

## XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### UM MODELO HIDROLÓGICO-HIDRODINÂMICO DA BACIA DO PARANÁ E SEUS RESERVATÓRIOS

*Ayan Fleischmann<sup>1</sup>; João Paulo Brêda<sup>2</sup>; Fernando Fan<sup>3</sup>; Sly Wongchuig<sup>4</sup> & Walter Collischonn<sup>5</sup> & Daniel Firmo Kazay<sup>6</sup> & Silvia Frazão Matos<sup>7</sup> & Karimi Mussi<sup>8</sup>*

**RESUMO** – Modelos hidrológicos regionais têm sido desenvolvidos recentemente de modo a representar, de forma acoplada, processos hidrodinâmicos em rios e planícies de inundação, bem como o efeito de reservatórios. Apresenta-se a aplicação do modelo MGB para a bacia do Alto Paraná (~947.000 km<sup>2</sup>), considerando propagação hidrodinâmica nas planícies de inundação e em 54 importantes reservatórios existentes ao longo de toda a bacia. São consideradas diferentes regras de operação, de regras simplificadas buscando manter o nível máximo normal, a regras mais sofisticadas objetivando manter um nível meta e um volume de espera para controle de cheias, ou mesmo regularização de vazões (no caso de Furnas) e vazões turbinadas/vertidas (Itaipu). A validação indicou um satisfatório desempenho do modelo com Nash-Sutcliffe > 0.7 para 70% dos postos fluviométricos. Cenários de simulação da atenuação em planícies de inundação mostraram a necessidade de representar o armazenamento nestas mesmo em tributários de cabeceiras. Por fim, a comparação entre atenuação de picos observada e simulada pelos reservatórios indicaram que para grande parte destes a simulação foi satisfatória, mas que para outros a regra de operação simplificada adotada subestimou a atenuação observada. O modelo apresentado é promissor para a gestão integrada dos reservatórios e dos recursos hídricos da bacia do Paraná.

### A HYDROLOGIC-HYDRODYNAMIC MODEL OF THE PARANÁ RIVER BASIN AND ITS RESERVOIRS

**ABSTRACT**– Regional hydrological models have been developed to represent, in a coupled strategy, hydrodynamic processes in rivers and floodplains, as well as reservoir effects. The MGB model application in Upper Paraná River (~947.000 km<sup>2</sup>) is presented in this study, considering the hydrodynamic routing in river-floodplains as well as 54 major dams in the basin. Different operation rules are considered, from simplified ones aiming at maintaining the normal water level, to more sophisticated rules involving waiting volumes for flood control, flow regularization (as in Furnas), and turbines/spillways flows (as in Itaipu). Model validation indicated a satisfactory performance with Nash-Sutcliffe > 0.7 for 70% of discharge gauges. Simulation scenarios with and without floodplains indicated the importance of considering the storage even in small, upstream floodplains. Finally, a comparison between observed and simulated flood peak attenuation by reservoirs showed that part of the reservoirs were well simulated, while for others the simplified adopted rules led to underestimation of flood attenuation. The presented model is very promising for integrated operation of reservoirs as well for integrated water resources management in the Paraná River Basin.

**Palavras-Chave** – Modelagem hidrológica-hidrodinâmica, reservatórios, Bacia do Rio Paraná

1) IPH/UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil, [ayan.fleischmann@gmail.com](mailto:ayan.fleischmann@gmail.com);

2) IPH/UFRGS, [joapaulolfb@gmail.com](mailto:joapaulolfb@gmail.com);

3) IPH/UFRGS, [fernando.fan@ufrgs.br](mailto:fernando.fan@ufrgs.br);

4) IPH/UFRGS, [xinox010@gmail.com](mailto:xinox010@gmail.com);

5) IPH/UFRGS, [waltercollischonn@gmail.com](mailto:waltercollischonn@gmail.com);

6) Itaipu Binacional, Av. Tancredo Neves, 6731, Foz do Iguaçu, Brasil, [danielfk@itaipu.gov.br](mailto:danielfk@itaipu.gov.br);

7) Itaipu Binacional, [sfrazao@itaipu.gov.br](mailto:sfrazao@itaipu.gov.br);

8) Itaipu Binacional, [kfmc@itaipu.gov.py](mailto:kfmc@itaipu.gov.py);

## INTRODUÇÃO

Modelos hidrológicos em escala regional (i.e. áreas entre  $10^4$  e  $10^6$  km<sup>2</sup>) têm sido desenvolvidos nos últimos anos, sendo ferramentas fundamentais para estudos de impactos de mudanças climáticas e alteração de uso do solo, gestão de recursos hídricos, compreensão e previsão de cheias, entre outros. Estes modelos foram também acoplados a módulos hidrodinâmicos, ora *online* (i.e. considerando feedbacks entre hidrologia e hidrodinâmica), ora *offline*, permitindo uma melhor representação da propagação de vazões ao longo de bacias e estimativa de áreas inundadas e níveis em rios e planícies de inundação (Paiva *et al.*, 2013; Hoch *et al.*, 2017; Fleischmann *et al.*, 2018a).

