

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

MODELAGEM HIDROLÓGICA PARA ESTIMATIVA DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA – ESTUDO DE CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA-PB

Juliana Cristina Jansson Kissula¹; Ana Paula Muhlenhoff¹; Cláudio Marchand Krüger²; Bruno dos Santos Guterres¹; Beatriz Tiemi Kawano¹; Murilo Nogueira¹; Christian Taschelmayer¹; Jose Antônio Oliveira de Jesus².

Abstract: Hydrological models are essential for understanding watershed behavior, and their selection should consider the study's objectives, data availability, and the area's characteristics. Modeling semi-arid regions poses challenges, such as representing river intermittency and the limited availability of data, with rainfall-runoff models like *Modelo de Grandes Bacias* - MGB being particularly relevant in these cases. This study presents the estimation of water availability for the Paraíba River Basin (PB), an area of approximately 20,000 km², characterized by a climate with well-defined dry and rainy seasons and predominantly anthropized land use. Model calibration was carried out using data covering the period from 1994 to 2019. The results showed that the MGB successfully represented the basin's seasonality but exhibited limitations in simulating peak flows. The NSE coefficient ranged from 0.45 to 0.60, reflecting difficulties in capturing river intermittency. Despite these limitations, the modeling process enabled the derivation of reference streamflows for the basin, which are essential for water planning within the framework of the Water Resources Plan for the basin, currently under implementation. The complexity of the region's hydrology requires ongoing improvements to modeling techniques and enhanced collection of observational data.

Resumo: Modelos hidrológicos são essenciais para entender o comportamento das bacias, e sua escolha deve considerar o objetivo, a disponibilidade de dados e as características da área de aplicação. A modelagem do semiárido apresenta desafios, como a representação da intermitência dos rios e a baixa disponibilidade de dados, sendo que modelos de transformação chuva-vazão, como o Modelo de Grandes Bacias - MGB, são relevantes nesses casos. O presente estudo apresenta a estimativa da disponibilidade hídrica da Bacia do Rio Paraíba (PB), cuja área é de aproximadamente 20 mil km², com clima caracterizado por períodos secos e chuvosos bem definidos e uso do solo majoritariamente já antropizado. A calibração do modelo foi feita para o período de 1994 a 2019. Os resultados indicaram que o MGB conseguiu representar a sazonalidade da bacia, mas apresentou limitações na simulação de picos de vazão. O coeficiente de NSE variou entre 0,45 e 0,60, refletindo as dificuldades na representação da intermitência dos rios. Apesar disso, a modelagem permitiu obter vazões de referência para a bacia, essenciais para o planejamento hídrico no contexto do Plano de Recursos Hídricos da bacia, atualmente em execução. A complexidade da hidrologia da região exige um contínuo aprimoramento das técnicas de modelagem e uma melhor coleta de dados observacionais.

Palavras-Chave – MGB, Semiárido, Plano de Recursos Hídricos

1) Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos (Cobrape) – Avenida São José, 618, Cristo Rei, Curitiba, Paraná. julianakissula@cobrape.com.br (Autor correspondente); anamuhlenhoff@cobrape.com.br; claudiokruger@cobrape.com.br; brunoguterres@cobrape.com.br; beatrizkawano@cobrape.com.br; murilonogueira@cobrape.com.br; christian@cobrape.com.br.

2) Universidade Federal do Paraná – UFPR. joseantoniojesus@cobrape.com.br; claudio.kruger@ufpr.br.

INTRODUÇÃO

A modelagem hidrológica desempenha um importante papel na gestão e no planejamento dos recursos hídricos ao permitir a simulação e a análise dos processos que governam o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas. Esses modelos são aplicados em diversas escalas e contextos, sendo particularmente relevantes em estudos de disponibilidade hídrica, onde a estimativa de vazões é essencial para a tomada de decisões. A escolha do modelo hidrológico depende de múltiplos fatores, desde os objetivos do estudo, a escala temporal e espacial de análise, a disponibilidade e qualidade dos dados, bem como as características físicas e climáticas da bacia.

Dentre os diversos tipos de modelos, destacam-se os de transformação chuva-vazão, que permitem estimar a resposta hidrológica de uma bacia a partir de séries temporais de precipitação. Esses modelos buscam representar os processos de geração e separação do escoamento nas diferentes camadas do solo, sendo amplamente utilizados em regiões com dados hidrométricos limitados. A etapa de calibração é fundamental para garantir a confiabilidade das simulações, consistindo no ajuste dos parâmetros do modelo de modo que os resultados reproduzam adequadamente os dados observados. Uma vez calibrados, os modelos possibilitam a geração de séries pseudo-históricas de vazão em locais sem medições diretas, melhorando a possibilidade de análise dessas regiões.

