Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Estimativa de cheias em bacias hidrográficas com base em previsões de precipitação por conjunto

Cinthia Mara Santos Martins¹, Benedito Cláudio da Silva², Nívea Adriana Dias Pons³

¹ MSc. em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, CEP 37500-903, Itajubá, Minas Gerais. (35) 3629-1101. cinthia.msantos87@gmail.com. (autor correspondente). ² Professor Dr. Adjunto, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, CEP 37500-903, Itajubá, Minas Gerais. (35) 3624-1449. silvabenedito@unifei.edu.br. ³ Dra. Professora Associada, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, CEP 37500-903, Itajubá, Minas Gerais. (35) 3624-1484. npons@unifei.edu.br.

Artigo recebido em 26/07/2018 e aceito em 04/02/2019

RESUMO

Bacias hidrográficas são normalmente suscetíveis a inundações devido à associação de fatores ambientais, climáticos e antrópicos. Dentre os métodos utilizados para mitigar os prejuízos provocados por inundações, o sistema de alerta contra cheias pode ser considerado como um dos mais efetivos, devido ao custo relativamente baixo. Neste contexto, o presente trabalho apresenta a avaliação de um modelo de previsão de vazão para os municípios de inseridos na bacia do rio Sapucaí, localizada na região sul do Estado de Minas Gerais. Para isso, é realizada a integração entre o modelo hidrológico MGB-IPH e o modelo atmosférico Eta. São utilizadas previsões de precipitação por conjunto do modelo Eta, que são assimiladas pelo modelo MGB-IPH para gerar previsões de vazão com antecedência de até 5 dias. Os resultados mostram que é possível obter previsões úteis para sistemas e alerta com até 3 dias de antecedência e os melhores resultados são para bacias com maior área de drenagem.

Palavras-chave: modelagem hidrológica; escoamento superficial; precipitação.

Estimation of floods in river basins based on ensemble precipitation forecasts

ABSTRACT

Watersheds are normally susceptible to flooding due to the association of environmental, climatic and anthropogenic factors. Among the methods used to mitigate damage caused by floods, the flood warning system can be considered one of the most effective because of the relatively low cost. In this context, the present work presents the evaluation of a flow forecasting model for the municipalities of the Sapucaí river basin, located in the southern region of the State of Minas Gerais. For this, the integration between the hydrological model MGB-IPH and the atmospheric model Eta. Ensemble precipitation forecasts of Eta model are used, which are assimilated by the MGB-IPH model to generate flow forecasts up to 5 days in advance. The results show that it is possible to obtain useful predictions for systems and alerts up to 3 days in advance and the best results are for basins with greater drainage area.

Keywords: hydrology models; runoff; rainfall

Introdução

No Brasil os problemas relacionados à inundação são constantes, o que reflete em impactos ao meio ambiente e a sociedade que está inserida no mesmo. Os impactos geram prejuízos e danos, que muitas vezes são irreparáveis. Com o passar dos anos a previsão de cheias, associadas aos impactos sociais, econômicos e sanitários, tem crescido no cenário brasileiro, devido aos danos que as inundações vem causando ao país nas últimas décadas, o que deixou o Brasil entre os dez

lugares mais atingidos por enchente no mundo, segundo o Banco de Dados Internacional de Desastres EM-DAT (Fan, 2015).

A previsão da vazão envolve a estimativa do escoamento da água com antecedência no tempo, que é uma ferramenta utilizada no gerenciamento dos recursos hídricos para minimizar as incertezas do clima (Silva et al., 2006). De acordo com os mesmos autores, a previsão pode ser realizada em curto prazo, com

antecedência de poucas horas até aproximadamente 14 dias, e em longo prazo, com antecedência de meses. No Brasil o setor elétrico é o que mais utiliza a previsão de vazão, como recurso para o planejamento e operação de reservatórios para geração de energia (Santos e Oliveira, 2016; Fan et al., 2017; Silveira et al., 2017). Quando se trata de alerta de enchente, o uso da previsão de vazão ainda está no início, devido a disponibilidade limitada dos dados de vazão e precipitação em tempo real com resolução espacial e temporal adequadas (Alfieri e Thielen, 2015; Reis et al., 2016; Artinyan et al. 2016; Azam et al., 2017; Negrão et al., 2017; Rodriguez et al., 2017; Souza et al., 2017). No Brasil, um exemplo bem-sucedido de previsão de vazão para alerta de enchentes é o Sistema de Alerta Contra Enchentes do Rio Doce, operado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) em parceria com a Agência Nacional de Águas (ANA) e o Instituto Mineiro de Gestão de Águas (IGAM). Este sistema é operado desde 1996, beneficiando cerca de 15 municípios, localizados nos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo (CPRM, 2018). Este sistema vem sendo ampliado e atualmente mais 15 bacias estão sendo atendidas.

Para previsão de vazão de curto prazo, que é o foco deste trabalho, existem diversas metodologias. O método a ser escolhido depende de vários fatores: escala da bacia, tempo de deslocamento da onda da cheia, recursos disponíveis e dos resultados necessários. Então, para realizar a previsão de vazão, podem ser utilizadas metodologias baseadas em: propagação de ondas de cheias, transformação de chuva em vazão e transformação de chuva em vazão com informação adicional de previsão quantitativa de precipitação (Fan, 2015)

As modificações dos recursos naturais, causada pela ação antrópica, influenciam nos processos hidrológicos, podendo resultar em eventos extremos, como inundações, estiagens, produção e transporte de sedimentos, entre outros (Blainski et al., 2017; Passos, 2017; Siqueira, 2017; Magalhães e Vieira, 2018). Juntamente com isto, surgiu nas últimas décadas a preocupação com problemas que se manifestam em de grande escala, como as mudanças climáticas e as alterações do uso do solo, o que motivou o desenvolvimento dos estudos voltados para hidrologia de grandes bacias. Com isso, Collischonn et al. (2007) desenvolveram com o foco nas bacias da América do Sul, o modelo MGB-IPH (Modelo de Grandes Bacias), que é do tipo conceitual e distribuído. Este modelo utiliza equações físicas e conceituais para simular o ciclo hidrológico, sua estrutura se divide em dois

módulos: balanço hídrico no solo e geração de escoamento a partir da chuva; e outro módulo de propagação de vazões ao longo da rede de drenagem (Pontes et al., 2015).

