

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

Quais caminhos garantem água para o futuro? Otimização hidroeconômica de alternativas para o abastecimento em Bauru (SP)

Fernando Schuh Rörig¹; Vinicius Boico¹; Warlen Librelon²; Carlos Gamba², Abraham Yu², Letícia Macedo², Douglas Bellomo², Daniela Barbat¹, Roy Brouwer³, Ricardo Hirata¹

Abstract: Economic and demographic growth, combined with climate change, intensifies pressure on water security, demanding resilient solutions for water provisioning. Bauru (São Paulo) faces recurrent water crises, with prolonged rationing linked to reduced surface water inflows during droughts. Groundwater sources supplement the supply, including the Guarani Aquifer System, a fossil aquifer of nonrenewable use that is experiencing increasing drawdown, and the Bauru Aquifer System, which is extracted by ~700 private wells. The SACRE Project | Integrated Water Solutions for Resilient Cities (FAPESP Grant 2020/15434-0) develops numerical models for these water systems and evaluates the effectiveness of nature-based technologies, such as infiltration trenches and Riverbank Filtration, to enhance water availability. Given the complexity of planning water-infrastructure investments under uncertainty, this study conducts a hydroeconomic analysis to select the optimal portfolio of solutions to secure the water supply for 380,000 inhabitants. The mixed-integer programming-based algorithm guides the implementation of technology combinations, ranging from various surface and groundwater withdrawal configurations to nature-based measures and distribution-loss reduction. The formulation couples hydrological models (both surface and groundwater), accounts for operational constraints, evaluates impacts on water bodies, and investigates future scenarios of demand, climate, and land use. This approach enables ranking investments and prioritizing alternatives that are advantageous in economic, social, and environmental aspects. The optimization engine is integrated into a Decision Support System, providing an interactive, user-friendly tool to assist water managers in planning under uncertainty.

Resumo: O crescimento econômico e populacional, combinado às mudanças do clima, aumenta a pressão sobre a segurança hídrica, exigindo soluções resilientes para a provisão de água. Bauru (São

1) Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas (CEPAS|USP), Instituto de Geociências (IGc), Universidade de São Paulo (USP). R. do Lago, 562 - Butantã, São Paulo - SP, 05508-080. fernandoschuh@usp.br.

2) Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), Av. Prof. Almeida Prado, 532 - Butantã, São Paulo (SP), 05508-901.

3) Department of Economics, University of Waterloo, University Ave W, Waterloo, ON N2L 3G1, Canada.

Paulo) enfrenta crises hídricas recorrentes, com rodízios prolongados associados à redução da vazão no manancial superficial durante estiagens. Fontes subterrâneas complementam o abastecimento, como o Sistema Aquífero Guarani — aquífero fóssil, de uso não renovável, que apresenta rebaixamentos crescentes — e o Sistema Aquífero Bauru, explotado por ~700 poços particulares. O Projeto SACRE | Soluções Integradas de Água para Cidades Resilientes (Proc. FAPESP 2020/15434-0) desenvolve modelos numéricos para os mananciais e avalia a eficiência de tecnologias baseadas na natureza, como barraginhas e Filtração em Margem de Rio, para aumentar a disponibilidade hídrica. Frente à complexidade de planejar investimentos em infraestrutura hídrica sob incertezas, este trabalho desenvolve uma análise hidroeconômica para selecionar o portfólio ótimo de soluções que garantam o abastecimento de mais de 380 mil pessoas. O algoritmo, baseado em Programação Inteira Mista, orienta a implementação de combinações de tecnologias, como diferentes configurações de captações superficiais e subterrâneas, soluções baseadas na natureza e redução de perdas na distribuição. A formulação acopla modelos hidrológicos (superficiais e subterrâneos), incorporando restrições operacionais, impactos nos mananciais e cenários futuros de demanda, clima e ocupação da terra. Implementar esta abordagem permite ordenar investimentos e priorizar alternativas vantajosas a partir de aspectos econômicos, sociais e ambientais. O mecanismo de otimização integra um Sistema de Suporte à Decisão, oferecendo uma ferramenta interativa e acessível para apoiar gestores no planejamento hídrico sob incertezas.

