

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

PROVA DE CONCEITO DE ESTIMATIVA DE VAZÕES PARA PEQUENAS BACIAS SEM DADOS USANDO MODELAGEM HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA: ESTUDO PARA O RIO DOCE (MG)

Alexandre Abdalla Araujo¹; Fernando Mainardi Fan²; Rodrigo C.D. Paiva³; Mariane Moreira Ravanello¹; Saulo Aires de Souza¹; Teresa Luísa Lima de Carvalho¹; Marcos Irineu Pufal¹; Alexandre de Amorim Teixeira¹; Walter Collischonn⁴; Maria Eduarda Alves⁵;

Palavras-Chave – Modelagem Hidrológica, Regionalização, Rio Doce

INTRODUÇÃO

O conhecimento das vazões em cada trecho de rio é de fundamental importância para a realização de estudos de disponibilidade e balanço hídricos para subsidiar ações de planejamento e a gestão por parte dos tomadores de decisão. Todavia, dificuldades tecnológicas e operacionais atualmente impedem o monitoramento e medição de vazões em todos os corpos hídricos do planeta. Neste contexto, um dos principais desafios da hidrologia é estimar, de forma razoavelmente acurada, a vazão em rios não monitorados, motivando diversas pesquisas e iniciativas como as do PUB - *Prediction in Ungauged Basins* (Blosch et al. 2013).

Dada a variabilidade natural das vazões nos rios em função do tempo, muitas vezes, o desafio é simplificado através do uso de vazões de referência para representar a disponibilidade hídrica, tais como a vazão média de longo termo Q_{mlt} ou vazões da curva de permanência (Q95, Q90 ou Q50, por exemplo) cujos valores são utilizados em estudos de regionalização que orientam as tomadas de decisão pelo gestores de recursos hídricos.

Vazões de referência são, tradicionalmente, estimadas por métodos de regionalização de vazões (Tucci, 2002), onde modelos estatísticos de base empírica são desenvolvidos para relacionar estatísticas sobre as vazões observadas com variáveis explicativas, tais como área da bacia, precipitação média, declividade *etc.* Por outro lado, simulações de vazões em rios (em geral representadas por séries de dados diários) têm sido utilizadas para dar suporte à gestão de recursos hídricos em áreas relacionadas à segurança hídrica, previsão de cheias, navegação, agricultura e energia, entre outras.

Neste sentido, estimativas de vazões em locais sem dados podem ser obtidas com a utilização de modelos hidrológicos. No contexto brasileiro, existem diversas aplicações com o modelo MGB (Pontes et al., 2017) com diferentes finalidades. Entretanto, o uso de modelos hidrológicos distribuídos ainda não é um procedimento consolidado e comum em estudos hidrológicos. Este tipo de procedimento depende de uma aplicação criteriosa da modelagem para a região de estudo, seguido

1) Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), E-mail: alexandre.araujo@ana.gov.br

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

3) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS), rodrigo.paiva@ufrgs.br

4) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS), collischonn@iph.ufrgs.br

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

de uma validação rigorosa das simulações, utilizando os dados disponíveis e apresentando os erros e as métricas de desempenho resultantes.

Nesta linha, o presente trabalho apresenta estudo do tipo prova de conceito na aplicação de um modelo hidrológico distribuído, visando estimativas de vazões de referência, incluindo uma avaliação criteriosa das capacidades do modelo, a partir de testes cruzados de calibração e validação.

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

METODOLOGIA

Neste trabalho foram realizadas análises sobre os resultados das aplicações do modelo MGB (Collischonn et al., 2007; Pontes et al., 2017) com propagação Muskingum-Cunge, na região de cabeceira da bacia do rio Doce. O objetivo destas análises foi buscar entender o comportamento hidrológico dessa região-piloto, dividida em minibacias muito semelhantes às otobacias da Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO-2017-5k), a partir da calibração do modelo nas estações fluviométricas e da avaliação da qualidade da modelagem, a partir de validações do tipo “leave one gauge out”.

O cálculo foi feito a partir da geração de minibacias com limiar de área (*stream definition*) de 10 km², compatível com a BHO-2017-5K e com todas as estações fluviométricas corretamente hidrorreferenciadas (ou seja, localizadas nas minibacia corretas). A aplicação modelo MGB para a bacia do rio Doce foi concebida considerando um conjunto de 64 estações, com número pequeno de falhas nas séries no período homogêneo de 1960 a 2019, divididas em 11 subbacias (conforme Figura 1), o que corresponde a subbacias do próprio rio Doce ou de seus maiores afluentes: Xopotó, Piranga, do Carmo, Piracicaba, Santo Antônio, Suaçu-Grande e Manhuaçu.

