

Validação da Chuva Estimada por Satélite “CMORPH” na Modelagem Hidrológica do Alto Iguaçu

Anderson N. de Araujo

Instituto Tecnológico SIMEPAR, Centro Politécnico da UFPR
ander.araujo@yahoo.com

Alexandre K. Guetter

Departamento de Hidráulica e Saneamento, Centro Politécnico da UFPR
guetter.dhs@ufpr.br

Recebido: 11/05/06 - revisado: 01/11/06 - aceito: 23/04/07

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. O principal objetivo desse estudo é validar a estimativa de chuva por satélite CMORPH na bacia do rio Iguaçu até União da Vitória, através de um estudo de sensibilidade de modelagem hidrológica em relação ao tipo de dado de entrada (chuva estimada por satélites e medida por pluviômetros), escala da bacia hidrográfica (bacia do Iguaçu em Porto Amazonas, com área de 3.662 km², e a bacia do Iguaçu em União da Vitória, com área de 24.211 km²), e densidade da rede de monitoramento (bacia do Iguaçu em Porto Amazonas, com uma única estação pluviométrica na sua exutória, e bacia do Iguaçu em União da Vitória, monitorada com uma rede de treze estações pluviométricas). Os principais resultados desse estudo são: (1) as incertezas da estimativa de chuva por satélite CMORPH são suficientes para que o produto seja usado como dado de entrada em sistemas de alertas de cheias para bacias maiores do que 1.000 km²; (2) a resposta do modelo hidrológico depende significativamente do tipo de dado de entrada, da escala da bacia hidrográfica e da densidade da rede de monitoramento pluviométrico, e (3) 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.

Palavras-chave: modelagem hidrológica, chuva estimada por satélite, Bacia do Iguaçu.

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 disponibilizados operacionalmente 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) N° 396 de 1998, que estabelece as condições para implantação, manutenção e operação de redes pluviométricas 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

utilizam 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 esparsos e/ou de baixa qualidade. 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).

REGIÃO DE ESTUDO

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 usina 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 3,0% na República da Argentina. A figura 1 ilustra a localização da bacia do Iguaçu em União da Vitória e suas sub-bacias.

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

A seleção da bacia do rio Iguaçu em União da Vitória para um estudo de viabilidade do uso de novas tecnologias de monitoramento da chuva na 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 (Araujo, 2006).

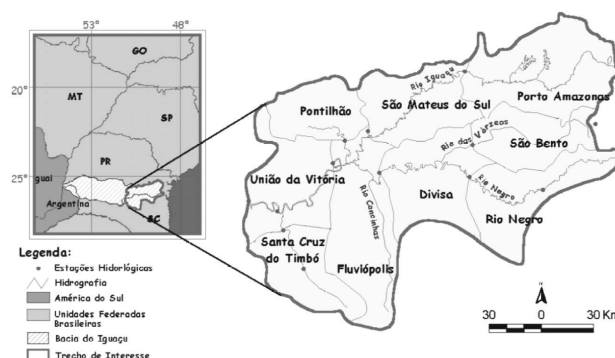


Figura 1 – Localização da bacia do Alto Iguaçu

DADOS HIDROLÓGICOS

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

Chuva estimada por satélites

A chuva estimada por satélite consiste no produto *CMORPH*, disponibilizado operacionalmente pelo *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)* da *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*. O *CMORPH* foi selecionado entre diversos outros produtos de acordo com os seguintes fatores: (a) por ser baseado em sensores microondas de diversos satélites polares, (b) pelo fato de já estar sendo testado há algum tempo nos EUA e Austrália, (c) por suas resoluções espacial e temporal serem apropriadas para a escala da área de estudo, e (d) pela sua operacionalidade na distribuição e atualização dos dados na *NOAA*. A estimativa de chuva *CMORPH* possui resolução temporal diária e espacial de 0,25° (cerca de 25 km). A figura 2 ilustra a abrangência global do *CMORPH* para a escala diária.

O *CMORPH* é derivado basicamente de sensores microondas a partir de satélites de órbita polar (tabela 1), propagados no tempo e no espaço por meio de sensores infravermelhos (tabela 2). As esti-

mativas 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 num futuro próximo, onde um número cada vez maior de satélites de órbita polar estarão em órbita.

