

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

COMPARAÇÃO ENTRE ABORDAGEM SIMPLIFICADA E HIDRODINÂMICA INERCIAL PARA SIMULAÇÃO DO RIO DOS SINOS (RS) UTILIZANDO MGB

Marcelle Gressler¹; Renata Barão Rossoni² & Fernando Mainardi Fan³

RESUMO – A modelagem hidrológica busca representar o comportamento de corpos hídricos por meio de simulações matemáticas. Através de modelos de chuva-vazão acoplados podem ser avaliados os efeitos de propagação e distribuição da vazão em bacias hidrográficas. Este trabalho utilizou o modelo MGB para comparar dois módulos de calibração do modelo: Muskingum-cunge (simplificado) e Inercial (hidrodinâmico - que considera a bacia de inundação) para o Rio dos Sinos (RS). Os resultados, avaliados através do coeficiente Nash-Sutcliffe e do seu logaritmo, demonstraram uma grande melhora na calibração do modelo para a abordagem hidrodinâmica. Entretanto, o erro de volumes foi agravado devido ao aumento da consideração da evapotranspiração na bacia de inundação.

ABSTRACT – The hydrologic modelling process seeks to represent the behavior from water bodies with mathematical simulation. Using rain-flow rate coupled models it's possible to evaluate the effects on the propagation and distribution of the flow rate in watersheds. This study applied the MGB model to compare two modules of calibration from the model: Muskingum-cunge (simplified) and Inertial (hydrodynamic – which considers the flood basin) to the Rio dos Sinos (RS). The results were evaluated using the Nash-Sutcliffe coefficient and its logarithm which demonstrated a great improvement in model calibration to the hydrodynamic approach. However, the volume error was aggravated by the increasing of the evapotranspiration estimation in the flood basin.

Palavras-Chave – MGB; Inercial; Simulação;

1 INTRODUÇÃO

A modelagem hidrológica - representação matemática do comportamento de corpos hídricos - é uma das principais ferramentas para que os desafios no gerenciamento dos recursos hídricos sejam superados (Fan, 2013). É um importante mecanismo de apoio à tomada de decisões na gestão de bacias, devido às suas características auxiliares na previsão de vazões (Fan, *et al.*, 2016), na compreensão dos processos hidrológicos em bacias hidrográficas e planícies de inundação (Fleishmann, *et al.*, 2018), em sistemas complexos lagunares, e no suporte à decisão de outorga de

¹ Graduanda em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), marcellegressler@gmail.com

² Mestranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), renata.rossoni@ufrgs.br

³ Prof. Dr. Em Recursos Hídricos, Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Fernando.fan@ufrgs.br

uso da água (Lopes, *et al.*,2018). Através de modelos chuva-vazão acoplados com metodologias de transporte de escoamento, pode-se avaliar os efeitos de propagação e distribuição da vazão em bacias hidrográficas (Pontes, *et al.*,2015).

Os modelos realizam a avaliação das vazões e propagações através da combinação do módulo de incidência de chuva sobre o solo e posterior geração de escoamento a partir dela e do módulo de propagação das vazões ao longo da rede de drenagem. Em muitos modelos, a avaliação do transporte de escoamento é realizada com a utilização da Equação de Muskingum-Cunge, que produz resultados aceitáveis para a maior parte dos casos, mesmo com a baixa quantidade de dados de entrada (Pontes, *et al.*, 2015). Existem, também, modelos que consideram as equações de Saint-Venant completas, os chamados modelos hidrodinâmicos, porém, estes exigem uma maior quantidade de dados de entrada e possuem uma aplicação mais exigente computacionalmente. A partir disto, surgem os modelos de complexidade intermediária, como é o caso do chamado modelo inercial, obtido ao se desprezar o termo da inércia advectiva das equações de Saint-Venant (Pontes, *et al.*, 2015).

Neste trabalho, apresenta-se a comparação entre duas propostas de calibração utilizando o modelo hidrológico MGB: metodologia simplificada Muskingum-Cunge e metodologia hidrodinâmica Inercial. A área de estudo escolhida é a bacia do Rio dos Sinos, localizada na região leste do estado do Rio Grande do Sul, Brasil, como pode ser observado na Figura 1.

