



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



RAPHAEL FERREIRA PEREZ

**Proposta de um modelo hidrológico, acoplado a previsões
meteorológicas, para a gestão de recursos hídricos**

São Paulo

2023

RAPHAEL FERREIRA PEREZ

Proposta de um modelo hidrológico, acoplado a previsões meteorológicas, para a gestão de recursos hídricos

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia Hidráulica e Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Joaquin Ignacio Bonnet Carrère Garcia

São Paulo

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 31 de outubro de 2023

Assinatura do autor: 

Assinatura do orientador: 
Prof. Dr. Joaquín I Bonhecarrere Garcia

Catálogo-na-publicação

Perez, Raphael Ferreira

Proposta de um modelo hidrológico, acoplado a previsões meteorológicas, para a gestão de recursos hídricos / R. F. Perez -- versão corr. -- São Paulo, 2023.

78 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental.

1.Recursos hídricos 2.Modelos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental II.t.

Nome: PEREZ, Raphael Ferreira

Título: Proposta de um modelo hidrológico, acoplado a previsões meteorológicas, para a gestão de recursos hídricos

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em: 11 de setembro de 2023

Banca examinadora

Prof. Dr.	Fernando Mainardi Fan
Instituição	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Julgamento	Aprovado
Prof. Dr.	Jamil Alexandre Ayach Anache
Instituição	Escola de Engenharia de São Carlos – USP
Julgamento	Aprovado
Prof. Dr.	Joaquin Ignacio Bonnacarrère Garcia
Instituição	Escola Politécnica – USP
Julgamento	Aprovado

Agradecimentos

À Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, por dar suporte à pesquisa realizada.

Ao professor Joaquin Bonnacarrère, meu orientador, por fornecer valiosos ensinamentos ao guiar e oferecer sugestões de melhoria ao projeto.

Aos amigos João Tercini, Dário Hossoda e Víctor Romero, pela parceria e colaboração.

À minha família.

Resumo

PEREZ, R. F. **Proposta de um modelo hidrológico, acoplado a previsões meteorológicas, para a gestão de recursos hídricos.** 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

A ocorrência de fenômenos cada vez mais recentes de escassez hídrica, aliada a demandas crescentes pela água, culmina em regras complexas para a operação de reservatórios e o atendimento de mínimos normativos à população. A dissertação aqui apresentada detalha a exploração de técnicas de modelagem hidrológica para apoiar a tomada de decisão em gerenciamento de recursos hídricos. O trabalho toma como estudo de caso as Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, que são atendidas pelo Sistema Cantareira e contribuem expressivamente para o desenvolvimento paulistano. Utilizando um modelo acoplado de chuva-vazão e *routing*, estimou-se os despachos necessários em dois reservatórios que atendem a região, a fim de atingir a mínima média diária outorgada em duas seções de controle a jusante, uma em Atibaia e outra em Valinhos. Através de dados de previsão meteorológica de sete dias, foram calculadas as operações ao longo de dois anos de simulação. Com os resultados obtidos, verificou-se o atendimento às demandas previstas com redução de até 72% em relação aos volumes reais descarregados durante o mesmo período. Mesmo com simplificações inerentes ao processo de modelagem, concluiu-se que o modelo fornece bons resultados, embasados em técnicas exatas, e pode oferecer informações que complementem a gestão de recursos hídricos de forma sustentável.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica. Gerenciamento de recursos hídricos. Despachos. Sistema Cantareira. Bacias PCJ.

Abstract

PEREZ, R. F. **Proposal of a hydrologic model, coupled to meteorological forecasts, for water resources management.** 2023. Dissertation (Master's in Science) - Polytechnic School, University of São Paulo, São Paulo, 2023.

The occurrence of increasingly recent water drought phenomena, combined with rising water demands, results in complex rules for the operation of reservoirs and the achievement of normative minimums to the population. The dissertation presented herein details the investigation of hydrologic modeling techniques to support decision making in water resources management. The research takes as study case the Piracicaba, Capivari, and Jundiaí River Watersheds, which are supplied by Cantareira System and contribute significantly to São Paulo's development. Utilizing a coupled model of rainfall-runoff and routing, necessary discharges were estimated in two reservoirs that cater for the region in order to fulfill the minimum mean discharge in two control sections downstream, one in Atibaia and another in Valinhos. Through groups of seven days of meteorological forecast data, the outflows were calculated along two years of simulation. With the obtained results, it was verified the attainment of expected demands with the reduction of around 72% with respect to real dispatched volumes during the same period. Even with simplifications inherent to the modeling process, the author concludes that the model provides good results, based on exact techniques, that can add information to complement water resources management in a sustainable way.

Keywords: Hydrologic modeling. Water resources management. Discharges. Cantareira System. PCJ Watersheds.

Lista de figuras

Figura 1	Sistema Cantareira e seus reservatórios	19
Figura 2	Ciclo hidrológico moderno	21
Figura 3	Propagação de cheias em rios	22
Figura 4	Inserção de modelos em processos de gestão	24
Figura 5	Sub-bacia do Atibaia e seus pontos de controle	34
Figura 6	Fluxogramas de modelagem divididos em etapas de calibração e previsão	36
Figura 7	Diagrama-resumo do modelo	37
Figura 8	Relações entre os reservatórios lineares superficial, subsuperficial e sub- terrâneo	38
Figura 9	Algoritmo de evolução diferencial	45
Figura 10	Estruturas de chuvas conforme cenário	47
Figura 11	Comparativo entre hidrogramas incrementais durante rodada de calibração	51
Figura 12	Gráficos de dispersão para incrementais após calibração	52
Figura 13	Comparativo entre hidrogramas de <i>routing</i> não-linear inverso durante rodada de calibração	53
Figura 14	Despachos calculados com previsões meteorológicas em relação às des- cargas reais	55
Figura 15	Vazões verificados no ponto de controle de Atibaia após decisões de des- pacho com previsões	56
Figura 16	Vazões verificados no ponto de controle de Valinhos após decisões de despacho com previsões	57
Figura 17	Hidrogramas despachados durante cenário de previsão, para análise de conservação de massa	58
Figura 18	Despachos calculados com chuvas observadas em relação às descargas reais	59
Figura 19	Vazões verificadas nos pontos de controle após decisões de despacho com observações	60
Figura 20	Relações entre os diferentes despachos de cada cenário	62
Figura 21	Curvas de permanência de vazões em Atibaia e Valinhos para os cenários analisados	63

Figura 22	Probabilidades de atendimento aos mínimos de cada ponto de controle conforme cenário	63
Figura 23	Médias móveis simuladas para Atibaia e Valinhos e seus despachos correspondentes	64
Figura 24	Relação entre as mínimas outorgadas e suas restrições práticas	65
Figura 25	Mapas pedológico e de cobertura	75

Lista de tabelas

Tabela 1	Faixas de operação atribuídas ao Sistema Cantareira conforme volume disponível	20
Tabela 2	Exemplos de modelos para gerenciamento de recursos hídricos	26
Tabela 3	Dados utilizados e suas fontes	46
Tabela 4	Parâmetros SMAP adotados	46
Tabela 5	Parâmetros SMAP calibrados com série observada	50
Tabela 6	Parâmetros Muskingum calibrados com série observada (K em dias, X e m adimensionais)	51
Tabela 7	Correlações entre pares calibrados	54
Tabela 8	Performances de modelagem conforme cenário	61
Tabela 9	Percentuais de área total conforme tipo de solo e cobertura superficial nas Bacias PCJ	76
Tabela 10	Temperaturas médias e evapotranspirações potenciais mensais em Atibaia	77

Lista de símbolos

- A_i : abstração inicial
- c_{apc} : capacidade de campo
- $capt.^{(\cdot)}$: captação de água em uma seção (A : Atibaia e V : Valinhos)
- c_{rec} : capacidade de recarga
- d, D : despacho por um reservatório ($Atib.$: Atibainha e $Cach.$: Cachoeira)
- $Desp^{(i \rightarrow j)}$: despacho de i para j
- E_b : escoamento básico
- E_d : escoamento direto
- E_s : escoamento superficial
- E_p : evapotranspiração potencial
- E_r : evapotranspiração real
- I : hidrograma de entrada
- K : tempo médio de deslocamento de onda de cheia
- K' : tempo médio para utilização em Muskingum inverso
- $k2t$: constante de recessão do escoamento superficial
- $kk t$: constante de recessão do escoamento básico
- m : expoente de Muskingum
- m' : expoente de Muskingum inverso
- $Musk^{-1}$: método de Muskingum inverso
- O : hidrograma de saída
- P : precipitação
- Q_{inc} : vazão incremental
- $Q_{obs}^{(\cdot)}$: vazão observada em uma seção (A : Atibaia e V : Valinhos)
- $P_{obs inc}^{(\cdot)}$: precipitação observada incremental em uma seção (A : Atibaia e V : Valinhos)
- r : *routing*
- R_{solo} : reservatório na zona aerada
- R_{sub} : reservatório na zona saturada
- R_{sup} : reservatório superficial
- S : armazenamento hidráulico
- r_{ec} : recarga subterrânea
- SAT : capacidade de saturação
- TU : teor de umidade
- X : fator de amortecimento
- X' : fator de amortecimento para utilização em Muskingum inverso

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Objetivos	16
2	Revisão bibliográfica	18
2.1	A gestão de recursos hídricos em bacias complexas	18
2.2	Modelos hidrológicos e sua importância	23
2.3	Técnicas de <i>routing</i> em rios	29
2.4	Previsões meteorológicas para suporte à gestão hídrica	30
3	Dados e métodos	34
3.1	As Bacias PCJ	34
3.2	Métodos utilizados	35
3.2.1	Modelo SMAP	38
3.2.2	Modelo de Muskingum não-linear	39
3.2.3	<i>Upstream routing</i>	41
3.2.4	Calibração de variáveis hidrológicas	42
3.2.5	Dados utilizados para simulação	45
3.2.5.1	Fontes e parâmetros adotados	45
3.2.5.2	Previsões meteorológicas e sua estrutura	46
3.2.6	Equacionamentos complementares aos fluxogramas	47
4	Resultados e discussões	50
4.1	Calibrações	50
4.2	Previsões	54
4.2.1	Comparativo entre cenários	61
4.3	Estudo com médias móveis mínimas de 15 dias	64
5	Conclusão	67
	Referências	69
	Apêndice	75

Variáveis SMAP adotadas	75
Parâmetros ajustados para evolução diferencial	77
Dados e <i>scripts</i>	78

1 Introdução

Ao abordar água como um tema de pesquisa, naturalmente incorre-se em duas vertentes: disponibilidade e escassez. Sob a ótica nacional, mesmo com uma aparente abundância de acesso hídrico, uma vez que o Brasil concentra cerca de 12% a 16% de toda a água doce global, [Lazaro et al. \(2023\)](#) mencionam que somente 0.7% de um total de 43,000 m³ por habitante brasileiro são consumidos anualmente. Mesmo com uma concentração elevada de água junto à região amazônica, em áreas como nordeste e sudeste inúmeros centros urbanos enfrentam desafios para acesso à água, agravados por secas recentes. Estes autores complementam que, não somente as mudanças climáticas delineiam tal problema; de [Jacobi, Cibim e Leão \(2015\)](#), a governança hídrica e a participação de atores públicos e instituições governamentais em planejar, transparecer e informar são também fatores primordiais neste tema. Para entender melhor a problemática e suas motivações, vale levantar certos fundamentos e históricos relevantes.

De acordo com [Setti et al. \(2000\)](#), em recursos hídricos define-se planejamento como o conjunto de procedimentos organizados que visam o atendimento de demandas de água frente à disponibilidade restrita deste recurso. Seu objetivo é avaliar as necessidades de água e sua consecutiva alocação entre múltiplos usos, a fim de garantir benefícios econômicos e sociais com mínima degradação ambiental. Dado o contexto brasileiro, o gerenciamento de recursos hídricos, formado por planejamento e administração, é cada vez mais obrigatório e pertinente; diante de uma falsa ideia de abundância, o Brasil vive uma cultura histórica de desperdício de água e de poucos investimentos para seu uso, proteção e valorização econômica. A escassez hídrica brasileira deve-se, essencialmente, ao crescimento exponencial de demandas e à degradação de qualidade de suas águas. Sob a crescente percepção destas adversidades, o principal marco legal de gestão hídrica brasileira ocorreu em 1997 com a elaboração de uma legislação específica denominada Política Nacional de Recursos Hídricos ([BRASIL, 1997](#)). Dentre suas diretrizes, é importante destacar que ela reconhece formalmente a água como recurso finito, vulnerável e de valor econômico, com múltiplos usos de equiparável carência de acesso. Para garantir a disponibilidade de água para gerações atuais e futuras de modo racional e sustentável, a lei formaliza um conjunto de ferramentas, também ditas instrumentos, que norteiam os princípios brasileiros de gestão. Dentre elas está a chamada outorga de direito de uso de recursos hídricos. Por meio dela, é estabelecido que usuários recebam uma autorização ou concessão para utilizar a água, de modo a controlar quantitativa e qualitativamente este uso e assegurar o efetivo exercício

de direitos de acesso ao bem natural. Conforme [Soares \(2015\)](#), qualquer derivação ou captação para consumo, como abastecimento público, ou como insumo de processo produtivo configuram usos sujeitos ao instrumento de outorga.

A região metropolitana de São Paulo e suas vizinhanças, por meio de sua expressividade econômica para o Brasil e sua notável densidade demográfica, exigem um rigoroso sistema hídrico de suprimento de múltiplos objetivos. O chamado Sistema Cantareira é um conjunto regional formado por cinco reservatórios: Jaguari, Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro. Com capacidade total de cerca de 33 m³/s, o complexo de reservatórios atende essencialmente a metrópole paulistana e nela cerca de 9 milhões de pessoas ([AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2022](#)), além de cidades interioranas próximas, que compõem as Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, com aproximados 5.8 milhões de habitantes ([AGÊNCIA DAS BACIAS PCI, 2022](#)). Dada a conjuntura de suas fontes hídricas, o sistema é caracterizado por uma administração bipartite, federal e estadual, formada por duas figuras: a Agência Nacional de Águas (ANA) e o Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE). [Coelho et al. \(2016\)](#) citam que durante os anos de 2014 e 2015, a região abastecida por este sistema vivenciou uma intensa seca que, por sua vez, impactou a disponibilidade hídrica para o abastecimento público, para a agricultura e para a produção de energia. Constatou-se que neste período o Cantareira registrou quedas de precipitação de cerca de 44% ([DOMINGUES; ABREU; ROCHA, 2022](#)) e vazões afluentes de até 23% de sua média histórica ([AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2022](#)). Considerada uma excepcionalidade, a seca vivenciada exemplificou o impacto de um evento físico extremo em um contexto vulnerável de grande exposição e dependência hídrica ([OTTO et al., 2015](#)). Exercendo suas atribuições legais em concordância com a Política Nacional de Recursos Hídricos, ANA e DAEE, como responsáveis por definir as diretrizes normativas que norteiam o Sistema Cantareira e sua operação, renovaram em 2017 a outorga de aproveitamento destes reservatórios por meio de duas portarias ([AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2017a](#)) ([AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2017b](#)). Nelas foram listadas regras de mínima descarga a jusante de cada reservatório que compõe o conjunto e de monitoramento de vazões mínimas instantâneas e médias móveis em três seções de controle sobre rios importantes para a região e para o sistema (Atibaia, Jaguari e Juqueri).