Os Planos de Recursos Hídricos constituem o instrumento de gestão que norteia os demais, estabelecendo diretrizes, metas e ações para o uso sustentável da água. Para sua elaboração, a avaliação da disponibilidade hídrica é um componente básico, que subsidia o diagnóstico e orienta a alocação equilibrada dos usos múltiplos da água. No caso do Rio Paraíba, como em outras bacias hidrográficas no semiárido brasileiro, o monitoramento de vazões é um desafio. De acordo com o inventário de estações fluviométricas do Portal Hidroweb (ANA, s.d.), estão cadastradas 95 estações fluviométricas na bacia do Rio Paraíba, entretanto, somente 5 destas estações possuem um período de dados suficientes para as análises referentes à disponibilidade hídrica da bacia. Essa limitação, aliada à extensão territorial da bacia, reforça a necessidade de ferramentas de modelagem que permitam estimativas confiáveis em locais sem dados.

Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo apresentar e avaliar a aplicação do modelo hidrológico MGB – Modelo de Grandes Bacias (Collischonn *et al.*, 2020) como alternativa metodológica para estudos de disponibilidade hídrica no âmbito da elaboração do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba (PRH-RPB), em curso, com foco nos estudos de diagnóstico da bacia.

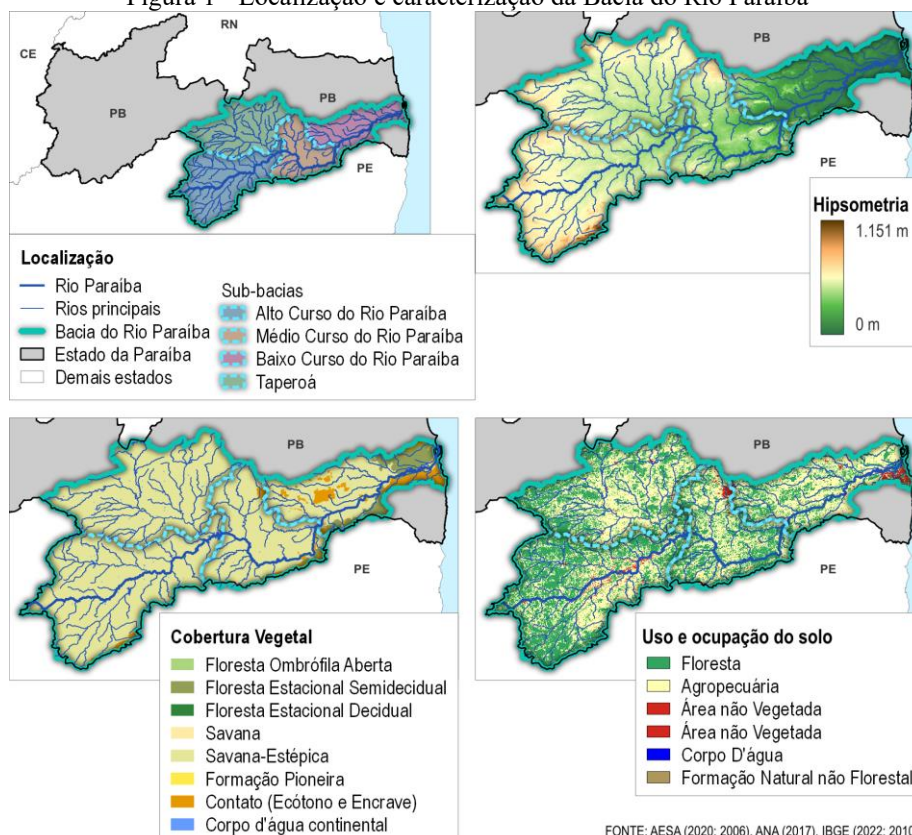
MATERIAIS E MÉTODOS

A Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba

A bacia hidrográfica do Rio Paraíba/PB (Figura 1), localizada no semiárido nordestino, abrange cerca de 20 mil km², ou 38% do território paraibano (AESAs, s.d.), e é dividida em quatro sub-bacias: Taperoá, Alto Paraíba, Médio Paraíba e Baixo Paraíba. Suas nascentes estão localizadas na Serra de Jabitacá, no município de Monteiro, a uma altitude de 1.100 metros. O Rio Paraíba segue, então, seu curso no sentido oeste-leste, percorrendo 380 km até desaguar no Oceano Atlântico, na região metropolitana de João Pessoa.

O Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba (CBHPB, 2014) abrange 85 municípios paraibanos, sendo estes a base para a elaboração do PRH-RPB. Segundo o Censo 2022 (IBGE, 2022), a população do estado alcançou quase 2,4 milhões de habitantes, dos quais pouco mais de 61% estão nos municípios abrangidos pelo PRH-RPB. As maiores populações da bacia estão nas cidades de João Pessoa, com 834 mil habitantes; Campina Grande, com 419 mil; Santa Rita, com 150 mil; Bayeux, com quase 83 mil; e Cabedelo, com 66 mil habitantes (IBGE, 2022).

Figura 1 - Localização e caracterização da Bacia do Rio Paraíba



FONTE: AESA (2020; 2006), ANA (2017), IBGE (2022; 2010)

Fonte: AESA/Cobrape (2024), com informações de AESA (s.d); IBGE (2012); MapBiomias (2023).