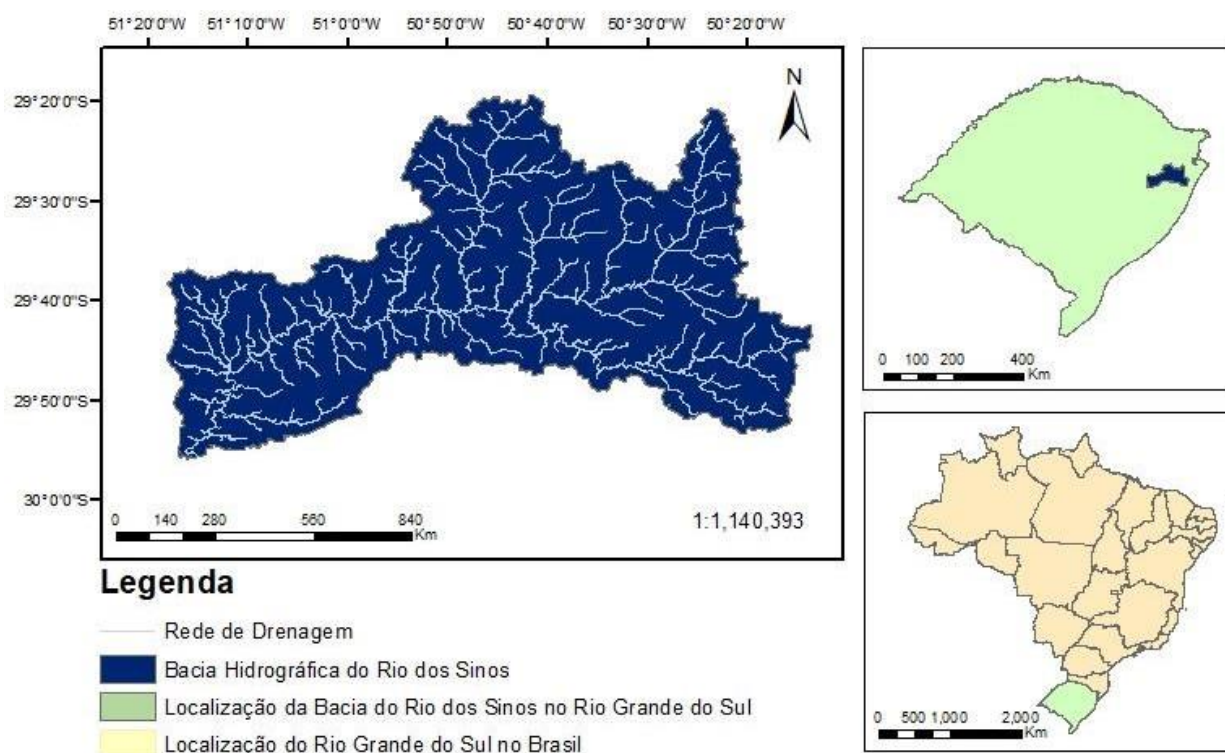


Figura 1. Rede de Drenagem, Bacia Hidrográfica e localização do Rio dos Sinos. Fonte: os autores, 2019.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Modelo MGB-IPH

Para a modelagem hidrológica, foi utilizado o Modelo de Grandes Bacias (MGB), desenvolvido por Collischonn, *et al.* (2007) e aprimorado constantemente nos últimos anos (Siqueira, *et al.*, 2018). O MGB considera topografia, cobertura, tipo e uso do solo, além de dados de clima e precipitação como dados de entrada do modelo (Collischonn, *et al.*, 2007).

Na etapa de pré-processamento, a bacia é discretizada em unidades irregulares, denominadas minibacias, conforme suas características físicas (Fan & Collischonn, 2014). Estas unidades são obtidas com auxílio da ferramenta *IPH-Hydro Tools*, desenvolvida por Siqueira *et al.* (2016), que considera para a divisão do relevo o uso do Modelo Digital de Elevação (MDE) e da hidrografia da região.

