

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

MAPEAMENTO DE MANCHAS DE INUNDAÇÃO UTILIZANDO MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA EM ESCALA LOCAL, REGIONAL E CONTINENTAL

Maria Eduarda Pereira Alves¹; Fernando Mainardi Fan²; Vinícius Alencar Siqueira³; Ayan Santos Fleischmann⁴; Leonardo Laipelt⁵; Gabriel Matte⁶; João Paulo Fialho Brêda⁷; Rodrigo Cauduro Dias de Paiva⁸ & Alexandre Abdalla Araujo⁹

Palavras-Chave – Áreas inundadas; modelagem hidrodinâmica, sensoriamento remoto.

RESUMO

A delimitação de áreas inundadas é uma informação importante para a gestão territorial e previsão de impactos ambientais. A delimitação da cheia observada pode ser feita através de imagens de sensoriamento remoto (SR), de descritores do terreno (como o uso do HAND), de modelagem hidrodinâmica detalhada ou modelagem hidrodinâmica de grande escala. Visto estas diversas abordagens com diferentes graus de complexidade e escalas espaciais, este trabalho buscou avaliar abordagens de estimativas de áreas inundadas, através de técnicas de modelagem em escala local, regional e continental, em comparação com observações de SR. Para isso, foi utilizado o modelo MGB em suas aplicações regional, continental e continental com *downscaling*. Além do MGB, também foi utilizada a metodologia HAND, aplicada em escala local e global. Essas metodologias foram comparadas a imagens de satélite e foram calculadas métricas de desempenho, buscando identificar as capacidades e limitações dos modelos estudados. A partir dos resultados se observou que o modelo MGB apresentou resultados mais satisfatórios que o uso de ferramentas mais simplificadas, como o HAND em escala local e global. O MGB regional e o continental se aproximaram nos resultados em relação a representação das manchas de inundação selecionadas para estudo, mostrando uma relevância regional para o MGB continental.

1) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS), duda.epa@gmail.com

2) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS), fernando.fan@ufrgs.br

3) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS), vinisiquera@gmail.com

4) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS), ayan.fleischmann@gmail.com

5) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS), leolaipelt@gmail.com

6) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS), riosmatte@hotmail.com

7) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS), joaopaulofb@gmail.com

8) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS), rodrigocdpaiva@gmail.com

9) Agência Nacional de Águas (ANA), alexandre.araujo@ana.gov.br

INTRODUÇÃO

Áreas inundadas ficam submersas em função da cheia de um rio, onde a água ocupa a região da planície de inundação. As inundações são consideradas desastres naturais quando a sua ocorrência causa danos para a sociedade, que muitas vezes estão alocadas nas áreas inundáveis. Assim, torna-se fundamental para evitar estes desastres, o conhecimento da dinâmica e da extensão das áreas inundáveis dos rios.

Neste sentido, a obtenção da mancha de inundação observada pode ser feita através de levantamentos de campo, imagens de sensoriamento remoto (SR), descritores geomorfológicos do terreno, como o *Height Above the Nearest Drainage* (HAND) (Rennó *et al.* 2008), ou com modelos hidrodinâmicos de diferentes complexidades. Cada técnica utilizada na estimativa da mancha de inundação possui vantagens e desvantagens.

No caso da modelagem hidrodinâmica, foco do presente trabalho, são aplicadas equações matemáticas na modelagem da propagação da onda de cheias para a obtenção da área inundada. Nessa linha, existem *softwares* que podem ser aplicados para delimitação da mancha de inundação. Alguns são mais utilizados em estudos de escala local, em trechos de rios, como é o caso do HEC-RAS (USACE, 2010), sendo uma ferramenta consolidada em estudos de inundação (Adnan & Atkinson, 2012; Coutinho M. M., 2015; Ahmad *et al.*, 2016).

Para grandes bacias, existem particularidades quando se trata do mapeamento de áreas inundadas. Isso se deve aos diversos processos atuando em conjunto para a geração da inundação, como chuvas com Tempos de Retornos (TRs) diferentes ocorrendo na bacia, aportes de água por afluentes, evapotranspiração, infiltração, efeitos de maré e do vento sobre a lâmina de água.