PALAVRAS-CHAVE – Hidroeconomia, Otimização, Suporte à decisão

INTRODUÇÃO

As mudanças do clima e a expansão demográfica e econômica resultam em incertezas crescentes sobre os padrões de disponibilidade hídrica e de consumo, demandando soluções robustas para garantir a segurança hídrica. Diversificar as alternativas de abastecimento — incluindo a Recarga Gerenciada de Aquíferos, Soluções Baseadas na Natureza (SbN) e o uso conjuntivo de água superficial e subterrânea — é fundamental para mitigar riscos associados à quantidade e qualidade dos mananciais. Considerando as incertezas e os diferentes custos de instalação e operação das intervenções, a escolha de portfólios de soluções para provisão de água pode ser estruturada em análises hidroeconômicas, que direcionam a implementação de investimentos eficientes para a sociedade (Ward, 2021).

No Brasil, aprimorar a infraestrutura hídrica e a gestão integrada dos recursos hídricos é urgente, frente às crises hídricas recorrentes e abrangentes. Entre 2014 e 2017, 2.780 municípios

enfrentaram interrupções prolongadas no abastecimento, sobretudo no Sudeste e Nordeste, onde a combinação de estiagens frequentes e a expansão urbana pressiona os mananciais (Hirata et al., 2019; Nobre et al., 2016). Nas regiões atingidas pela crise, as águas subterrâneas contribuíram para mitigar os impactos (Hirata et al., 2019). Projeções do CMIP6 indicam estiagens mais severas e aumento de temperatura nas regiões já afetadas, o que reforça a necessidade de planejar considerando os riscos climáticos e investir em infraestrutura e gestão (Davamani et al., 2024).

Modelos hidroeconômicos combinam simulação hidrológica e otimização, permitindo planejar decisões em infraestrutura hídrica como uma minimização de custo ou maximização de benefícios, sujeitas a metas de confiabilidade. Além de capturar a incerteza, esses modelos permitem avaliar *trade-offs* entre múltiplas fontes de água e os valores atribuídos pela sociedade. Por exemplo, um modelo em rede foi utilizado em Los Angeles para maximizar o atendimento da cidade, detalhando como captações de água subterrânea e água pluvial podem reduzir a dependência de importações de água, mas impõe um *trade-off* com o rebaixamento do aquífero local, caso não haja políticas complementares de conservação (Porse et al., 2018). Assim, a otimização hidroeconômica permite identificar estratégias ótimas para ampliação dos sistemas hídricos, ao explorar os *trade-offs* entre a performance do abastecimento e custo de alternativas de provisão de água, usando a sensibilidade a incertezas-chave e incluindo restrições ambientais (Hall et al., 2020).

Em Bauru (São Paulo), que contempla os desafios hídricos de diversas cidades brasileiras, considerar múltiplas soluções —como a Recarga Gerenciada de Aquíferos, Soluções Baseadas na Natureza e o uso conjuntivo de água superficial e subterrânea—é vital para enfrentar a variabilidade climática e a demanda urbana crescente. Parte de Bauru é atendida por uma captação no Rio Batalha, impactada por estiagens, que geram racionamentos prolongados que afetam cidade ao longo de meses. O problema é recorrente: ocorreram períodos de racionamento em Bauru em quatro dos últimos cinco anos, sendo que o mais extenso ocorreu em 2024, ao longo de seis meses. A captação superficial vem sendo complementada por poços no Sistema Aquífero Guarani (SAG), com provisão de água robusta às estiagens; porém, há rebaixamentos piezométricos crescentes, ameaçando a sustentabilidade de longo prazo desse recurso (Boico et al., 2018). Além disso, há mais de 500 poços particulares no município, utilizando águas do Sistema Aquífero Bauru (SAB) e do SAG.

