

# APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO MGB-IPH NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRANHAS-AÇU

*Daniel Soares da Silva<sup>1</sup>; Joana Darc Freire de Medeiros<sup>2</sup>*

**Resumo** - Os problemas relacionados a região semiárida do Nordeste Brasileiro faz com que seja necessário se fazer uso de alguma metodologia que ajude a definir o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica, para que se possa ter um melhor planejamento para solucionar os problemas ocasionados pelas secas. Nesse sentido, o Modelo de Grande Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH) entra como um grande auxiliador no sentido de se fazer a modelagem da bacia. O presente trabalho trata da aplicação do MGB-IPH na Bacia do Rio Piranhas-Açu no período de 1963 a 2015, os parâmetros que foram utilizados na calibração do modelo obtiveram um bom ajuste de calibração para a estação fluviométrica escolhida, por meio da análise do hidrograma gerado também foi observado que os dados calculados reproduziam de maneira satisfatória os dados observados.

**Abstract** - The problems related to the semi-arid region of Northeast Brazil make it necessary to make use of some methodology that helps to define the hydrological behavior of a river basin, so that a better planning can be had to solve the problems caused by the dry. In this sense, the MGB-IPH, enters as a great help in the direction of modeling the basin. The present work deals with the application of the MGB-IPH in the Piranhas-Açu River Basin from 1963 to 2015, the parameters that were used in the calibration of the model obtained a good calibration adjustment for the fluviometric station chosen, through the analysis of the hydrograph was also observed that the calculated data satisfactorily reproduced the observed data.

Keywords: Hydrological Model. MGB-IPH. Piranhas-Açu.

**Palavras-chave:** Semiárido, Modelo distribuído.

## INTRODUÇÃO

A Região Semiárida do Nordeste Brasileiro se caracteriza por apresentar uma precipitação pluviométrica reduzida, concentrada em poucos meses, com grande variabilidade interanual, aliada a uma forte insolação, o que resulta na intermitência da rede hidrográfica (SILVA, 2010; STRAHLER e STRAHLER, 1994). Esses problemas ocasionam dificuldades na gestão de recursos hídricos da região e faz-se necessário se conhecer o comportamento hidrológico das bacias desta região, de modo a se avaliar a disponibilidade hídrica e possibilitar um melhor planejamento dos usos, reduzindo os conflitos.

Uma maneira que pode ser utilizada para se compreender os processos hidrológicos que envolvem uma bacia hidrográfica é a modelagem hidrológica, que permite analisar processos, como, por exemplo, a transformação de chuva em vazão, de modo a entender como a bacia se comporta ao longo do ano, com as variações de precipitação ao qual ela se submete (TUCCI, 1998).

1 Graduando, Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil. danielsoaress\_@hotmail.com.

2 Professora, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil. joanadarc.medeiros@gmail.com

Existem diversos modelos que podem ser utilizados para simular o processo de transformação de chuva em vazão, dentre eles o Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH), desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. O MGB é capaz de realizar a simulação de vários processos, como: interceptação, balanço d'água no solo, evapotranspiração, geração de escoamento superficial, sub-superficial, subterrâneo e propagação do escoamento na rede de drenagem (COLLISCHONN, 2001).

O MGB-IPH foi desenvolvido e tem sido amplamente utilizado para grandes bacias hidrográficas de rios perenes em algumas regiões do país, como, por exemplo, na Bacia do Rio São Francisco (SILVA; COLLISCHONN; TUCCI, 2005), na Bacia do rio Piracicaba, situada na região sudeste do Estado de São Paulo e Sul do Estado de Minas Gerais (MELLER; BRAVO; COLLISCHONN 2012), na Bacia do rio Ijuí Rio Grande do Sul (FAN & COLLISCHONN, 2014) e até mesmo bacias que abrangem outras áreas da América Latina, como é o caso, por exemplo, da Bacia do rio Paraná, que é de importância vital para a produção de energia hidrelétrica na Argentina, Brasil e Paraguai (ADAM et al., 2015) e também da Bacia do rio Madeira, que se estende pelo Brasil, Bolívia e Peru (RIBEIRO NETO, 2006). Nestas regiões sua aplicação tem apresentado bons resultados.