O modelo MGB-IPH também é conhecido como modelo de transformação chuva-vazão, porque ele utiliza como dados de entrada a chuva e a vazão observada, além de dados de previsão de precipitação, resultando na vazão prevista para o futuro (Paiva et al., 2013). De acordo com Merkurjeva et al. (2015), a utilização de um modelo de transformação chuva-vazão é a melhor solução para prever inundações e emitir alertas com antecedência para a comunidade em situação de risco. Os mesmos autores mostraram que este tipo de sistema de alerta no Brasil foi testado em alguns lugares do país, tais como: bacia do Rio Paraopeba, localizada no sudeste do Brasil, bacia do rio São Francisco e do rio Tocantins.

Na literatura é possível encontrar vários estudos que envolvem o uso de previsão por conjunto (ensemble) na previsão hidrológica, principalmente em locais onde as previsões meteorológicas são mais difíceis, gerando maior incerteza. Neste contexto, em alguns trabalhos foram feitas a comparação entre a previsão por conjunto e a previsão determinística para estudar a ocorrência de cheias. No estudo de Alfieri et al. (2014), foi utilizado o modelo EFAS para realizar a previsão de vazão na Europa. Com os métodos de avaliação do resultado, os autores conseguiram mostrar que o modelo tem destreza para representar médias e pequenas bacias da região para um horizonte de até 10 dias de previsão, porém, para as bacias menores e localizadas em áreas com relevo acidentado, os resultados não foram satisfatórios. Mais recente, um estudo elaborado por Ye et al. (2016) para o analisar inundações do rio Yi, também utilizou previsões disponíveis na base de dados TIGGE. Neste caso foram escolhidos três EPS: ECMWF, NCEP e CMA. Esses dados foram inseridos no modelo hidrológico distribuído TOPX. Os resultados mostraram que a interação entre os modelos hidrológicos e meteorológicos contribuiu, de forma satisfatória, para a previsão de vazão, resultando em valores previstos próximos dos observados. Além disso, os autores ainda concluíram que com o acoplamento dos modelos hidrológicos e meteorológicos foi possível prever com precisão a ocorrência dos picos e a probabilidade de ocorrência de cheia, o que proporcionou base teórica para tomada de decisão.

Embora as pesquisas sobre previsão de vazão por conjunto estejam crescendo, no Brasil ainda é muito recente. Um dos primeiros trabalhos

abordando este assunto foi o de Calvetti (2011), no qual foram avaliadas as previsões para a bacia do rio Iguaçu (24.000 km²). Neste caso, o autor utilizou o modelo hidrológico TopModel e o modelo atmosférico WRF (*Weather and Research Forecasting*). Com o modelo WRF foram geradas as previsões de precipitação por conjunto, composta por 10 membros e resolução de 5 km. Os resultados mostraram que a previsão por conjunto teve um desempenho superior ao da previsão determinística. Meller (2012) utilizou o modelo hidrológico MGB-IPH para realizar a previsão de cheias por conjunto em curto prazo da bacia do rio Paraopeba (12.150 km²), no qual os resultados mostraram que a previsão por conjunto obteve um desempenho superior ao da previsão determinística. O autor ainda concluiu que houve um aumento na proporção de previsões corretas e, conseqüentemente, diminuição da ocorrência de alarmes falsos, principalmente para os limiares de vazões mais altas, que são de extrema importância para a previsão de cheias. Fan (2015) também utilizou o modelo MGB-IPH para realizar previsão de vazão para três bacias hidrográficas brasileiras: Alto São Francisco, Doce e Tocantins. E o mais recente foi um estudo elaborado por Siqueira et al. (2016), também foi utilizado o modelo MGB-IPH para realizar previsão de cheias por conjunto na bacia do Taquari-Antas/RS, que também concluiu que as previsões por conjunto apresentam potencial para servir como informação para complementar o sistema de alerta contra cheias. Então, no mesmo contexto, este trabalho tem como objetivo principal a avaliação da aplicabilidade da previsão de cheia por conjunto para a bacia do Sapucaí, através da integração dos modelos hidrológicos e meteorológicos.

Material e métodos

Descrição Geral

A metodologia proposta neste trabalho consiste da integração de modelos atmosférico e hidrológico, através da assimilação de dados de chuva observada até o início da previsão e a previsão de precipitação a partir deste instante. O modelo atmosférico prevê o comportamento da precipitação, tanto a quantidade quanto a variabilidade espaço-temporal, já o modelo hidrológico descreve as características físicas da bacia hidrográfica, tais como topografia, vegetação e sistema de drenagem.

Foram utilizadas previsões de precipitação por conjunto, geradas pelo modelo atmosférico Eta, usado pelo CPTEC/INPE, com resolução de 5 km.

A previsão foi realizada sempre para até cinco dias a frente, considerando quatro membros: Controle (CNTRL), Zhao, Kain-Fritsch (KF) e Kain-Fritsch com Fluxo de Momento (KFMX).

O modelo hidrológico utilizado foi o MGB-IPH, que é um modelo de base física do tipo distribuído (Fan, 2015). Com ele, foram geradas as previsões de vazão em valores médios diários. Este modelo necessita de dados espaciais de entrada que exigem extensa manipulação, os quais foram obtidos através de imagens de satélite, mapas de pedologia, mapas de uso e ocupação, modelo numérico do terreno e séries históricas de variáveis, como: precipitação, vazão, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e radiação solar ou insolação.

Bacia do rio Sapucaí

O rio Sapucaí pertence à bacia do Rio Grande, nasce a mais de 1750 m de altitude em Campos do Jordão, desaguando no Lago de Furnas (MG), percorrendo aproximadamente 248 km. Abrange um total de 51 municípios, sendo apenas 3 no Estado de São Paulo, e 48 no Estado de Minas Gerais. Os terrenos da bacia são ocupados predominantemente com agriculturas, pastagens e remanescentes de matas de galerias e araucárias (IGAM, 2010).

O Rio Sapucaí é dividido em três segmentos (Figura 1): curso superior (Alto Sapucaí), curso médio (Médio Sapucaí) e curso inferior (Baixo Sapucaí). Neste trabalho foi dado enfoque para os municípios de Itajubá e Santa Rita do Sapucaí, que são algumas das cidades da bacia que mais sofrem com inundações.