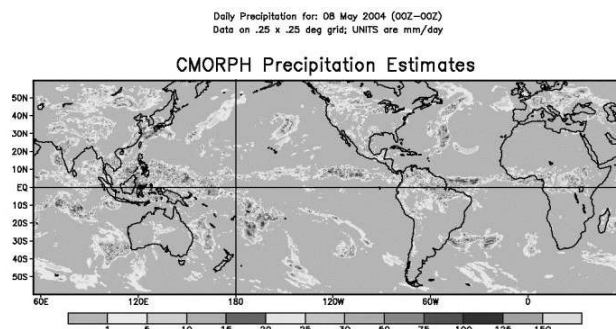


Figura 2 – Exemplo do produto CMORPH de estimativa de chuva por satélite

As imagens obtidas por meio dos sensores infravermelhos 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 (Maidment, 1993). É a partir daí que a chuva pode ser estimada a partir do canal infravermelho dos satélites. 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. Já 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 Ghz) é registrada a dispersão da radiação que sobe da superfície terrestre, devido a partículas de gelo na camada de chuva, e topos de sistemas convectivos (Joyce, 2004).

Tabela 1 – Satélites polares utilizados no CMORPH

Satélite	Sensor	Resolução espacial (km)	Altitude (km)
TRMM	TMI	4,6 x 6,9	402
DMSP F13	SSM/I	13,0 x 15,0	830
DMSP F14	SSM/I	13,0 x 15,0	830
DMSP F15	SSM/I	13,0 x 15,0	830
NOAA 15	AMSU-B	13,0 x 15,0	830
NOAA 16	AMSU-B	13,0 x 15,0	830
NOAA 17	AMSU-B	13,0 x 15,0	830

Tabela 2 – Satélites geoestacionários utilizados no CMORPH

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

Como a resolução espacial e temporal dos satélites de órbita polar ainda não são suficientes para representar adequadamente a faixa de domínio do CMORPH, 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.

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

Chuva medida por pluviômetros

Os dados de chuva convencionais foram obtidos a partir da rede telemétrica de estações hidrológicas do Instituto Tecnológico SIMEPAR, as quais coletam chuva em intervalos de 15 minutos. A relação das estações pluviométricas utilizadas nesse estudo é apresentada na tabela 3.

Tabela 3 – Lista das estações pluviométricas

Estação	Código ANEEL	Área (km ²)
Porto Amazonas	65035001	3662
São Mateus do Sul	65060001	6065
Pontilhão	65208001	1961
São Bento	65155001	2012
Fluviópolis	65220001	18300
Palmital do Meio	65415001	323
Divisa	65175001	7970
Rio Negro	65100001	3379
Fragosos	65090001	800
Foz do Timbó	65300000	-
Santa Cruz do Timbó	65295001	-
União da Vitória	65310001	24211
Foz do Cachoeira	65260001	-

MODELO HIDROLÓGICO

Para a validação da chuva estimada por satélite 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 (figura 3). 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 01 a 09, sendo que 01 e 02 se referem às equações de estado e 03 a 09, as equações de fluxo, ambas da fase bacia.

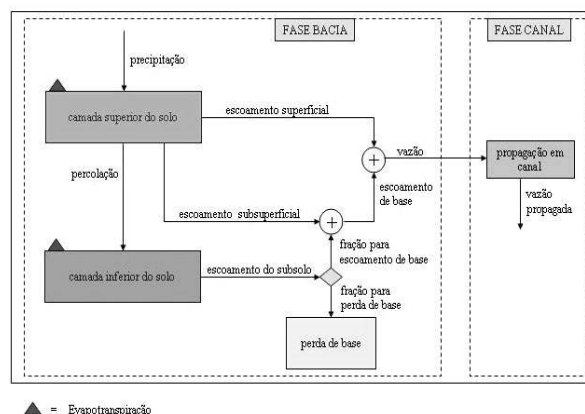


Figura 3 – Estruturação dos componentes das fases bacia e canal do modelo 3R

$$\frac{dX_1}{dt} = P - SR - PC - ET_1 - I \quad (01)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = PC - ET_2 - GW \quad (02)$$

$$SR = P \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right)^{m_1} \quad (03)$$

$$I = c_1 X_1 \quad (04)$$

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.)

$$ET_1 = PET \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right) \quad (05)$$

m_3 Expoente da função de transpiração proveniente da camada inferior do solo (Adim.)

$$PC = c_2 X_2^0 \left[1 + c_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2} \right] \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right) \quad (06)$$

μ Fração do escoamento de base para recarga do aquífero (Adim.)

$$ET_2 = (PET - ET_1) \left(\frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_3} \quad (07)$$

$$GW = c_2 X_2 \quad (08)$$

$$BF = \left(\frac{1}{1 + \mu} \right) GW + I \quad (09)$$

Notação das equações 01 a 09:

