

Simulação na Bacia Amazônica com Dados Limitados: Rio Madeira

Alfredo Ribeiro Neto, Rui Carlos Vieira da Silva

Programa de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ

alfredo@coc.ufrj.br, rui@coc.ufrj.br

Walter Collischonn, Carlos E.M. Tucci

Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS

collischonn@uol.com.br, tucci@iph.ufrgs.br

Recebido: 31/03/06 – revisado: 04/07/07 – aceito: 25/07/08

RESUMO

A simulação hidrológica da transformação da precipitação em vazão através de um modelo hidrológico é utilizada na gestão dos recursos hídricos para dimensionamento, previsão e avaliação do comportamento dos processos, entre outros. As grandes bacias hidrográficas (> 10.000 km²) possuem os mais variados efeitos de clima, geologia e antrópicos. A Amazônia é uma região que sofre importantes impactos antrópicos devido à expansão do desenvolvimento econômico. O modelo de Grandes Bacias, denominado MGB-IPH, foi aplicado na bacia Amazônica com o intuito de avaliar seu potencial de uso nessa bacia. Diferentes fontes de dados hidrológicos foram testadas. Utilizaram-se dados de precipitação diária da rede hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas (ANA) e de reanálises do NCEP/NCAR corrigidas pelo Center for Ocean Land Atmosphere (COLA). Para o cálculo da evapotranspiração, utilizaram-se informações climatológicas em nível mensal do International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP) e as provenientes das reanálises do NCEP/NCAR. O modelo foi aplicado na bacia do rio Madeira, um dos principais afluentes do rio Amazonas. Os resultados indicaram que a série de precipitação diária disponibilizada pelo COLA possui valores bastante próximos à série da ANA no período de 1979 a 1990. Na parte da bacia localizada fora do Brasil, a série de precipitação diária do COLA foi comparada com bases de dados que possuem série mensal. Em alguns pontos da bacia fez-se necessária a correção da precipitação utilizando-se essas mesmas bases. As simulações mostraram que o modelo reproduziu bem os processos hidrológicos, a despeito da limitação de informações hidrológicas na Amazônia.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica, dados hidrológicos, bacia amazônica.

INTRODUÇÃO

Assim como em outras grandes bacias hidrográficas, a Amazônia apresenta problemas com respeito à obtenção de dados para a realização adequada da modelagem hidrológica e para a avaliação quantitativa dos principais componentes do ciclo hidrológico. Um agravante da Amazônia refere-se ao fato de algumas de suas sub-bacias estarem localizadas em mais de um país. Com exceção do Brasil, que disponibiliza os dados hidrológicos levantados por entidades governamentais, os países onde a bacia Amazônica está inserida não permitem o acesso de forma direta e rápida. Em alguns casos, os dados levantados nem mesmo se encontram em formato digital.

Associada à escassez de dados, outro fator complicador da modelagem hidrológica na Amazô-

nia é a complexidade dos processos hidrológicos da bacia, tais como a evapotranspiração, umidade do solo e geração do escoamento, os quais estão inter-relacionados. A grande dimensão espacial envolvida exige o uso de uma parametrização adequada para representar esses processos na macro escala.

A modelagem hidrológica de grande escala na Amazônia tem sido realizada com diferentes objetivos e diferentes níveis de complexidade. Com passo de tempo mensal, Vorosmarty *et al.* (1989) apresentam uma das primeiras simulações na bacia Amazônica e Chapelon *et al.* (2002) apresentam simulações com o modelo ISBA.

Simulação em nível diário tem sido desenvolvida no âmbito do projeto LBA (Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia), utilizando-se o modelo VIC-2L. Foram Modeladas as bacias dos rios Ji-Paraná com aproximadamente

60.000 km² (Richey *et al.*, 2004) e do rio Juruá (Victoria *et al.*, 2005).

A limitação das informações é um dos maiores desafios no uso de técnicas hidrológicas na Amazônia. Este artigo apresenta uma análise sobre as bases alternativas de dados pluviométricos e climatológicos disponíveis na região para a representação do processo de transformação chuva-vazão utilizando o modelo MGB-IPH na bacia do rio Madeira, um dos principais afluentes do Amazonas.

MODELO HIDROLÓGICO

O Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH) foi desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Collischonn *et al.*, 2007). O MGB-IPH é distribuído por células e realiza simulações em nível diário ou horário. Cada célula é dividida em blocos de acordo com características como tipo de solo e cobertura vegetal. Cada bloco equivale a uma área hidrológicamente homogênea, ou seja, áreas em que se verifica um comportamento hidrológico semelhante. Maiores detalhes sobre o MGB-IPH são apresentados no Anexo A.

BACIA DO RIO MADEIRA

A bacia do rio Madeira é representativa das condições amazônicas devido a: a) bacia suficientemente extensa, o que caracteriza os sistemas deste bioma; b) a bacia apresenta os três tipos de unidades morfo-estruturais da bacia Amazônica, quais sejam, a cordilheira dos Andes, o escudo (no caso o Brasileiro) e a planície Amazônica; c) a bacia está localizada em diferentes países, o que permite ter uma noção quanto às dificuldades de obtenção dos dados de entrada do modelo hidrológico.

A bacia do rio Madeira se estende por Bolívia (51%), Brasil (42%) e Peru (7%) e possui superfície de 1.420.000 km². A área de estudo, entretanto, estende-se até a estação fluviométrica de Fazenda Vista Alegre, cuja área de drenagem é de 1.324.727 km². A Figura 1 mostra a bacia do Madeira juntamente com os principais rios formadores da bacia. O rio Madeira recebe esse nome após o encontro

dos rios Beni e Mamoré na fronteira entre Brasil e Bolívia.

A pluviosidade média anual é de 1.940 mm, a descarga média anual é igual a 31.200 m³/s na estação de Fazenda Vista Alegre, a vazão específica é de 23,55 l/s/km² (considerando toda a bacia) e coeficiente de escoamento igual a 0,38 (Molinier *et al.*, 1994). Dentre os principais afluentes do Amazonas, a bacia do rio Madeira apresenta um dos menores valores de precipitação, coeficiente de escoamento e vazão específica. A elevada descarga média na bacia do rio Madeira (15% da vazão na foz do Amazonas) deve-se à sua grande extensão (23% do total da bacia).