A bacia é majoritariamente coberta pela Savana-Estépica, vegetação campestre com estrato lenhoso decidual e espinhoso, pertencente à Caatinga do Sertão Árido Nordeste. A Floresta Estacional Semidecidual, típica de áreas tropicais com seca no inverno seguida de chuvas intensas no verão, está presente mais a leste da bacia, estendendo-se até a divisa com Pernambuco e o município de Umbuzeiro (IBGE, 2012). A bacia hidrográfica do Rio Paraíba tem 54% de sua área antropizada, usada majoritariamente para agropecuária. A cobertura natural da região representa pouco mais de 45%, sendo que as florestas ocupam 44,8% da área da bacia, e o restante divide-se entre corpos d'água e áreas de formação natural não florestal, esta última em menor parcela (MapBiomias, 2023).

O clima na região apresenta dois períodos secos anuais: um extenso, seguido por chuvas intermitentes, e outro mais breve, com possíveis chuvas torrenciais (IBGE, 2012). O estado tem dois períodos chuvosos principais: (i) de fevereiro a maio na região do Rio Taperoá e Alto Paraíba, e (ii) de abril a julho nas sub-bacias do Médio e Baixo Paraíba (AESA, 2022). Antes desses períodos, ocorrem chuvas de pré-estação em dezembro e janeiro para as sub-bacias do Taperoá e do Alto Paraíba, e em fevereiro e março para as sub-bacias do Médio e Baixo Paraíba. Essas chuvas são curtas e irregulares, apesar dos altos índices de precipitação.

Modelagem Hidrológica no Semiárido

Grande parte dos modelos hidrológicos chuva-vazão se concentra na representação e separação do escoamento nas diferentes camadas do solo. Entretanto, na região semiárida, uma abordagem mais simplificada das camadas do solo é suficiente para representar seu comportamento hidrológico, dado que as parcelas associadas aos escoamentos subsuperficial e subterrâneo são insignificantes devido às características do solo de formação cristalina do nordeste brasileiro (Lanna e Schwarzbach, 1989).

Cirilo (2020) e Feitoza (2021) ressaltam a necessidade de investigar a representação das regiões áridas e semiáridas pelos modelos hidrológicos, visto que a eficiência desses modelos tende a diminuir com o aumento da aridez da região. A representação do comportamento hidrológico das bacias do semiárido apresenta desafios constantes nos estudos de modelagem hidrológica, levando diversos autores a proporem diferentes modelos para análise da região. Dentre esses estudos, a Tabela 1 apresenta diferentes aplicações de modelagem hidrológica chuva-vazão no semiárido brasileiro.

Tabela 1 – Estudos de modelagem hidrológica chuva-vazão no semiárido brasileiro

Fonte	Área de Estudo	Modelo Hidrológico	Disponibilidade do modelo utilizado
Silva, 2012	63 açudes monitorados pela AESA na Paraíba	SMAP	Planilha Eletrônica*
Cirilo <i>et al.</i> , 2020	Bacia dos rios Pajeú, Capibaribe, Mundaú e Ipojuca (PE)	CAWM IV	Planilha Eletrônica
Virões <i>et al.</i> , 2019	Semiárido Nordestino (UFs: RN, PB, PE e CE)	MODHAC	Programa executável*
Moura, 2007	Rio Piranhas-Açu (PB/RN)	MODHISA	*
Feitoza, 2021	45 sub-bacias no semiárido nordestino	CAWM IV	Planilha Eletrônica
Silans <i>et al.</i> , 2000	Rio do Peixe	AÇUMOD	*
Felix & Paz, 2016	Rio Piancó (PB)	MGB	Programa executável e interface GIS
Negreiros e Medeiros, 2017	Rio Seridó (PB/RN)	MGB	Programa executável e interface GIS
Silva e Medeiros, 2018	Rio Piranhas-Açu (PB/RN)	MGB	Programa executável e interface GIS
PERH-PB, 2022	Sub-bacias do Estado da Paraíba	SMAP	Planilha Eletrônica*

* não disponível

Fonte: AESA/Cobrape (2024).

Os modelos AÇUMOD (Silans *et al.*, 2000) e MODHISA (Moura, 2007) destacam-se como opções desenvolvidas a partir da especificidade do comportamento hidrológico observado no semiárido brasileiro. Apesar de bem-sucedidos, esses modelos têm poucas aplicações relatadas na literatura, o que pode estar relacionado à dificuldade de acesso aos programas e suas planilhas, bem como à ausência de manuais de usuário que viabilizem sua aplicação em outras áreas de estudo. Nesse contexto, o modelo MODHAC (Lanna e Schwarzbach, 1989), desenvolvido para aplicação tanto em bacias de rios perenes quanto em bacias do semiárido brasileiro, também carece de um manual técnico ou programa executável de fácil obtenção. No entanto, o MODHAC possui mais aplicações documentadas em artigos com resultados positivos (Virões *et al.*, 2019; Silva, 2012).

