AVALIAÇÃO DO USO DADOS DE SATÉLITE PARA O CÁLCULO DA VAZÃO EM UMA PEQUENA BACIA HIDROGRÁFICA POR MEIO DO MODELO SWAT

Jaqueline Cremonini [1] & Tássia Mattos Brighenti [2]& Nádia Bernardi Bonumá [3]& Fernando Grison [4]*

Resumo – A precipitação é uma das variáveis mais importantes do ciclo hidrológico e um dado de entrada indispensável em modelos hidrológicos. Porém, algumas regiões não possuem medição pontual de chuva ou quando existentes incluem períodos de observação curtos e incompletos. Assim, estimativas de precipitação por satélite são uma ferramenta extremamente útil. O objetivo desse artigo é avaliar o uso de dados de precipitação diários estimados pelo satélite TRMM 3B42 em comparação com dados diários medidos em campo na previsão de vazões utilizando o modelo SWAT na bacia hidrográfica de Rio dos Bugres, Santa Catarina de 2011 a 2014. A calibração foi realizada no *software* SWAT-CUP e o desempenho do modelo avaliado pelas funções objetivo *Percent bias*, Coeficiente de *Nash-Sutcliffe* e Coeficiente de *Nash-Sutcliffe* Modificado. Os resultados mostraram que as estimativas de precipitação do TRMM tenderam a superestimar a precipitação na região. Para a vazão, o modelo teve sucesso no ajuste do volume de vazão diária, porém os picos de vazão não foram bem representados e as vazões mínimas foram minimizadas. Conclui-se que as estimativas do satélite representaram o comportamento da chuva e da vazão na área da bacia, bem como, produziram estimativas confiáveis dos diferentes componentes do balanço hídrico.

Palavras-chave – precipitação, dados de satélite, SWAT

EVALUATION OF THE USE OF SATELLITE DATA FOR DISCHARGE CALCULATION IN A SMALL HYDROGRAPHIC BASIN BY MEANS OF THE SWAT MODEL

Abstract – Precipitation is one of the most important variables of the hydrological cycle and an indispensable input in hydrological models. However, some regions do not have rain gauges measurements or if existing they include short and incomplete observation periods. In turn, satellite precipitation estimates are an extremely useful tool. The objective of this paper is to evaluate the use of daily precipitation data estimated by the TRMM 3B42 satellite for discharge calculations using the SWAT model in the Rio dos Bugres basin, Santa Catarina from 2011 to 2014. The calibration was performed in the SWAT-CUP software and the performance of the model evaluated by Percent bias, Nash-Sutcliffe Coefficient and Modified Nash-Sutcliffe Coefficient. The results showed that the model was successful in adjusting the daily discharge volume for TRMM precipitation estimates, but the discharge peaks were not well represented and the minimum discharges were minimized. Finally, the satellite estimates were able to quantify the water balance components.

Keywords – precipitation, satellite data, SWAT

[1] Graduação em Eng. Sanitária e Ambiental - UFSC/SC; jaquelinecremonini@hotmail.com.
[2] Programa de Pós-Graduação em Eng. Ambiental - UFSC/SC; tassiabrighenti@hotmail.com.
[3] Universidade Federal de Santa Catarina. Dep. de Eng. Sanitária e Ambiental; nadia.bonuma@ufsc.br.
[4] Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS); Chapecó; Engenharia Ambiental e Sanitária. fernando.grison@uffs.edu.br
* Autor Correspondente.

INTRODUÇÃO

A precipitação é uma das variáveis mais importantes do ciclo hidrológico e também um dado de entrada indispensável em modelos hidrológicos. A chuva pode ser medida pontualmente de forma direta, com aparelhos como pluviômetros e pluviógrafos, ou espacialmente de maneira indireta através de radares e satélites. As resoluções espaciais e temporais da precipitação influenciam diretamente na qualidade dos dados de precipitação, que por sua vez, influenciam significativamente na determinação hidrológica (XU et al., 2013). Segundo Chappel et al. (2013), áreas que possuem maior densidade de pluviômetros fornecem estimativas de precipitação mais confiáveis do que aqueles que possuem baixa densidade de pluviômetros. Porém, Monteiro et al. (2015) ressalta que uma rede de estações pluviométricas possui elevado custo econômico e, além disso, exige dedicação constante de técnicos especializados para recolher dados, manter os equipamentos e controlar a consistência dos dados coletados, como consequência, o número de estações em uma área de interesse normalmente está abaixo do ótimo e os dados disponíveis podem incluir períodos de observação curtos, incompletos e de baixa qualidade.