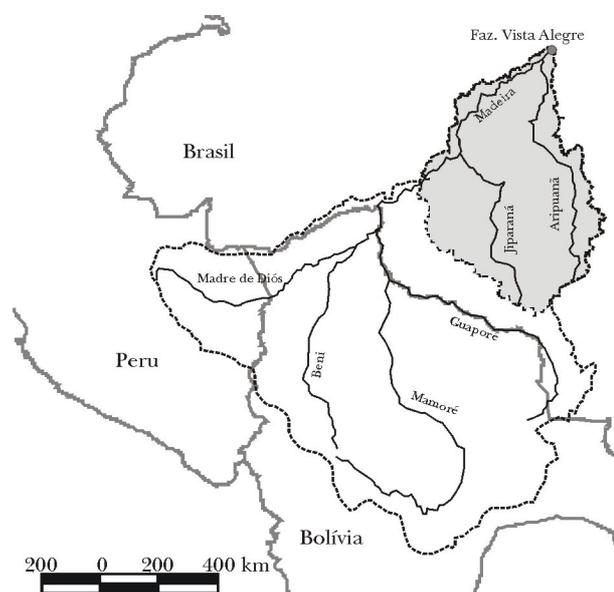


Figura 1 – Bacia do rio Madeira

DISPONIBILIDADE DE DADOS

Por se estender por vários países, o levantamento de informações hidrológicas na bacia é difícil, pois as instituições governamentais responsáveis pelo levantamento dessas informações não trabalham de forma homogênea, principalmente no que se refere à política de distribuição dos dados. A seguir, descrevem-se as diversas fontes de dados utilizados na modelagem.

Vazão: A Agência Nacional de Águas (ANA) disponibiliza séries de vazão para a parte brasileira da bacia. As séries de vazão de estações fluviométricas

localizadas nos outros países não são disponibilizadas da mesma forma. Por esse motivo, até que se tenha acesso às informações das estações de outros países amazônicos, devem-se utilizar apenas os dados disponibilizados pela ANA. Dessa forma, para a parte da bacia localizada fora do Brasil, a discretização para a modelagem deve seguir uma orientação que leve em consideração a disponibilidade de estações fluviométricas localizadas próximo às fronteiras do Brasil com esses países.

Precipitação: Duas fontes de dados pluviométricos são disponíveis: estações pluviométricas pertencentes à rede hidrometeorológica da ANA e reanálises realizadas pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) e *National Center for Atmospheric Research* (NCAR).

As informações pluviométricas da ANA foram utilizadas na parte brasileira da bacia. Nos outros países, utilizaram-se alternativamente informações das reanálises do NCEP/NCAR (Kistler *et al.*, 2001). O estudo de reanálise consiste em se realizar simulações com modelos atmosféricos utilizando-se valores observados como condição inicial e de contorno. Um problema das reanálises diz respeito aos erros causados pelas características do modelo como resolução e parametrização. Com o intuito de superar essa deficiência, Dirmeyer e Tan (2001) utilizaram dados observados em toda a América do Sul para corrigir os valores encontrados pela reanálise do NCEP/NCAR. A correção é realizada com a seguinte equação:

$$[P]_{A,M,D,H} = \frac{[P_{OBS}]_M}{[P_{NCEP}]_M} \cdot [P_{NCEP}]_{A,M,D,H} \quad (1)$$

onde $[P]_{A,M,D,H}$ e $[P_{NCEP}]_{A,M,D,H}$ são, respectivamente, as precipitações corrigida e do NCEP/NCAR para a hora H, dia D, mês M e ano A, $[P_{OBS}]_M$ e $[P_{NCEP}]_M$ são as precipitações observada e do NCEP/NCAR correspondentes ao mês M. Esse trabalho foi realizado pelo *Center for Ocean Land Atmosphere* (COLA) e, por esse motivo, daqui em diante esses dados serão referidos por essa sigla. A sua resolução espacial é de $1^\circ \times 1^\circ$ e se estende de 1979 a 1999.

Informações climatológicas: O modelo MGB-IPH utiliza 5 variáveis climatológicas para o cálculo da evapotranspiração potencial por meio do método de Penman-Monteith: temperatura do ar, pressão de vapor, velocidade do vento, radiação líquida e pressão atmosférica. Na Amazônia, não há um número

suficiente de estações climatológicas com leitura em nível diário. Uma alternativa é o uso de valores levantados por projetos e instituições internacionais.

O *International Satellite Land Surface Climatology Project* (ISLSCP) fornece uma série mensal de 1986 a 1995 para as variáveis radiação líquida, pressão de vapor e temperatura do ar. As variáveis pressão de vapor e temperatura do ar foram obtidas por meio de interpolação dos valores coletados em estações meteorológicas em todo o planeta e a radiação líquida foi levantada a partir de medições de satélite. O ISLSCP ainda fornece média mensal do período 1960-1990 para as variáveis pressão atmosférica e velocidade do vento, as quais foram obtidas por meio do uso de modelo atmosférico.

Outra fonte de dados é a disponibilizada pelo COLA. Esses dados foram levantados juntamente com as informações de precipitação discutidas anteriormente, ou seja, a partir das reanálises do NCEP/NCAR. A temperatura do ar foi corrigida com os dados observados de Webber e Willmott (1998). A base de dados do COLA não fornece pressão de vapor diretamente, mas sim, umidade específica, que foi ajustada de modo a refletir as correções realizadas na temperatura do ar. A correção é feita assumindo o mesmo valor da umidade relativa (UR) antes e depois da correção da temperatura do ar (Zhao e Dirmeyer, 2003):

$$UR = \frac{q_a \cdot (0,622 - q_{s_a})}{q_{s_a} \cdot (0,622 - q_a)} = \frac{q_d \cdot (0,622 - q_{s_d})}{q_{s_d} \cdot (0,622 - q_d)} \quad (2)$$

onde q_a e q_d são a umidade específica antes e depois da correção, q_{s_a} e q_{s_d} são a umidade específica com o ar saturado antes e depois da correção. Rearranjando a Equação 2, pode-se isolar q_d , que corresponde à umidade específica corrigida e disponibilizada pelo COLA (q_{COLA}).

$$q_{COLA} = \frac{0,622 \cdot UR \cdot q_{s_d}}{0,622 - q_{s_d} + UR \cdot q_{s_d}} \quad (3)$$

A partir dos valores de q_{COLA} , determinou-se a pressão de vapor. A pressão atmosférica e velocidade do vento não foram corrigidas. Os valores utilizados são os fornecidos pelas reanálises do NCEP/NCAR. Quanto à radiação líquida, há disponibilidade de valores mensais provenientes de simulações com o esquema de superfície SSiB (*Simplified Simple Biosphere*), que utiliza as informações climatológicas das reanálises do NCEP/NCAR como dados de entrada. Detalhes a respeito da forma de cálculo

da radiação líquida no modelo SSiB pode ser obtido em Xue *et al.* (1991). Tanto os dados do ISLSCP como do COLA possuem resolução espacial de $1,0^\circ \times 1,0^\circ$.

Demais informações: Outras informações utilizadas pelo MGB-IPH são modelo numérico do terreno da bacia (*Shuttle Radar Topography Mission – SRTM* com resolução de 90 metros), mapas de tipo de solo (RADAM Brasil na parte brasileira e FAO/UNESCO fora do Brasil), cobertura vegetal (imagens do satélite NOAA-AVHRR), sub-bacias e rede de drenagem digitalizadas (ambas preparadas pelo projeto HiBAm – Hidrologia e Geoquímica da Bacia Amazônica).