Neste sentido, um modelo muito aplicado na América do Sul é o modelo MGB (Modelo de Grandes Bacias). O MGB é um modelo hidrológico-hidrodinâmico para aplicações em grandes áreas, que representa o processo de transformação de chuva em vazão, com embasamento físico e de forma semi-distribuída na bacia hidrográfica (Pontes *et al.*, 2017). Este modelo tem sido aplicado com sucesso em diversos estudos (Paiva, *et al.*, 2013; Fan & Collischonn, 2014; Fleischmann, *et al.*, 2015; Siqueira, *et al.*, 2017; Pontes, *et al.*, 2017; Lopes, *et al.*, 2018).

Apesar da ampla aplicação em mapeamento de manchas de inundação, estudos que tenham comparado a capacidade de simular áreas inundadas entre modelos simplificados e hidrodinâmicos, em diferentes escalas, e ainda validados por imagens de SR são pouco encontrados. Portanto, com este trabalho buscou-se avaliar o desempenho do modelo MGB regional em relação a outras ferramentas de modelagem locais e continentais, mais detalhadas ou simplificadas. Para isso, foram

comparadas aplicações do modelo MGB, em escala regional, continental e em escala continental com *downscaling*, e aplicações do método HAND em escala local e global. Esses métodos foram utilizados para simulação de inundações ocorridas no rio Uruguai (RS). Para validação, foram utilizadas imagens das inundações observadas, obtidas por sensoriamento remoto.

Este trabalho se insere no contexto do projeto “Avaliação de estimativas de áreas inundadas do modelo MGB”, resultante da Cooperação em Tecnologias para Análises Hidrológicas em escala Nacional, entre o Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS) e a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), para o desenvolvimento e aplicação de ferramentas e técnicas para estudo de hidrologia em escala nacional no Brasil.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizada a comparação de três versões do modelo MGB, uma versão em escala regional, outra em escala continental (Siqueira et al., 2018), e a terceira em escala continental com *downscaling*; e de duas aplicações do método HAND, uma de escala local (Mengue et al., 2016) e outra de escala global (Donchyts et al., 2016). A partir desses métodos, foram simuladas as manchas de inundação de cheias específicas, ocorridas no rio Uruguai (RS) e os resultados foram comparados com as cheias obtidas a partir de imagens de satélite.

Área de estudo

No contexto das recentes ocorrências de inundações no estado do Rio Grande do Sul, os municípios localizados às margens do Rio Uruguai têm sido atingidos frequentemente por episódios de cheia. Entre os anos de 1980 e 2005 foram registrados 41 eventos nos municípios brasileiros que margeiam o Rio Uruguai (Righi & Robaina, 2010). Portanto, a área de estudo deste trabalho compreende a extensão do rio Uruguai., sendo apresentada na Figura 1 .

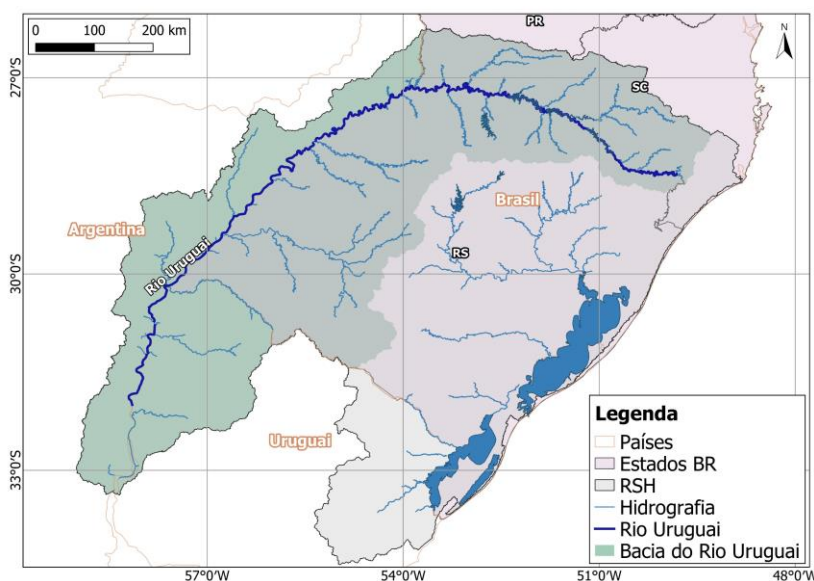


Figura 1. Localização do rio Uruguai – área de estudo.