Outro modelo com aplicações recentes para 45 sub-bacias do semiárido nordestino é o CAWM IV (Cirilo *et al.*, 2020), desenvolvido pela Universidade Federal de Pernambuco, projetado especificamente para bacias do semiárido e disponível para uso. Dentre as sub-bacias onde foi aplicado no estudo de Feitoza (2021), três estão localizadas no Rio Paraíba, definidas pelos postos fluviométricos 38850000 (Rio Taperoá), 38830000 e 38860000 (Rio Paraíba). Similarmente ao trabalho de Virões *et al.* (2019), os resultados para a regionalização de parâmetros hidrológicos não foram satisfatórios nas sub-bacias dos citados postos no curso principal do Rio Paraíba. No estudo também foi aplicado o modelo MODHAC, com resultados insatisfatórios possivelmente devido à presença de açudes a montante das estações fluviométricas (Feitoza, 2021).

Existem também estudos aplicando o Modelo de Grandes Bacias (MGB) em sub-bacias na região semiárida do Brasil. O MGB é amplamente utilizado no país, e apesar de haver poucas aplicações específicas para a região semiárida, seus resultados são considerados satisfatórios pelos pesquisadores (Felix e Paz, 2016; Silva e Medeiros, 2018). Em geral, modelos distribuídos como o MGB são integrados a ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), o que permite uma melhor integração e manipulação de diversas informações espacializadas, facilitando e aprimorando a análise da disponibilidade hídrica no contexto da gestão de recursos hídricos (Morad e Pérez, 2001;

Machado, 2002; Santos *et al.*, 2006; Fan e Collischonn, 2014). Esse acoplamento é especialmente relevante para a regionalização dos resultados em áreas sem monitoramento hidrológico.

Além disso, é sabido que a representação do comportamento hidrológico de bacias como a do Rio Paraíba apresenta desafios significativos devido às suas características únicas. O regime intermitente dos canais principais e os elevados picos de vazão durante as estações chuvosas são aspectos típicos dessas regiões, representando um desafio computacional para a modelagem desses processos. Considerando os resultados do Plano Estadual de Recursos Hídricos da Paraíba (PERH-PB, 2022) com a aplicação do modelo SMAP, bem como a disponibilidade de modelos hidrológicos já aplicados na região semiárida, foi decidido utilizar o MGB no âmbito do PRH-RPB após a validação de sua empregabilidade em regiões do Brasil análogas à Bacia do Rio Paraíba.

Entre as aplicações do MGB em bacias hidrográficas no semiárido, destaca-se o estudo da bacia do Rio Piranhas-Açu, com a maior parte de sua área de drenagem localizada na Paraíba, e abrangendo os anos de 1963 a 2015. Silva e Medeiros (2018) consideraram os resultados satisfatórios, contudo, sublinham os desafios de estabelecer o comportamento hidrológico na região do semiárido nordestino e a relevância da aplicação de modelos para tal finalidade. Outro estudo relevante é de Silva, Collischonn e Tucci (2005) na bacia do Rio São Francisco, com o objetivo de prever vazões afluentes a reservatórios hidrelétricos. Abrangendo os anos de 1977 a 1997, os primeiros nove anos foram utilizados para calibração e os onze anos subsequentes para verificação do modelo. Os autores destacaram a precisão dos ajustamentos obtidos entre hidrogramas observados e simulados, reforçando o potencial do MGB como ferramenta na gestão de recursos hídricos da bacia.

Negreiros e Medeiros (2017) aplicaram o MGB na bacia do Rio Seridó (PB), para avaliar o desempenho do modelo em uma bacia de rio intermitente, considerando o período entre 1990 e 2000. Os resultados indicaram que o modelo reproduziu adequadamente a sazonalidade da bacia e a variação entre anos de diferentes níveis de precipitação. No entanto, os hidrogramas gerados tenderam a superestimar as vazões observadas devido à simulação de vazões naturalizadas, desconsiderando a influência de diversos reservatórios na bacia, que acumulam grandes volumes de água, o quais não chegam atingir a rede de drenagem, gerando a disparidade entre a vazão observada e a simulada.

Visando aprofundar a investigação sobre o desempenho do MGB em rios intermitentes, Felix e Paz (2016) aplicaram o modelo na bacia do Rio Piancó, no semiárido paraibano. A área de estudo focou na região a montante do posto fluviométrico Piancó, sem a influência de reservatórios localizados na parte alta da bacia. A calibração foi realizada para o período de 1970 a 2011 e, similarmente ao estudo de Negreiros e Medeiros (2017), o modelo representou bem a sazonalidade da bacia e os processos de transformação chuva-vazão, embora tenha enfrentado desafios na simulação de rios intermitentes, refletindo a complexidade inerente a essa modelagem.