No entanto, o semiárido nordestino apresenta características climáticas e hidrológicas muito diversas e existem poucas aplicações do MGB-IPH nas mesmas. Felix & Paz (2016) calibraram o MGB-IPH para a bacia hidrográfica do rio Piancó e do rio Seridó, respectivamente, ambas sub-bacias da bacia hidrográfica Piranhas-Açu. No trabalho de Felix & Paz (2016) o MGB-IPH conseguiu simular a forte sazonalidade da bacia, apresentando vazões calculadas muito próximas das vazões observadas, indicando que este modelo apresenta um bom potencial para representar os fenômenos hidrológicos de uma bacia hidrográfica da região semiárida, já no trabalho de Negreiros (2017) onde foi realizada a aplicação do MGB-IPH na bacia do rio Seridó os resultados da calibração mostraram que o modelo não foi capaz de representar de maneira satisfatória o regime de vazões da bacia estudada, provavelmente devido a presença de muitos reservatórios de regularização na bacia, os quais o modelo não leva em consideração.

O objetivo do presente trabalho foi aplicar o modelo MGB-IPH na modelagem do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu, de modo a auxiliar na gestão dos recursos hídricos no semiárido.

## METODOLOGIA

### Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu está situada na região semiárida do Nordeste brasileiro, possui uma área de drenagem de 43.683 km<sup>2</sup> que está parcialmente inserida nos Estados da Paraíba (60%) e do Rio Grande do Norte (40%) (Figura 1). A bacia abrange 147 municípios, dos quais 47 pertencem ao Estado do Rio Grande do Norte e 100 ao Estado da Paraíba (ANA, 2014).

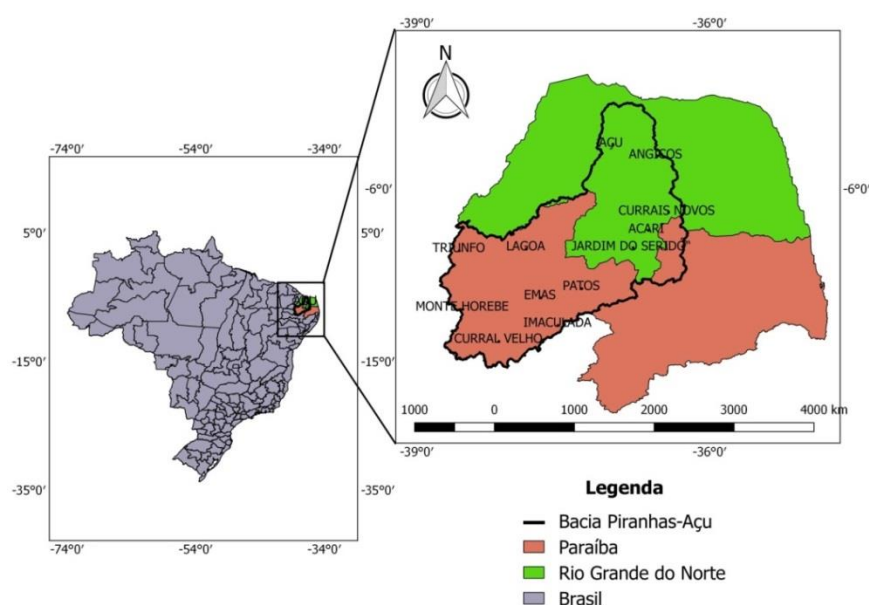


Figura 1 - Localização da bacia Piranhas-Açu

Segundo a ANA (2014), a bacia Piranhas-Açu possui uma grande variabilidade interanual de precipitação, com chuvas bastante concentrada em poucos meses do ano e altas taxas de evaporação que causam perdas significativas das reservas de água, resultando na intermitência natural dos rios e demais corpos d'água. A bacia, portanto, apresenta sérios problemas de déficit hídrico e períodos de seca prolongados.