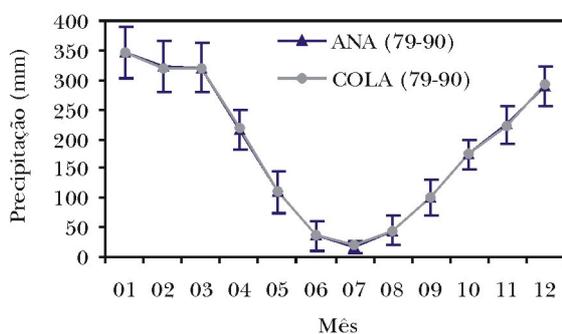


Figura 2 – Variação da precipitação média mensal na parte brasileira (1979-1990)

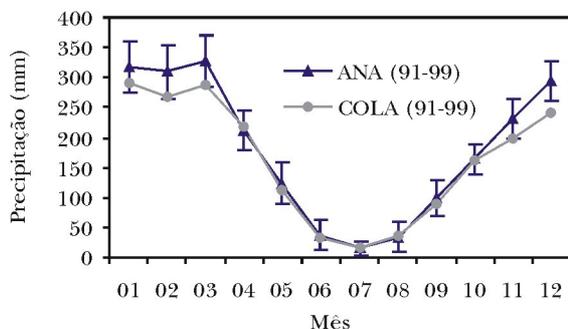


Figura 3 - Variação da precipitação média mensal na parte brasileira (1991-1999)

AVALIAÇÃO DAS INFORMAÇÕES DE PRECIPITAÇÃO

Para que se tivesse uma noção da qualidade dos dados de precipitação fornecidos pelo COLA, foi realizado o cálculo da precipitação média anual

na área de estudo com outras fontes de dados. Primeiramente, comparou-se a precipitação do COLA com a chuva medida pela ANA na parte brasileira da bacia. Para a parte da bacia localizada fora do Brasil, utilizou-se precipitação levantada por instituições e projetos de pesquisa internacionais.

Porção brasileira da bacia: A área escolhida compreende a região entre as estações fluviométricas de Porto Velho e Fazenda Vista Alegre (destacada na Figura 1). A superfície total dessa região é de 334.000 km².

Foram utilizados 60 postos pluviométricos da ANA, resultando em uma densidade de 5.564 km² por posto. Quanto aos dados de reanálises, utilizaram-se 46 pontos com valores diários de precipitação o que equivale a uma densidade de 7.260 km² por ponto.

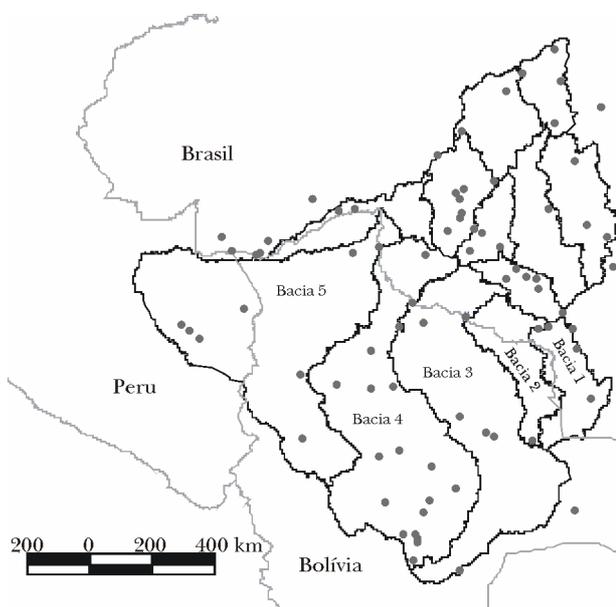


Figura 4 – Distribuição das estações pluviométricas compiladas pelo HiBAm na bacia do rio Madeira

Calculou-se a variação temporal na área de estudo para as duas fontes de dados (ANA e COLA). Ao analisar a variação mensal da precipitação na área de estudo no período 1979-1999, verificou-se que, a partir de 1991, a precipitação calculada com dados do COLA passa a ser sensivelmente inferior à calculada com dados da ANA. Isso coincide com as informações utilizadas pelo COLA para corrigir a precipitação proveniente das reanálises do NCEP/NCAR: Webber e Willmott (1998) de 1979 a 1990 e CPC Merged Analysis of Precipitation

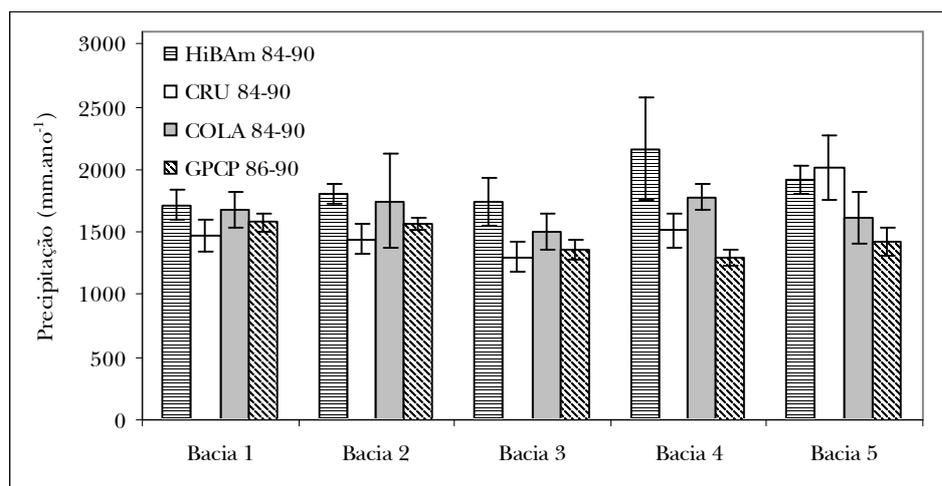


Figura 5 – Precipitação média anual nas sub-bacias da Bolívia e do Peru

(CMAP) de 1991 a 1999. Xie e Arkin (1997) descrevem como é construída e atualizada a série do CMAP.

A diferença de qualidade dos dados do COLA nesses dois períodos pode ser observada ao se plotar a precipitação média mensal de longo período de 1979 a 1990 e de 1991 a 1999, que são mostradas nas Figuras 2 e 3.

De acordo com a análise realizada observa-se que se devem, preferencialmente, utilizar os dados provenientes de reanálises no período entre 1979 e 1990.

Porções boliviana e peruana da bacia: Na parte da bacia do rio Madeira localizada fora do Brasil, não foi possível o acesso aos dados diários de precipitação. Logo, a comparação dos dados produzidos pelo COLA foi feita com valores médios mensais levantados por outras fontes: HiBAm, *Climatic Research Unit* (CRU) e *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP). Hiez *et al.* (1991), no âmbito do projeto HiBAm, realizaram um trabalho de consistência e homogeneização dos dados de chuva na bacia Amazônica para o período de 1968 a 1998 utilizando o método do vetor regional. A Figura 4 mostra a distribuição espacial das estações na bacia do rio Madeira.

