



DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO HIDROLÓGICO- HIDRODINÂMICO PARA A AMÉRICA DO SUL: PARTE 1

Vinicius Alencar Siqueira^{1} & Ayan Santos Fleischmann² & Fernando Mainardi Fan³ & Rodrigo Cauduro Dias de Paiva⁴ & Paulo Rógenes Monteiro Pontes⁵ & Walter Collischonn⁶*

Resumo – Os conflitos crescentes relacionados aos recursos hídricos vêm motivando a implementação de modelos hidrológicos em escalas continentais e globais, especialmente em locais com limitação de dados e rios de caráter transfronteiriço. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo hidrológico-hidrodinâmico para a América do Sul, a partir do acoplamento do modelo MGB-IPH a um módulo de propagação inercial local. Os dados de vazão necessários para calibração do modelo foram obtidos de diversas instituições em diferentes países, enquanto que os dados de entrada foram extraídos de produtos globais derivados de sensoriamento remoto. Os resultados mostraram um desempenho aceitável na simulação dos principais rios tropicais do continente principalmente no sentido noroeste-sudeste, sendo que mais da metade dos postos foram considerados bons em termos de Nash-Sutcliffe e eficiência de Kling-Gupta. O uso da propagação hidrodinâmica foi importante para resolver sistemas de rios complexos que são bastante comuns em bacias como Amazônica e Prata, demonstrando o potencial integrador do modelo apesar da resolução relativamente grosseira das informações de entrada.

Palavras-Chave – Modelagem hidrológica, Propagação hidrodinâmica, América do Sul

DEVELOPMENT OF A COUPLED HYDROLOGIC-HYDRODYNAMIC MODEL FOR SOUTH AMERICA: PART 1

Abstract – Increasing conflicts over water resources have motivated the implementation of hydrological models at continental and global scales, which can provide information for data scarce regions and support issues related to transboundary rivers. This work presents the development of a hydrologic-hydrodynamic model for South America, coupling the MGB-IPH model to a local inertial flow routing method. Streamflow data was obtained from several hydrological centers in different countries, while input data was extracted from global products derived from remotely sensed data. Results showed a reasonable performance regarding the main tropical rivers of the continent especially in northwest-southeast direction, with good values of Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency in more than half of the gauging stations. The hydrodynamic model was important to solve complex river systems that are quite common in large basins such as Amazon and La Plata, which demonstrates the integrative potential of the developed model despite the coarse resolution of the input data.

Keywords – Hydrological modelling, Hydrodynamic flow routing, South America.

¹ Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS. vinicius.siqueira@ufrgs.br

² Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS. ayan.fleischmann@gmail.com

³ Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS. fernando.fan@ufrgs.br

⁴ Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS. rodrigodpaiva@gmail.com

⁵ Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS. p.rogenes@gmail.com

⁶ Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS. collischonn@iph.ufrgs.br

*Autor correspondente: vinicius.siqueira@ufrgs.br

1. INTRODUÇÃO

Modelos hidrológicos são ferramentas que descrevem matematicamente os processos físicos que ocorrem em bacias hidrográficas. Além de permitir a estimativa de variáveis associadas ao balanço hídrico no solo e a compreensão destes processos em locais pouco ou não monitorados, tais modelos podem ser utilizados para diversos fins a exemplo da avaliação de impactos antrópicos e de mudanças climáticas sobre a disponibilidade hídrica e ocorrência de eventos extremos, bem como de forma operacional na previsão de vazões afluentes a reservatórios e controle de cheias.