O clima da bacia, segundo a classificação climática de Köppen, varia do tipo A (clima tropical) na porção mais a montante ao tipo B (clima árido) no restante da bacia, com temperatura média variando entre 24,2°C a 28,2°C, precipitações médias anuais da ordem de 590 a 940 mm/ano, concentradas nos meses de fevereiro a maio, e evapotranspiração na faixa de 1.786 mm/ano ANA (2014).

Estão presentes nessa bacia reservatórios que são de grande importância para o desenvolvimento socioeconômicos dos estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, são eles: Curema Mãe D'água (construído no rio Piancó-PB, no município de Coremas) e Armando Ribeiro Gonçalves (construído no município de Assu-RN, no Rio Piranhas-Açu), tais reservatórios foram

construídos pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), com capacidade de regularização interanual de vazões (Oliveira, 2013).

## MODELAGEM ATRAVÉS DO MGB-IPH

### Pré-Processamento

No pré-processamento dos arquivos de entrada para utilização do MGB-IPH, fez-se uso do pacote de ferramentas IPH-Hydro Tools, que é um plugin para o software de SIG MapWindow GIS®, assim como o próprio plugin do MGB-IPH acoplado ao software.

O plugin IPH-Hydro Tools utiliza o Modelo Digital de Elevação (MDE) da região como arquivo de entrada para gerar os arquivos necessários no pré-processamento do MGB-IPH. O MDE utilizado foi obtido através de imagens SRTM, geradas pela *Shuttle Radar Topography Mission*, da *National Geospatial-Intelligence Agency* – NGA e NASA, obtidas diretamente pelo site (<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>) do *Consortium for Spatial Information* (CGIAR-CSI) com resolução espacial de 90 metros.

Inicialmente foi realizado o preenchimento das depressões do MDE (valor da altitude de uma ou mais célula menor que o da célula vizinha). Em seguida foi utilizado o plugin para se determinar a direção de fluxo dos corpos d'água da bacia de interesse, de posse das direções de fluxo pôde-se definir a rede de drenagem da bacia. Para o caso estudado foi selecionado um limite de área de drenagem de 5000, este limite de área de drenagem afluente a rede mostra os canais de fluxo de água que são conectados entre si e que drenam a água da chuva numa densidade aceitável para o tamanho da bacia.

Com a direção de fluxo, foi delimitada a bacia. A área da bacia obtida por esta metodologia foi de 42.557 km<sup>2</sup> este valor é semelhante ao apresentado no Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açu (43.683 km<sup>2</sup>) (ANA, 2014).

Na sequência foi utilizado o arquivo de direções de fluxo, juntamente com a rede de drenagem, para gerar o arquivo de minibacias (Figura 2a), a bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu apresentou 1000 minibacias.

Após definidas as minibacias, foi necessário definir as URHs, para isso foi utilizado um mapa de URH da América do Sul e recortada apenas a área de interesse (Figura 2b e Tabela 1).