Modelos utilizados

Para a realização deste trabalho foram utilizadas cinco metodologias. Entre elas, a aplicação do MGB, o qual é um modelo hidrológico-hidrodinâmico semi-distribuído com propagação unidimensional de vazões, e que simula a bacia hidrográfica subdividindo-a em minibacias. O MGB foi aplicado em escala regional, continental e continental *downscaling*.

O MGB regional representa uma atualização do modelo utilizado por Alves *et al.* (2019), em que o período de calibração e validação foi estendido, sendo calibrado para o período de 1990 a 2010 e validado para o período de 2011 a 2020. Para comparação, foi utilizado o MGB continental MGB-SA, o qual corresponde à aplicação do MGB na América do Sul, desenvolvido por Siqueira *et al.* (2018). O modelo foi calibrado para o período de 1990 a 2010.

Também foi utilizada uma versão do MGB continental, chamada de MGB-SA *Downscaling*, onde o resultado de mapa de inundação do MGB-SA com uma grade mais grosseira (~500 m) foi transformado para uma grade mais refinada (90 m), detalhando as áreas inundadas a nível local. As manchas foram geradas através do reprocessamento das áreas inundadas do modelo de 500 m (MGB-SA) para 90 m, com base na conservação de volumes extravasados da calha do rio para a planície.

Além das aplicações do modelo MGB, foram utilizadas duas abordagens do método HAND, uma em escala local e outra de escala global. O HAND em escala local foi preparado por Mengue *et al.* (2016). Os autores testaram diversas configurações do modelo HAND para representar a cheia de 1997 no rio Uruguai, em Itaqui. Este HAND foi preparado a partir do MDE SRTM de 90m e só foi utilizado para análise da cheia de outubro de 1997. O modelo HAND em escala global foi preparado por Donchyts *et al.* (2016). Os autores rodaram o processamento do HAND para o globo terrestre a partir do SRTM de 30m e o disponibilizaram através do *Google Earth Engine* (GEE).

Dados observados

Para validação das simulações realizadas, foram utilizadas imagens de satélites como verdades de campo. Para isso, foram selecionadas cheias históricas do rio Uruguai, a partir das séries de vazões das estações fluviométricas da ANA, entre os anos de 1990 e 2020. Após seleção das cheias, foi analisado se haviam disponíveis imagens de satélite nessas datas, sem interferências de nuvens. Os satélites avaliados foram o Landsat, Sentinel, CBERS, PlanetScope e RapidEye. As cheias para as quais foi possível obter imagens de satélite com qualidade para processamento são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Datas das imagens obtidas em períodos de cheia.

Data	Satélite	Data	Satélite	Data	Satélite	Data	Satélite
08/06/1990	LANDSAT 5	23/10/2002	LANDSAT 7	02/06/2017	LANDSAT 8	11/06/2017	LANDSAT 8
17/06/1990	LANDSAT 5	05/12/2009	LANDSAT 5	02/06/2017	SENTINEL 1 GRD	12/06/2017	PlanetScope
26/10/1997	LANDSAT 5	05/07/2014	LANDSAT 8	11/06/2017	PlanetScope	22/01/2019	CBERS

Para cada cheia foi extraída a mancha de inundação a partir o índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI – *Normalized Difference Water Index*) e utilizada para validação das diferentes metodologias na estimativa de áreas inundadas.