Os desafios de concatenar desenvolvimento humano e proteção de sistemas naturais requer duas perspectivas, uma sociopolítica e outra científica. Apesar de, historicamente, a fronteira entre as duas searas tê-las afastado, modelos de simulação ambiental e processos de modelagem

cada vez mais encurtam esta separação, ao integrar diversos conhecimentos e objetivos institucionais e científicos (CHO *et al.*, 2023). A operação de um amplo sistema de reservatórios para abastecer e garantir água a milhares de indivíduos e processos configura uma tarefa de considerável complexidade. Junto dela soma-se o histórico de eventos recentes de escassez e insegurança hídrica. A fim de atender os limites outorgáveis neste contexto, a gestão pública deve ser munida com informações, dados e inclusive simulações. A aplicação de modelos hidrológicos é importante para subsidiar tomadas de decisão, pois fornece embasamentos técnicos para melhorar a gestão de recursos hídricos e introduzir políticas e programas setoriais (LOPES *et al.*, 2020). A modelagem chuva-vazão, por exemplo, é vital para a gestão a nível de bacia hidrográfica e para análise de riscos, como dito por Wang e Karimi (2022), além de dialogar diretamente com os requisitos de outorga apresentados. Operar barragens em uma região envolve conhecer o ciclo hidrológico como um todo e, mais especificamente, o regime de chuvas ali observado e suas previsões de curto prazo, para então estimar a parcela destas precipitações que será convertida em escoamento superficial e garantirá água suficiente nos cursos para captação. A administração ótima de sistemas de reservatórios requer o uso de ferramentas de modelagem computacional para o provimento de informações que promovam decisões coesas de operação (SANTANA; CELESTE, 2021). A utilização de modelos para guiar a operação de reservatórios é uma tendência científica prolífera e progressiva, verificada em vários estudos (SANKARASUBRAMANIAN *et al.*, 2009) (BLOCK *et al.*, 2009) (SOUZA *et al.*, 2023).

Apresentado o panorama nacional de gestão hídrica e os desafios observados em gerir um sistema de reservatórios de grande porte e importância socioeconômica, a seguinte dissertação visa tomar um estudo de caso e analisar como a utilização de técnicas de modelagem hidrológica pode beneficiar a garantia de outorgas de suprimento de água a nível regional. O trabalho analisa a fundo as Bacias do Piracicaba, Capivari e Jundiá (Bacias PCJ) em um trecho com duas seções fluviais de interesse. Ao aplicar em cada ponto de controle a simulação de cenários de conversão chuva-vazão e escoamento superficial a partir de séries de precipitação prevista, pretende-se evidenciar como o suprimento de dados modelados pode nortear a manobra de reservatórios, garantir o abastecimento hídrico e a gestão sustentável da água.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é estabelecer comparativos e estratégias por meio de um modelo hidrológico acoplado a um modelo de previsão meteorológica, de modo a subsidiar a gestão de

recursos hídricos em bacias hidrográficas com escassez de água e possibilitar o atendimento de regras de operação complexas com maior confiabilidade. Os objetivos específicos deste estudo desdobram-se em:

- Desenvolver um modelo acoplado para calibrar variáveis com uma série histórica de 2 anos de dados observados e realizar a decisão de despachos neste mesmo período com previsões meteorológicas;
- Avaliar os despachos para três diferentes cenários: **i.** simulação de vazões com chuvas previstas, **ii.** com chuvas observadas e **iii.** com vazões observadas.

2 Revisão bibliográfica

Antes de detalhar o estudo de caso e especificar o modelo proposto para o problema, vale estabelecer certos fundamentos que norteiam a dissertação em sua totalidade. Para tal, optou-se por dividir a seguinte revisão em quatro frentes correlatas. Primeiramente, é importante destacar como o gerenciamento da água em bacias hidrográficas complexas (tomadas por grandes demandas, sujeitas à carência hídrica diante de mudanças climáticas e marcadas por regras de gestão desafiadoras) exige o estabelecimento de outorgas pré-definidas que devem dialogar com os fenômenos físicos conhecidos. Em seguida, convém descrever melhor como a utilização de modelos hidrológicos, em seus inúmeros tipos, embasa a solução de problemas de gestão. Posteriormente, é preciso estabelecer com maior rigor a adaptação de técnicas para representar o deslocamentos de ondas de cheia em rios, conceito este importante para compreender as dificuldades de determinar despachos corretos de reservatórios. Por fim, completa-se a discussão contextualizando o uso de previsões meteorológicas para o suporte a decisões em pesquisas e atividades de gerenciamento.

2.1 A gestão de recursos hídricos em bacias complexas

A Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997) define que a água é um bem dotado de valor econômico e sua utilização deve ser tratada com racionalidade. Em certos contextos, como o paulistano, o acesso ao recurso natural é dificultado por múltiplos fatores. Um deles, como dito por Santarosa, Gastmans e Quaggio (2022) e pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) (SABESP, 2020), é a representatividade socioeconômica regional, assim como a alta densidade populacional atribuída à região metropolitana de São Paulo e suas vizinhanças. Outro fator é o histórico de eventos extremos de escassez hídrica, como aquela observada entre 2014 e 2015. A seca excepcional vivenciada, de probabilidade de ocorrência de cerca de 1% (SABESP, 2020), implicou em reduções drásticas de disponibilidade hídrica e motivou o governo, à época, a adotar medidas únicas, como bombear água de seus reservatórios em níveis não utilizados para finalidades normais e aplicar junto à população políticas de gestão de demanda para fins de economia (PORTO; PORTO; PALERMO, 2014).

Diante destes desafios, e com o sumo objetivo de garantir o acesso múltiplo à água, em 2017 os órgãos ANA e DAEE estenderam à Sabesp por mais dez anos o direito de operar o Sistema Cantareira conforme o instrumento de outorga. A fim de prover diretrizes para sua atuação neste

cenário de grande complexidade, as agências listaram por meio de duas portarias um conjunto específico de regras que merece uma exposição maior.

Conforme ilustra a [figura 1](#), vê-se que o Sistema é dividido em cinco represas. Jaguari e Jacareí, Cachoeira e Atibainha atendem as Bacias PCJ; por meio de túneis, suas reservas somam-se à represa Paiva Castro, já sob a Bacia do Alto Tietê, onde bombeia-se água através de uma estação elevatória para vencer a topografia serrana e abastecer a metrópole de São Paulo. Nesta configuração, 31 m³/s são produzidos nas Bacias PCJ — com 22 m³/s advindos do reservatório conjunto Jaguari/Jacareí — e 2 m³/s na Bacia do Alto Tietê ([AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2022](#)).

Figura 1: Sistema Cantareira e seus reservatórios



Fonte: adaptado de [Agência Nacional de Águas \(2022\)](#)

A primeira resolução promulgada em 2017, portaria N° 925 ([AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2017a](#)), dispõe sobre as condições em que o Sistema deve ser operado. Nela verifica-se que o conjunto de reservatórios conta com um volume útil de 981.56 hm³, com mínimos e máximos operacionais de 510.89 hm³ e 1,492.45 hm³ respectivamente. A partir desta disponibilidade, decidiu-se que as descargas mínimas instantâneas de cada reservatório fossem divididas em: 0.10 m³/s para jusante do Paiva Castro e 0.25 m³/s para jusante do Jaguari/Jacareí, Cachoeira e Atibainha.

Os critérios de monitoramento de vazões no PCJ e as parcelas regulamentadas de retirada de água para São Paulo pela estação elevatória Santa Inês foram vinculados a cinco faixas de operação do Sistema, conforme lista a [tabela 1](#). Em situação normal, é dado à Sabesp a autorização

Tabela 1: Faixas de operação atribuídas ao Sistema Cantareira conforme volume disponível

Faixa	Descrição	Volume útil acumulado
1	Normal	Igual ou maior que 60%
2	Atenção	Igual ou maior que 40% e menor que 60%
3	Alerta	Igual ou maior que 30% e menor que 40%
4	Restrição	Igual ou maior que 20% e menor que 30%
5	Especial	Menor que 20%

Fonte: adaptado de [Agência Nacional de Águas \(2017a\)](#)

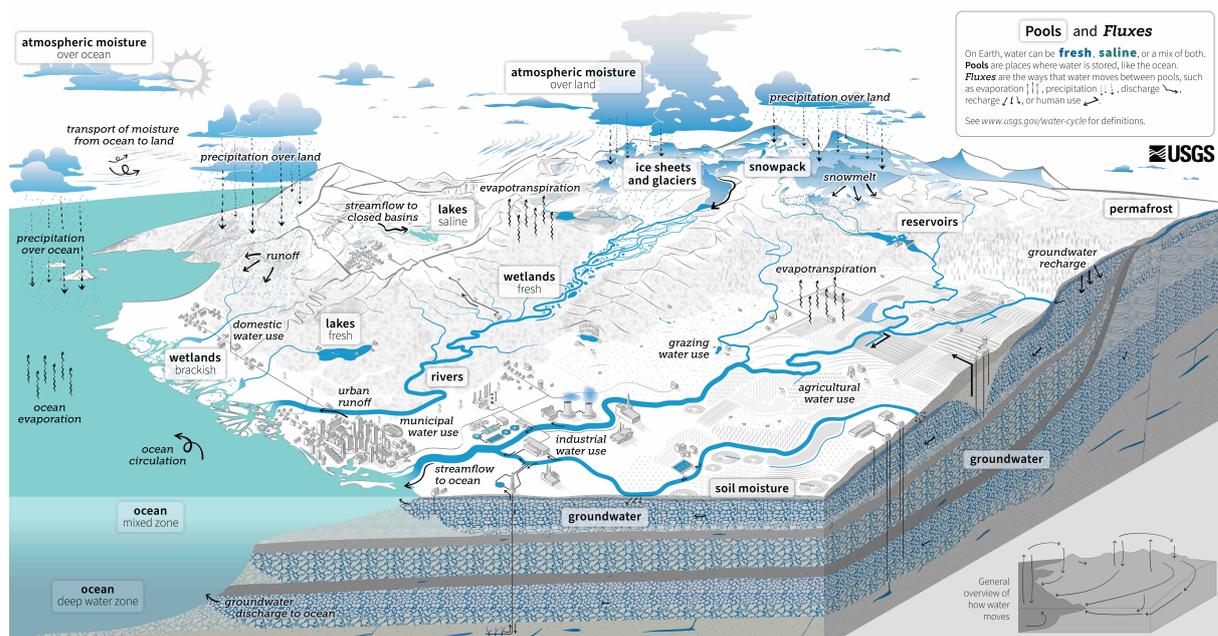
de retirada de 33 m³/s para São Paulo; em estado de atenção, reduz-se para 31 m³/s; quando em alerta, para 27 m³/s; em condições de restrição, cai-se para 23 m³/s e, por fim, em situação especial, para 15.5 m³/s. Em contrapartida, a portaria afirma que a liberação de vazões para as Bacias PCJ deve ser controlada em 3 pontos fluviais distintos, onde foram instituídos postos de controle: um deles em Buenópolis, no Rio Jaguari, a jusante das represas Jaguari/Jacareí, e dois outros no Rio Atibaia, a jusante das represas Cachoeira e Atibainha, nos municípios paulistanos de Atibaia e Valinhos. Quando no período úmido anual, definido historicamente para a região como de primeiro de dezembro a trinta e um de maio, nas faixas 1 e 2 é necessário garantir médias móveis de quinze dias mínimas de 12 m³/s em Valinhos, 3 m³/s em Atibaia e 2.5 m³/s em Buenópolis. Por outro lado, nas faixas 3 e 4, cai-se para 11 m³/s em Valinhos e 2 m³/s em Atibaia e Buenópolis. De modo a permitir variabilidade momentânea, tais médias móveis são complementadas com mínimas médias diárias: de 10 m³/s em Valinhos e 2 m³/s em Atibaia e Buenópolis. Na faixa 5, a condição mínima diária substitui a condição média móvel como regra única. Quando no período seco, de primeiro de junho a trinta de novembro, as Bacias PCJ devem ser abastecidas com uma vazão média de 10 m³/s. Em complemento, a portaria N° 926 ([AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2017b](#)) enumera as obrigações legais que a Companhia de Saneamento deve cumprir enquanto operadora.

A partir destas disposições, é nítido que o atendimento a tais normas não é tarefa simples. Para obedecer aos mínimos dispostos em cada seção de controle, por exemplo, é preciso conhecer intimamente o ciclo hidrológico e o balanço hídrico regional. Entender como funcionam os sistemas produtores locais e sua recarga d'água depende de uma compreensão de como o solo, a vegetação e o clima atuam interativamente ([SABESP, 2020](#)).

De modo conciso, [Collischonn e Dornelles \(2013\)](#) detalham que a energia solar, responsável por aquecer o ar, o solo e a água superficial, evapora a água líquida e, pela evapotranspiração de plantas, a água junto ao solo. Este vapor é transportado pelo ar e pode condensar, formando

nuvens. Dadas as circunstâncias, o mesmo retorna à superfície sob a forma de precipitação. Quando a precipitação atinge a superfície, ela pode infiltrar ou escoar até alcançar um curso d'água. A parcela infiltrante umedece o solo, alimenta aquíferos e origina o escoamento básico subterrâneo. Em linhas gerais, este é o ciclo da água. Atualmente, entretanto, esta descrição teórica passa por uma reformulação mais abrangente e moderna. O *United States Geological Survey* (USGS, 2023) explica qualitativamente que o ciclo hidrológico descreve onde a água está na Terra e como ela se move. Armazenada na atmosfera, na superfície terrestre e abaixo do solo, ela pode apresentar-se líquida (doce ou salgada), sólida ou gasosa. Movendo-se em larga (por meio de bacias, pela atmosfera e abaixo da superfície) ou baixa escala (em seres humanos, plantas e outros organismos), seu deslocamento, assim como seu armazenamento e qualidade são afetados e fortemente impactados pelas atividades humanas. A [figura 2](#) representa visualmente o ciclo hidrológico moderno:

Figura 2: Ciclo hidrológico moderno



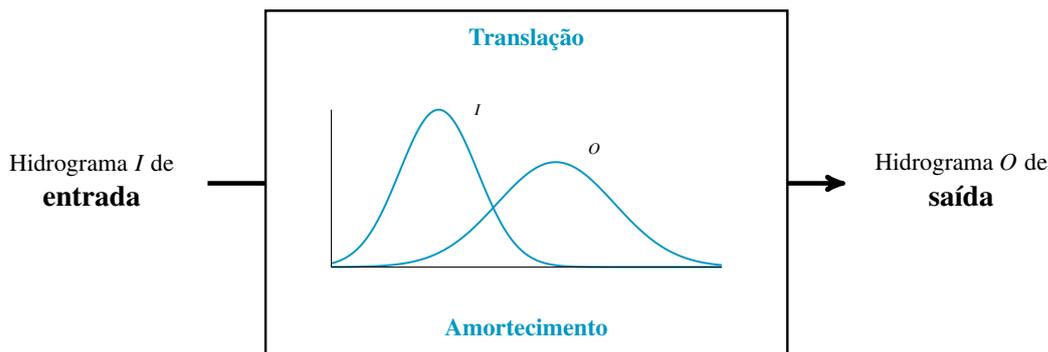
Fonte: adaptado de USGS (2023)

Nesta sequência de fenômenos, a bacia hidrográfica é unidade fundamental. Tucci (2015) descreve bacia como a área de captação natural de água de precipitações que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório. O equilíbrio entre entradas e saídas de água neste sistema físico é denominado balanço hídrico. Já que a principal entrada de água de uma bacia é a precipitação P e a saída pode ocorrer por evapotranspiração ET e escoamento Q , é possível derivar a seguinte relação (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013):

$$P = ET + Q \quad (2.1)$$

Os conceitos enunciados mostram que perguntas simples necessárias ao correto gerenciamento de recursos hídricos, como “ — Para onde vai a água precipitada? ” e “ — Quanto de chuva de fato será convertido em vazão? ”, somente podem ser respondidas mediante o conhecimento de eventos característicos da Hidrologia. O próprio processo de operação de um sistema de reservatórios, através de manobras de comportas hidráulicas, deve ser feito logicamente. Os principais efeitos atuantes quando uma onda de cheia de uma descarga propaga-se ao longo de um canal fluvial são a translação e a atenuação (ou amortecimento) (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). Ou seja, a parcela despachada de água ao pé de uma barragem não será exatamente igual quilômetros a jusante, como mostra a [figura 3](#). É comum então estudar tal fenômeno, também chamado de *routing*, para responder o seguinte: “ — Descarregando um certo volume a montante, quanto chegará a jusante, para atender a uma outorga específica? ”.