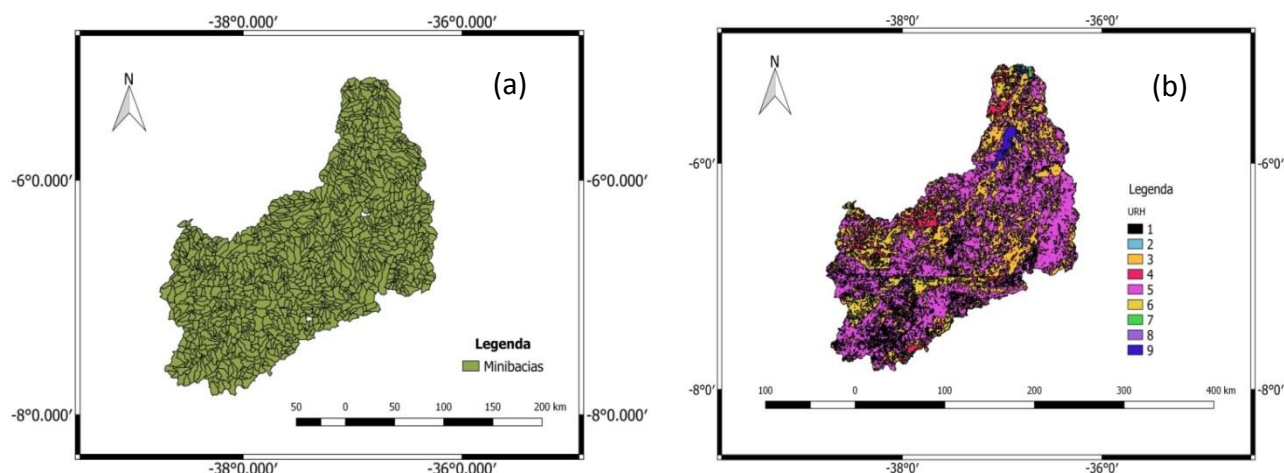


Figura 2 - Resultados do pré-processamento. (a) minibacias geradas; (b) URHs.

Tabela 1 – Tipos de URHs e respectivas porcentagens

| Código | Descrição                       | Porcentagem |
|--------|---------------------------------|-------------|
| 1      | Caatinga densa em solo raso     | 4,65%       |
| 2      | Caatinga densa em solo profundo | 0,91%       |
| 3      | Agricultura em solo raso        | 26,37%      |
| 4      | Agricultura em solo profundo    | 5,76%       |
| 5      | Caatinga em solo raso           | 50,29%      |
| 6      | Caatinga em solo profundo       | 10,37%      |
| 7      | Várzeas inundáveis              | 0,19%       |
| 8      | Áreas semi-impermeáveis         | 0,10%       |
| 9      | Água                            | 1,44%       |

## Dados de Entrada

Além dos dados e informações obtidas no pré-processamento, o MGB utiliza diversos outros dados, tais como: dados de chuva (precipitação diária), vazão, clima (médias climáticas mensais dos parâmetros como temperatura, vento, umidade relativa, insolação e pressão atmosférica da região).

Os dados de precipitação das estações pluviométricas localizadas no Rio Grande do Norte tiveram como fonte a EMPARN (Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte), enquanto os dados de precipitação das estações localizadas na Paraíba foram cedidos pela AESA (Agência Executiva de Gestão das Águas). Os dados de vazão foram obtidos diretamente pelo ANA data acquisition, presente no próprio plugin do MGB. Os arquivos de clima foram obtidos através de base de dados interna de normais para o Brasil (INMET) também presente no plugin do MGB.

Nesse estudo foram utilizadas 56 postos pluviométricos e 1 posto fluviométrico (37470000), localizado em Jardim de Piranhas. O período simulado foi entre 1963 e 2015 (Figura 3).