O município de Itajubá está localizado as margens do rio Sapucaí, na região do Alto Sapucaí, com as seguintes coordenadas 22°30'30" de latitude Sul e 45°27'20" de longitude Oeste. Segundo o censo demográfico do IBGE (2016), a população aproxima-se de 96.523 habitantes, abrangendo uma área de aproximadamente 295 km². Santa Rita do Sapucaí também se desenvolveu as margens do rio Sapucaí e está localizada na região do médio Sapucaí, com as coordenadas 22°15'08" de latitude Sul e 45°42'12" de longitude Oeste. A estimativa da população para 2016, segundo o IBGE é de 41.886 habitantes, e área territorial de aproximadamente 353 km².

Os municípios de Itajubá e Santa Rita do Sapucaí já sofreram com grandes inundações, devido à alta vulnerabilidade. A grande maioria dos rios que pertencem à bacia do Sapucaí são susceptíveis a inundação. Neste contexto, a previsão de vazão é uma ferramenta para alertar

sobre ocorrência de enchente na região, podendo reduzir e evitar os danos causados a população.

Figura 1. Municípios pertencentes à Bacia do Rio Sapucaí. Fonte: Adaptado de IGAM (2010).

Na Tabela 4.1 encontra-se o histórico das cheias que ocorreram no município de Itajubá até o ano 2000, com sua respectiva magnitude (Pinheiro, 2005).

Tabela 1. Histórico das inundações em Itajubá.

Ano	Altura (m)	Vazão (m ³ /s)	Tempo de Retorno (anos)
1874	9,55	973,3	141,79
1919	7,17	291,8	21,1
1929	8,58	635,7	1781
1945	8,47	601,3	1139
1957	8,42	586,0	934,7
1991	7,37	327,3	33,1
2000	8,30	550,3	588,9

Fonte: Adaptado de Pinheiro (2005)

O evento de 2000, umas das piores para o município, a chuva acumulada nos dias 2, 3 e 4 de janeiro atingiu valores máximos de 350 mm sobre

a bacia. Neste episódio, o nível do rio Sapucaí ultrapassou a marca dos 8 metros, atingindo praticamente toda a cidade (Pinheiro, 2005).

Assim como Itajubá, o município de Santa Rita do Sapucaí também sofre com as inundações recorrentes. De acordo com Sarlas (2010), um dos maiores problemas que o município enfrenta, referente as enchentes, são as áreas planas próximas ao leito do rio, onde a população se fixou sem nenhum planejamento. Geralmente, quando ocorrem inundações grandes, atingem os dois municípios simultaneamente.

Dados Hidrometeorológicos

Os dados de vazão e chuva observados foram obtidos através de 14 estações fluviométricas (Figura 2) e 31 estações pluviométricas da ANA. Para complementar, ainda foram utilizadas estações do INMET. Como não foram encontrados dados meteorológicos suficientes, optou-se por utilizar as normais climatológicas.

Figura 2. Localização das estações fluviométricas que foram utilizadas como exutório para as sub-bacias.

Dados fisiográficos

O mapa pedológico foi digitalizado com base no projeto RADAM Brasil, que está na escala 1:1.000.000. Posteriormente o mapa foi reclassificado e os solos foram agrupados de acordo com o potencial de escoamento superficial, sendo considerada solo A aquela que possui baixo potencial de geração de escoamento superficial, solo B médio potencial de geração de escoamento superficial e, por fim, solo C alto potencial de geração de escoamento superficial.

O mapa de uso e ocupação do solo foi elaborado através da classificação multiespectral, optando pelo método de classificação supervisionada. Para este processo, foram obtidas imagens do satélite Landsat 5, com datas de 2010 e 2011 e de resolução 30 metros, obtidas no banco de dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

A discretização é a divisão da bacia em minibacias, para descrever melhor a variabilidade espacial dos processos e das variáveis de entrada. Isso é necessário porque o MGB é um modelo do tipo distribuído. Então, a bacia do Sapucaí foi discretizada com base no modelo numérico do

terreno (MNT), com resolução de 90 metros, disponibilizado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Os postos fluviométricos foram utilizados como o exutório de cada sub-bacia, então, foi gerado um mapa com 14 sub-bacias, além do mapa da bacia do Sapucaí discretizado em 229 minibacias.

Ajuste do Modelo Hidrológico

A calibração do modelo hidrológico foi realizada para toda a bacia do rio Sapucaí, através da utilização dos dados observados do período de 1980 a 1989. Para avaliar a qualidade das previsões foram utilizados dois coeficientes:

- Coeficiente de *Nash-Sutcliffe* das vazões diárias

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - Q_{cal})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (1)$$

- *Nash-Sutcliffe* dos logaritmos das vazões diárias

$$NS_{\log} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (\log Q_{obs} - \log Q_{cal})^2}{\sum_{t=1}^n (\log Q_{obs} - \overline{\log Q_{obs}})^2} \quad (2)$$

Onde: t indica o intervalo de tempo; n é o número de intervalos de tempo; Q_{cal} é a vazão calculada no posto; Q_{obs} é a vazão observada; $\overline{Q_{obs}}$ é a média das vazões observadas.

Como o objetivo do ajuste é a previsão de vazões de cheia, optou-se por dar um peso maior ao Coeficiente de Nash-Sutcliffe das vazões diárias (Equação 4.1), por proporcionar um melhor ajuste das vazões mais elevadas. Este coeficiente pode assumir valores no intervalo de $(-\infty, 1]$, sendo que a previsão é considerada perfeita quando NS é igual a 1 (Oliveira e Lima, 2016).

Previsão de Precipitação por Conjunto

Foram disponibilizados arquivos de dados de previsão de precipitação do modelo Eta, gerados pelo CPTEC, para o período de dezembro de 1999 a dezembro de 2013. A previsão foi realizada sempre para cinco dias a frente, considerando quatro membros com diferentes esquemas de parametrização: Controle (CNTRL), Zhao, Kain-Fritsch (KF) e Kain-Fritsch com Fluxo de Momento (KFMX).