O Projeto SACRE | Soluções Integradas de Água para Cidades Resilientes (Proc. FAPESP 2020/15434-0) tem Bauru como área de estudo e desenvolve modelos que representam a dinâmica hidrológica dos mananciais locais e tecnologias para aumentar a segurança hídrica, embasando a adoção de intervenções hídricas inovadoras. O Projeto contempla a modelagem numérica de fluxo

dos Sistemas Aquíferos Bauru e Guarani e um modelo acoplado de água superficial-subterrânea na bacia do Alto Rio Batalha. Além disso, estudos piloto em campo estão avaliando a eficiência de tecnologias para aumento de disponibilidade natural ou produção de água, como barraginhas na zona rural, ou sistemas de Filtração em Margem de Rio (FMR) na área urbana. Tais tecnologias estão sendo representadas nos modelos hidrológicos para entender o seu impacto na escala municipal.

Porém, gerir simultaneamente as múltiplas formas de abastecimento, sob diversas incertezas futuras, não é trivial aos gestores. Nesse sentido, este trabalho propõe (i) um algoritmo de otimização hidroeconômica para avaliar portfólios de alternativas de água superficial e subterrânea, (ii) sua aplicação ao caso de Bauru, sob cenários climáticos e crescimento das demandas, e (iii) a integração do algoritmo em um Sistema de Suporte à Decisão (SSD), que permite aos responsáveis interagirem de forma visual e acessível com as diferentes opções de abastecimento. Assim, estamos construindo uma ferramenta para responder a problemas reais de planejamento hídrico a partir dos diversos resultados do Projeto SACRE, com potencial de replicação para demais municípios.

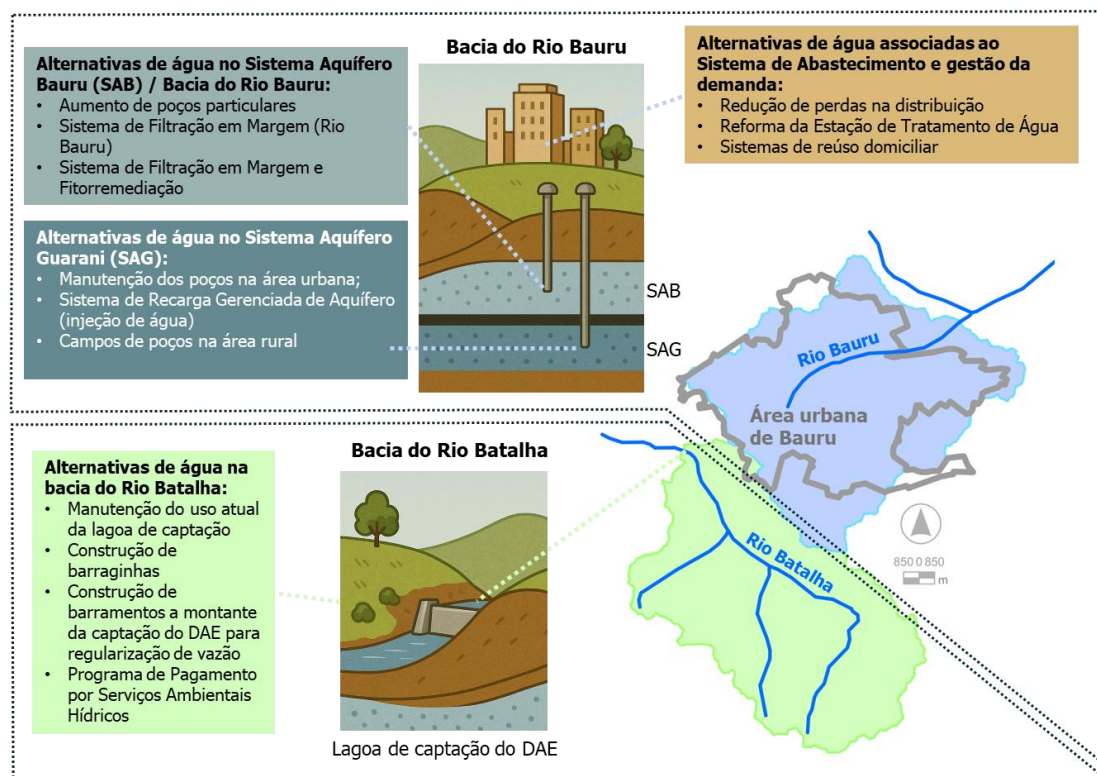
MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo consiste em formular e implementar um modelo de programação matemática para selecionar o portfólio ótimo de alternativas para abastecimento de água, que minimize o custo total esperado sujeito a garantias de atendimento, considerando as demandas mapeadas. Com base na compreensão do risco futuro de déficit de água para a população de Bauru, a partir dos modelos hidrológicos, uma série de soluções para provisão de água estão sendo avaliadas (Figura 1):