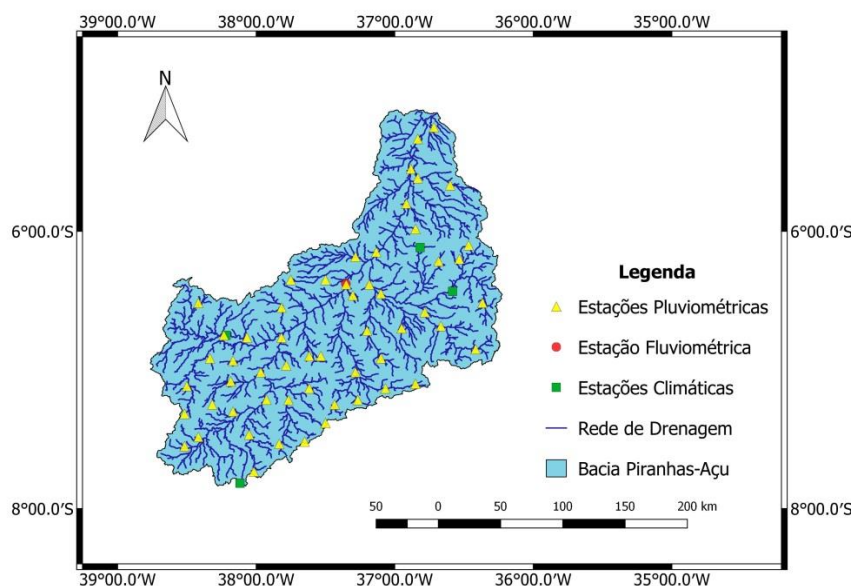


Figura 3- Distribuição das estações

### Calibração dos Parâmetros

O modelo MGB utiliza um conjunto de parâmetros fixos e outros calibráveis. Os parâmetros considerados fixos são aqueles que não alteram significativamente os resultados do modelo, por exemplo: índice de área foliar (IAF), albedo, altura média da vegetação e resistência superficial do solo (COLLISHONN, 2001). Os parâmetros fixos utilizados foram utilizados os valores escolhidos por Negreiros (2017) (Tabela 2).

Para calibrar o conjunto de parâmetros calibráveis foram realizadas várias simulações manualmente. O ajuste da calibração do modelo foi feita utilizando o coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NS), que mostra quão próximo as vazões calculadas estão das vazões observadas nos postos fluviométricos (Equação 1) (Moriasi *et al.*, 2007). Quanto mais próximo de 1 for o coeficiente, melhor foi a calibração.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{mean})^2} \quad (1)$$

Onde  $Y_i^{obs}$  e  $Y_i^{sim}$ , são as vazões observadas e simuladas, respectivamente; e  $Y_i^{mean}$  é a média das vazões observadas ao longo de todo o período da simulação.

Segundo Gotschalk & Motovilic (2000)  $NS = 1$  corresponde a um ajuste perfeito,  $NS > 0,75$  o modelo é considerado adequado e bom;  $0,36 < NS < 0,75$  o modelo é considerado aceitável. Já segundo Zaapa (2002), valores de NS acima de 0,5 qualificam o modelo para simulação.

Tabela 2: Parâmetros fixos utilizados

| URH | Descrição                       | Albedo | IAF | Altura média da vegetação (m) | Resistência superficial (s/m) |
|-----|---------------------------------|--------|-----|-------------------------------|-------------------------------|
| 1   | Caatinga densa em solo raso     | 0,13   | 6,0 | 10                            | 100                           |
| 2   | Caatinga densa em solo profundo | 0,13   | 6,0 | 10                            | 100                           |
| 3   | Agricultura em solo raso        | 0,17   | 3,0 | 1,0                           | 70                            |
| 4   | Agricultura em solo profundo    | 0,17   | 3,0 | 1,0                           | 70                            |
| 5   | Caatinga em solo raso           | 0,18   | 2,0 | 6,0                           | 60                            |
| 6   | Caatinga em solo profundo       | 0,18   | 2,0 | 6,0                           | 60                            |
| 7   | Várzeas inundáveis              | 0,10   | 1,0 | 0,5                           | 0                             |
| 8   | Áreas Semi-Impermeáveis         | 0,10   | 1,0 | 0,5                           | 200                           |
| 9   | Água                            | 0,08   | 1,0 | 0,1                           | 0                             |

Fonte: Negreiros, 2017

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O MGB-IPH apresentou NS de 0,802, no hidrograma da estação fluviométrica No 37470000, localizada em Jardim de Piranhas/RN, um valor considerado adequado e bom, segundo Gotschalk & Motoviloc (2000). Este resultado é semelhante ao obtido por Felix & Paz (2016), que obteve um valor de NS de 0,7, mas bem diferente do resultado obtido por Negreiros (2017) que obteve NS inaceitáveis, ambos os estudos realizados para sub-bacias do rio Piranhas-Açu. Esta variabilidade de resultados obtidos pode ser função da presença de reservatórios de grande porte nas proximidades das estações fluviométricas. No presente trabalho e no estudo de Feliz & Paz as estações fluviométricas analisadas no ajuste do modelo eram relativamente distantes de um grande reservatório de regularização e existe uma significativa bacia remanescente. No caso do estudo de Negreiros, a bacia hidrográfica estudada (Bacia do rio Seridó) é fortemente influenciada pela presença de vários reservatórios de grande e médio porte.

