

Avaliação do Bare-Earth SRTM para simulação hidrodinâmica de rios com planícies inundáveis sob vegetação densa

Vinícius Alencar Siqueira¹
Ayan Santos Fleischmann¹
João Paulo Lyra Fialho Brêda¹
Rodrigo Cauduro Dias de Paiva¹
Walter Collischonn¹

¹Instituto de Pesquisas Hidráulicas - UFRGS/IPH
Caixa Postal 15029 - 91501-970 – Porto Alegre - RS, Brasil
vinisiquera@gmail.com, ayan.fleischmann@gmail.com, joaopaulofb@gmail.com,
rodrigo.paiva@ufrgs.br, collischonn@ufrgs.br

Abstract. Hydrological-hydrodynamic models are important tools for simulation of rivers with backwater effects and floodplain attenuation. As a requirement of these models, a stage-area relationship usually needs to be defined based on topography data, which is often conducted by processing a Digital Elevation Model (DEM). However, large errors in the stage-area curve may arise in densely vegetated regions, since the C-band radar of the widely used SRTM DEM did not fully penetrate the canopy. Thus, in this work we evaluated the potential of the so-called Bare-Earth SRTM for hydrodynamic simulation in areas of dense vegetation, using the Purus basin as a study case. The MGB-IPH hydrological model was coupled to the inertial flow routing approach, and a methodology based on HAND model was adopted in order to represent stage-area relationship over the floodplain. Results showed a good agreement and timing between observed and simulated flows, with improvements over the original SRTM especially for areas influenced by the floodplain. Regarding inundation extent, although with 35% of incorrect predictions during high water period, model was able to reproduce well the total inundated areas, with accuracy and detection of 48% and 64% respectively. However, in the low water period the performance was poor, which was mainly related to simplifications used by MGB-IPH model. We conclude that the Bare-Earth SRTM has a potential for river simulations in densely vegetated areas, which can be useful for other basins within the Amazon region.

Palavras-chave: Hydrological modelling, hydrodynamic simulation, modelagem hidrológica, simulação hidrodinâmica, Bare-Earth SRTM.

1. Introdução

A compreensão de processos hidrológicos é um elemento fundamental para a avaliação de impactos antrópicos e de mudanças climáticas sobre os recursos hídricos. Este entendimento pode ser alcançado através do uso de modelos hidrológicos, uma vez que descrevem matematicamente os processos físicos que ocorrem na bacia e permitem que variáveis associadas ao balanço hídrico no solo sejam estimadas para diferentes cenários de simulação.

Quando desenvolvidos para bacias de grande escala, os modelos hidrológicos geralmente possuem métodos simplificados de propagação de vazão nos rios, a exemplo do Muskingum-Cunge e de onda cinemática. Embora tais métodos sejam adequados para uma variedade de condições de escoamento, em regiões como a Amazônia grande parte dos rios encontra-se em áreas essencialmente planas, onde os sistemas hídricos são governados por extensas planícies inundadas e por efeitos de remanso devido à grande amplitude e defasagem das ondas de cheia. Neste caso, as simplificações usualmente adotadas são insuficientes para lidar com a maior complexidade hidráulica destes sistemas, o que torna necessário a utilização de métodos com maior base física a exemplo da propagação hidrodinâmica (Paiva et al. 2011) ou inercial (Pontes et al., 2015).

O uso de modelos hidrológicos-hidrodinâmicos muitas vezes requer o estabelecimento de uma relação entre nível do rio e área da planície. Modelos Digitais de Elevação (MDE) podem ser utilizados para esta finalidade, porém grandes problemas surgem quando se deseja definir a relação nível-área para áreas com vegetação densa. O uso de MDEs amplamente empregados em estudos hidrológicos, como o Shuttle Radar Topography Mission – SRTM, acaba levando a erros elevados nas estimativas de área inundada, já que a banda-C do radar que foi utilizado pelo SRTM não penetra totalmente no dossel e superestima a elevação do terreno (Carabajal e Hardling, 2005; Berry et al. 2007). Desta forma, a aplicação de modelos nestas áreas requer algum tipo de correção estática na altura da vegetação (e.g. Paiva et al., 2011; Baugh et al. 2013), cujo problema acaba sendo resolvido através de um procedimento de calibração. Além disso, investigações de campo já foram realizadas para estimar a altura da vegetação (e.g. Wilson et al. 2007), porém é um processo que demanda tempo, recursos humanos/financeiros, além de ser inviável para grandes áreas e de difícil acesso.