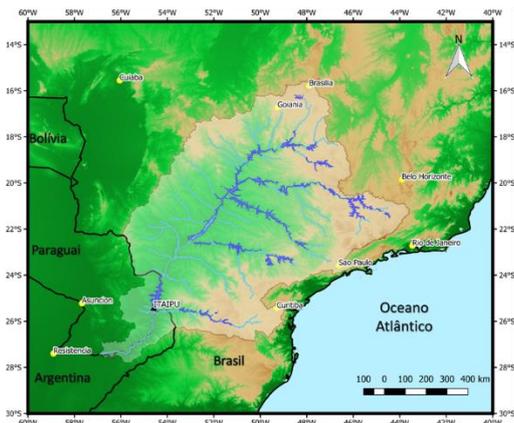
Mais recentemente, estudos têm proposto métodos de simulação de reservatórios nestes modelos de grande escala, o que traria grandes benefícios para estudos integrados de bacias hidrográficas, bem como para a operação coordenada de reservatórios (Döll *et al.*, 2009; Seibert *et al.*, 2014; Mateo *et al.*, 2014; Yoon *et al.*, 2015; Pokhrel *et al.*, 2018). A gestão de bacias como a do rio Paraná, onde existe uma grande cascata de reservatórios (Kelman, 1989; Agostinho *et al.*, 2008), poderia ser muito beneficiada por ferramentas como estas. Assim, o objetivo deste estudo é apresentar a aplicação de um modelo hidrológico-hidrodinâmico para a bacia do Alto Paraná incluindo a sua cascata de reservatórios, discutindo o papel de atenuação destas barragens e das planícies de inundação nas cheias que ocorrem na bacia.

## MATERIAIS E MÉTODOS

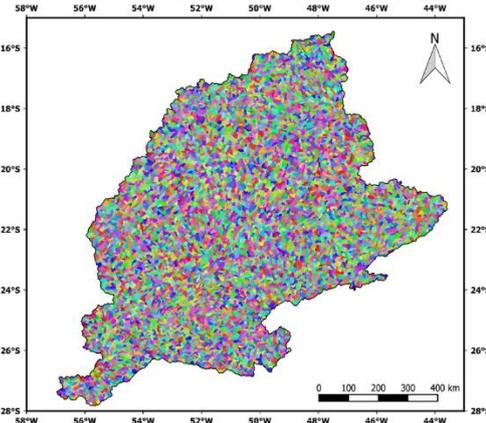
### Área de Estudo

A bacia do Alto Rio Paraná foi delimitada neste estudo até a barragem de Yaciretá no Paraguai (Figura 1), totalizando cerca de 947.000 km<sup>2</sup>. Possui 53 usinas hidrelétricas a montante de Itaipu despachadas centralizadamente pelo ONS, e 9 usinas no rio Iguaçu, que junto com Itaipu totalizam mais de 50% da energia gerada por hidrelétricas no país (EPE, 2015). Muitos dos principais polos econômicos do Brasil (como São Paulo e Brasília) também estão localizados na bacia. Apresenta uma grande variabilidade da sazonalidade de precipitação, variando de regiões com forte sazonalidade no norte da bacia (clima tropical com inverno seco) para um regime com pouca sazonalidade no sul próximo aos rios Iguaçu, Ivaí e Paranapanema (clima subtropical úmido). Além disso, grandes planícies de inundação ocorrem ao longo da bacia, como as planícies do rio Paraná (como a Ilha Grande entre os reservatórios de Porto Primavera e Itaipu) (Agostinho *et al.*, 2008) e as planícies no Alto Rio Iguaçu e Alto Rio Paranapanema, as quais podem atenuar expressivamente eventos de cheia.