Na Tabela 3 são mostrados os parâmetros calibráveis para a bacia de estudo. O parâmetro  $W_m$  (mm), representa a capacidade de armazenamento de água no solo,  $b$  o controle da separação entre o escoamento superficial e a saturação de armazenamento de água,  $K_{bas}$  (mm/dia) parâmetro de escoamento subterrâneo,  $K_{int}$  (mm/dia) parâmetro de drenagem sub-superficial,  $XL$  Índice de distribuição do tamanho dos poros,  $CAP$  parâmetro que representa a presença ou não de fluxo ascendente de umidade do lençol freático para o perfil do solo,  $WC$  (mm) limite de armazenamento para acontecer fluxo ascendente ou descendente.

Em regiões semiáridas têm-se baixos valores de  $W_m$  devido as baixas profundidade dos solos, quanto menor o valor de  $W_m$ , maior o escoamento superficial. Diferentemente do  $W_m$  o parâmetro  $b$  é diretamente proporcional ao escoamento superficial e indiretamente proporcional a quantidade de água que infiltra no solo, ou seja, quanto maior o parâmetro  $b$ , maior é o escoamento superficial e menor a infiltração (COLLISCHONN, 2001). Diante disso os valores adotados para o

parâmetro  $b$  deveriam ser altos para a bacia devido a baixa profundidade do solo, no entanto, devido a alta retenção de água nos reservatórios, o valor de  $b$  que apresentou melhor performance foi muito baixo. Segundo Ribeiro Neto (2006) deve variar entre 0 e 1,2. Os parâmetros  $K_{bas}$  e  $K_{int}$ , relacionados com a parcela da precipitação que gera escoamento subterrâneo e subsuperficial, respectivamente, são baixos devido a região semiárida ter geologia cristalina e ocorrer maior contribuição do escoamento superficial.

Tabela 3 – Parâmetros calibráveis

| URH                             | Wm  | b    | Kbas | Kint | XL  | CAP | WC  |
|---------------------------------|-----|------|------|------|-----|-----|-----|
| Caatinga densa em solo raso     | 430 | 0.05 | 0    | 1    | 0.6 | 0   | 0.1 |
| Caatinga densa em solo profundo | 730 | 0.05 | 0    | 1    | 0.6 | 0   | 0.1 |
| Agricultura em solo raso        | 430 | 0.05 | 0    | 1    | 0.6 | 0   | 0.1 |
| Agricultura em solo profundo    | 730 | 0.05 | 0    | 1    | 0.6 | 0   | 0.1 |
| Caatinga em solo raso           | 430 | 0.05 | 0    | 1    | 0.6 | 0   | 0.1 |
| Caatinga em solo profundo       | 730 | 0.05 | 0    | 1    | 0.6 | 0   | 0.1 |
| Várzeas inundáveis              | 800 | 0.05 | 0    | 1    | 0.6 | 0   | 0.1 |
| Áreas Semi-Impermeáveis         | 300 | 0.05 | 0    | 1    | 0.6 | 0   | 0.1 |
| Água                            | 0   | 0    | 0    | 1    | 0.6 | 0   | 0.1 |

O hidrograma resultante no período de calibração, para a estação fluviométrica escolhida, mostra que os valores calculados pelo modelo tendem a acompanhar os valores que foram observados na estação. Entre o ano de 2008 e 2009, pôde-se observar que o pico da vazão calculada é inferior ao da vazão observada, isso se deve ao fato deste anos terem sido extremamente chuvosos, de forma que a maioria dos reservatórios da região sangraram e, como o MGB foi calibrado para considerar que boa parte do armazenamento fica retido nos reservatórios, o modelo não consegue representar os eventos de vertimento que ocorreram nesse período (Figura 7).