Atualmente, os conflitos crescentes relacionados ao gerenciamento de recursos hídricos, seja pelo caráter transfronteiriço dos rios, ou pela falta de compartilhamento de dados (quando existem) entre diferentes países, vem impulsionando a implementação de modelos hidrológicos para domínios continentais e globais (Archfield et al. 2015, Bierkens, 2015). A América do Sul, que se estende por 17.800.000 km² e representa 14% da massa continental terrestre (García e Mechoso, 2005), é drenada por algumas das maiores bacias do mundo em termos de área e/ou vazão média anual, incluindo Amazonas (5,92 milhões de km²), Prata (~3 milhões de km²) e Orinoco (940 mil km²). Estas bacias, por exemplo, são compartilhadas entre alguns países e possuem um elevado interesse tanto por parte da sociedade como da comunidade científica, o que motiva o desenvolvimento de ferramentas hidrológicas capazes de integrar os mais diversos sistemas hídricos no continente em questão.

Contudo, a aplicação de um modelo para a escala da América do Sul é um grande desafio técnico em função da elevada heterogeneidade das características físicas e climáticas das bacias envolvidas. Além disso, regiões como a Amazônia (Paiva et al. 2013) e Paraguai (Pontes, 2016) possuem sistemas de rios complexos em que efeitos de remanso e planícies de inundação governam o escoamento dos rios, sendo que a propagação de vazão não pode ser tratada através de simplificações usualmente empregadas em modelos de grande escala, como o método de Muskingum-Cunge e de onda cinemática. Nesse sentido, a utilização de modelos com melhor representação física do escoamento se torna essencial, o que vem se tornando viável devido aos recentes avanços computacionais e da crescente disponibilidade de bases de dados derivadas de sensoriamento remoto.

O objetivo deste primeiro trabalho (parte 1) é apresentar o desenvolvimento de um modelo hidrológico-hidrodinâmico para a América do Sul, e discutir brevemente o seu desempenho para alguns dos principais rios do continente.

2. MÉTODOS

2.1 Modelo hidrológico-hidrodinâmico: MGB-IPH

O MGB-IPH é um modelo hidrológico conceitual e semi-distribuído que foi desenvolvido especialmente para grandes bacias tropicais, utilizado com sucesso em um grande número de aplicações na América do Sul (e.g. Collischonn et al. 2007; Paiva et al. 2013; Pontes, 2016). Na versão atual, a bacia hidrográfica é discretizada em minibacias nas quais é calculado o balanço hídrico no solo, subdivididas em unidades de resposta hidrológica (URH) categorizadas por tipo do solo e cobertura vegetal. Após a geração de escoamento, este sofre atenuação e retardo no interior da minibacia e é posteriormente propagado ao longo da rede de drenagem, através do método de Muskingum-Cunge Linear (MCL).

De forma alternativa ao MCL, a propagação hidrodinâmica em rios pode ser resolvida explicitamente através de uma formulação inercial local (Pontes, 2016), a qual despreza apenas o termo de aceleração convectiva nas equações completas unidimensionais de Saint Venant. Esta

abordagem permite representar fisicamente processos típicos de sistemas de rios complexos, como atenuação do pico de cheia devido à planície e efeitos de remanso, além da interação entre a planície inundável e o balanço hídrico vertical no solo. No cálculo da propagação, o volume de água armazenado em cada minibacia é a única variável prognóstica do modelo, sendo que variáveis como nível de água e área inundada são diagnosticadas a partir do volume armazenado utilizando curvas cota-área derivadas de topografia em sub-grid.

Bases utilizadas e processamento dos dados

As bases de dados utilizadas para preparação do modelo hidrológico-hidrodinâmico na América do Sul, com as respectivas referências bibliográficas, estão apresentadas na Tabela 1. Para a etapa de pré-processamento foi utilizado o pacote de ferramentas IPH-Hydro Tools (Siqueira et al. 2016), aplicado sobre o mapa de direções de fluxo do HydroSHEDS com resolução de 450 m. Utilizou-se um limiar de 1000 km² de área para delimitar o início da rede de drenagem, a qual foi segmentada em trechos de comprimento máximo (Δx) de 15 km para evitar erros de instabilidade na propagação hidrodinâmica. Para determinar a topografia de planície em sub-grid utilizou-se um procedimento baseado no modelo HAND, aplicado sobre o Bare-Earth SRTM após *upscaling* de 90 para 450 m conforme realizado anteriormente por Siqueira et al. (2017). O Bare-Earth SRTM foi também utilizado para definição da elevação da calha cheia em cada minibacia, após um procedimento de suavização de ruídos baseado em regressão linear dos pixels em cada trecho de rio.