Uma alternativa à versão original do SRTM é o uso da base de dados denominada Bare-Earth SRTM (O’Loughlin et al., 2016). Nesta base de dados, a vegetação do SRTM original é removida a partir do produto entre os valores do mapa global de altura do dossel (Simard et al., 2011) e uma função densidade de vegetação, que é relacionada ao percentual de cobertura de árvores do Campo de Vegetação Contínua (VCF) do MODIS. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar o potencial do Bare-Earth SRTM para simulação hidrodinâmica de rios com planícies inundáveis sob áreas densamente vegetadas, usando a bacia do rio Purus como estudo de caso.

2. Metodologia de Trabalho

A metodologia deste trabalho foi composta pelas seguintes etapas: (i) Geoprocessamento aplicado ao SRTM original e ao Bare-Earth SRTM para estabelecimento das curvas cota-área; (ii) Preparação do modelo MGB-IPH; (iii) Comparação das simulações de vazão, nível e área inundada com dados observados e mapas derivados de sensoriamento remoto. Por questões de simplificação, o SRTM original e o Bare-Earth SRTM serão denominados nas seções seguintes como SRTM e BareSRTM, respectivamente.

2.1 Área de estudo

A bacia do rio Purus (Figura 1) drena uma área de cerca de 380.000 km², e seu rio principal possui um comprimento aproximado de 3200 km até a foz no rio Solimões. A porção baixa da bacia é caracterizada por declividades muito baixas (< 5cm/km) e uma grande planície de inundação, cuja largura é da ordem de 30 km e corresponde algo em torno de 30 vezes a largura do canal principal (Paiva et al. 2011).

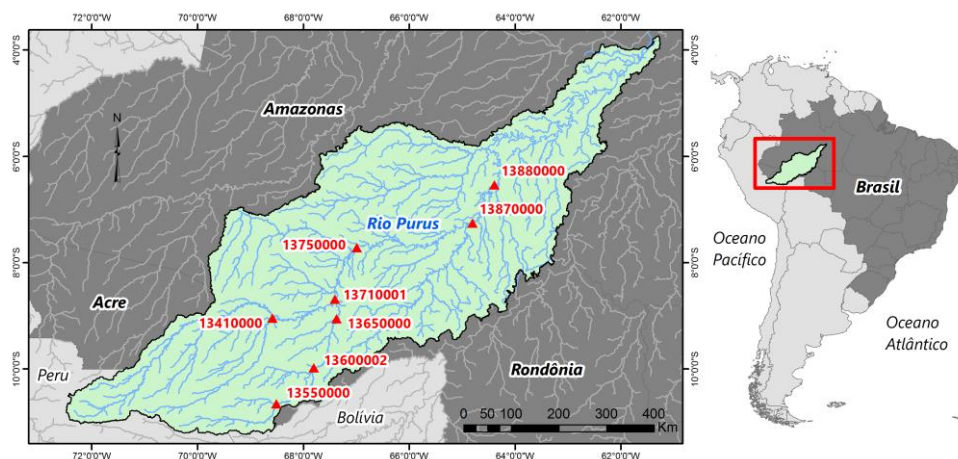


Figura 1. Localização da bacia do rio Purus, com as estações fluviométricas utilizadas.

2.2 Modelo 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 (Collischonn et al., 2007). Na versão atual, a bacia hidrográfica é dividida em minibacias, delimitadas a partir da análise de um MDE utilizando critérios topográficos e confluências de trechos de rio. Em cada minibacia é calculado o balanço hídrico vertical através do conceito de 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.