Análise Estatística da Previsão de Vazão

Para avaliar a qualidade dos resultados da previsão foram definidas algumas medidas de precisão, baseadas nos erros e/ou correspondência entre os valores de vazões previstas e observadas. Neste aspecto foram consideradas como medidas de desempenho o erro médio relativo (EMR), o Coeficiente de Eficiência (CM) e o Diagrama de Dispersão (DD).

$$EMR = \frac{\sum_{t=1}^n |Q_{prev} - Q_{obs}|}{\sum_{t=1}^n Q_{obs}} \quad (3)$$

$$CM = 1 - \left[\frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - Q_{prev}^m)^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{prev}})^2} \right] \quad (4)$$

Onde: t indica o intervalo de tempo; n é o número de intervalos de tempo; Q_{prev} é a vazão prevista pelo modelo; Q_{obs} é a vazão observada; Q_{prev}^m é o

valor previsto de cada membro e N é o número total de previsões.

O erro médio relativo (Equação 3) fornece um viés geral da previsão. Da mesma forma que o EMA, para calcular o EMR é necessário resumir as previsões em uma única previsão, utilizando assim, a média das previsões dos membros.

O Coeficiente de Eficiência - CM (Equação 4) compara o desempenho da média das previsões em relação a cada um dos membros de previsão (Controle, KF, KFMX e ZHAO). Valores de CM positivo indicam que determinado membro tem melhor desempenho quando comparado a média dos membros. Por outro lado, valores negativos indicam que a média das previsões tem melhor desempenho.

O diagrama de dispersão não é uma medida de desempenho e sim uma ferramenta para análises exploratórias, com ele é possível visualizar a o grau de associação entre as duas variáveis (Meller, 2012).

Para a análise probabilística, foi adotado o Brier Score (BS) como método de avaliação de desempenho. Ele representa o erro médio quadrático da probabilidade de uma previsão para a ocorrência de um evento determinado. No caso de uma previsão perfeita, que acerta a ocorrência ou não ocorrência do evento determinado, o BS (Equação 5) sempre será zero (Fan, 2015). A faixa de variação do BS fica entre 0 e 1, sendo que os valores próximos de zero indicam melhores resultados de previsão (Meller, 2012).

$$BS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (pp_i - po_i)^2 \quad (5)$$

Onde: n é o número de pares de previsão-observação; pp é a probabilidade de ocorrência prevista do evento e po é a probabilidade de ocorrência observada do evento, ou seja, zero para não ocorrência do evento e 1 para ocorrência do evento.

Resultados e discussão

Ajuste do modelo hidrológico

O ajuste do modelo foi realizado durante o período de 01/01/1980 a 31/12/1989. Na Tabela 2 é apresentado para cada estação fluviométrica o resumo dos coeficientes utilizados para avaliar da qualidade do ajuste do modelo. Nesta tabela é possível observar, de maneira geral, que o ajuste do modelo foi satisfatório para a maioria das sub-bacias, apresentando os coeficientes de Nash-Sutcliffe e Nash-Sutcliffe dos logaritmos próximos ou maiores do que 0,70, o que é considerado

aceitável para calibração de modelo hidrológico. Para as sub-bacias que possuíam menor área de drenagem o ajuste não foi considerado satisfatório, os baixos valores do *Nash-Sutcliffe* para as estações de São Bento do Sapucaí, Delfim Moreira e Bairro Santa Cruz podem ser explicados por apresentarem áreas de drenagem pequenas, o que dificulta o

ajuste do modelo. Para melhor visualizar o ajuste, foram construídos os hidrogramas comparando as vazões calculadas pelo modelo com as vazões observadas. Nas Figuras 3, 4 e 5, encontram-se, respectivamente, os hidrogramas para os municípios de Itajubá, Santa Rita do Sapucaí e Paraguaçu.

Tabela 2. Ajuste do modelo MGB à bacia hidrográfica do rio Sapucaí

<i>Nome da Estação</i>	<i>NS</i>	<i>NS_{log}</i>	<i>Área de drenagem (km²)</i>
São Bento do Sapucaí	0,263	0,078	475
Cambuí	0,516	0,605	116
Delfim Moreira	0,246	0,064	112
Bairro Santa Cruz	0,338	0,381	268
Itajubá	0,768	0,813	860
Brazópolis	0,825	0,818	156
São João de Itajubá	0,669	0,690	560
Conceição dos Ouros	0,712	0,719	1310
Ponte do Rodrigues	0,810	0,753	676
Santa Rita do Sapucaí	0,669	0,810	2810
Vargem do Cervo	0,835	0,864	486
Careaçu	0,760	0,860	7330
Paraguaçu	0,715	0,774	9410

No hidrograma para Itajubá (Figura 3), verificou-se que as curvas das vazões observadas e calculadas estão praticamente sobrepostas, comprovando que o ajuste foi satisfatório. Porém, em alguns períodos, o modelo está superestimando a vazão, e em outros momentos ele está subestimando a vazão. Nota-se que o modelo teve dificuldade de representar os picos, o que já era esperado, devido a pequena área de drenagem da sub-bacia.

Para Santa Rita do Sapucaí é possível observar no hidrograma (Figura 4) que as curvas das vazões observadas e calculadas estão sobrepostas, porém com ajuste um pouco inferior quando comparado ao de Itajubá. O que também pode ser confirmando pelos valores do coeficiente de *Nash-Sutcliffe*, que também ficou um pouco

menor do que o de Itajubá. Mas, de maneira geral, considera-se que o ajuste para esta bacia também foi satisfatório.

O resultado obtido no ajuste da sub-bacia de Paraguaçu (Figura 5) foi parecido com o das outras sub-bacias. A calibração foi considerada satisfatória, com valor do coeficiente de Nash-Sutcliffe aceitável para o desempenho de um modelo hidrológico. Percebe-se, assim como as sub-bacias anteriores, que as curvas de vazão observada e calculada praticamente se sobrepõe, porém há alguns períodos de superestimação e outros de subestimação, o que foi verificado para todas as sub-bacias. Esta inconsistência dos dados pode ser devido a deficiência do modelo, possivelmente por erros no processo de estimativa das vazões, que é feito através de balanço hídrico.

Figura 3. Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Itajubá

Figura 4. Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Santa Rita do Sapucaí

Figura 5. Hidrograma das vazões calculadas e observadas da estação de Paraguaçu

Previsão da Vazão

Nesta etapa do estudo, foram utilizados os dados de chuva observada até o início da previsão e a partir do primeiro dia da previsão foram utilizados os dados de previsão de precipitação gerado pelo modelo ETA. Para avaliar os resultados foram analisadas três sub-bacias: Itajubá, Santa Rita do Sapucaí e Paraguaçu. As duas primeiras foram escolhidas por estar em uma região onde ocorre inundações frequentes e, a última foi escolhida por ser a sub-bacia mais a jusante, totalizando uma área de drenagem bem próxima da área total da bacia do Sapucaí.