Figura. 1 - Subbacias, principais rios e estações fluviométricas selecionadas na bacia do rio Doce.



desempenho na estimativa das vazões na minibacia da estação retirada, em termos da comparação entre os valores calculados e observados de 11 vazões de permanência (Q5, Q10, Q20, Q30, Q40, Q50, Q60, Q70, Q80, Q90 e Q95).

Um foco especial foi dado para a métrica F2 (NSlog), pois esta prioriza as vazões mínimas que, em geral, são de grande interesse para estudos de regionalização.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O conjunto de resultados deste item é oriundo das simulações para o período de 1960 a 2009, com os valores convergidos na calibração automática, utilizando os parâmetros de solo que determinaram o menor valor de F2 (Log-Nash das vazões) convergido.

Os resultados do primeiro experimento realizado, que foi a calibração (aqui chamada de V0) da subbacia SB 1 com as 6 estações fluviométricas são apresentados na Tabela 2.

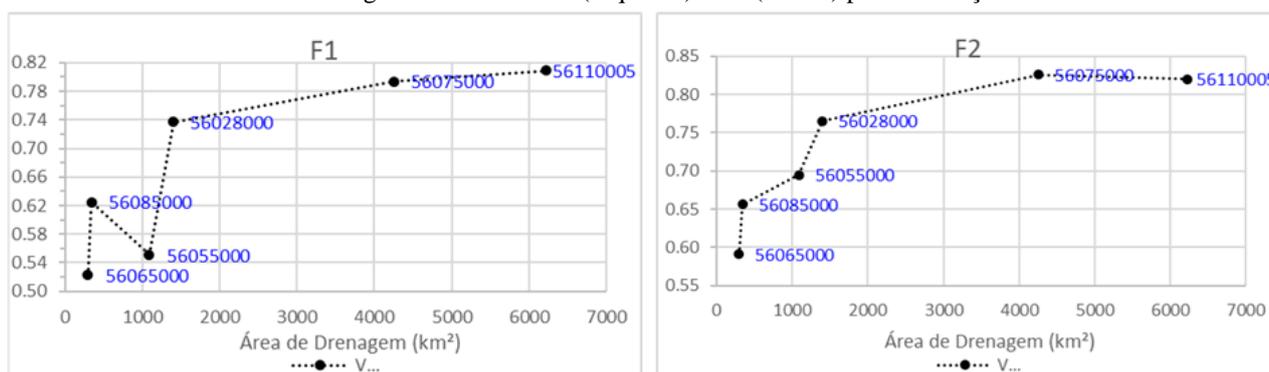
Tabela 2. Métricas de desempenho da calibração (V0) com as 6 estações para o período **1960-2009**, com os parâmetros de solo gerados a partir do menor **F2** convergido.

Código	A. D.(km ²)	F1	F2	F3
56065000	297	0.523	0.591	-6.638
56085000	342	0.625	0.656	6.260
56055000	1090	0.551	0.695	6.167
56028000	1400	0.737	0.765	-0.404
56075000	4260	0.794	0.826	-1.276
56110005	6230	0.809	0.820	-1.344

Em relação às métricas de desempenho F2 de V0 temos valores entre 0.591 e 0.826 e média dos valores de F2 das 6 estações de **0.7256** (NSlog). Para F1 temos valores de Nash entre 0.523 e 0.809. Para F3 temos erros de volume variando de -6.638% a 6.260%.

A figura 3 apresenta os valores de F1 e F2 para cada uma das estações

Figura 3. Métricas F1 (esquerda) e F2 (direita) para as estações.



Note que as estações estão ordenadas por área de drenagem (AD) e que, aparentemente, o desempenho das funções-objetivo F1 e F2 guarda alguma proporcionalidade em relação às ADs.

Os resultados do segundo experimento realizado, correspondente à validação, são apresentados a seguir. A metodologia de validação *leave one gauge out* aplicada com o modelo MGB para a SB 1 (com N=6 estações) pode ser representada por 6 calibrações (N=6) com 5 estações (N-1), sendo retirada uma das estações em cada calibração. Assim teremos, por exemplo, a validação V1,

representada pela calibração com as estações: 56055000, 56065000, 56075000, 56085000, 56110005, sendo retirada a estação 1 (56028000), e assim por diante.