(a) Bacia do Alto Rio Paraná



(b) Minibacias



(c) Barragens simuladas

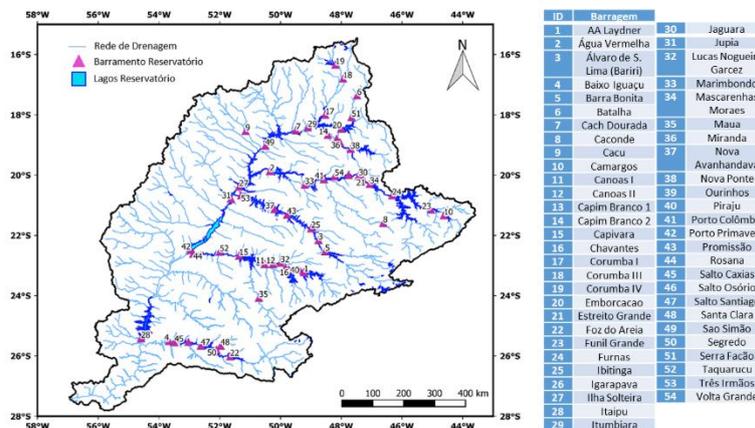


Figura 1 – (a) Localização da bacia do Paraná; (b) minibacias em que a bacia foi discretizada; (c) barragens simuladas no modelo hidrológico.

## Modelo MGB

O modelo hidrológico MGB (Collischonn *et al.*, 2007; Pontes *et al.*, 2017) é um modelo semi-distribuído que representa processos hidrológicos verticais (interceptação vegetal, infiltração de água no solo, evapotranspiração e geração de escoamento) e processos hidrodinâmicos de propagação de fluxos em rios e planícies de inundação, e tem sido tipicamente aplicado a bacias de grande escala (>1000 km<sup>2</sup>), apesar de ter sido também utilizado em áreas menores. A bacia é dividida em minibacias (Figura 1b), que são definidas para esta aplicação como a área de contribuição local para trechos de rio de mesma distância (aqui definida como 10 km). Dentro destas, unidades de resposta hidrológica (URH's) são definidas como áreas de comportamento hidrológico similar (e.g., florestas de solo raso, agricultura de solo profundo), para as quais são estabelecidos os parâmetros de solo e vegetação do modelo. Em sua versão mais recente o modelo foi acoplado ao software SIG QGIS, e permite ao usuário a simulação de complexos sistemas rios-planície de inundação com o uso de propagação hidrodinâmica (Pontes *et al.*, 2017).

Neste estudo, o modelo foi aplicado à bacia do Alto Paraná de modo a representar tanto as planícies de inundação quanto os diversos reservatórios existentes ao longo da bacia, seguindo a metodologia descrita por Fleischmann *et al.* (2018b) para a bacia do Itajaí-Açu. O modelo foi simulado em passo de tempo diário utilizando dados de precipitação observada de 2030 postos pluviométricos da ANA e dados de clima para cálculo da evapotranspiração de 195 estações do INMET. A calibração manual foi realizada para o período 1990-2010 e a validação para 1980-1990, utilizando dados de vazão observada de 143 postos fluviométricos (estações da ANA e postos de vazão naturalizada do ONS para o local de barragens). As URH's foram obtidas do produto para a América do Sul desenvolvido por Fan *et al.* (2015), a topografia do terreno do SRTM 90 m do HydroSheds (<https://www.hydrosheds.org/>), e a bacia discretizada num total de 9625 minibacias. As larguras de calha cheia dos rios foram obtidas a partir da máscara d'água de Pekel *et al.* (2015), e as profundidades foram calibradas a partir de uma relação geomorfológica com a área de drenagem obtida previamente para a bacia a partir de dados in-situ de seções transversais. Como condição de contorno de jusante assumiu-se um nível constante na barragem de Yaciretá. A seguir são apresentados detalhes da simulação de reservatórios.

### Simulação de reservatórios

Os reservatórios da bacia do Paraná foram simulados como condição de contorno interna do modelo MGB, tendo sido simulado um total de 54 barragens seguindo critérios de relevância na alteração de hidrogramas e tamanho dos reservatórios (Figura 1c). Assim, as equações de propagação inercial (hidrodinâmica), baseada nas equações de Saint-Venant (i.e. equações de momento e continuidade), foram adaptadas de modo a substituir a equação de momento por uma equação de defluência das barragens (i.e. curva-chave relacionando cota e vazão defluente). Além disso, é considerada a variação temporal da área inundada do reservatório, de modo a estimar a parcela de evaporação do lago de forma dinâmica e o impacto deste na hidrologia da bacia.

Para simular os reservatórios, é necessário que a curta cota-área-volume do conjunto de minibacias que compõem o reservatório seja igual à curva real dos reservatórios (e disponibilizada pelo ONS). Assim, foi realizado um procedimento para substituir a curva das minibacias localizadas dentro de cada lago de reservatório simulado pela curva deste, sendo esta curva distribuída linearmente de forma a garantir, para uma mesma cota, um maior volume próximo ao barramento e um menor em trechos mais distantes.