Para Itajubá o melhor resultado foi para a previsão com um dia de antecedência (Figura 6), na qual foi possível observar menor diferença entre os membros e o modelo também conseguiu prever a subida do nível, mas com um dia de atraso, prevendo que o nível subiria no dia 01/01/2000. Na mesma figura, nota-se ainda que há um período sem dados observados, que é justamente o período em que a cidade ficou inundada e as estações ficaram cobertas pela água, por isso não foi possível obter os dados.

O comportamento encontrado para o posto de Itajubá, foi o mesmo para as outras estações, ou seja, as previsões com 5, 4, 3 e 2 dias de antecedência não geraram bons resultados para a previsão de vazão.

Para a estação de Santa Rita do Sapucaí, um fato que chamou a atenção foi a antecipação dos picos das cheias (Figura 7). Este problema pode estar relacionado a existência de planície de inundação entre os municípios de Itajubá e Santa Rita do Sapucaí, que quando inundam, diminuem a velocidade de escoamento, o que não é considerado pelo modelo, gerando assim, a antecipação dos picos de cheia.

O período entre 25/12/1999 até 10/01/2000 é importante de ser analisado devido a ocorrência de uma das piores inundações na região, porém, para o município de Santa Rita do Sapucaí não foi possível fazer análise desse período, assim como foi feita para Itajubá, porque a falta de dados observados impossibilitou a verificação do momento em que o nível da água subiu, e também não tinha como fazer as comparações entre vazão prevista e observada.

Figura 6. Previsão de vazão por conjunto para a sub-bacia de Itajubá com 1 dia de antecedência.

Figura 7. Previsão de vazão por conjunto para a sub-bacia de Santa Rita do Sapucaí com 1 dia de antecedência.

Agora, analisando o período entre 25/12/1999 até 10/01/2000 da sub-bacia de Paraguaçu, observa-se que os resultados foram melhores para 1 e 2 dias de antecedência (Figura 8 e Figura 9). O modelo conseguiu captar o momento da subida de nível (01/01/2000) com antecedência de até dois dias, porém ele superestimou o pico, não conseguindo, então, representar a magnitude do pico de maneira adequada. Esse erro pode estar associado a existência de planícies de inundação na região, que foi o mesmo problema detectado na análise da sub-bacia de Santa Rita do Sapucaí. Nestas figuras, nota-se, também, que a diferença entre os membros é mínima e, comparando a previsão para esta sub-bacia com as duas anteriores, é possível perceber que os resultados foram melhores, conseguindo boas previsões para até dois de antecedência. Isso pode estar relacionado ao fato desta sub-bacia ter maior área de drenagem, sendo melhor representada pelo modelo hidrológico.

Figura 8. Previsão de vazão por conjunto para a sub-bacia de Paraguaçu com 1 dia de antecedência

Figura 9. Previsão de vazão por conjunto para a sub-bacia de Paraguaçu com 2 dias de antecedência.

Análise estatística

Analisando o EMR, nota-se na Figura 10 que o erro cresce com o aumento da antecedência da previsão. Para Itajubá, observa-se que o erro varia entre 0,49 e 0,61, apresentando uma tendência a manter o mesmo patamar de erro a partir do terceiro dia de antecedência, que pode ser devido ao efeito da assimilação de dados deixar de influenciar no resultado. A sub-bacia de Santa Rita do Sapucaí apresentou EMR entre 0,37 e 0,64, com comportamento parecido com a de Itajubá, porém com um erro um pouco menor para o primeiro dia de antecedência. Para a sub-bacia de Paraguaçu o EMR variou entre 0,12 e 0,57, apresentando o mesmo comportamento também, ou seja, o erro cresce com o aumento do horizonte da previsão, porém, apresenta erros menores do que das sub-bacias anteriores, o que já era esperado por esta sub-bacia ter maior a maior área de drenagem. Então, com este método foi possível perceber que o erro médio apresentou valores menores apenas

para um dia de antecedência para as sub-bacias de Itajubá e Santa Rita do Sapucaí, e erro considerado baixo para até dois dias de antecedência para a sub-bacia de Paraguaçu.

Figura 10. Erro médio relativo para cada antecedência de previsão

Os diagramas de dispersão foram utilizados para analisar a associação entre os dados previstos e observados. Na Figura 11 encontra-se a comparação entre os valores de vazão observada e prevista para 1 dia de antecedência na sub-bacia de Itajubá, que foi o melhor resultado obtido. Neste caso, observa-se que há maior concentração dos pares observação/previsão acima da linha, o que indica a superestimativa da vazão. O mesmo comportamento foi verificado para a sub-bacia de Santa Rita do Sapucaí (Figura 12), com melhores resultados apenas para um dia de antecedência e, com o aumento do horizonte da previsão os dados previstos foram se distanciando dos observados. Além disso, também foi verificado que ocorreu a superestimativa da vazão.

Figura 11. Correlação entre vazão prevista e observada na sub-bacia de Itajubá

Figura 12. Correlação entre vazão prevista e observada na sub-bacia de Santa Rita do Sapucaí.

Para a sub-bacia de Paraguaçu (Figura 13 e 14), o resultado foi melhor quando comparado as outras duas sub-bacias, pois os pares observação/previsão estão bem mais próximos da linha e os resultados satisfatórios para até dois de antecedência.

Na Figura 13 encontra-se o diagrama para um dia de antecedência, no qual é possível perceber que os dados previstos estão muito próximos dos dados observados, assim como na Figura 14, que é o resultado para dois dias de antecedência. Neste último caso, a vazão prevista ainda está próxima da vazão observada, porém já perceptível o início dos espalhamentos destes dados, que com o aumento do horizonte da previsão e os pares de dados previstos/observados ficam mais dispersos e acima da linha, indicando, também, a superestimativa da vazão.

Figura 13. Correlação entre vazão prevista e observada na sub-bacia de Paraguaçu para 1 dia de antecedência.

Figura 14. Correlação entre vazão prevista e observada na sub-bacia de Paraguaçu para 2 dias de antecedência.

Também foi comparado o desempenho de cada membro (Controle, KF, KFMX e ZHAO) com a média do conjunto através do coeficiente CM, definido anteriormente pela Equação 4. Valores positivos de CM indicam que o resultado obtido com determinado membro é melhor do que o resultado obtido com a média dos membros. Em contrapartida, os resultados negativos indicam que o resultado com utilizando a média do conjunto é melhor do que com membro avaliado.