A série mensal da CRU é fruto de um trabalho que utilizou estações meteorológicas para gerar valores em uma grade de $0,5^\circ$ e que cobre o período de 1901 a 2002 (Mitchell e Jones, 2005). Algumas das variáveis levantadas são precipitação, temperatura do ar e pressão de vapor. A CRU é uma institui-

ção de pesquisa em mudanças climáticas vinculada à Universidade de East Anglia, Inglaterra.

A base de dados do GPCP foi construída a partir de medições de estações pluviométricas combinadas com estimativas de chuva de satélite. Esses dados foram elaborados pela NASA/*Goddard Space Flight Center's Laboratory for Atmospheres* como uma contribuição ao *GEWEX-Global Precipitation Climatology Project* (Adler *et al.*, 2003).

A análise foi feita comparando-se as quatro fontes de dados em cada sub-bacia em que foi dividida a bacia do Madeira na Bolívia e no Peru. As sub-bacias são mostradas na Figura 4. A precipitação média anual foi calculada utilizando-se o período de 1984 a 1990 para os dados do COLA, CRU e HiBAm e de 1986 a 1990 para o GPCP. Os valores da precipitação média anual de cada fonte de dados nas sub-bacias da Bolívia e Peru são mostrados na Figura 5.

Conforme pode ser visto por meio da Figura 5, a precipitação calculada com os dados do COLA é próxima da precipitação calculada com as bases do HiBAm e CRU, com exceção da Bacia 5, cuja precipitação COLA é menor. Uma análise dessa sub-bacia mostrou que há indícios de que a explicação para o baixo valor encontrado com os dados do COLA está na subestimação da precipitação nos pontos que se encontram no Peru (destacados na Figura 6). Não foi investigado o motivo para a subestimação da precipitação nesses pontos.

Optou-se por se utilizar as informações da base CRU para corrigir a precipitação COLA. Essa base possui discretização e densidade de pontos com informação iguais à base do COLA.

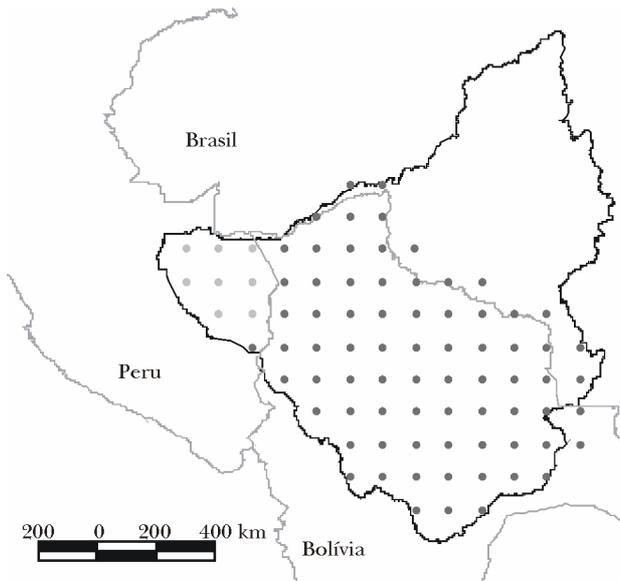


Figura 6 – Pontos da base de dados COLA corrigidas (em tons mais claros)

Os pontos corrigidos são mostrados na Figura 6. A correção da precipitação COLA consistiu em se utilizar o volume de precipitação CRU de cada mês do período de 1984 a 1990. A desagregação do volume de chuva para nível diário foi feita utilizando-se a mesma distribuição temporal da precipitação original do COLA. A expressão para desagregação da precipitação mensal para diária é dada por:

$$P_{D,M,A} = \frac{V_{D,M,A}(COLA)}{V_{M,A}(COLA)} \cdot V_{M,A}(CRU) \quad (4)$$

onde $P_{D,M,A}$ é a precipitação corrigida do dia D, mês M e ano A; $V_{D,M,A}(COLA)$ é o volume da precipitação COLA do dia D, mês M e ano A; $V_{M,A}(COLA)$ e $V_{M,A}(CRU)$ são os volumes do mês M e ano A da precipitação COLA e CRU respectivamente.

A correção realizada tornou o valor da precipitação COLA na Bacia 5 mais coerente uma vez que as simulações com o modelo melhoraram sensivelmente. Antes da correção, a vazão calculada pelo modelo era bastante inferior à medida, tornando inviável a calibração dos parâmetros.

AVALIAÇÃO DAS INFORMAÇÕES CLIMATOLÓGICAS

O período utilizado cobre os anos de 1986 a 1990. Nos cálculos realizados, quando necessário,

admitiu-se que a cobertura vegetal era floresta (principal cobertura na bacia) e o método utilizado para determinar a evapotranspiração foi o de Penman-Monteith.

A Figura 7 mostra a variação da evapotranspiração potencial média mensal calculada com base nas duas fontes de dados. O resultado mostrou que há uma diferença sistemática entre a evapotranspiração potencial calculada com os dados do ISLSCP (superior) e a do COLA, com exceção dos meses de agosto e setembro. A média anual da evapotranspiração foi de 1.278 e 1.099 mm/ano, respectivamente, para ISLSCP e COLA.

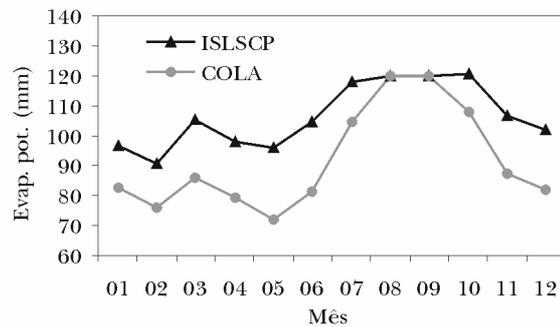


Figura 7 - Variação da evapotranspiração potencial média mensal na área de estudo (1986-1990)

A Tabela 1 apresenta valores da evapotranspiração calculada em pesquisas realizadas na Amazônia. As informações climatológicas do ISLSCP fornecem valores de evapotranspiração potencial mais próximos dos apresentados na literatura conforme mostrado na Tabela 1. Por esse motivo, deve-se, preferencialmente, utilizar essa fonte de dados.