Implementação do MGB para a Bacia do Rio Paraíba-PB

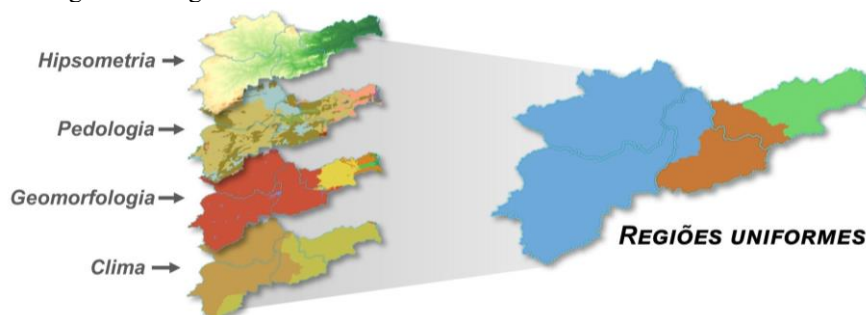
Para o estudo da disponibilidade hídrica no PRH-BRP, foi empregado o Modelo de Grandes Bacias (MGB), um modelo chuva-vazão integrado com o *software* QGIS (Collischonn *et al.*, 2020). O *plugin* e toda a sua documentação, manuais de referência teórica e aplicação do modelo, estão disponíveis no *site* do Grupo de Pesquisa de Hidrologia de Grande Escala, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (HGE IPH/UFRGS).

Para utilizar o modelo, é necessário o pré-processamento de informações espaciais para obtenção dos dados que serão empregados na modelagem. No caso da bacia do Rio Paraíba, essa etapa inicial foi realizada utilizando as seguintes bases de dados: (i) Modelo Digital de Elevação *Multi-Error-Removed Improved-Terrain* (MERIT DEM) de 90 m; (ii) Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas (BHO) 2017 5k (ANA, 2017); (iii) *shapefile* de uso e ocupação do solo

(Mapbiomas, 2022); e, (iv) Unidades de Resposta Hidrológica (URHs) derivadas da ferramenta *Hydrological Landscape Classes Generator* (Barbedo et al., 2022).

Para viabilizar a calibração do modelo foram definidas sub-bacias com base na existência de dados observados de vazão e a partir de características físicas da bacia quanto a hipsometria, pedologia e geomorfologia, que, quando avaliadas em conjunto com o aspecto climático, definem regiões espacialmente semelhantes. A primeira região inclui as sub-bacias do Alto Paraíba e Taperoá; a segunda região abrange a porção mais baixa do Médio Paraíba e a parte mais a montante do Baixo Paraíba; enquanto o restante do Baixo Paraíba constitui a terceira e última região (Figura 2).

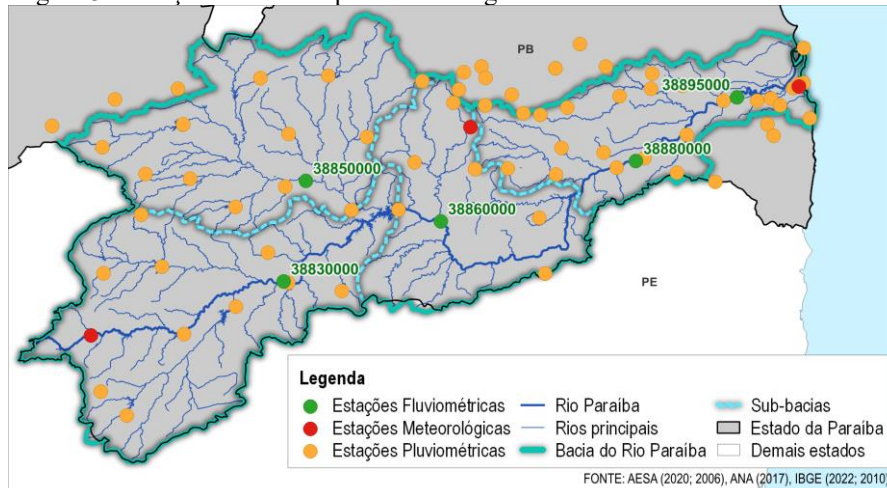
Figura 2 - Regiões com características uniformes da Bacia do Rio Paraíba



Fonte: AESA/Cobrape (2024).

Para tanto, foram utilizados dados das estações apresentadas pela Figura 3. O regime de chuvas foi representado pelos dados de 70 estações pluviométricas, pré-selecionadas por uma análise de consistência. Para calibração foram utilizadas apenas as 3 estações fluviométricas de jusante, na calha principal do Rio Paraíba (Figuras 2 e 3). Adicionalmente, foram utilizadas as normais climatológicas das estações Campina Grande, João Pessoa e Monteiro do INMET (1992), disponíveis no MGB (Figura 3). O período para simulação e calibração foi definido de 1994 a 2019, com base na maior disponibilidade de dados recentes com menor índice de falhas.