Por sua vez, o sensoriamento remoto via satélite pode fornecer dados de precipitação espacial em grandes áreas e de forma contínua. Moreno et al. (2012) revelou que estimativas de precipitação provenientes do sensoriamento remoto melhoraram o desempenho do modelo hidrológico em comparação com simulações conduzidos apenas com dados de medição local. No entanto, como os produtos do sensoriamento remoto possuem orientação global (ou semi-global), seus resultados podem variar de um local para outro, sendo necessário avaliar o seu desempenho com dados de medições locais antes de ser aplicado para uma área de especifica (LIU et al., 2014).

O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) é um modelo hidrológico de transformação chuva-vazão utilizado para gestão de bacias hidrográficas, pois consegue prever o impacto da gestão da água, sedimentos e químicos agrícolas em bacias hidrográficas que não possuem medição através da utilização de dados de entrada como tipo de solo, uso do solo e informações de estações meteorológicas (ARNOLD et al., 1998).

Nesse sentido, o presente trabalho possui como objetivo principal avaliar o uso de dados de precipitação diários estimados pelo satélite TRMM 3B42 em comparação com dados diários medidos em campo na previsão de vazões utilizando o modelo hidrológico SWAT, no período de 2011 a 2014 para a bacia hidrográfica de Rio dos Bugres, localizada no município de Rio Negrinho, Santa Catarina. A bacia foi escolhida com o intuito de dar continuidade aos trabalhos realizados na região (e.g. Cardoso, 2013 e Grison, 2013). Visto que o monitoramento na bacia foi encerrado em 2014, o sensoriamento remoto via satélite em conjunto com a modelagem hidrológica se apresentam como ferramentas muito valiosas para que os estudos na região tenham continuidade.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A bacia hidrográfica de Rio dos Bugres (BHRB) está localizada no município de Rio Negrinho, região norte do Estado de Santa Catarina, entre as coordenadas UTM 7092134 a 7074604 e 642588 a 652049, referente ao sistema de projeção SAD 69. A bacia tem uma área de drenagem de 65,21 km² e o rio principal é o Rio dos Bugres com comprimento total de 16,64 km. A localização dessa bacia pode ser visualizada na Figura 1.

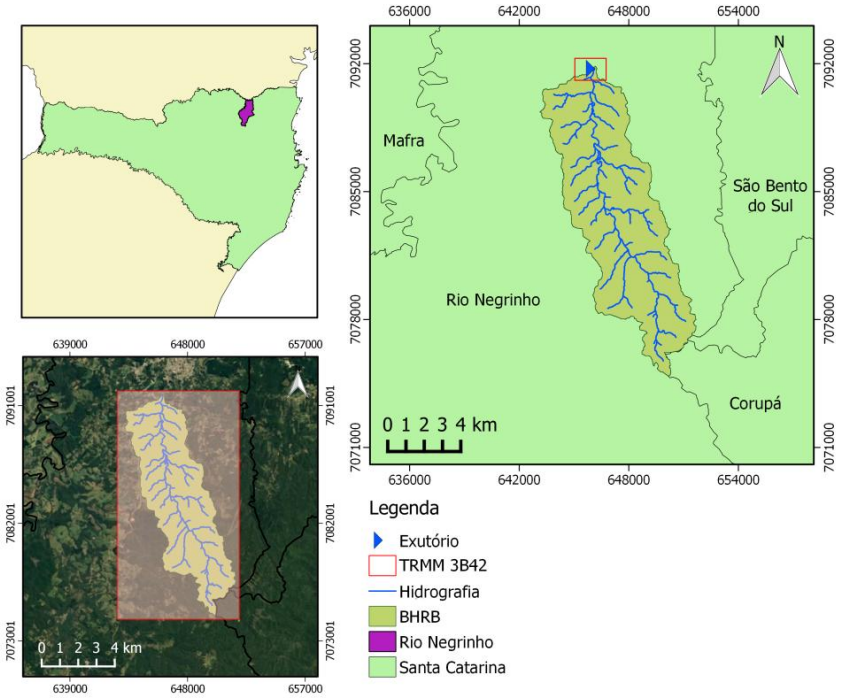

Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica de Rio dos Bugres, Santa Catarina.