- Alternativas de água no Sistema Aquífero Bauru (SAB), na Bacia do Rio Bauru, envolvendo o uso de poços particulares e sistemas de FMR;
- Alternativas de água no Sistema Aquífero Guarani (SAG), como a continuidade ou expansão dos poços na área urbana, o uso de sistemas de Recarga Gerenciada de Aquífero com injeção de água e campos de poços no SAG na área rural;
- Alternativas de água associadas ao sistema de abastecimento e à gestão da demanda, como a redução de perdas na distribuição, a reforma da Estação de Tratamento de Água e a gestão da demanda residencial;
- Alternativas de água na bacia do Rio Batalha, que podem aumentar a vazão natural do rio disponível para a captação, como a construção de barraginhas ao longo da margem do Rio,

barramentos a montante para regularização de vazão e mudanças de ocupação da terra induzidas por Programas de Pagamentos por Serviços Ambientais Hídricos.

Figura 1 – Alternativas de água para Bauru nas duas bacias em que o município está inserido (Bacia do Rio Batalha, onde está a captação do Departamento de Água e Esgoto (DAE) e Bacia do Rio Bauru, sob o perímetro urbano)

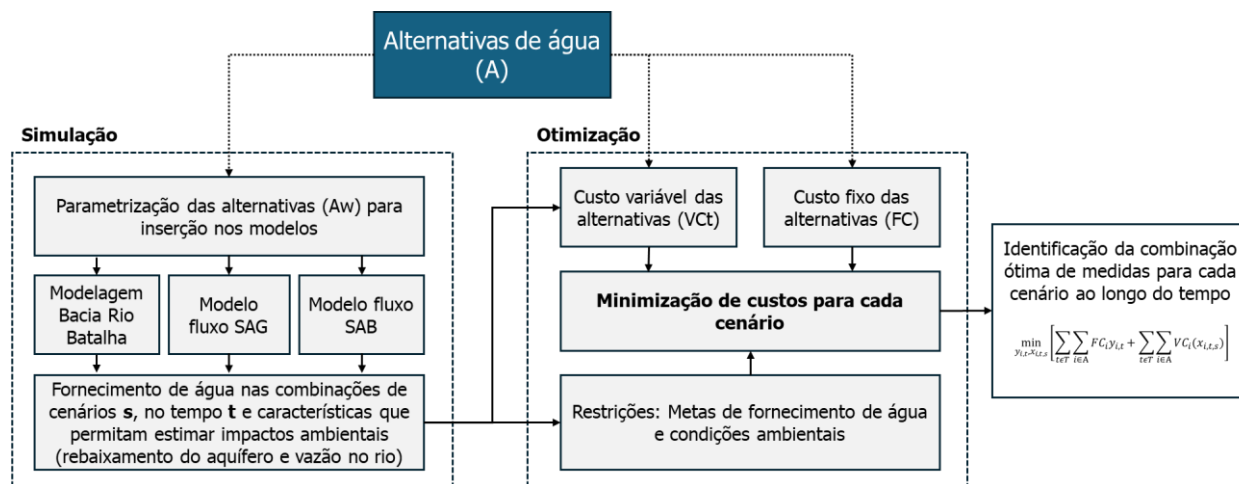


Como é usual em abordagens hidroeconômicas, ferramentas de otimização são acopladas ou partem de modelos de simulação, que representam a dinâmica hidrológica. Neste trabalho, junto aos modeladores, as alternativas de água estão sendo parametrizadas para serem representadas nos modelos hidráulicos, que retornam o impacto de cada intervenção na fonte de água respectiva. Algumas alternativas estão sendo discretizadas em graus de implementação, por exemplo, um aumento de 50%, 100% ou 200% da vazão explorada por poços particulares, que possuem impactos distintos a longo prazo nos mananciais. Também está incorporada na simulação hidrológica e na otimização a opção de implementar a alternativa em diferentes momentos no tempo, por exemplo, considerando sua instalação em $t = 0, 5, 10, 20$ ou 25 anos (horizonte do projeto). Cada solução está sendo avaliada junto ao modelo hidrológico para um conjunto de cenários que representem as incertezas-chave para cada manancial, com destaque para cenários de mudanças do clima e de ocupação da terra. Assim, cada intervenção possui um intervalo de resposta (limites superior e inferior) relativo à água adicional fornecida ao sistema e de impacto sobre o manancial. Como a