Para a simulação, estas minibacias foram agrupadas em seis sub-bacias, com a finalidade de facilitar a sua calibração. Desta forma, é possível variar os parâmetros propostos para o modelo entre as bacias, considerando as diferentes características de cada região. Os exutórios e limites foram definidos com base em pontos de interesse, buscando separar os maiores trechos da bacia, seguindo o leito principal do rio.

Ainda, o *IPH-Hydro Tools* possibilita a divisão em Unidades de Resposta Hidrológica (URH), ou seja: a redução da bacia em áreas com comportamento hidrológico similar, cuja divisão é baseada nas características do terreno, como tipo de solo, cobertura vegetal e usos do solo. Neste estudo, foi utilizado um mapa de URHs para a América do Sul desenvolvido por Fan *et al.* (2015).

O modelo possui dois métodos possíveis para transporte do escoamento na bacia: o método Muskingun-Cunge (MC) (Collischonn, *et al.*, 2007) e o método Inercial (Pontes, *et al.*, 2017). O primeiro utiliza a simplificação das equações de Saint-Venant, onde os termos de inércia advectiva e gradiente de pressão são desprezados (Collischonn, *et al.*, 2007). O segundo utiliza a simplificação na qual é considerado o termo do gradiente de pressão, contudo, o termo de inércia advectiva é desprezado (Fan *et al.*, 2015)

A calibração consiste em uma iteração na qual parâmetros físicos do solo e vegetação são modificados e ajustados, e seus efeitos avaliados até que se obtenha um hidrograma com boa precisão (Collischonn *et al.*, 2007). Foi realizada manualmente entre as datas de 01/01/1995 e 31/12/2017 e a validação foi efetuada com o período compreendido entre 01/01/1966 e 31/12/1994. A avaliação da proximidade das séries simuladas e observadas foi realizada através da comparação das métricas de desempenho fornecidas pelo modelo, conforme o item 2.4 abaixo. A Figura 2 apresenta as sub-bacias discretizadas, o MDE do terreno e as URHs.