A operação dos reservatórios pode ser simulada através de adaptações da equação de defluência da barragem. Neste estudo os reservatórios foram divididos em quatro grupos baseados na regra de operação adotada: (i) reservatórios com pequena capacidade de regularização ou reservatórios localizados no rio Iguaçu: regra simplificada visando a manter o nível máximo

operacional; (ii) 15 reservatórios com capacidade de regularização localizados a montante de Itaipu e utilizados para controle de cheia visando a estação de Porto São José; (iii) usina de Furnas; e (iv) usina de Itaipu. As informações necessárias para todas as barragens foram: nível máximo normal, máximo maximum e vazão no nível máximo maximum. Adicionalmente, para as barragens dos grupos ii, iii e iv, foram necessários também dados das estruturas hidráulicas extravasoras (descarregadores de fundo, vertedouros, etc.).

A operação simplificada (i) pressupõe que a defluência total será zero para cotas abaixo de 0.5 m do nível máximo normal, e será gradualmente aumentada com o nível atingindo a vazão de projeto (tipicamente a vazão decamilenar) no nível máximo maximum, emulando a abertura de comportas dos descarregadores de superfície (vertedouros) e buscando manter o nível da água do reservatório próximo ao máximo normal. A operação (ii) visando ao controle de cheias em Porto São José foi baseada na manutenção de um nível meta conforme definido pelo ONS (ONS, 2019), que estabelece o volume de espera a ser mantido em cada semana do período de cheias da bacia. Por simplicidade, foi assumido aqui o maior volume de espera proposto para cada reservatório. Caso o nível da água baixe do nível meta, a vazão defluente dada pela equação hidráulica dos respectivos vertedouros/descarregadores de fundo é diminuída por um fator  $F$ , objetivando voltar ao nível meta. Caso supere o nível, este fator  $F$  é aumentado até atingir a unidade, indicando que todas as estruturas extravasoras estariam abertas. Esta operação não considera a vazão adicional que poderia ser liberada com as turbinas, o que é um critério tipicamente adotado em simulações de eventos de cheias.

Dada a grande capacidade de regularização de Furnas, buscou-se simular a operação desta a partir da manutenção, durante períodos secos, de uma defluência próxima a  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$  (similar à vazão regularizada), e da manutenção de um nível meta próximo a 767.37 m para vazões maiores (isto é, alterando o fator  $F$  de abertura de comportas para manter este nível através do vertedouro).

Por fim, a operação de Itaipu levou em conta a manutenção do nível meta 220 m e também a abertura gradual das turbinas (fator  $F$  de abertura de turbinas) e, quando estas estavam em pleno uso (i.e. a capacidade total das turbinas assumida como  $13800 \text{ m}^3/\text{s}$ ), a abertura gradual dos vãos do vertedouro (fator  $F$  de abertura de vertedouro), até que estes estivessem totalmente abertos. Estas diferentes formas de simulação da operação de reservatórios são avaliadas neste estudo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta hidrogramas simulados e observados em pontos de interesse ao longo da bacia, indicando um satisfatório ajuste do modelo para os rios Ivinhema e Iguaçu, com forte efeito de planície de inundação e atenuação de hidrogramas, e a localização das barragens de Itumbiara, Furnas e Itaipu (vazões naturalizadas). A Figura 3 apresenta histogramas da métrica Nash-Sutcliffe

(NSE) de performance do modelo para os 143 postos fluviométricos utilizados, indicando que mais de 70% dos postos obtiveram NSE superior a 0.7 na verificação do modelo.