Figura 3 - Estações utilizadas para a modelagem da Bacia do Rio Paraíba no MGB



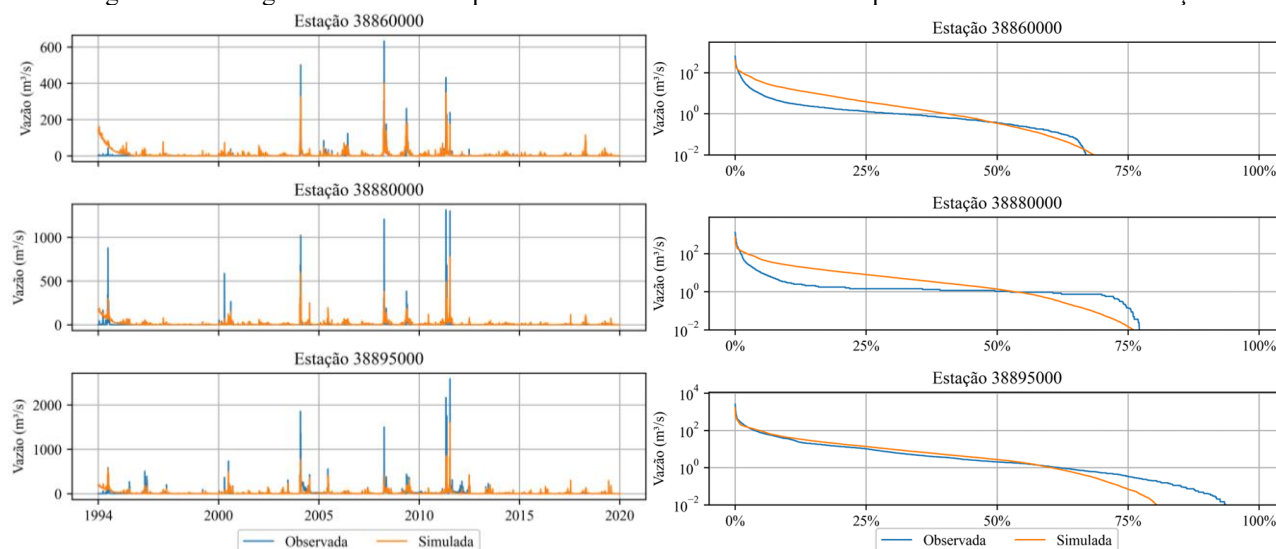
Fonte: AESA/Cobrape (2025), com informações de ANA (2022) e INMET (1992).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O MGB demonstrou capacidade de representar a acentuada sazonalidade da bacia do Rio Paraíba. No entanto, como esperado, apresentou limitações na simulação de períodos de vazões nulas e na reprodução dos picos das maiores cheias. A análise visual dos hidrogramas e das curvas de

permanência (Figura 4), observadas e simuladas para cada sub-bacia de calibração definida para a bacia do Rio Paraíba demonstra esse comportamento.

Figura 4 – Hidrogramas e curvas de permanência observadas e simuladas para as sub-bacias de calibração



Fonte: AESA/Cobrape (2024).

Nota-se, da Figura 4, a dificuldade do modelo na representação da magnitude dos maiores picos, fator que teve impacto determinante sobre os valores obtidos para o coeficiente de Nash-Sutcliffe no processo de calibração do modelo, os quais ficaram entre 0,45 e 0,60. Destaca-se, que o coeficiente apresentou menor valor para a sub-bacia definida pela estação 38880000, localizada a jusante do reservatório de Acauã no Baixo Paraíba (Figura 4), que apresenta um comportamento marcado pelo efeito de regularização. Neste caso, as chuvas ocorridas em 2004, 2008 e, principalmente, em 2012, permitiram a manutenção de alguma vazão a jusante do reservatório.

Na porção alta da bacia do Rio Paraíba, existem duas estações fluviométricas com dados que não foram utilizadas para a calibração do modelo, dada a complexidade da representação da intermitência dos rios nesta região, pois nessas estações as vazões são nulas em cerca de 65% e 85% do tempo. Toda essa região alta da bacia foi calibrada a partir dos dados da estação 38860000, localizada no trecho do rio entre os reservatórios de Epitácio Pessoa e Acauã (Figura 3), no médio Paraíba, e com maior área de drenagem. A partir do Médio Paraíba o período de vazões nulas cai para cerca de 30% do tempo, de tal maneira que os hidrogramas respondem melhor às precipitações, porém ainda com dificuldade de representação dos picos de vazões observados. Contudo, as curvas de vazões observadas e simuladas se aproximam, demonstrando uma maior adaptação da modelagem a partir de então (Figura 4).

Adicionalmente, destaca-se que para a estação fluviométrica que define a sub-bacia de calibração mais a jusante da bacia (38895000), o resultado da modelagem no que se refere à representação da curva de permanência (Figura 4), foi bastante satisfatório para a faixa de permanências de até 60% e para a faixa restante, evidencia a dificuldade do modelo na representação da intermitência do escoamento.

Os desafios encontrados para a modelagem hidrológica da bacia do Rio Paraíba se assemelham aos encontrados por Felix e Paz (2016) quando da aplicação do MGB a um trecho da bacia do rio Piancó, com aproximadamente 4.603 km² de extensão, também localizado no semiárido paraibano. Nesse estudo, os autores avaliaram os resultados como satisfatórios, reportando um coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,70 para a simulação em escala diária e de 0,82 em escala mensal. Silva e Medeiros

(2018) obtiveram resultados semelhantes (coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,80) na implementação e calibração do MGB para a bacia do Rio Piranhas-Açu, em um trecho com cerca de 43.683 km² de área de drenagem.