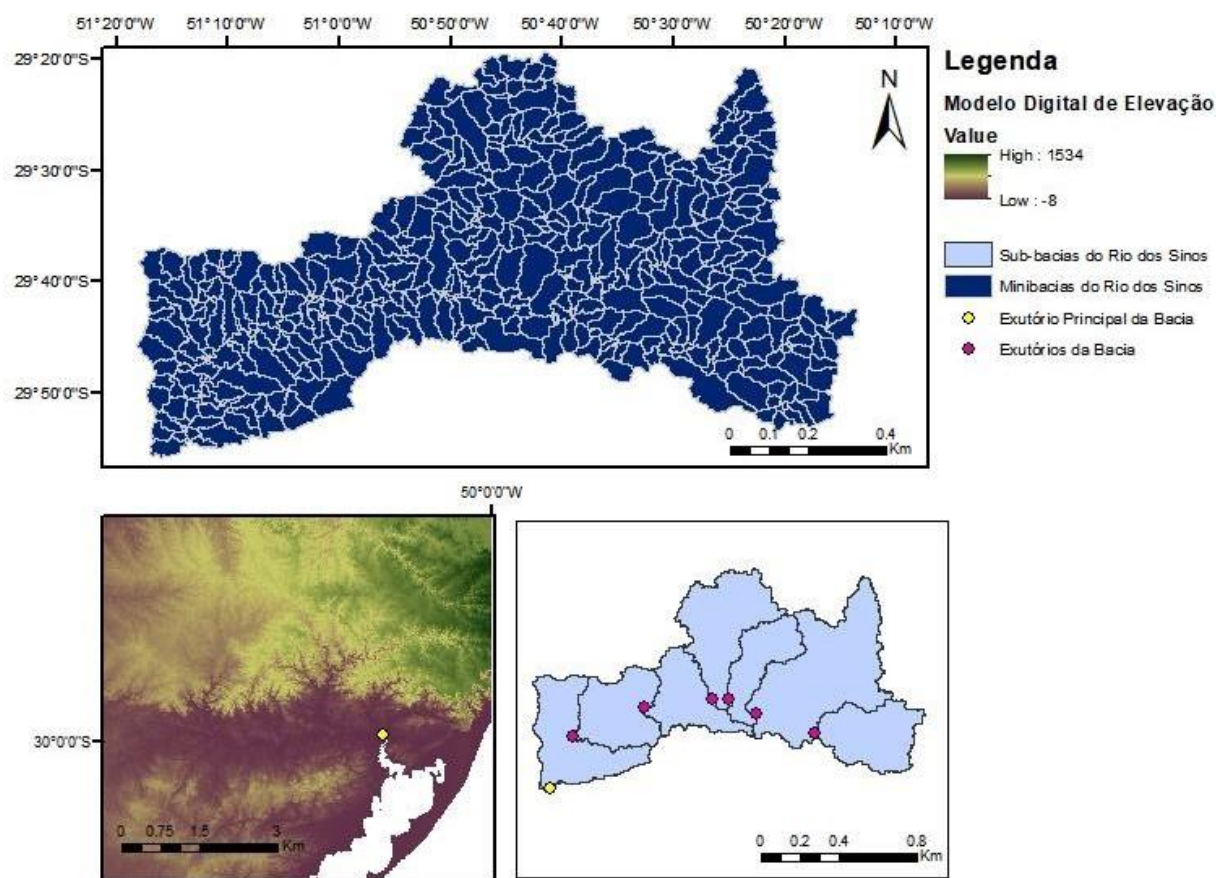


Figura 2. Modelo Digital de Elevação e sub-bacias e Unidades de Resposta Hidrológica e sub-bacias. Fonte: os autores, 2019.

2.2 Caracterização da Bacia do Rio dos Sinos

A bacia hidrográfica do Rio dos Sinos ocupa 3 693km², o que corresponde à cerca de 1,3% do território estadual, estando interligada com a geração de 21% do PIB do estado (COMITESINOS, 2010). Além disso, possui intenso uso da água para abastecimento urbano, uso industrial e irrigação (COMITESINOS, 2010). A pluviosidade da região é de cerca de 1 600 mm/ano, com chuvas bem distribuídas nas quatro estações. O clima é subtropical, sem estação seca, com verão quente, e temperaturas médias de 20°C (Pereira, 1996). A bacia abastece 32 municípios, com cerca de 1 350.000 habitantes e foi selecionada tendo em vista a relevância econômica para o estado.

O relevo foi obtido a partir de um MDE obtido do STRM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução espacial aproximada de 90 metros na horizontal e 1 metro na vertical.

Desde sua nascente, em Caraá, até sua foz, no município de Canoas, o leito principal percorre cerca de 160 km (COMITESINOS, 2010). As informações sobre a hidrografia da bacia foram obtidas da Agência Nacional de Águas (ANA). Estas informações são utilizadas para recorte da área de interesse na bacia, além da visualização da rede de drenagem, conforme a Figura 1, apresentada na Introdução.

2.3 Dados

A simulação no MGB foi realizada utilizando dados diários de vazão e chuva disponíveis no sistema Hidroweb, da ANA. Apesar da relevância da bacia, apenas 3 estações fluviométricas e 81 pluviométricas possuem dados de operação suficientes para que sejam utilizadas na modelagem. Além destes dados, são utilizados dados meteorológicos disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia.

Os dados meteorológicos necessários ao MGB incluem umidade do ar, temperatura, velocidade do vento, insolação e pressão atmosférica. São obtidos do INMET diretamente na interface do programa e utilizados para calcular a evapotranspiração da bacia. A estação do INMET utilizada foi a estação Porto Alegre, cujo código é 0008396, com latitude -51.167 e longitude -30.050.

Os dados de vazão e chuva utilizados são provenientes de estações fluviométricas e pluviométricas georreferenciadas. A Figura 3 apresenta a localização espacial das estações fluviométricas, das estações pluviométricas e da estação meteorológica utilizadas no estudo.