De forma alternativa, a propagação inercial de vazões também pode ser utilizada no MGB-IPH (Pontes et al., 2015), a qual considera atenuação da planície e efeitos de remanso. 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.

2.3 Pré-processamento, cálculo da área inundada e perfil de fundo do rio

Os dados de MDE foram obtidos do site do CGIAR (<http://srtm.csi.cgiar.org/>) e da Universidade de Bristol (<https://data.bris.ac.uk/data/dataset/10tv0p32gizt01nh9edcjzd6wado>) respectivamente para o SRTM e BareSRTM, ambos com resolução espacial de 90 m. Um procedimento de agregação espacial foi aplicado nos MDEs para gerar um *upscaling* de 90 para 450 m, visando reduzir ruídos aleatórios no SRTM conforme realizado de forma similar por Wilson et al. (2007) e sugerido por O’Loughlin et al. (2016). Posteriormente, uma sequência de etapas foi realizada conforme apresentado no fluxograma da Figura 2.

O pacote de ferramentas IPH-Hydro Tools (Siqueira et al. 2016) foi aplicado sobre o SRTM de 450 m para pré-processamento, o que inclui a remoção de depressões, derivação de direções de fluxo, extração e segmentação da rede de drenagem. Utilizou-se um limiar de 625 km² para delimitar o início da rede de drenagem, de maneira a compatibilizar com a resolução da grade de precipitação (descrita no próximo item). A rede foi segmentada em trechos de comprimento máximo (Δx) de 10 km para evitar erros de instabilidade na propagação inercial, cujo critério foi o mesmo de Paiva et al. (2011) para a simulação hidrodinâmica no rio Purus. Cada um dos trechos com comprimento fixo de 10 km foi relacionado a uma única minibacia no modelo, conforme descrito em Pontes et al. (2015).

Para determinar a curva cota-área em cada minibacia utilizou-se um procedimento baseado no modelo HAND (Rennó et al. 2008). Desta forma, foi inicialmente calculada a diferença de elevação entre os pixels do MDE (SRTM e BareSRTM) situados na planície e aqueles pertencentes à drenagem mais próxima, seguindo as direções de fluxo que foram obtidas durante o pré-processamento para o SRTM. Partindo-se do valor de HAND = 0 como elevação equivalente à calha cheia do rio, somou-se a área de todos os pixels com valor de HAND igual ou abaixo do analisado considerando incrementos verticais de 1 em 1 metro, dentro de uma mesma minibacia.

Na propagação inercial, adicionalmente deve ser definida a elevação de fundo do rio em cada minibacia, necessária para o cálculo da declividade da linha de água a cada intervalo de tempo. Entretanto, os ruídos existentes tanto no SRTM como no BareSRTM devem ser minimizados para suavizar declividades exageradas e, conseqüentemente, evitar instabilidades no modelo. Desta forma, foi calculada uma regressão linear sobre as elevações de cada trecho de rio, sendo que os coeficientes obtidos foram aplicados de maneira a definir um valor de elevação corrigido no ponto central do trecho analisado.

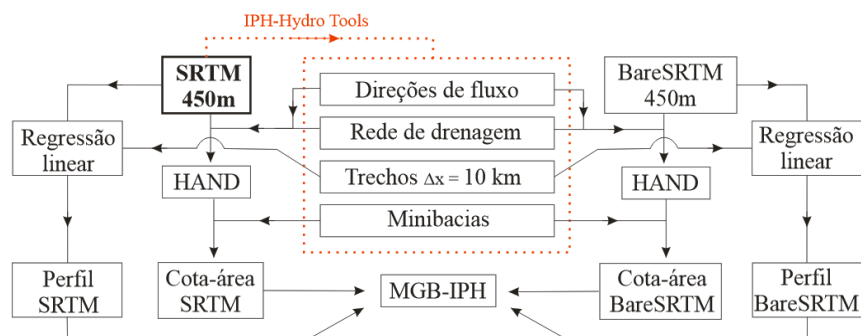


Figura 2. Fluxograma das etapas de geoprocessamento realizadas.