Tabela 1 – Evapotranspiração medida em pesquisas na Amazônia (E em mm.ano⁻¹)

Local	Período	E (mm)	Referência
Reserva Ducke (AM)	Set/83 a Set/85	1320	Shuttleworth (1988)
Reserva Jaru (RO)	Jan/92 a Out/93	1497	Alves <i>et al.</i> (1999)
Reserva Cuieiras (AM)	Set/95 a Ago/96	1123	Malhi <i>et al.</i> (2002)
Bacia do rio Ji-Paraná	1995-1996	1153	Victoria (2004)

SIMULAÇÕES

Collischonn *et al.* (2007) utilizaram o MGB-IPH nas bacias dos rio Taquari-Antas (RS), com 26.000 km², e na bacia do rio Uruguai (75.000 km²). Outras aplicações foram realizadas no Alto Paraguai (140.000 km²) (Allasia *et al.*, 2004) e no rio São Francisco (640.000 km²) (Silva *et al.*, 2007). A preparação de dados e a calibração do modelo seguiram a metodologia adotada nesses trabalhos.

Pré-processamento dos dados: O trabalho de pré-processamento dos dados consiste no uso de ferramentas como geoprocessamento e programas computacionais para a construção dos arquivos de entrada do modelo. As atividades de pré-processamento foram:

- Discretização da bacia em células de 0,25° de lado. Essa discretização foi utilizada na determinação das direções de fluxo, cálculo da área de drenagem acumulada, delimitação das sub-bacias de acordo com as estações fluviométricas e definição da rede drenagem;
- Determinação dos blocos de tipo de solo e cobertura vegetal, que respondem de forma hidrológicamente homogênea aos estímulos climáticos;
- Interpolação espacial da precipitação e interpolação temporal das variáveis climatológicas;

Calibração dos parâmetros: A calibração dos parâmetros pode ser feita de duas formas: manual ou automática. A calibração automática utiliza algoritmos genéticos que consideram múltiplos objetivos na determinação dos parâmetros. Os seguintes parâmetros foram calibrados de forma automática: capacidade de armazenamento do solo (W_m), parâmetro b (define a relação entre a umidade do solo e a proporção de área saturada), parâmetro do escoamento de base (K_{BAS}), parâmetro do escoamento sub-superficial (K_{INT}), parâmetro de retardo do reservatório linear simples (TK).

Os demais parâmetros foram determinados a partir de estudos realizados na bacia Amazônica. O índice de área foliar (IAF), para o cálculo do reservatório de interceptação, foi obtido de Honzák *et al.* (1996) e Roberts *et al.* (1996); a altura média da

vegetação (Z), para o cálculo da resistência aerodinâmica – r_a , foi determinada por Wright *et al.* (1996); e a resistência superficial (r_s) foi retirada do estudo de Shuttleworth (1993). A equações que fazem uso dos parâmetros são apresentadas no Anexo A.

A bacia do rio Madeira foi discretizada em sub-bacias de acordo com a disponibilidade de estações fluviométricas. A discretização adotada é mostrada na Figura 8.

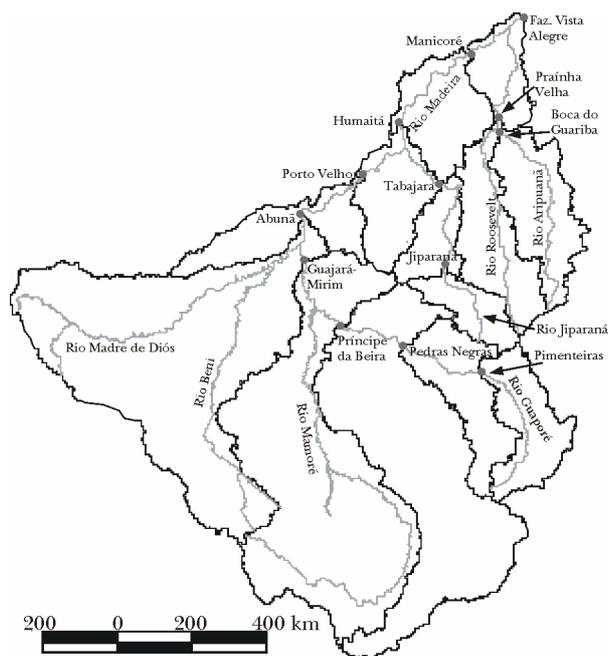


Figura 8 - Estações fluviométricas e as respectivas sub-bacias

Resultados da calibração e verificação: Para a calibração dos parâmetros, utilizou-se o período de dados de 1987 a 1990. O ano de 1986 foi utilizado para “aquecimento” do modelo. Na verificação da modelagem, utilizou-se o período de 1984 a 1986 e o ano de 1983 para “aquecimento”. Os valores dos parâmetros foram atribuídos para cada bloco de tipo de solo e cobertura vegetal. Nas cinco primeiras bacias, localizadas na Bolívia e Peru, os valores dos parâmetros relacionados aos blocos, modificaram-se de uma bacia para outra. Entretanto, na parte brasileira da bacia do Madeira utilizou-se o mesmo conjunto de parâmetros para cada bloco em todas as bacias.

O resultado das simulações para a calibração e verificação do modelo é mostrado nas Figuras