Métricas de comparação

Para comparação dos resultados das manchas de inundação dos diferentes modelos aplicados foram utilizadas análises estatísticas. A extensão da inundação foi validada através da taxa de acerto H, a taxa de falso alarme F e o índice crítico de sucesso C (Hoch & Trigg, 2019), representados nas equações (1), (2) e (3), respectivamente.

$$H = \frac{N_{sim} \cap N_{obs}}{N_{obs}} \quad (1)$$

$$F = \frac{N_{sim}/N_{obs}}{N_{sim} \cap N_{obs} + N_{sim}/N_{obs}} \quad (2)$$

$$C = \frac{N_{sim} \cap N_{obs}}{N_{sim} \cup N_{obs}} \quad (3)$$

Onde N_{obs} e N_{sim} indicam o número de células inundadas de acordo com a observação e da simulação, respectivamente.

Desse modo, os índices H, F e C foram determinados para cada mapa de inundação com relação à extensão da inundação observada das imagens de satélite.

RESULTADOS

Todos os resultados gerados pelas metodologias foram comparados com a delimitação da imagem obtida pelo sensor remoto. Os resultados foram analisados em termos de capacidade de representação da cheia, a partir do cálculo de métricas como taxa de acerto (H), taxa de falso-alarme (F) e índice crítico (C).

É conveniente ressaltar que pequenas áreas isoladas, que não são parte da planície de inundação dos rios, foram mapeadas como áreas inundadas a partir da imagem de satélite. Estas áreas correspondem aos açudes, pequenos lagos e reservatórios existentes. Não se espera e nem se pretende que os métodos utilizados sejam capazes de mapear estas pequenas áreas.

As análises foram divididas e são apresentadas a seguir para as diferentes datas das inundações. A mancha em azul representa a mancha modelada pelo método testado (MGB regional, MGB continental original e downscaling, HAND global e local), e os polígonos pretos representam as áreas inundadas delimitadas pela imagem do satélite. São apresentados os resultados das análises das cheias ocorridas em 08/06/1990 e 26/10/1997 no rio Uruguai.

Oito de junho de 1990

Na Figura 2 são apresentados os resultados obtidos para cada um dos experimentos testados, sendo MGB Regional, MGB-SA, MGB-SA *downscaling* e HAND global, para esta cheia.

O resultado do cálculo das métricas é apresentado na Tabela 2. Todas as aplicações foram comparadas com a mancha observada pelo satélite Landsat 5.