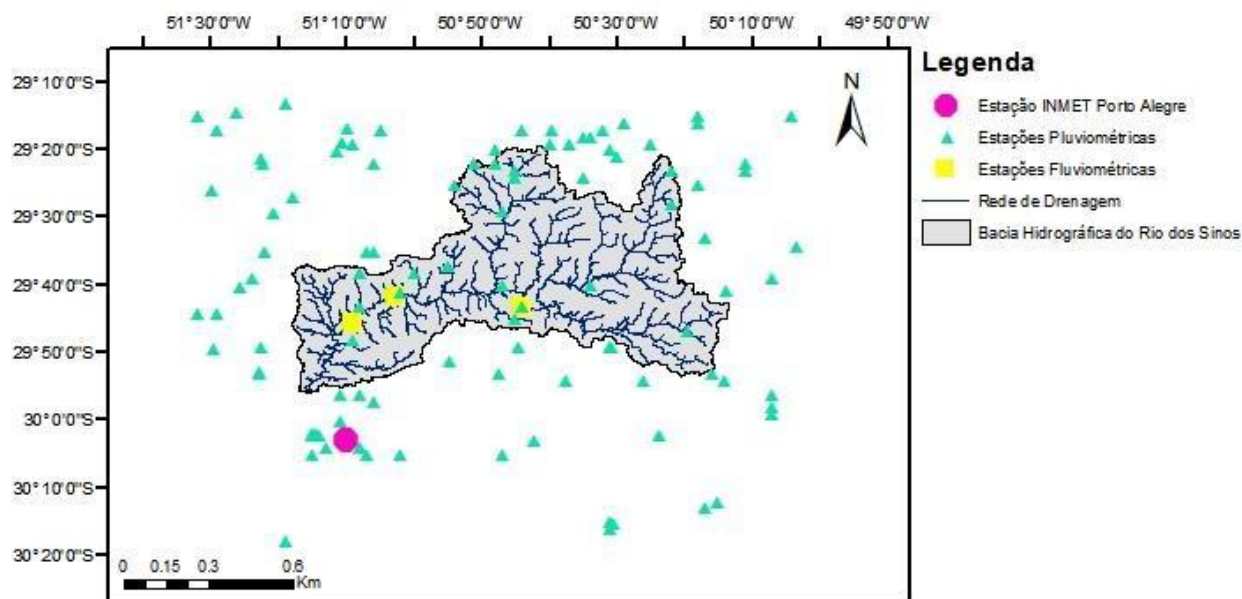


Figura 3. Mapa das Localizações dos Pontos de Chuva, Vazão e da Estação Meteorológica. Fonte: os autores, 2019.

2.4 Métricas de Desempenho

Segundo Fan e Collischonn (2014), a qualidade da calibração do MGB é pautada em três métricas de desempenho. O primeiro é o coeficiente de Nash-Sutcliffe [NSE (1)] das vazões calculadas e observadas, que mede o quanto os resultados do modelo são melhores do que os obtidos

por um modelo alternativo, que considerasse as médias dos dados observados. Este indicador tende a dar mais valor nos picos das vazões, e calibrar o modelo maximizando-o pode resultar em um mau ajuste nos períodos de recessão. O segundo parâmetro considerado é o coeficiente de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões [NSELog (2)], mais sensível aos períodos de recessão do que o anterior, favorecendo o ajuste das vazões menores. Para estas duas primeiras métricas, valores desejados são tão próximos de 1 quanto possível. A terceira métrica é o erro relativo de volume [PBIAS (3)], que avalia se existe um desvio sistemático na estimativa da vazão: um erro relativo de +12% significa que houve uma vazão média estimada 12% superior no período simulado. Para este parâmetro, deseja-se que se aproxime de 0. De acordo com Pontes (2014), as equações que descrevem os parâmetros estão apresentadas abaixo:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (QC_i - QO_i)^2}{\sum_{i=1}^N (QC_i - QOm)^2} \quad (1)$$

$$NSELog = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\text{Log}(QC_i) - \text{Log}(QO_i))^2}{\sum_{i=1}^N (\text{Log}(QC_i) - QOmLog)^2} \quad (2)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^N QC_i - \sum_{i=1}^N QO_i}{\sum_{i=1}^N QO_i} \quad (3)$$

Onde QC_i é a vazão calculada num intervalo de tempo i ; QO_i é a vazão observada no mesmo intervalo de tempo; N é o número de intervalos de tempo; QOm é a média das vazões observadas no período de N intervalos de tempo e $QOmLog$ é a média dos logaritmos das vazões observadas no período N de intervalos de tempo.