As Figuras 15, 16 e 17 mostram o desempenho de cada membro, comparado ao desempenho do conjunto dos membros das sub-bacias de Itajubá, Santa Rita do Sapucaí e Paraguaçu, respectivamente. Então, é possível observar que para as três sub-bacias o conjunto dos membros obteve melhor desempenho quando comparado a maioria dos membros, exceto o membro controle, que apresentou valores de CM positivo para ambas as sub-bacias, o que indica que o desempenho dele, individualmente, é superior ao da média dos membros. Com o membro ZHAO, verificou-se que, na maioria dos resultados para Santa Rita do Sapucaí e Paraguaçu, o CM ficou próximo de zero, indicando que o desempenho entre a média e o membro ZHAO é praticamente o mesmo. Já os membros KF e KFMX, em todos os

casos, resultaram em CM negativo, indicando melhor desempenho da média dos membros, ou seja, a média dos membros está mais próxima dos dados observados do que os membros KF e KFMX. É importante ressaltar que o CM não compara o desempenho dos membros entre si, ou seja, com este resultado não é possível afirmar que um membro tem desempenho melhor que outro, e sim, apenas uma comparação de cada membro com a média do conjunto.

Figura 15. Comparação entre o desempenho de cada membro com a média de todos os membros para a sub-bacia de Itajubá

Figura 16. Comparação entre o desempenho de cada membro com a média de todos os membros para a sub-bacia de Santa Rita do Sapucaí.

Figura 17. Comparação entre o desempenho de cada membro com a média de todos os membros para a sub-bacia de Paraguaçu.

Tabela 3. Vazões limites adotadas para a análise do Brier Score

Vazão Limite	Quantil	Condições hidrológicas hipotéticas	Vazão (m³/s)		
			Itajubá	Santa Rita do Sapucaí	Paraguaçu
Q20%	80%	Vazões típicas durante períodos de cheias	27,95	82,10	252,10
Q5%	95%	Vazões acima do normal, mas não são esperadas inundações	46,50	138,00	424,40
Q2%	98%	Possibilidade de vazões próximas ao limite da calha menor	66,25	177,00	515,80
Q1%	99%	Extravasamento da calha menor, com grande possibilidade de inundação	83,53	200,30	583,40

O Brier Score (BS) foi calculado considerando cada limiar de vazão separadamente e foram utilizados todos os membros do conjunto. Na Figura 18, na qual é possível observar os resultados de BS para sub-bacia de Itajubá, verificou-se que os resultados foram melhores para as vazões maiores, pois os valores de BS estão mais próximos de zero. Considerando o limiar de 27,95 m³/s (Q20%), o BS variou entre 0,41 para antecedência de 1 dia e 0,44 para 5 dias de antecedência, porém chegou a atingir 0,48 para 2 e 3 dias de antecedência. Para o limiar de 46,5 m³/s (Q5%), o BS apresentou o mesmo comportamento, variando entre 0,23 para 1 dia de antecedência e 0,28 para horizonte de 5 dias de previsão, apresentando o maior BS para 3 dias de antecedência. Os melhores resultados obtidos de BS foram para os maiores limiares, Q2% e Q1%, apresentando o valor de BS crescente de acordo com o aumento da antecedência da previsão.

Para sub-bacia de Santa Rita do Sapucaí é possível observar, na Figura 19, que o BS aumenta

Para o cálculo do BS é necessário ter um limiar de vazão, então, foi adotada a mesma metodologia de Meller (2012), que utilizou como base para os cálculos quatro limites de vazões, de terminados através de análise da série de dados observados de cada estação fluviométrica de 1980 a 2013. A Tabela 3 apresenta os limites utilizados neste estudo e as respectivas condições hidrológicas hipotéticas.

de acordo com o aumento do horizonte da previsão, sendo que os menores valores são para a antecedência de um dia. Os resultados de BS foram maiores para o limiar de 82,1 m³/s, chegando a atingir o valor de 0,44 para 5 dias de antecedência. Mas de maneira geral, considera-se que os resultados foram satisfatórios para a previsão com 1 dia de antecedência, no qual os resultados estão mais próximos de zero. Neste caso, também foi verificado que os resultados foram melhores para vazões maiores (Q1% e Q2%), o que está relacionado aos maiores níveis de vazão e ao alto risco de inundação.

Na análise de BS da sub-bacia de Paraguaçu (Figura 20), os erros aumentam com o aumento da antecedência da previsão. Nos primeiros intervalos de tempo (1 e 2 dias de antecedência) os valores de BS para os limites Q5%, Q2% e Q1% estão muito próximos, assumindo valores entre 0,02 a 0,05. Neste caso, verificou-se também que os resultados foram melhores para os limites de vazões maiores, o que

pode ser explicado pelo fato de o BS estar relacionado com probabilidade de excedência de um determinado limiar, e essa probabilidade é maior quanto menor for o limiar (Mendes, 2017). Então, de modo geral, o resultado pode-se considerar satisfatório, pois os valores estão próximos a zero, principalmente para as menores antecedências.

Figura 18. Resultado do Brier Score para a sub-bacia de Itajubá

Figura 19. Resultado do Brier Score para a sub-bacia de Santa Rita do Sapucaí

Figura 20. Resultado do Brier Score para a sub-bacia de Paraguaçu.

Conclusões

O presente estudo avaliou a aplicabilidade do modelo MGB-IPH à bacia do rio Sapucaí para a previsão de vazão de curto prazo, com o foco no auxílio ao alerta de inundações nos municípios de Itajubá e Santa Rita do Sapucaí.

Na aplicação do modelo hidrológico, a bacia do rio Sapucaí foi discretizada em 229 minibacias e 14 sub-bacias, que foram definidas utilizando os postos fluviométricos como exutório. Como os dados disponíveis estavam em intervalos diários, todo o procedimento foi feito considerando esse intervalo de tempo. De modo geral, foram obtidos valores significativos na etapa de calibração, com Coeficientes de Eficiência de *Nash-Sutcliffe* maior do que 0,70 para a maioria das sub-bacias, sendo que para a sub-bacia de Itajubá o Coeficiente foi de aproximadamente 0,77 e para Santa Rita do Sapucaí 0,67, que são valores considerados satisfatórios para modelagem hidrológica. Porém, o modelo teve dificuldade de ajustar as bacias com menor área de drenagem.