Tabela 1. Bases de dados utilizadas para preparação do MGB-IPH em escala continental.

Informação	Descrição dos dados	Referência
Modelo digital de elevação (MDE)	Bare-Earth SRTM v 1.0 DEM, <i>upscaled</i> 450 m	O'Loughlin et al. (2016)
Mapa de direções de fluxo	<i>Global HydroSHEDS Flow Direction Map</i> , 450m	Lehrer et al. (2008)
Precipitação	<i>Global Multi-Source Weighted Ensemble Precipitation</i> v 1.1 (MSWEP), resolução de 0.25°	Beck et al. (2017)
Clima	Médias mensais climatológicas do <i>Climate Research Unit</i> (CRU Dataset v. 2.0)	New et al. (2002)
Dados de vazão (> 10.000 km ²)	Observações <i>in situ</i> - ANA (Brasil), Vazões naturalizadas de reservatórios (ONS - Brasil), INA (Argentina), IDEAM (Colômbia), DGA (Chile), SENAMHI (Peru e Bolívia), ORE-HyBAM (Internacional), <i>Global Runoff Data Center</i> – GRDC (Internacional). Total de 612 postos utilizados.	-
Uso do Solo / Tipo do solo	Mapa de blocos para América do Sul, <i>upscaled</i> 450m	Fan et al. (2015)
Geologia / Litologia	<i>Global lithologic composition of the Earth's continental surfaces dataset</i>	Durr et al (2005)
Largura / Profundidade dos rios	<i>Global bankfull width and depth database</i> ; Relações geomorfológicas de estudos regionais	Andreadis et al. (2013), Paiva et al. (2013), Pontes (2016)

Os dados de vazão *in situ* foram obtidos a partir de instituições de diferentes países, incluindo vazões naturalizadas em diversos pontos controlados por operação de reservatórios. Foram incluídos apenas os postos com mais de 10.000 km² de área de drenagem, totalizando 612 estações fluviométricas. Devido à escala de aplicação do modelo, optou-se por utilizar uma base global de precipitação (resolução espacial de 0,25°) que combina informações de satélite, reanálise

meteorológica e dados observados. Parâmetros de geometria dos rios (largura / profundidade) foram extraídos de bases de dados globais e estudos regionais nas bacias Amazônica, Prata e Lagoa dos Patos. Para evitar um excesso de parametrização do modelo devido à resolução relativamente grosseira dos dados de entrada, foram adotadas sub-bacias delineadas a partir da combinação entre um mapa global de litologia/geologia e um mapa de grandes bacias hidrográficas na América do Sul, elaborado a partir de informações da Agência Nacional das Águas e *Food Agriculture Organization* (FAO). Sendo assim, uma calibração convencional “posto a posto” não foi realizada neste estudo. Os valores de Manning foram globalmente mantidos em 0.03, com alguns ajustes em trechos específicos da Amazônia conforme Paiva et al. (2013). Todo o procedimento de calibração do MGB-IPH foi realizado de forma manual.

Configuração da simulação e avaliação do desempenho do modelo

A simulação com o MGB-IPH foi realizada para o período de 1990 a 2010, utilizando os dois primeiros anos para aquecimento do modelo. Este foi inicialmente calibrado utilizando o método de Muskingum-Cunge Linear para propagação nos rios, devido a critérios de eficiência computacional. Na sequência, o MCL foi substituído pela propagação hidrodinâmica com aproximação inercial, configurada para operar com processamento paralelo. O tempo de simulação para um período de 20 anos é de aproximadamente 90 minutos em um computador pessoal com processador Intel Core i7 e 16 Gb de RAM. Os índices de eficiência de Kling-Gupta (KGE) e Nash-Suttcliffe (NSE) foram utilizados para avaliação de desempenho do modelo:

$$KGE = 1 - \sqrt{(1 - r^2)^2 + \left(1 - \frac{\mu_{calc}}{\mu_{obs}}\right)^2 + \left(1 - \frac{CV_{calc}}{CV_{obs}}\right)^2}, \text{ sendo } CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (1)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{calc})^2}{\sum (Q_{obs} - \bar{Q})^2} \quad (2)$$