Para avaliação da qualidade de calibração foi utilizada, como uma abordagem simplificada, a tabela proposta por Moriasi *et al.* (2007), que avalia modelos com parâmetros e simulações análogas ao MGB, conforme o disposto na Tabela 1, abaixo.

Tabela 1. Parâmetros para avaliação da qualidade da calibração.

NSE	PBIAS	Avaliação da Performance
> 0,65	> 10%	Muito boa
0,54 até 0,65	10 até 15 %	Adequada
> 0,50	15 até 25%	Satisfatória
Até 0,50	> 25%	Inadequada

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No MGB, a avaliação dos resultados é realizada principalmente pelas métricas citadas acima, e os resultados da calibração deste trabalho estão dispostos na Tabela 2 e os resultados para a validação podem ser visualizados na Tabela 3.

Tabela 2. Estatísticas de avaliação para calibração. Valores em negrito indicam o melhor resultado

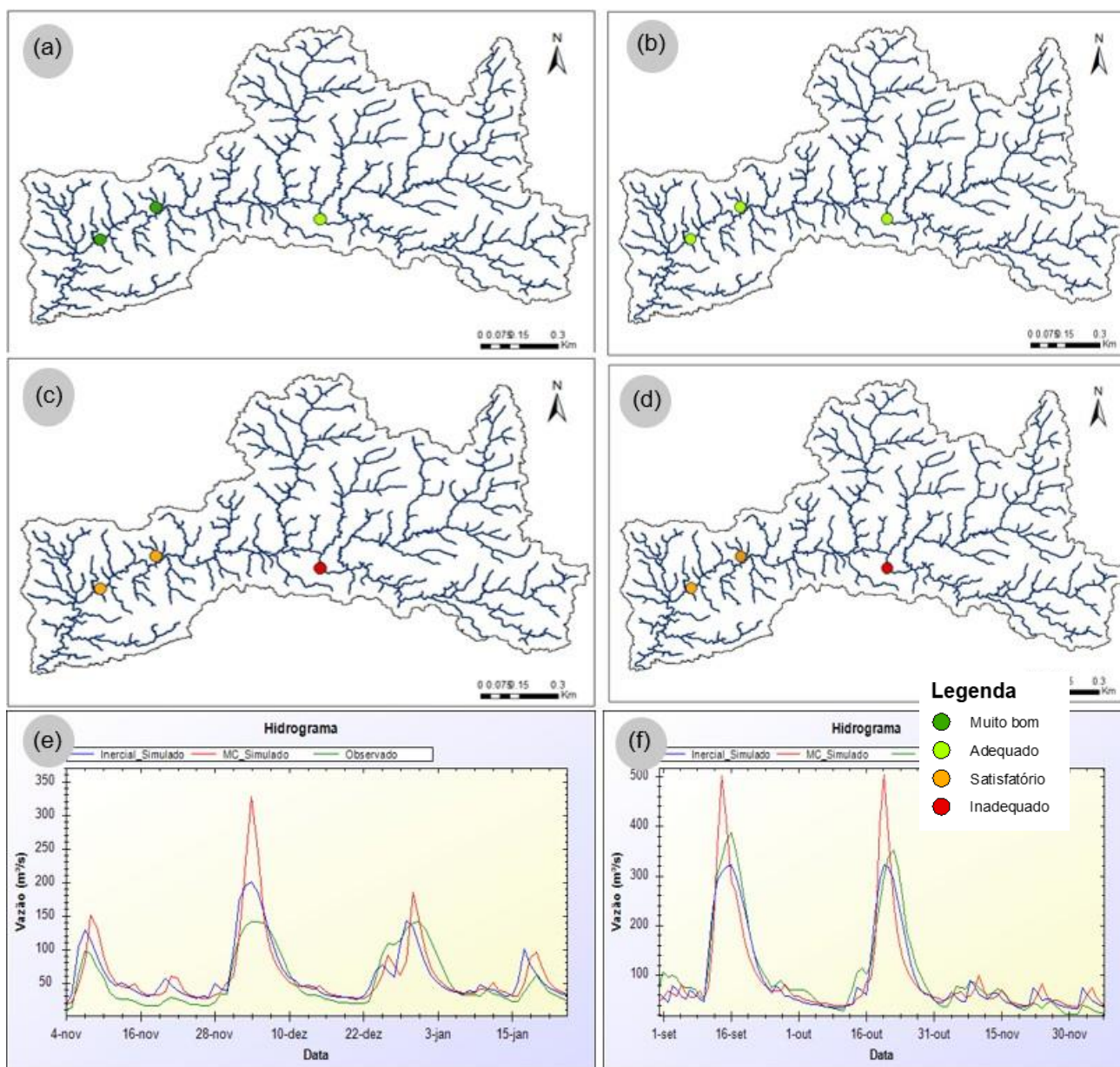
Estação	NSE		NSELog		PBIAS	
	MC	Inercial	MC	Inercial	MC	Inercial
8737400	0,599	0,601	0,722	0,736	-27,2	-26,9
8738000	0,613	0,751	0,709	0,720	-15,8	-16,6
8738200	0,601	0,710	0,660	0,674	-20,7	-21,4