Dados de entrada

O modelo hidrológico utilizado para simular a vazão a partir dos dados medidos e estimados pelo satélite TRMM 3B42 foi o SWAT versão 2012. O modelo foi executado em cima da interface GIS - QGIS e necessitou da consolidação de uma base de dados espaciais (e.g. modelo digital do terreno, tipo de solo e uso do solo) e temporais (e.g. temperatura máxima e mínima, radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa e precipitação).

Os dados de precipitação para a região da bacia hidrográfica de Rio do Bugres foram obtidos da versão 7 do satélite TRMM 3B42 para o período de 01/01/2010 a 31/12/2014. O produto TRMM 3B42 fornece estimativas de precipitação acumulada em 24 horas (mm/dia), que foram geradas a partir de uma resolução temporal de 3 horas e uma resolução espacial de 0,25° x 0,25° em uma faixa de latitude que se estende 50°S a 50°N (HUFFMAN et al., 2007) . A versão 7 do produto TRMM 3B42 diário pode ser obtida gratuitamente através do portal < http://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/>.

As estimativas de precipitação do TRMM 3B42 são produzidas numa sequência de 4 passos: (1) as estimativas de precipitação de micro-ondas são calibradas e combinadas; (2) as estimativas de precipitação de infravermelho são criadas usando a precipitação de micro-ondas calibrada; (3) as estimativas de precipitação de micro-ondas e infravermelho são combinadas; e (4) o reescalonamento para dados mensais é aplicado. Cada campo de precipitação é interpretado como a taxa de precipitação efetiva no tempo de observação nominal (HUFFMAN et al., 2007).

De modo a avaliar a versão 7 do produto TRMM 3B42 foi utilizado um banco de dados de medição de precipitação diária e vazão realizado pelo Laboratório de Hidrologia (LabHidro) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). A precipitação na bacia foi medida no período de 16/03/2011 a 09/06/14. Os dados de precipitação do TRMM 3B42 de 2010 a 2014 cobrem o mesmo período dos dados observados em campo, sendo que o ano 2010 serviu para o aquecimento do modelo. Os dados de vazão foram obtidos do trabalho de Grison (2013).

Avaliação dos dados do satélite TRMM

A qualidade da série de precipitação média estimada pelo satélite TRMM foi verificada através de correlações e comparações com a série média dos dados observados, com auxílio do *software* SigmaPlot. Além da análise das séries diárias, elaboraram-se séries anuais, bem como se agrupou os dados diários em intervalos de médias mensais, com intuito de identificar o comportamento dos dados medidos e estimados nestas situações.

Calibração do modelo hidrológico chuva-vazão SWAT

O modelo hidrológico SWAT foi calibrado no software SWAT-CUP através do algoritmo semiautomático SUFI2. O desempenho do modelo foi verificado através das funções objetivo: (1) *Percent Bias* (Pbias); (2) Coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (NS) e (3) Coeficiente de *Nash-Sufcliffe* Modificado. A primeira função objetivo avalia a tendência média que os dados simulados têm de serem maiores ou menores que os dados observados, a segunda busca o melhor ajuste para as vazões máximas e a terceira é mais sensível para vazões mínimas. As faixas de valores considerados como bom ajuste ou não do modelo serão NS≥0,5, MNS≥0,5 e Pbias≤±25% (MORIASI et al, 2007).

$$Pbias = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_m - Q_s)_i}{\sum_{i=1}^{n} Q_{m,i}} \quad (1)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_i |Q_m - Q_s|_i^2}{\sum_i |Q_{m,i} - \overline{Q_m}|^2} \quad (2)$$

$$MNS = 1 - \frac{\sum_i |Q_m - Q_s|_i}{\sum_i |Q_{m,i} - \overline{Q_m}|_i} \quad (3)$$

onde, Q é a vazão e $\overline{Q}$ é a vazão média, sendo m referente a vazão observada, s a vazão simulada e n é o número total de observações.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Comparação da chuva

A primeira análise da chuva considerou a precipitação diária medida e estimada pelo satélite TRMM, no período de 2011 a 2014. As falhas na série dos dados medidos foram preenchidas pelo gerador climatológico automático do SWAT. Quando a comparação das séries é feita, o coeficiente de determinação apresentou baixo valor (0,4). Na análise anual, verificou-se que o satélite superestimou a precipitação média anual, havendo uma diferença entre os anos de 186 mm a 504 mm (Tabela 1).