X_1	Armazenamento na capa superior do solo (mm)
X_2	Armazenamento na capa 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)
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)

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 α . As equações de propagação cinemáticas são mostradas nas equações 10 e 11, onde X representa o armazenamento do reservatório conceitual (mm) e α é o coeficiente de propagação (por dia).

$$\frac{dX_3}{dt} = (SR + BF) - \alpha(X_3)^m \quad (10)$$

$$\frac{dX_4}{dt} = \alpha(X_3)^m - \alpha(X_4)^m \quad (11)$$

Notação das equações 10 e 11:

α	Coefficiente linear do modelo de propagação (Adim.)
m	Expoente do modelo de propagação (Adim.)
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)

METODOLOGIA

Definição da malha

A malha na bacia do Iguaçu em União da Vitória (figura 4) 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, 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° x 0,25°). 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 no cálculo da chuva média na bacia.

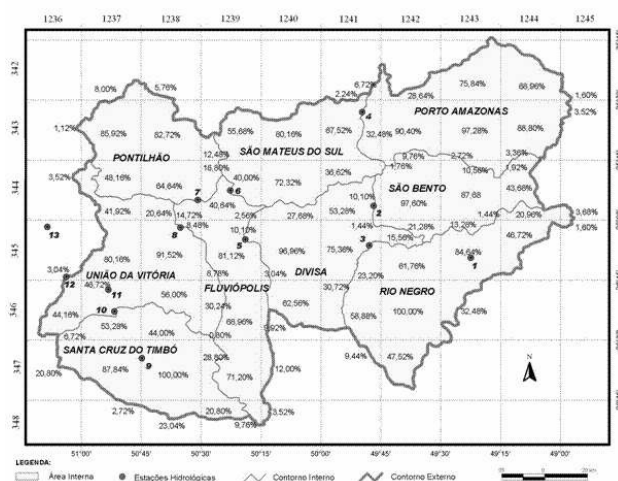


Figura 4 – Malha de distribuição da chuva sobre a bacia do Alto Iguaçu

Chuva média na bacia

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

- Método do inverso do quadrado da distância;
- Média ponderada pela área.

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. 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 12. Assim, a ponderação é feita em função da área da célula ocupada pela bacia.

$$CMB_b = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=m} P_{i,j} \cdot W_{bi,j}}{\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=m} W_{bi,j}} \quad (12)$$

Calibração do modelo hidrológico

A sensibilidade do modelo hidrológico é avaliada em função de três elementos: o tipo de dado de chuva (rede pluviométrica ou por satélite), a escala da bacia (bacia do Iguaçu em Porto Amazonas, com área de 3.662 km², e bacia do Iguaçu em União da Vitória, com área de 24.211 km²), e densidade da rede de monitoramento (bacia do Iguaçu em Porto Amazonas, contendo apenas um pluviômetro na sua exutória, e bacia do Iguaçu em União da Vitória, contendo uma rede de treze pluviômetros). Após a calibração do modelo hidrológico com a chuva média resultante da rede pluviométrica, são feitas simulações, resultando em duas combinações possíveis para as duas bacias:

- modelo hidrológico usando chuva estimada por pluviômetros como dado de entrada;
- modelo hidrológico usando chuva estimada por satélite como dado de entrada.

RESULTADOS

As figuras 5 e 6 comparam os campos de chuva média na bacia gerados por pluviômetros e satélite para a bacia do Iguaçu em Porto Amazonas e União da Vitória. Em ambas situações, a chuva estimada por satélite superestima a chuva média na bacia, porém destaca-se a grande aderência entre os

dados no que diz respeito a ocorrência ou não da chuva na escala diária.

O objetivo da validação da chuva estimada por satélite 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 densidade da rede de monitoramento pluviométrico. 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 Iguaçu em União da Vitória, contendo 13 pluviômetros em seu interior. Os parâmetros do modelo hidrológico 3R calibrados com as séries obtidas pela rede de pluviômetros no período 01/01/2003 a 31/12/2004 são mostrados na tabela 4.

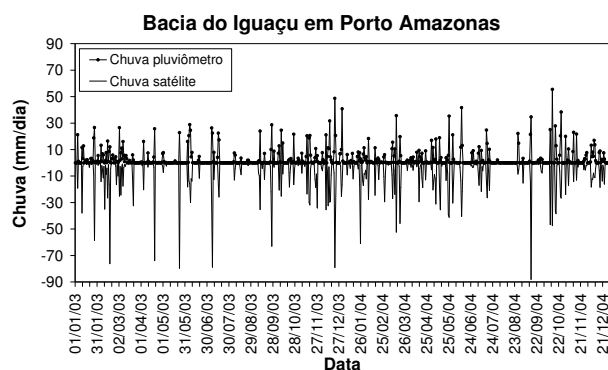


Figura 5 – Comparação entre os campos de chuva gerados por satélite e pluviômetro - Porto Amazonas

Após a calibração foram feitas simulações com as séries estimadas por satélite. O motivo pelo qual efetuaram-se apenas calibrações com os dados de pluviômetro, é que a calibração com os dados de 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.