Após a simulação com o MGB-IPH e a obtenção do nível do rio em cada minibacia, a diferença entre este nível e a profundidade da calha correspondente equivale ao valor que deve ser inundado no modelo HAND. Um valor positivo desta diferença para um dado *pixel*, em um determinado intervalo de tempo, indica que o mesmo foi inundado.

2.4 Dados de entrada e simulação com o MGB-IPH

Como base de dados de precipitação utilizou-se o produto global *Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation* - MSWEP (Beck et al. 2016). Os dados do MSWEP foram adquiridos com resolução espacial de 0,25° e temporal de 3h, os quais foram posteriormente agregados para intervalo de tempo diário. Em relação às variáveis climatológicas, estas foram obtidas das médias mensais do *Climatic Research Unit - CRU Global Climate v.2* (New et al. 2002), elaboradas para os anos entre 1960-1990. Para definição das unidades de resposta hidrológica, informações de cobertura vegetal e tipo do solo foram extraídas diretamente do Mapa de Blocos da América do Sul (Fan et al. 2015), que é produzido a partir de levantamentos do projeto RADAMBrasil e da *Food and Agriculture Organization* - FAO. O coeficiente de Manning, bem como as relações geomorfológicas necessárias para definição da largura e profundidade dos rios foram retiradas do estudo de Paiva et al. (2011). Por fim, os dados de vazão observada para a calibração do modelo foram obtidos diretamente da plataforma HidroWeb, da ANA.

O modelo foi inicialmente ajustado de forma manual utilizando a propagação de Muskingum-Cunge para redução do custo computacional, conforme realizado por Pontes et al. (2015). Posteriormente, a versão do MGB-IPH com propagação inercial foi rodada para cada uma das relações de cota-área (SRTM e BareSRTM), adotando o mesmo conjunto de parâmetros obtido na etapa anterior.

2.5 Avaliação de desempenho do modelo

O desempenho do modelo foi avaliado através das métricas Kling-Gupta-Efficiency - KGE (Kling et al. 2012), Delay Index - DI (Paiva et al. 2013) e o erro percentual de amplitude de níveis - A' , sendo a amplitude definida como a diferença entre os percentis 95% e 5% da série (Paiva et al. 2013). Valores desejados de KGE e DI são, respectivamente, 1 (perfeita predição) e 0 (sem defasagem).

As extensões de área inundada pelo modelo foram posteriormente comparadas ao mapa de Hess et al. (2015). Adicionalmente, foram utilizadas tabelas de contingência para o cálculo das métricas Threat Score (TS), Taxa de Alarme Falso (FAR), Razão de áreas Inundadas Não-Detectadas (MFR) e Viés (BIAS), as quais foram adotadas por Paiva et al. (2013) na avaliação de áreas inundadas na região central da Amazônia. Os valores ótimos destas métricas correspondem a $TS = 1$ (100% de acurácia), $FAR = 0$ (0% de falso alarme), $MFR = 0$ (0% de não-detecção ou 100% de detecção das áreas observadas) e $BIAS = 1$ (valores > 1 indicam superestimativa e menores que a unidade subestimativa).

3. Resultados e Discussão

A simulação com o MGB-IPH ocorreu para o período entre 01/01/2000 e 31/12/2007, com os resultados apresentados na Tabela 1. Os valores de KGE foram na sua grande maioria superiores a 0,8 e com DI próximo de 0 (sem defasagem), sendo que praticamente não houveram diferenças entre o SRTM e BareSRTM para estes índices nos postos fluviométricos situados a montante de Lábrea. Por outro lado, a amplitude dos níveis foi subestimada na maior parte dos postos da bacia, especialmente naqueles com menor área de drenagem e situados na margem direita do rio Purus (A' de -40% a -63%). Esta subestimativa pode estar associada à relação geomorfológica utilizada para obtenção de larguras e profundidades do canal, enquanto que discrepâncias entre as duas simulações se devem às diferenças no perfil de fundo do rio bem como na relação cota-área.