Assim como no estudo de Felix & Paz (2016) e de Negreiros (2017) a curva de permanência mostra uma diferença significativa. Estas diferenças tem relação com a operação dos reservatórios, a estação fluviométrica estuda está localizada num trecho do rio Piranhas-Açu perenizado pelo reservatório Curemas-Mãe D'Água, fazendo com que curva de permanência dos dados observados apresenta uma maior regularização que a curva de permanência dos dados calculados pelo modelo (Figura 8).

Figura 7 - Comparação entre hidrograma calculado e observado

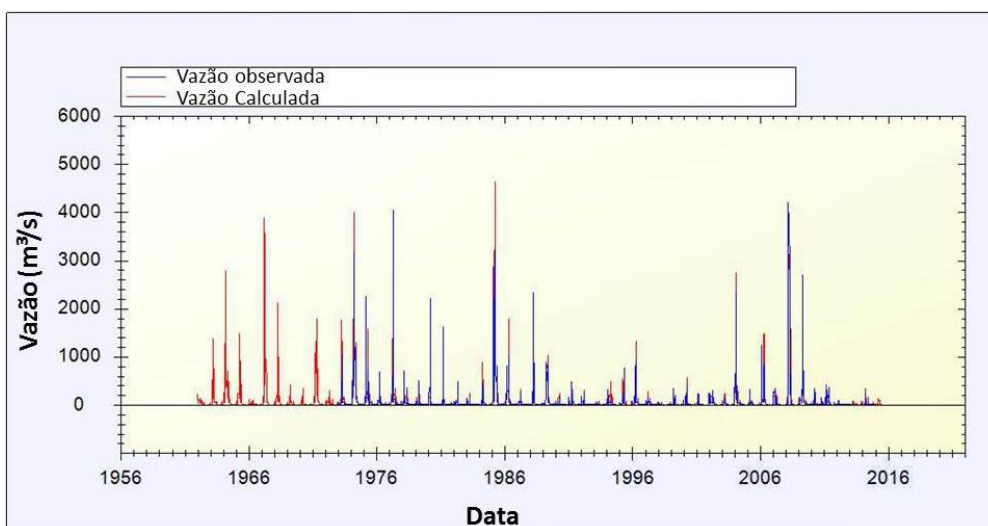
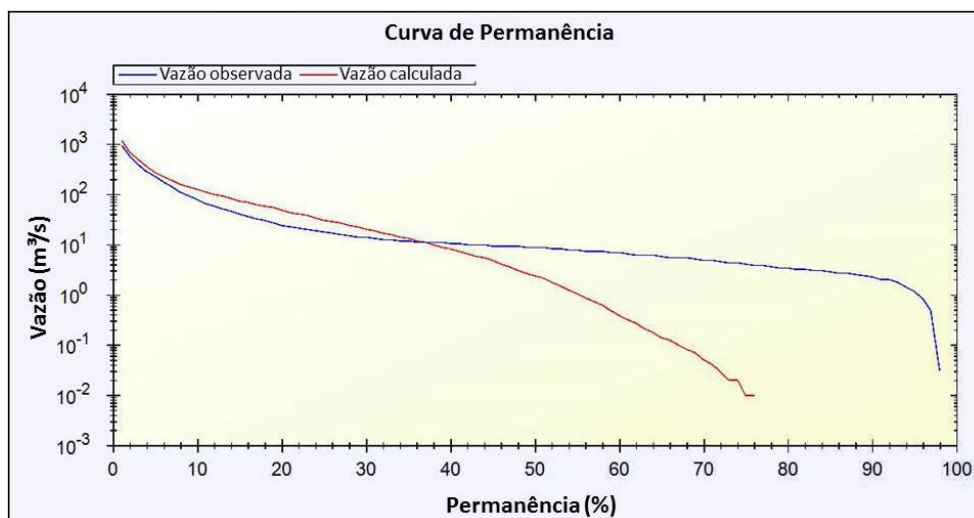