implementação das soluções é sequencial, o algoritmo indica a adoção de ações adaptativas ao passo que os cenários se realizem.

A Figura 2 resume a proposta de otimização a partir dos resultados da simulação, adaptando a proposta de Brouwer et al. (2023). A simulação envolve a inserção das alternativas de água nos modelos hidrológicos, que retornam o fornecimento de água e características do sistema hidrológico (como rebaixamento e vazão) para diferentes cenários ao longo do tempo. Tais respostas alimentam entradas para o algoritmo de otimização, pois impactam nos custos variáveis (especialmente custo de energia das captações subterrâneas), no fornecimento de água e em restrições ambientais. Com base nessas entradas, propõe-se uma otimização dinâmica para minimizar o custo de produção de água, selecionando um conjunto de soluções para cada cenário. A combinatória de cenários abrange as principais incertezas sobre os sistemas hídricos, envolvendo as mudanças do clima, a ocupação da terra e a evolução demográfica (Hall et al., 2020). Para resolver esse modelo, foi selecionada a programação linear e inteira mista (considerando que parte das variáveis assume valores inteiros ou binários) usando *solvers* adequados, com o auxílio da plataforma Google OR-Tools, como adotado em Brouwer et al. (2023).

Figura 2 – Fluxograma da otimização hidroeconômica das alternativas de água embasada nos resultados da simulação.



Um protótipo de função objetivo (Z) foi construído (1):

$$Z = \min_{y_{i,t}, x_{i,t}} \left[\sum_{t \in T} \sum_{i \in A} FC_i y_{i,t} + \sum_{t \in T} \sum_{i \in A} VC_i(x_{i,t}) \right] \quad (1)$$

Onde $y_{i,t}$ é uma variável de decisão que indica a implantação ou expansão da alternativa i no período t , inteira ou binária: $y_{i,t} \in \{0,1\}$ (ex.: instalar ou não um conjunto de poços na zona rural) ou contínua: $0 \leq y_{i,t} \leq 1$ (ex.: percentual de redução de perdas). A é o conjunto de intervenções possíveis (como instalação de novos poços no SAB, campo de poços do SAG, redução de perdas, construção de estações de FMR, construção de barraginhas etc.), T é o conjunto de períodos de decisão (meses

ou anos ao longo do horizonte do projeto). $x_{i,t}$: volume de água (m^3) produzido ou fornecido pela alternativa i no período t , FC_i é o custo fixo associado à ativação ou expansão da alternativa i (CAPEX) e VC_i é o custo variável de produzir x m^3 pela alternativa i (OPEX), ajustado para efeitos como rebaixamento de aquífero.