Tabela 1. Precipitação anual da sub-bacia decorrente dos dados medidos e estimados de 2011 a 2014.

Ano	P_{Medida}(mm)	P_{TRMM} (mm)	Diferença (mm)	R^2
2011	1.577,9	2.081,5	-503,5	0,34
2012	1.420,3	1.698,6	-278,3	0,57
2013	1.655,3	1.841,7	-186,3	0,47
2014	1.676,4	1.987,9	-311,4	0,35
Média anual (2011-2014)	1.582,4	1.902,3	-319,9	0,41

Comparando as estatísticas das séries obtidas (Tabela 2), verificou-se uma diferença considerável entre a precipitação média diária e o desvio padrão. A precipitação média anual da série estimada apresentou uma diferença de 17% em relação à medida, evidenciando a superestimativa do TRMM para volumes mais significativos, o que pode ser explicado pelo fato do tamanho da bacia ser menor do que a grade utilizada para obter os dados do TRMM.

Tabela 2. Estatística descritiva das séries de precipitação médias diárias e total medida e estimada.

	P_{Medida}	P_{TRMM}
P média diária (mm)	4,3	5,3
P média anual (mm)	1.582,5	1.902,5
Desvio padrão	11,4	12,7

Foi realizada uma segunda análise, comparando apenas os dias que tiveram medição em campo, sem o preenchimento de falhas, nesse caso, os dados apresentaram um coeficiente de determinação melhor (0,6). Houve uma diferença da precipitação média entre os anos de 21 mm a 214 mm. A precipitação média anual da série estimada apresentou uma diferença de 8% em relação a medida. Para efeito de comparação, a Figura 2 mostra que, em termos médios, o TRMM consegue estimar a variação da precipitação sobre a bacia considerada. Em alguns picos, o satélite superestimou a precipitação, em outros subestimou. Os resultados obtidos vão de encontro aos apresentados em outros estudos da região sul como de Kurek et al. (2013) para a bacia do Rio Guaporé - RS e Fensterseifer (2013) para a bacia do Alto Jucuí - RS.

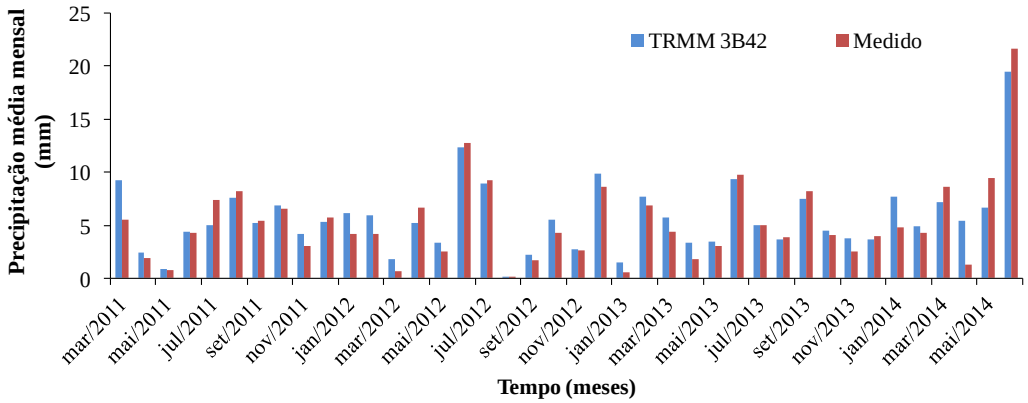

Figura 2 - Comparação da precipitação média mensal da chuva medida e estimada pelo satélite TRMM na bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - SC.

Comparação da vazão

A simulação da vazão para os dados medidos e estimados pelo satélite TRMM foram realizadas com o modelo SWAT no período de 2011 a 2014. Os resultados obtidos após a calibração para as vazões diárias a partir dos dados de precipitação medidos e estimados pelo satélite TRMM são mostrados na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3. Valores de Pbias, NS e MNS após a calibração da vazão diária a partir dos dados de precipitação medidos em campo e estimados pelo satélite TRMM 3B42.