Figura 3: Propagação de cheias em rios



Fonte: autor

Em síntese, convém salientar que em regiões onde o acesso à água é carente e indispensável ao desenvolvimento social e econômico, a vivência de situações extremas e complexas motivou a organização de uma série de regras bem definidas para garantir a todos o recurso hídrico natural. Após descrever em maiores detalhes como a dinâmica natural é intrincada e envolve diversos sub-processos paralelos, pode-se partir para uma discussão sobre como *stakeholders* gerenciais e a comunidade científica abordam atualmente os problemas de gestão. Parte fundamental nestes estudos é a modelagem, a ser pormenorizada a seguir em duas seções: uma para representar o ciclo hidrológico e entender a conversão chuva-vazão e outra sobre técnicas de representação de escoamentos superficiais em rios.

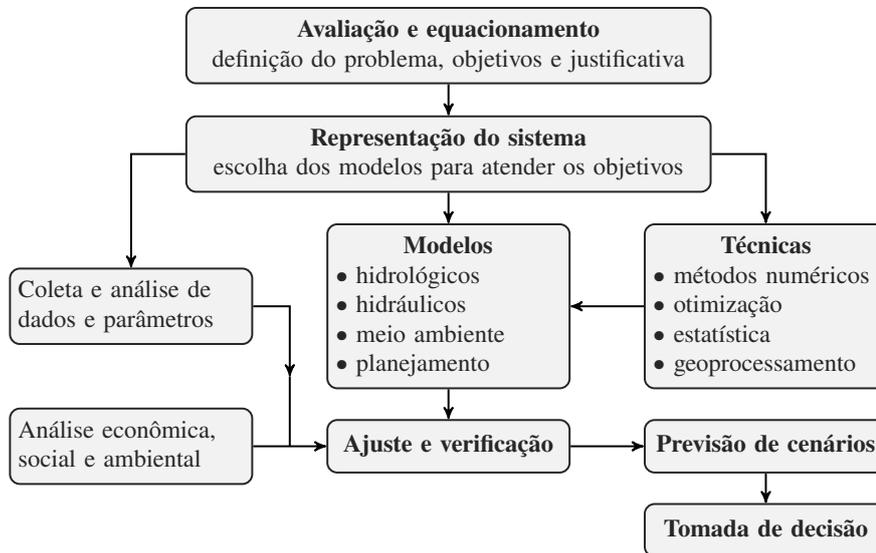
2.2 Modelos hidrológicos e sua importância

Um modelo, de acordo com [Tucci \(2005\)](#), é a representação de um certo objeto ou sistema em uma linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas. O modelo hidrológico, como explica o mesmo autor, existe para melhor compreender e representar o comportamento de uma bacia hidrográfica e prever nela condições diferentes daquelas observadas. [Santarosa, Gastmans e Quaggio \(2022\)](#) reforçam que a grande pressão exercida sobre recursos hídricos após o crescimento de demandas ou perda de qualidade de cursos d'água exige uma abordagem multidisciplinar para lidar com problemas ambientais, científicos e sociais neste meio. Para tal, a combinação de metodologias de modelagem é uma importante ferramenta para interpretar e caracterizar sistemas hidrológicos em bacias.

Dando um passo atrás, é importante esclarecer que sistemas equivalem ao conjunto de partes que formam um todo. Um sistema hidrológico pode ser definido como uma estrutura ou volume em um espaço, rodeado por fronteiras, que aceita água e outras entradas, processa-as internamente, e as produz como resultado ([CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988](#)). Nesta construção, o modelo hidrológico aproxima o sistema real e nele entradas e saídas são medíveis via variáveis, enquanto sua estrutura é formulada por meio de um conjunto de equações. [Chow, Maidment e Mays \(1988\)](#) destacam que modelos hidrológicos podem ser divididos em duas categorias. Uma delas abrange os físicos, que desdobram-se em modelos de escala (os quais representam sistemas em escala reduzida) e modelos analógicos (em que um protótipo é substituído por um sistema físico alternativo com propriedades similares ao primeiro para inferir resultados de processos desejados). Outra categoria inclui modelos abstratos, que representam sistemas matematicamente. Apesar de sua grande versatilidade e velocidade de resposta, é importante destacar que modelos matemáticos possuem o inconveniente de discretizar processos contínuos, além de demonstrarem certa dificuldade em retratar alguns processos físicos. Por estes motivos, [Oliveira \(2012\)](#) reforça que, perante a inviabilidade de traduzir matematicamente todas as relações existentes entre os inúmeros componentes de uma bacia, a modelagem hidrológica torna-se somente a reprodução aproximada da realidade. Modelos expandem o conhecimento, porém não produzem resultados absolutos. Mesmo assim, este autor destaca que sua importância é tamanha, uma vez que eles permitem estruturar dados, estudar as respostas de um local, selecionar e avaliar parâmetros e também antecipar eventos ou prever a ocorrência de extremos estatisticamente possíveis. Quando utilizada em conjunto com experiências práticas e dados de campo, a modelagem auxilia a tomada de decisão técnica de forma aprimorada ([OLIVEIRA, 2012](#)). O fluxograma abaixo des-

taca com clareza como um modelo é utilizado para o suporte a decisões em estudos de recursos hídricos:

Figura 4: Inserção de modelos em processos de gestão



Fonte: adaptado de Tucci (2005)

Antes de citar tipos de modelos hidrológicos, convém enumerar algumas nomenclaturas fundamentais. Ao detalhar o ciclo hidrológico (vide figura 2), vê-se que o sistema natural é composto por diversos fenômenos, como a precipitação, a evaporação e a infiltração. *Fenômeno*, como dito por Tucci (2005), é um processo físico que altera o estado de um sistema. A descrição quantitativa destes processos, que variam espacial e temporalmente, é feita por meio de *variáveis*, como a precipitação ou a vazão, por exemplo. Outros valores que caracterizam o sistema são ditos *parâmetros*, seja a área de uma bacia ou a rugosidade de um curso d'água, dentre outros. Muito importante nesta dissertação, a *simulação* é o processo de utilização de um modelo. Nela existem três fases características: a estimativa, a verificação e a previsão. Em suma, estimativa é a fase de determinação de parâmetros. Sua realização depende de dados históricos disponíveis, medições amostrais e via determinação de características sistemáticas físicas. É comum atualmente estimar através de um ajuste por otimização. Nesta prática, por meio de valores conhecidos de entrada e saída de variáveis, busca-se com métodos matemáticos a otimização de uma função que retrate a diferença entre o observado real e o calculado por modelagem. Feita a estimativa, a verificação simula o modelo com parâmetros presumidos para analisar o ajuste realizado e sua validade. Assim, após calibrar o modelo, ele deve ser verificado com outros dados a fim de garantir que o sistema seja representado adequadamente. Feito isto, parte-se para a previsão, em que o modelo, depois de ajustado e verificado, simula o sistema para quantificar

sua resposta para situações desconhecidas (TUCCI, 2005).

É também imprescindível, ao abordar modelos hidrológicos, listar sua taxonomia. De modo simplificado, pode-se classificá-los de acordo com quatro categorias: **i.** contínuos e discretos; **ii.** concentrados e distribuídos; **iii.** estocásticos e determinísticos e **iv.** conceituais e empíricos. De Chow, Maidment e Mays (1988), Oliveira (2012) e Tucci (2005), montou-se a seguinte lista-resumo:

- **contínuos e discretos:** modelos contínuos simulam um longo período, enquanto modelos discretos simulam eventos específicos;
- **concentrados e distribuídos:** modelos concentrados não levam em conta o conceito de variabilidade espacial. Geralmente, eles utilizam somente o tempo como variável independente. Por outro lado, modelos distribuídos possuem variáveis e parâmetros que alternam com o espaço e/ou o tempo;
- **estocásticos e determinísticos:** modelos estocásticos introduzem à representação a chance de ocorrência de certas variáveis, e portanto, trabalham com probabilidades. Caso tais chances sejam ignoradas e o modelo siga leis bem definidas que não envolvam probabilidades, eles serão ditos determinísticos. Dooge (1973) traz uma definição ainda mais clara e precisa sob a ótica de sistemas: quando, para uma mesma entrada, um sistema produz sempre a mesma saída, para condições iniciais exatamente iguais, ele é retratado como determinístico. Quando o relacionamento entre entrada e saída é estatístico, ou variável, o sistema é estocástico. Assim, estende-se o mesmo para modelos;
- **conceituais e empíricos:** modelos conceituais equacionam em sua elaboração funções que consideram os processos físicos naturais. Alternativamente, modelos empíricos, também chamados *black box* ou “caixa-preta”, ajustam valores calculados a dados observados por meio de funções que não possuem relação alguma com processos físicos.

Conhecidos os principais termos e classificações de modelos, é possível elaborar melhor aqueles selecionados nesta dissertação. Primeiramente, visto que o enfoque comum de inúmeras pesquisas é a concessão, controle ou conservação de água, a [tabela 2](#) destaca alguns exemplos rotineiros de modelos para gestão.

Em resumo, o gerenciamento de recursos hídricos abrange modelos chuva-vazão, vazão-vazão, hidrodinâmicos, de qualidade, além de outros mais conforme o uso desejado e o problema

Tabela 2: Exemplos de modelos para gerenciamento de recursos hídricos

Nome	Tipo	Características	Usos
Chuva-vazão	determinístico empírico conceitual	calcula a vazão de uma bacia a partir de uma precipitação	extensão de séries de vazão, dimensionamento, previsão em tempo atual, avaliação de uso de solo
Vazão-vazão	determinístico empírico conceitual	calcula a vazão de uma seção a partir de um ponto a montante	extensão de séries de vazão, dimensionamento, previsão de cheia
Geração estocástica de vazão	estocástico	calcula a vazão por meio de séries históricas	dimensionamento de volume de um reservatório
Fluxo saturado	determinístico	determina a vazão potencial de águas subterrâneas com dados de realimentação e bombeamento	capacidade de bombeamento, nível de lençol freático, iteração rio-aquífero
Hidrodinâmico	determinístico	sintetiza vazões em rios e redes de canais	simulação de alterações sistêmicas, efeitos de escoamento de jusante
Qualidade de água	determinístico	simula a concentração de parâmetros de qualidade	impacto de efluentes, eutrofização de reservatórios, condições ambientais

Fonte: adaptado de [Tucci \(2005\)](#)

em mãos. O estudo aqui realizado aborda em detalhes o acoplamento de um modelo chuva-vazão e um modelo vazão-vazão, todos com teor hidrológico. A gama de tipos vazão-vazão e a ponderação sobre qual melhor adequou-se a este trabalho será detalhada a seguir, em uma seção a parte. Antes disso, deve-se destacar os principais modelos chuva-vazão utilizados no meio científico e qual possui maior mérito para ser empregado adiante.

Ao citar chuva-vazão, entende-se modelos que adaptam o ciclo hidrológico entre a precipitação e o escoamento superficial. Como o escoamento é gerado por uma combinação de excessos, de saturação e infiltração ([UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2017](#)), é preciso conhecer desde a distribuição de chuvas, perdas por interceptação e evaporação, o fluxo pedológico por infiltração, percolação e água subterrânea, até os escoamentos superficial e sub-superficial em um rio. Com maior ou menor ênfase, tais modelos visam concatenar diferentes algoritmos que adaptem os processos hidrológicos descritos entre o evento chuvoso e a vazão fluvial.

Em sua exposição sobre a evolução de modelos desde a década de 1960 aos dias atuais, [Singh \(2018\)](#) mostra que são populares os modelos HEC-HMS e SWMM. Complementarmente, durante a formulação desta dissertação, averiguou-se também o modelo SMAP.

O chamado *Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*, ou HEC-HMS (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2023), é um modelo conceitual desenvolvido pelo US Army Corps of Engineers para representar bacias urbanas e naturais em tormentas contínuas ou eventos isolados. Sahu, Shwetha e Dwarakish (2023) comentam que o modelo pode ser desmembrado em quatro componentes: um módulo de bacia, que determina perdas por infiltração e evapotranspiração e calcula excessos de chuva para cada intervalo de tempo durante o processo analisado; um módulo de transformação, que converte a precipitação excedida em escoamento direto por meio de um hidrograma calculado para o exutório; um módulo de escoamento básico, para modelar a contribuição de águas subterrâneas ao escoamento; e, por fim, um módulo de *routing*, para propagação de cheias de montante a jusante conforme pontos de interesse específicos. Em cada um destes módulos o usuário é convidado a escolher um método específico de representação de fenômenos, como Green-Ampt ou SCS-CN para infiltração, SCS ou Clark para hidrogramas unitários, reservatório linear para escoamento básico e Muskingum ou onda cinemática para *routing*.

Storm Water Management Model, proposto pela Environmental Protection Agency dos Estados Unidos, é um modelo chuva-vazão que simula eventos de tormenta a partir de dados meteorológicos e de características atribuídas ao sistema com o objetivo de prever resultados de quantidade e qualidade (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2023). Simplificadamente, sua estrutura pode ser subdividida em blocos, cada qual com uma atribuição: um *runoff*, de escoamento superficial por meio de hidogramas, condições topográficas e de uso e ocupação de solo; dois blocos, *transport* e *extended transport*, para *routing*; um bloco *storage/treatment* para incluir estruturas hidráulicas de controle e seus efeitos sobre o escoamento e qualidade, além de blocos auxiliares para plotagem de gráficos e inserção de dados de entrada (HUBER; DICKINSON, 1992). O modelo divide áreas de estudo em sub-bacias menores e homogêneas que recebem precipitações, geram escoamentos e/ou cargas poluidoras, que por sua vez podem ser transportados por simulações de tubulações, canais, dispositivos de armazenamento e tratamento, bombas e elementos de regulação. Sua larga utilização ocorre em áreas de planejamento, análise e projeto de sistemas de drenagem em áreas urbanas e sistemas coletores de águas residuárias (UFPB, 2023).

Por último, SMAP, ou *Soil Moisture Accounting Procedure*, é um modelo determinístico, conceitual e concentrado elaborado por Lopes, Braga e Conejo (1982) que separa escoamentos conforme o método norte-americano SCS (ou *Soil Conservation Service*) (SOIL CONSERVA-

TION SERVICE, 1956). Ele utiliza como entrada séries de precipitação e evapotranspiração potencial para determinar vazão junto ao exutório de uma bacia (ÁVILA *et al.*, 2022). Em sua versão diária, o modelo segue a representação de armazenamentos e escoamentos d'água de acordo com uma abordagem conceitual de três reservatórios fictícios lineares. Sua simplicidade e estrutura, que requer poucas variáveis, o tornam bastante atrativo e referência em diversos estudos. Chen, Cataldi e Francisco (2023) e também Cavalcante, Barcellos e Cataldi (2021) aplicaram o modelo sob o contexto de monitoramento e previsão de cheias extremas, após o evento que atingiu a região montanhosa carioca, no Rio de Janeiro, em 2011. Ávila *et al.* (2022) compararam SMAP e outro 4 modelos hidrológicos para representar regimes de escoamento diário em seis hidroelétricas no Tocantins, a fim de averiguar similaridades e diferenças diante de incertezas paramétricas e estruturais de cada abordagem. Neves *et al.* (2020) utilizaram a modelagem SMAP com um gerador estocástico de dados climáticos para estudar mudanças climáticas em uma bacia hidrográfica paulistana. Estas e outras publicações utilizaram o modelo e obtiveram bons resultados ou o compararam eficientemente com outras opções.