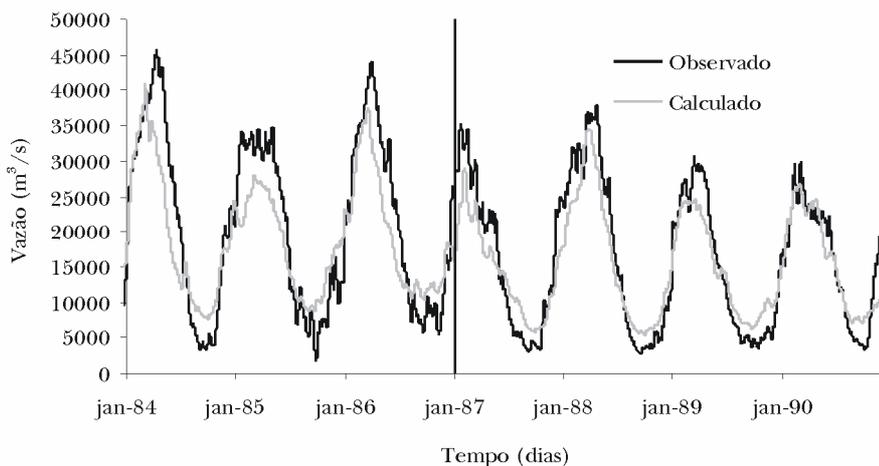


Figura 9 - Hidrogramas observado e calculado em Abunã

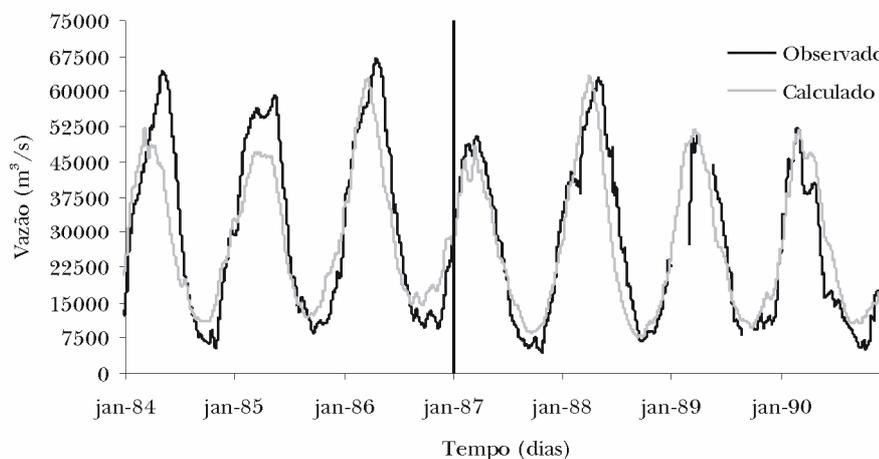


Figura 10 - Hidrogramas observado e calculado em Fazenda Vista Alegre

Tabela 2 - Valores dos critérios de avaliação da calibração e verificação

Sub-bacia	Área (km ²)	Calibração		Verificação	
		R ²	ΔV (%)	R ²	ΔV (%)
Pimenteiras	53.887	0,941	-1,996	0,855	-6,971
Pedras Negras	111.915	0,727	-3,606	0,735	-14,675
Príncipe da Beira	343.020	0,783	-3,704	0,574	-13,724
Guajará-mirim	614.333	0,882	3,502	0,713	-13,204
Abunã	929.486	0,848	-5,970	0,764	-8,824
Porto Velho	984.164	0,883	-5,677	0,703	-14,436
Jiparaná	28.683	0,825	-4,275	0,693	-25,644
Tabajara	60.252	0,874	14,702	0,881	-9,809
Humaitá	1.097.174	0,932	-3,052	0,810	-4,725
Manicoré	1.155.606	0,834	-10,290	0,724	-2,855
Boca do Guariba	70.401	0,725	34,528	0,784	26,811
Prainha Velha	142.948	0,912	12,266	0,915	-2,257
Fazenda Vista Alegre	1.333.649	0,860	0,585	0,723	-9,565

9 e 10. A Figura 9 apresenta os hidrogramas observado e calculado na estação fluviométrica de Abunã, que, de certa forma, resume o desempenho do modelo na parte da bacia localizada na Bolívia e Peru. A Figura 10 apresenta os hidrogramas em Fazenda Vista Alegre, que pode dar uma idéia global do desempenho da modelagem. A Tabela 2 apresenta os valores de dois critérios utilizados na avaliação das simulações: coeficiente de Nash (R^2) e o erro de volume (ΔV em %).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Q_{\text{obs}} - Q_{\text{calc}})^2}{\sum(Q_{\text{obs}} - \overline{Q_{\text{obs}}})^2} \quad (5)$$

$$\Delta V = \frac{\sum Q_{\text{calc}} - \sum Q_{\text{obs}}}{\sum Q_{\text{obs}}} \quad (6)$$

onde Q_{obs} é a vazão observada e Q_{calc} é a vazão calculada pelo modelo.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados das simulações indicam que o MGB-IPH representou satisfatoriamente o processo de transformação chuva-vazão na bacia do rio Madeira com as bases de dados utilizadas. Os valores dos critérios apresentados na Tabela 2 mostram que, na maioria das sub-bacias, o hidrograma observado teve bom ajuste ao hidrograma calculado pelo modelo.

Deve-se destacar, entretanto, que houve uma tendência de subestimação da vazão calculada pelo modelo conforme apresentado nas Figuras 9 e 10. Outro indicador de subestimação da vazão calculada é o valor negativo do erro de volume (ΔV), principalmente, nas sub-bacias localizadas na Bolívia e Peru (Tabela 2). Esses resultados podem estar influenciados pela precipitação da base COLA, que foi utilizada como dado de entrada nessas sub-bacias. Como mostrado na Figura 5, verifica-se que a precipitação anual dessa base é sistematicamente inferior aos valores dados pela série compilada pelo HiBAM, que utiliza séries mensais dos postos pluviométricos. A série do HiBAM não pode ser usada no MGB-IPH porque as simulações são em nível diário.

Outra deficiência da simulação diz respeito ao baixo desempenho do modelo na representação do escoamento nos períodos de estiagem na bacia de drenagem da estação de Abunã como pode ser

deduzido dos hidrogramas apresentados na Figura 9.

Um fato importante que deve ser destacado na calibração realizada diz respeito ao uso de um conjunto único de parâmetros nos blocos de uso do solo para todas as sub-bacias localizadas no Brasil. Isso é mais um fator que reforça a noção de que os dados utilizados na parte brasileira da bacia são de melhor qualidade. Nesse caso, provavelmente, deve-se ao uso de informações de tipo de solo mais acuradas.

CONCLUSÕES

A comparação dos dados de precipitação da rede da ANA com os levantados pelo COLA mostrou que até o ano de 1990 os dois valores são bastante próximos. Isso deve ser explicado pelos fatores de correção utilizados para os dois períodos: 1979-1990 (dados de Webber e Willmott (1998)) e 1991-1999 (dados do CMAP). Na parte da bacia Amazônica localizada fora do Brasil, constatou-se que é possível verificar a qualidade dos dados do COLA comparando-o com outras bases que possuem série mensal. Isso permitiu verificar que a precipitação no Peru era subestimada e precisava de correção. A correção realizada mostrou-se adequada para a modelagem hidrológica, o que leva a concluir que se pode utilizar a mesma estratégia para corrigir o período de dados entre 1991 e 1999 que apresentou valores inferiores aos das estações da ANA.

O cálculo da evapotranspiração potencial indicou que a base de dados do ISLSCP fornece valores mais próximos da realidade que a base do COLA. Por isso, sugere-se que se utilizem, preferencialmente, os dados do ISLSCP. Os dados do COLA deveriam ser utilizados com ressalva e em situações cujo período simulado não seja contemplado pelo ISLSCP. Em testes realizados, verificou-se que as informações de velocidade do vento e pressão atmosférica da base do COLA podem ser utilizados sem maiores ressalvas.

Os resultados obtidos com o modelo MGB-IPH são bastante encorajadores, haja vista a qualidade dos resultados das simulações realizadas na bacia do rio Madeira. Caso se consiga ter acesso às séries de vazão das estações fluviométricas da Bolívia, será possível obter resultados ainda melhores, pois se trabalhará com sub-bacias menores. Independentemente disso, os resultados obtidos já permitem a realização de estudos como a análise dos processos hidrológicos, quantificação da disponibi-

lidade hídrica em sub-bacias e avaliação das consequências de mudanças na cobertura vegetal sobre o escoamento na bacia.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio em forma de bolsa de doutorado concedida ao primeiro autor. Ao projeto HiBAm na pessoa de Gerard Cochonneau pelo fornecimento de informações hidrológicas.