Tabela 3. Estatísticas de avaliação para validação. Valores em negrito indicam o melhor resultado.

Estação	NSE		NSELog		PBIAS	
	MC	Inercial	MC	Inercial	MC	Inercial
8738000	0,613	0,763	0,709	0,789	-15,8	-7,8
8738200	0,487	0,707	0,750	0,751	-13,0	-13,1

A Figura 4 apresenta os resultados de forma espacializada na área de estudo. Observa-se que as simulações realizadas utilizando o método inercial obtiveram resultados “muito bons” para a calibração do NSE (a) em dois dos três pontos avaliados, contra três resultados classificados como “adequados” para a simulação realizada com MC (b). Ou seja, houve uma melhora em relação ao modelo simplificado na calibração das vazões ao se avaliar a representatividade da planície de inundação. A melhora também ocorreu ao avaliar o NSELog, o que indica uma calibração mais representativa do todo, uma vez que o NSE tende a valorizar os picos e o NSELog a ajustar melhor as vazões de recessão.

Entretanto, houve um aumento no erro volumétrico ao utilizar a calibração inercial. Isto ocorre porque, ao considerar a planície de inundação, aumenta-se a área de evapotranspiração, o que configura uma maior retirada de água e, portanto, um aumento negativo do erro no volume. No caso específico da bacia do Rio dos Sinos ocorrem inúmeras retiradas de água para irrigação e consumo humano durante o seu percurso, que não são representadas pelo modelo, caracterizando mais um erro negativo. Ainda, há o fato de que não temos uma representação de dados das chuvas de cabeceira na bacia.



comparativo da simulação. Nos hidrogramas, a linha azul representa a simulação inercial, vermelha a MC e a verde os dados observados. Fonte: os autores, 2019.

A melhora nos resultados também pode ser observada ao se analisar os hidrogramas obtidos. Nota-se, nas Figuras (e) e (f), que a simulação com MC (linhas vermelhas) está superestimando as vazões de pico observadas (linha verde) para todo o hidrograma. Além disso, observa-se que o

hidrograma que representa a simulação com método Inercial (linha azul) apresenta uma tendência semelhante ao hidrograma com vazões observadas (linha verde), nos quais há um arredondamento no formato dos hidrogramas. Dessa forma, é possível perceber que, nessas regiões com planícies de inundação, apenas o método Inercial consegue representar os processos hidrológicos que estão ocorrendo de forma mais representativa, como a atenuação dos picos nas planícies de inundação.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo permitiu avaliar a influência da consideração da planície de inundação na modelagem hidrológica da bacia do Rio dos Sinos. Através da utilização do modelo MGB, foram comparados os métodos de propagação de vazões Muskingum-Cunge (método simplificado) e Inercial (método hidrodinâmico). Para todos os casos, as simulações com modelo Inercial obtiveram melhores resultados do que as simplificadas em termos visuais e dos coeficientes de NSE e NSELog. Para os erros de volume, o modelo inercial acabou por apontar maiores erros, principalmente porque ele aumenta a evaporação simulada na planície de inundação.