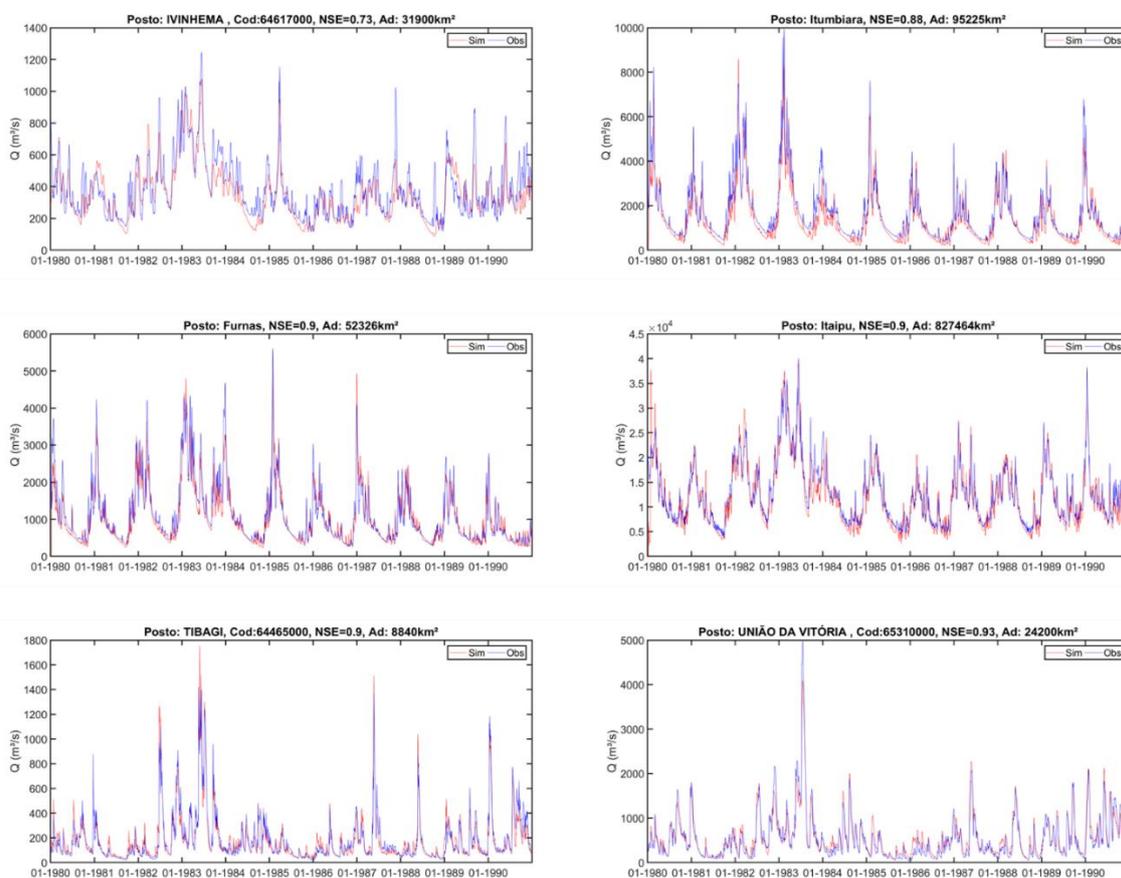


Figura 2 – Hidrogramas simulados e observados para os postos fluviométricos de Ivinhema, Itumbiara e União da Vitória e para as barragens (vazões naturalizadas ONS) de Itumbiara, Furnas e Itaipu. São apresentados também os valores de Nash-Sutcliffe (NSE) e área de drenagem (Ad).

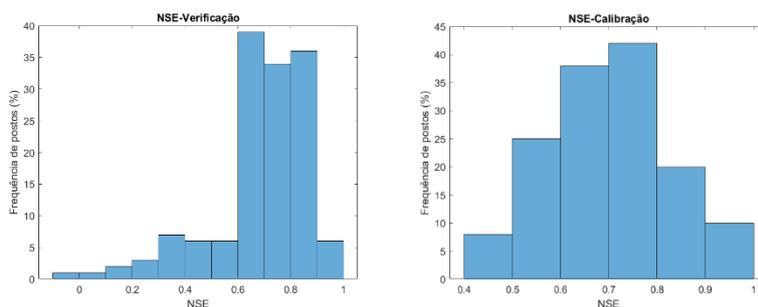


Figura 3 – Histogramas de valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) para os 143 postos fluviométricos (observações da ANA e vazões naturalizadas da ONS) utilizados para calibração (1990-2010) e verificação (1980-1990) do modelo.

A bacia do Paraná possui extensas planícies de inundação, tanto ao longo do rio Paraná quanto em tributários ou áreas de cabeceiras. A Figura 4 apresenta alguns destes tributários (Rio Ivinhema, Rio Verde, Rio Iguaçu e Rio Itapetininga no Alto Rio Parapanema) e imagens ópticas salientando características típicas de rios com planícies, como um grande número de meandros e meandros

abandonados, vegetação ripária adaptada a inundações, etc. Estas planícies possuem uma alta capacidade de amortecer cheias, e para avaliar este efeito o modelo MGB foi simulado nos cenários alternativos com e sem planícies (isto é, considerando rios com calha unicamente retangular). Na Figura 4 são apresentadas as vazões máximas simuladas nestes cenários (período 1980-2010) e os tempos de retorno associados a estas vazões. De modo geral, as vazões máximas simuladas com planícies (pontos vermelhos) foram bem ajustadas às observações (pontos azuis), enquanto o cenário sem planícies (pontos verdes) indica que as vazões poderiam ser expressivamente superestimadas caso o modelo não considerasse este amortecimento. Estes resultados indicam a necessidade de se utilizar modelos de propagação adequados mesmo para trechos de montante em bacias de grande escala (por exemplo, o rio Verde com 1840 km<sup>2</sup>), representando a condutância limitada destes trechos de baixa declividade e o armazenamento de água nas planícies.