Coincidentemente, os modelos HEC-HMS e SWMM são distribuídos sob a forma de *softwares* “prontos”, de modo que usuários interessados devem conhecer as plataformas e com elas interagir para escolher métodos hidrológicos de interesse para representar seus problemas. Sem implicar demérito aos dois, sob os pontos de vista prático e acadêmico, verificou-se a necessidade de eleger em meio à literatura uma solução metodológica que fosse replicável computacionalmente desde sua origem, ou seja, codificada em uma linguagem de programação desde o básico, para que desta forma fosse possível detalhar pessoalmente os pormenores e demais condições de contorno próprias deste trabalho. O modelo SMAP, por ser simples, familiar ao autor e frequentemente aplicado em inúmeras produções científicas com bons resultados, foi preferido nesta dissertação. Sua descrição detalhada, com diagramas e equações, é melhor aproveitada junto à seção de metodologia, pois lá será possível descrevê-lo de forma integrada ao modelo acoplado construído, que une chuva-vazão, *routing* e previsões meteorológicas.

O objetivo desta seção é destacar os fundamentos de modelagem hidrológica, conceitos básicos e a importância desta ferramenta para atingir fins práticos em problemas de gestão. Após contextualizar e justificar o componente chuva-vazão selecionado para a pesquisa, resta detalhar o estudo realizado acerca de propagação de cheias, necessário para complementar a solução desenhada com um bloco vazão-vazão, de *routing*, como mostra a seção a seguir.

2.3 Técnicas de *routing* em rios

Das (2009) explica que as propriedades de cursos d'água naturais de resistência ao escoamento causam a atenuação de hidrogramas de cheia durante sua passagem ao longo destes rios. Modelos de escoamento, ou *routing*, servem para traçar hidrogramas de jusante atenuados a partir de hidrogramas de montante conhecidos.

Para calcular vazões propagadas de montante a jusante sob os efeitos de translação e amortecimento (vide figura 3), existem duas vertentes: **i.** métodos hidráulicos, que utilizam equações diferenciais de conservação de massa e quantidade de movimento em rios, também ditas equações de Saint-Venant, e **ii.** métodos hidrológicos, mais simplificados e que tomam apenas a equação de continuidade e uma função simplificada de vazão e armazenamento fluvial (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

A partir de certas hipóteses físicas, a literatura destaca duas equações diferenciais parciais que matematicamente representam o escoamento superficial ao longo de cursos d'água de forma exata, considerando efeitos de translação, atenuação e condições de jusante. As equações hidráulicas abaixo,

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\beta Q V) + g A \left[\frac{\partial y}{\partial x} + (S_f - S_0) \right] = 0 \quad (2.3)$$

são também conhecidas como equações de Saint-Venant¹ (SAINT-VENANT, 1871). Por não possuírem solução analítica, sua resolução deve ser feita por meio de métodos numéricos computacionais. A título de exemplo, enquanto Chow, Maidment e Mays (1988) propõem métodos de diferenças finitas, seja com esquemas implícito ou explícito para aproximar as derivadas parciais, Tucci (2005) sugere o método das características, que transforma as equações acima em quatro equações diferenciais ordinárias de solução factível.

De maior acesso e usualmente empregados em inúmeros problemas, métodos hidrológicos adaptam as equações de Saint-Venant de forma prática. Neste seguimento, são populares o método de Muskingum e o método de Muskingum-Cunge. Em sua forma mais simples, dita linear, o método de Muskingum, desenvolvido por McCarthy (1938) para estudar o Rio Muskingum em Ohio, Estados Unidos, toma como base uma relação entre vazão e armazenamento em que

¹Nestas equações, x equivale à distância ao longo do rio, y à profundidade, t ao tempo, A à área da seção transversal do corpo hídrico, Q à vazão, V à velocidade da água, β a um coeficiente de correção de momento, S_0 à declividade de fundo e S_f à declividade de atrito.

um hidrograma de entrada I , um de saída O e o armazenamento fluvial S relacionam-se por meio de dois parâmetros, K e X :

$$S = K [XI + (1 - X) O] \quad (2.4)$$

Em muitas situações reais, porém, não é possível determinar valores apropriados para K e X por meio de dados observados. Assim, [Cunge \(1969\)](#) propôs uma formulação alternativa de K e X que, ao invés de serem escolhidos ou calibrados, sejam calculados a partir de características físicas referentes ao rio estudado:

$$K = \Delta x / c \quad (2.5)$$

$$X = 0.5 \left[1 - \left(\frac{Q}{B c S_0 \Delta x} \right) \right] \quad (2.6)$$

onde Δx corresponde ao comprimento do trecho de rio, c à celeridade da onda de cheia, B à largura do rio, S_0 a sua declividade de fundo e Q a uma vazão de referência.

Por oferecer maior viabilidade computacional, em termos de simplicidade para codificar e menores complexidades teóricas, mas acima disto, por ser largamente adotado em diversas pesquisas, optou-se por utilizar nesta dissertação o método de Muskingum para *routing* hidrológico. A título de exemplo, [Dehghanian et al. \(2020\)](#) utilizaram o modelo de Muskingum para simulação hidrológica em uma situação de identificação de áreas de cheia via redes neurais artificiais. [Tassew, Belete e Miegel \(2019\)](#) adotaram a técnica em uma análise de sensibilidade para modelagens na Bacia do Alto Nilo, em Etiópia. [Li et al. \(2019\)](#) aplicou Muskingum para calcular escoamentos subterrâneos em bacias cársticas na China.

Deliberadamente formulou-se esta seção de forma resumida, pois é interessante detalhar o método quando for apresentada a metodologia, onde o leitor poderá compreender melhor os conceitos aplicados ao modelo formulado. Especialmente, é interessante especificar metodologicamente uma importante inovação deste trabalho, o qual tendeu a uma alternativa *não-linear* de Muskingum, mais realista e aderente ao problema prático confrontado, para realizar *routings* em ambos os sentidos fluviais. Para concluir esta exposição, o último assunto imprescindível é a utilização de previsões meteorológicas em modelagem, como segue.

2.4 Previsões meteorológicas para suporte à gestão hídrica

Para adaptação climática e mitigação de riscos, tomadores de decisão em gestão de recursos hí

dricos cada vez mais demandam informações regionalizadas de tempo e clima (PORTELE *et al.*, 2021). Bressiani *et al.* (2015) informam que a variabilidade climática possui um impacto considerável em sistemas hidrológicos, seja em acesso e qualidade de água, ou em frequência e severidade de enchentes e secas. Neste âmbito, Schardong, Simonovic e Garcia (2014) acrescentam que, atualmente, modelos climáticos de circulação global ou modelos regionais destacam-se entre as melhores ferramentas para determinar impactos em disponibilidade hídrica futura em bacias hidrográficas ou sistemas de recursos hídricos.

Nesta dissertação a utilização de previsões meteorológicas assume papel ímpar para subsidiar o gerenciamento e o processo decisório; afinal, para garantir o atendimento a vazões outorgadas, é necessário estimar a parcela de escoamento superficial direto que receberá contribuição de chuvas futuras, de modo que o complemento destas vazões deva ou não advir de despachos reservados. A partir de sua importância, buscou-se estudar neste trabalho exemplos de modelos numéricos de previsão de tempo, também conhecidos sob a sigla em inglês NWP, de *Numerical Weather Prediction models*. Golding (2015) explica que tais modelos utilizam equações que governam o movimento de cascas gasosas finas em esferas rotacionais e adicionam expressões que descrevem a água e suas mudanças de estado (entre vapor, líquido e gelo) e representam efeitos de radiação solar, de nuvens e de turbulência devido à superfície topográfica. De maior importância neste trabalho, um NWP regional prediz a evolução atmosférica sobre uma superfície terrestre limitada, de modo bastante refinado e com menor demanda computacional. Em suas publicações voltadas às Bacias PCJ, Bozzini (2019) e Bozzini e Júnior (2019) limitam suas investigações a três modelos principais: ETA, BAM e WRF.

O modelo regional ETA, desenvolvido pela Universidade de Belgrado, foi adotado pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em 1996 (CENTRO DE PREVISÃO DO TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS, 2023), com uma proposta de prever com detalhes fenômenos associados a frentes, orografia, brisa marítima e tempestades severas, dentre outros sistemas organizados em mesoescala. Sua discretização ocorre em malhas com resolução de 40 quilômetros. De estudos elaborados, verifica-se que o modelo tendia resultados conforme o horizonte de previsão utilizado, a região analisada e o volume de chuva observado, uma vez que ele pode superestimar ou subestimar precipitações de acordo com o tempo de previsão ou a intensidade de ocorrência (BOZZINI; JÚNIOR, 2019).

O *Brazilian Atmospheric Model*, ou BAM, é um modelo global empregado junto ao CP-

TEC desde 2016 (BOZZINI, 2019), elaborado para uso em escalas de tempo desde dias até temporadas e em resoluções horizontais de 10 a 200 km (FIGUEROA *et al.*, 2016). Bozzini e Júnior (2019) afirmam que dada sua discretização refinada, o modelo representa satisfatoriamente eventos relacionados a orografias complexas e é largamente utilizado para estudar o sudeste brasileiro.

Por sua vez, o *Weather Research and Forecasting Model* é um modelo regional comunitário tipo *open-source*, desenvolvido pelo *National Center for Atmospheric Research* e diversos outros órgãos norte-americanos desde a década de 1990. Seu uso é prolífero em meio à comunidade científica, sendo aplicado em diversos trabalhos, como em Portele *et al.* (2021), Pellegrini *et al.* (2019) e Rozanov, Calvetti e Filho (2014).

Dentre as opções listadas, elegeu-se para uso nesta dissertação o modelo regional WRF com resolução de 5 km e horizonte de 7 dias. Sua disponibilidade de dados imediata mostrou-se um atrativo decisivo para utilizá-lo como fonte de previsões meteorológicas em Atibaia e Valinhos, sub-bacias de estudo. Inclusive, Bozzini (2019) verifica em sua pesquisa que o modelo WRF demonstra boa correlação entre dados observados e previstos de chuva para Atibaia e Valinhos, o que atesta sua qualidade como amostra para utilização junto à modelagem deste trabalho. A subseção metodológica de dados utilizados trará maiores detalhes sobre estas considerações.

Para concluir esta revisão bibliográfica vale citar uma fala de Bozzini (2019) e Schardong *et al.* (2010) que reforçam com precisão os conceitos aqui explicados:

A tomada de decisão na gestão de sistemas de recursos hídricos envolve, com frequência, a alocação eficiente da água. Dado o grande número de variáveis envolvidas, a não linearidade dos processos, o fator probabilístico inerente às variáveis hidrológicas e os conflitos entre as diferentes demandas, a operação de sistemas de reservatórios consiste num problema de alta complexidade. A busca por melhores alternativas de alocação de água é feita com a aplicação de modelos de simulação e otimização associados a ferramentas computacionais (BOZZINI, 2019 apud SCHARDONG *et al.*, 2010).

Com base nesta fala é possível constatar que esta pesquisa alinha-se com diversas abordagens atuais que são motivadas por um objetivo comum: frente à dificuldade cada vez maior de alocar água a populações crescentes e que demandam o bem natural para múltiplos objetivos, uma alternativa bastante proveitosa é dar suporte à tomada de decisão em processos de gerenciamento por meio de modelagens, sejam elas hidrológicas e/ou meteorológicas. Como visto junto à primeira seção, após eventos climáticos extremos (e cada vez mais frequentes), o endurecimento de regras complexas para nortear a operação de reservatórios exige, além de conhecimentos e práticas

tradicionais, que sejam empregadas ferramentas capazes de simular o ciclo hidrológico e suas minúcias (como o processo fundamental de conversão chuva-vazão e escoamento superficial) e que sejam utilizadas técnicas de previsão para oferecer a operadores e *stakeholders* alternativas ou *insights* científicos bem-estruturados para complementar a atividade de gestão.

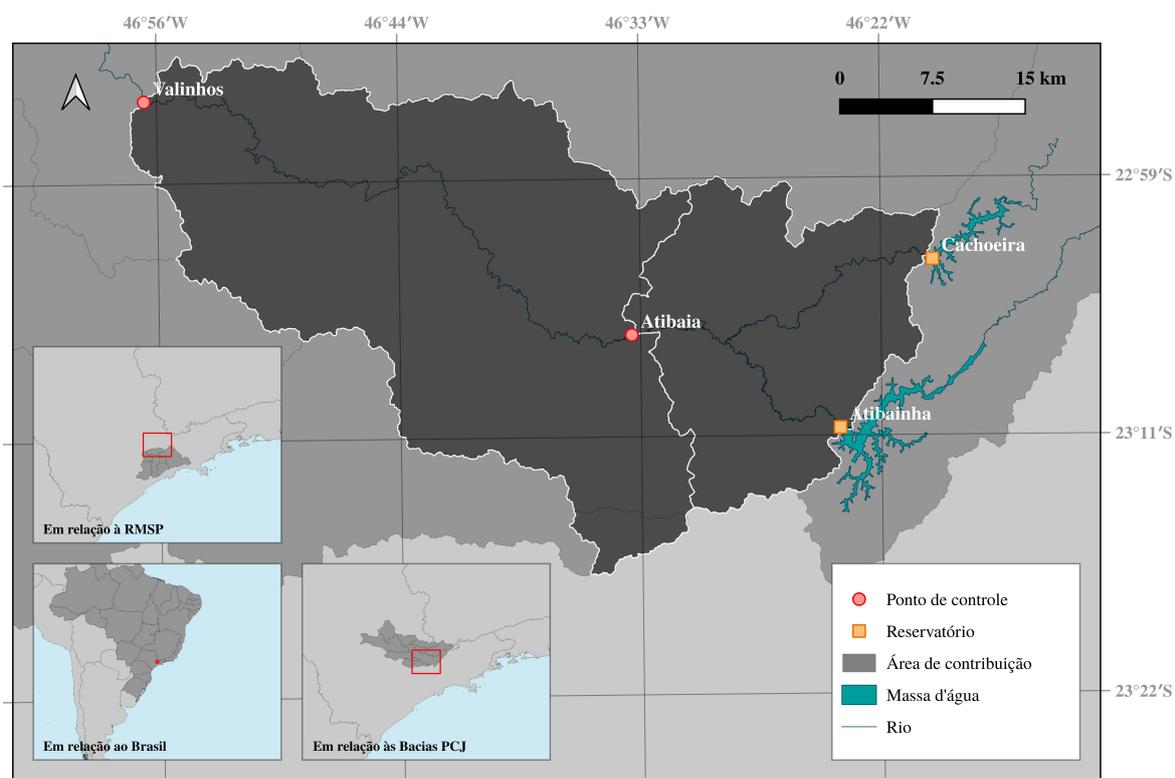
Feita esta síntese, pode-se partir com maiores subsídios para o problema prático abordado. A seção a seguir visa descrever o estudo de caso e o modelo construído para propor despachos que atendam as outorgas emitidas em 2017 de garantia de vazões às Bacias PCJ.

3 Dados e métodos

3.1 As Bacias PCJ

Localizadas majoritariamente em São Paulo e com extensões menores sobre o estado de Minas Gerais, as Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá, ou Bacias PCJ, totalizam uma área de 15,377.81 km² entre os meridianos 46 e 49° O e latitudes 22 e 23.5° S (AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ, 2022). Seu nome é devido à hidrografia local, composta por sete sub-bacias: Capivari, Jundiá e mais outras cinco associadas ao Rio Piracicaba (Piracicaba porção baixa, Corumbataí, Jaguari, Camanducaia e Atibaia). Como o estudo de caso envolve utilizar a regra proposta para a outorga do Sistema Cantareira, Resoluções Conjuntas ANA/DAEE N° 925 e 926, de 29 de maio de 2017 (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2017a) (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2017b), nesta última sub-bacia, de Atibaia, pretende-se analisar a fundo duas seções de controle de referência para as outorgas regionais: uma localizada em Atibaia e outra em Valinhos, ambos municípios paulistanos.

