bacia do Iguaçu em União da Vitória, respectivamente.

TABELA 5.7 – ESTATÍSTICAS DE CHUVA MÉDIA POR ESTAÇÃO DO ANO PARA A SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS

Estação	Ano	NDC		Chuva Acumulada (mm.3meses ⁻¹)		Chuva média (mm.mes ⁻¹)	
		SAT	PLU	SAT	PLU	SAT	PLU
VERÃO	2003	36	42	476.49	311.12	158.83	103.71
OUTONO	2003	17	16	313.04	208.14	104.35	69.38
INVERNO	2003	22	18	366.59	206.54	122.20	68.85
PRIMAVERA	2003	41	40	620.16	442.22	206.72	147.41
VERÃO	2004	37	33	498.69	239.09	166.23	79.70
OUTONO	2004	34	29	467.58	292.32	155.86	97.44
INVERNO	2004	22	21	286.14	200.00	95.38	66.67
PRIMAVERA	2004	37	36	473.89	398.62	157.96	132.87

TABELA 5.8 – ESTATÍSTICAS DE CHUVA MÉDIA POR ESTAÇÃO DO ANO PARA A BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA

Estação	Ano	NDC		Chuva Acumulada (mm.3meses ⁻¹)		Chuva média (mm.mes ⁻¹)	
		SAT	PLU	SAT	PLU	SAT	PLU
VERÃO	2003	46	45	383.71	332.94	127.90	110.98
OUTONO	2003	17	19	323.24	226.60	107.75	75.53
INVERNO	2003	23	20	349.14	192.95	116.38	64.32
PRIMAVERA	2003	45	42	755.89	494.78	251.96	164.93
VERÃO	2004	39	38	382.27	221.80	127.42	73.93
OUTONO	2004	38	32	478.59	293.80	159.53	97.93
INVERNO	2004	23	21	352.70	218.12	117.57	72.71
PRIMAVERA	2004	40	36	581.57	435.90	193.86	145.30

5.1.2.3 Anual

As tabelas 5.9 e 5.10 apresentam as estatísticas de chuva anuais de satélite e pluviômetro para a sub-bacia de Porto Amazonas e para a bacia do Iguazu em União da Vitória, respectivamente. As mesmas características observadas nas outras escalas (mensal e por estação) são observadas também para a agregação anual.

TABELA 5.9 – ESTATÍSTICAS DE CHUVA MÉDIA ANUAL PARA A SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS

Ano	NDC		Chuva Acumulada (mm.ano ⁻¹)		Chuva média (mm.mês ⁻¹)	
	SAT	PLU	SAT	PLU	SAT	PLU
2003	116	116	1776.28	1168.02	148.02	97.33
2004	130	119	1726.30	1130.03	143.86	94.17

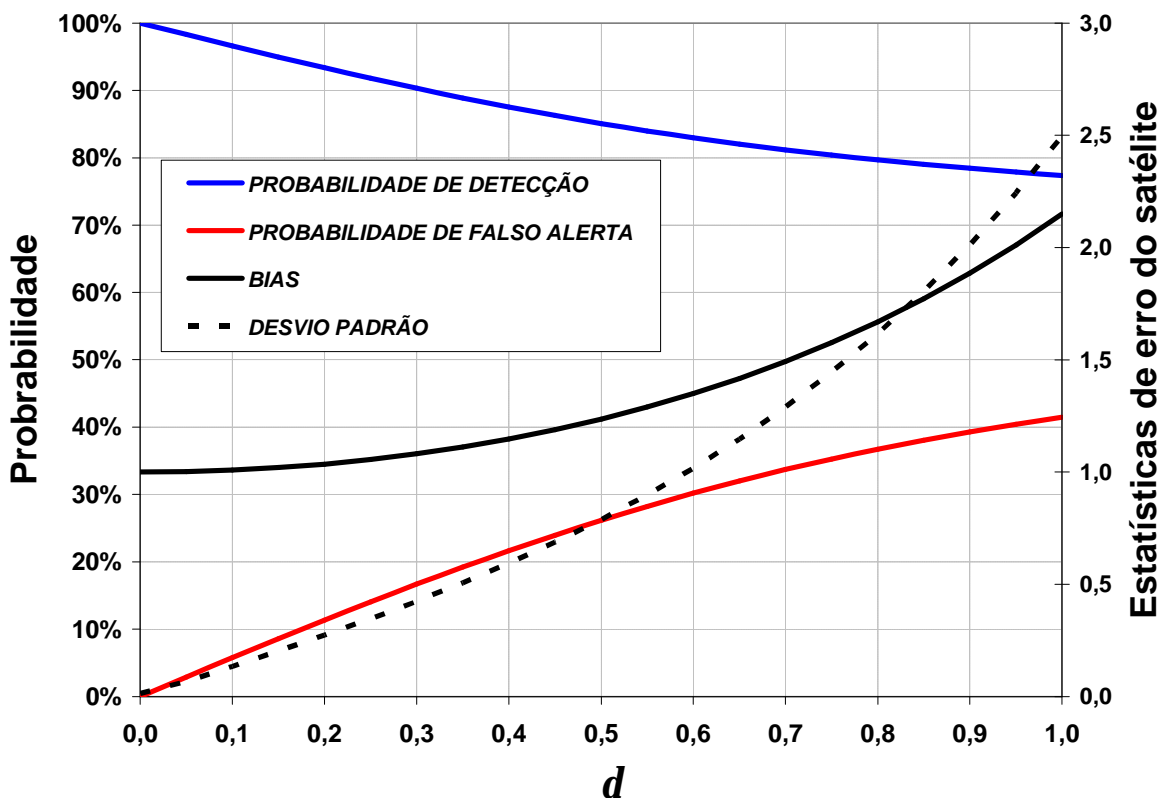
TABELA 5.10 – ESTATÍSTICAS DE CHUVA MÉDIA ANUAL PARA A BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA

Ano	NDC		Chuva Acumulada (mm.ano ⁻¹)		Chuva média (mm.mês ⁻¹)	
	SAT	PLU	SAT	PLU	SAT	PLU
2003	131	126	1811.98	1247.27	151.00	103.94
2004	140	127	1795.13	1169.62	149.59	97.47

5.2 ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA INCERTEZA DA CHUVA ESTIMADA POR SATÉLITES

A figura 5.18 apresenta os resultados da metodologia da análise probabilística da incerteza da chuva descrita por GEORGAKAKOS (1992). No eixo das abscissas é representado o intervalo da distribuição de erro d (ver equação 2.13), e nas ordenadas da esquerda e direita, respectivamente, o par de estatísticas: probabilidade de detecção (curva azul) e falso alerta (curva vermelha), e o BIAS (curva preta contínua) e desvio padrão (curva preta tracejada).

FIGURA 5.18 – RESULTADOS DA ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA INCERTEZA DA CHUVA ESTIMADA POR SATÉLITE: PROBABILIDADES DE DETECÇÃO E FALSO ALERTA



d A partir do gráfico da figura 5.18 é feita uma análise da metodologia probabilística para as estimativas de chuva média na bacia do Iguazu em União da Vitória, sendo esquematizada na figura 5.19. A interpretação gráfica dessa análise é

descrita pelos seguintes passos:

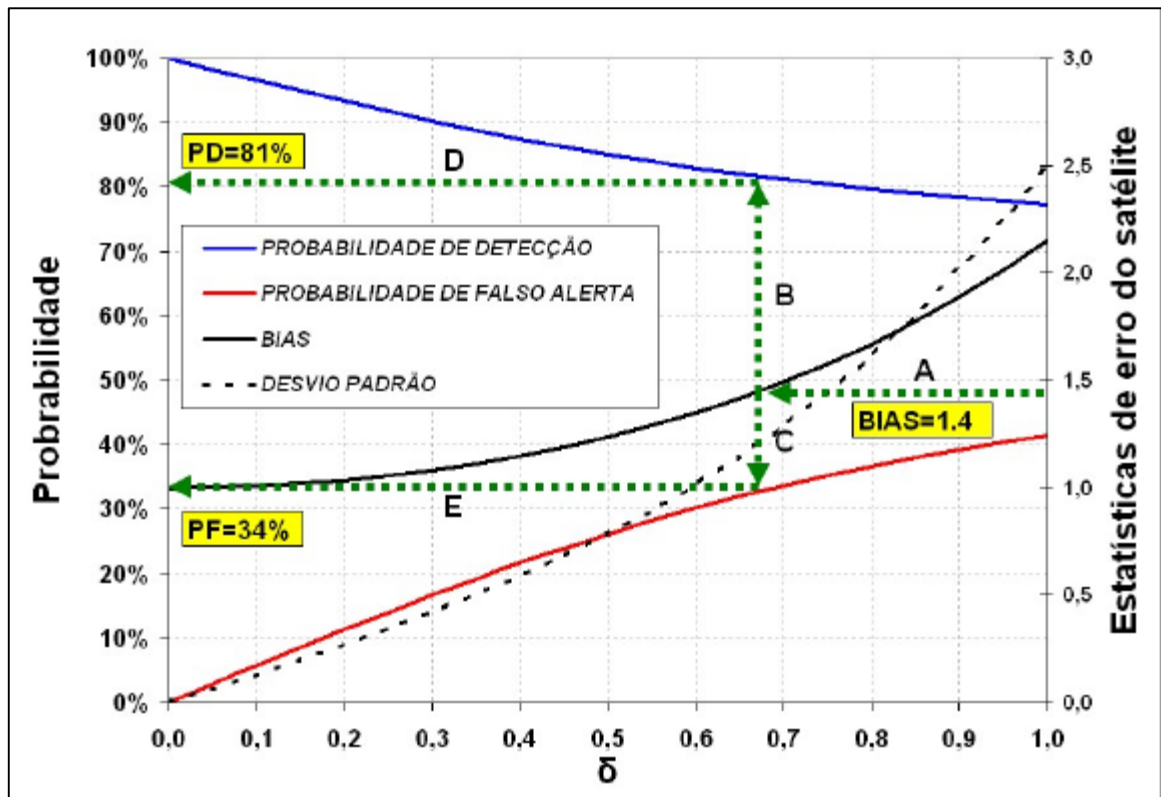
- (a) Inserção no gráfico do *BIAS* de 1,49 (ver tabela 5.5 – estatística quantitativa de chuva para a bacia do Iguaçu em União da Vitória);
- (b) A partir da ordenada da direita fixada em 1,49, prolonga-se uma reta horizontal até a curva referente ao *BIAS* (representado pela seta A);
- (c) A partir da intersecção com a curva do *BIAS*, prolongam-se duas retas verticais, uma para cima em encontro com a curva da probabilidade de detecção, e outra para baixo, em encontro com a curva da probabilidade de falso alerta (representado pelas setas B e C);
- (d) A partir da intersecção com as curvas das probabilidades de detecção e alarme falso, prolongam-se outras duas retas horizontais em encontro com a ordenada da esquerda (representado pelas setas D e E);
- (e) Na intersecção com a ordenada da esquerda efetuam-se as leituras das probabilidades de detecção e falso alerta procuradas.

Assim, para a metodologia da análise probabilística, as probabilidades de detecção e falso alerta são de 81% e 34%, respectivamente, para a bacia do rio Iguaçu em União da Vitória, referentes ao *BIAS* de 1,49.

Conforme o mesmo procedimento, nota-se que para um *BIAS* de 1,0, ou seja, os dados de satélites são iguais aos dados de pluviômetro, a probabilidade de detecção é de 100% e a probabilidade de falso alerta, 0%, o que demonstra a coerência do método.

A partir da probabilidade de detecção de 81%, conclui-se que a estimativa de chuva *CMORPH* é adequada para utilização em sistemas de alertas de cheias na bacia do Iguaçu em União da Vitória. Todavia, analisando um valor elevado de 34% na probabilidade de falso alerta, conclui-se que isso reduziria relativamente a eficiência do sistema.

FIGURA 5.19 – VERIFICAÇÃO DA METODOLOGIA DA ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA INCERTEZA DA CHUVA ESTIMADA POR SATÉLITE NA BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA



Com isso, conclui-se que a metodologia probabilística é adequada para avaliar as incertezas da chuva estimada por satélite em sistemas de alertas de cheias, porém, em determinados locais do planeta, a chuva pode se aproximar a outras distribuições de probabilidade diferentes da exponencial, na qual se baseia o método proposto por GEORGAKAKOS (1992). Da mesma forma, para cada tipo de produto de chuva estimada por satélite, uma relação de erro entre o dado remoto e a chuva “real” pode ser encontrada, sendo assim, diferente da equação 2.13. Essas situações devem ser levadas em consideração na avaliação das incertezas usando esse método, sendo que se aconselha, dependendo da localização da bacia e do tipo de produto de chuva por satélite, que novas distribuições de probabilidade da chuva sejam testadas ou aferidas, bem como, verificadas outras relações de erro entre a estimativa por satélite e a chuva “real”.

5.3 ANÁLISE DA INCERTEZA DA CHUVA NA MODELAGEM HIDROLÓGICA

O objetivo da análise da incerteza da chuva na modelagem hidrológica é verificar se a qualidade do produto *CMORPH* de estimativa de chuva por satélite é suficiente para ser usada na previsão hidrológica em bacias com escala maior do que 1.000 km². Esta verificação é conduzida por meio de um estudo de sensibilidade do modelo hidrológico em função do tipo de dado de entrada, da escala da bacia hidrográfica, e da configuração do modelo. Os tipos de dados de entrada utilizados são: chuva média na bacia diária derivada da rede de pluviômetros e da estimativa por satélite *CMORPH*. As escalas utilizadas foram de 3.662 km² para a sub-bacia de cabeceira Porto Amazonas, que contém apenas um único pluviômetro localizado na sua exutória, e de 24.211 km², para a bacia do Iguazu em União da Vitória, contendo 13 pluviômetros em seu interior. O modelo usado é o chuva-vazão-propagação 3R, sendo que as suas configurações são: com ou sem estimador de estado. Os parâmetros do modelo hidrológico 3R foram calibrados apenas com as séries de chuva obtidas pela rede pluviométrica, no período 01/01/2003 a 31/12/2004. Após a calibração foram feitas simulações com as séries estimadas por satélite. O motivo pelo qual efetuou-se apenas calibrações com os dados de pluviômetro, é que a calibração com os dados de chuva por satélite não convergiu, pois o modelo não foi capaz de compensar a superestimativa de chuva com a vazão modelada, e outros componentes que compõem o balanço hídrico do 3R. A tabela 5.11 apresenta os parâmetros obtidos com a calibração do modelo hidrológico 3R para a sub-bacia de Porto Amazonas e para a bacia do Iguazu em União da Vitória.

Já para o estimador de estado, foram calibrados os parâmetros ambos para a chuva medida por pluviômetro e estimada por satélite. A tabela 5.12 apresenta os parâmetros obtidos com a calibração do estimador de estado para a sub-bacia de Porto Amazonas e para a bacia do Iguazu em União da Vitória.