Para gerar as previsões de vazão, a variável precipitação foi alimentada pelo conjunto de previsões meteorológicas, obtidas com o modelo ETA, operado pelo CPTEC/INPE. A princípio, com a análise visual dos hidrogramas, foi observado que o modelo conseguiu atingir desempenho satisfatório apenas para um dia de antecedência, para as sub-bacias de Itajubá e Santa Rita do Sapucaí e, dois dias para a sub-bacia de Paraguaçu. Com as análises estatísticas, essa avaliação visual foi confirmada, pois o EMR mostrou que o erro era menor para as menores antecedências e aumentava de acordo com o horizonte da previsão, o que era esperado, pois com o aumento da antecedência, consequentemente, aumenta as incertezas. O EMR apresentou valores relativamente altos, sendo de aproximadamente 49% para um dia de antecedência para a sub-bacia de Itajubá e de 37% para Santa Rita do Sapucaí, considerando a mesma antecedência. A partir de dois dias de antecedência o EMR foi aumentando e chegou a mais de 60% para as duas sub-bacias citadas anteriormente. Apesar do EMR alto para essas duas sub-bacias, considera-se que o resultado foi aceitável por se tratar da previsão de uma região de difícil modelagem. Porém, para a sub-bacia de Paraguaçu, os resultados foram melhores, obtendo resultados satisfatórios com até dois dias de antecedência, visto que o EMR foi de 12% para o primeiro dia de antecedência e de 24% para o segundo dia. Mas, acredita-se que os resultados para esta sub-bacia foram melhores porque ela tem a maior área de drenagem e, com isso, o modelo conseguiu representar melhor. O mesmo

comportamento foi verificado com os diagramas de dispersão, no qual os resultados foram melhores para um dia de antecedência para Itajubá e Santa Rita do Sapucaí, e a partir do segundo dia de previsão os dados previstos começaram a se distanciar dos dados observados, já para Paraguaçu os dados começaram a dispersar a partir do terceiro dia de previsão, gerando bons resultados para uma antecedência de dois dias. O que é a grande vantagem da aplicação deste método, pois possibilita a emissão do alerta de inundação com antecedência suficiente para que a população consiga deixar a área de risco, além de facilitar a tomada de decisão pelo poder público.

Com o BS foi possível verificar a tendência de melhores resultados para limites maiores de vazão e, também, o aumento deste índice com o aumento da antecedência da previsão. Neste caso, assim como das outras análises estatísticas, os resultados para Paraguaçu também foram melhores do que para Itajubá e Santa Rita do Sapucaí. Então, de modo geral, o resultado foi considerado satisfatório para região de estudo, pois os valores estavam próximos a zero.

A previsão de vazão é um processo complexo e que depende de diversos fatores, que influenciam no resultado final. A qualidade dos dados disponíveis é fundamental para obter bons resultados. Então, alguns fatores que podem ter afetado o resultado da previsão são: as falhas na série de vazão observados; a localização da bacia do Sapucaí, que está em uma região de topografia acentuada, o que dificulta a previsão atmosférica, podendo afetar diretamente o resultado da previsão de precipitação, consequentemente a previsão de vazão e, por fim, o tempo de concentração menor do que um dia da bacia em estudo. Como os dados disponíveis estavam em intervalos diários, todo o processo foi feito usando este intervalo, mas, devido o tempo de concentração da bacia do rio Sapucaí ser menor do que um dia, o ideal seria que as previsões fossem feitas em intervalos menores do que um dia. É importante ressaltar ainda, que para a sub-bacia de Santa Rita do Sapucaí foi verificado a antecipação das cheias, o que pode ter sido causado devido as planícies de inundação desconsideradas pelo modelo.

Com este estudo, foi possível concluir que a aplicação do modelo MGB-IPH à bacia em estudo é possível, e este tipo de previsão, utilizando a previsão por conjunto é um método promissor, mas ainda necessita de melhorias, devido aos vários fatores, citados anteriormente, que interferiram no resultado. É importante os estudos nessa área, pois a aplicação deste método

proporciona uma antecedência maior da previsão, contribuindo para a emissão do alerta de cheia com antecedência e, com isso, diminuir o impacto das inundações sobre a população.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES pela concessão da bolsa de estudos a Cinthia Mara Santos Martins, ao CPTEC/INPE pela disponibilização das previsões do modelo Eta, ao CNPq e a FAPEMIG (APQ-00108-14) pelos recursos dos projetos de pesquisa que financiaram esta pesquisa.

Referências bibliográficas

- Alfieri, L., Thielen, J. 2015. A European precipitation index for extreme rain-storm and flash flood early warning. *Meteorological Applications* [online] 22, 3-13. Disponível: <https://doi.org/10.1002/met.1328>. Acesso: 15 dez. 2018.
- Alfieri, L., Pappenberger, F., Wetterhall, F., Haiden, T., Richardson, D., Salamon, P. 2014. Evaluation of ensemble streamflow predictions in Europe. *Journal of Hydrology* [online] 517, 913-922. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.035>. Acesso: 20 dez. 2018.
- Artinyan, E., Vincendon, B., Kroumova, K., Nedkov, N., Tsarev, P., Balabanova, S., Koshinchanov, G. 2016. Flood forecasting and alert system for Arda River basin. *Journal of Hydrology* [online] 541, 457-470. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.059>. Acesso: 05 jan. 2019.
- Azam, M., Kim, H.S., Maeng, S.J. 2017. Development of flood alert application in Mushim stream watershed Korea. *International Journal of Disaster Risk Reduction* [online] 21, 11-26. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.11.008>. Acesso: 18 dez. 2018.
- Blainski, E., Porras, E.A.A., Garbossa, L.H.P., Pinheiro, A. 2017. Simulation of land use scenarios in the Camboriú River Basin using the SWAT model. *Brazilian Journal of Water Resources* [online] 22. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/23180331.01171610>. Acesso: 15 mai. 2018.
- Calvetti, L. 2011. Previsão hidrometeorológica probabilística na bacia do alto Iguaçu – PR com os modelos WRF e TopModel. Tese (Doutorado). São Paulo, USP.
- Collischonn, W., Allasia, D., Silva, B.C. da., Tucci, C.E.M. 2007. The MGB-IPH model for large-