3. RESULTADOS

A figura 1 apresenta os índices de KGE e ENS espacializados para a América do Sul. O desempenho foi superior nas regiões sul e sudeste do Brasil incluindo a região central da Amazônia (sentido nordeste-sudeste), com ambos valores de KGE e NSE predominantemente acima de 0,6. As maiores dificuldades no ajuste ocorreram em regiões de clima semi-árido a desértico, a exemplo do nordeste brasileiro, oeste/sudoeste da bacia do Prata, Argentina e norte do Chile. Aspectos como calibração simplificada, limitação na estrutura do MGB-IPH na representação dos processos hidrológicos nestas áreas e inexistência de um módulo de usos de água podem estar influenciando no resultado do modelo. Outros pontos com desempenho inferior destacados no mapa se referem a regiões bastante chuvosas no entorno da Cordilheira dos Andes, o que é esperado para um modelo hidrológico combinado a produtos de precipitação derivados de satélite.

De acordo com a figura 2, aproximadamente 55% e 70% dos postos tiveram resultados considerados bons em termos de NSE e KGE respectivamente, enquanto que estas taxas sobem para 75% e 85% dos postos quando estes são avaliados sob um critério de resultado razoável, considerando a escala de aplicação do modelo. Embora 10 a 15% dos postos tiveram um desempenho muito ruim quando comparados com as vazões simuladas, de forma geral os resultados podem ser considerados satisfatórios dado à limitação e resolução espacial dos dados de entrada. Observa-se que há uma certa tendência de melhoria do resultado para maiores áreas de drenagem e

postos com maior vazão média anual, porém essa relação não é tão evidente (principalmente no primeiro caso).

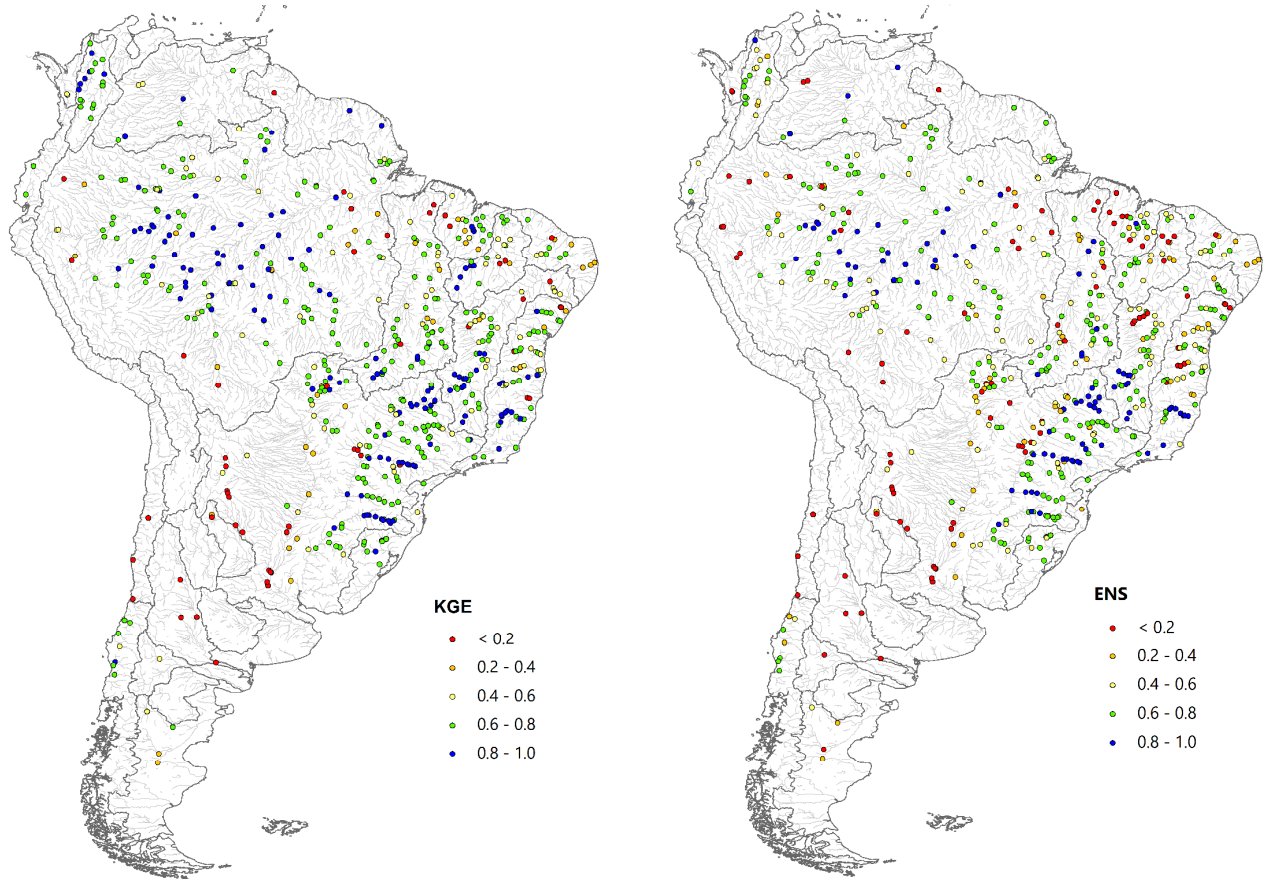


Figura 1 – Desempenho do modelo MGB-IPH em termos de eficiência de Kling-Gupta – KGE (à esquerda) e Nash-Sutcliffe – NSE (à direita), especializados para o território da América do Sul.

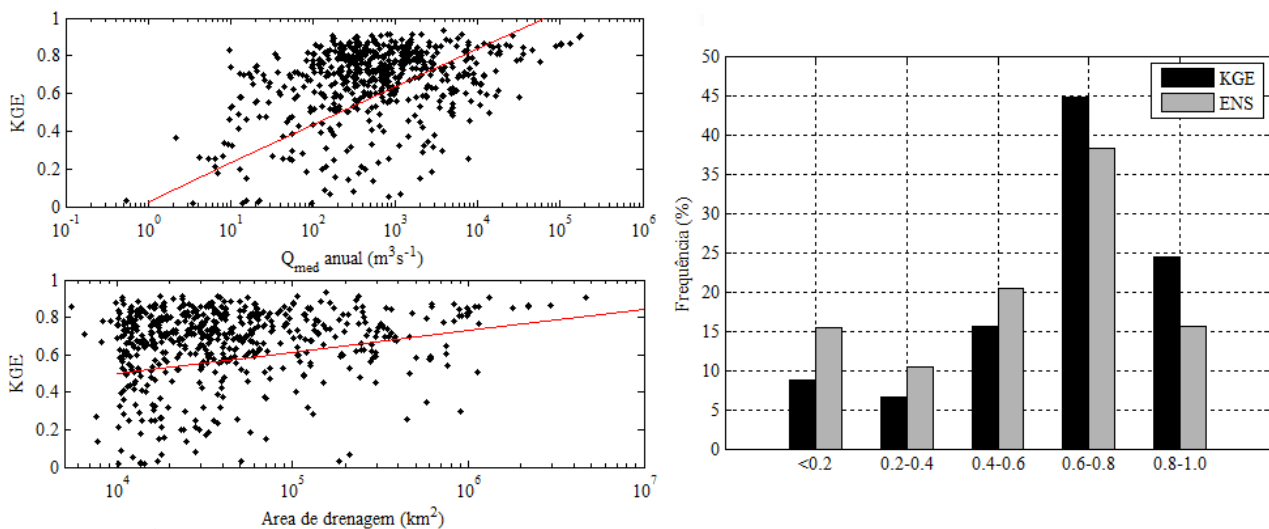


Figura 2 – Índice de eficiência de KGE x vazão média anual (a) e área de drenagem (b), bem como frequência dos valores de KGE e NSE de acordo com intervalos de desempenho (c) (<0,2: Muito ruim; 0,2-0,4: Ruim; 0,4-0,6: Razoável; 0,6-0,8: Bom; 0,8-1,0: Muito bom).

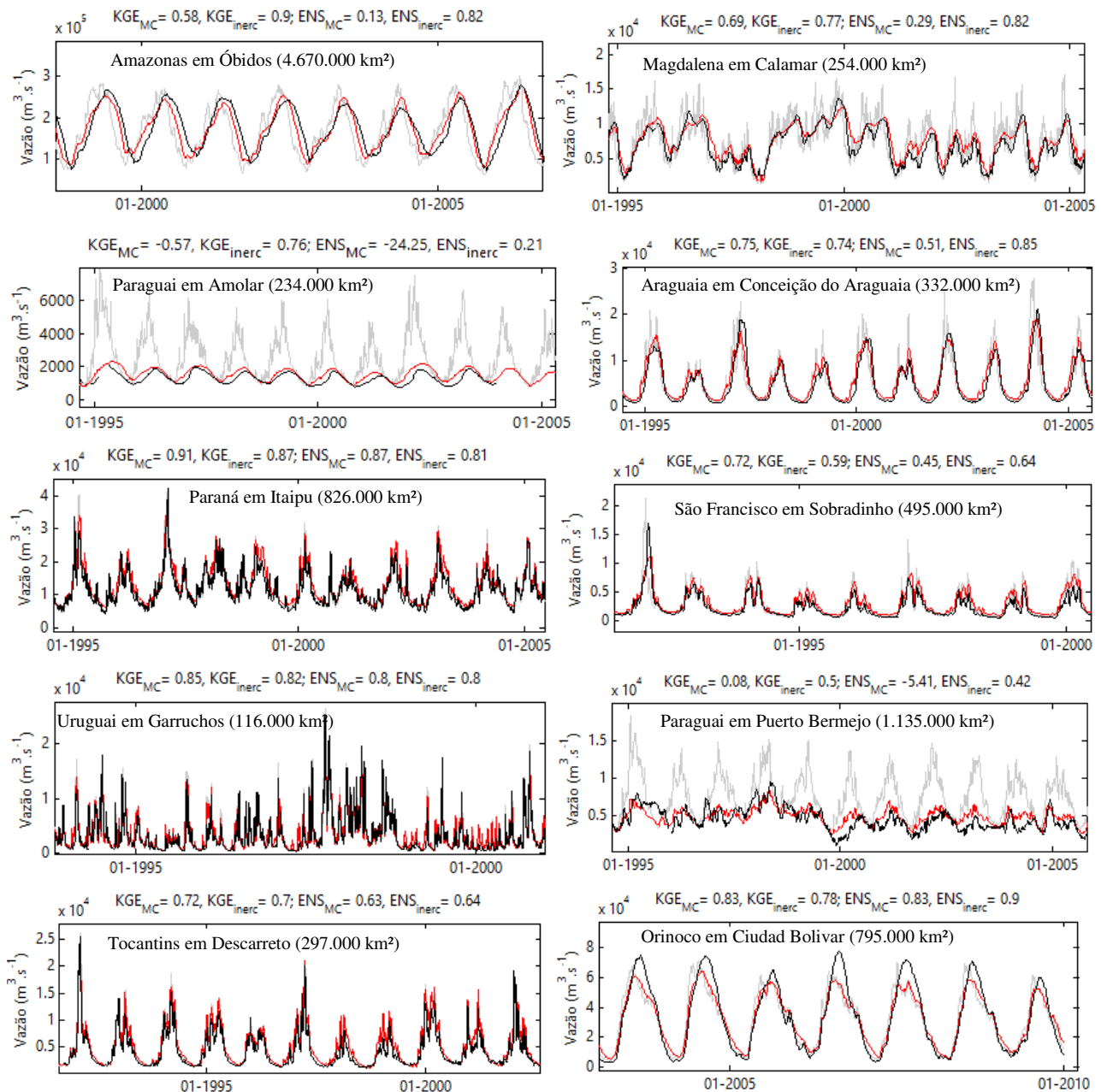


Figura 3 – Comparação dos hidrogramas simulados e observados em alguns dos principais rios tropicais da América do Sul. As linhas em preto, cinza e vermelho indicam os valores observados, simulados com o método de Muskingum-Cunge (MC) e simulado com propagação hidrodinâmica (inercial), respectivamente.

Para avaliar o impacto da propagação hidrodinâmica nos resultados modelo, na figura 3 estão apresentados alguns hidrogramas de principais bacias tropicais da América do Sul, em comparação à simulação com o método de Muskingum-Cunge. Em regiões com sistemas de rios complexos, fortemente governados por interações entre planície e canal, como Amazônia (Óbidos) e Alto Paraguai, a adoção de uma representação mais física do escoamento promove uma melhoria expressiva na predição do modelo em comparação com as vazões observadas *in situ*. No posto de Amolar por exemplo, localizado na região do Pantanal, o comportamento dos hidrogramas simulados muda completamente dependendo do método de propagação que é utilizado. Isso ocorre

por diversos fatores, incluindo bifurcações de rios, escoamento difuso de água na planície e processos hidrológicos verticais como infiltração e evaporação nas áreas planas e sazonalmente inundadas, os quais afetam bastante os resultados no rio Paraguai (p. ex. Puerto Bermejo próximo à confluência com o rio Paraná). Em outros locais, como em Calamar (norte da Colômbia) e Conceição do Araguaia, os resultados também são impactados pela inundação sazonal de planície que ocorre no baixo rio Magdalena e na ilha do Bananal, onde os hidrogramas sofrem atenuação e atraso dos picos de cheia. Embora uma grande área inundada seja também existente na região de Llanos de Orinoco (parte central da bacia), as diferenças entre o Muskingum-Cunge e o modelo hidrodinâmico foram pouco evidentes no posto de Ciudad Bolivar possivelmente devido a uma subestimativa de precipitação e, conseqüentemente, de menor inundação. Ainda, problemas de *timing* nas vazões baixas podem estar diretamente relacionados com a estimativa grosseira da geometria dos rios na bacia do Orinoco.

Já em bacias como a do Tocantins, Uruguai e Alto Paraná, os resultados são relativamente próximos entre os métodos de propagação. Apesar do efeito de planície ser baixo, os picos na propagação hidrodinâmica tendem a ser mais atenuados pela existência de reservatórios nas bacias, já que nestes locais a topografia derivada do MDE é exageradamente plana e acaba superestimando a área inundada, no momento que ocorre extravasamento do canal.

4. CONCLUSÃO

No presente estudo, mostrou-se que é possível simular o comportamento dos principais rios da América do Sul, quando utilizado um modelo hidrológico acoplado internamente a um módulo hidrodinâmico de propagação de vazões. De forma geral, o modelo apresentou um desempenho razoável em termos de métricas como KGE e ENS, cujas maiores limitações podem ser explicadas, em parte, por um exercício de calibração simplificada e uso de bases de dados globais como precipitação por satélite, largura e profundidade dos rios. Contudo, é importante destacar que os resultados foram bastante similares em comparação a estudos anteriores focados na Amazônia (Paiva et al. 2013) e na bacia do Prata (Pontes, 2016), as quais juntas representam quase 50% do território da América do Sul e possuem alto interesse científico para a comunidade acadêmica nacional e internacional.