Apesar dos desafios para representar com precisão as particularidades da hidrologia do semiárido paraibano através da modelagem hidrológica realizada com o MGB, os resultados obtidos foram satisfatórios dada a complexidade da obtenção de dados observados de vazão na região, decorrente da natureza intermitente dos cursos d'água, da variabilidade extrema das cheias e da ausência de seções estáveis nos canais, e da necessidade de embasamento técnico para o planejamento hídrico no contexto da elaboração do PRH-RPB. A utilização de um modelo distribuído permitiu que fossem obtidas as vazões de referência para toda a extensão espacial da bacia, como apresentam a Figura 6 e a Figura 7.

Na Figura 6 são apresentadas as vazões específicas com 30% de permanência ($Q_{30\%}$), onde é possível identificar que uma significativa parte da porção oeste da bacia já apresenta vazões nulas, abrangendo principalmente as sub-bacias Taperoá e Alto Paraíba, e se estendendo com menor intensidade no Médio Paraíba. A partir da jusante do Médio Paraíba até as proximidades da sede de Santa Rita, a $Q_{30\%}$ é estimada, em média, em 30 L/s ou 2,3 L/s.km², sendo verificadas vazões em torno de 150 L/s apenas na proximidade da foz do Rio Paraíba, onde a $Q_{30\%}$ chega a 850 L/s, que corresponde a 34 L/s.km².

Figura 6 – Vazões específicas com 30% e 90% de permanência simuladas para o PRH-RPB



Fonte: AESA/Cobrape (2024).

Por fim, são apresentadas as vazões específicas com 90% de permanência ($Q_{90\%}$) na Figura 6, ou seja, que são garantidas em 90% do período observado e que são os valores de referência para a disponibilidade hídrica propriamente dita. Nessa permanência, praticamente a totalidade das vazões simuladas são nulas, com poucos trechos de rio com valores acima de zero, de modo que o maior valor estimado é 30 L/s ou 1,2 L/s.km², na foz.

Uma vez que o modelo utilizado simula vazões naturalizadas para a bacia, em seu processamento são consideradas as características naturais da região, sem a influência de infraestruturas hídricas que possam alterar seu comportamento hidrológico. Diante disso, os resultados da modelagem hidrológica para o PRH-RPB confirmam que a disponibilidade hídrica superficial da Bacia do Rio Paraíba está atrelada à capacidade artificial de armazenamento de seus reservatórios e açudes.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A hidrologia do semiárido brasileiro é caracterizada pela escassez de chuvas, com alta variabilidade espacial e temporal em que predominam eventos extremos, o que dificulta o monitoramento contínuo e confiável das variáveis hidrológicas. Nesse sentido, pode-se ressaltar que o semiárido possui características peculiares que não são representadas adequadamente pela grande

maioria dos modelos hidrológicos. Esses modelos reproduzem os processos de separação do escoamento no solo como expressões matemáticas de decaimento exponencial, os quais não são capazes de representar a intermitência dos corpos hídricos do semiárido. Somado a isso, a capacidade de armazenamento do solo da região é muito baixa, em suas camadas superficiais por conta da alta evapotranspiração, e nas camadas inferiores devido à presença da formação geológica do Cristalino.

Além disso, ao buscar por estudos que contemplem a modelagem hidrológica na região do semiárido brasileiro, outra dificuldade encontrada foi a obtenção dos modelos desenvolvidos especificamente para a região e sua documentação. Ainda que não haja um modelo que esteja completamente adaptado a representar satisfatoriamente este comportamento hidrológico, os modelos hidrológicos ainda são a melhor ferramenta para estudos hidrológicos de regiões complexas, heterogêneas e pouco monitoradas, desde que se tenha ciência de tais limitações.

Nesse sentido, a aplicação do MGB no presente estudo foi considerada satisfatória para o propósito de avaliação da disponibilidade hídrica, no contexto de planejamento e gestão de recursos hídricos. As curvas de permanência geradas representaram adequadamente o comportamento hidrológico da bacia do Rio Paraíba para o objetivo do PRH-RPB.