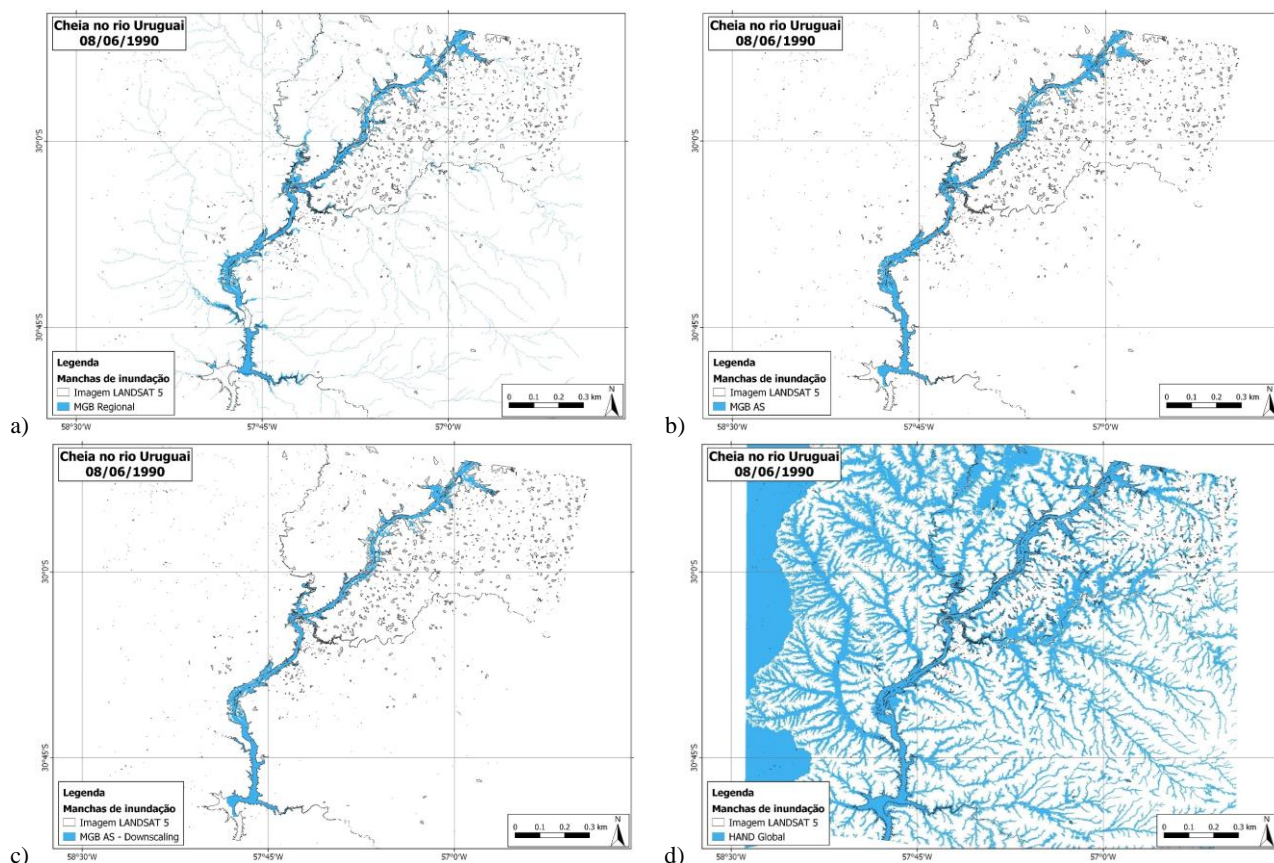


Figura 2. Metodologias em comparação com a imagem de satélite para a cheia de junho de 1990.

Tabela 2. Métricas de desempenho para análise das extensões de inundação obtidas.

Mancha	H	F	C
MGB REG	0.496	9.87E-06	0.357
MGB SA	0.544	5.52E-06	0.544
MGB SA Downscaling	0.506	5.52E-06	0.506
HAND Global	0.888	6.57E-05	0.083

Pode-se observar que, para o índice H que representa o quanto da mancha observada está inundada pela mancha simulada, os modelos que apresentaram melhor desempenho foram o HAND global e o MGB SA. Entretanto, é importante analisar as três métricas em conjunto (H, F e C). Em relação à taxa de falso alarme F, os modelos que melhor representaram a mancha observada foram o MGB-SA *downscaling* e o MGB-SA, indicando que foram os modelos que menos apresentaram áreas alagadas onde não eram identificados locais inundados pela imagem de SR. Analisando o índice crítico C, verifica-se que os modelos que representaram melhor a extensão da inundação observada foram os modelos MGB-SA seguido pelo MGB-SA *downscaling*. Portanto, de acordo com as

métricas, o modelo que melhor representou a inundação ocorrida no rio Uruguai em 08/06/1990 foi o MGB continental (MGB-SA).

Vinte e seis de outubro de 1997 no rio Uruguai

Para esta inundação, também foram comparados os resultados de uma aplicação de HAND local, apresentado no estudo de Mengue *et al.* (2016). Na Figura 3 são apresentados os resultados obtidos para cada um dos experimentos.