Ano	Medidos em campo			Estimados pelo satélite TRMM		
	Pbias	**NS**	**MNS**	**Pbias**	**NS**	**MNS**
2011	26,2	0,40	0,38	31,9	-0,02	0,25
2012	-21,1	0,29	0,16	-20,1	0,12	0,32
2013	-11,9	0,32	0,23	-18,5	-0,14	0,22
2014	-0.6	0,31	0,23	-1,3	-0,12	0,06
Total (2011-2014)	0,0	0,34	0,27	0,0	-0,04	0,24

A partir da Tabela 3 nota-se que o modelo teve dificuldade para obter os resultados dentro da faixa considerada como satisfatória (NS≥0,5, MNS≥0,5 e Pbias≤±25%), principalmente no ajuste da vazão do TRMM para a função objetivo NS. Em princípio o modelo SWAT, tem melhor avaliação quando se observa os valores do Pbias. Para os dados medidos, com exceção do ano de 2011, todos os outros anos tiveram os valores ajustados do Pbias dentro da faixa aceitável (Pbias≤±25%) e o modelo tende a subestimar a vazão em 2011 e superestimar de 2012 a 2014 (como pode ser observado na Figura 3a). Para o TRMM, com exceção do ano de 2011, todos os outros anos tiveram os valores ajustados do Pbias dentro da faixa aceitável (Pbias≤±25%) e o modelo tende a subestimar a vazão em 2011 e superestimar de 2012 a 2014, o que de certa forma já é esperado, visto que a formulação do Curva-Número é usada para o cálculo do escoamento superficial (conforme pode ser observado na Figura 3b).

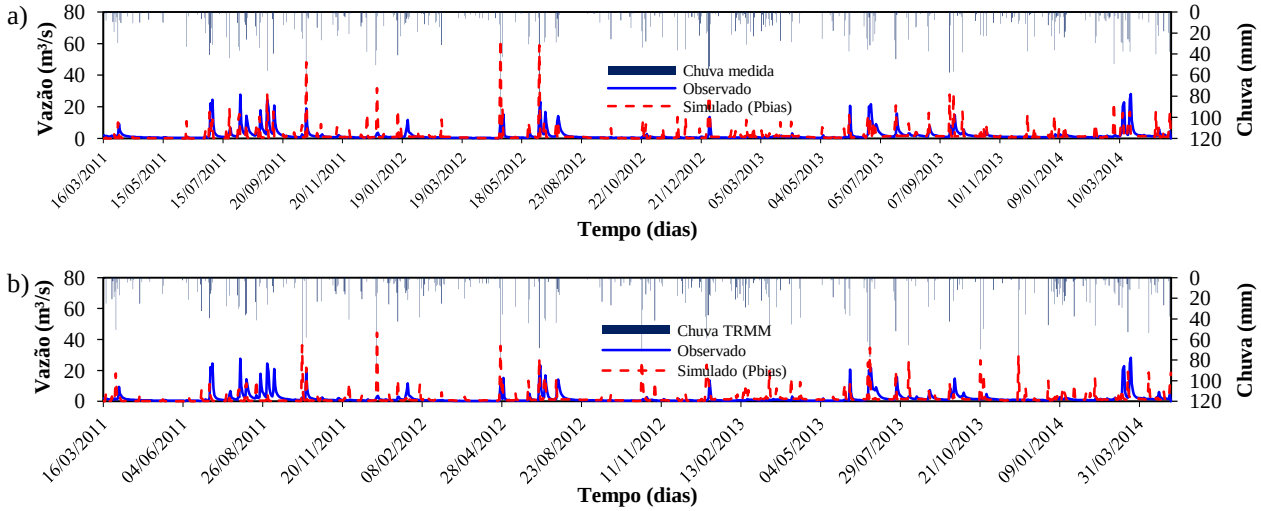

Figura 3 - Vazão calibrada para a função objetivo Pbias a partir da precipitação (a) medida e (b) estimada pelo satélite TRMM na bacia hidrográfica de Rio dos Bugres - SC no período de 2011 a 2014.

Na análise do coeficiente NS, os resultados para ambos os casos estão fora da faixa aceitável, porém, a calibração com os dados medidos apresentou melhores resultados que a calibração a partir dos dados de satélite, mostrando que os dados medidos conseguiram simular melhor as vazões de pico observadas, sendo a melhor avaliação em 2011. Na análise do coeficiente MNS, o modelo tendeu a minimizar as vazões mínimas em alguns períodos, sendo o melhor ajuste para os dados medidos no ano de 2011.