Figura 5: Sub-bacia do Atibaia e seus pontos de controle. (À esquerda), em relação ao território brasileiro, à região metropolitana e às Bacias PCJ; (ao centro), pontos de controle sobre o Rio Atibaia e suas áreas de contribuição



Fonte: autor

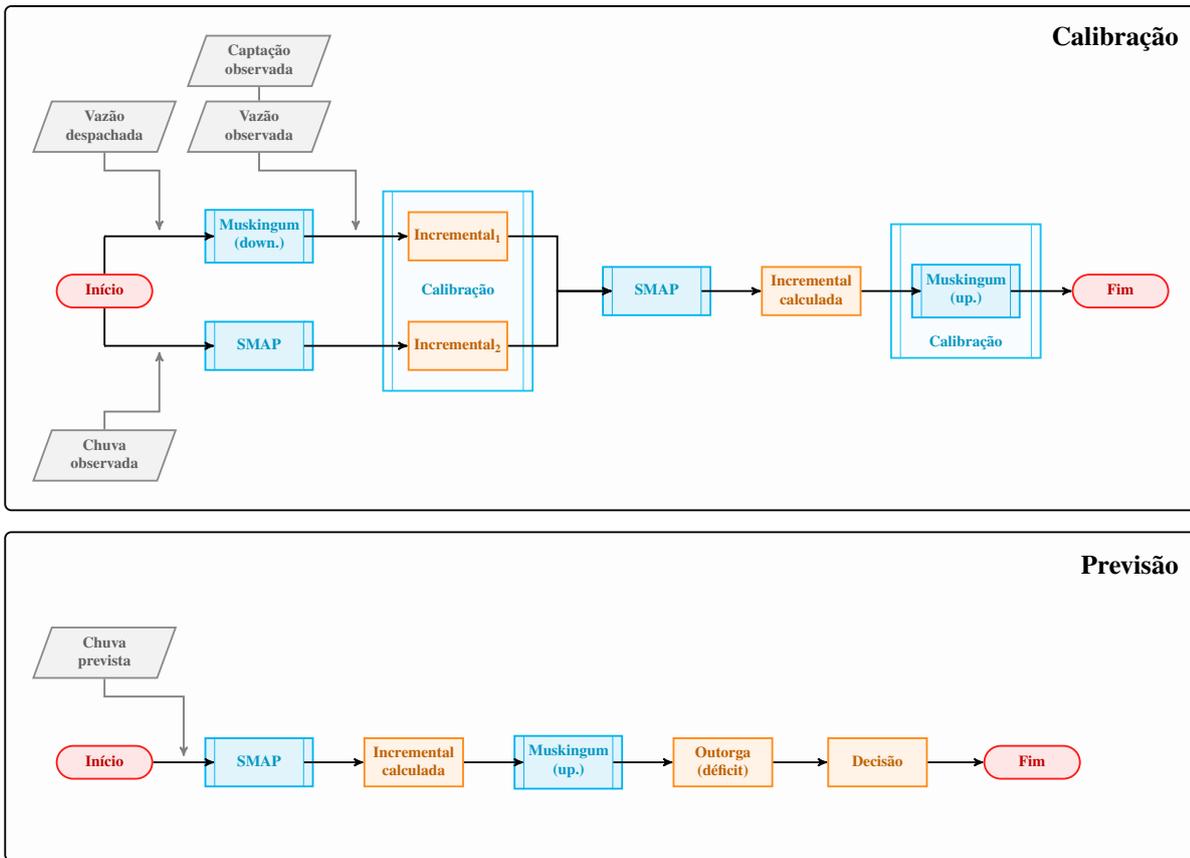
A [Agência das Bacias PCJ \(2022\)](#) descreve que a região conta com um solo ocupado por campos (25%) e matas nativas (20%), lavouras (19%) e áreas urbanizadas (12%), além de parcelas menores de cultivos (24%). O clima local é considerado subtropical úmido, conforme a classificação de Köppen e o mapa brasileiro de [Alvares et al. \(2013\)](#). As médias anuais de precipitação estão entre 1,195 mm e 1,609 mm. Em sua extensão, 80.3 km² de área é inundada por reservatórios que compõem o Sistema Cantareira, que atende as imediações e a metrópole de São Paulo. Como dependem de água cerca de 5.8 milhões de habitantes, as Bacias PCJ contabilizam demandas de até 35.68 m³/s, vazão que representa apenas 79% de sua disponibilidade hídrica superficial ([AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ, 2022](#)).

A discrepância entre oferta e demanda de água evidencia a importância de um bom gerenciamento e fundamenta a relevância de uma análise detalhada, com cenarização e modelagens, para suportar a tomada de decisões e a segurança hídrica nas Bacias PCJ. Neste estudo foram selecionados dois pontos de controle sobre o Rio Atibaia: 3E-063T em Atibaia e 3D-007T em Valinhos (vide [figura 5](#)). Cada qual possui áreas de contribuição próprias, de 477 e 1,074 km², e são monitorados para que sejam cumpridas as regras de outorga emitidas pelos órgãos locais administrativos. Em retrospecto, as portarias de concessão de água afirmam que as barragens de Atibainha e Cachoeira que atendem a região de estudo devem liberar para jusante mínimas instantâneas de 0.25 m³/s. Em Atibaia, a vazão média diária mínima deve valer 2 m³/s; em Valinhos, 10 m³/s. As médias móveis de quinze dias consecutivos variam de 2 a 3 m³/s em Atibaia e de 11 a 12 m³/s em Valinhos, conforme variar o volume útil total armazenado junto ao Sistema Cantareira. O modelo a ser detalhado foi codificado para operar sob a condição mais crítica imposta ao sistema. Deste modo, sob a condição de uma faixa especial de operação, objetivou-se impor o atendimento de mínimas médias diárias, que substituem as mínimas médias móveis em cenários de exceção.

3.2 Métodos utilizados

Para melhor compreender como foi estruturado o modelo final, junção de um módulo hidrológico de conversão chuva-vazão e outro de escoamento fluvial, os fluxogramas abaixo (vide [figura 6](#)) relacionam cada processo implementado e suas ordens de execução. Os passos marcados em azul representam procedimentos essenciais à modelagem, a serem examinados em seções futuras. Aqueles em laranja correspondem a produtos de processos prévios, enquanto os em cinza equivalem a dados conhecidos.

Figura 6: Fluxogramas de modelagem divididos em etapas de calibração e previsão

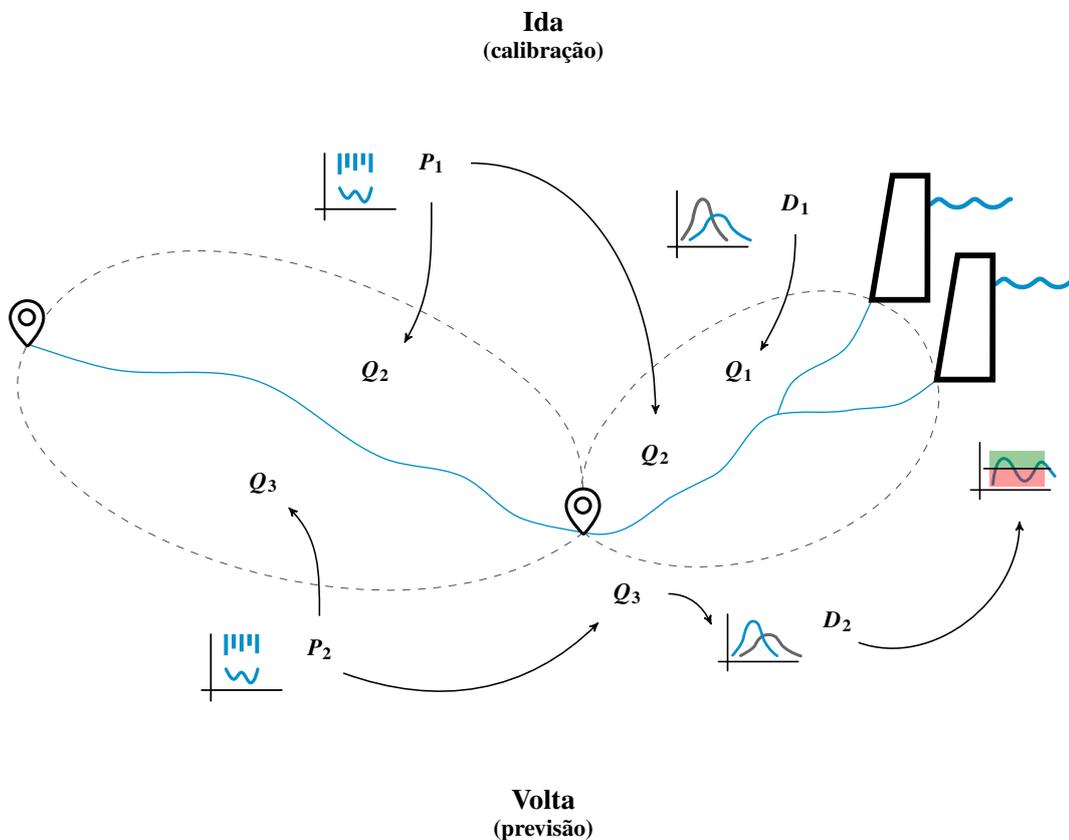


Fonte: autor

A fim de identificar as descargas necessárias para atender as mínimas vazões estipuladas em cada ponto de controle, o modelo inicialmente registra os despachos pretéritos de cada barragem (a partir de uma série histórica pré-definida) e translada tais hidrogramas até a primeira seção de controle encontrada, conforme o método de Muskingum não-linear de escoamento em rios (*downstream*). A partir de vazões e captações observadas, uma separação de parcelas é feita para que os parâmetros de Muskingum sejam calibrados conjuntamente com o módulo hidrológico chuva-vazão SMAP, que utiliza chuvas observadas para ajuste de suas variáveis. A técnica empregada para minimizar as diferenças entre as incrementais de cada processo corresponde a um algoritmo de evolução diferencial. O mesmo procedimento então repete-se entre a primeira e segunda seções; agora, vazões observadas salvas para o primeiro ponto são transladadas até o segundo, onde será feita uma nova separação e calibração de variáveis mediante incrementos de vazão calculados via Muskingum e SMAP. Com o modelo chuva-vazão devidamente ajustado, é necessário adequar os parâmetros de retrocesso de hidrogramas para aplicação junto ao esquema de *routing* reverso de Muskingum (*upstream*). Posteriormente, emprega-se séries de previsões meteorológicas de 7 dias para alimentar o módulo chuva-vazão, retroceder até os reservatórios

de origem e comparar os hidrogramas obtidos com as demandas estipuladas via outorga. O despacho necessário que garantirá segurança hídrica a jusante corresponde à maior diferença positiva entre previsto futuro e mínima diária. Para complementar os fluxogramas e traduzir visualmente os processos, segue uma ilustração explicativa:

Figura 7: Diagrama-resumo do modelo. (*Parte superior, de calibração*), despachos D_1 são convertidos por *routing* tradicional em vazões incrementais Q_1 (após separação de parcelas). Concomitantemente, precipitações observadas P_1 são transformadas em vazões incrementais Q_2 . Juntos, Q_1 e Q_2 são utilizados para calibrar os módulos chuva-vazão e vazão-vazão. (*Parte inferior, de previsão*), precipitações previstas P_2 são transformadas em vazões previstas Q_3 . As vazões estimadas são retrocedidas até os reservatórios por *routing* reverso. Quando comparadas com as mínimas outorgadas, as ordenadas que estão acima (faixa verde) indicarão despachos D_2 mínimos, enquanto as ordenadas que estão abaixo (faixa vermelha) indicarão despachos D_2 iguais aos déficits calculados



Fonte: autor

Bozzini (2019) conduziu um estudo semelhante para as Bacias PCJ, também sob a ótica de formulação de técnicas para atendimento de outorgas. Enquanto sua pesquisa seguiu o viés de sistemas de suporte a decisão e algoritmos de alocação de água, esta dissertação explora o cálculo de despachos ótimos e seu efeito hidrológico para suprir as demandas hídricas.

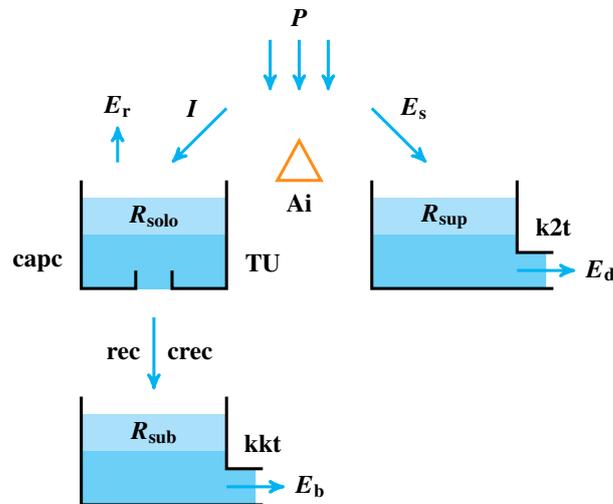
Todos os códigos escritos utilizaram Python como linguagem de programação, assim como uma lógica orientada a objetos e estruturada em *scripts*. O autor documentou todos os arquivos em um repositório versionado com a plataforma GitHub[®]. É prática comum que produções ci-

entíficas atuais preguem transparência e divulguem códigos-fonte e dados utilizados para replicação quando desejada. Seguindo estas recomendações de *open science*, os *links* para examinar os materiais desta dissertação estão referenciados em anexo. A seguir serão detalhados os métodos considerados e as fontes de dados utilizadas para o estudo.

3.2.1 Modelo SMAP

Como visto anteriormente, modelos chuva-vazão compreendem uma composição de algoritmos que descrevem processos inerentes ao ciclo hidrológico, como a distribuição espacial de precipitações, perdas por interceptação ou evaporação, o fluxo por infiltração e o escoamento superficial. Nesta linha de pesquisa, SMAP é um modelo proposto por [Lopes, Braga e Conejo \(1982\)](#) com níveis de discretização mensal, diária ou horária. Em sua versão diária, o modelo interpreta armazenamentos e escoamentos por meio de três reservatórios lineares (vide [figura 8](#)):

Figura 8: Relações entre os reservatórios lineares superficial, subsuperficial (zona aerada, ou solo) e subterrâneo (zona saturada)



Fonte: adaptado de [Cavalcante, Barcellos e Cataldi \(2021\)](#)

Em um passo diário valem as relações:

$$R_{solo (i+1)} = R_{solo (i)} + P - E_s - E_r - r_{ec} \quad (3.1)$$

$$R_{sub (i+1)} = R_{sub (i)} + r_{ec} - E_b \quad (3.2)$$

$$R_{sup (i+1)} = R_{sup (i)} + E_s - E_d \quad (3.3)$$

onde (unidades todas dadas em milímetros):

- R_{solo} : reservatório associado ao solo em sua zona aerada

- R_{sub} : reservatório associado ao solo em sua zona saturada
- R_{sup} : reservatório superficial
- E_s : escoamento superficial
- E_d : escoamento direto
- E_b : escoamento básico
- E_r : evapotranspiração real
- P : precipitação
- r_{ec} : recarga subterrânea

Para aplicar o modelo, utiliza-se séries de chuvas e vazões diárias observadas, além de evapotranspirações diárias potenciais E_p , todas necessárias para calibrar seis parâmetros: capacidade de saturação SAT (mm), constante $k2t$ de recessão de E_s (dias), capacidade de recarga c_{rec} (%), abstração inicial A_i (mm), capacidade de campo c_{apc} (%) e constante kkt de recessão de E_b (dias). Por meio de valores para o teor de umidade inicial TU_{in} , assim como para o escoamento básico inicial $E_{b \text{ in.}}$, conhecendo a área de drenagem A_d de interesse, inicialmente faz-se

$$R_{\text{solo in.}} = TU_{\text{in.}} \times \text{SAT} \quad (3.4)$$

$$R_{\text{sub in.}} = [E_{b \text{ in.}} / (A_d \times 86.4)] / (1 - 0.5^{1/kkt}) \quad (3.5)$$

$$R_{\text{sup in.}} = 0 \quad (3.6)$$

Em seguida, para cada dia de chuva realiza-se o seguinte:

1. Se $P > A_i$, então $E_s = (P - A_i^2) / [P - A_i + (\text{SAT} - R_{\text{solo}})]$. Caso contrário, $E_s = 0$.
2. Se $(P - E_s) > E_p$, então $E_r = E_p$. Caso contrário, $E_r = (P - E_s) + [E_p - (P - E_s)] \times TU$.
3. Se $R_{\text{solo}} > c_{\text{apc}} \times \text{SAT}$, então $r_{\text{ec}} = c_{\text{rec}} \times TU \times [R_{\text{solo}} - (c_{\text{apc}} \times \text{SAT})]$. Caso contrário, $r_{\text{ec}} = 0$.
4. $E_d = R_{\text{sup}} \times (1 - 0.5^{1/k2t})$
5. $E_b = R_{\text{sub}} \times (1 - 0.5^{1/kkt})$

Depois de aferir os reservatórios com as três relações iniciais, calcula-se

$$Q = [(E_d + E_b) \times A_d] / 86.4 \quad (3.7)$$

3.2.2 Modelo de Muskingum não-linear

A revisão bibliográfica mostrou que um exemplo de modelo de translação e abatimento de cheias

em canais hidráulicos é o método de Muskingum, desenvolvido por [McCarthy \(1938\)](#). Para elaborá-lo melhor, seguem algumas considerações.