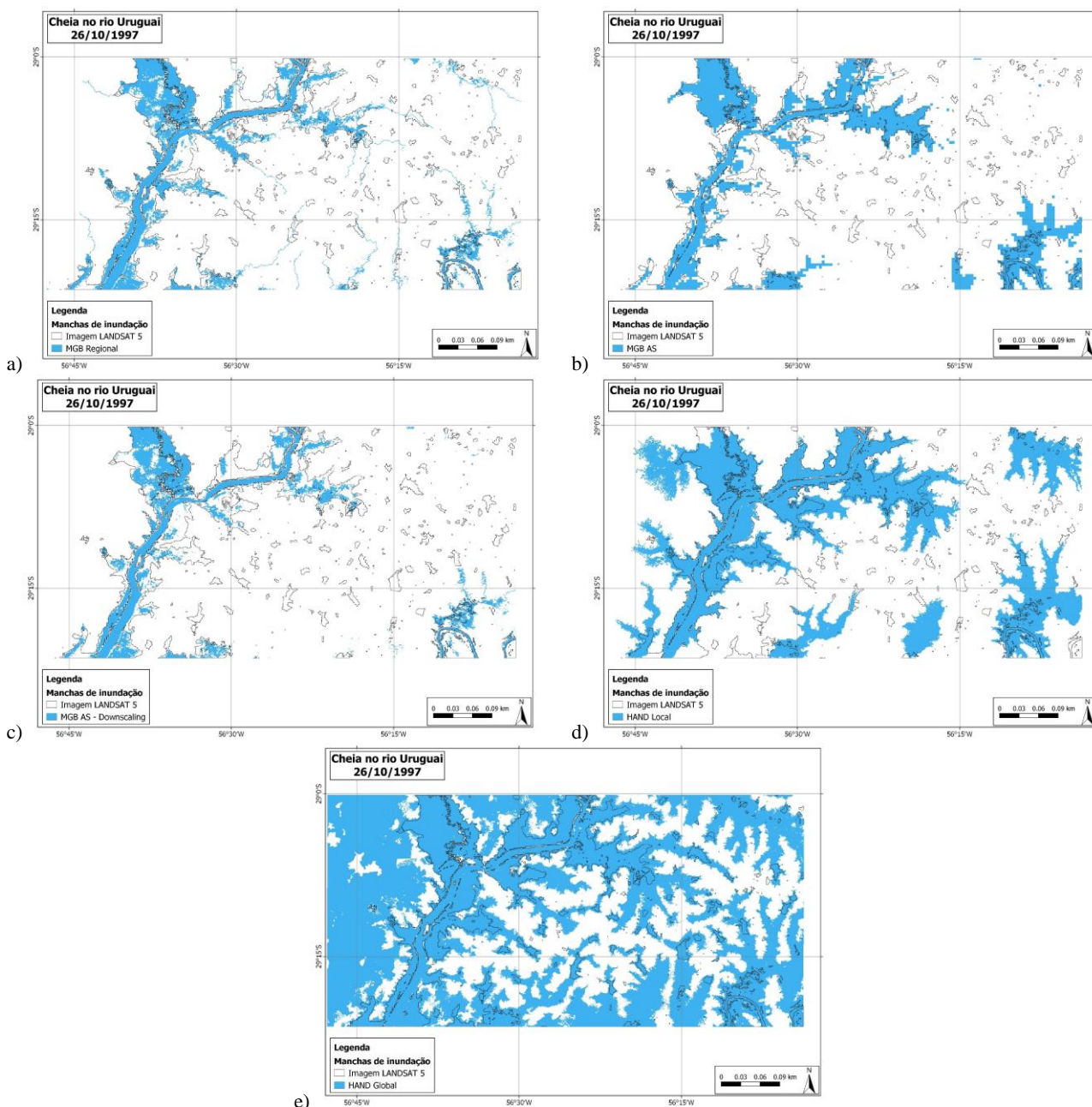


Figura 3. Metodologias em comparação com a imagem de satélite para a cheia de outubro de 1997.

O resultado do cálculo das métricas é apresentado na Tabela 3. Todas as aplicações foram comparadas com a mancha observada pelo satélite Landsat 5.

Tabela 3. Métricas de desempenho para análise das extensões de inundação obtidas.

Mancha	H	F	C
MGB REG	0.512	1.856E-06	0.464
MGB SA	0.609	2.180E-06	0.487
MGB SA Downscaling	0.427	1.743E-06	0.404
HAND Local	0.846	3.282E-06	0.423
HAND Global	0.976	5.623E-06	0.273

Pode-se observar que para o índice H, os modelos que melhor representaram foi o HAND Global e o MGB-SA. Em relação à taxa de falso alarme F, os modelos que melhor representaram a mancha observada foram o MGB-SA *downscaling* e o MGB Regional. Analisando o índice crítico C, verifica-se que os modelos que representaram melhor a extensão da inundação observada foram os modelos MGB-SA seguido pelo MGB regional. Portanto, de acordo com as métricas, o modelo que melhor representou a inundação ocorrida no rio Uruguai em 26/10/1997 foi o MGB continental (MGB-SA).