A influência da escala temporal para o melhor ajuste entre os dados simulados e observados no SWAT já é algo conhecido. Bonumá (2011) utilizou o modelo SWAT na bacia de Arroio Lino - RS, e os resultados indicaram que nas simulações em escala diária, os picos de vazão não foram bem representados e as vazões mínimas tenderam a ser minimizadas. Brighenti (2015) aplicou o modelo SWAT na bacia de Rio Negrinho - SC e apontou que os ajustes das calibrações mensais apresentam melhores valores do que as calibrações diárias.

Avaliando as curvas de permanência em escala logarítmica das vazões calibradas a partir dos dados estimados pelo satélite TRMM (Figura 4), percebe-se que para o Pbias, a quantidade e a magnitude dos picos simulados é maior que os observados e identifica-se um problema na simulação das vazões mais baixas, onde o modelo tende a subestimar as vazões. Na análise da função objetivo NS, percebe-se que apesar dos dados observados apresentarem maior magnitude, a quantidade de picos simulados é maior que os observados mostrando que o modelo tem uma tendência de superestimar as vazões máximas. Para a função objetivo MNS, a magnitude dos picos

observados é maior que os simulados, sendo que entre 0% e 40% do tempo as vazões observadas são superadas pelas simuladas e entre 40 e 100% do tempo as vazões simuladas superam as observadas.

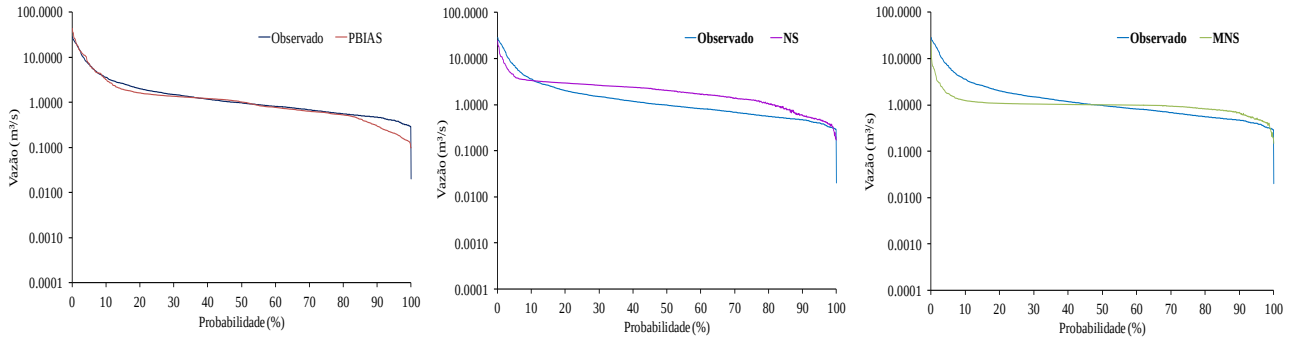

Figura 4 - Curvas de permanência em escala logarítmica das vazões calibradas para as funções objetivo Pbias, NS e MNS e a partir da vazão simulada para os dados estimados pelo satélite TRMM e observados na bacia de Rio dos Bugres - SC de 2011 a 2014.

Balanço hídrico

Um dos importantes resultados da simulação do SWAT é a quantificação das variáveis envolvidas no balanço hídrico. A Tabela 4 apresenta os valores do balanço hídrico anual médio da bacia hidrográfica do Rio dos Bugres no período de 2011 a 2014.

Tabela 4 - Valores envolvidos no balanço hídrico anual da bacia hidrográfica de Rio dos Bugres, SC utilizando dados medidos e estimados pelo satélite TRMM no período de 2011 a 2014.