A principal mensagem do presente trabalho é que o uso de uma abordagem de simulação com método de propagação hidrodinâmico é essencial para uma melhor representação da bacia do rio dos Sinos (RS). As próximas etapas de estudo incluirão a validação das manchas de inundação geradas pelo modelo, o que é outro benefício da abordagem hidrodinâmica em relação ao MC, visto que a simulação MC não possibilita a geração da mancha, e que não foi explorada neste momento. Também, será avaliada a possibilidade de inclusão de efeitos antrópicos (retiradas de água) na simulação do sistema.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

COMITESINOS, 2010. *Caracterização da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos*. Disponível em: <<http://www.comitesinos.com.br/bacia-hidrografica-do-rio-dos-sinos>>. Acesso em 26/02/2019.

FAN F. M., COLLISCHONN W., *Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica*. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 19 n.1 –Jan/Mar 2014, pág. 243-254.

FAN F. M., BUARQUE D. C., PONTES, P.R.M., COLLISCHONN W. *Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul*. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Novembro de 2015, Brasília-DF.

FAN F. M., COLLISCHONN W., et al., *Flood forecasting on the Tocantins River using ensemble rainfall forecasts and real-time satellite rainfall estimates*. – Journal of Flood Risk Management 2016 p. 218 – 288.

FLEISCHMANN, A. *et al. Modelling hydrologic and hydrodynamic processes in basins with large semi-arid wetlands*. ELSEVIER - Journal of Hydrology vol. 561 2018 p. 943 - 959

JARDIM P. F., SIQUEIRA V. A., FLEISCHMANN A. S., FAN F. M., COLLISCHONN W., *IPH-hydro tools: pacote de ferramentas open source de geoprocessamento aplicado a recursos hídricos*. XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2015. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

LOPES, V. A. R. L., FAN F. M., *et al. A first integrated modelling of a river-lagoon large-scale hydrological system for forecasting purposes*. Elsevier – Journal of Hydrology 2018 p. 177 - 196

MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L. *Model Evaluation Guidelines For Systematic Quantification of Accuracy In Watershed Simulations*. American Society of Agricultural and Biological Engineers. V.50(3), 2007.

PEREIRA, M., KAYSER R. B., COLLISCHONN W., *Integração do modelo hidrológico para grandes bacias MGB-IPH e sistemas de informação geográfica para suporte à decisão de outorga de direito de uso da água*. REGA – Vol. 9, no. 2, p. 21-33, jul./dez. 2012.

PEREIRA, J.S. *Análise de Critérios de Outorga e de Cobrança Pelo Uso da água na Bacia do Rio dos Sinos, RS*. Disponível em: < <http://jaildo.chez-alice.fr/disserta.pdf> > Acesso em 26/02/2019

PONTES, P. R. M., COLLISCHONN W. *O modelo Muskingum-Cunge-Todini em rios com planície de inundação*. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, versão On-line. vol. 20 no .2 Porto Alegre abr./jun. 2015 p. 298 – 309

PONTES, P. R. M., FAN F. M., *et al. MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS* – Elsevier Environmental Modelling & Software 2017 p 1-20.

PONTES, P. R. M., COLLISCHONN W., FAN F. M., PAIVA, R. P. D., BUARQUE, D. C *Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões*. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 20 n. 4. Porto Alegre out/dez 2015 p. 888-904

SIQUEIRA V. A., FLEISCHMANN A. S., JARDIM P. F., FAN F. M., COLLISCHONN W., *IPH-Hydro Tools: uma ferramenta open source para determinação de informações topológicas em bacias hidrográficas integrada a um ambiente SIG*. RBRH vol.21 no.1 Porto Alegre Jan./Mar. 2016

SIQUEIRA V. A., PAIVA, R. P. D., FLEISCHMANN A. S., *et al., Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America* Hydrol. Earth Syst. Sci., 22, 4815–4842, 2018