ANEXO A – Modelo MGB-IPH

O modelo é composto de módulos para o cálculo da interceptação/evapotranspiração, balanço hídrico no solo, propagação do escoamento na célula e propagação do escoamento na rede de drenagem (Collischonn *et al.*, 2007).

Primeiramente, parte da precipitação incidente na célula é retida no reservatório de interceptação. A energia da evapotranspiração potencial é utilizada no processo de evaporação da água retida no reservatório de interceptação. Caso reste energia, será utilizada para a transpiração da água retida no solo. A água que não é retida no reservatório de interceptação poderá infiltrar no solo ou escoar superficialmente.

A capacidade do reservatório de interceptação é dada por (Liang *et al.*, 1994):

$$SIL = \alpha \cdot IAF \quad (A.1)$$

onde SIL é a capacidade do reservatório de interceptação e \square é a capacidade máxima de armazenamento de água por unidade de área das folhas.

A evapotranspiração é calculada com a equação de Penman-Monteith (Wigmosta *et al.*, 1994):

$$E = \left(\frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \rho_A \cdot c_p \cdot \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_s / r_a)} \right) \cdot \frac{1}{L \cdot \rho_w} \quad (A.2)$$

onde E é a evapotranspiração ($m \cdot s^{-1}$), L é o calor latente de vaporização ($MJ \cdot kg^{-1}$), Δ é a taxa de variação da pressão de saturação do vapor ($kPa \cdot ^\circ C^{-1}$), R_n é radiação líquida ($MJ \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), G é o fluxo de energia para o solo ($MJ \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), ρ_A é a massa específica do ar ($kg \cdot m^{-3}$), ρ_w é a massa específica da água ($kg \cdot m^{-3}$), c_p é o calor específico do ar úmido ($MJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$), e_s é a pressão de saturação do vapor d'água (kPa), e_a é a pressão de vapor d'água (kPa), γ é a constante psicométrica ($kPa \cdot ^\circ C^{-1}$), r_s é resistência superficial e r_a resistência aerodinâmica.

Para o cálculo do balanço hídrico no solo, o MGB-IPH utiliza a formulação do modelo Xinanjiang (Zhao *et al.*, 1980).

$$\Delta W = \Delta t \cdot (P - E - D_{sup} - D_{int} - D_{bas}) \quad (A.3)$$

onde W é a umidade do solo (mm); Δt é o passo de tempo (dias); P é a chuva que alcança o solo ($mm/\Delta t$); E é a evapotranspiração ($mm/\Delta t$); D_{sup} é o escoamento superficial ($mm/\Delta t$); D_{int} é o escoamento subsuperficial ($mm/\Delta t$); D_{bas} é o escoamento de base ($mm/\Delta t$).

D_{sup} é calculado com base no armazenamento do solo W e em parâmetros do modelo de acordo com as equações A.4 (Zhao *et al.*, 1980):

$$D_{sup} = \Delta t \cdot P - (W_m - W), \text{ se } A \leq 0$$

$$D_{sup} = \Delta t \cdot P - (W_m - W) + W_m \cdot$$

$$\left[\left(1 - \frac{W}{W_m} \right)^{\frac{1}{b+1}} - \frac{\Delta t \cdot P}{W_m \cdot (b+1)} \right]^{b+1}, \text{ se } A > 0 \quad (A.4)$$

$$\text{onde, } A = \left[\left(1 - \frac{W}{W_m} \right)^{\frac{1}{b+1}} - \frac{\Delta t \cdot P}{(b+1) \cdot W_m} \right]$$

W_m é a capacidade máxima de armazenamento do solo; b representa a distribuição estatística da capacidade de armazenamento do solo (parâmetros do modelo).

O escoamento sub-superficial (D_{int}) é dado por (Rawls *et al.*, 1993):

$$D_{int} = K_{int} \cdot \left(\frac{W - W_z}{W_m - W_z} \right)^{(3+\frac{2}{\lambda})} \quad (A.5)$$

onde W_z é o limite de armazenamento para que ocorra escoamento sub-superficial, K_{int} é a condutividade hidráulica em meio saturado e λ é o índice de porosidade do solo.

O escoamento de base D_{bas} é calculado com a expressão (Collischonn *et al.*, 2007):

$$D_{bas} = K_{bas} \cdot \frac{(W - W_c)}{(W_m - W_c)} \quad (A.6)$$

onde W_c é o limite de armazenamento para que ocorra escoamento de base e K_{bas} é o parâmetro do escoamento de base.

O volume correspondente aos escoamentos D_{sup} , D_{int} e D_{bas} é propagado na célula com o método do reservatório linear simples (Collischonn *et al.*, 2007).

$$Q_{sup} = \frac{1}{TKS} \cdot V_{sup} \quad (A.7)$$

$$Q_{int} = \frac{1}{TKI} \cdot V_{int} \quad (A.8)$$

$$Q_{bas} = \frac{1}{TKB} \cdot V_{bas} \quad (A.9)$$

onde Q_{sup} , Q_{int} e Q_{bas} são as vazões de saída dos reservatórios e TK o tempo de retardo do reservatório. O termo TK representa a taxa de deplecionamento do reservatório e pode ser obtido a partir de características físicas como o tempo de concentração da célula no caso de TKS e TKI e recessão do hidrograma no caso de TKB .

Após a propagação da água no interior da célula, o modelo realiza a propagação no rio principal de cada célula. Para a propagação, utiliza-se o modelo de Muskingum-Cunge (Tucci, 1998). A vazão de saída em uma célula é utilizada como entrada na célula a jusante. O processo segue até o exutório da bacia.