Para as calibrações e simulações do modelo hidrológico foram utilizadas séries de vazões especí-

ficas, ou seja, na mesma unidade da chuva, mm.dia⁻¹. As vazões específicas são obtidas a partir da área de drenagem de cada bacia.

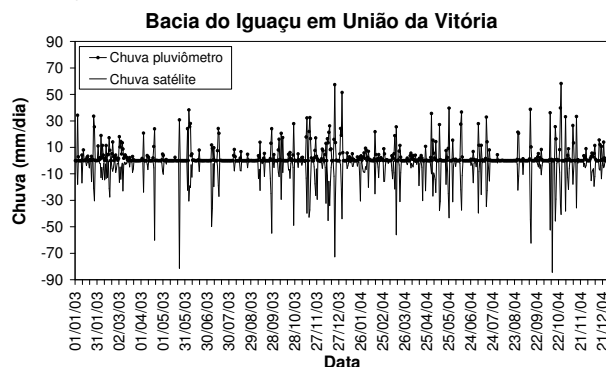


Figura 6 – Comparação entre os campos de chuva gerados por satélite e pluviômetro - União da Vitória

Tabela 4 – Parâmetros do modelo hidrológico 3R calibrados para a bacia do Iguaçu em Porto Amazonas e União da Vitória

Fase	Parâmetro	Porto Amazonas	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
	μ	0,033	0,299
Canal	α	0,349	0,252
	m	1,0	1,0

A tabela 5 resume os resultados da modelagem hidrológica da bacia do Iguaçu em 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. 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). A figura 7 ilustra a comparação das vazões calculadas com o modelo hidrológico 3R alimentado com dados de entrada resultantes dos dois tipos de monitoramento: satélite e pluviômetro. Nessa figura, destaca-se o viés da chuva estimada por satélite de superestimar as vazões modeladas com o 3R, isso devido a superestimativa da chuva por parte do satélite.

Tabela 5 – Estatísticas da modelagem da bacia do Iguaçu em Porto Amazonas

Estatística	Vazão Observada	Vazão simulada	
		Pluviômetro	Satélite
Média (mm.dia ⁻¹)	1,59	1,59	2,81
Desvio padrão (mm.dia ⁻¹)	0,80	0,62	1,44
r (Modelo x Observado)	-	0,72	0,78
Média dos resíduos	-	0,00	-1,21
Desvio padrão dos resíduos	-	0,55	0,96

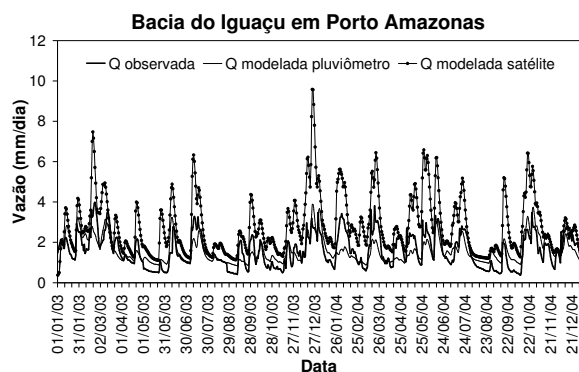


Figura 7 – Resultados da calibração da bacia do Iguaçu em Porto Amazonas

A tabela 6 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 bacia em Porto Amazonas, a simulação com os dados de pluviômetros apresentou melhores resultados.

Tabela 6 – Estatísticas da modelagem da bacia do Iguaçu em União da Vitória

Estatística	Vazão Observada	Vazão simulada	
		Pluviômetro	Satélite
Média (mm.dia ⁻¹)	1,33	1,33	2,75
Desvio padrão (mm.dia ⁻¹)	0,94	0,83	1,99
r (Modelo x Observado)	-	0,87	0,74
Média dos resíduos	-	0,00	-1,42
Desvio padrão dos resíduos	-	0,46	1,44