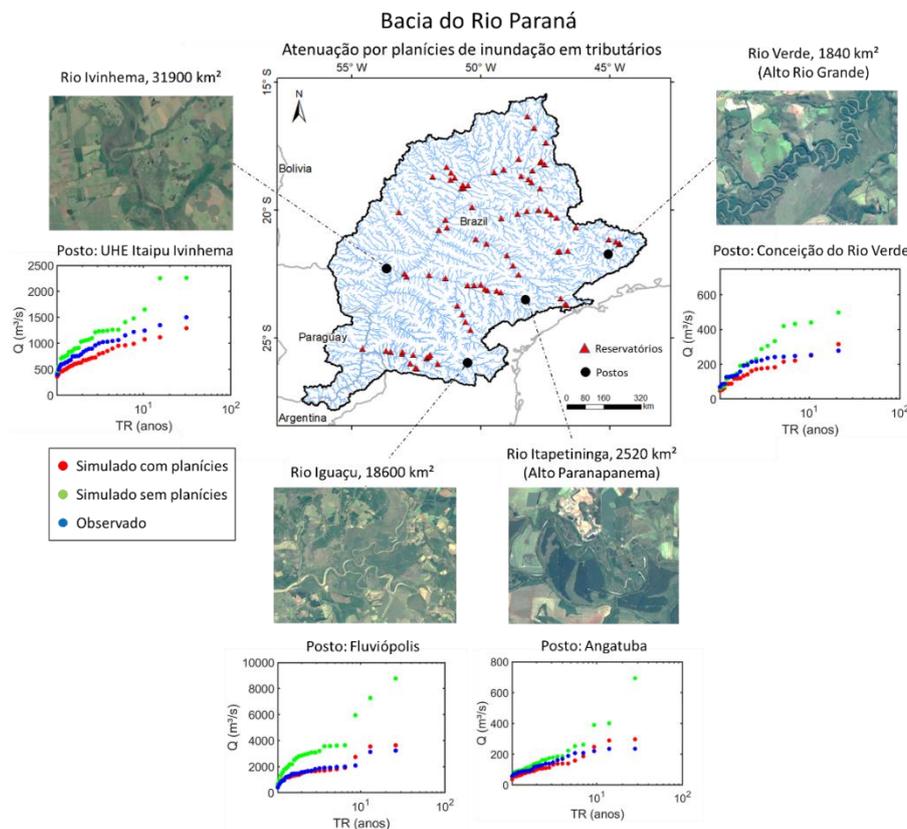


Figura 4 – Vazões máximas simuladas nos cenários com e sem planície de inundação em diferentes partes da bacia do Paraná, indicando o papel de planícies em pequenas sub-bacias.

A simulação dos 54 reservatórios considerados na bacia do Paraná é sintetizada na Figura 5, através da comparação da atenuação de picos observada e simulada pelas barragens. Para cada ano do período de simulação com disponibilidade de afluência e defluência observadas (via Sistema de Acompanhamento de Reservatórios- SAR/ANA), obteve-se a redução de pico do maior evento do ano (i.e. diferença relativa entre máxima defluência e afluência durante o evento), e calculou-se a redução média dos picos para cada barragem. De modo geral, a Figura 5 indica que para parte dos

reservatórios há uma concordância entre redução de pico simulada e observada, sendo que para uma outra parcela houve uma maior capacidade de amortecimento de picos nos dados observados. Isto é coerente com a regra de operação adotada para os reservatórios visando ao controle de cheias em Porto São José, cujos volumes de espera definidos pelo ONS e simulados neste estudo são inferiores aos que estes reservatórios muitas vezes adotam (por exemplo, para regularização pode haver um rebaixamento superior ao considerado neste estudo). Desenvolvimentos futuros deste estudo podem considerar regras de operação distintas visando à regularização de vazões, por exemplo, como foi feito apenas para a barragem de Furnas neste estudo. Como ilustração da afluência e defluência simuladas de barragens, a Figura 5 apresenta exemplos para Barra Bonita no rio Tietê e Furnas no Rio Grande, indicando como a regularização simulada em Furnas garante a manutenção de uma vazão de base superior à afluência ao longo do ano, enquanto a simulação apenas da operação de controle de cheias em Barra Bonita somente atenua os picos, mantendo a afluência similar à defluência durante períodos de recessão do hidrograma.