A equação hidrológica de continuidade é expressa por

$$I - O = \frac{dS}{dt} \quad (3.8)$$

em que I equivale a um hidrograma de entrada, O a um de saída e S ao armazenamento junto ao canal. Sua forma em diferenças finitas, por sua vez, corresponde a

$$S_{t+1} - S_t = (\Delta t/2) [(I_{t+1} + I_t) - (O_{t+1} + O_t)] \quad (3.9)$$

[Vatankhah \(2014\)](#) ressalta que a relação numérica entre um dado escoamento ponderado e o armazenamento fluvial junto ao canal hidráulico é não-linear. De fato, em problemas práticos trabalha-se com hidrogramas de n picos de vazão, notadamente diferentes daqueles estudados em textos didáticos que recomendam o método de Muskingum simplificado, ou linear. Deste modo, o modelo de armazenamento de Muskingum mais apropriado para a pesquisa, apresentado por [Chow \(1959\)](#), embora menos tradicional, equivale à relação

$$S = K [XI + (1 - X) O]^m \quad (3.10)$$

Nela K representa o tempo médio de deslocamento de uma onda de cheia entre seções de montante e jusante, enquanto X equivale a um fator de peso, ou amortecimento, e m é um expoente real não nulo.

A fim de obter um hidrograma de saída a partir de um de entrada e, calibradas e devidamente conhecidas as três variáveis K , X e m que compõem o modelo, é necessário utilizar uma abordagem numérica que aproxime a equação diferencial de continuidade de primeira ordem. Uma possibilidade neste caso é utilizar o método de Runge-Kutta de quarta ordem, ou FORK (*fourth-order Runge-Kutta method*) ([VATANKHAH, 2014](#)). Nele primeiramente são assumidos valores para K , X e m e, em seguida, um armazenamento S_0 é calculado a partir de uma condição inicial imposta ($O_0 = I_0$, por exemplo). Então, para obter o armazenamento seguinte S_{t+1} , toma-se a derivada dS/dt por uma inclinação estimada com quatro parâmetros:

$$k_1 = - \left(\frac{1}{1 - X} \right) \left[\left(\frac{S_t}{K} \right)^{m-1} - I_t \right] \quad (3.11)$$

$$k_2 = - \left(\frac{1}{1 - X} \right) \left[\left(\frac{S_t + 0.5\Delta t k_1}{K} \right)^{m-1} - \left(\frac{I_t + I_{t+1}}{2} \right) \right] \quad (3.12)$$

$$k_3 = - \left(\frac{1}{1-X} \right) \left[\left(\frac{S_t + 0.5\Delta t k_2}{K} \right)^{m-1} - \left(\frac{I_t + I_{t+1}}{2} \right) \right] \quad (3.13)$$

$$k_4 = - \left(\frac{1}{1-X} \right) \left[\left(\frac{S_t + 1.0\Delta t k_3}{K} \right)^{m-1} - I_{t+1} \right] \quad (3.14)$$

Calculados os quatro coeficientes, têm-se que

$$S_{t+1} = S_t + \Delta t \left(\frac{k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4}{6} \right) \quad (3.15)$$

Para concluir o passo de tempo e obter a ordenada de jusante procurada, faz-se

$$O_{t+1} = \frac{(S_{t+1}/K)^{m-1} - XI_{t+1}}{1-X} \quad (3.16)$$

Mediante um hidrograma de entrada de n ordenadas, o método é aplicado de $t = 1$ a $n - 1$.

3.2.3 *Upstream routing*

Uma forma direta de calcular os despachos necessários para suprir as demandas hídricas a jusante de uma barragem após conhecer a contribuição incremental de chuvas futuras é identificar se a vazão prevista com a precipitação supre o mínimo atendimento estipulado em uma seção de controle e caso contrário, descarregar somente o volume de água excedente para o abastecimento. O hidrograma obtido com as previsões meteorológicas é calculável e então conhecido, assim como as mínimas médias diárias por ponto de interesse. Deste modo, o problema delineado envolve dimensionar qual hidrograma de montante, de despacho junto aos reservatórios, irá culminar naquele de jusante após deixar as barragens e atravessar o curso d'água (para suprir déficits hídricos, quando existirem). Em outras palavras, com um hidrograma de *output* em mãos, deseja-se obter o *input* que o gerou através de um *routing* inverso. Embora menos comum que o *routing* convencional de montante para jusante, muitos autores, como [Das \(2009\)](#), [Badfar et al. \(2021\)](#) e [Haddad et al. \(2018\)](#), analisaram tal situação em estudos passados. Entretanto, entre eles [Koussis et al. \(2012\)](#) alerta que a simples inversão de cálculo entre I e O não configura um problema bem definido de acordo com o método de Muskingum e, conseqüentemente, erros computacionais de arredondamento ou de dados de entrada são esperados e rapidamente amplificados e propagados entre iterações numéricas. Para o caso não-linear de primeira ordem, [Badfar et al. \(2021\)](#) segue conforme [Vatankhah \(2014\)](#) e propõe como técnica para inversão de *routing* o algoritmo FORK de Runge-Kutta. De acordo com o autor, após tomar valores para K' , X' e m' , parte-se para o cálculo de um armazenamento S_{n-1} a partir de uma certa condição ini-

cial, como $I_{n-1} = O_{n-1}$. Posteriormente, quatro parâmetros são necessários para estimar a taxa dS/dt :

$$k'_1 = \left(\frac{1}{X'}\right) \left[\left(\frac{S_t}{K'}\right)^{m'-1} - O_t \right] \quad (3.17)$$

$$k'_2 = \left(\frac{1}{X'}\right) \left[\left(\frac{S_t + 0.5\Delta t k'_1}{K'}\right)^{m'-1} - \left(\frac{O_t + O_{t-1}}{2}\right) \right] \quad (3.18)$$

$$k'_3 = \left(\frac{1}{X'}\right) \left[\left(\frac{S_t + 0.5\Delta t k'_2}{K'}\right)^{m'-1} - \left(\frac{O_t + O_{t-1}}{2}\right) \right] \quad (3.19)$$

$$k'_4 = \left(\frac{1}{X'}\right) \left[\left(\frac{S_t + 1.0\Delta t k'_3}{K'}\right)^{m'-1} - O_{t-1} \right] \quad (3.20)$$

Com eles, o armazenamento anterior é aferido com

$$S_{t-1} = S_t - \Delta t \left(\frac{k'_1 + 2k'_2 + 2k'_3 + k'_4}{6} \right) \quad (3.21)$$

Para concluir o passo de tempo e obter a ordenada de montante procurada, faz-se

$$I_{t-1} = \frac{(S_t/K')^{m'-1} - (1 - X')O_t}{X'} \quad (3.22)$$

Mediante um hidrograma de saída de n ordenadas, o método é aplicado de $t = n - 1$ a 1.

3.2.4 Calibração de variáveis hidrológicas

A previsão de vazões futuras oriundas de eventos chuvosos é imprescindível a um operador de barragens, que orienta os reservatórios conforme as estimativas meteorológicas de curto prazo. Para obter valores confiáveis de vazão em um modelo hidrológico, é necessário calibrar as variáveis físicas utilizadas para valores condizentes com a dinâmica regional de estudo. [Lopes, Braga e Conejo \(1982\)](#) afirmam que o modelo SMAP inclui seis parâmetros livres; entretanto, destes seis o autor sugere a fixação de três como invariáveis e a calibração automática de outros três. A abstração inicial A_i e a capacidade de campo c_{apc} podem ser diretamente mensuradas com conhecimentos básicos de uso e ocupação (cobertura vegetal) e tipo de solo; a constante de recessão kkt é pouco sensível às funções-objetivo de calibração, o que permite a escolha de um ajuste manual fixo.

Para aferir os parâmetros capacidade de saturação, constante de recessão para o escoamento superficial e capacidade de recarga, existem limites inferior e superior conhecidos: $100 < SAT < 2,000$ mm, $0.2 < k2t < 10$ dias e $0 < c_{rec} < 20\%$. Por meio destas condições de contorno, o desafio envolve determinar valores tais que as vazões finais calculadas com o modelo estejam

suficientemente condizentes com valores determinados via *routing* hidrológico, de modo a minimizar as diferenças entre ambas as séries de incrementais. Somado ao conjunto de parâmetros SMAP deve-se também considerar e calibrar **i.** os responsáveis por iniciar a simulação (o teor de umidade $TU_{in.}$ e o escoamento básico $E_{b.in.}$) e **ii.** as variáveis de Muskingum K , X e m e suas variantes para o tipo *upstream*. Assim, ao SMAP foram incluídos dois intervalos adicionais: $0 \leq TU_{in.} \leq 1$ e $E_{b.in.} > 0 \text{ m}^3/\text{s}$. Para as variáveis de Muskingum, seja para o modelo não-linear tradicional ou para o inverso, tomou-se o seguinte: $2.5 < K, K' < 7.5$ dias, $0.2 < X, X' < 0.5$ e $1.1 < m, m' < 1.3$.

A função-objetivo considerada neste estudo é o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NASH; SUTCLIFFE, 1970), dado por

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Q_{obs.(i)} - Q_{calc.(i)}]^2}{\sum_{i=1}^n [Q_{obs.(i)} - \overline{Q_{obs.(i)}}]^2} \quad (3.23)$$

Durante o preparo para simulação, foram também ponderadas outras três funções: a soma quadrática de diferenças, o erro padrão médio e o coeficiente de eficiência de Kling-Gupta (GUPTA *et al.*, 2009), respectivamente dados por

$$SSQ = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_{obs.(i)} - Q_{calc.(i)}}{Q_{obs.(i)}} \right)^2 \quad (3.24)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{calc.(i)} - Q_{obs.(i)})^2}{n} \right]^{1/2} \quad (3.25)$$

$$KGE = 1 - \left[(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{calc.}}{\sigma_{obs.}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\mu_{calc.}}{\mu_{obs.}} - 1 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.26)$$

em que r é o coeficiente de correlação de Pearson, σ o desvio padrão e μ a média. A partir destas métricas e também de estudos de análise de diferentes objetivos para calibração de modelos (BORTOLIN *et al.*, 2017), viu-se que o coeficiente NSE foi aquele que melhor conformou-se ao modelo acoplado em termos de estabilidade. Testes com as outras opções conduziram muitas vezes a divergências, uma vez que os cálculos de *routing* principalmente são bastante sensíveis a erros numéricos por exponenciação complexa.

O procedimento estipulado para simular o problema narrado e garantir o cálculo de despachos futuros envolve selecionar uma série histórica de chuvas, vazões, despachos e captações e calibrar as variáveis SMAP e Muskingum para cada bacia incremental e trecho de curso d'água (totalizando 3 termos hidrológicos para Atibaia e sua bacia, mais 3 para Valinhos, além de 6² termos de *routing* para cada trecho de rio — de Atibainha a Atibaia, de Cachoeira a Atibaia e de

Atibaia a Valinhos). Este processo corresponde ao fluxograma “Calibração” mostrado junto à [figura 6](#). Em seguida, para cada dia de decisão de despacho, a ser calculado via previsão meteorológica, parte-se para uma determinação única de apenas dois dados iniciais: os termos TU_{in} e E_{bin} , enquanto todas as demais variáveis serão fixadas com os valores calibrados previamente.

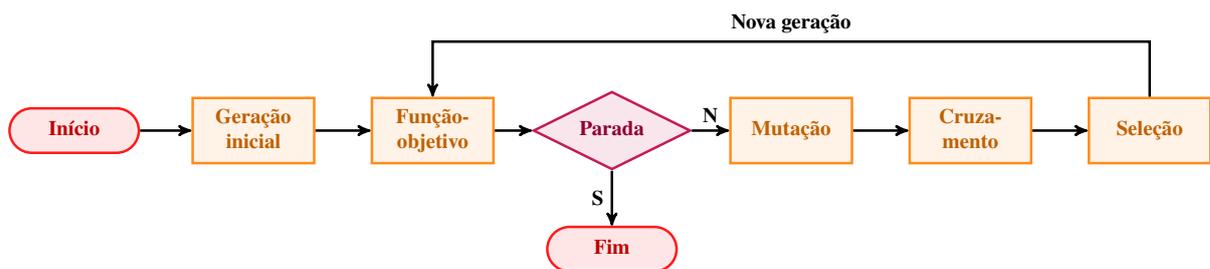
Quanto ao método de calibração, [Lopes, Braga e Conejo \(1982\)](#) sugerem em seu texto o algoritmo de Rosenbrock-Hill de busca direta. A tendência moderna de abordagem de problemas de otimização, porém, segue a linhagem de algoritmos evolucionários, como é possível observar em diversas pesquisas recentes ([LEON; BIAN; TANG, 2021](#)) ([TEHRANI; HADDAD; LOÁ-CIGA, 2020](#)) ([LEWIS; RANDALL, 2017](#)). Além desta opção, verificou-se também a viabilidade de utilizar outras ferramentas, como o Solver[©] distribuído junto ao *software* Microsoft Excel[©] ou opções ainda mais atuais, como redes neurais. Em relação ao uso de planilhas, de imediato concluiu-se que elas não coadunam com a abordagem de programação, principalmente pelo Solver demonstrar lentidão para calibrar longas séries de dados. A utilização de redes neurais, por sua vez, é comum e vista em outros trabalhos ([MACIEL *et al.*, 2020](#)), porém sua aplicação exige um conhecimento extenso de *machine learning*, o que a torna impraticável. Por este motivo, seguiu-se com um algoritmo genético, endossado em pesquisas semelhantes.

De acordo com [Karterakis *et al.* \(2007\)](#), algoritmos evolucionários (AE) pertencem a uma classe de métodos de otimização com um notável balanço entre aproveitamento de melhores soluções e exploração de espaços de busca. Eles combinam buscas diretas e estocásticas e, de forma robusta, proporcionam a determinação de ótimos globais sem ficarem presos em ótimos locais. [Vikhar \(2016\)](#) afirma que um AE é inspirado em mecânicas de evolução biológica, como reprodução, mutação, recombinação e seleção. Soluções candidatas ao problema de otimização são criadas aleatoriamente e assemelham-se a indivíduos em uma população. A partir dela são geradas populações descendentes, por meio de evoluções, para atendimento de uma certa função-objetivo. Neste grupo de técnicas metaheurísticas [Karterakis *et al.* \(2007\)](#) destacam que o chamado algoritmo de evolução diferencial (ED) é um AE bastante promissor em termos de eficiência, efetividade e robustez. Proposto por [Storn e Price \(1997\)](#), ED inicia-se com uma população aleatória de indivíduos, ou vetores reais, também chamados cromossomos. A população inicial é construída com base em uma distribuição uniforme que cobre o espaço de busca de acordo com as condições de contorno impostas às variáveis decisórias. Em seguida, para cri-

²⁶ termos totais, pois 3 deles (K , X e m) são necessários ao Muskingum não-linear de montante para jusante (também dito tradicional ou de *downstream*) e outros 3 (K' , X' e m') são necessários ao Muskingum não-linear de jusante para montante (reverso ou também de *upstream*).

ar uma geração seguinte, procede-se a uma operação de mutação, em que três vetores alvos são escolhidos aleatoriamente e combinados para formar um novo vetor mutante, também dito doador. Para aprimorar o potencial de diversidade de uma nova geração, após a mutação parte-se para uma operação de cruzamento, em que vetores doadores são recombinados com vetores alvos para formar vetores de teste. A escolha para recombinação segue diferentes possíveis distribuições probabilísticas, como binomial ou exponencial. Após o cruzamento, a etapa seguinte, de seleção, determina quais vetores de teste sobreviverão para constituir a próxima geração, de acordo com sua resposta à função-objetivo que se deseja minimizar. O procedimento então repete-se com a avaliação de sucessivas gerações até que seja atingido o objetivo estipulado (SCHARDONG, 2011) (DAS; SUGANTHAN, 2011). O fluxograma a seguir, adaptado de Schardong (2011), ilustra o algoritmo (vide figura 9).