Tabela 3. Esquema de validação adotado. V_n representa a calibração com a retirada da n -ésima estação correspondente (na mesma linha de V_n).

Validação	Estação retirada
V1	56028000
V2	56055000
V3	56065000
V4	56075000
V5	56085000
V6	56110005

Os valores das métricas para F2 da calibração (V0) e das validações (V0, V1, V2, V3, V4, V5 e V6) são apresentados na tabela 4. Note que, em todos os casos, o valor Log-Nash do conjunto de estações (1ª linha da tabela) foi maior que 0.7, caracterizando assim, um bom desempenho.

Tabela 4. Dados da calibração (V0) e validações V_n . A 1ª linha contém os valores da combinação dos F2 das estações. As colunas de 4 a 10 apresentam os respectivos valores de F2 para cada estação validada.

F2			0.7256	0.7247	0.7322	0.7666	0.7162	0.7447	0.7120
Código	MINI_10	AD	V0	V1	V2	V3	V4	V5	V6
56065000	3906	297	0.591	0.578	0.581	0.563	0.551	0.596	0.586
56085000	3965	342	0.656	0.659	0.659	0.674	0.676	0.657	0.670
56055000	4185	1090	0.695	0.706	0.677	0.712	0.727	0.687	0.700
56028000	4339	1400	0.765	0.764	0.773	0.772	0.786	0.779	0.770
56075000	4511	4260	0.826	0.844	0.824	0.841	0.849	0.833	0.835
56110005	4610	6230	0.820	0.837	0.824	0.836	0.840	0.829	0.827

Um primeiro resultado importante é que, para todas as estações, os valores das métricas obtidos na calibração, mantém-se, aproximadamente os mesmos, em todas as validações correspondentes, ou seja, para cada estação, observa-se que os valores F2, de V1 a V6, são semelhantes ao F2 de V0. Isto pode ser visto na Tabela 5, que representa os desvios percentuais da validação V_n em relação à calibração (V0) e na Figura 4, que representa graficamente esses resultados.

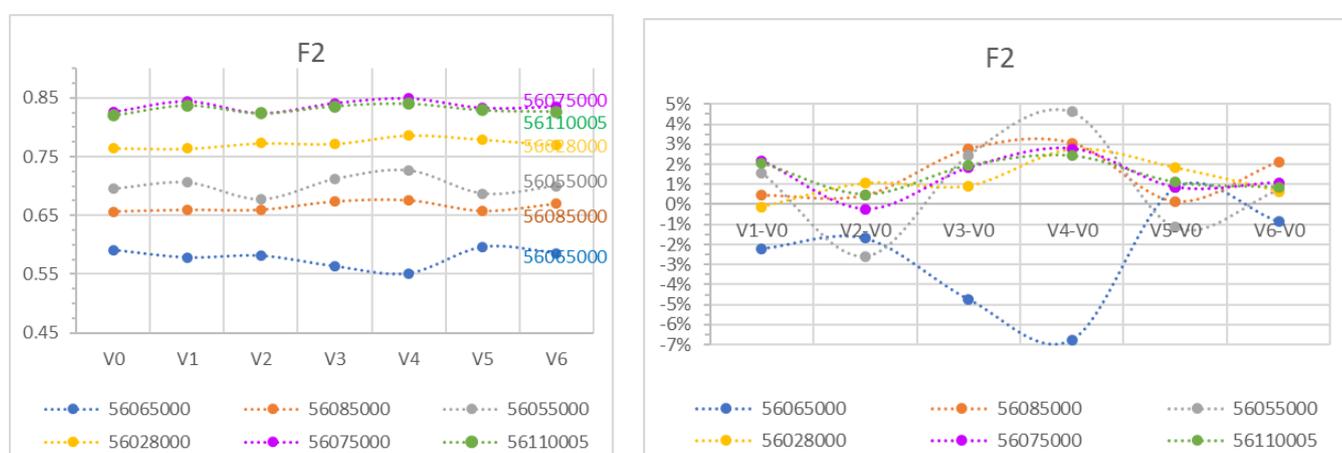
A estação que apresenta o maior desvio percentual foi a 56065000, que possui a menor área de drenagem. A estação 56055000 apresentou um desvio da ordem de 5%. Mas, no geral, os desvios foram considerados reduzidos (abaixo de 3%, em módulo, nos demais casos).