Por fim, a simulação de Itaipu seguiu uma operação distinta visando à representação tanto das vazões turbinadas quanto das vertidas. A Figura 6 apresenta a série temporal, para um período de três anos, de vazões turbinadas e vertidas (Figura 6a), sendo que com a operação adotada apenas quando a abertura das turbinas fosse igual a 1 (totalmente aberta e vazão vertida igual a 13.800 m<sup>3</sup>/s) haveria vertimento via vertedouro (que por sua vez atingiu uma abertura máxima, no período mostrado, igual a 20% durante o evento de 1992, conforme Figura 6b). Estes resultados indicam a potencialidade do modelo MGB aplicado à bacia do Paraná para representar processos hidrológicos e hidráulicos, considerando tanto uma propagação hidrodinâmica com forte embasamento físico quanto a interação com reservatórios.

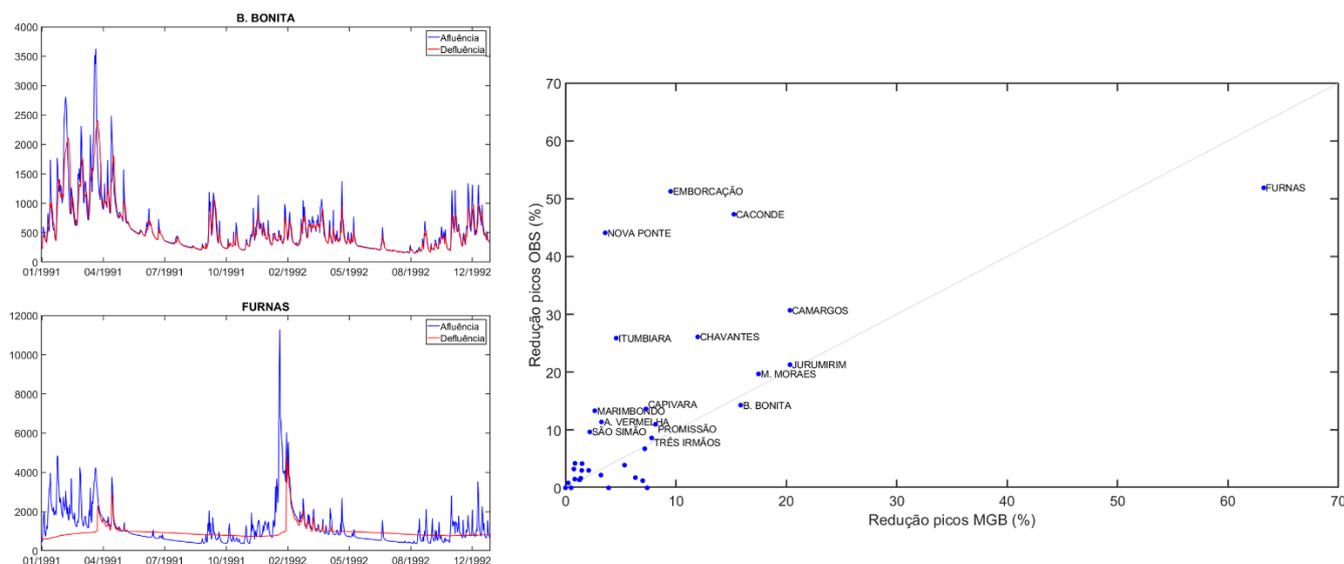


Figura 5 – Hidrogramas simulados da afluência e defluência das barragens de Barra Bonita (Rio Tietê) e Furnas (Rio Grande) e comparação entre atenuação de picos (observada x simulada) dos 54 reservatórios simulados.

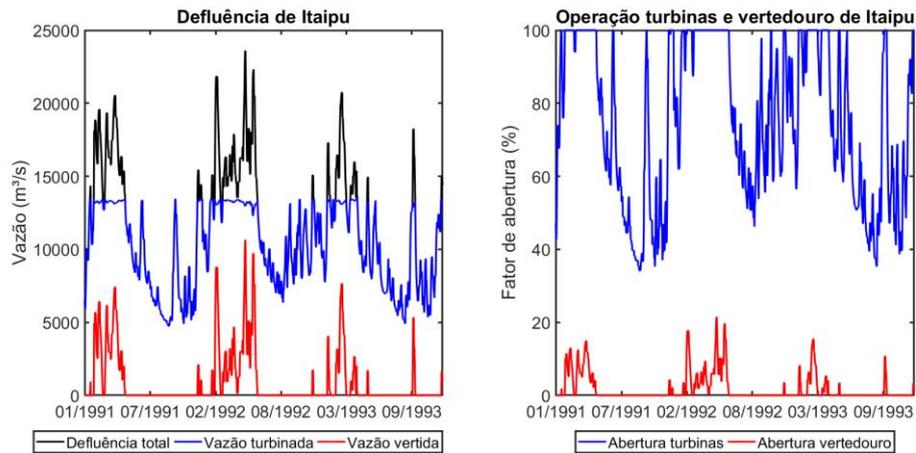


Figura 6 – (a) Defluência simulada de Itaipu (defluência total e vazões turbinadas e vertidas) e (b) operação das turbinas e vertedouro.