Figura 9: Algoritmo de evolução diferencial



Fonte: autor

Para compreender melhor os parâmetros ajustados junto à biblioteca em Python utilizada para implementar o algoritmo genético ED, elaborou-se uma breve descrição anexada ao final deste texto.

3.2.5 Dados utilizados para simulação

3.2.5.1 Fontes e parâmetros adotados

Os dados coletados para simulação de despachos às Bacias PCJ consistem, essencialmente, em dois tipos: os observados e os previstos (vide tabela 3). Captações observadas entre os reservatórios e os pontos de controle foram obtidas junto ao DAEE. As informações englobam quatro pontos de retirada de água ao longo de todo o ano de 2021. É importante destacar que, já que esta dissertação objetiva calibrar e simular despachos ao longo de dois anos, utilizou-se para calibração um total de 720 dias, de 01/01/2020 a 20/12/2021, e para previsão 677 dias, de 31/01/20 a 07/12/21. Dado que o Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo apenas listou

Tabela 3: Dados utilizados e suas fontes

Tipo	Dado	Fonte
Observado	Captação	DAEE
	Despacho Precipitação Vazão	SSD Sabesp
	Previsto	Precipitação
		WRF 5 km

Fonte: autor

as captações de 2021, elas foram replicadas igualmente em 2020, para preencher a escassez de informações. Em relação aos despachos em Atibaia e Cachoeira e às precipitações e vazões em Atibaia e Valinhos, tomou-se como amostra os dados diários de janeiro de 2021 a dezembro de 2022 armazenados em um sistema de suporte à decisão (SSD) da Sabesp. As vazões advêm de medições fluviométricas locais, pois as seções de controle são também estações administradas pelo DAEE. As precipitações observadas, por outro lado, são estimadas com um radar meteorológico e disponibilizadas pelo Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo (SAISP). Os valores coletados são aferidos para cada bacia incremental. Por último, as precipitações previstas foram tomadas de um modelo climático específico, o WRF com discretização horizontal de 5 km disponibilizado pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/CPTEC). Para cada dia deste período de estudo o modelo afere a previsão meteorológica de 7 dias a frente.

Embora o modelo calibre um conjunto de variáveis antes de executar a cenarização de previsão, ao longo de sua simulação certos parâmetros para utilização com o módulo SMAP são mantidos fixos. A [tabela 4](#) resume tais valores para cada sub-bacia. Para maiores informações sobre os dados adotados, vide o anexo ao final deste texto.

Tabela 4: Parâmetros SMAP adotados

Sub-bacia	A_d [km ²]	A_i [mm]	capc	$kk t$ [dias]	E_p [mm]
Atibaia	477	2.5	0.5	60	vide
Valinhos	1,074				anexo

Fonte: autor

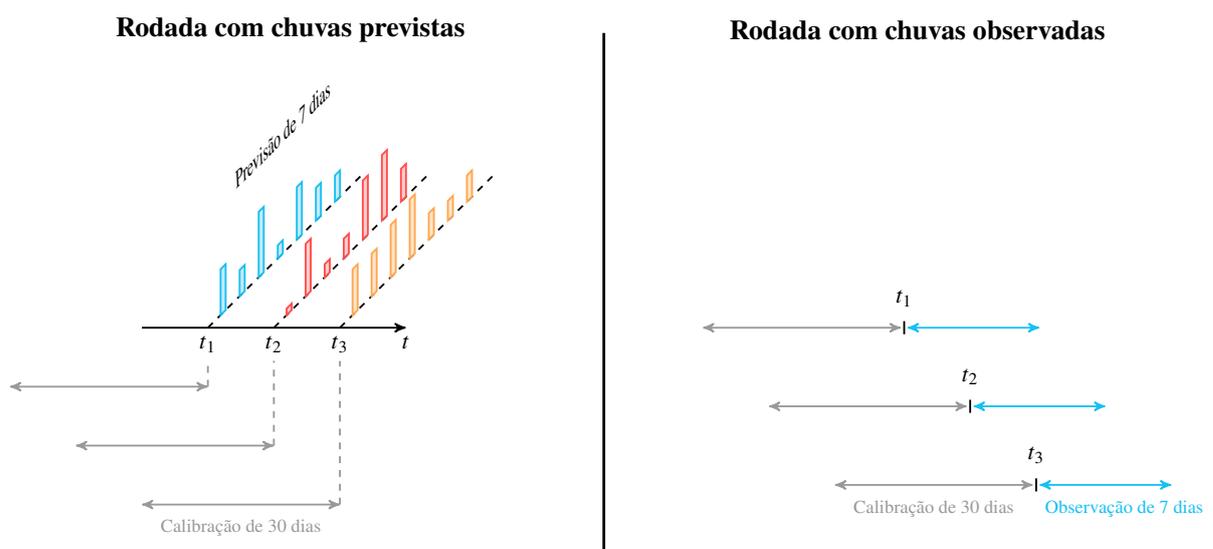
3.2.5.2 Previsões meteorológicas e sua estrutura

Como dito em seções prévias, o modelo acoplado foi estruturado para receber a cada passo um conjunto de sete previsões meteorológicas, a serem utilizadas para conversão em vazões futuras

que serão verificadas em relação ao atendimento às outorgas locais de recursos hídricos. As rotinas de decisão de despacho seguem o seguinte padrão: a cada iteração alimenta-se os módulos com 30 dias de dados observados, uma vez que mesmo após a calibração de 720 dias que definirá as variáveis SMAP e de *routing* de Muskingum (tanto *downstream* quanto *upstream*), ainda é necessário iniciar o algoritmo chuva-vazão com um teor de umidade TU_{in} e um escoamento básico $E_{b\ in}$. Ou seja, faz-se uma calibração rápida com 1 mês observado. Feito isto, ao final de cada série de 30 dias adiciona-se um vetor de 7 dias de chuvas futuras, definidas conforme o modelo climático WRF 5 km. Com o conjunto de 30+7 dias e os parâmetros iniciais determinados, simula-se a previsão e o retrocesso de hidrogramas até as barragens de origem. A [figura 10](#), à esquerda, ilustra o procedimento narrado. Vale destacar que a cada passo os vetores de previsão de 7 dias são renovados, uma vez que os dados de cada iteração são distintos e não repetidos.

A fim de complementar o estudo proposto neste projeto, objetivou-se simular um cenário em que os *inputs* de previsão são ótimos e representam as melhores estimativas meteorológicas possíveis. Assim, construiu-se uma situação em que os vetores futuros de 7 dias, na verdade, são populados com chuvas observadas em cada sub-bacia. Nesta nova abordagem, o conjunto 30+7 é inteiramente observado e simplesmente transladado em um dia a cada iteração (e portanto, os conjuntos de “previsões” incluem dados repetidos entre passos). Para mais informações, vide a [figura 10](#), à direita.

Figura 10: Estruturas de chuvas conforme cenário. (À esquerda), estruturas de séries pluviométricas utilizadas para cenário com chuvas previstas; (à direita), esquema para cenário com chuvas observadas



Fonte: autor

3.2.6 Equacionamentos complementares aos fluxogramas

Com o objetivo de elucidar os fluxogramas apresentados inicialmente (vide [figura 6](#)), convém detalhar certas nomenclaturas e relações que embasam o modelo acoplado desenvolvido para resolver o problema de despacho deste projeto. Ao tomar uma seção ou ponto de controle qualquer, seja Atibaia ou Valinhos, necessariamente valerá a seguinte equação de vazões:

$$\text{observado} = \begin{array}{c} \text{incremental} \\ \text{da chuva} \end{array} + \text{despachado} - \begin{array}{c} \text{extraído das} \\ \text{captações} \end{array} \quad (3.27)$$

Matematicamente, é possível expandir o balanço acima para cada ponto:

$$\begin{cases} Q_{\text{obs}}^{(A)} = \text{SMAP} \left(P_{\text{obs inc}}^{(A)} \right) + \left[\text{Musk} (D_{\text{Cach.}}) + \text{Musk} (D_{\text{Atib.}}) \right] - \text{capt.}^{(A)} & \text{(Atibaia)} \\ Q_{\text{obs}}^{(V)} = \text{SMAP} \left(P_{\text{obs inc}}^{(V)} \right) + \text{Musk} \left(Q_{\text{obs}}^{(A)} \right) - \text{capt.}^{(V)} & \text{(Valinhos)} \end{cases}$$

Em sua estrutura, SMAP é uma função $f(\text{SAT}, k2t, c_{\text{rec}}, \text{TU}_{\text{in}}, E_{\text{b in}})$ de 5 parâmetros calibráveis, enquanto Musk é uma função $g(K, X, m)$ de 3. Para calibrar as 8 variáveis totais com as séries de dados observados, utiliza-se como comparativo uma dupla de vazões incrementais, cada qual obtida por um módulo:

$$Q_{\text{inc1}} = \text{SMAP} \left(P_{\text{obs inc}}^{(\cdot)} \right) \quad (3.30)$$

$$Q_{\text{inc2}} = \begin{cases} Q_{\text{obs}}^{(\cdot)} + \text{capt.}^{(\cdot)} - \left[\text{Musk} (D_{\text{Cach.}}) + \text{Musk} (D_{\text{Atib.}}) \right], & \text{se Atibaia} \\ Q_{\text{obs}}^{(\cdot)} + \text{capt.}^{(\cdot)} - \text{Musk} \left(Q_{\text{obs}}^{(A)} \right), & \text{se Valinhos} \end{cases} \quad (3.31)$$

A rotina de calibração utiliza como objetivo a função

$$\text{f.o} = \min - \frac{\sum \left(Q_{\text{inc2}} - Q_{\text{inc1}} \right)^2}{\sum \left(Q_{\text{inc2}} - \overline{Q_{\text{inc2}}} \right)^2} \quad (3.32)$$

Definidas as variáveis responsáveis por ditar o sentido de ida, ou de montante a jusante, é preciso atentar-se aos valores de K' , X' e m' necessários ao Muskingum inverso. Ao retroceder de Valinhos e Atibaia para os reservatórios de origem, Atibainha e Cachoeira, utiliza-se o seguinte conceito: seja r o *routing* de jusante para montante com início em uma dada seção; têm-se que

$$r = \text{Musk}^{-1} \left(\text{SMAP} \left(P_{\text{obs inc} + \text{prev}}^{(\cdot)} \right) \right) \quad (3.33)$$

Calculado r , a decisão d de despacho é desdobrada naturalmente:

$$\begin{cases} \text{se } r > \text{outorga}, & d = 0.25 \text{ m}^3/\text{s} \\ \text{se } r < \text{outorga}, & d = \text{outorga} - r \end{cases}$$

Para determinar corretamente o *routing* para cada trecho de rio, formalizamos um grupo de equações para calibrar as variáveis que “retornarão” os hidrogramas de jusante. Em Valinhos,

$$\text{Desp}^{(A \rightarrow V)} = \text{Musk} \left(Q_{\text{obs}}^{(A)} \right) \therefore \text{Desp}^{(V \rightarrow A)} = \text{Musk}^{-1} \left(\text{Desp}^{(A \rightarrow V)} \right) \quad (3.34)$$

Conseqüentemente, objetiva-se minimizar as diferenças entre o despacho de Valinhos a Atibaia e a vazão observada em Atibaia; em outras palavras: $\min(\text{Desp}^{(V \rightarrow A)}, Q_{\text{obs}}^{(A)})$. Em Atibaia, por sua vez, nota-se a confluência de dois trechos de rio. Desta forma, o retorno aos reservatórios sofrerá uma ponderação:

$$\begin{aligned} \text{Desp}^{(\text{Atib.}, \text{Cach.} \rightarrow A)} &= \text{Musk} (D_{\text{Atib.}}) + \text{Musk} (D_{\text{Cach.}}) \\ \therefore \begin{cases} \text{Desp}^{(A \rightarrow \text{Atib.})} &= \text{Musk}^{-1} \left(\alpha \text{Desp}^{(\text{Atib.}, \text{Cach.} \rightarrow A)} \right) \\ \text{Desp}^{(A \rightarrow \text{Cach.})} &= \text{Musk}^{-1} \left(\beta \text{Desp}^{(\text{Atib.}, \text{Cach.} \rightarrow A)} \right) \end{cases} \end{aligned} \quad (3.35)$$

A título de simplificação, propõe-se fixar os termos α e β de separação de despachos em 50% cada. Finalmente, verifica-se como funções-objetivo:

$$\min(\text{Desp}^{(A \rightarrow \text{Atib.})}, D_{\text{Atib.}}) \text{ e } \min(\text{Desp}^{(A \rightarrow \text{Cach.})}, D_{\text{Cach.}})$$

Com os métodos elencados nesta seção têm-se contexto suficiente para discutir os resultados desta modelagem. Assim, dispõe-se a seguir uma seção de discussão apropriada.

4 Resultados e discussões

Esta seção de resultados divide-se em três partes. A primeira visa destacar as informações obtidas durante a etapa modelada de calibração. A segunda, de previsões, discorrerá sobre os despachos aferidos com o modelo durante os dias simulados, assim como o atendimento de mínimas médias diárias em cada ponto de controle. Por último, acrescentou-se à discussão uma seção sobre o cálculo de vazões em obediência ao critério outorgado de médias móveis, suas dificuldades e perspectivas. Vale lembrar que, junto aos objetivos, foram propostos três cenários distintos que serão aqui comparados. O primeiro faz referência ao uso de previsões meteorológicas de sete dias para a tomada de decisão e equivale à situação mais realista possível em termos de operação. O segundo substitui as previsões de sete dias por chuvas de fato observadas durante o período estudado. Tal cenário representa uma situação idealista em que o operador de barragem possui em mãos as melhores previsões possíveis para sua decisão de despacho. Por último, selecionou-se como terceiro cenário o observado real durante os meses de janeiro de 2020 a dezembro de 2021, a fim de comparar os resultados calculados com os dados concretos e tecer comentários sobre a acurácia atingida com o modelo. Seguem as discussões.