A otimização está sujeita a algumas restrições: (a) a soma da produção de água deve atender à demanda (D) em cada período em todo o intervalo de otimização; (b) os volumes extraídos não podem exceder a capacidade de produção de água em cada fonte; (c) conformidade com as decisões possíveis de expansão (binárias ou fracionárias, dependendo da solução): $y_{i,t} \in \{0, 1\}$ ou $0 \leq y_{i,t} \leq 1, \forall i \in A, t \in T$; (d) não negatividade da produção de água: $x_{i,t} \geq 0, \forall i \in A, t \in T$. Além disso, restrições ambientais associadas a cada manancial serão incorporadas, como limites de rebaixamento no aquífero ou vazão remanescente no Rio Batalha após a captação, permitindo combinar os aspectos econômicos à preservação dos corpos hídricos locais. A otimização está sendo aplicada a um conjunto de cenários S , que agregam *drivers* de incerteza (climáticos, demográficos e ocupação da terra), e a comparação dos resultados revelará os impactos adicionais resultantes de cenários mais críticos.

Um aprimoramento dessa abordagem está avançando para incorporar diretamente os benefícios econômicos da provisão de água ao objetivo da otimização. Este pode ser redefinido como a maximização dos benefícios descontados dos custos fixos e variáveis, obtidos a partir da curva de benefício marginal (disposição a pagar pela água), derivada da curva de demanda municipal (Griffin, 2006). Dessa forma, a otimização não apenas reduz custos, mas escolhe um portfólio de soluções que ofereça a maior vantagem econômica social. Essa integração da análise de custo-benefício permite explorar *trade-offs* entre investimento em infraestrutura e valor social da água, fornecendo um critério para selecionar estratégias com base na sua razão custo-benefício em diferentes cenários.

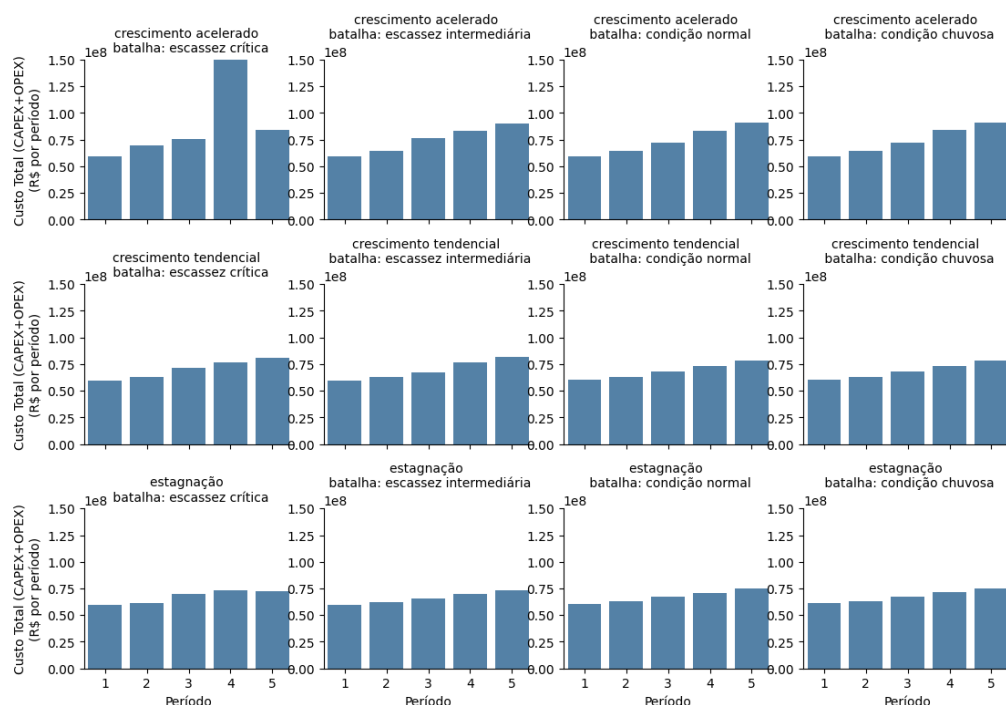
O algoritmo está integrado a um Sistema de Suporte à Decisão (SSD), construído pelo WP5|SACRE. Considerando a importância da visualização de forma acessível dos *trade-offs* entre risco de desabastecimento, custo de provisão de água e critérios ambientais (Hall et al., 2020), especialmente para os decisores e stakeholders da região, uma plataforma interativa está sendo construída. Esse portal facilitará aos decisores o manuseio das ferramentas de otimização, a posterior avaliação de cenários e alternativas e a disseminação dos resultados.