Tabela 1. Resultados de calibração do modelo MGB-IPH, para o período entre os anos de 01/01/2000 e 31/12/2007.

| Código | Nome da estação | Área (km ²) | MGB+SRTM | | | MGB+BareSRTM | | |
|----------|----------------------|----------------------------|----------|-----|--------|--------------|----|--------|
| | | | KGE | DI | A' (%) | KGE | DI | A' (%) |
| 13410000 | Seringal da Caridade | 63.100 | 0,87 | 0 | -21,2 | 0,86 | 0 | -18,8 |
| 13550000 | Xapuri | 8.270 | 0,78 | -1 | -63,2 | 0,78 | -1 | -62,2 |
| 13600002 | Rio Branco | 23.500 | 0,87 | -1 | -41,3 | 0,87 | -1 | -62,4 |
| 13650000 | Florianópolis | 34.400 | 0,82 | -1 | -57,9 | 0,82 | 0 | -59,7 |
| 13710001 | Valparaíso Montante | 105.000 | 0,85 | 0 | -7,4 | 0,85 | 0 | -4,5 |
| 13750000 | Seringal Fortaleza | 154.000 | 0,93 | 0 | -23,1 | 0,93 | 0 | -26,6 |
| 13870000 | Lábrea | 226.000 | 0,88 | -7 | -0,5 | 0,95 | +3 | -11,9 |
| 13880000 | Canutama | 236.000 | 0,84 | -11 | 5,7 | 0,96 | +5 | -8,9 |

Já nas estações de Lábrea e Canutama, nota-se uma melhora na concordância do modelo com o uso do BareSRTM, onde os valores de KGE ficaram em torno de 0,95. Além disso, os hidrogramas simulados com a cota-área do SRTM ficaram adiantados em mais de uma semana (DI = -7 a -11), ao passo que a utilização do BareSRTM resultou em um atraso da onda de cheia entre 3 e 5 dias. Nestes pontos, o gradiente da linha de água é caracterizado por uma declividade muito baixa e os efeitos de atraso e atenuação da planície são mais pronunciados, o que explica as diferenças encontradas entre as simulações.

Para destacar estas diferenças, na Figura 3 foram apresentadas as vazões e os níveis do rio Purus simulados para as estações fluviométricas de Valparaíso Montante e Canutama, caracterizados respectivamente por uma baixa e alta influência da planície. Para a estação Valparaíso Montante a forma dos hidrogramas e a magnitude dos picos é similar entre o SRTM e o BareSRTM, porém na estação de Canutama os picos são bastante atenuados e os hidrogramas passam a ter uma ondulação suave quando o BareSRTM é utilizado. Apesar disso, o nível do rio sobe mais lentamente que o observado nesta estação, o que indica que a área inundada na relação cota-área possa estar sendo superestimada para níveis mais baixos.

Na Tabela 2 estão apresentadas as métricas calculadas com base na tabela de contingência, enquanto que na Figura 4 é mostrado o mapa de erros para a extensão de áreas inundadas para ambos períodos de águas baixas e altas. Os valores de TS representam a acurácia ponderando os acertos e erros do modelo, e verifica-se que na simulação com o BareSRTM este valor ficou em 48% para o período de águas altas. De acordo com o resultado do MFR para o mesmo período (0,36) a correta detecção de áreas inundadas foi de 64%, ao mesmo tempo em que o viés, próximo à unidade, indica que a área total estimada foi praticamente igual à observada. O melhor desempenho do modelo ocorre para os últimos 1200 km da bacia, ao passo que áreas mais a montante dificilmente são detectadas como

inundadas. Entretanto, as taxas de falso alarme foram consideráveis situando-se na faixa de 35%, conforme pode ser verificado de maneira mais expressiva entre as estações fluviométricas de Lábrea e Canutama (região central da Figura 4).