- scale rainfall - runoff modeling. *Hydrological Sciences Journal* [online] 52, 878-895. Disponível: <https://doi.org/10.1623/hysj.52.5.878>. Acesso: 16 dez. 2018.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil, 2018. SACE – Sistema de Alerta de Eventos Críticos. Brasília.
- Fan, F.M. 2015. Previsão por conjunto de vazões afluentes a reservatórios em grandes bacias hidrográficas brasileiras. Tese (Doutorado). Porto Alegre, UFRGS.
- Fan, F.M., Pontes P.R.M., Buarque D.C., Collischonn, W. 2017. Evaluation of upper Uruguay river basin (Brazil) operational flood forecasts. *Brazilian Journal of Water Resources* [online] 22. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.0217160027>. Acesso: 10 mai. 2018.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2015. Disponível: <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=313240>. Acesso: 04 de nov. 2015.
- IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2010. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Sapucaí. Belo Horizonte.
- Magalhães, R.C., Vieira, A.F.S.G., 2018. As Características Hidrológicas do solo de Várzea e sua Vulnerabilidade ao Processo de Terras Caídas na Amazônia Central (BR). *Revista Brasileira de Geografia Física* 11, 773-788.
- Meller, A. 2012. Previsão de cheias por conjunto em curto prazo. Tese (Doutorado). Porto Alegre, UFRGS.
- Mendes, J.M.M. 2017. Previsão de alerta de cheias em bacias regularizadas: Aplicação ao caso de uma bacia portuguesa. Tese (Doutorado). Porto, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto.
- Merkuryeva, G., Merkuryev, Y., Boris V. Sokolov, B.V., Potryashev, S., Zelentsov, V.A., Lektuers, A. 2015. Advanced river flood monitoring, modelling and forecasting. *Journal of Computational Science* [online] 10, 77-85. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jocs.2014.10.004>. Acesso: 20 mai. 2018.
- Negrão, A.C., Rodriguez, D.A., Chou, S.C., Medeiros, G.S., Camargo, C.P. 2017. Previsão de vazão de eventos extremos utilizando o modelo hidrológico distribuído mhd-inpe e previsões meteorológicas do modelo eta-inpe para uma alta resolução espacial – estudo de caso: São Luís do Paraitinga (SP). *Revista Brasileira de Cartografia* 69, 647-657.
- Oliveira, V.G. de., Lima, C. H. R. 2016. Previsões multiescala de vazões para o sistema hidrelétrico brasileiro utilizando ponderação bayesiana de modelos (BMA). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 21, 618-635.
- Paiva, R.C.D. de., Buarque, D.C., Collischonn, W., Bonnet, M.P.; Frappart, F., Calmant, S., Mendes, C.A.B. 2013. Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River Basin. *Water Resources Research* [online] 49, 1226-1243. Disponível: <https://doi.org/10.1002/wrcr.20067>. Acesso: 16 nov. 2018.
- Passos, F.O. 2017. Avaliação de impactos de mudanças no uso e manejo do solo sobre as vazões da Bacia do Ribeirão José Pereira, utilizando o Modelo SWAT. Dissertação (Mestrado). Itajubá, UNIFEI.
- Pinheiro, M.V. 2005. Avaliação técnica e histórica das enchentes em Itajubá – MG. Dissertação (Mestrado). Itajubá, UNIFEI.
- Pontes, P.R.M., Collischonn, W., Fan, F.M., Paiva, R.C.D., Buarque, D.C. 2015. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre 20, 888-904.
- Reis, J.B.C., Pons, N.A.D., Lopes, E.S.S. 2016. Monitoramento e alerta de inundação no município de Itajubá (MG) por regressão polinomial. *Geociências* [online] 35. Disponível: https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/35/volume35_1.html. Acesso: 03 abr. 2018.
- Rodriguez, D.A., Lopes, L.G., Carriello, F., Siqueira Júnior, J.L., Pinto, G.L., Tomasella, J., Chou, S.C. 2017. Previsões de cheias extremas nos horizontes sazonais e de curto e médio prazos na bacia do rio Madeira: estudo de caso da enchente de 30 de março de 2014 em Porto Velho. *Revista Brasileira de Cartografia* 69, 827-836.
- Santos, P.G.P., Oliveira, T.F. 2016. Modelagem e previsão de vazão afluente média mensal no rio Tocantins, usina hidrelétrica Tucuruí-Pará, Amazônia, Brasil. *Biota Amazônia* [online] 06, 9-16. Disponível: <http://dx.doi.org/10.18561/21795746/biotaamazonia.v6n2p9-16>. Acesso 07 jan. 2019.
- Sarlas, T.L.B. 2010. Elaboração de manchas de inundação para o município de Santa Rita do Sapucaí/MG, utilizando SIG. Dissertação (Mestrado). Itajubá, UNIFEI.

- Silva, B.C. da., Tucci, C.E.M., Collischonn, W. 2006. Previsão de Vazão com Modelos Hidroclimáticos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 11, 15-29.
- Silveira, C.S., Alexandre, A.M.B., Souza Filho, F.A., Junior, F.C.V., Cabral, S.L. 2017. Monthly streamflow forecast for National Interconnected System (NIS) using Periodic Auto-regressive Endogenous Models (PAR) and Exogenous (PARX) with climate information. *Brazilian Journal of Water Resources* [online] 22. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011715186>. Acesso: 15 mai. 2018.
- Siqueira, P.C. 2017. Cenários de uso do solo baseados na cobertura de Áreas de Preservação Permanente (APP) e simulação hidrológica na bacia do Rio Sapucaí. Dissertação (Mestrado). Itajubá, UNIFEI.
- Siqueira, V.A., Collischonn, W., Fan, F.M., Chou, S.C. 2016. Ensemble flood forecasting based on operational forecasts of the regional Eta EPS in the Taquari-Antas basin. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 21, 587-602.
- Souza, A.S., Curvello, A.M.L., Souza, F.L.S., Silva, H.J. 2017. A flood warning system to critical region. *Procedia Computer Science* [online] 109, 1104-1109. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.453>. Acesso: 18 dez. 2018.
- Ye, J.; Shao, Y.; Li, Z. 2016. Flood forecasting based on TIGGE precipitation ensemble forecast. *Advances in Meteorology* [online] 2016, 1-9. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/9129734>. Acesso: 25 jun 2018.