Para cada mancha obtida por SR apresentada anteriormente (Tabela 1) foram calculadas as métricas e analisadas as capacidades dos modelos em representar as cheias. Assim, a Figura 4 apresenta o *ranking* de representação das manchas. Como o HAND local foi comparado em apenas uma mancha (26/10/1997 – rio Uruguai), ele não foi considerado nesta análise.

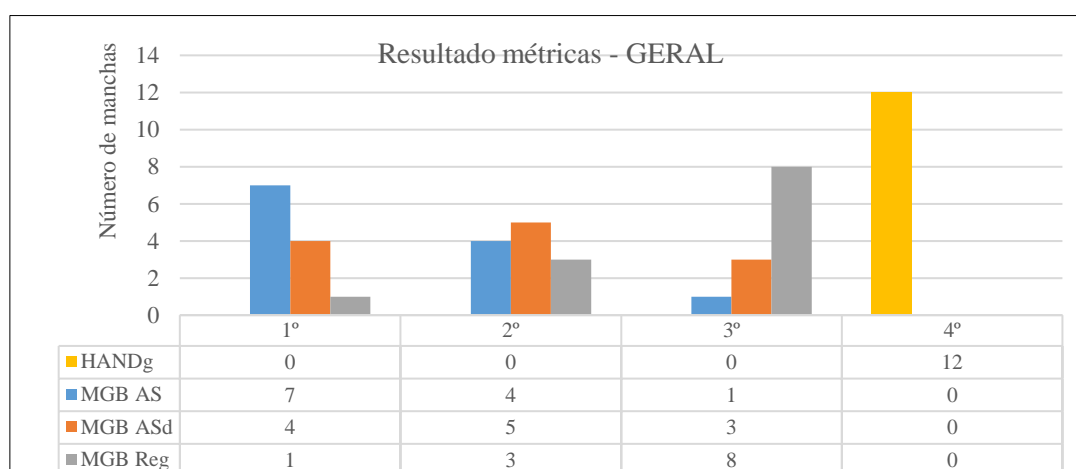


Figura 4. Resultado das simulações e comparações com a imagem observada da inundação.

Observa-se, a partir da Figura 4, que o modelo MGB continental se destaca nas posições 1° e 2°, tanto na versão original quanto na *downscaling*. O MGB regional apresenta maior concentração na 3ª posição. Já o HAND global representou de maneira menos satisfatória as inundações selecionadas.

Entretanto, observou-se que para muitas manchas simuladas a diferença no valor absoluto das métricas entre os métodos não era tão significativa. Assim, avaliou-se também os valores médios e os desvios padrões apresentados para o índice crítico C entre os resultados das comparações. A Tabela 4 apresenta esses valores para cada metodologia de simulação.

Tabela 4. Resultados médios e desvio padrão obtidos para os valores de índice crítico (C).

Metodologia	Média índice C	Desvio padrão índice C
HAND Global	0.194	0.119
MGB SA	0.397	0.150
MGB SA Downscaling	0.385	0.158
MGB Regional	0.355	0.156

Observa-se, a partir dos valores médios do índice crítico C que, como apresentado também na Figura 4, o MGB-SA apresenta um valor maior, seguido pelo MGB-SA *downscaling*, MGB regional e HAND global. Entretanto, nota-se que os valores médios do índice C entre as simulações com o MGB (regional e continental *downscaling*) são da mesma ordem de grandeza do modelo continental. Já em relação ao HAND global é apresentado um distanciamento entre os valores médios.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após as comparações e análises realizadas entre os modelos MGB Regional, o MGB-SA (original e *downscaling*), e a utilização do HAND, e após as validações com manchas de SR e cálculo de métricas de desempenho, foram levantadas as seguintes conclusões:

- O MGB (em todas as versões) forneceu resultados mais acurados que a metodologia de mapeamento do HAND global de fácil acesso;
- O MGB regional e as versões do MGB continental forneceram resultados de acurácia, em geral, semelhantes em termos de valor médio do índice C.
- A acurácia similar do modelo continental em comparação com o regional, em alguns casos até melhor, ocorreu mesmo com uma discretização espacial menos detalhada e com um desempenho em termos de métricas de avaliação da calibração pior. Isto sugere que a qualidade de boas simulações de áreas inundadas é dependente de outros fatores que vão além da calibração. Esses fatores podem ser: representação adequada da geometria da calha dos rios, modelo digital de elevação das planícies, ou desempenho do modelo para simulação de níveis.
- O método de *downscaling* do modelo continental produziu resultados com padrão espacial mais realístico (em função do menor pixel), porém não necessariamente melhores no mapeamento de áreas inundadas.