O modelo aqui desenvolvido é um primeiro passo para estudos hidrológicos na escala continental, onde existem diversos desafios relacionados à natureza transfronteiriça dos rios. Salienta-se que a experiência de estudos de modelagem regionais é fundamental para que processos hidrológicos relevantes de grandes bacias, bem como geometria dos rios, sejam melhor conhecidos. Ainda, a inclusão de módulos específicos como reservatórios e usos de água também merece destaque, e são aspectos a serem trabalhados no futuro.

REFERÊNCIAS

- ARCHFIELD, S.A. et al. (2015) Accelerating advances in continental domain hydrologic modeling. *Water Resources Research*. v.51, n.12, pp.10078-10091.
- ANDREADIS, K. M.; SCHUMANN, G. J. P.; PAVELSKY, T. (2013). A simple global river bankfull width and depth database. *Water Resources Research*, 49, n.10, pp. 7164-7168.
- BECK, H.E.; VAN DIJK, A.I.J.M.; LEVIZZANI, V.; SCHELLEKENS, J.; MIRALLES, D.G.; MARTENS, B.; DE ROO, A.D. (2017) MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation

(1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. *Hydrology and Earth System Sciences*, v.21, pp. 589-615.

BIERKENS, M. (2015) Global hydrology 2015. State, trends and directions. *Water Resources Research*, v. 51, pp. 4923-4947.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; DA SILVA, B.C.; TUCCI, C.E.M. (2007). The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, v. 52, n. 5, pp. 878-895.

DÜRR, H.H.; MEYBECK, M.; DÜRR, S.H. (2005). Lithologic composition of the Earth's continental surfaces derived from a new digital map emphasizing riverine material transfer. *Global Biogeochemical Cycles*, v.19, n.4, GB4S10, doi:10.1029/2005GB002515.

FAN, F.M.; BUARQUE, D.C.; PONTES, P.R.M.; COLLISCHONN, W. (2015) Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH), 21, 2015. Brasília. *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 2015.

GARCIA, N. O.; MECHOSO, C. R. (2005). Variability in the discharge of South American rivers and in climate. *Hydrological Sciences Journal*, v.50, n.3. pp. 459-478.

LEHNER B, VERDIN K, JARVIS A. (2008). New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, v. 89, n. 10, pp.: 93–94.

NEW, M.; LISTER, D.; HULME, M.; MAKIN, I. (2002). A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Climate Research*, v. 21. pp. 1-25.

O'LOUGHLIN, F.; PAIVA, R.C.D.; DURAND, M.; ALSDORF, D.E.; BATES, P.D. (2016). A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product. *Remote Sensing of Environment*, v. 182, pp. 49-59.

PAIVA, R. C. D., D. C. BUARQUE, W. COLLISCHONN, M.-P. BONNET, F. FRAPPART, S. CALMANT, AND C. A. B. MENDES, (2013). Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin, *Water Resources Research*, 49, pp. 1226–1243.

PONTES, P. R. (2016); Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada da bacia do Rio da Prata. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. 194p.

SIQUEIRA, V.A.; FLEISCHMANN, A.S.; JARDIM, P.F.; FAN, F.M.; COLLISCHONN, W. (2016). IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in open-source environment. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 1, p. 274-287.

SIQUEIRA, V.A.; FLEISCHMANN, A.S.; BREDAS, J.P.F.; PAIVA, R.C.D.; COLLISCHONN, W. (2017) Avaliação do Bare-Earth SRTM para simulação hidrodinâmica de rios com planícies inundáveis sob vegetação densa. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 18, 2017. Santos. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2017.