## CONCLUSÃO

Neste estudo foi apresentado o desenvolvimento de um modelo de grande escala para a bacia do Alto Rio Paraná. O modelo simula a hidrodinâmica dos rios e suas planícies de inundação, bem como a propagação dos diversos reservatórios existentes na cascata do Paraná. Foi considerada a operação dos reservatórios visando ao controle de cheias, seguindo a operação proposta pelo ONS para o posto de Porto São José, bem como a regularização da usina de Furnas e a operação com turbinas e vertedouro de Itaipu.

Os resultados mostraram um satisfatório ajuste do modelo à vazão observada, bem como uma coerência entre a atenuação de picos simulada e observada nos 54 reservatórios simulados. A avaliação do papel das planícies na atenuação de cheias também indicou o papel fundamental que estas têm neste aspecto, sendo importante considerar as diversas planícies existentes ao longo da bacia, mesmo em tributários de cabeceiras como o caso do rio Verde (Alto Rio Grande) com cerca de 1800 km<sup>2</sup>.

Possíveis aplicações e desenvolvimentos futuros do modelo apresentado incluem a simulação do Canal Pereira Barreto que conecta os reservatórios de Três Irmãos e Ilha Solteira; uso para operação coordenada da cascata do Paraná, por exemplo, durante eventos de cheia ou visando à maximização de geração de energia; avaliação integrada de alterações da bacia e de operações de reservatórios na disponibilidade hídrica, entres outros aspectos.

**AGRADECIMENTOS** – O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil.

## REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO, ANGELO ANTONIO, FERNANDO MAYER PELICICE, & LUIZ CARLOS Gomes. (2008). "Dams and the fish fauna of the Neotropical region: impacts and management related to diversity and fisheries." *Brazilian Journal of Biology* 68.4: 1119-1132.
- COLLISCHONN, W., et al., (2007). "The MGB-IPH model for large scale rainfall—runoff modelling". *Hydrological Sciences Journal*, 52, 878–895.
- DÖLL, PETRA, KRISTINA FIEDLER, & JING ZHANG. (2009). "Global-scale analysis of river flow alterations due to water withdrawals and reservoirs." *Hydrology and Earth System Sciences* 13.12: 2413-2432.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), (2015). "Brazilian energy balance". Rio de Janeiro, Brazil. 291 pp.
- FAN, F.M., et al., (2015). "A hydrological response units map for all South America". XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília, Brazil. Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.
- FLEISCHMANN, AYAN SANTOS; COLLISCHONN, W.; PAIVA, R. (2018). "Integrando reservatórios e planícies de inundação para a simulação de cheias em grandes bacias: aplicação na bacia do rio Itajaí-Açu". In: I Encontro Nacional de Desastres, 2018, Porto Alegre. Anais do I Encontro Nacional de Desastres, 2018.
- HOCH, J.M., HAAG, A.V., VAN DAM, A., WINSEMIUS, H.C., VAN BEEK, L.P.H., BIERKENS, M.F.P., (2017). "Assessing the impact of hydrodynamics on large-scale flood wave propagation – A case study for the Amazon Basin". *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21,117–132.
- ONS. (2019). "Manual de Procedimentos da Operação. Controle dos Reservatórios da Região Hidrográfica do Paraná - Bacia do rio Paraná até Porto São José".
- PAIVA, R. C. D. DE, BUARQUE, D. C., COLLISCHONN, W., BONNET, M. P., FRAPPART, F., CALMANT, S., & BULHÕES MENDES, C. A. (2013). "Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin". *Water Resources Research*, 49(3), 1226–1243.
- PEKEL, J.F., et al. (2016). "High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes." *Nature* 540.7633: 418.
- PONTES, P., et al. (2017). "MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS". *Environmental Modelling & Software*, 94, 1–20.
- SEIBERT, S. P., SKUBLICS, D., & EHRET, U. (2014). "The potential of coordinated reservoir operation for flood mitigation in large basins - A case study on the Bavarian Danube using coupled hydrological hydrodynamic models". *Journal of Hydrology*, 517, 1128 1144.
- YOON, Y., & BEIGHLEY, E. (2015). "Simulating streamflow on regulated rivers using characteristic reservoir storage patterns derived from synthetic remote sensing data". *Hydrological Processes*, 29(8), 2014.