TABELA 5.11 – PARÂMETROS DO MODELO HIDROLÓGICO 3R CALIBRADOS PARA A SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS E PARA A BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA

Fase	Parâmetro	Sub-bacia Porto Amazonas	Bacia do Iguaçu em União da Vitória
Bacia	X_1^0	398,4	376,2
	X_2^0	269,1	239,5
	m_1	0,670	1,437
	c_1	0,00022	0,00025
	c_2	0,00555	0,00305
	c_3	152,1	51,8
	m_2	1,8	1,8
	m_3	1,0	1,0
Canal	\mathbf{II}	0,033	0,299
	\mathbf{a}	0,349	0,252
	m	1,0	1,0

TABELA 5.12 – PARÂMETROS DO ESTIMADOR DE ESTADO CALIBRADOS PARA A SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS E PARA A BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA

Local	Pluviômetro		Satélite	
	\mathbf{a}_U	\mathbf{a}_P	\mathbf{a}_U	\mathbf{a}_P
Sub-bacia de Porto Amazonas	9	1	9	9
Bacia do Iguaçu em UV	6	4	3	8

O procedimento adotado para a calibração dos parâmetros \mathbf{a}_U (referentes aos dados de entrada: chuva, vazão e evapotranspiração) e \mathbf{a}_P (referentes aos parâmetros do modelo hidrológico) do estimador de estado, consiste na minimização dos erros: resíduo normalizado, desvio padrão normalizado, correlação dos resíduos normalizados e correlação dos resíduos lag 1, dos resultados do modelo hidrológico. As figuras 5.20 e 5.21 apresentam os resultados da calibração do estimador de estado para os dados de pluviômetro da sub-bacia de Porto Amazonas. A análise gráfica das figuras 5.20 e 5.21 teve como etapas encontrar as seguintes estatísticas : (a) valor do resíduo normalizado tendendo a zero, (b) valor do desvio padrão normalizado tendendo a zero, (c) correlação dos resíduos tendendo a unidade e, (d) correlação lag 1

dos resíduos tendendo a zero. O objetivo é encontrar a melhor situação que satisfaça os itens (a) a (d), simultaneamente. Assim foram determinados os valores de α_U igual a 9 e α_P igual a 1, para os dados de pluviômetro da sub-bacia de Porto Amazonas, indicando que o estimador de estado deu maior ênfase aos erros derivados dos dados de entrada de modelo (peso 9), do que para os seus parâmetros (peso 1). Isso é explicado pelo fato de que a sub-bacia de Porto Amazonas é amostrada por um número reduzido de pluviômetros, com isso, diminuindo a confiança na estimativa da chuva média na bacia. As figuras contendo a calibração do estimador de estado para os demais casos são apresentados no apêndice 4, no final dessa dissertação.

Para as calibrações e simulações do modelo hidrológico foram utilizadas séries de vazões específicas, ou seja, na mesma unidade da chuva, mm.dia^{-1} . As vazões específicas são obtidas a partir do conhecimento da área de drenagem de cada sub-bacia.

FIGURA 5.20 – CALIBRAÇÃO DO ESTIMADOR DE ESTADO COM OS DADOS DE PLUVIÔMETRO PARA A SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS: RESÍDUO E DESVIO PADRÃO NORMALIZADOS

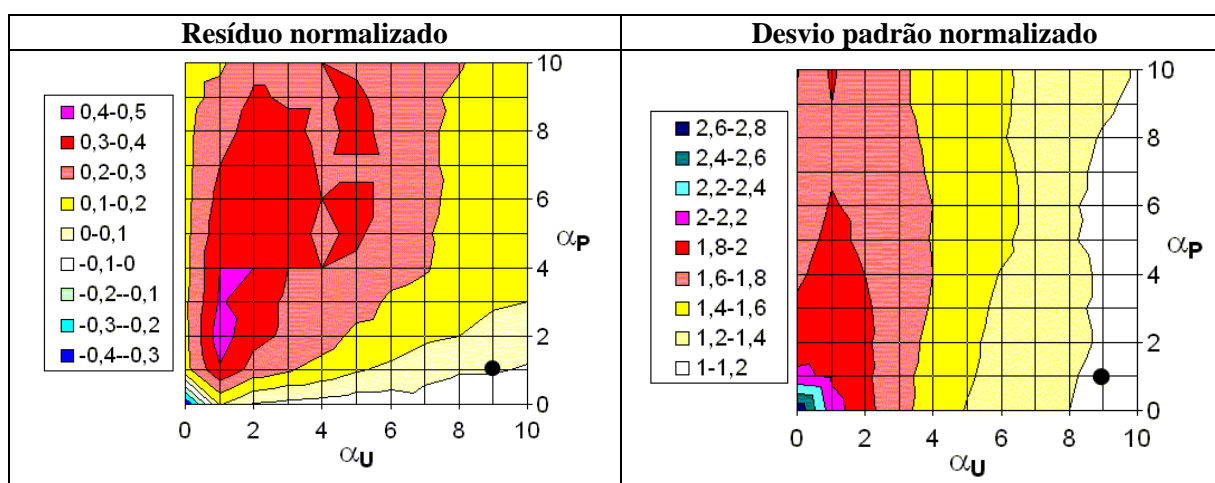
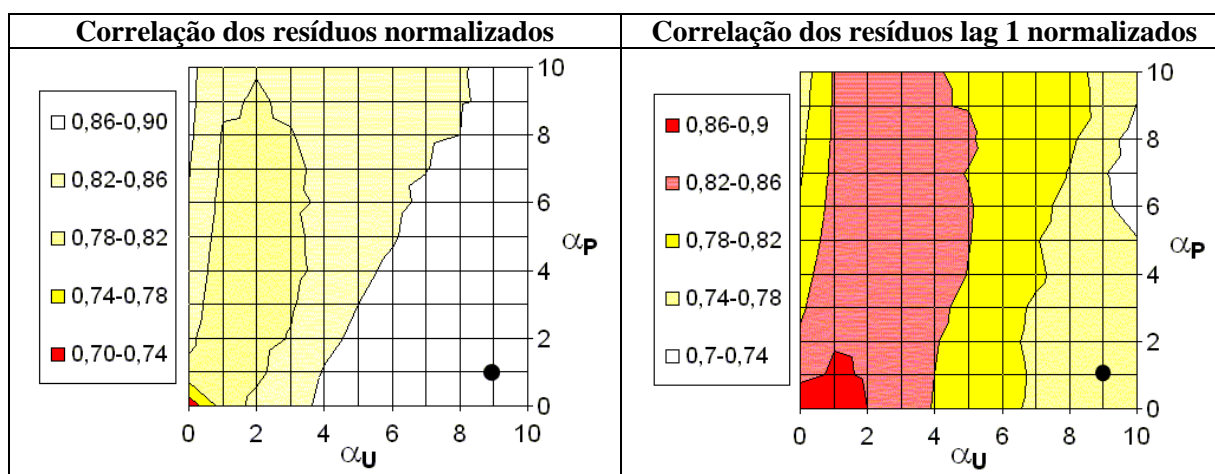


FIGURA 5.21 – CALIBRAÇÃO DO ESTIMADOR DE ESTADO COM OS DADOS DE PLUVIÔMETRO PARA A SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS: CORRELAÇÃO E CORRELAÇÃO LAG 1 NORMALIZADAS



5.3.1 Sub-bacia de Porto Amazonas

A tabela 5.13 resume os resultados da modelagem hidrológica da sub-bacia de Porto Amazonas, apresentando as estatísticas das vazões médias diárias observadas e simuladas nos anos de 2003 e 2004. A comparação entre as vazões simuladas pelo modelo *3R*, usando a chuva medida a partir da rede pluviométrica, com aquela produzida com a chuva *CMORPH*, indica um aumento na correlação entre as vazões observadas e calculadas, quando se utiliza a estimativa por satélite. Porém, as intensidades da vazão média e desvio padrão são maiores, em consequência da superestimativa da chuva por parte do satélite. Observam-se essas características nas duas configurações do modelo, ou seja, com ou sem a atualização de estados. Isso ocorre pelo fato da sub-bacia de Porto Amazonas não ter uma boa representatividade da chuva média na bacia resultante dos pluviômetros, fazendo com que as estimativas de satélite indiquem os picos de chuva e os períodos de estiagem, em alguns casos, com melhor desempenho do que o pluviômetro. A correlação entre as vazões observadas e simuladas aumentam de 0,72 (com pluviômetro) para 0,78 (com satélite), sem o uso do estimador de estado, e de 0,89 (com pluviômetro) para 0,90 (com satélite) utilizando o estimador de estado.

TABELA 5.13 – ESTATÍSTICAS DA MODELAGEM DA SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS: MÉDIA, DESVIO PADRÃO, CORRELAÇÃO, MÉDIA RESIDUAL E DESVIO PADRÃO RESIDUAL

Sub-bacia	Estatística	Vazão Observada	Vazão simulada pelo modelo 3R sem estimador de estado		Vazão simulada pelo modelo 3R com estimador de estado	
			PLU	SAT	PLU	SAT
Porto Amazonas	Média (mm.dia ⁻¹)	1,59	1,59	2,81	1,56	1,84
	Desvio padrão (mm.dia ⁻¹)	0,80	0,62	1,44	0,67	0,94
	r (Modelo x Observado)	-	0,72	0,78	0,89	0,90
	Média dos resíduos	-	0,00	-1,21	0,04	-0,24
	Desvio padrão dos resíduos	-	0,55	0,96	0,36	0,40

Nas vazões simuladas com a inclusão do estimador de estado, nota-se uma grande melhoria na qualidade da modelagem, com destaque para a redução das médias, desvios padrões e resíduos das vazões simuladas com a chuva estimada por satélite. A qualidade da modelagem usando as estimativas por satélite com o estimador de estado, foi muito semelhante à obtida com os pluviômetros. As figuras 5.22 e 5.23 ilustram as comparações das vazões observadas e simuladas em Porto Amazonas, para dois períodos específicos da série (20/07/2003 a 28/10/2003 e 12/11/2003 a 22/02/2004). Nota-se, que mesmo com a vazão simulada com a estimativa de satélite ser, em média, maior do que a simulada com os pluviômetros, em várias situações a simulação com os dados de satélite identificou melhor alguns picos e recessões do hidrograma. Isso demonstra que em bacias com monitoramento esparsos de superfície, o uso das estimativas de chuva por satélite podem apresentar resultados muito satisfatórios.

Nos próximos itens (5.3.1.1 e 5.3.1.2) são detalhadas todas as simulações realizadas na sub-bacia de Porto Amazonas: chuva estimada por satélites, medida por pluviômetros, com e sem estimador de estado, bem como é apresentada uma análise de sensibilidade dos parâmetros de armazenamento do modelo hidrológico.

FIGURA 5.22 – COMPARAÇÕES DAS VAZÕES OBSERVADAS E SIMULADAS NA SUB-BACIA DE PORTÓ AMAZONAS NO PERÍODO DE 20/07/2003 A 28/10/2003

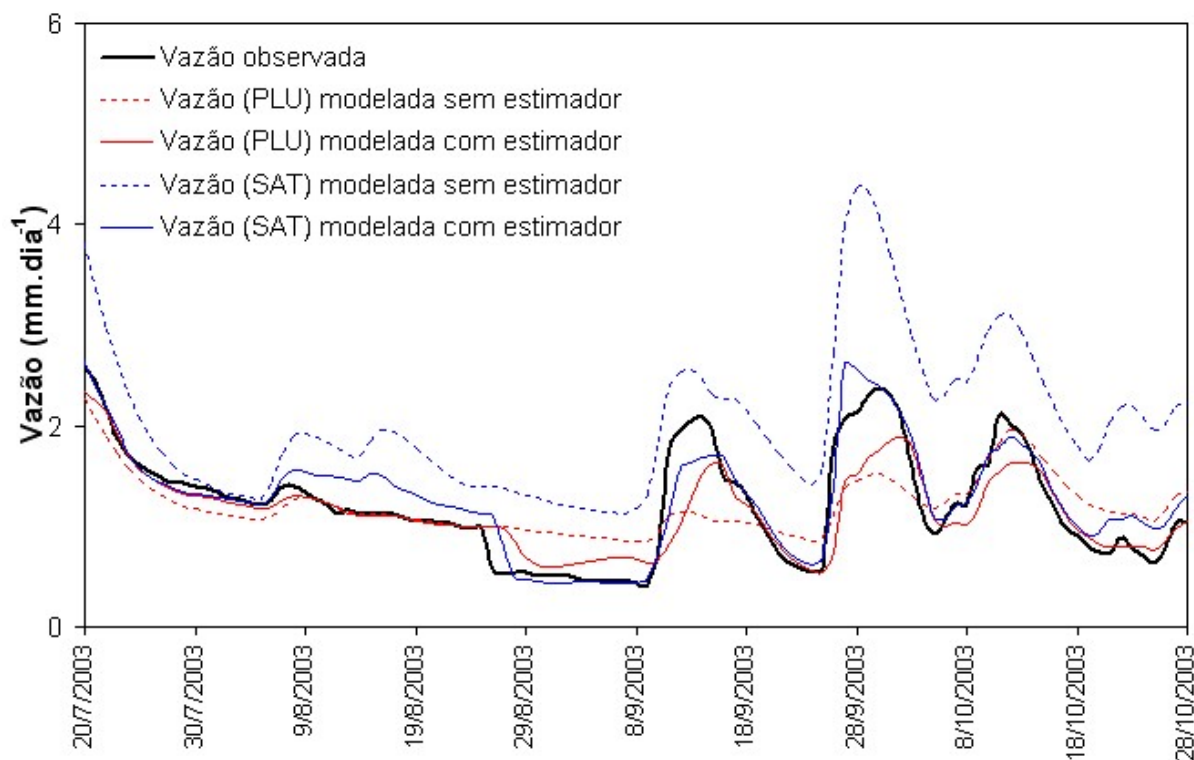
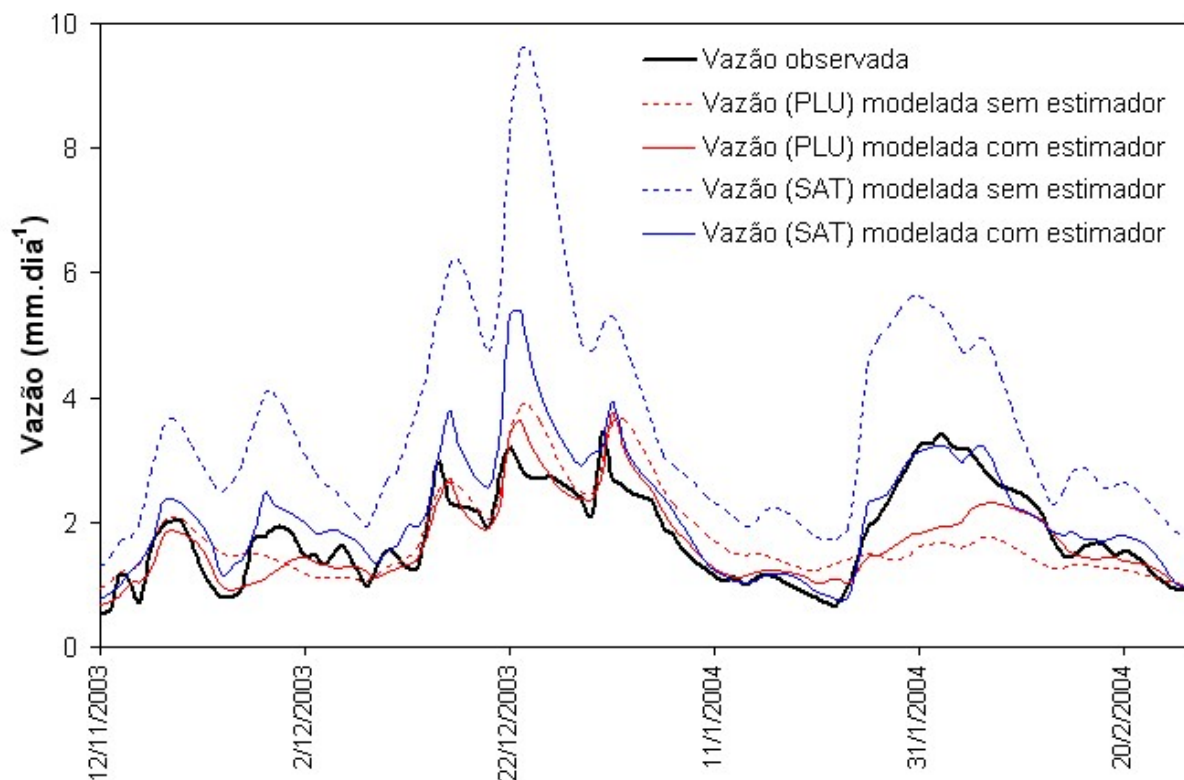