Esses resultados indicaram que, para o caso testado, não houve perda considerada relevante, em termos de desempenho, ao se retirar uma estação para simular a subbacia. Isto parece indicar que nas minibacias não monitoradas, e não apenas nas estações, os valores estimados foram razoáveis e da mesma ordem de grandeza do desvio apresentado nos locais das estações. Isto sugere uma boa perspectiva para regionalização de vazões com o MGB nesta bacia.

Tabela 5. Desvios percentuais entre valores de V_n e V_0 de cada estação.

F2							
Código	AD	V1-V0	V2-V0	V3-V0	V4-V0	V5-V0	V6-V0
56065000	297	-2%	-2%	-5%	-7%	1%	-1%
56085000	342	0%	0%	3%	3%	0%	2%
56055000	1090	2%	-3%	2%	5%	-1%	1%
56028000	1400	0%	1%	1%	3%	2%	1%
56075000	4260	2%	0%	2%	3%	1%	1%
56110005	6230	2%	0%	2%	2%	1%	1%

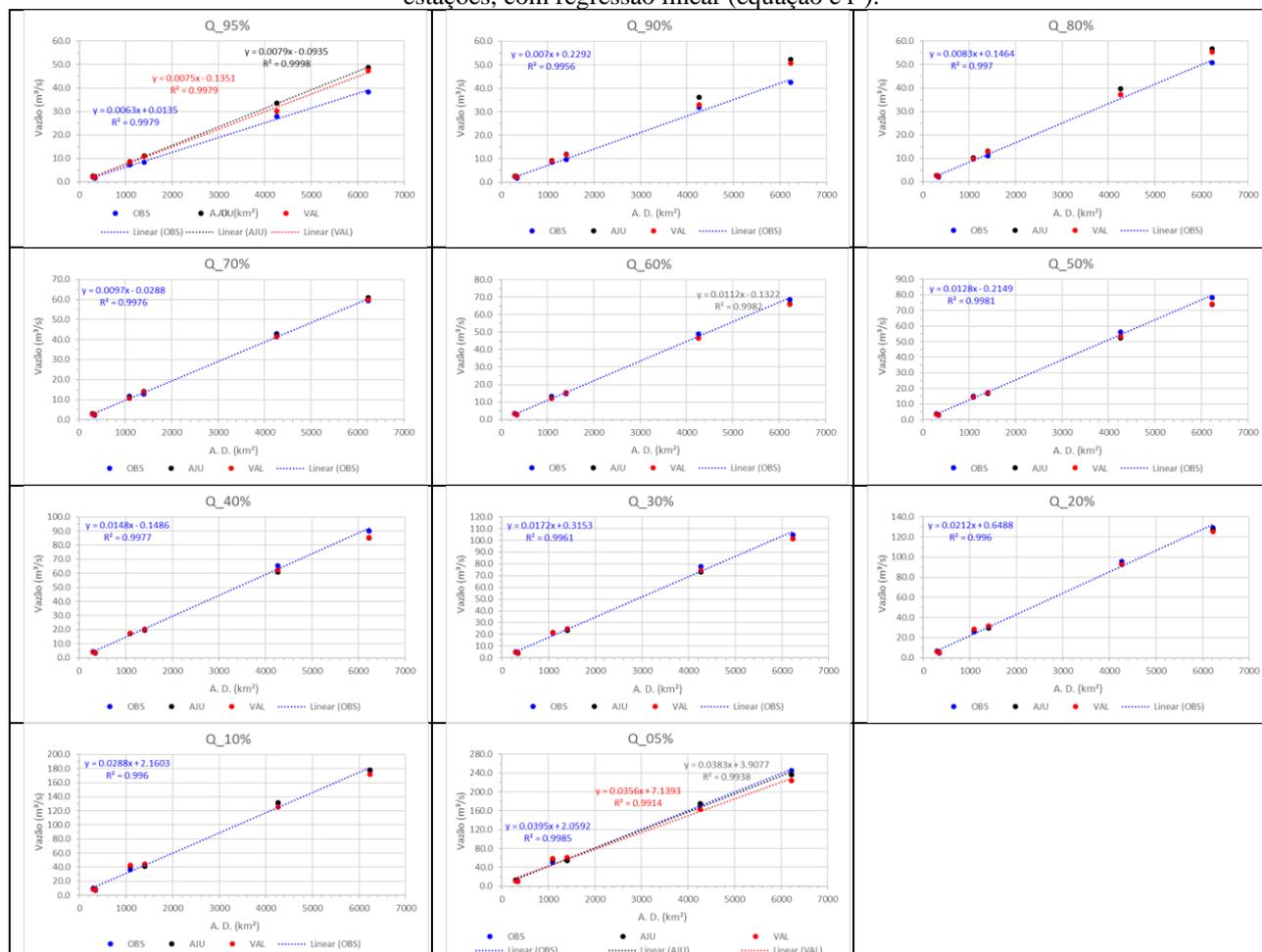
Figura 4 - Valores de F2 da calibração V_0 e das validações V_n para as estações (esquerda) e desvios relativos