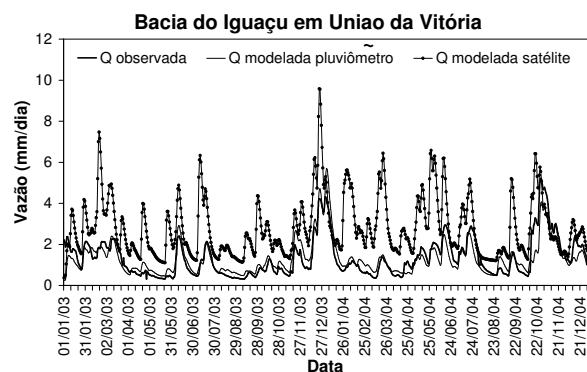


Figura 8 – Resultados da calibração da bacia do Iguaçu em União da Vitória

Para a simulação com os dados de satélite foram verificadas as mesmas características da bacia com menor densidade de pluviômetros, ou seja, superestimativa da vazão calculada. A figura 8 ilustra a comparação das vazões calculadas com o modelo hidrológico 3R alimentado com dados de entrada

resultantes dos dois tipos de monitoramento: satélite e pluviômetro. Nessa figura, destaca-se também o viés da chuva estimada por satélite de superestimar as vazões modeladas com o 3R, porém com uma modelagem de melhor qualidade com os dados de pluviômetro. Isso é devido ao fato da bacia do Iguaçu em União da Vitória apresentar um maior número de postos de monitoramento de chuva, diminuindo assim, as incertezas no cálculo da chuva média na bacia.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o potencial do uso de estimativas de chuva por satélite para a previsão hidrológica. Selecionou-se a bacia do Alto Iguaçu, na região Sul do Brasil, para a validação das estimativas de chuva por satélite, na modelagem hidrológica, por meio da avaliação das diferenças entre simulações do modelo hidrológico 3R com a chuva média na bacia estimada pelo satélite, e a estimada pela rede de pluviômetros.

As conclusões desse estudo foram: (1) a resposta do modelo hidrológico depende significativamente do tipo de dado de entrada usado (rede de pluviômetros ou chuva estimada por satélite), da escala da bacia hidrográfica e da densidade da rede de monitoramento pluviométrico, (2) 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) as incertezas da estimativa de chuva por satélite CMORPH são suficientes para que o produto seja usado como dado de entrada em sistemas de alertas de cheias para bacias maiores do que 1.000 km².

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 precisão.

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 sistemas de monitoramento de bacias, 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 precisão 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) 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 pluviométrico na exutória da bacia, e (4) mesmo havendo uma rede pluviométrica de boa qualidade, 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

- ARAUJO, A.N. Simulação hidrológica com o uso de chuva estimada por satélite. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná. Janeiro de 2006.
- 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.
- DNAEE (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica). Divisão de controle dos recursos hídricos. Inventário das estações fluviométricas. Brasília, 1987.
- 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.; BRAS, R.L. Real time statistically linearized adaptive flood routing. *Water Resources Research*, 18(3), 513-524, 1982.
- GEORGAKAKOS, K.P.; RAJARAM, H.; LI, S.G. On improved operational hydrologic forecasting of streamflow. IHR Report No. 325. Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa, Iowa City, 1988, 162 pp.
- 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*, 101, D21, 26.527-26.538, 1996.

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

tems for basins larger than 1,000 km²; (2) the response of the hydrological model depends significantly on the type of input data, on the scale of the river basin and on the density of the rainfall monitoring network, and (3) the satellite product had a bias, overestimating mean rainfall, causing a faster saturation of the basin and increasing the hydrograph peaks.

Key-words: Hydrological modeling, rainfall estimated by satellite, Iguaçu Basin.

Validation of Rainfall Estimated by the CMORPH Satellite in Hydrological Modeling of the Upper Iguaçu

ABSTRACT

Currently several products are being developed to estimate rainfall by satellite. The main ones are products that combine microwave sensors of polar satellites, with infrared sensors of geostationary satellites, and they have very different spatial and temporal resolutions. The main purpose of this study is to validate rainfall estimated by CMORPH satellite in the Iguaçu river basin, up to União da Vitória, by a study of the sensitivity of hydrological modeling as regards the type of data input (rainfall estimated by satellites and measured by raingauges.), scale of the river basin (Iguaçu Basin at Porto Amazonas, with a 3,662 km², area, and the Iguaçu basin at União da Vitória, with a 24,211 km² area), and the density of the monitoring network (Iguaçu basin at Porto Amazonas has a single rainfall gauge at its outflow and the Iguaçu basin at União da Vitória monitored by 13 rainfall gauges). The main results of this study are: (1) the uncertainties of rainfall estimates by CMORPH satellites are sufficient for the product to be used as input data in flood warning sys-