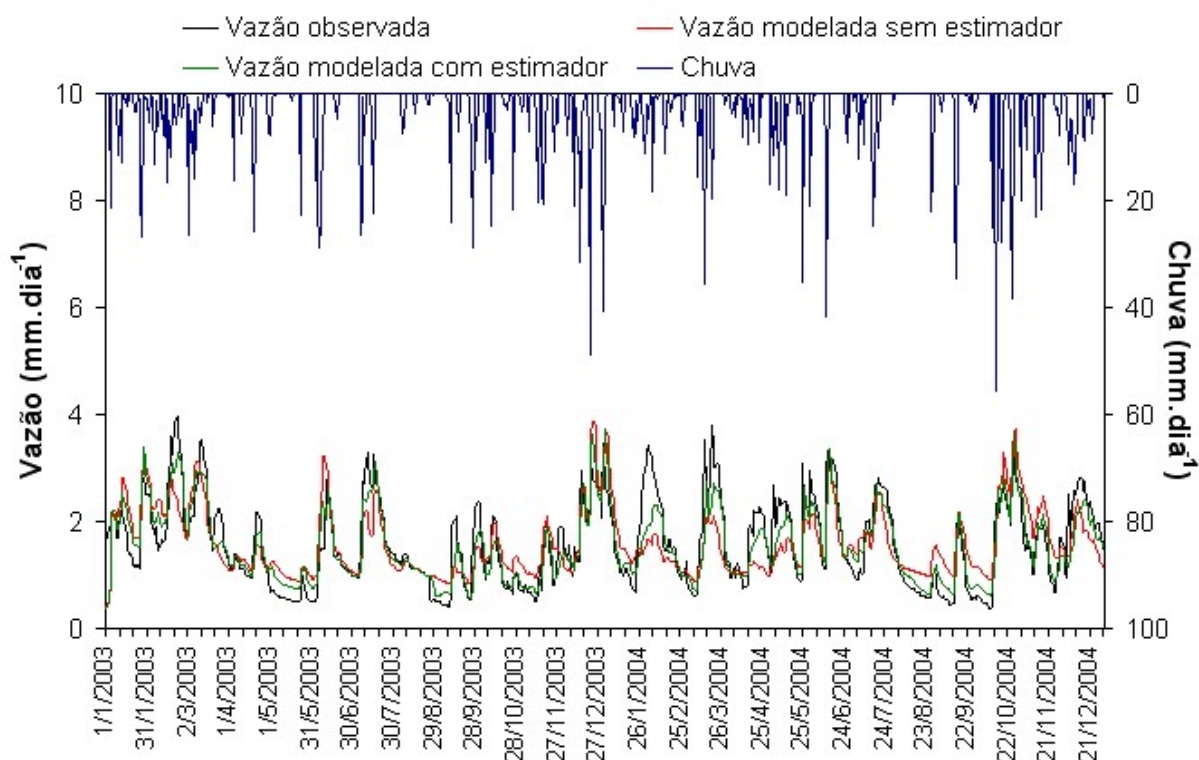
FIGURA 5.23 – COMPARAÇÕES DAS VAZÕES OBSERVADAS E SIMULADAS NA SUB-BACIA DE PORTÓ AMAZONAS NO PERÍODO DE 12/11/2003 A 22/02/2004



5.3.1.1 Modelagem com os dados de pluviômetros

A figura 5.24 ilustra a simulação da sub-bacia de Porto Amazonas em 2003-2004, obtida com os dados de pluviômetro, comparando os resultados das configurações do modelo hidrológico com e sem estimador de estado. De modo geral, o estimador de estado melhora significativamente a performance do modelo hidrológico, mesmo não sendo capaz de identificar alguns picos do hidrograma observado.

FIGURA 5.24 – SIMULAÇÃO DA SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS OBTIDA PELO MODELO 3R ALIMENTADO COM OS DADOS DE PLUVIÔMETRO

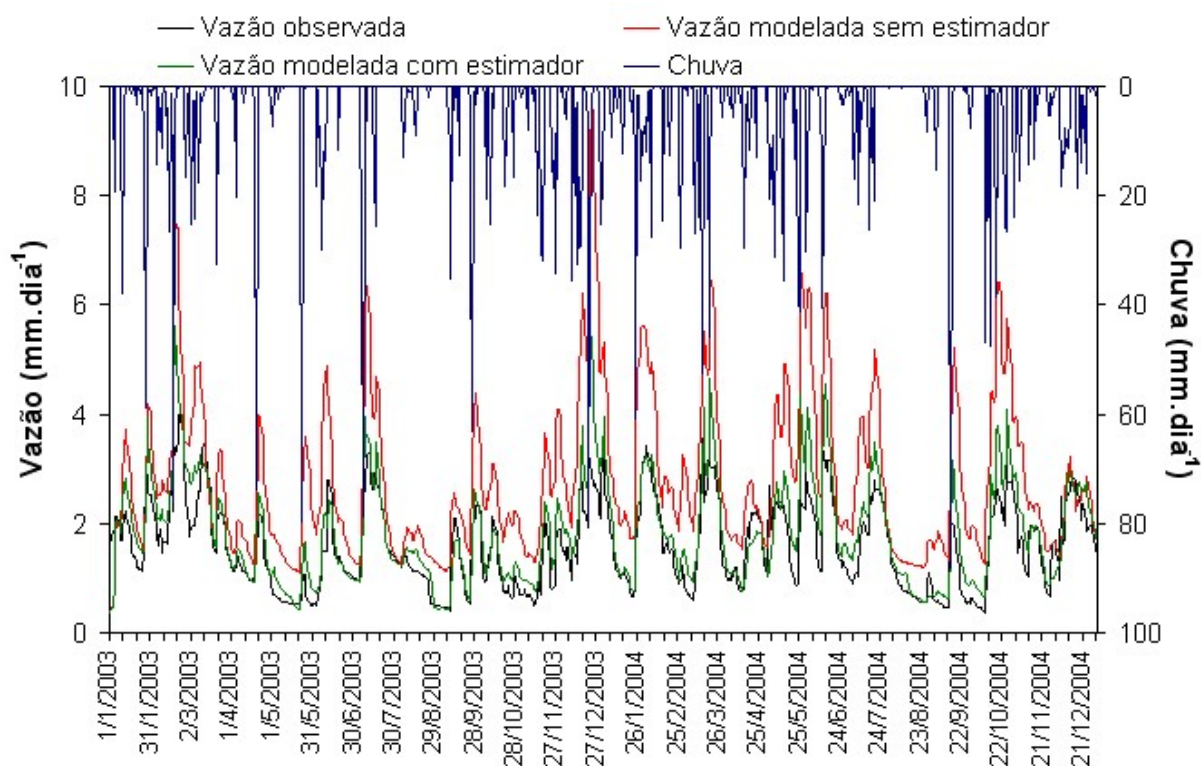


5.3.1.2 Modelagem com os dados de satélite

A figura 5.25 ilustra a simulação da sub-bacia de Porto Amazonas obtida com os dados de satélite, comparando os resultados das configurações do modelo hidrológico com e sem estimador de estado. Neste caso, com a incorporação do

estimador de estado, observaram-se ganhos significativos na performance do modelo hidrológico para o período 2003-2004. O estimador de estado foi capaz de reduzir a superestimativa da vazão modelada (representado pela linha vermelha), e representou os picos e as recessões do hidrograma mais adequadamente do que os dados de pluviômetro. Então, nesse caso para a sub-bacia de Porto Amazonas, a estimativa de chuva por satélite com uso do estimador de estado, apresentou melhores resultados de vazão modelada do que a modelagem obtida com os dados de pluviômetro sem atualização de estado.

FIGURA 5.25 – SIMULAÇÃO DA SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS OBTIDA PELO MODELO 3R ALIMENTADO COM OS DADOS DE SATÉLITE



Os armazenamentos do modelo hidrológico na camada superior (X_1) e inferior (X_2), bem como os armazenamentos nos reservatórios conceituais de propagação (X_3 e X_4), ou seja, os estados do modelo, são representados nas figuras 5.26 e 5.27, em função da configuração do modelo hidrológico (com ou sem estimador de estado). Por meio dessas figuras pode ser explicado o motivo do modelo

hidrológico, com o uso do estimador de estado, corrigir a vazão modelada de forma superestimada. Nota-se na figura 5.27 uma maior variação do parâmetro de armazenamento na camada inferior do solo X_2 , em comparação com a figura 5.26, sem o uso do estimador de estado. Isso pode ser observado também para os demais parâmetros de armazenamento (X_1 , X_3 e X_4). O modelo atenua as incertezas da superestimativa da chuva por satélite na modelagem, por meio da distribuição dos erros sobre os seus parâmetros de armazenamento, fazendo com que todo o excesso de água inserido no modelo com a chuva estimada por satélite, seja melhor distribuído sobre os seus diversos compartimentos, para o cálculo do balanço hídrico na bacia. Isso é possível devido ao uso da vazão monitorada para a solução das equações governantes do modelo, diminuindo assim, as incertezas no cálculo da vazão.

FIGURA 5.26 – PARÂMETROS X_1 , X_2 , X_3 E X_4 DE ARMAZENAMENTO DO MODELO 3R PARA A SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS – DADOS DE SATÉLITE – SEM ESTIMADOR DE ESTADO

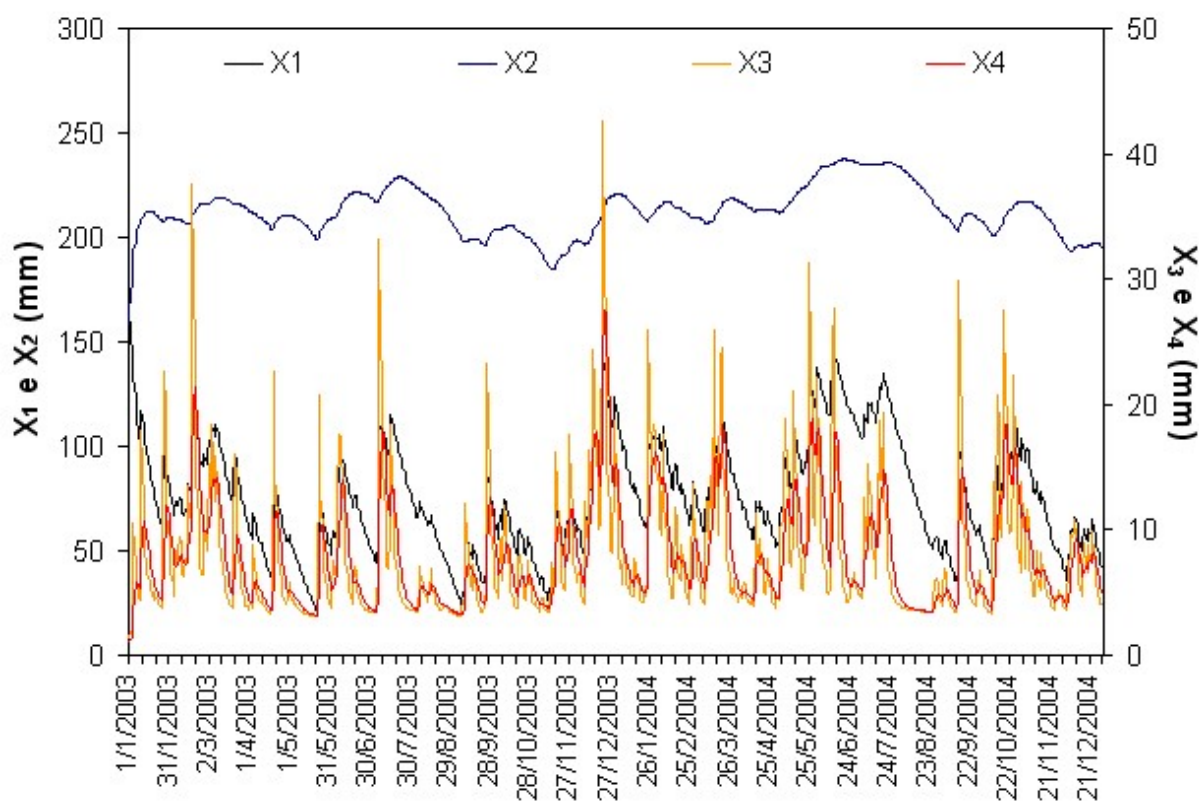
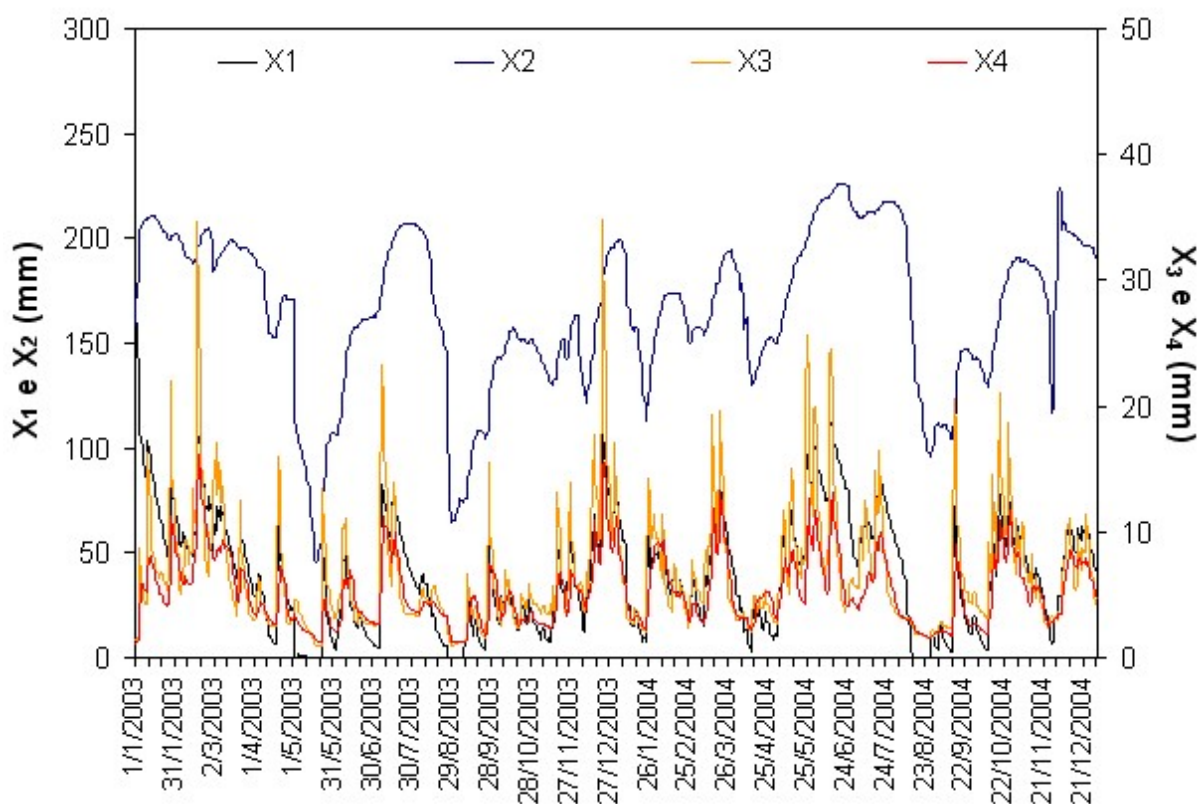


FIGURA 5.27 – PARÂMETROS X_1 , X_2 , X_3 E X_4 DE ARMAZENAMENTO DO MODELO 3R PARA A SUB-BACIA PORTO AMAZONAS – DADOS DE SATÉLITE – COM ESTIMADOR DE ESTADO



5.3.2 Bacia do Iguaçu em União da Vitória

A tabela 5.14 resume os resultados da modelagem hidrológica da bacia do Iguaçu em União da Vitória, apresentando as estatísticas das vazões médias diárias observadas e simuladas nos anos de 2003 e 2004. Neste caso, como a amostragem da chuva média na bacia é bem maior do que para a sub-bacia de Porto Amazonas, a simulação com os dados de pluviômetros sem o uso do estimador de estado já apresentou bons resultados. Para a simulação com os dados de satélite sem o uso do estimador de estado foram verificadas as mesmas características da bacia de cabeceira, ou seja, superestimativa da vazão calculada.

Para as vazões simuladas com o uso do estimador de estado, nota-se um aumento considerável na performance do modelo hidrológico, tanto para os dados de

pluviômetros, quanto para os dados de satélite, com a vazão simulada com a chuva estimada por satélites sendo mais conservativa do que a vazão simulada pelos pluviômetros. A melhoria na qualidade da modelagem hidrológica usando o estimador de estado foi mais sensível para as estimativas por satélite, onde notam-se as mesmas características de redução das vazões modeladas, que eram superestimadas quando o estimador de estado não era utilizado na sub-bacia de Porto Amazonas.

TABELA 5.14 – ESTATÍSTICAS DA MODELAGEM DA BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA: MÉDIA, DESVIO PADRÃO, CORRELAÇÃO, MÉDIA RESIDUAL E DESVIO PADRÃO RESIDUAL

Sub-bacia	Estatística	Vazão Observada	Vazão simulada pelo modelo 3R sem estimador de estado		Vazão simulada pelo modelo 3R com estimador de estado	
			PLU	SAT	PLU	SAT
Bacia do Iguaçu em União da Vitória	Média (mm.dia ⁻¹)	1,33	1,33	2,75	1,32	1,64
	Desvio padrão (mm.dia ⁻¹)	0,94	0,83	1,99	0,88	1,16
	r (Modelo x Observado)	-	0,87	0,74	0,97	0,94
	Média dos resíduos	-	0,00	-1,42	0,01	-0,31
	Desvio padrão dos resíduos	-	0,46	1,44	0,24	0,43

As figuras 5.28 e 5.29 ilustram comparações entre as vazões observadas e simuladas na bacia do Iguaçu em União da Vitória, para dois períodos específicos da série (09/01/2003 a 20/03/2003 e 29/09/2004 a 30/12/2004). Nota-se, neste caso, que a simulação feita com os dados de pluviômetro, com estimador de estado, se adequou mais à série observada. A redução das incertezas da chuva estimada por satélite por parte do estimador de estado, fez com que as vazões simuladas (por satélite) ficassem muito próximas às simuladas com o pluviômetro, e por sua vez com a vazão observada. Ou seja, a incorporação do estimador de estado faz com que se tenha uma modelagem tão boa, utilizando as estimativas de satélite, quanto as que foram feitas com os dados derivados de pluviômetros em uma bacia contendo uma rede representativa da chuva média espacial.

FIGURA 5.28 – COMPARAÇÕES DAS VAZÕES OBSERVADAS E SIMULADAS NA BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA - 09/01/2003 A 20/03/2003

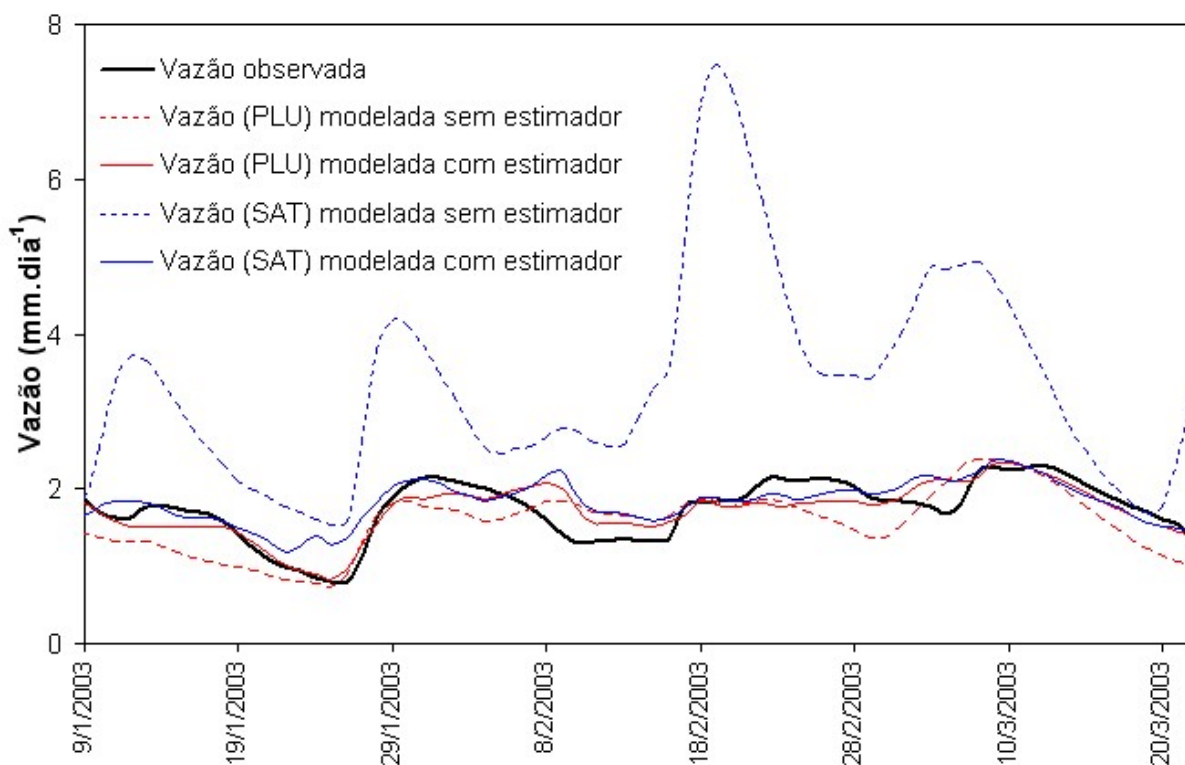
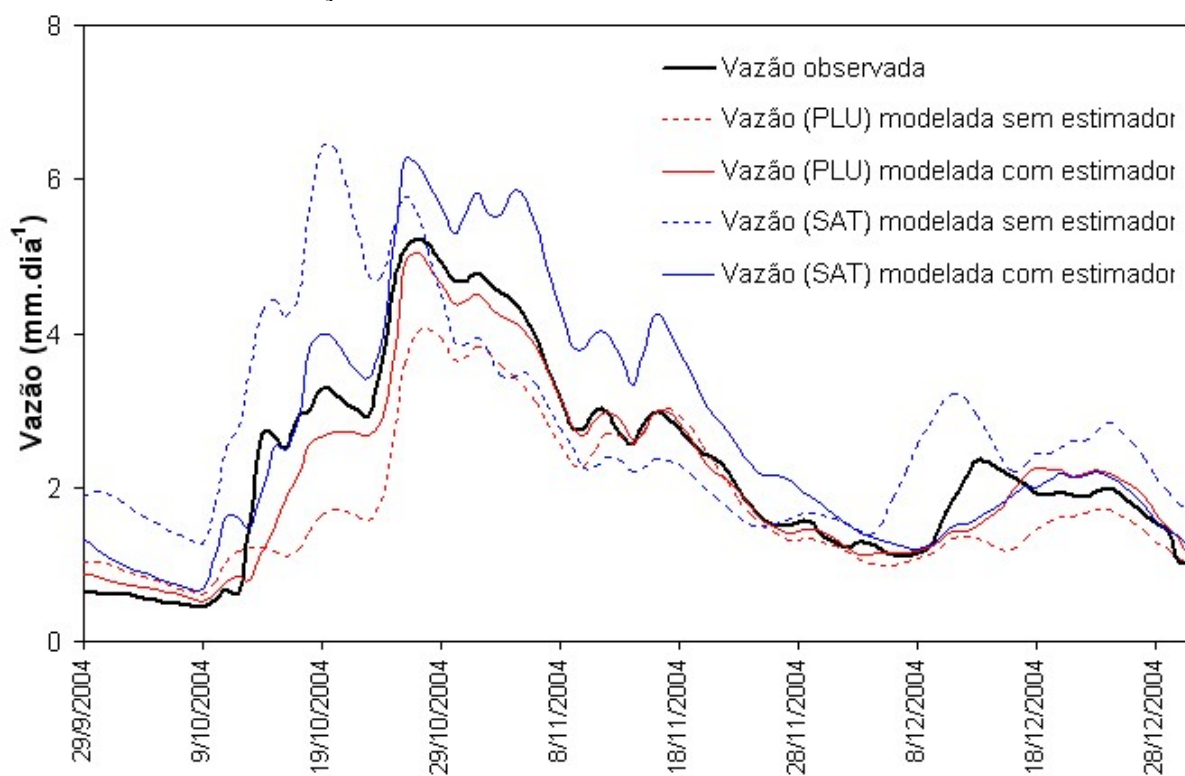


FIGURA 5.29 – COMPARAÇÕES DAS VAZÕES OBSERVADAS E SIMULADAS NA BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA - 29/09/2004 A 30/12/2004

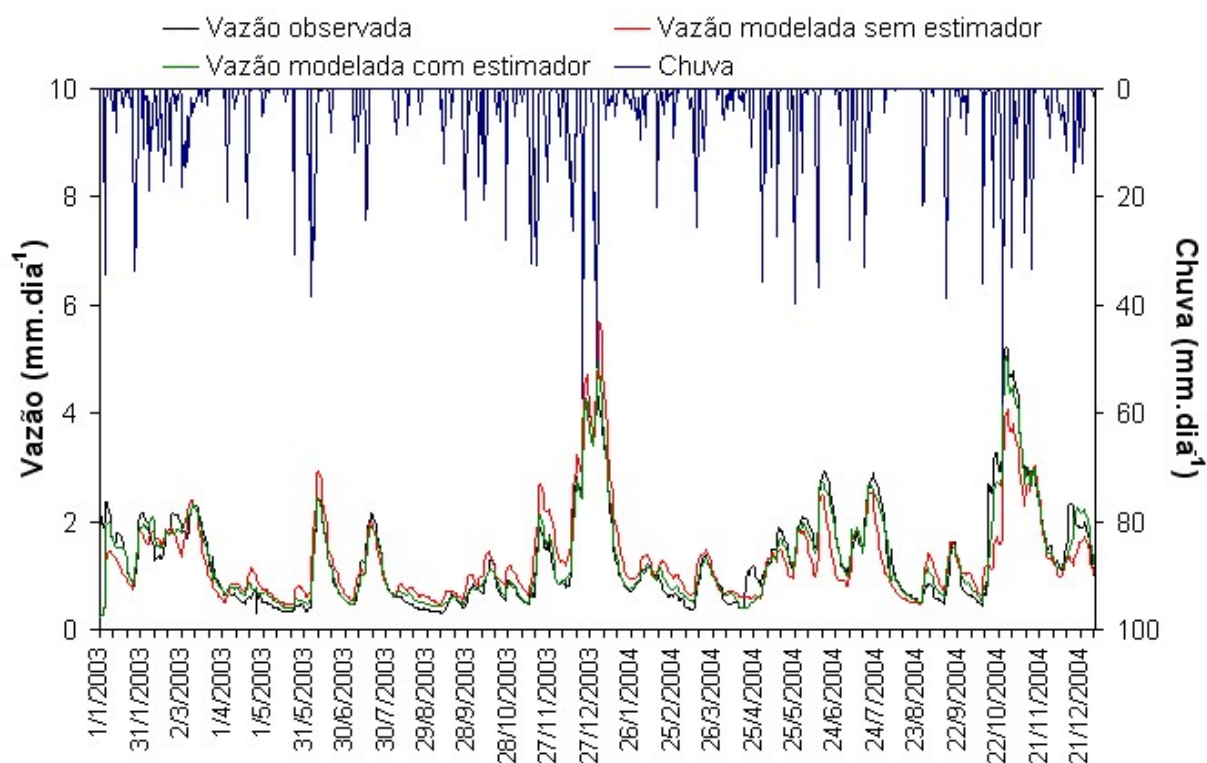


Nos próximos itens (5.3.2.1 e 5.3.2.2) são descritas as simulações feitas na bacia do Iguazu em União da Vitória, para todas as situações: chuva estimada por satélites, chuva medida por pluviômetros, com e sem estimador de estado, bem como é apresentada uma análise de sensibilidade dos parâmetros de armazenamento do modelo hidrológico (estados).

5.3.2.1 Modelagem com os dados de pluviômetros

A figura 5.30 ilustra a simulação da bacia do Iguazu em União da Vitória, obtida com os dados de pluviômetros, comparando os resultados das configurações do modelo hidrológico com e sem estimador de estado. De modo geral, o estimador de estado melhorou significativamente a performance da modelagem, resultando em vazões simuladas e observadas muito parecidas para a série de 2003-2004.

FIGURA 5.30 – SIMULAÇÃO DA BACIA DO IGUAZU EM UNIÃO DA VITÓRIA OBTIDA PELO MODELO 3R ALIMENTADO COM OS DADOS DE PLUVIÔMETRO

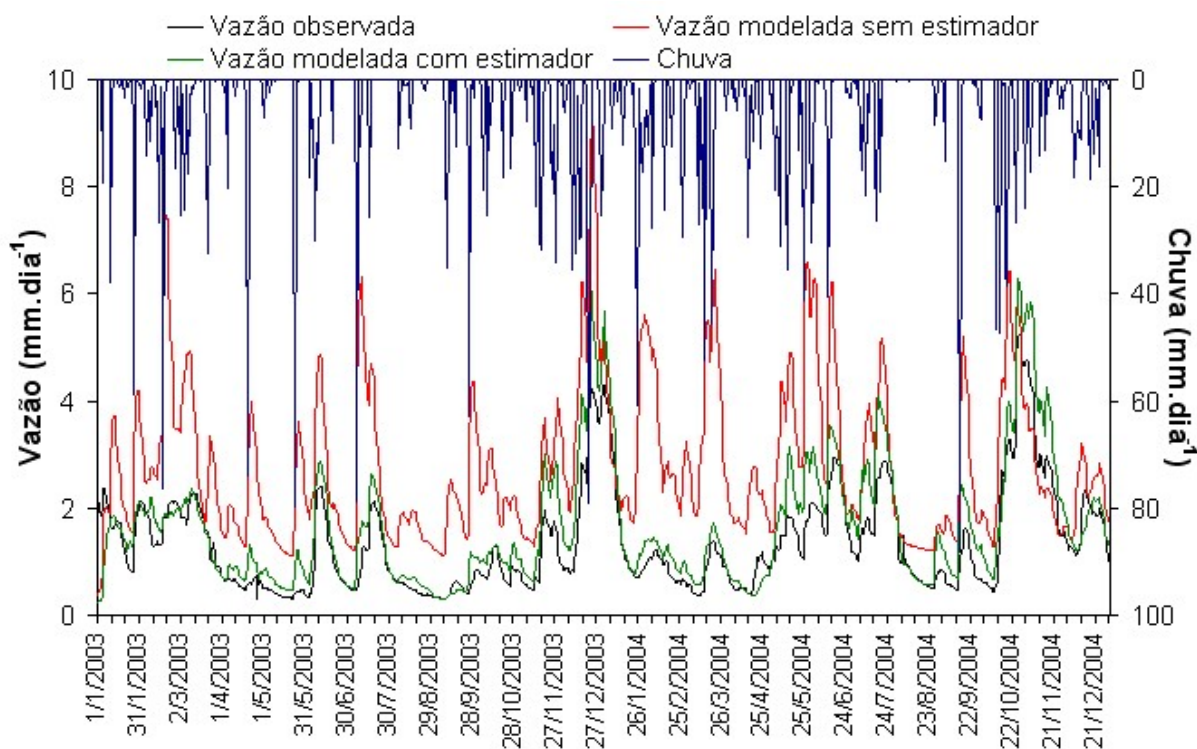


5.3.2.2 Modelagem com os dados de satélite

A figura 5.31 ilustra a simulação da bacia do Iguazu em União da Vitória, obtida com os dados de satélite, comparando os resultados das configurações do modelo hidrológico com e sem estimador de estado. Neste caso, com a inclusão do estimador de estado, também foram observados ganhos significativos na performance do modelo hidrológico para o período 2003-2004. O estimador de estado foi capaz de reduzir a superestimativa da vazão calculada (representado pela linha vermelha), e gerou vazões mais parecidas com a observada (linha verde).

Com base nos resultados obtidos na sub-bacia de Porto Amazonas e na bacia do Iguazu em União da Vitória, conclui-se que para o uso de estimativas de chuva por satélite na modelagem hidrológica, torna-se imprescindível a incorporação do estimador de estado no modelo hidrológico.

FIGURA 5.31 – SIMULAÇÃO DA BACIA DO IGUAZU EM UNIÃO DA VITÓRIA OBTIDA PELO MODELO 3R ALIMENTADO COM OS DADOS DE SATÉLITE



Os armazenamentos do modelo hidrológico representados pelos parâmetros X_1 , X_2 , X_3 e X_4 são mostrados nas figuras 5.32 e 5.33, em função da configuração do modelo hidrológico (com ou sem estimador de estado). Observam-se aqui, como na sub-bacia de Porto Amazonas, as mesmas características de variação dos parâmetros de armazenamento do modelo, servindo para distribuição dos erros da superestimativa da chuva por satélite sobre os compartimentos de armazenamento do modelo. Neste caso, foi notada uma variação ainda maior dos parâmetros de armazenamento, isso sendo devido à maior escala da bacia hidrográfica.

FIGURA 5.32 – PARÂMETROS X_1 , X_2 , X_3 E X_4 DE ARMAZENAMENTO DO MODELO 3R PARA A BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA – DADOS DE SATÉLITE – SEM ESTIMADOR DE ESTADO

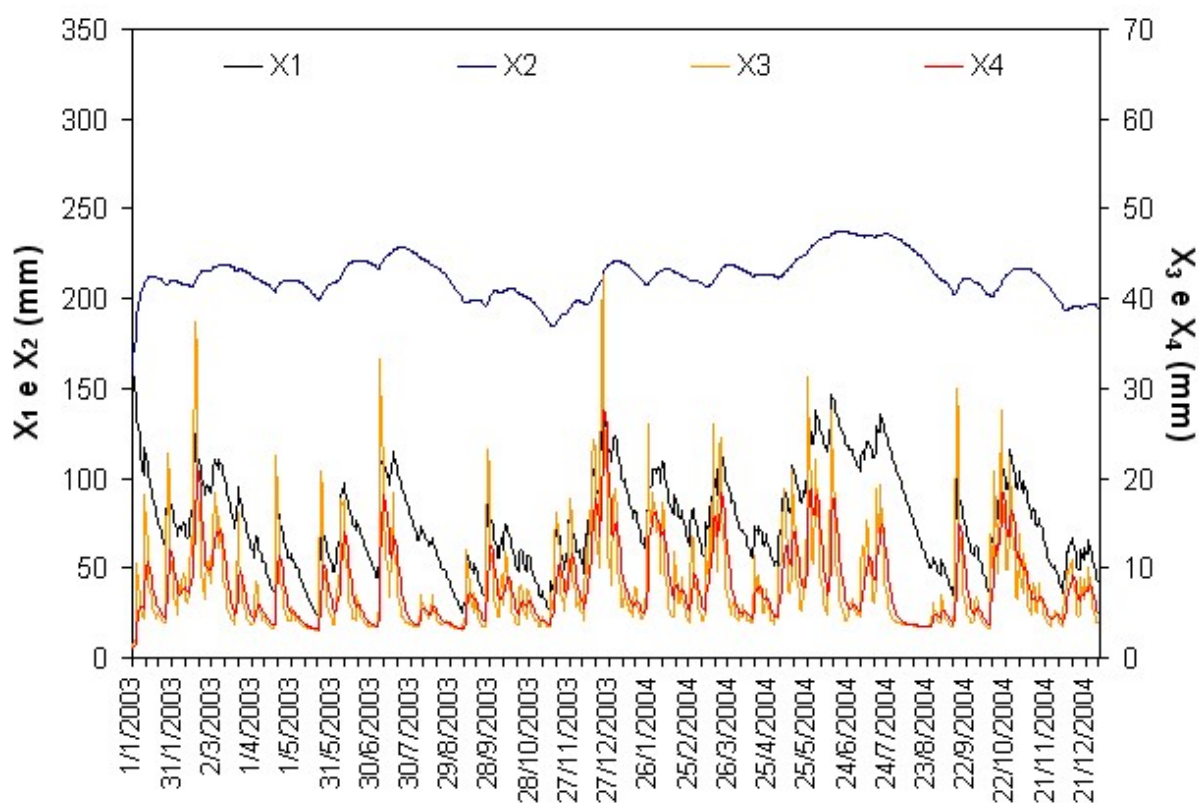
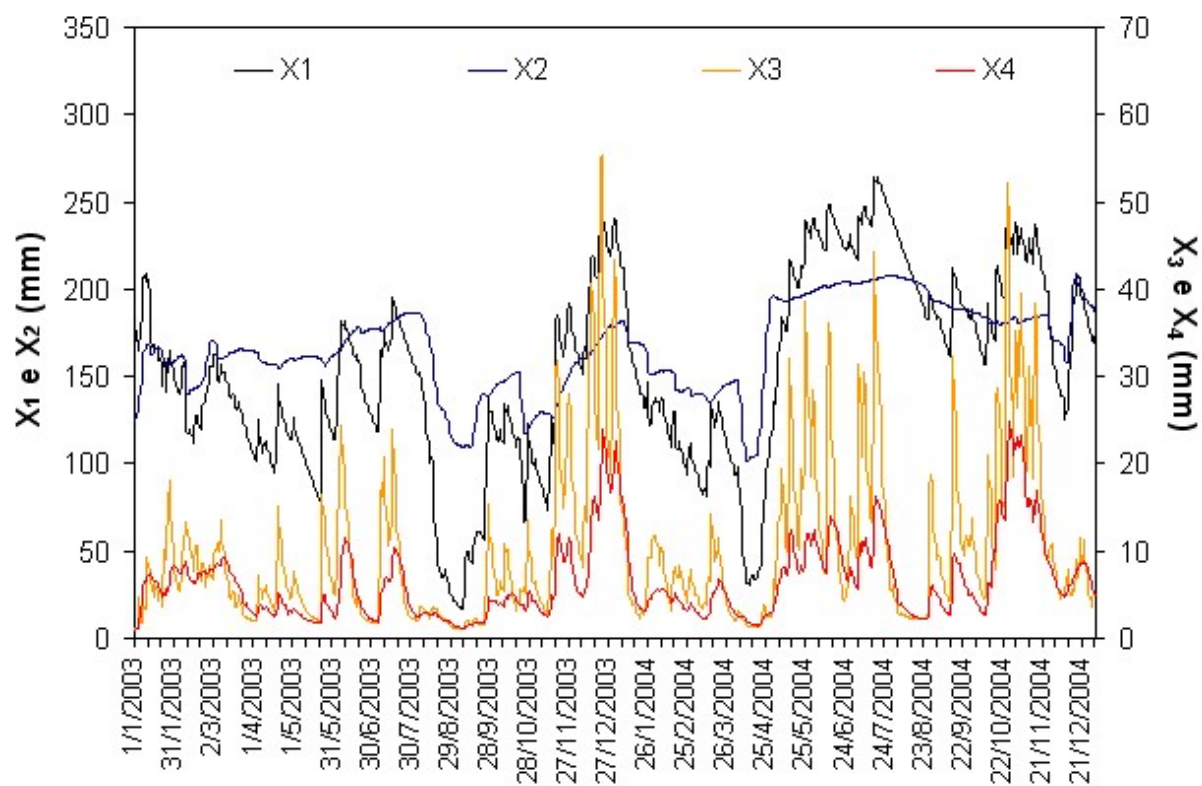


FIGURA 5.33 – PARÂMETROS X_1 , X_2 , X_3 E X_4 DE ARMAZENAMENTO DO MODELO 3R PARA A BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA – DADOS DE SATÉLITE – COM ESTIMADOR DE ESTADO



CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o potencial do uso de estimativas de chuva por satélite para a previsão hidrológica, tanto no alerta da ocorrência de chuvas intensas como na previsão de inundações com o uso de modelos chuva-vazão-propagação. Selecionou-se a bacia do rio Iguaçu em União da Vitória, na região Sul do Brasil, para a validação das estimativas de chuva por satélite, por meio da avaliação das diferenças entre a chuva média na bacia estimada pelo satélite com a técnica *CMORPH*, e a estimada pela rede de pluviômetros. A análise de validação indicou que a frequência e duração dos eventos de chuva foi muito semelhante tanto no monitoramento pela rede de pluviômetros, quanto pelo satélite. A estimativa da chuva por satélite apresentou maiores intensidades e, por consequência disso, maiores volumes acumulados do que a rede de pluviômetros. O valor das correlações obtidas entre a chuva estimada por satélite e monitorada por pluviômetros, para as várias sub-bacias, foi da ordem de 0,85. Portanto, houve boa aderência entre as estimativas de chuva média por satélite e pluviômetros, distribuídas sobre áreas variando de 2.000 km² e 25.000 km². O número de dias de chuva entre satélite e pluviômetro ficou bastante próximo, sendo que para o satélite cerca de 37% do tempo, contra 35% do pluviômetro.

Foi desenvolvida uma análise probabilística da incerteza da chuva sobre a probabilidade de detecção de cheias e da emissão de um falso alerta. A análise probabilística foi fundamentada no cômputo de distribuições de probabilidades condicionadas pela relação de erro da estimativa de chuva. Foram estimadas as probabilidades de emissão de um falso alerta e de detecção de cheias para que o produto *CMORPH* de estimativa de chuva por satélite possa ser usado em sistemas de alerta de inundações. Os resultados demonstraram que a metodologia da análise probabilística fornece uma boa ferramenta para verificação do uso das estimativas de satélite em sistemas de alertas de cheias, e para a bacia do Iguaçu foram verificadas

probabilidades de detecção e falso alerta de 81% e 34%, respectivamente.

Nesse estudo, avaliou-se também o impacto da utilização da chuva estimada por satélite na modelagem hidrológica, usando um estimador de estado, que assimila a vazão observada em tempo real. As conclusões desse estudo de viabilidade foram: (1) a resposta do modelo hidrológico depende significativamente do tipo de dado de entrada usado (i. e. rede de pluviômetros ou chuva estimada por satélite), (2) os estados do modelo hidrológico, que conferem “memória” para a modelagem, variam significativamente em função do dado de entrada; neste estudo o produto de satélite teve um viés de superestimar a chuva média, causando uma saturação mais rápida da bacia e aumentando os picos dos hidrogramas, (3) a inclusão da atualização de estado no modelo hidrológico, com assimilação da vazão observada, atenua as incertezas na estimativa da chuva por satélite, produzindo uma modelagem com qualidade equivalente à obtida pelo modelo hidrológico quando usa somente dados da rede pluviométrica.

Concluindo, as estimativas de chuva por satélite com a técnica *CMORPH* apresentam grande potencial para serem usadas em diversas aplicações hidrológicas, como por exemplo, em previsões de cheias com modelos chuva-vazão em bacias desprovidas de monitoramento pluviométrico em tempo real, ou ainda em conjunto com os dados pluviométricos esparsos, radar, ou outros instrumentos, para produzir estimativas de chuva média na bacia com maior acurácia.

A análise dos resultados produz as seguintes recomendações e orientações gerais para a modelagem hidrológica: (1) recomenda-se que novas tecnologias de estimativa de chuva como o *CMORPH* devam ser integradas em bacias com monitoramento de superfície e radar, para que os dados de satélite possam ser usados em bacias sem monitoramento de chuva em tempo real ou com redes muito esparsas, (2) a acurácia das estimativas de chuva por satélite já é suficiente para que se produzam sistemas de previsão de vazão mesmo em bacias que não tenham monitoramento pluviométrico com transmissão de chuva em tempo real, (3) o

monitoramento fluviométrico automático, com transmissão de dados em tempo real é essencial para um sistema de previsão hidrológico, pois permite implementar algoritmos de atualização de estado que atenuam os erros nas estimativas de chuva, (4) o uso de modelos hidrológicos aprimorados com atualização de estados e assimilação de vazão reduz a sensibilidade dos modelos aos erros no monitoramento da chuva, (5) se o sistema de monitoramento e transmissão de dados incluir uma rede pluviométrica, então a densidade desta rede deve ser bem distribuída em cada sub-bacia do sistema, em acordo com a densidade recomendada pela *World Meteorological Organization*, ao invés de ter um único pluviômetro coincidente com o posto fluviométrico na exutória da bacia, e (6) mesmo havendo uma rede pluviométrica com transmissão automática, se deve incluir as estimativas de chuva por satélite para eventuais contingências de falhas na rede e para suporte ao controle de qualidade dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADLER, R.F.; HUFFMAN, G.J.; KEEHN, P.R. Global tropical rain estimates from microwave-adjusted geosynchronous IR data. **Remote Sensing Reviews.**, 11, p. 125-152, 1994.
- ADLER, R.F.; NEGRI, A.J. A satellite infrared technique to estimate tropical convective and stratiform rainfall. **Journal of Applied Meteorology**, 27, p. 30-51, 1988.
- ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas. Inventário: estações fluviométricas. Brasília, 2001.
- ARAUJO, A.N.; GUETTER, A.K. Estimativa de chuva por satélite para a bacia do rio Ivaí. In: I CONGRESSO PARAGUAIO DE RECURSOS HÍDRICOS, 10.2005, Hernandarias, Paraguai. CD-ROM.
- ARAUJO, A.N.; GUETTER, A.K. Análise da eficiência da chuva estimada por satélite "CMORPH" na bacia do rio Iguaçu. In: Recursos Hídricos: Prêmio Jovem Pesquisador 2005, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Fortaleza, 2005.
- ARAUJO, A.N.; GUETTER, A.K. Regionalização hidrológica através de estimativas de chuva por satélite. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 11.2005, João Pessoa. CD-ROM.
- ARKIN, P.A. The relationship between fractional coverage of high cloud and rainfall accumulations during GATE over the B-scale array. **Monthly Weather Review**, 107, p. 1382-1387, 1979.
- ARKIN, P.A.; JANOWIAK, J. Analysis of the global distribution of precipitation. **Dyn. Atmos. Oceans**, 16, p. 5-16, 1991.
- ARKIN, P.A.; MEISNER, B.N. The relationship between large scale convective rainfall and cold cloud over the western hemisphere during 1982-1984. **Monthly Weather Review**, 115, p. 51-74, 1987.
- ARNAUD, P.; BOUVIER, C.; CISNEROS, L.; DOMINGUEZ, R. Influence of rainfall spatial variability on flood prediction. **Journal of Hydrology**, 260:1, p. 216-230, 2002.
- BAE, D.H.; GEORGAKAKOS, K.P. Hydrological modeling for flow forecasting and climate studies in large drainage basins. Relatório Técnico nº 360. Iowa City: The University of Iowa, 241p., 1992.
- BRAS, R.L. Hydrology: An Introduction to Hydrologic Science. EUA: Wesley, 1990
- CALVETTI, L.; BENETI, C.; PEREIRA FILHO, A.J. Características das estimativas

de precipitação por radar, satélite e pluviômetro no Paraná: Uma comparação entre chuva de verão e chuva provocada por frente fria. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 11.2003, Curitiba. CD-ROM.

CENTENO, J.A.S. Sensoriamento remoto e processamento de imagens digitais. Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, 2004.

CHOKNGAMWONG, R.; CHIU, S. L. Comparisons of daily hailand rain gauge with GPCC and TRMM satellite precipitation measurements. The 2nd TRMM International Science Conference, 2004, Nara, Japão.

CPC-NOAA (Climate Prediction Center – National Oceanic and Atmospheric Administration). CMORPH Precipitation Validation Page. Disponível em <<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/janowiak/cmorph.html>>. Acesso em dezembro de 2004.

CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos). Estimativas de precipitação: Hidroestimador. Disponível em <<http://satelite.cptec.inpe.br/htmldocs/precipitacao/hidro.htm>>. Acesso em dezembro de 2004.

DEVORE, J. L. Probability and Statistics for engineering and the sciences. 5th Edition, Duxbury Thomson Learning, EUA, 2000.

DNAEE (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica). Divisão de controle dos recursos hídricos. Inventário das estações fluviométricas. Brasília, 1987.

DROEGEMEIER, K.K.; SMITH, J.D.; BUSINGER, S.; DOSWELL, C.; DOYLE, J.; DUFFY, C.; FOUFOULA-GEORGIU, E.; GRAZIANO, T.; JAMES, L.D.; KRAJEWISK, V.; LEMONE, M.; LETTENMAIER, D.; MASS, C.; PIELKE, R.; RUTLEDGE, S.; RAY, P.; SCHAAKE, J.; ZIPSER, E. Hydrologic aspects of weather prediction and flood warnings: Report of the Ninth Prospectus Development Team of the U.S. Weather Research Program. Bulletin of the American Meteorological Society, 81(11), p. 2665-2680, 2000.

EBERT, E.E. Monitoring the quality of operational and semi-operational satellite precipitation estimates – the IPWG validation/intercomparison study. 2nd International Precipitation Working Group, 25-28 Outubro 2004, Monterey, EUA.

EBERT, E.E.; MANTON, M.J. Performance of satellite rainfall estimation algorithms during TOGA-COARE. **Journal of Atmospheric Sciences.**, 55, N09, p. 1537-1557, 1998.

FERRARO, R.R. Special sensor microwave imager derived global rainfall estimates for climatological applications. **Journal of Geophysical Research**, 102, p. 16715-16735, 1997.

FERRARO, R. R.; WENG, F.; GRODY, N.C.; ZHAO, L. Precipitation characteristics over land from the NOAA-15 AMSU sensor. **Geophysical Research Letters**, 27, p. 2669-2672, 2000.

GEORGAKAKOS, K.P. Advances in forecasting flash floods. Proceedings of the CCNAA-AIT joint seminar on prediction and damage mitigation of meteorologically induced natural disasters. National Taiwan University, maio 21-24, 1992.

GEORGAKAKOS, K.P.; RAJARAM, H.; LI, S.G. On improved operational hydrologic forecasting of streamflow. IIHR Report No. 325. Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa, Iowa City, 1988, 162 pp.

GEORGAKAKOS, K.P.; BRAS, R.L. Real time statistically linearized adaptive flood routing. *Water Resources Research*, 18(3), 513-524, 1982.

GEORGAKAKOS, K.P.; ARTAN, G.A. Hydrologic modeling and forecasting for the upper Iguazu river catchment. HRC Limited Distribution Report No. 5. Hydrologic Research Center, San Diego-CA, fevereiro de 1997.

GRODY, N.C. Classification of snow cover and precipitation using the special sensor microwave imager. **Journal of Geophysical Research**, 96, N° D4, p. 7423-7435, 1991.

GUEDES, R.L.; DIAS, M.A.F.S. Estudo de caso de tempestades severas associado com o jato subtropical na América do Sul. In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 1984, Rio de Janeiro. CR-ROM.

GUETTER, A.K.; ARAUJO, A.N.; KRAUSKOPF NETO, R. Previsão hidrológica na bacia do rio Ivaí usando estimativa de chuva por satélite. In: I CONGRESSO PARAGUAIO DE RECURSOS HÍDRICOS, 10.2005, Hernandarias, Paraguai. CD-ROM.

GUETTER, A. K.; GEORGAKAKOS, K. P. Uncertainty in the prediction of streamflow by real-time prediction models using satellite rainfall estimates. Preprints AMS 13th Conference on Hydrology, American Meteorological Society, Boston, MA 2-7 february, 1997, pp. J109-J112.

GUETTER, A. K.; GEORGAKAKOS, K. P.; TSONIS, A. A. Hydrologic applications of satellite data: 2. Flow simulation and soil water estimates. **Journal of Geophysical Research**, Vol. 101, No D21, 26.527-26.538, november, 1996.

HOSSAIN, F.; ANAGNOSTOU, E.M.; BAGTZOGLU, A.C. Efficient uncertainty assessment for satellite rainfall observations with application to flood prediction. Proceedings of the ninth biennial ASCE Aerospace Division International Conference on Engineering, Construction and Operations in challenging environments. League City/Houston, Texas, EUA, pp 532-539, 7-10 march, 2004.

HUFFMAN, G.J.; ADLER, R.F.; MORRISSEY, M.M.; BOLVIN, D.T.; CURTIS, S.; JOYCE, R.; McGAVOCK, B.; SUSSKIND, J. Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations. **Journal of Hydrometeorology**, 2, p. 36-50, 2001.

IPWG (International Precipitation Working Group). Products and Validation. Disponível em <<http://www.isac.cnr.it/~ipwg/>>. Acesso em agosto de 2005.

JANOWIAK J.E.; XIE, P.; JOYCE, R.J.; CHEN, M.; YAROSH, Y. Validation of satellite-derived rainfall estimates and numerical model forecasts of precipitation over the United States. Program for the 29th Annual Climate Diagnostics & Prediction Workshop, 2004, Madison, EUA.

JOBARD, I.; DESBOIS, M. Satellite estimation of the tropical precipitation using the METEOSAT and SSM/I data. **Atmospheric Research**, 34, p. 285-298, 1994.

JOBARD, I. Status of satellite retrieval of rainfall at different scales using multi-source data. MEGHA-TROPIQUES 2nd SCIENTIFIC WORKSHOP, 2001, Paris, França.

JOYCE, R.J.; JANOWIAK, J.E.; ARKIN, P.A.; XIE, P. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. **Journal of Hydrometeorology**, (5): p. 487-503, 2004.

KOSTER, R.D.; HOUSER, P.R.; ENGMAN, E.T. Remote sensing may provide unprecedented hydrological data. American Geophysical Union, 1999. Disponível em <<http://www.engr.uconn.edu>>. Acesso em janeiro de 2005.

KRAUSKOPF NETO, R; GUETTER, A. K.; MINE, M.R. Previsão hidrológica com estimador de estado. In: I CONGRESSO PARAGUAIO DE RECURSOS HÍDRICOS, 10.2005, Hernandarias, Paraguai. CD-ROM.

KUMMEROW, C.D., BARNES, W.; KOZU, T.; SHIUE, J.; SIMPSON, J. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, 15, 809-817, 1998.

KUMMEROW, C.D.; GIGLIO, L. A passive microwave technique for estimating rainfall and vertical structure information from space, part I: Algorithm description. **Journal of Applied Meteorology**, 33, p. 3-18, 1994.

KUMMEROW, C.D.; HONG, Y.; OLSON, W.S.; YANG, S.; ADLER, R.F.; MCCOLLUM, J.; FERRARO, R.; PETTY, G.; SHIN, D.B.; WILHEIT, T.T. Evolution of the Goddard profiling algorithm (GPROF) for rainfall estimation from passive microwave sensors. **Journal of Applied Meteorology**, 40, p. 1801-1820, 2001.

LARSON, L.W.; PECK, E.L. Accuracy of precipitation measurements for Hydrologic Modeling. **Water Resources Research**, 10, p. 857-863, 1974.

LEMOS, C. F.; CALBETE, N. O. Sistemas frontais que atuaram no litoral de 1987-1995. Climanálise Especial - Edição comemorativa de 10 anos. MCT/INPE/CPTEC. Cap. 14, 1996.

MACHADO, L.A.T.; FATTORI, A.P.; ARAI, N.; PERRELLA, A.C.F. Mini-curso de meteorologia por satélite e radiação atmosférica. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11.2000, Rio de Janeiro.

MAIDMENT, D.R. Handbook of hydrology. New York: Ed. McGraw-Hill, 1ª edição, 1993, 1424 p.

MANUAL DO SUTRON. Manual for tipping bucket rain gage model 5600-0420. Sutron Corporation. Agosto de 1993.

MEIN, R.G.; LAURENSEN, E.M.; McMAHON, T.A. Simple nonlinear model for flood estimation. **Journal of the Hydraulics Division**, Am. Soc. Civ. Eng., 100(HY11), 1507-1518, 1974.

MINE, M.R.M. Método determinístico para minimizar o conflito entre gerar energia e controlar cheias. Porto Alegre: UFRGS, 1998. 146 f. Tese (Doutorado), UFRGS.

MORALES, C.A.; ANAGNOSTOU, E.N. Extending the capabilities of high-frequency rainfall estimation from geostationary-based satellite infrared via a network of long-range lightning observations. **Journal of Hydrometeorology**, (4) p. 141-159, 2003.

MUGNAI, A.; SMITH, E.A. Radiative transfer to space through a precipitating cloud at multiple microwave frequencies. Part I: Model description. **Journal of Applied Meteorology**, 27, p. 1055-1073, 1988.

NASA. Disponível em <<http://lake.nascom.nasa.gov/data/dataset/TRMM/>>. Acesso em julho de 2004.

NICHOLSON, S. E.; SOME, B.; McCOLLUM, J.; NELKIN, E.; KLOTTER, D.; BERTE, Y.; DIALLO, B.M; GAYE, I.; KPABEBA, G.; NDIAYE, O.; NOUKPOZOUNKOU, J.N.; TANU, M.M.; THIAM, A.; TOURE, A.A.; TRAORE, A.K. Validation of TRMM and other rainfall estimates with a high-density gauge dataset for West Africa. Part II: Validation of TRMM Rainfall Products. **Journal of Applied Meteorology**, 10(42): p. 1355-1368, 2003.

NIMER, E. Climatologia do Brasil. Fundação IBGE. Rio de Janeiro, 1979.

OLIVEIRA, A. S. Interações entre sistemas frontais na América do Sul e convecção na Amazônia. São José dos Campos. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) –

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1986.

PECK, E.L. Design of precipitation networks. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 61, p. 894-902, 1980.

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

PEREIRA FILHO, A. J.; NEGRI, A.; NAKAYAMA, P.T. An inter-comparison of gauge, radar and satellite rainfall in the tropics. 1st International Precipitation Working Group Workshop, CGMS-WMO, Proceedings, 275-284, Madrid, Spain, 2002.

PETTY, G.W. Physical retrievals of over-ocean rain rate from multichannel microwave imager. Part I: Theoretical characteristics of normalized polarizations and scattering indices. **Meteorology and Atmospheric Physics**, 54, p. 79-99, 1994.

PLANO DIRETOR DO IGUAÇU. Plano diretor de recursos hídricos da bacia hidrográfica do Iguaçu – Relatório Principal II. Disponível em <<http://www.hidricos.mg.gov.br/in-bacia.htm>>. Acesso em dezembro de 2004.

PONCE, V. M. Engineering hydrology, principles and practices. P. Hall, New Jersey, 1989.

PRESS, W. H.; FLANNERY, B.P.; TEUKOLSKY, S.A.; VETTERLING, W.T. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. Cambridge: Cambridge University Press, 818 pp, 1986.

RAMAGE, K.; JOBARD, I.; LEBEL, T.; DESBOIS, M. Satellite estimation of 1-day to 10-day precipitation: Comparison and validation over Tropical Africa of TRMM, METEOSAT and GPCP products. THE 2000 EUMETSAT METEOROLOGICAL SATELLITE DATA USER'S CONFERENCE, 2000, Bologna, Italy. p. 363-369.

SEMARH/SUDERHSA. Atlas de Recursos Hídricos do Estado do Paraná. Curitiba-PR, 1998

SILVA DIAS, M.A.F. Complexos convectivos de mesoescala sobre a região Sul do Brasil. Climanálise Especial - Edição comemorativa de 10 anos. MCT/INPE/CPTEC. Cap. 22, 1996.

SIMEPAR (Instituto Tecnológico SIMEPAR). Relação de estações. Disponível em <www.simepar.br>. Acesso em dezembro de 2004.

SMITH, E.; PHILLIPS, D. Measurements from satellite platforms. Annual Satellite Rep. NASS-11542, SSEC. University of Wisconsin, Madison, 53 pp., 1972.

TRMM (Tropical Rainfall Mission Mission). Mission Overview. Disponível em <<http://trmm.gsfc.nasa.gov>>. Acesso em outubro de 2004.

TSINTIKIDIS, D.; GEORGAKAKOS, K. P.; ARTAN, G.A.; TSONIS, A.A. A feasibility study on mean areal rainfall estimation and hydrologic response in the Blue Nile region using METEOSAT images. **Journal of Hydrology**, 221, 97-116, 1999.

TSONIS, A.A.; TRIANTAFYLLOU, G. N.; GEORGAKAKOS, K. P. Hydrological applications of satellite data 1. Rainfall estimation. **Journal of Geophysical Research**, D21(101): p. 26,517-26,525, november, 1996.

TUCCI, C.E.M. Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: Ed. da Universidade UFRGS, 1993. 943 p.

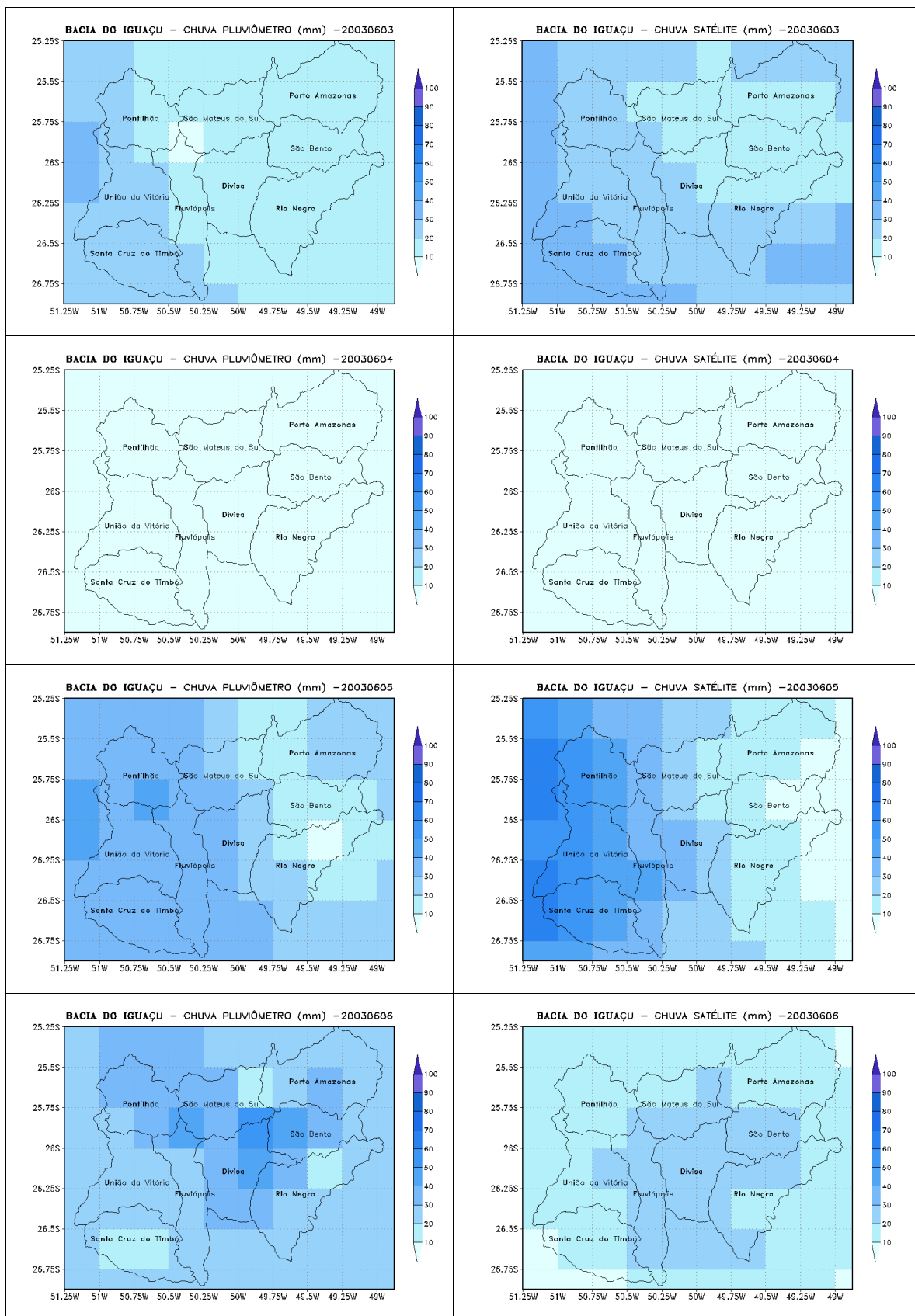
ULABY, F.T.; MOORE, R.K.; FUNG, A.K. Microwave remote sensing: active and passive. Volume 1: Microwave remote sensing fundamentals and radiometry. A. House. 1981, Norwood, MA.

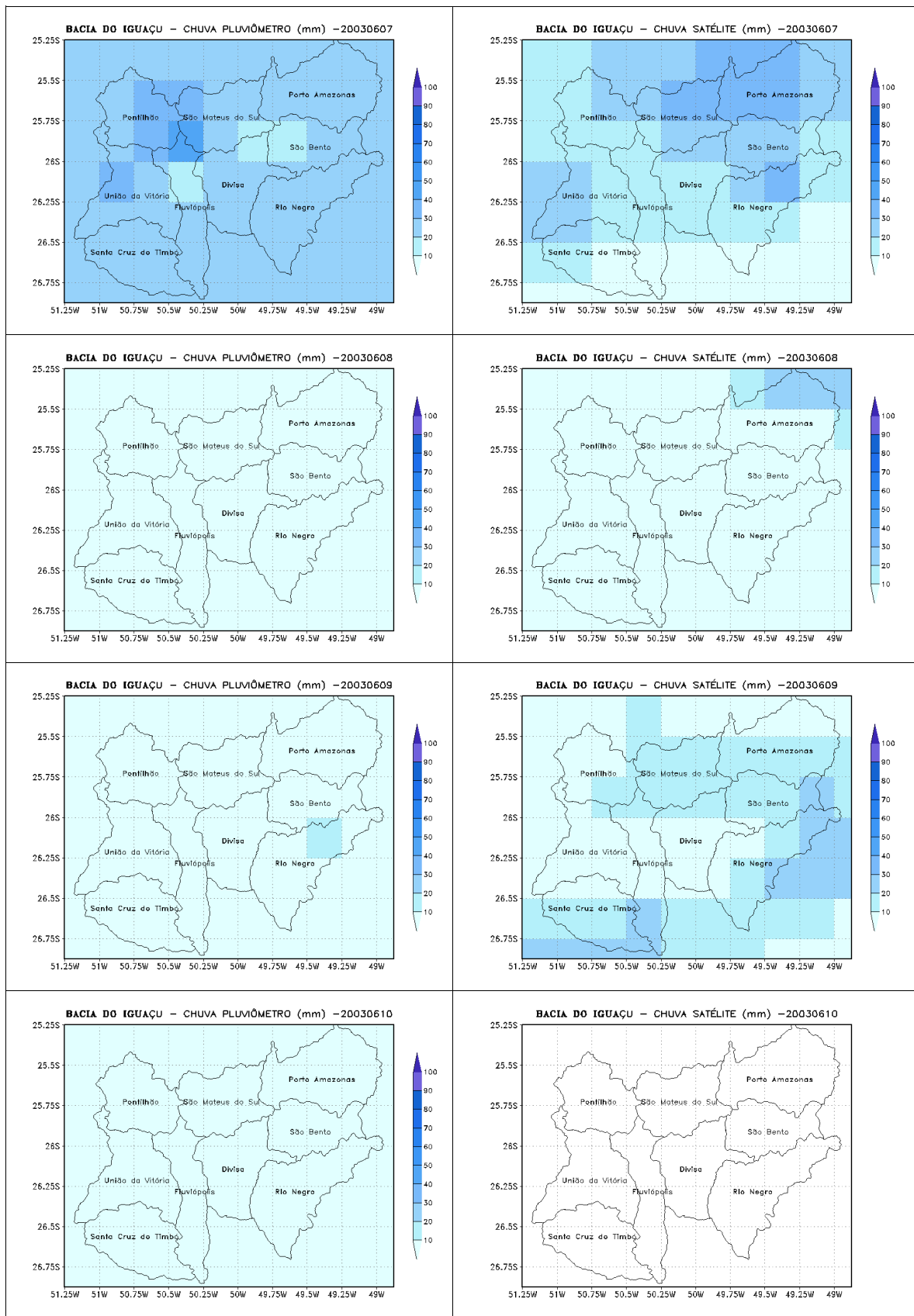
VELASCO, I.; FRITSCH, J.M. Mesoscale convective complexes in the Americas. **Journal of Geophysical Research**, 92, D8, p. 9591-9613, 1987.

VICENTE, G.A.; SCOFIELD, R.A.; MENZEL, P.W. The operational GOES infrared rainfall estimation technique. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 79, p. 1883-1898, September, 1998.

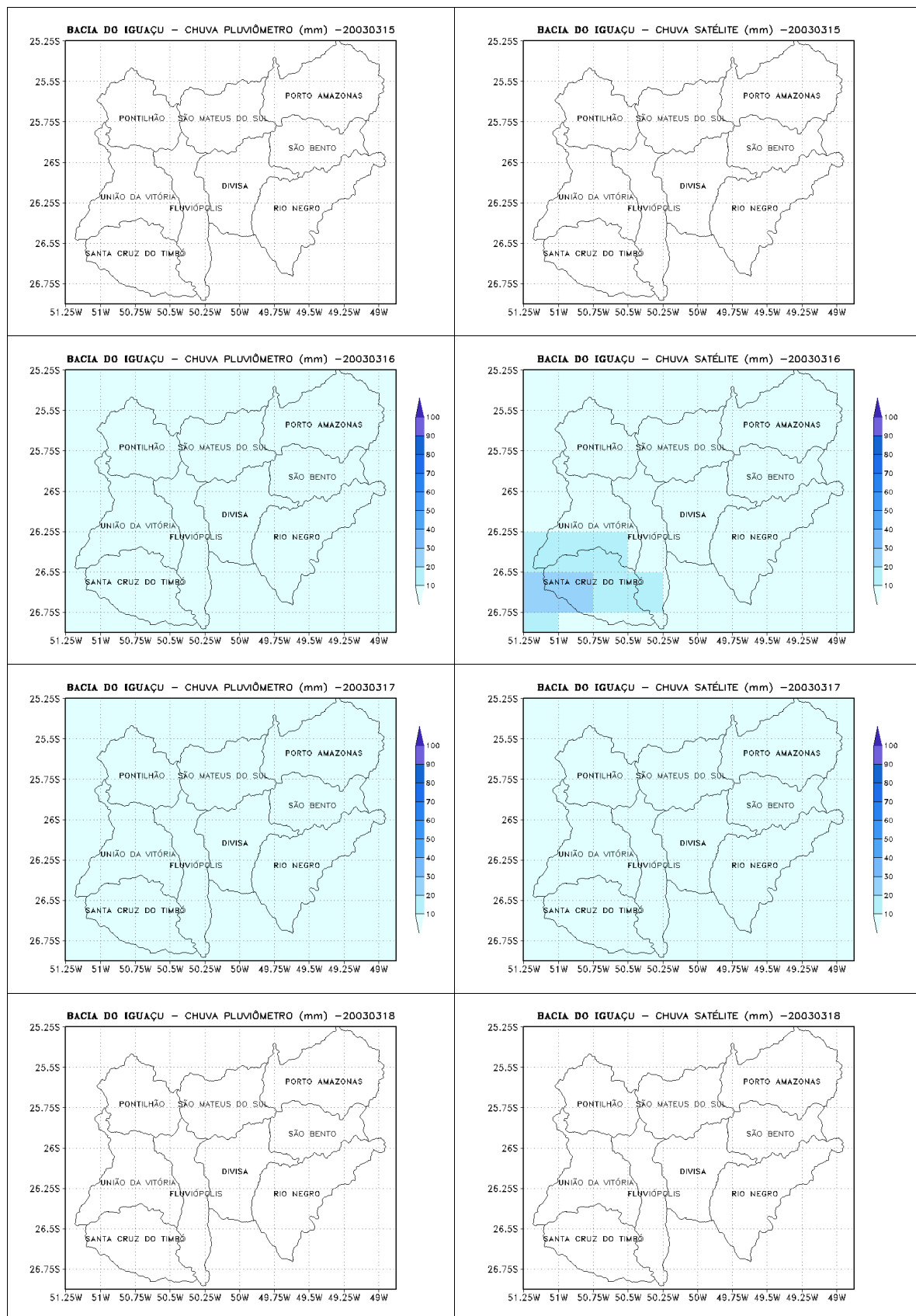
WWRP/WGNE (World Weather Research Programme / Working Group on Numerical Experimentation). Forecast Verification - Issues, Methods and FAQ. Disponível em <http://www.bom.gov.au/bmrc/wefor/staff/eee/verif/verif_web_page.html>. Acesso em agosto de 2005.

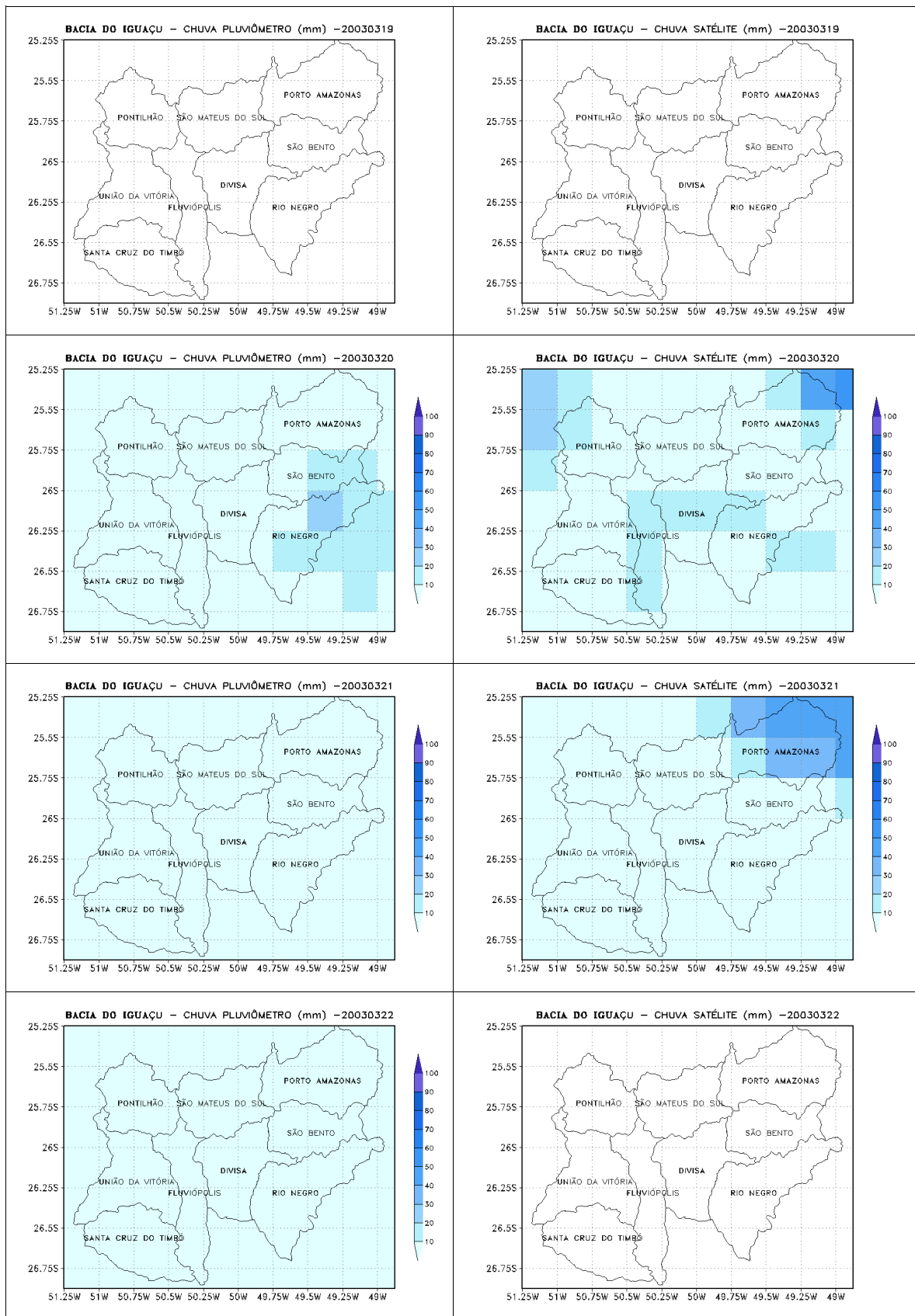
APÊNDICE 1 – CAMPOS DE CHUVA 03/06/2003 A 10/06/2003 - ÚMIDO



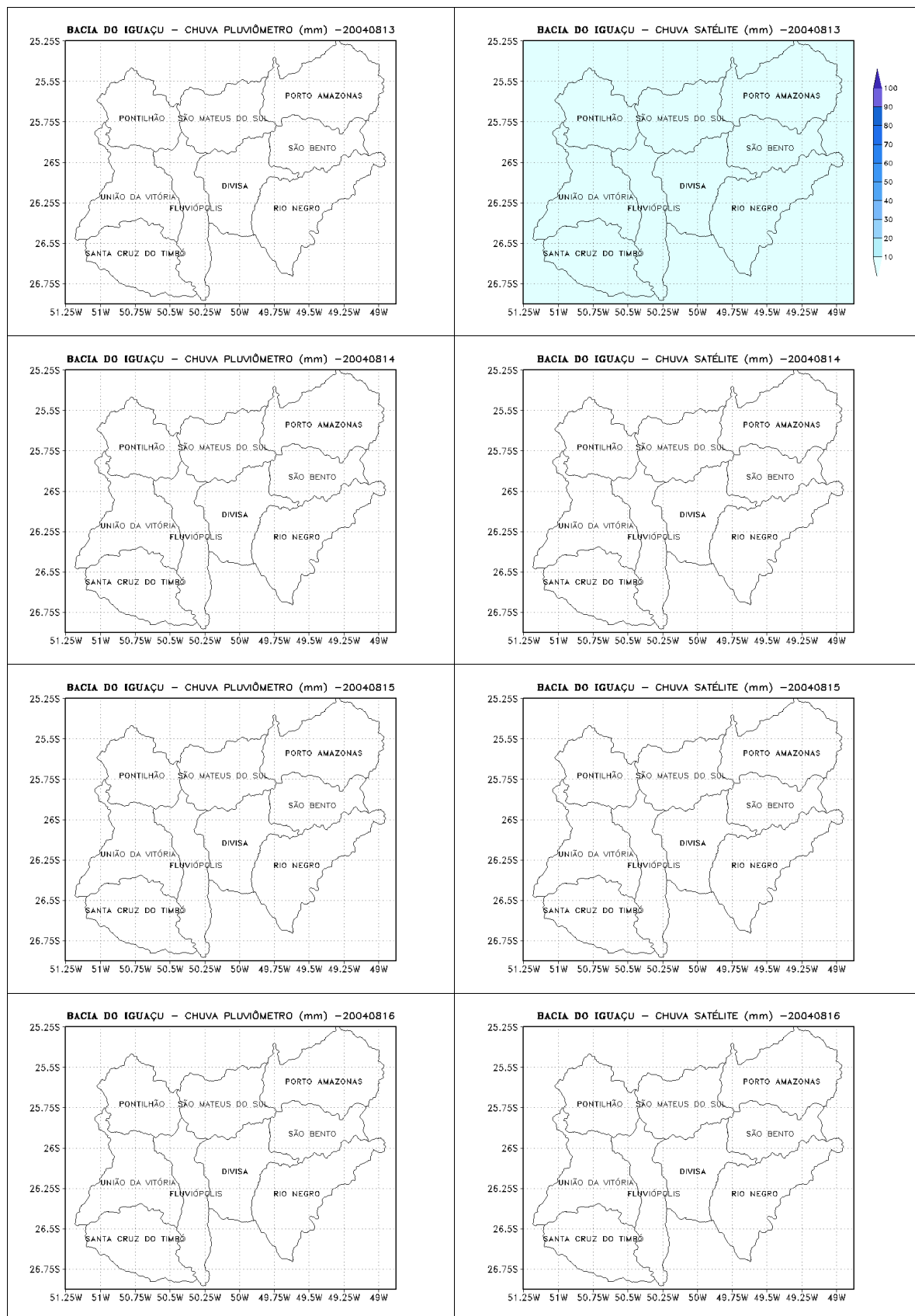


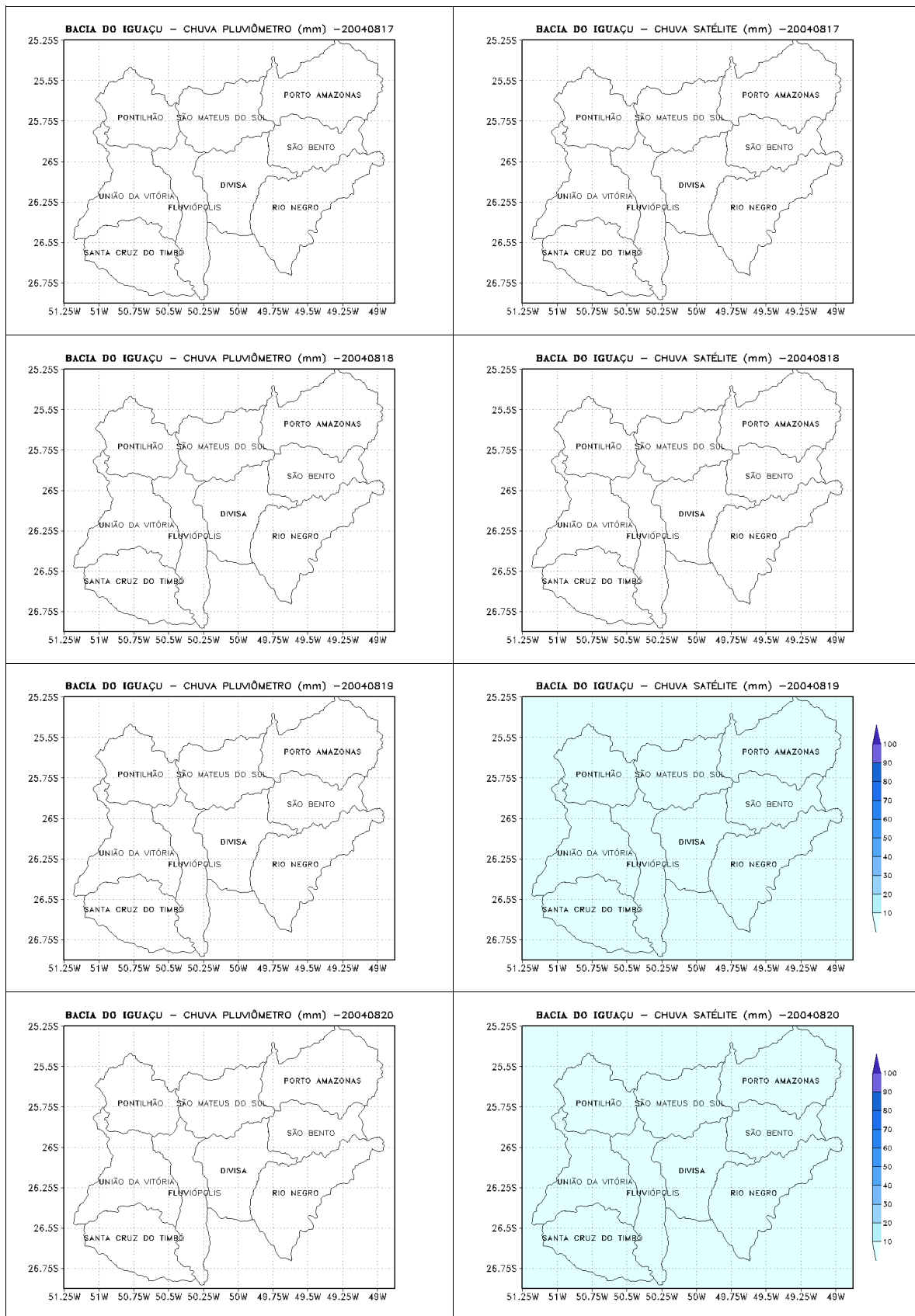
APÊNDICE 2 – CAMPOS DE CHUVA 15/03/2003 A 22/03/2003 - NORMAL





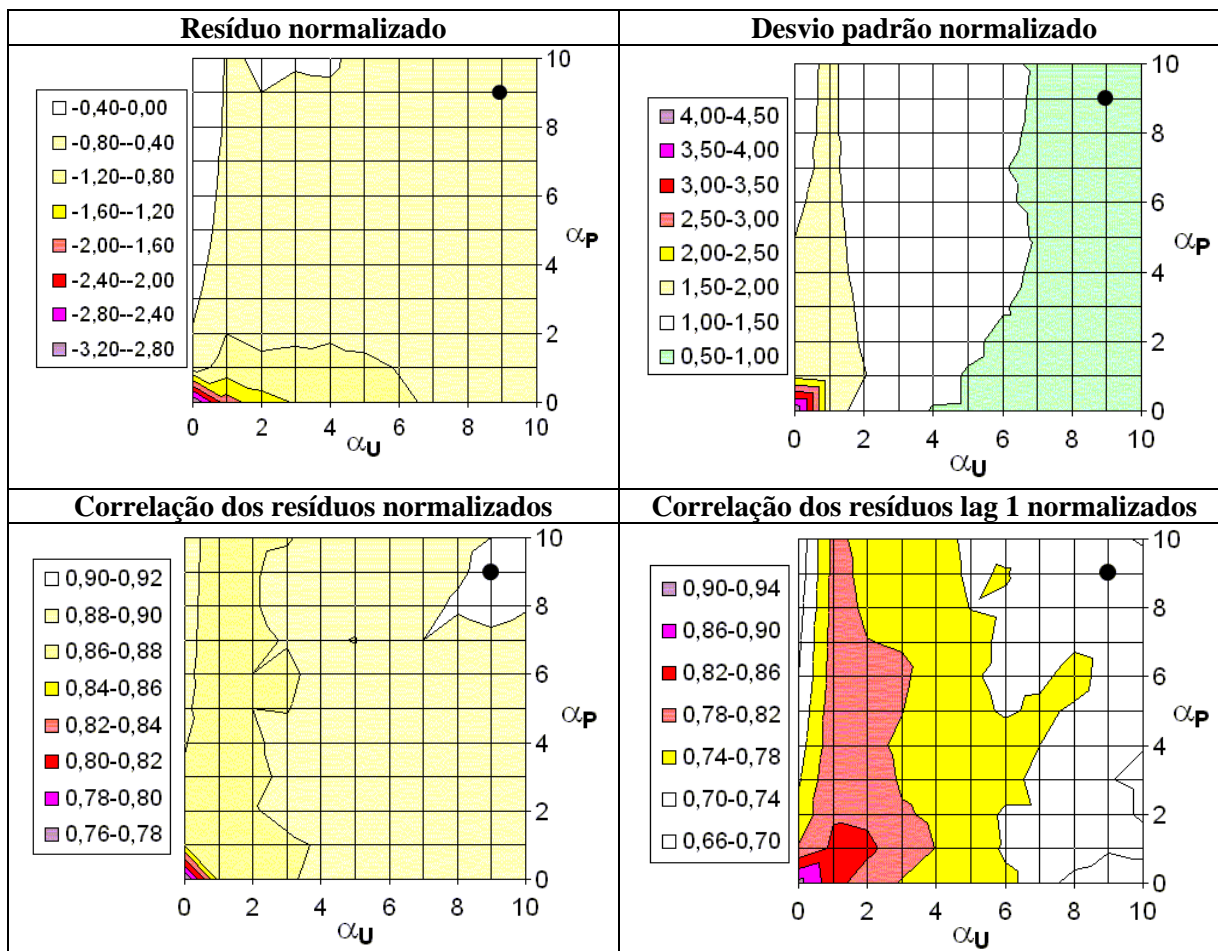
APÊNDICE 3 – CAMPOS DE CHUVA 13/08/2004 A 20/08/2004 - SECO



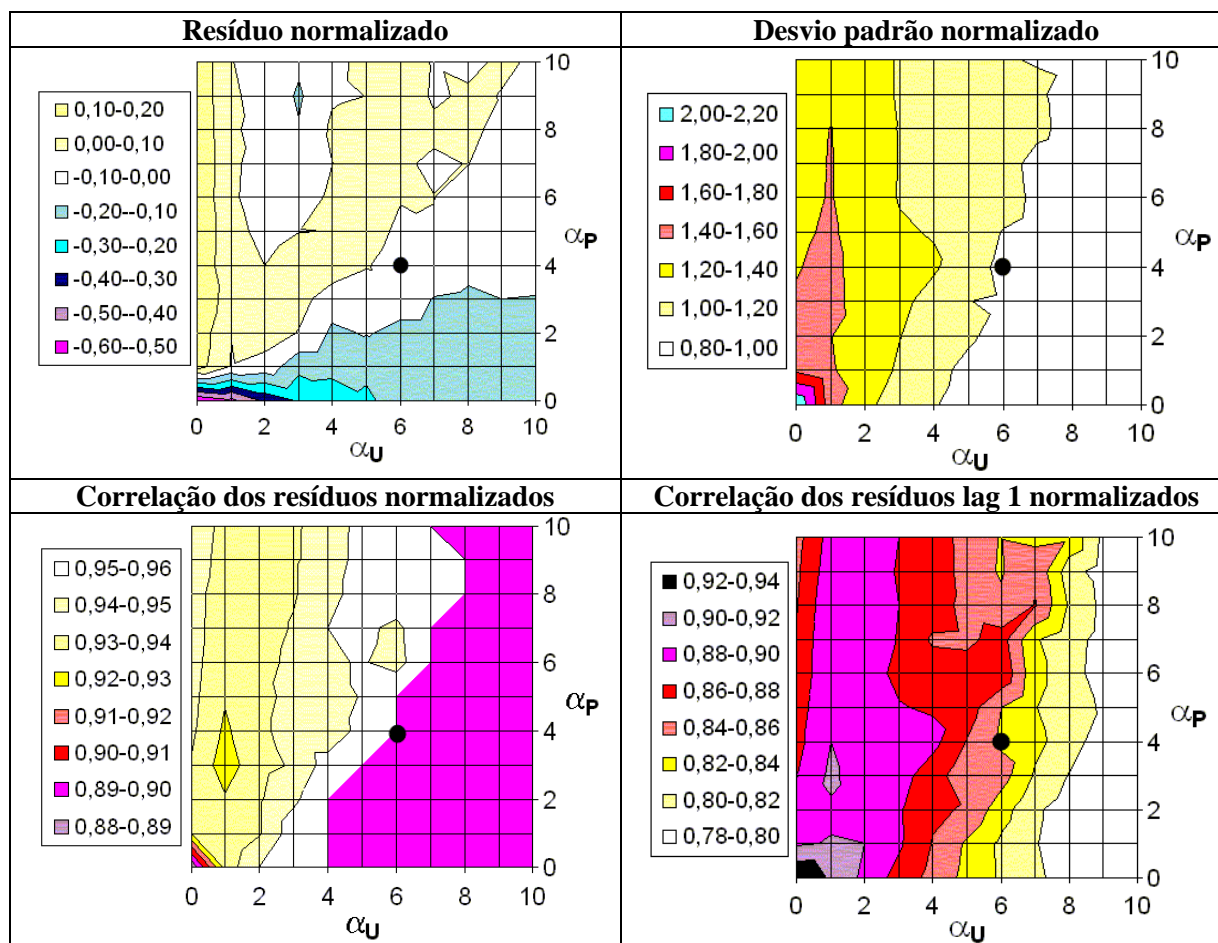


APÊNDICE 4 – CALIBRAÇÃO DO ESTIMADOR DE ESTADO

SUB-BACIA DE PORTO AMAZONAS – SATÉLITE



BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA – PLUVIÔMETRO



BACIA DO IGUAÇU EM UNIÃO DA VITÓRIA – SATÉLITE