REFERÊNCIAS

- AESA/COBRAPE. (2024) Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAs). Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos (COBRAPE). “*RP-03 – Estudo Hidrológico da Bacia: Potencialidades e Disponibilidades Hídricas.*” In: Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica da Bacia do Rio Paraíba. Relatório Parcial. Revisão Final. Governo da Paraíba. Agosto, 2024. Disponível em: <<https://www.planorioparaiba.com.br/andamento>>. Acesso: 3 Abr. 2025.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento. (2017). *Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2017 5k* (BHO 2017 5k).
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento. (S.d.) *Portal Hidroweb*. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH).
- BARBEDO, R *et al.* (2022). “*Manual de aplicação BHO2MGB.*” HGE IPG/UFRGS. Maio de 2022. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/hge/modelos-e-outros-produtos/bho2mgb/>> Acesso: 10 de abr. 2024.
- CIRILO, J. A., *et al.* (2020). “*Development and application of a rainfall-runoff model for semi-arid regions.*” Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 25, e15. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190106>. Acesso: 14 mai. 2024.
- COLLISCHONN, W. *et al.* (2020). *Manual de Referência Teórica do MGB*. HGE, IPH, UFRGS.
- DE MOURA, E. M. *et al.* (2007). “*Modelagem hidrológica da bacia do rio Piranhas-Açu utilizando o MODHISA juntamente com o balanço hídrico dos principais açudes da rede fluvial.*” in Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. São Paulo, p. 1-20, 2007.
- FAN, F.; COLLISCHONN, W. (2014). “*Integração do Modelo MGB com Sistema de Informação Geográfica.*” Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, v.19, p. 243-254, 2014.
- FEITOZA, M. A. B. (2021) *Aplicação de modelo de simulação hidrológica com regionalização de parâmetros para regiões semiáridas*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Núcleo de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2021. 144 f. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/40725>>. Acesso em: 14 maio 2024.
- FELIX, V.S.; PAZ, A. R. (2016). “*Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída.*” Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, v. 21, n.3, p. 556-569, 2016.

- INMET. (1992). Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil. *Normal Climatológica do Brasil 1961-1990*. Brasília - DF.
- LANNA, A. E.; SCHWARZBACH, M. (1989). “MODHAC: Modelo Hidrológico Auto-Calibrável.” Recursos Hídricos, Publicação, v. 21.
- LIMA, G. D. ; et al. (2022). “Modelling intermittence and river flow in the semi-arid region of Brazil: The Umbuzeiro River, Ceará.” Revista Ciência Agronômica, v. 53, e20218162.
- MACHADO R. E. (2002). *Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento*. Tese de doutorado de agronomia. Área de concentração: irrigação e drenagem. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. São Paulo, 2002.
- MAPBIOMAS. (2023). *Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil*. Projeto MapBiomass. Dados espaciais do uso do solo no Brasil. Brasil. 2023. Disponível em: <https://storage.googleapis.com/mapbiomaspublic/initiatives/brasil/collection_8/lcu/coverage/brasil_coverage_2022.tif> Acesso em: 7 dez. 2023.
- MORAD, M.; PÉREZ, A. T. (2001). “Sistemas de información geográfica y modelizaciones hidrológicas: una aproximación a las ventajas y dificultades de su aplicación”. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, ISSN 0212-9426, ISSN-e 2605-3322, Nº. 31, págs. 23-46.
- NEGREIROS, B. M. F.; MEDEIROS, J. C. F. (2017) “Aplicação do Modelo Hidrológico MGB-IPH na Bacia Hidrográfica do Rio Seridó” in Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis.
- PERH-PB. (2022). *Plano Estadual de Recursos Hídricos da Paraíba - RF-02 A - Diagnóstico. Volume 2*. Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA). Governo da Paraíba, PB.
- SANTOS, B. V. C. D. dos; FONTES, A. S. (2014). “Modelagem Hidrológica de Sistema Hídrico Complexo do Semiárido Baiano.” Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA), v.2, n. 1 - p.152-162, 2014 – ISSN: 2317-563X.
- SANTOS, S. et al. (2006) “Os sistemas de informação geográfica na modelagem hidrológica.” in Anais do XII Congresso Nacional de Tecnologias de La Información Geográfica. Granada, 2006 “El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas” p 465-479.
- SILANS, A. M. B. P. et al. (2000). “Aplicação do modelo hidrológico distribuído AÇUMOD à bacia hidrográfica do rio do PEIXE-Estado da Paraíba.” Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 5, n. 3, p. 5-19, 2000.
- SILVA, B. C.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; (2004). “Simulação da bacia do Rio São Francisco através do modelo hidrológico MGB-IPH” Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/239551794>>. Acesso em: 26 de mar. de 2024
- SILVA, D. S.; MEDEIROS, J. D. F. (2018). “Aplicação do modelo hidrológicos MGP-IPH na bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu.” in XIV Simpósio de Recurso Hídricos do Nordeste. Maceió, Alagoas.
- SILVA, G. N. S. D. (2012). *Regionalização automatizada de parâmetros de modelos chuva-vazão integrada a um sistema de informações geográficas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, 2012.
- SOUSA, F. R. C. de, COSTA, L. H. M.; PAULA, D. P. de. (2017). “Modelagem hidrológica chuva-vazão aplicada ao estudo de chuvas intensas na bacia hidrográfica Semiárida do Rio Pesqueiro (Ceará – Brasil)” in XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada / I Congresso Nacional de Geografia. Campinas, SP. 2017. DOI - 10.20396/sbgfa.v1i2017.2189 - ISBN 978-85-85369-16-3.
- VIRÃES, M.V.; CIRILO, J. A. (2019) “Regionalização de parâmetros de modelo hidrológico para a região semiárida do nordeste brasileiro”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 24, p. e49, 2019.