4.1 Calibrações

O modelo foi calibrado com uma série de 720 dias de observação hidrológica, ou aproximadamente dois anos, de 01/01/20 a 20/12/21, em duas situações distintas: com vetores de sete dias de chuva estimadas meteorologicamente (previsões) e observadas. A [tabela 5](#) e a [tabela 6](#) mostram, respectivamente, os parâmetros obtidos para a conversão chuva-vazão e para os *routings* não-lineares tradicional e inverso:

Tabela 5: Parâmetros SMAP calibrados com série observada

Cenário	Sub-bacia	SAT [mm]	$k2t$ [dias]	crec [%]	TU _{in.}	$E_{b\ in.}$ [m ³ /s]
Chuvas previstas	Atibaia	1303.99	3.7	0.23	0.74	7.42
	Valinhos	1107.29	5.6	0.10	0.82	18.53
Chuvas observadas	Atibaia	1777.06	3.5	0.14	0.81	5.31
	Valinhos	1143.08	6	0.14	0.89	0.1

Fonte: autor

Uma forma mais apropriada e visual de entender os resultados de calibração é plotar para Atibaia e Valinhos, as vazões incrementais aferidas via SMAP e Muskingum (tradicional) com

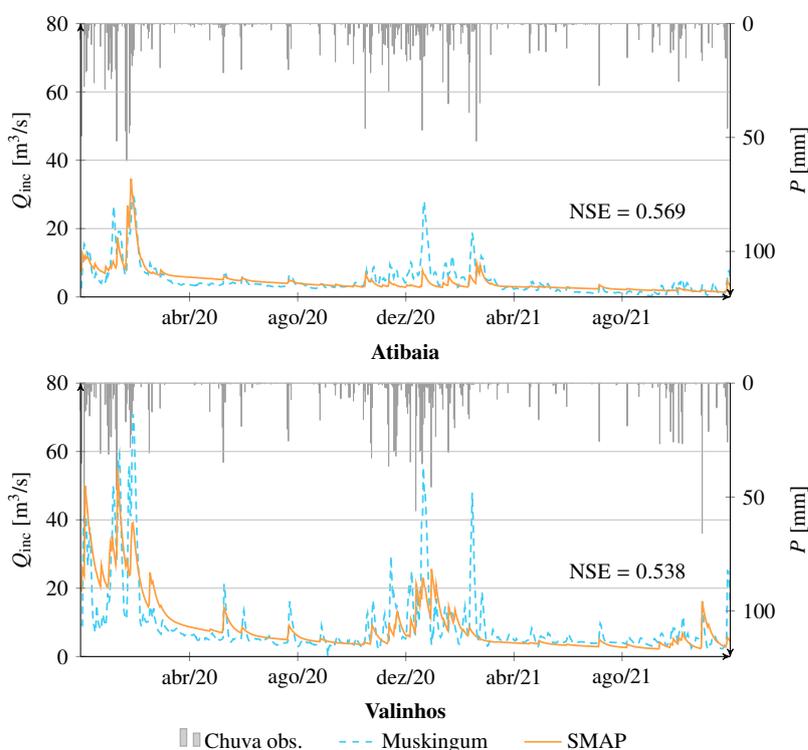
Tabela 6: Parâmetros Muskingum calibrados com série observada (K em dias, X e m adimensionais)

Cenário	Sentido	Valinhos			Atibaia					
		K	X	m	K_1	X_1	m_1	K_2	X_2	m_2
Chuvas previstas	Downstream	4.35	0.2	1.1	3.14	0.254	1.206	3.09	0.226	1.24
	Upstream	4.12	0.281	1.2	5.13	0.4	1.144	5.29	0.4	1.144
Chuvas observadas	Downstream	2.56	0.2	1.1	2.78	0.353	1.183	3.30	0.307	1.243
	Upstream	4.12	0.219	1.178	5.51	0.4	1.1	5.41	0.4	1.134

Fonte: autor

os dados acima tabelados. Para o cenário de previsões, têm-se as seguintes imagens:

Figura 11: Comparativo entre hidrogramas incrementais durante rodada de calibração



Fonte: autor

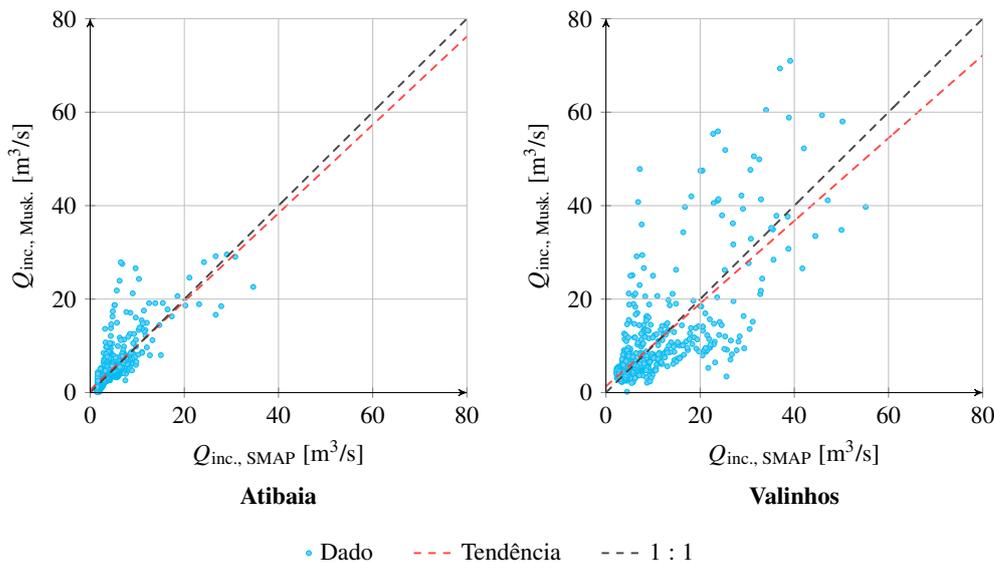
O que a figura nos mostra é que o hidrograma pontilhado em azul, de Muskingum, conta com um número maior de picos de cheia que não são inteiramente replicados pelos hidrogramas em laranja calculados via SMAP. Estas cheias características estão alinhadas a dias de precipitação intensa durante o período úmido. Uma vez que a propagação é feita com base em vazões observadas, que são separadas de despachos deslocados até os pontos de controle, em dias com chuva em excesso, e portanto, onde mediui-se vazões elevadas junto às seções de controle, há aumentos de vazão incremental calculada com o *routing*. Para o SMAP porém, a resposta a eventos de chuva intensa começa bem aderente e depois passa a ser pouco influente. [Bozzini \(2019\)](#) comenta que o modelo pode representar bem o comportamento de bacias diante de chu-

vas moderadas, mas não diante de chuvas extremas; pode levar a valores imprecisos para picos de vazão, mas modelar bem a recessão de escoamentos. Entende-se que neste caso ocorreu algo semelhante, em que o modelo “acostumou-se” bem a períodos de recessão e reagiu com *delay* ou atenuação em casos pontuais de tormenta.

É importante destacar que nesta comparação não existe um par observado/calculado, mas sim um par calculado/calculado de dados. Portanto, o principal desafio durante a calibração consistiu em diminuir as diferenças entre dois resultados que são calculados e que variam a cada iteração. Esta dificuldade justifica os coeficientes de Nash-Sutcliffe de 0.569 e 0.538. Embora não estejam próximo de 1, que é o ótimo desejado, [McCuen, Knight e Cutter \(2006\)](#) ressaltam que valores de aderência não ideais não são indicativo de uma modelagem pobre, como será possível constatar para a etapa de previsão.

Por meio de gráficos de dispersão (vide [figura 12](#)) é possível observar como muitos pontos estão plotados acima em relação à linha ótima de 45°:

Figura 12: Gráficos de dispersão para incrementais após calibração



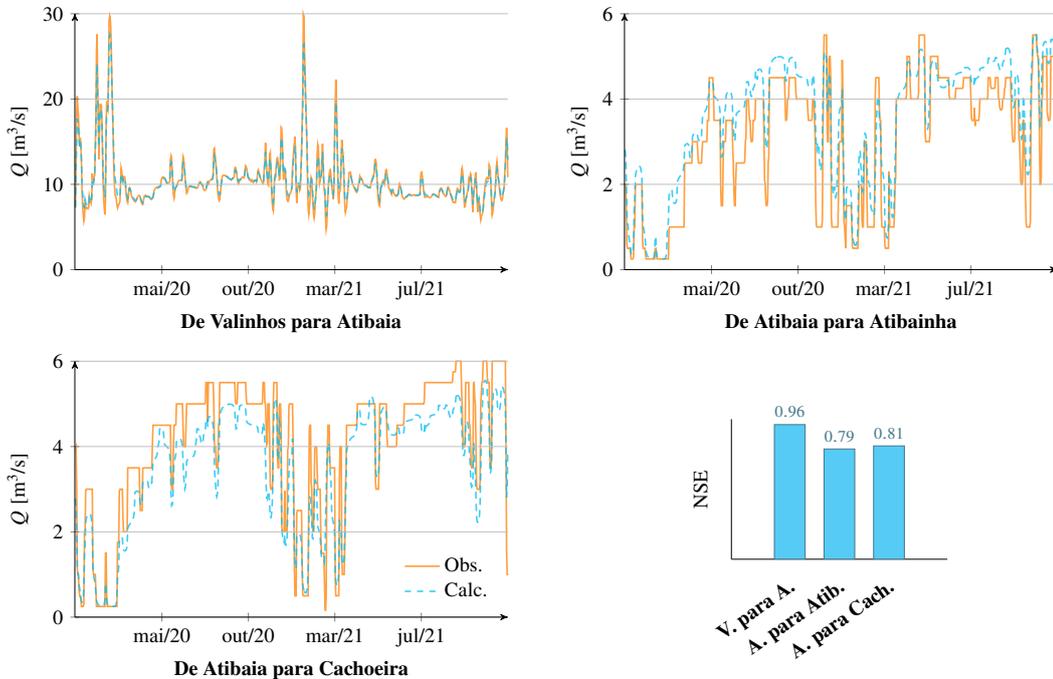
Fonte: autor

Isto deve-se ao fato de certos pares de vazão elevada tenderem à incremental de Muskingum em relação à de SMAP. Para Valinhos, cuja área de drenagem é maior e os picos de chuva e vazão também sobressaltam, a nuvem é ainda mais esparsa.

Em complemento à calibração de variáveis chuva-vazão e de *routing downstream*, elaborou-se também o ajuste de termos para o *routing* de Muskingum de jusante para montante, ou inverso. Nesta nova situação, por sua vez, contou-se com dados observados para referenciar os calculados em busca de uma otimização para K' , X' e m' . De acordo com a [figura 13](#), os hidrogramas obser-

vados em laranja e os calculados em azul pontilhado apresentam um nível maior de aderência, com valores de NSE de cerca de 0.8 ou mais:

Figura 13: Comparativo entre hidrogramas de *routing* não-linear inverso durante rodada de calibração



Fonte: autor

O que a [figura 13](#) ilustra é uma constatação importante para a calibração e também para a seção seguinte, de previsões: o modelo de Muskingum não-linear empregado, embora seja a alternativa ideal para exemplos práticos em que são analisados hidrogramas de múltiplos picos ([BADFAR et al., 2021](#)), não possui uma boa adaptação para calcular o transporte (em ambos os sentidos, montante ou jusante) a partir de despachos. Conjectura-se que o formato característico destas curvas, com “platôs” de vazão, não é inteiramente compreendido fisicamente. Dada sua discretização que adapta a taxa de variação de armazenamento por meio de 4 parâmetros ($k_i, i = 1, \dots, 4$ que aproximam dS/dt), em períodos onde são despachadas vazões constantes o modelo tende a suavizar as transições. [Koussis et al. \(2012\)](#) apresenta uma análise semelhante ao aplicar o *routing* inverso de Muskingum a um pulso de onda quadrado e observar o hidrograma calculado com um certo ruído, ou flutuações. Como será visto adiante, esta observação não representa um demérito à abordagem, mas serve como ponto de atenção, uma vez que quando encontrar “vértices” em um hidrograma de entrada (em que após uma sucessão de dias com vazão constante saltamos para um despacho), o modelo tenderá a representar o hidrograma de saída por meio de oscilações, o que pode causar desvios numéricos não controlados. Este fenômeno é evidente ao observar os gráficos gerados para o trecho Atibaia/Atibainha e Atibaia/Cachoeira.

Mesmo com esta nota, os coeficientes de Nash-Sutcliffe aferidos trazem confiabilidade ao *routing* inverso calibrado, especialmente para aquele de Valinhos a Atibaia. Já que o uso com estes perfis naturais é a principal aplicação durante a rodada de previsões, conclui-se que a calibração destes transportes atingiu bons resultados.

Apesar de as tabelas anteriores também destacarem os parâmetros obtidos para o segundo cenário, com chuvas observadas, optou-se por suprimir seus gráficos desta discussão para evitar redundância. É mais válido explorar melhor este cenário a seguir, junto às previsões. Antes de encerrar esta seção, apresenta-se abaixo as correlações para os diferentes pares calibrados. O ótimo desta medida é 1, com valores acima de 0.5 indicativos de uma boa correlação positiva. Com a expressão de Pearson conforme [Kotu e Deshpande \(2019\)](#), dada por

$$r(x, y) = \frac{\sum (x - \mu_x) (y - \mu_y)}{[\sum (x - \mu_x)^2 \sum (y - \mu_y)^2]^{1/2}} \quad (4.1)$$

têm-se os seguintes valores, cada qual associado às justificativas e apontamentos narrados:

Tabela 7: Correlações entre pares calibrados

Vazões incrementais		<i>Routings</i>		
Atibaia	Valinhos	Valinhos a Atibaia	Atibaia a Atibainha	Atibaia a Cachoeira
0.76	0.74	0.99	0.95	0.95

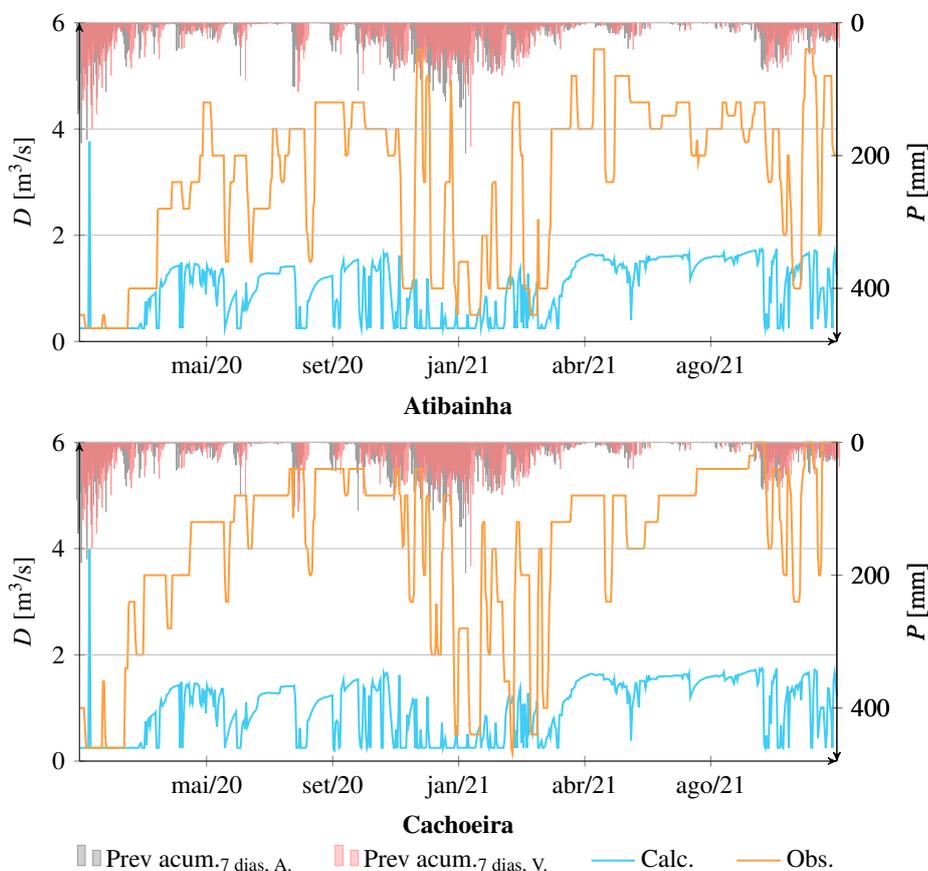
Fonte: autor

4.2 Previsões

Para validar o modelo e sua eficiência enquanto ferramenta de suporte à decisão, primeiramente deve-se apresentar os despachos calculados numericamente, comparar com os despachos reais e, além disto, confirmar se aqueles modelados foram eficientes ao garantir vazões iguais ou superiores às mínimas de cada ponto. