

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ANÁLISE DE RESPOSTAS HIDROLÓGICAS E IMPACTOS NA SEGURANÇA HÍDRICA DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

*Walter Manoel Mendes Filho¹; Maria Luiza Teófilo Gandini²; Wilson Cabral de Sousa Júnior³ &
Demerval Aparecido Gonçalves⁴*

Abstract: Climate change is likely to impact hydrological drought trends worldwide in the 21st century. Thus, the challenges posed by scenarios of reduced water availability trigger public pressure for actions that can expand reservoirs to increase water security, especially in metropolitan regions. However, understanding the interactions triggered by the variability of the hydrological components associated with the operating rules in reservoirs linked to water-producing systems in these regions, especially over long-term horizons, is essential for enhancing the climate resilience of these systems. In this sense, this article presents the application of the System Dynamics approach to developing a generic model for the integrated analysis of hydrological responses and impacts on water security in the São Paulo metropolitan region. For this analysis, the Cantareira system was considered, which supplies approximately 9 million inhabitants in the metropolitan region of São Paulo, Brazil. The structuring of the model enabled the simulation of complex interactions associated with the dynamics of hydrological responses within the system's operational policies. The results suggest that the model can dynamically update the main hydrological components, allowing for the incorporation of hydrological projections and the identification of long-term trends in urban water supply systems.

Resumo: As mudanças climáticas provavelmente afetarão as tendências de secas hidrológicas em todo o mundo durante o século XXI. Assim, os desafios impostos por cenários de redução na disponibilidade hídrica desencadeiam a pressão pública por ações que podem resultar na expansão de reservatórios para aumentar a segurança hídrica, sobretudo em regiões metropolitanas. Porém, a compreensão das interações desencadeadas pela variabilidade das componentes hidrológicas associadas às regras de operação em reservatórios ligados aos sistemas produtores de água dessas regiões, especialmente em horizontes de longo prazo, é essencial para aumentar a resiliência climática desses sistemas. Nesse sentido, este artigo apresenta a aplicação da abordagem de Dinâmica de Sistemas no desenvolvimento de um modelo genérico para a análise integrada de respostas hidrológicas e impactos na segurança hídrica na região metropolitana de São Paulo. Para essa análise, foi considerado o sistema Cantareira, que abastece aproximadamente 9 milhões de habitantes na região metropolitana de São Paulo, Brasil. A estruturação do modelo permitiu simular interações complexas associadas à dinâmica das respostas hidrológicas nas políticas operacionais do sistema. Os resultados sugerem que o modelo é capaz de atualizar dinamicamente as principais componentes hidrológicas, permitindo incorporar projeções hidrológicas, e identificar tendências de longo prazo para sistemas urbanos de abastecimento de água.

Palavras-Chave – Mudanças Climáticas; Respostas Hidrológicas; Dinâmica de Sistemas.

¹ Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Aparecida de Goiânia, GO, Brasil, walter.mendes@ufg.br

² Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, MG, Brasil, (31) 3559-1541, maria.gandini@ufop.edu.br.

³ Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50, São José dos Campos, SP, Brasil, wilson.cabral@gp.ita.br

⁴ Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, Estrada Doutor Altino Bondensan, 500, São José dos Campos, SP, Brasil, demerval.goncalves@cemaden.gov.br

INTRODUÇÃO

Eventos de precipitação intensa, assim como períodos úmidos e secos, têm provocado danos significativos para a população em todo o mundo, particularmente nos países em desenvolvimento, conforme o relatório IPCC (2013). Na América do Sul, as projeções climáticas do Quinto Relatório de Avaliação (AR5, na sigla em inglês) publicadas em IPCC (2014), indicam cenários de secas mais longas e mais frequentes. No Brasil, as secas têm afetado diferentes regiões nos últimos anos: o nordeste no período 2010-2016; a Amazônia em 2005, 2010 e 2016; e o Sudeste em 2014-2015 (Coelho *et al.* 2016; Nobre *et al.* 2016; Marengo *et al.* 2017; Marengo *et al.* 2018).

A pressão sobre os sistemas hídricos poderá atingir níveis ainda mais elevados até 2050. As projeções da população mundial indicam entre 9,4 e 10,2 bilhões de pessoas, o que representará um aumento de 22 a 34%. Essa pressão será ainda mais agravada, em razão do crescimento desigual da população em diferentes regiões (ONU, 2018). A maior parte do crescimento populacional é esperada nos países em desenvolvimento, primeiro na África, e depois na Ásia, onde a escassez já é um problema importante (Mekonnen e Hoekstra, 2016; Boretti e Rosa, 2019).

Diante de cenários de escassez hídrica e aumento da demanda por água na maior parte do mundo (Pedro-Monzonís *et al.* 2015; Mo *et al.* 2016), as estratégias de gerenciamento de recursos naturais devem buscar a sustentabilidade dos sistemas envolvidos. No domínio da água, destaca-se o gerenciamento integrado de recursos hídricos, que serve como estrutura analítica para o desenvolvimento do modelo genérico apresentado neste artigo. Além disso, é adotada a abordagem de Dinâmica de Sistemas, que pode ser utilizada como um importante instrumento de apoio para melhorar o entendimento dos sistemas complexos e dinâmicos que permeiam a maioria das atividades humanas (Forrester, 1961; Sterman, 2000). Para facilitar a análise integrada das interações entre as respostas hidrológicas e impactos na segurança hídrica na região metropolitana de São Paulo, algumas ferramentas de modelagem em Dinâmica de Sistemas foram aplicadas na estruturação do modelo. E como estudo de caso, foi utilizado o sistema Cantareira, que abastece aproximadamente 9 milhões de habitantes na região metropolitana de São Paulo, Brasil. Esse sistema está conectado a diferentes regiões de abastecimento, compondo um sistema hídrico complexo e dinâmico.

Considerando a complexidade desse sistema, sob a influência de cenários de mudanças climáticas e pressões no ciclo oferta-demanda, postula-se que há dinâmicas de longo prazo que devem ser consideradas para análise integrada das respostas hidrológicas e impactos na segurança hídrica em regiões metropolitanas. Assim, o modelo proposto neste estudo permite uma visão de como diferentes padrões de variabilidade das respostas hidrológicas podem impactar na segurança hídrica em grandes centros urbanos.

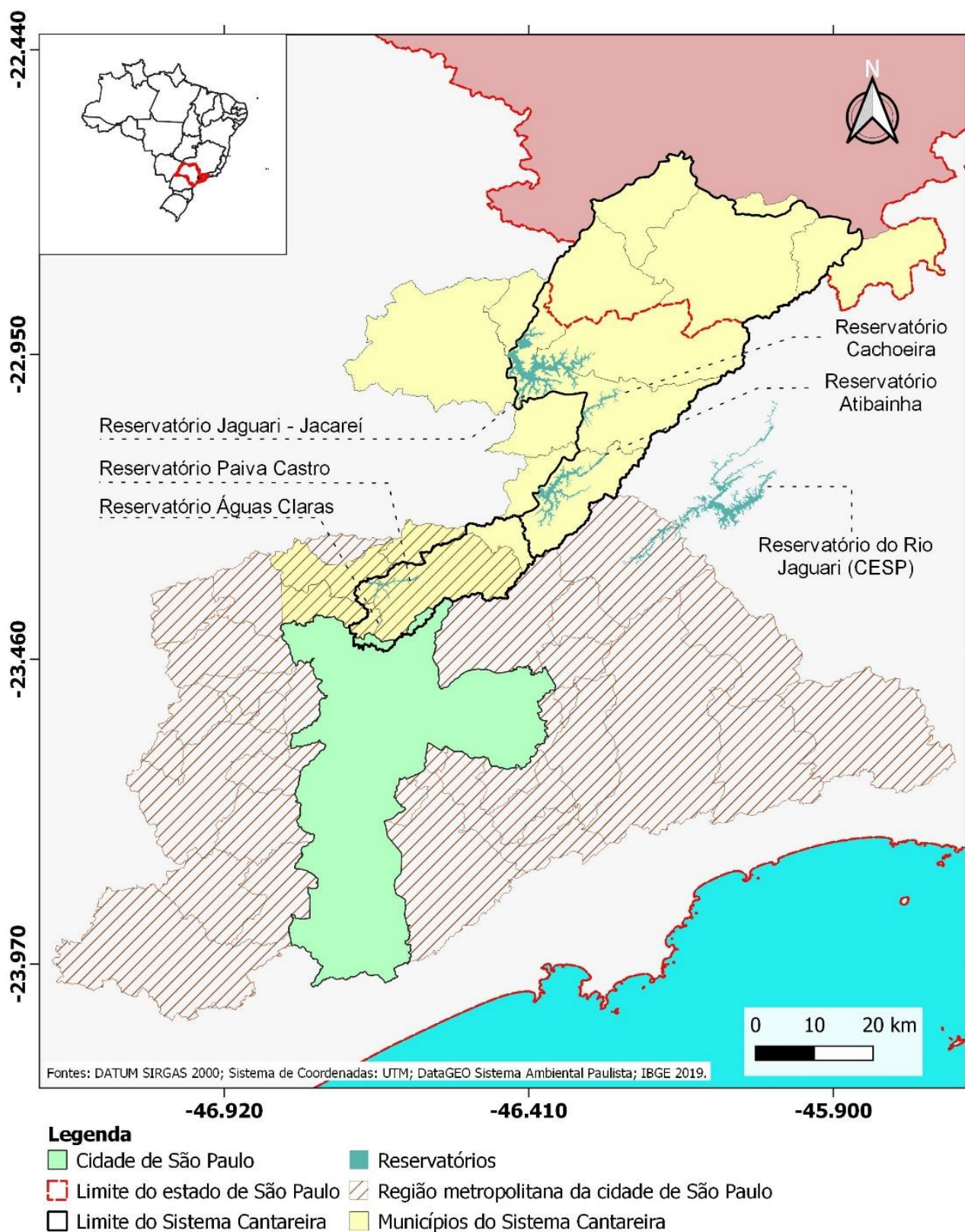
MATERIAIS E MÉTODOS

O Sistema Cantareira

O processo de estruturação do modelo genérico proposto neste artigo considera em contexto regional, todas as sub-bacias dos reservatórios que compõem o sistema Cantareira e a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), conforme apresentado na Figura 1.

A bacia do Cantareira é formada pelas sub-bacias: Alto Juquery, Atibainha, Cachoeira, Jacaré e Jaguari. Com área total de 2.279 km², a topografia varia na faixa de 745 – 2.027m (Zhang *et al.* 2018). Essa região é dominada pelas encostas moderadas a altas da Serra da Mantiqueira. As cabeceiras desse sistema estão localizadas nos estados de Minas Gerais e São Paulo, entre 46°30'W, 22°35'S e 45°50'W, 23°05'S.

Figura 1 – Contexto regional da área de estudo. Destacada na seta vermelha está a conexão entre o rio Jaguari e os reservatórios Atibainha, no sistema Cantareira.



Operado pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), uma série de canais e reservatórios formam o sistema Cantareira (Figura 1). Essas estruturas captam e redirecionam a água de alguns rios das bacias do Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ) para a bacia do Alto Tietê (AT), podendo atender a aproximadamente 9 milhões de habitantes (ANA, 2016; Nobre *et al.* 2016).

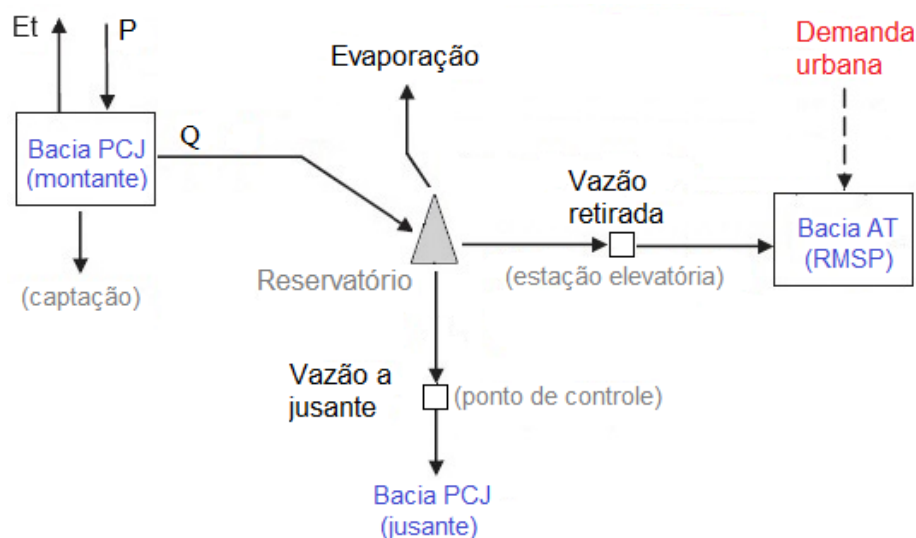
A RMSP representa uma das maiores densidades populacionais do Brasil, quase 60% da população vive na cidade de São Paulo, resultando em cerca de 7.220 habitantes por quilômetro quadrado. A cidade concentra 12% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional brasileiro e o dobro do PIB per capita do país (Marengo *et al.* 2020).

A delimitação das fronteiras do modelo

O melhor entendimento de mudanças endógenas e exógenas dos sistemas hidrológicos a longo prazo, segundo Thompson *et al.* (2013), exige a concepção de estruturas para modelagem que busquem identificar e descrever interações entre componentes do sistema para modelar os processos de retroalimentação entre o ciclo hidrológico e outros subsistemas ambientais alternativos, e modificados por impactos no ciclo hidrológico global.

Dada a complexidade em analisar essas interações entre as componentes hidrológicas associadas às regras de operação em reservatórios, para a configuração do ambiente de modelagem admitem-se os reservatórios que compõem o sistema Cantareira formando um sistema único e delimitam-se as fronteiras do modelo no contexto regional, conforme o modelo conceitual indicado na Figura 2.

Figura 2 – Modelo conceitual do sistema Cantareira.



A estrutura considera as bacias hidrográficas, a demanda, as variáveis hidrometeorológicas (P – precipitação; Et – evapotranspiração nas bacias contribuintes; Q – vazão afluente; Evaporação líquida do reservatório; vazões a jusante e retiradas), a infraestrutura hídrica desse sistema (pontos de controle / medição de vazão a jusante e retirada, características físicas do reservatório e captações superficiais nas bacias), além das condições de controle a jusante estabelecidas em outorga (ANA, 2017).

A abordagem de Dinâmica de Sistemas

O processo de modelagem envolveu o desenvolvimento do modelo de simulação usando o diagrama de estoque e fluxo (SFD, na sigla em inglês). Esses diagramas são representados por blocos que podem ser desenvolvidos para caracterizar melhor a acumulação e/ou depleção do(s) estoque(s) e a taxa de fluxo de quantidades no sistema (Ford, 1999; Sterman, 2000).

Um modelo físico de enchimento e esvaziamento de um reservatório pode ser apresentado na notação do diagrama SFD apresentado na Figura 3. O nível do reservatório é determinado pela taxa de entrada, $d(X)$, e de saída, $d(Z)$. A taxa de vazão é novamente determinada pelo nível da água (X), visto que o incremento de vazão eleva com o nível da água.

Matematicamente, o SFD pode ser representado da seguinte forma:

$$X(t) = \int_{t_0}^t [d(X) - d(Z)] dt - X(t_0) \quad (1)$$

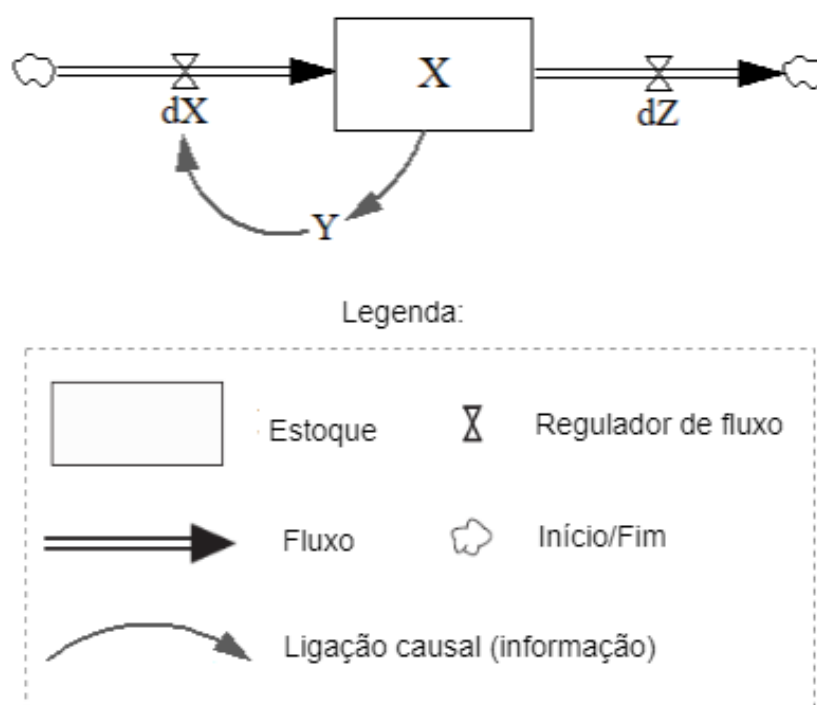
onde $d(X)$ e $d(Z)$ são, respectivamente, os fluxos de entrada e de saída do estoque entre o instante de tempo (t_0) e (t). A taxa de variação desse estoque pode ser obtida por:

$$d(X) = f(Y(t)) \quad (2)$$

$$Y(t) = g(X(t)) \quad (3)$$

ou seja, os estoques (X) são medidos no instante (t) e representam qualquer variável que se acumula ou se esgota ao longo do tempo, enquanto os fluxos $d(X)$ e $d(Z)$ são medidos ao longo de um intervalo (t) e representam as variáveis que fazem com que o estoque sofra alterações. Enquanto (Y) representa a variável auxiliar (Ford, 1999; Sterman, 2000; Mirchi *et al.* 2012).

Figura 3 – Representação esquemática de diagrama estoque e fluxo.



O processo de modelagem

O desenvolvimento do modelo considerou dados disponibilizados no relatório (ANA, 2016). A operação do Cantareira com a demanda alvo (31 m³/s) para a RMSP, e a vazão mínima requerida a jusante do sistema, na bacia PCJ para o período de 2009 a 2016, conforme o número de habitantes. Em termos quantitativos, o comportamento do reservatório pode ser reproduzido pelo balanço hídrico simplificado, conforme Equação 4:

$$Q_{afluente,t} = Q_{defluente,t} + Q_{transferência,t} + \frac{Vol_{final,t} - Vol_{inicial,t}}{\Delta_t} \quad (4)$$

onde $Q_{afluente,t}$ é a vazão média afluyente ao reservatório no intervalo de tempo (Δt); $Q_{defluente,t}$ é a vazão média defluente do reservatório no intervalo de tempo (Δt); $Q_{transferência,t}$ é a vazão média transferida do reservatório no intervalo de tempo (Δt) na estação Elevatória Santa Inês; $Vol_{final,t}$ é o volume final do reservatório no intervalo de tempo (Δt); $Vol_{inicial,t}$ é o volume inicial do reservatório no instante (t) e Δ_t é o intervalo de tempo.

Para condições de vertimento, considera-se a Equação 5:

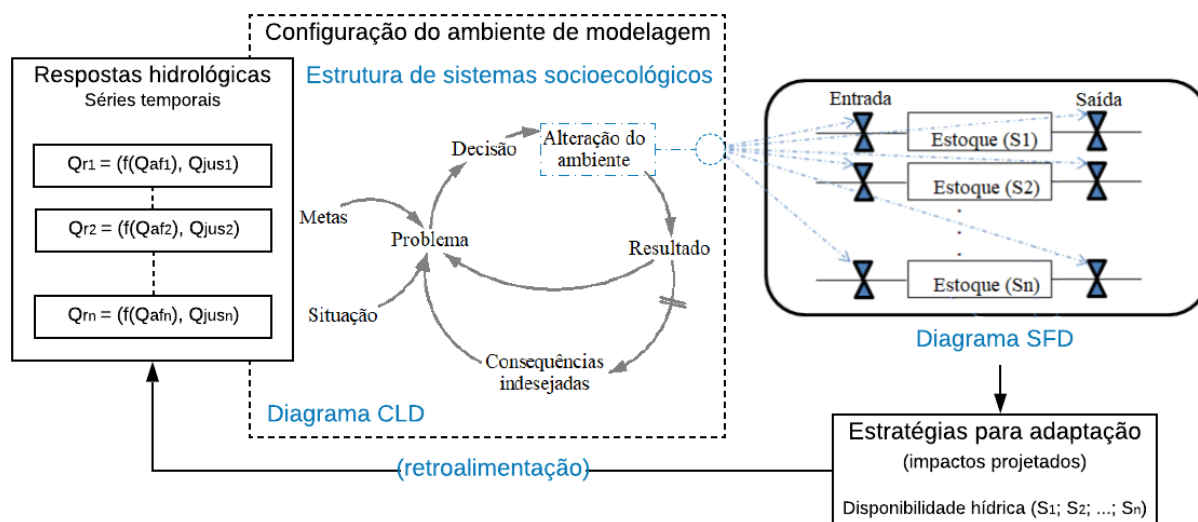
$$Vertimento = \max\left(0, (Vol_{final,t} + Q_{afluente,t} + Q_{transferência,t} - Vol_{inicial,t})\right) \quad (5)$$

Assim, com base nos dados observados, o modelo desenvolvido com a abordagem de Dinâmica de Sistemas permite analisar a variabilidade das componentes hidrológicas associadas às regras de operação em reservatórios. O ambiente de modelagem foi desenvolvido no Software Vensim PLE Plus 6.4 e a simulação considera a unidade de tempo mensal. As séries temporais referentes a vazão afluyente, vazão a jusante e demanda RMSP foram obtidas em (ANA, 2016).

Após a estruturação do ambiente sistêmico, o processo de atualização dinâmica das componentes envolvidas no sistema (Figura 2) pode ser resumido na representação esquemática da Figura 4, configurando um modelo para análise integrada de respostas hidrológicas e impactos na segurança hídrica na região metropolitana de São Paulo.

Essa abordagem admite as regras de operação do reservatório condicionadas às políticas de adaptação estabelecidos para análise, o modelo de faixas (ANA, 2017). Essas regras determinam o volume armazenado (S_1 ; S_2 ; ...; S_n) em um determinado mês (t), em função das respostas hidrológicas. Assim, considera-se para a liberação de vazão retirada (Q_r), de modo a satisfazer a demanda, a função de compartilhamento da vazão afluyente (Q_{af}) e o atendimento dos requisitos de controle de vazão a jusante (Q_{jus}). Esses critérios representam os controles entrada/saída destacados na representação do diagrama SFD na Figura 4, tendo como unidade de análise o volume armazenado (S_1 ; S_2 ; ...; S_n).

Figura 4 – Estrutura do modelo para a análise integrada.

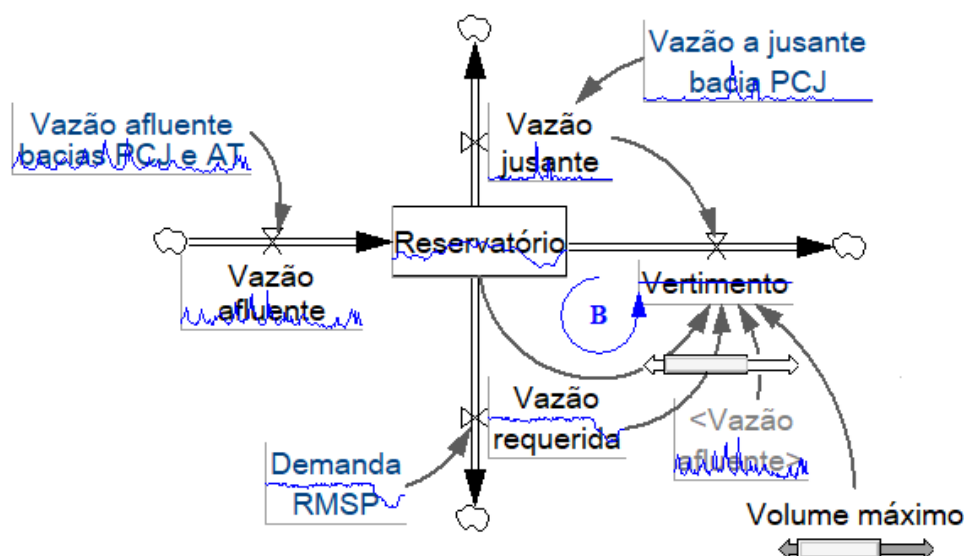


RESULTADOS E DISCUSSÃO

Adotando a estrutura de balanço hídrico simplificada (Equações 4 e 5), para replicar o modo de referência no processo de estruturação do modelo, foram considerados os registros históricos da operação do sistema no período de outubro de 2005 a setembro de 2016, obtidas em ANA (2017).

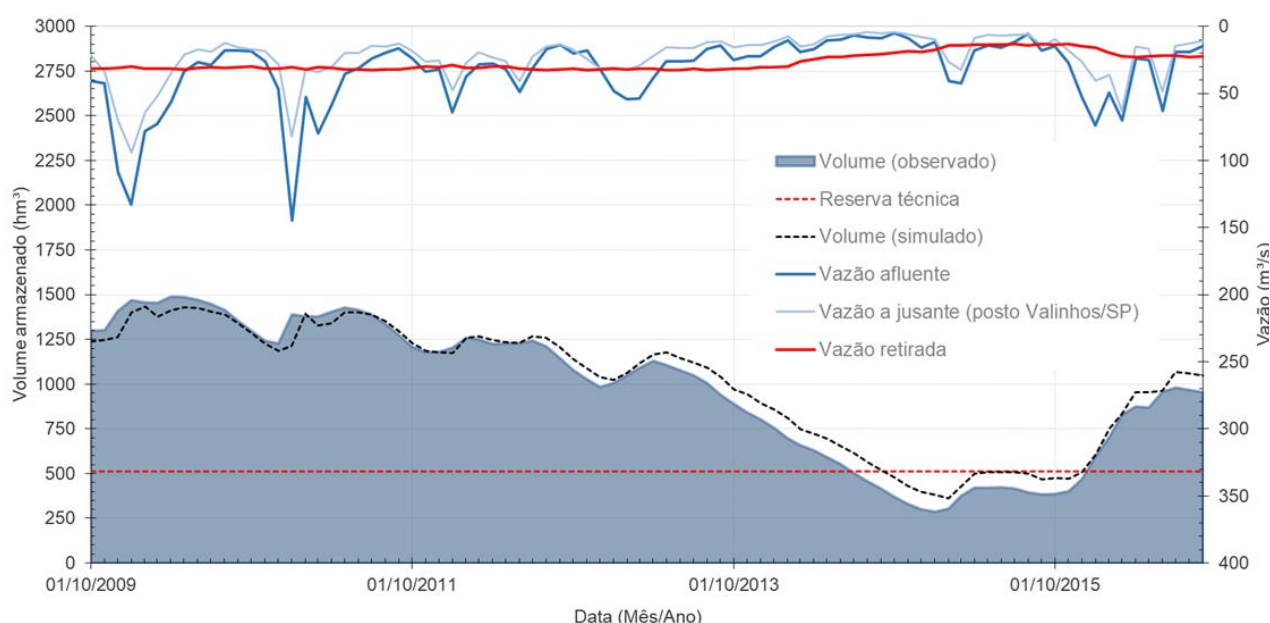
Conforme apresentado na Figura 5, a estrutura do modelo manteve o ciclo de controle (B), estabelecido para caracterizar cenários de vertimento, além do balanço de entradas e saídas de água (mensal), configurando a demanda (RMSP) às condições de cada estado hidrológico, que são as faixas de operação do reservatório, de modo a acompanhar o armazenamento (mensal) no sistema (ANA, 2017).

Figura 5 – Estruturação do modelo de reservatório.



Para descartar o efeito das condições iniciais de armazenamento, considerou-se um período de aquecimento de quatro anos para a simulação, começando com estoque inicial na metade da capacidade máxima do sistema (out./2005), e trazendo o sistema ao estado de equilíbrio (out./2009). Assim, o modelo para a análise integrada conseguiu replicar de maneira satisfatória o modo de referência do período observado (outubro de 2009 a setembro de 2016), período de validação, conforme a Figura 6, com $R^2 = 0,958$.

Figura 6 – Validação do modelo (modo de referência).



No processo de desenvolvimento do modelo foram considerados os postos de controle a jusante, na bacia PCJ e as derivações entre bacias hidrográficas, a saber: a transferência de água para a bacia AT, a demanda urbana da RMSP, além da interligação do reservatório Jaguari (Companhia Energética de São Paulo – CESP) e o sistema Cantareira (reservatório Atibainha). Cronologicamente, o Jaguari só foi incorporado ao sistema após o período analisado. Portanto, estes novos aportes não foram considerados nesta análise.

Uma vez replicado o modo de referência, esses resultados sugerem que o modelo é capaz de atualizar dinamicamente as principais componentes hidrológicas. Nesse sentido, em etapas futuras desse estudo, será possível investigar dinâmicas de longo prazo que devem ser consideradas para análise integrada das respostas hidrológicas e impactos na segurança hídrica em regiões metropolitanas. Sobretudo, para analisar a disponibilidade hídrica dos sistemas associada às políticas de adaptação para a operação dos reservatórios, condicionada às mudanças nos padrões das respostas hidrológicas, aos requisitos para controle de vazão a jusante do reservatório e vazão de recalque (cenários de demanda de água). Ou seja, importantes fatores que impactam a segurança hídrica.

CONCLUSÃO

Em cenário regional, as regiões metropolitanas apresentam complexidades especiais devido ao seu tamanho, principalmente em termos de gerenciamento, infraestrutura, mobilidade urbana e assim

por diante. Sob mudanças climáticas, os sistemas de abastecimento, especialmente dessas regiões, apresentam maior variabilidade na disponibilidade hídrica, o que exige estratégias para aumentar a resiliência.

Diante de realidades em rápida mudança nas regiões metropolitanas, ao incorporar os ciclos de retroalimentação para analisar as interações entre as componentes hidrológicas associadas às regras de operação em reservatórios, a abordagem Dinâmica de Sistemas contribui na formulação e testes de políticas de adaptação e no planejamento de longo prazo desses sistemas hídricos. Nesse sentido, com o modelo genérico desenvolvido neste artigo, é possível capturar as informações sobre o comportamento do sistema Cantareira, relativo às interações desencadeadas pela variabilidade das componentes hidrológicas, e associadas às regras de operação no reservatório.

Portanto, considera-se que essa abordagem configura um importante instrumento para a análise integrada de respostas hidrológicas sob cenários de mudanças climáticas e impactos na segurança hídrica, sobretudo por possibilitar o teste de diferentes configurações.

Outrossim, destaca-se que esses resultados são preliminares. No entanto, considerando as incertezas condicionadas aos cenários climáticos, às mudanças nos padrões das respostas hidrológicas e aos cenários de demanda urbana de água, o modelo permite incorporar importantes atualizações ao gerenciamento integrado de recursos hídricos, como projeções hidrológicas de longo prazo.

AGRADECIMENTOS

A pesquisa é desenvolvida com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). (2016). *Dados de referência acerca da outorga do Sistema Cantareira*. Brasília, 2016. Disponível em: http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sof/Renovacao_Outorga/DDR_Sistema_Cantareira.pdf. Acesso em: 29 jul. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). (2017). *Resolução conjunta ANA/DAEE nº 926, de 29 de maio de 2017*. Brasília, 2017. Disponível em: <http://www.daee.sp.gov.br/site/gestao-do-sistema-cantareira/>. Acesso em: 20 mai. 2019.

BORETTI, A.; ROSA, L. (2019). "Reassessing the projections of the world water development report". *NPJ Clean Water*, Nature Publishing Group, v. 2, n. 1, p. 1–6.

COELHO, C. A. S.; DE OLIVEIRA, C. P.; AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S.; CARPENEDO, C. B.; CAMPOS, J. L. P. S.; TOMAZIELLO, A. C. N.; PAMPUCH, L. A.; CUSTÓDIO, M. D. S.; DUTRA, L. M. M.; DA ROCHA, R. P.; REHBEIN, A. (2016). "The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections". *Climate Dynamics*, Springer, v. 46, n. 11, p. 3737–3752.

FORD, A. (1999). *Modeling the environment: an introduction to system dynamics models of environmental systems*. Washington: Island Press.

FORRESTER, J. (1961). *Industrial Dynamics*. Waltham: Pegasus Communications.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (2013). *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (2014). *Climate change 2014: synthesis report: contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.

MARENGO, J. A.; SOUZA JR, C. M.; THONICKE, K.; BURTON, C.; HALLADAY, K.; BETTS, R. A.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R. (2018). “Changes in climate and land use over the Amazon region: current and future variability and trends”. *Frontiers in Earth Science*, Frontiers, v. 6, p. 228.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALA, R.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L. (2017). “Climatic characteristics of the 2010–2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region”. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, SciELO Brasil, v. 90, p. 1973–1985.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; YOUNG, A.; BARRETO, N. J.; RAMOS, A. M. (2020). “Trends in extreme rainfall and hydrogeometeorological disasters in the Metropolitan Area of São Paulo: a review”. *Annals of the New York Academy of Sciences*, Wiley Online Library, v. 1472, n. 1, p. 5–20.

MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. (2016). “Four billion people facing severe water scarcity”. *Science Advances*, American Association for the Advancement of Science, v. 2, n. 2.

MIRCHI, A.; MADANI, K.; WATKINS, D.; AHMAD, S. (2012). “Synthesis of system dynamics tools for holistic conceptualization of water resources problems”. *Water Resources Management*, Springer, v. 26, n. 9, p. 2421–2442.

MO, W.; WANG, H.; JACOBS, J. M. (2016). “Understanding the influence of climate change on the embodied energy of water supply”. *Water Research*, v. 95, p. 220–229.

NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A.; SELUCHI, M. E.; CUARTAS, L. A.; ALVES, L. M. (2016). “Some characteristics and impacts of the drought and water crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015”. *Journal of Water Resource and Protection*, Scientific Research Publishing, v. 8, n. 02, p. 252.

PEDRO-MONZONÍS, M.; SOLERA, A.; FERRER, J.; ESTRELA, T.; PAREDES-ARQUIOLA, J. (2015). “A review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management”. *Journal of Hydrology*, v. 527, p. 482–493.

STERMAN, J. D. (2000). *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. Boston: McGraw-Hill.

THOMPSON, S.; SIVAPALAN, M.; HARMAN, C.; SRINIVASAN, V.; HIPSEY, M.; REED, P.; MONTANARI, A.; BLOSCHL, G. (2013). “Developing predictive insight into changing water systems: use-inspired hydrologic science for the anthropocene”. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 17, n. 12.

ZHANG, R.; CUARTAS, L. A.; CARVALHO, L. V. de C.; LEAL, K. R. D.; MENDIONDO, E. M.; ABE, N.; NOBRE, C. A. (2018). “Season-based rainfall-runoff modelling using the probability-distributed model (PDM) for large basins in southeastern Brazil”. *Hydrological Processes*, v. 32, n. 14, p. 2217–2230.