dos valores F2 entre as validações V_n e a calibração V_0 (direita)

Gráficos das vazões de permanência em função da área de drenagem das estações são mostrados na Figura 5. A figura mostra uma relação aproximadamente linear para todas as permanências (conforme as linhas de tendência e os valores de coeficiente de determinação r^2 das retas ajustadas com as vazões observadas (o mesmo ocorre para as vazões ajustadas e validadas). As três curvas de tendência, em geral, estão muito próximas. As que mais diferiram foram as correspondentes às permanências extremas Q95 e Q90, Q80 e Q5.

Figura 5. Vazões de permanência das séries observadas (OBS), ajustadas (AJU) e validadas (VAL) para as estações, com regressão linear (equação e r^2).



A Figura 6 mostra os erros percentuais do ajuste ($Er\%(Aju)$) e das validações ($Er\%(val)$) para os 11 pontos da curva de permanência, de onde nota-se que:

- Ocorrem desvios negativos em todas as permanências, menos na Q95 e Q90.
- Em um número razoável dos casos o erro relativo de validação (em vermelho) é menor que o erro relativo de ajuste (em preto), indicando a ocorrência de casos em que a validação foi melhor que o ajuste.
- Aparentemente não existe uma relação direta do erro em relação à área de drenagem, mas pode-se dizer que, com exceção de Q95, Q90 e Q80, o erro das estações com as menores áreas é maior que o erro das estações com as maiores áreas.

Figura 6 - Erros percentuais do ajuste ($Er\%(Aju)$) e das validações ($Er\%(val)$) para os 11 percentis da curva de permanência.



CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou uma avaliação criteriosa e detalhada da aplicação do modelo MGB para bacias relativamente pequenas (algumas menores do que 1000km²), focando na regionalização de vazões. Considera-se este estudo uma prova de conceito importante para aplicações deste tipo de técnica em outras bacias. As principais conclusões que podem ser retiradas do trabalho foram:

1. Quanto maior a bacia menor foi o erro, em termos de métricas, no processo de calibração.
2. A validação cruzada do ajuste sugere que os erros das simulações em locais não monitorados são da mesma ordem de grandeza que os erros nos locais monitorados, fornecendo uma informação relevante para uso do modelo em extrapolações.
3. Os maiores erros relativos encontrados para as vazões regionalizadas das curvas de permanência foram os correspondentes às vazões mais extremas, mínimas: Q95, Q90e Q85 e máximas: Q5. Os maiores valores de erros foram de até 32%.

Finalmente, acredita-se que estes números (valores e desvios) encontrados podem servir de referência para a tomada de decisão com base nas vazões regionalizadas com as técnicas aqui testadas. Por exemplo, para a outorga de vazões baseada na estimativa da Q95 regionalizada, deve-se levar em conta que ela pode apresentar incerteza da magnitude dos erros indicados na modelagem.

REFERÊNCIAS

BLÖSCHL, Günter et al. (Ed.). Runoff prediction in ungauged basins: synthesis across processes, places and scales. Cambridge University Press, 2013.

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

PONTES, P. R. M., FAN, F. M., FLEISCHMANN, A. S., DE PAIVA, R. C. D., BUARQUE, D. C., SIQUEIRA, V. A., et al. (2017). MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. *Environmental Modelling and Software*, 94, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.029>

TUCCI, Carlos E.M. 2002. Regionalização de vazões. Editora da Universidade. UFRGS. 1a edição. Porto Alegre.

AGRADECIMENTOS - Todos os dados e as aplicações do MGB para este estudo de caso foram desenvolvidos pela equipe da ANA, a partir do conhecimento adquirido no subprojeto de Capacitação Tecnológica com o modelo MGB do TED 05/2019/ANA, através de atividades colaborativas, de troca de conhecimentos e transferência de tecnologias entre as equipes da ANA e do IPH.