Figura 8 - Curvas de permanência de vazões observadas e calculadas



## CONCLUSÃO

O modelo MGB-IPH apresentou um bom ajuste para a estação fluviométrica Jardim de Piranhas, com um coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,802, mostrando que o modelo conseguiu representar bem os processos hidrológicos de transformação de chuva em vazão na bacia.

Em alguns momentos os hidrogramas que foram calculados através do modelo mostraram vazões inferiores as observadas na estação fluviométrica, mostrando que o modelo tem dificuldade de representar a presença de reservatórios de grande porte na bacia.

A curva de permanência apresentou diferenças significativas, devido a dificuldade do modelo em representar a regularização da vazão na bacia devido a presença de grandes reservatórios.

## REFERÊNCIAS

- ADAM, K.N.; FAN, F.M.; PONTES, P.R.M.; COLLISCHONN, W. Mudanças climáticas e vazões extremas na bacia do Rio Paraná. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 20, n. 4. 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA) (2014). Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu. Brasília, Brasil.
- COLLISCHONN, W., TUCCI, C. E. M. Simulação hidrológica de grandes bacias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 6, n. 2, 2001.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. **Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 1, p. 243-254, 2014.
- Fan F. M., Buarque D. C., Pontes, P.R.M., Collischonn W. Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Novembro de 2015, Brasília-DF. Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. PAP019919. 2015.
- GOTTSCHALK, L.; MOTOVILOV, Y. Macro-scale hydrological modelling – a scandinavian experience. In: International Symposium on: 'Can science and society save the water crisis in the 21st century - reports from the World', 2000, Tokyo. Anais. Tokyo: Japan Society of Hydrology and Water Resources, 2000. p.38-45.
- JARDIM, P F.; FLEISCHMANN, A. S.; PELINSON, D.; OLIVEIRA, A. M.; SIQUEIRA, V. A.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Manual de Exemplo de Aplicação do Modelo MGB-IPH 2017 utilizando o IPH-Hydro Tools. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 2017.
- Meller, A.; Bravo, J. M.; Collischonn, W. Assimilação de dados de vazão na previsão de cheias em tempo-real com o modelo hidrológico MGB-IPH. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, n. 3, p. 209-224, 2012.
- MORIASI, D. N. et al. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, v. 50, n. 3, p.885-900, 2007. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE).
- NEGREIROS, Beatriz Medeiros Fernandes. Aplicação do modelo hidrológico MGB-IPH na bacia hidrográfica do rio Seridó. 2017. 19 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.
- Oliveira, Marcos Antônio de. Governança na gestão dos recursos hídricos da bacia hidrográfica Piranhas-Açu: uma investigação jurídica, institucional e ambiental / Marcos Antônio de Oliveira. – Campina Grande (PB), 2013.
- RIBEIRO NETO, A. Simulação Hidrológica na Amazônia. 2006. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- SILVA, B. C.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação da bacia do Rio São Francisco através do modelo hidrológico MGB-IPH. São Luis: ABRH, v.1, p.1-22, 2005.
- SILVA, R. M. Entre o combate à seca e a convivência com o semiárido: transições paradigmáticas e sustentabilidade do desenvolvimento. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2010.
- STRAHLER, A.; STRAHLER, A. H. Geografia física. Tradução de Marta Barrutia e Pierre Sunyer. 3. Ed. Barcelona: OMEGA, 1994. 550 p.
- Tucci, C.E.M. Modelos hidrológicos. Porto Alegre, Ed. Universidade UFRGS, 1998.
- ZAAPA, M. Multiple-response verification of a distributed hydrological model at different spatial scales. 2002. 167 p. Ph.D. thesis (Natural Science) – Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.