RESULTADOS

A arquitetura do algoritmo está em construção e uma formulação inicial foi implementada com o solver SCIP, utilizando a API do Python do Google OR-Tools. O modelo foi implementado

com as principais alternativas de água (poços no SAB e SAG, módulos de FMR, captação do Rio Batalha, redução de perdas e implementação de barraginhas), arbitrando a possibilidade de implementar 10 novos poços no SAG, 20 novos poços no SAB e 20 sistemas de FMR (o que está sendo revisado junto aos modeladores e o DAE) e redução de perdas até 25%. No instante inicial da simulação, partiu-se da capacidade atual do sistema de abastecimento (65% da produção é feita poços no SAG, 25% pela captação no Rio Batalha e 10% por poços privados). Para os custos fixos e variáveis, considerou-se valores de referência para a região, obtidos junto ao DAE. Foram incorporados cenários de crescimento da demanda (“acelerado” - 4% a.a, “tendencial” – 2% a.a. e “estagnação” – 1% a.a.) combinados a cenários de disponibilidade hídrica na Bacia do Rio Batalha, refletindo os efeitos das mudanças climáticas sobre a vazão do rio disponível para captação (de “crítico”, com redução de 50% na vazão captável, como observado durante os racionamentos, a “chuvoso”, sem redução de vazão). Como exemplificado na Figura 3, para um período de 5 anos, foi possível identificar portfólios ótimos de soluções (combinação de poços e intervenções) que minimizassem os custos e garantam o abastecimento, para cada cenário.

Figura 3- Exemplo de resultado obtido pela otimização do portfólio de alternativas de água, em termos de custos totais (fixos e variáveis) por período, para um conjunto de cenários.



Espera-se um custo crescente de produção de água no município, considerando o crescimento das demandas, que exige investimentos crescentes em infraestrutura, assim como um aumento dos custos variáveis frente ao rebaixamento do SAG, que resulta em maiores despesas no bombeamento.

Comparando o cenário mais crítico (crescimento acelerado de demanda e maior redução de vazão no Rio Batalha) e o mais favorável (crescimento estagnado e sem redução de vazão), observou-se uma diferença de R\$120 milhões, para custos fixos e variáveis a valor presente. Assim, o algoritmo demonstrou-se capaz de hierarquizar decisões, priorizando, inicialmente, a expansão de alternativas com menores custos unitários (os poços no SAB e sistemas de FMR, no exemplo), e postergando a ampliação de alternativas mais caras, como poços no SAG e a redução de perdas na distribuição.

A etapa de desenvolvimento do algoritmo contribuiu para: (i) estruturar as necessidades de dados (custos e provisão de água associada à cada ação) e (ii) identificar, junto aos modeladores, potencialidades de integração dos modelos hidrológicos à otimização, incluindo a definição do nível de discretização compatível com a capacidade dos modelos. O algoritmo está sendo incorporado como um microserviço no SSD, que possui uma interface que permite selecionar os cenários e ações disponíveis para a otimização. O SSD está passando por uma fase de validação externa com os stakeholders da região de Bauru, para aprimorar a entrega da ferramenta como suporte efetivo do planejamento hídrico local.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento deste modelo de otimização hidroeconômica representa um avanço na capacidade de planejar o abastecimento de água de maneira integrada, considerando múltiplas fontes, restrições ambientais e incertezas climáticas e de demanda em Bauru. Ao traduzir as soluções hídricas em variáveis de decisão dentro de uma estrutura matemática, o modelo permite simular e comparar diferentes trajetórias de investimento, otimizando a relação entre custos e segurança hídrica. Isso torna possível não apenas minimizar os custos financeiros, mas também avaliar *trade-offs* relevantes, como o risco de rebaixamento de aquíferos, a redução da dependência do Rio Batalha, e a eficácia de Soluções Baseadas na Natureza.