REFERÊNCIAS

- ADLER, R.F., HUFFMAN, G.J., CHANG, A. *et al.*, 2003, "The version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-Present)". *Journal of Hydrometeorology*, v. 4, n. 6, 1147-1167.
- ALLASIA, D.G., COLLISCHONN, W., TUCCI, C.E.M. *et al.*, 2004, "Modelo hidrológico da bacia do Alto Paraguai". In: Anais do III Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste, CD ROM, Goiânia, Brasil, 20 a 22 de maio.
- ALVES, F.S.M., FISCH, G. e VENDRAME, I.F., 1999, "Modificações do microclima e regime hidrológico devido ao desmatamento na Amazônia: estudo de um caso em Rondônia (RO), Brasil". *Acta Amazônica*, v. 29, n. 3, pp. 395-409.
- CHAPELON, N., DOUVILLE, H., KOSUTH, P. e OKI, T., 2002, "Off-line simulation of the Amazon water balance: a sensitivity study with implications for GSWP". *Climate Dynamics*, v. 19, n. 2, pp. 141-154.
- COLLISCHONN, W. *et al.*, 2007, "The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling". *Hydrological Sciences Journal*, v. 52, n. 5, pp. 878-895.
- DIRMEYER, P. A. e TAN, L., 2001, "A multi-decadal gridded meteorological and land-surface data set over South America". COLA Technical Report, Calverton, EUA, COLA.
- HIEZ, G., COCHONNEAU, G. e SECHET, P., 1991, "Aplicação do método do vetor regional à análise da pluviometria anual da bacia amazônica". In: Anais do IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vol. 1, pp. 367-377, Rio de Janeiro, Novembro.
- KISTLER, R., KALNAY, E., COLLINS, W. *et al.*, 2001, "The NCEP/NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation". *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 82, n. 2, pp. 247-268.
- LIANG, X., LETTENMAIER, D.P., WOOD, E.F. e BURGESS, S.J., 1994, "A Simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models". *J. Geophys. Research*, 99(D7), 14.416-14.428.
- MALHI, Y., PEGORARO, E., NOBRE, A.D. *et al.*, 2002, "Energy and water dynamics of a central Amazonian rain forest". *Journal of Geophysical Research*, v. 107, n. D20, pp. 45-1 – 45-17.
- MITCHELL, T.D. e JONES, P.D., 2005, "An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids". *International Journal of Climatology*, v. 25, n. 3, pp. 693-712.
- MOLINIER, M., GUYOT, J.L., OLIVEIRA, E., 1994, GUIMARÃES, V. e CHAVES, A. *et al.*, "Hidrologia da bacia do rio Amazonas". *A Água em Revista*, v. 2, n. 3, pp. 31-36.
- RAWLS, W.J., AHUJA, L.R., BRAKENSIEK, D.L. *et al.*, 1993, "Infiltration and soil water movement". In: Maidment, D.R. (Editor in Chief). *Handbook of Hydrology*, 1 ed., Capítulo 4, New York, E.U.A, McGraw-Hill Inc.

- RICHEY, J.E., CABRAL, M.C.C., SANTIAGO, A.V., *et al.*, 2004, "Recent progress in modeling surface hydrology across the Amazon Basin using a Variable Infiltration Capacity approach". In: *III Conferência Científica do LBA*, Brasília, Brasil, 27 a 29 de Julho.
- ROBERTS, J.M., CABRAL, O.M.R., COSTA, J.P. *et al.*, 1996, "An overview of the leaf area index and physiological measurements during ABRACOS". In: GASH, J.H.C., NOBRE, C.A., ROBERTS, J.M., VICTORIA, R.L. (ed.), *Amazonian Deforestation and Climate*, 1 ed., Capítulo 16, Chichester, Inglaterra, John Wiley.
- SHUTTLEWORTH, W.J., 1993, "Evaporation". In: Maidment, D.R. (Editor in Chief). *Handbook of Hydrology*, 1 ed., Capítulo 4, New York, EUA, McGraw-Hill Inc.
- SHUTTLEWORTH, W.J., 1988, "Evaporation from Amazonian rainforest". *Proceedings of the Royal Society of London Series B*, v. 233, pp. 321-346.
- SILVA, B.C., COLLISCHONN, W., TUCCI, C.E.M. *et al.*, 2007 "Previsão hidroclimática de vazão de curto prazo na bacia do rio São Francisco". *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 12, n. 3, pp. 31-41.
- TUCCI, C.E.M., 1998, "Modelos Hidrológicos". 1 ed., Porto Alegre, Brasil, Editora Universidade/UFRGS/ABRH.
- VICTORIA, D.C., BALLESTER, M.V.R., SANTIAGO, A.V. *et al.*, 2005, "Simulação hidrológica da bacia Amazônica com o modelo VIC-nL: calibração preliminar na bacia do Juruá". In: *II Congresso de Estudantes e Bolsistas do LBA*, Manaus, 11 a 13 de Julho.
- VICTORIA, D.C., 2004, "Estimativa da evapotranspiração da bacia do Ji-Paraná (RO) através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento". Dissertação de M.Sc., Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", USP, Piracicaba, SP, Brasil.
- VÖRÖSMARTY, C.J., MOORE, B., GRACE, A.L. *et al.*, 1989, "Continental scale models of water balance and fluvial transport: an application to South America". *Global biogeochemical cycles*, v. 3, n. 3, pp. 241-265.
- WEBBER, S.R. e WILLMOTT, C.J., 1998, "South America precipitation: 1960-1990 gridded monthly time series". Center for Climatic Research, Dept. of Geography, University of Delaware, Newark, EUA.
- WIGMOSTA, M.S., VAIL, L.W. e LETTENMAIER, D.P., 1994, "A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain". *Water Resources Research*, v. 30, n. 6, pp. 1665-1679.
- WRIGHT, I.R., NOBRE, C.A., TOMASELLA, J. *et al.*, 1996, "Towards a GCM surface parameterization for Amazonia". In: GASH, J.H.C., NOBRE, C.A., ROBERTS, J.M., VICTORIA, R.L. (ed.), *Amazonian Deforestation and Climate*, 1 ed., Capítulo 28, Chichester, Inglaterra, John Wiley.
- XIE, P. e ARKIN, P.A., 1997, "Global precipitation: a 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates and numerical outputs". *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 78, n. 11, pp. 2539-2558.
- XUE, Y., SELLERS, P.J., KINTER, J.L. e SHUKLA, J., 1991, "A simplified biosphere model for global climate studies". *Journal of Climate*, v. 4, n. 3, pp. 345-364.
- ZHAO, M. e DIRMEYER, P.A., 2003, "Production and Analysis of GSWP-2 Near-Surface Meteorology Data Sets". COLA Technical Report, Calverton, EUA, COLA.
- ZHAO, R.J., ZUANG, Y.L., FANG, X.R., *et al.*, 1980, "The Xinanjiang model". in *Hydrological Forecasting Proceedings Oxford Symposium*, IAHS 129, pp. 351-356.

Simulation in the Amazon Basin Using Limited Data: the Madeira River

ABSTRACT

Hydrological simulation of the rain-discharge transformation using a hydrological model is applied to water resources management in a number of activities such as estimate, forecast and evaluation of the hydrological processes. The large basins (> 10,000 km²) have many effects such as climate, geology and human activities. The Amazon is a region where there are major human impacts due to the expansion of economic development. The Hydrological Model for Large Basins (MGB-IPH) was applied in the Amazon basin in order to evaluate its potential in this basin. Different hydrological data sources were tested. Daily precipitation data were used from the hydrometeorological network of the National Water Agency (ANA) and from NCEP/NCAR re-analysis corrected by the Center for Ocean Land Atmosphere (COLA). Climatological data from the International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP) and from NCEP/NCAR reanalysis were used to calculate evapotranspiration. The model was applied in the Madeira river basin, one of the most important sub-basins of the Amazon River. The results showed that daily COLA precipitation series have values very close to ANA precipitation series for the 1979-1990 period. In the portion of the basin located outside Brazil, COLA precipitation was compared with monthly data bases. At some points in the basin we had to correct the precipitation using these data bases. The model simulations showed good quality despite the limited hydrological information in the Amazon region. Key-words: Hydrological modeling; hydrological data; Amazon basin.