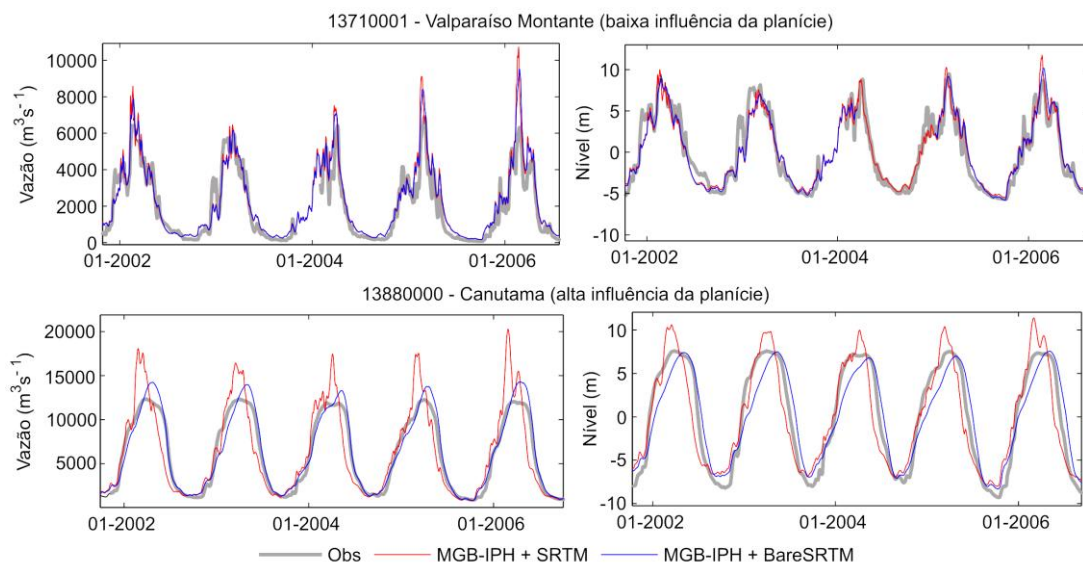


Figura 3. Efeito da influência de planície sobre as vazões e níveis, nas estações fluviométricas de Valparaíso Montante (baixa influencia) e Canutama (alta influencia).