A integração do modelo ao Sistema de Suporte à Decisão amplia sua utilidade prática, oferecendo uma interface capaz de comunicar os resultados de forma visual e acessível aos tomadores de decisão, incluindo empresas de saneamento e órgãos gestores e reguladores, como a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Essa abordagem fortalece a capacidade de tomar decisões sobre o abastecimento baseadas em ciência, robustas e adaptativas, diante das incertezas associadas às mudanças do clima e ao crescimento urbano. O aproveitamento integrado de recursos hídricos superficiais e subterrâneos é uma das vantagens deste SSD. A estrutura modular foi adotada para permitir a replicação dessa metodologia para outros municípios e contextos, contribuindo para a

disseminação de práticas sustentáveis de gestão hídrica e baseadas na incorporação do conhecimento sobre os diversos mananciais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Projeto SACRE | Soluções Integradas de Água para Cidades Resilientes (Proc. FAPESP 2020/15434-0) e à FAPESP pelas bolsas de Doutorado Direto (Proc. nº 2022/15693-0), Pós-Doutorado (Proc. nº 2024/23353-0) e TT-5 (Proc. nº 2024/23825-0).

REFERÊNCIAS

BOICO, V. F.; WENDLAND, E.; BATISTA, J. A. do N. Assessment of the potentiometric drawdown in the Guarani Aquifer System in Bauru/SP by a model of analytical elements. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 23, 2018. DOI: 10.1590/2318-0331.0318170121.

BROUWER, R.; SHARMIN, D. F.; ELLIOTT, S.; LIU, J.; KHAN, M. R. Costs and benefits of improving water and sanitation in slums and non-slum neighborhoods in Dhaka, a fast-growing mega-city. *Ecological Economics*, v. 207, 2023. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2023.107763.

DAVAMANI, V.; JOHN, J. E.; POORNACHANDHRA, C.; GOPALAKRISHNAN, B.; ARULMANI, S.; PARAMESWARI, E.; SANTHOSH, A.; SRINIVASULU, A.; LAL, A.; NAIDU, R. A critical review of climate change impacts on groundwater resources: a focus on the current status, future possibilities, and role of simulation models. *Atmosphere*, v. 15, n. 1, p. 122, 2024.

GRIFFIN, R. C. *Water resource economics: the analysis of scarcity, policies, and projects*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2006.

HALL, J. W.; GREY, D.; GARRICK, D.; FUNG, F.; BROWN, C.; DADSON, S. J.; SADOFF, C. W. Coping with the curse of freshwater variability: institutions, infrastructure, and information for adaptation. *Science*, v. 346, n. 6208, p. 429–430, 2014. DOI: 10.1126/science.1257890.

HALL, J. W. et al. Risk-based water resources planning in practice: a blueprint for the water industry in England. *Water and Environment Journal*, v. 34, n. 3, p. 441–454, 2020. DOI: 10.1111/wej.12479.

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A.; MARCELLINI, S.; VILLAR, P. C.; MARCELLINI, L. As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 24, n. 1, p. e6, 2019. DOI: 10.1590/2318-0331.241920180103.

NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A.; SELUCHI, M. E.; CUARTAS, L. A.; ALVES, L. M. Some characteristics and impacts of the drought and water crisis in southeastern Brazil during 2014 and 2015. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 8, n. 2, p. 252–262, 2016. DOI: 10.4236/jwarp.2016.82022.

PORSE, E. et al. The economic value of local water supplies in Los Angeles. *Nature Sustainability*, v. 1, n. 6, p. 289–297, 2018. DOI: 10.1038/s41893-018-0068-2.

WARD, F. A. Hydroeconomic analysis to guide climate adaptation plans. *Frontiers in Water*, v. 3, 2021. DOI: 10.3389/frwa.2021.681475.