REFERÊNCIAS

- ADNAN, N., & ATKINSON, P. M. (2012). *Remote Sensing of River Bathymetry for Use in Hydraulic Model Prediction of Flood Inundation*. IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and its Applications, 159-163.
- AHMAD, H. F., ALAM, A., BHAT, M. S., & AHMAD, S. (2016). *One Dimensional Steady Flow Analysis Using HECRAS – A case of River Jhelum, Jammu and Kashmir*. European Scientific Journal, 340-350.

- COUTINHO, M. M. (2015). *Avaliação Do Desempenho Da Modelagem Hidráulica Unidimensional E Bidimensional Na Simulação De Eventos De Inundação Em Colatina/ES*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG.
- DONCHYTS, G., WINSEMIUS, H., SCHELLEKENS, J., ERICKSON, T., GAO, H., SAVENIJE, H., & GIESEN, N. V. (2016). *Global 30 m Height Above the Nearest Drainage*. Proceedings of the EGU General Assembly, 17–22 .
- FAN, F. M., & COLLISCHONN, W. (2014). *Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica*. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 243-254.
- FLEISCHMANN, A. S., SIQUEIRA, V. A., COLLISCHONN, W., & FAN, F. M. (2015). *Desenvolvimento Do Módulo De Reservatórios Do Modelo Hidrológico MGB-IPH*. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (p. PAP019961). Porto Alegre - RS: ABRH.
- HOCH, J., & TRIGG, M. A. (2019). *Advancing global flood hazard simulations by improving comparability, benchmarking, and integration of global flood models*. Environmental Research Letters.
- LOPES, V. A., FAN, F. M., PONTES, P. R., SIQUEIRA, V. A., COLLISCHONN, W., & MARQUES, D. D. (2018). *A first integrated modelling of a river-lagoon large-scale hydrological system for forecasting purposes*. Journal of Hydrology, 177-196.
- MENGUE, V. P., SCOTTÁ, F. C., SILVA, T. S., & FARINA, F. (2016). *Utilização do Modelo HAND para mapeamento das áreas mais suscetíveis à inundação no Rio Uruguai*. Pesquisas em Geociências, 41-53.
- PAIVA, R., BUARQUE, D., COLLISCHONN, W., BONNET, M., FRAPPART, F., CALMANT, S., & MENDES, C. (2013). *Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin*. Water Resource Research, 1226-1243.
- PONTES, P., COLLISCHONN, W., FAN, F., PAIVA, R., & BUARQUE, D. (2015). *Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação*. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 888 - 904.
- PONTES, P., FAN, F., FLEISCHMANN, A., PAIVA, R., BUARQUE, D., SIQUEIRA, V., & COLLISCHONN, W. (2017). *MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS*. Environmental Modelling & Software. v. 94, p.1-20.
- RENNÓ, Camilo Daleles et al. *HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia*. Remote Sensing of Environment, v. 112, n. 9, p. 3469-3481, 2008.
- RIGHI, E., & ROBAINA, L. (2010). *Enchentes do Rio Uruguai no Rio Grande do Sul entre 1980 e 2005: uma análise geográfica*. Sociedade & Natureza, 22, 35-54.
- SIQUEIRA, V., PAIVA, R., FLEISCHMANN, A., FAN, F., RUHOFF, A., PONTES, P.; COLLISCHONN, W. (2018). *Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America*. Hydrology and Earth System Sciences, 4815-4843.
- USACE - U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. (2010). *HEC-RAS River analysis system: Hydraulic Reference Manual*, version 4.0. Hydrologic Engineering Center, 244.