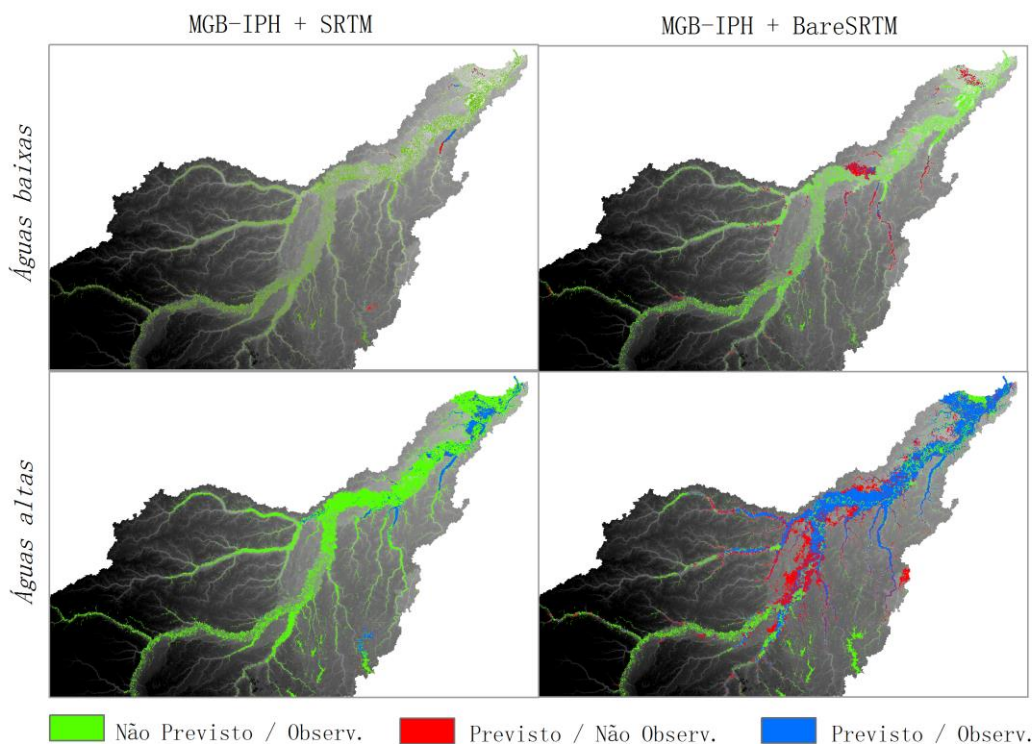


Figura 4. Mapa de erros na extensão de áreas inundadas, simuladas para a região baixa da bacia do Purus. Resultados são comparados ao mapa de Hess et al. (2015) elaborado para o período de águas baixas (out-nov) e águas altas (mai-jul).

No caso do SRTM durante o período de águas altas, apesar de uma baixa FAR (0,1) os valores de TS e BIAS ficaram muito baixos (cerca de 10%) ao mesmo tempo que o MFR ficou elevado (0,89). Estes resultados demonstram uma grande subestimativa e incapacidade

de representar áreas inundadas nesta região, conforme pode ser claramente identificado no mapa de erros da Figura 4.

Tabela 2. Desempenho do modelo na simulação de extensão de áreas inundadas

| MDE | Águas baixas | | | | Águas altas | | | |
|----------|--------------|------|------|------|-------------|------|------|------|
| | TS | FAR | MFR | BIAS | TS | FAR | MFR | BIAS |
| SRTM | 0.01 | 0.52 | 0.99 | 0.03 | 0.11 | 0.10 | 0.89 | 0.12 |
| BareSRTM | 0.06 | 0.70 | 0.93 | 0.24 | 0.48 | 0.35 | 0.36 | 0.98 |

Já no período de águas baixas, ambas simulações com o SRTM e o BareSRTM tiveram um desempenho ruim, com grandes subestimativas. Além disso, no caso do BareSRTM, tanto a acurácia como a capacidade de detecção diminuem drasticamente em relação ao período de águas altas, com valores próximos de 6%, sendo que as áreas identificadas como inundadas são na maior parte estimadas incorretamente (FAR= 0,7). Isso é explicado, em grande parte, devido à planície no MGB-IPH ser representada através de um modelo simples de armazenamento, onde toda a água que vai para a planície no período de águas altas retorna para o rio quando o nível do mesmo baixa. Contudo, durante o processo de secagem, algumas áreas da planície ficam desconectadas do canal principal devido à existência de depressões no terreno, ou seja, formando lagos marginais e que sofrem lentamente processos de infiltração e evaporação (Wilson et al. 2007). Sendo assim, um desempenho ruim para a representação espacial de áreas inundadas é esperado para o período de águas baixas, independentemente do MDE utilizado.

4. Conclusões

Neste trabalho foi avaliado o uso do Bare-Earth SRTM para simulação hidrodinâmica de rios com planícies em regiões densamente vegetadas, utilizando a bacia do rio Purus como estudo de caso. Em geral, uma boa representação das vazões e no timing da onda de cheia foram obtidas, com vantagens em relação ao SRTM original sobretudo em locais com significativa influência da planície. Contudo, a amplitude dos níveis teve uma grande tendência de subestimativa, relacionada principalmente a erros na definição de largura e profundidade no canal.

A simulação da extensão de áreas inundáveis foi avaliada a partir de mapas derivados de sensoriamento remoto. Verificou-se que no período de águas altas o conjunto MGB-IPH + Bare-Earth SRTM foi capaz de estimar a extensão total de áreas inundadas com boa detecção e relativa acurácia, embora mantendo uma parcela razoável de incorreta predição. Já no período de águas baixas as áreas inundadas foram bastante subestimadas e com erros elevados, o que foi em grande parte atribuído a simplificações do modelo hidrológico utilizado para representação da planície. Outros fatores, como erros no Bare-Earth SRTM e incertezas nas informações utilizadas para o cálculo do HAND também podem ter influenciado no desempenho do modelo, as quais devem ser melhor avaliadas como objetivo de outros estudos.