Dado de entrada	Precipitação (mm)	Evapotranspiração (mm)	Escoamento superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Fluxo de retorno (mm)	Percolação Aquífero Raso (mm)	Recarga Aquífero Profundo (mm)
Medido	1.582,5	470,1	474,4	71,9	523,3	563,4	28,2
TRMM	1.902,5	476,8	628,0	87,2	654,8	701,9	35,1

Em uma avaliação do desempenho do modelo, a porcentagem de precipitação que é perdida em evapotranspiração (30%), escoamento superficial (45%), percolação para o aquífero raso (36%) e recarga do aquífero profundo (0,2) são bem similares para os dois casos analisados. A análise hidrológica do balanço hídrico sugeriu que o fluxo de retorno é um componente importante do rendimento total da água na área de estudo que contribui mais do que o escoamento superficial.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas comparações entre os dados de satélite e os dados medidos, os dados de satélite tendem a superestimar a precipitação na bacia hidrográfica de Rio dos Bugres quando comparado com os dados medidos. Com relação à vazão, o modelo teve sucesso no ajuste do volume das vazões diárias, representado pelo Pbias. Porém, teve dificuldade no ajuste para as funções objetivo NS (vazões de pico) e MNS (vazões de base). Mesmo com a tendência de superestimação dos dados de satélite, nos meses entre junho a setembro de 2011, notou-se que os picos de vazão observados não foram bem representados, o fato pode estar associado a problemas de extrapolação da curva-chave e não exclusivamente as medições de cota-vazão ou chuva. Por fim, a avaliação do balanço hídrico indicou que o modelo SWAT é capaz de produzir estimativas confiáveis para os diferentes componentes do ciclo hidrológico. Recomenda-se para trabalhos futuros, o teste dos dados provenientes de satélite em bacias com uma série maior de dados observados. Bem como, a consideração da análise de incerteza dos dados do modelo (entrada e saída), de forma a proporcionar maior confiabilidade nas simulações realizadas.

REFERÊNCIAS

ARNOLD, J. G. et al. Large area hydrologic modeling and assessment part i: model development. **Journal of The American Water Resources Association,** v.34, n.1, p.73-89, 1998. Wiley-Blackwell.

BRIGHENTI, T. M. **Modelagem hidrológica e avaliação de diferentes métodos de calibração para o modelo SWAT.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC. 2015. 119 p.

BONUMÁ, N. B. **Modelagem do escoamento, da produção de sedimentos e da transferência de fósforo em bacia rural no sul do Brasil.** Tese (Doutorado em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos físicos e morfogenéticos do solo), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS. 2011. 136 p.

CARDOSO, A. T. **Estudo hidrossedimentológico em três bacias embutidas no município de Rio Negrinho - SC.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC. 2013. 102 p.

CHAPPELL, A. et al. Evaluating geostatistical methods of blending satellite and gauge data to estimate near real-time daily rainfall for Australia. **Journal Of Hydrology,** v.493, p.105-114, 2013. Elsevier BV.

FENSTERSEIFER, C. A. **Qualidade das estimativas de precipitações derivadas de satélites na bacia do Alto Jacuí-RS.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS. 2013. 126 p.

GRISON, F. Estudo da geometria hidráulica do rio dos bugres, no município de rio negrinho - SC**.** Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC. 2013. 242 p.

HUFFMAN, G. J. et al. The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis: Quasi-Global, Multi-Year, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scale. **Journal Hydrometeor**, v.8, n.1, p.38-55. 2007.

KUREK, R. K. M.; TASSI, R.; PICCILLI, D. G. A. Aplicabilidade da precipitação estimada pelo satélite TRMM na modelagem chuva-vazão: uma análise na sub-bacia do Rio Guaporé/RS. **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos,** Brasília-DF, p.1-8, 2015.

LIU, J. et al. Evaluation of Three Satellite Precipitation Products TRMM 3B42, CMORPH, and PERSIANN over a Subtropical Watershed in China. **Advances In Meteorology,** v.2015, p.1-13, 2015. Hindawi Publishing Corporation.

MONTEIRO, J. A. F. et al. Accuracy of grid precipitation data for Brazil: application in river discharge modelling of the Tocantins catchment. **Hydrology Process,** v.30, n.9, p.1419-1430, 2015. Wiley-Blackwell.

MORENO, H. A. et al. Utility of Quantitative Precipitation Estimates for high resolution hydrologic forecasts in mountain watersheds of the Colorado Front Range. **Journal Of Hydrology,** v.438-439, p.66-83, 2012. Elsevier BV.

LIU, J. et al. Evaluation of Three Satellite Precipitation Products TRMM 3B42, CMORPH, and PERSIANN over a Subtropical Watershed in China. **Advances In Meteorology,** v.2015, p.1-13, 2015. Hindawi Publishing Corporation.