Por fim, conclui-se que o Bare-Earth SRTM tem potencial para a simulação de rios com planícies sob áreas densamente vegetadas, representando uma vantagem para a aplicação em outras bacias da região Amazônica.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa e Qualificação Superior (CNPQ) pela concessão da bolsa ao longo da realização deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- Baugh, C.; Bates, P.D.; Schumann, G.; Trigg, M.A. SRTM vegetation removal and hydrodynamic modeling accuracy. **Water Resources Research**, v. 49, p. 5276-5289, 2013.
- Beck, H.E.; van Dijk, A.I.J.M.; Levizzani, V.; Schellekens, J.; Miralles, D.G.; Martens, B.; de Roo, A.D. MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, doi:10.5194/hess-2016-236, in review, 2016.
- Berry, P.A.M.; Garlick, J.D.; Smith, R.G. Near-global validation of the SRTM DEM using satellite radar altimetry. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, n. 1, p. 17-27, 2007.
- Carabajal, C.C.; Harding, D.J. ICESat validation of SRTM C-band Digital Elevation Models. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 22, L22S01, 2005, doi:10.1029/2005GL023957.
- Collischonn, W.; Allasia, D.; da Silva, B.C.; Tucci, C.E.M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 5, p. 878-895, 2007.
- Fan, F.M.; Buarque, D.C.; Pontes, P.R.M.; Collischonn, W. 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. Disponível em: http://www.evolvedoc.com.br/sbrh/detalhes-351_um-mapa-de-unidades-de-resposta-hidrologia-para-a-america-do-sul. Acesso em: 18/10/2016.
- Hess, L.L.; Melack, J.M.; Affonso, A.G.; Barbosa, C.C.F., Gastil-Buhl, M.; Novo, E.M.L.M. **LBA-ECO LC-07 Wetland Extent, Vegetation, and Inundation: Lowland Amazon Basin**. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1284>, Acesso em: 18/10/2016.
- Kling, H.; Fuchs, M.; Paulin, M. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. **Journal of Hydrology**, v. 424-425, p. 264-277, 2012.
- New, M.; Lister, D.; Hulme, M.; Makin, I. A high-resolution data set of surface climate over global land areas. **Climate Research**, v. 21, p. 1-25, 2002.
- O’Loughlin, F.; Paiva, R.C.D.; Durand, M.; Alsdorf, D.E.; Bates, P.D. A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product. **Remote Sensing of Environment**, v. 182, p. 49-59, 2016.
- Paiva, R.C.D.; Collischonn, W.; Tucci, C.E.M. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. **Journal of Hydrology**, v. 406, n. 3-4, p. 170-181, 2011.
- Paiva, R.C.D.; Collischonn, W.; Buarque, D.C. Validation of a full hydrodynamic model for large-scale hydrologic modelling in the Amazon. **Hydrological Processes**, v. 27, n. 3, p.333-346, 2013.
- Pontes, P.R.M.; Collischonn, W.; Fan, F.M.; Paiva, R.C.D.; Buarque, D.C. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 888-904, 2015.
- Rennó, C.D., Nobre, A.D., Cuartas, L.A., Soares, J.V., Hodnett, M.G., Tomasella, J., Waterloo, M. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM; mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 3469–3481, 2008.
- Siqueira, V.A.; Fleischmann, A.S.; Jardim, P.F.; Fan, F.M.; Collischonn, W. 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, 2016.
- Wilson, M.; Bates, P.D.; Alsdorf, P.; Bruce F.; Horrit, M.; Melack, J.; Forsberg, B.; Horrit, M.; Melack, J.; Frappart, F.; Famiglietti, J. Modelling large-scale inundation of Amazonian seasonally flooded wetlands. **Geophysical Research Letters**, v. 34, L15404, 2007. doi:10.1029/2007GL030156.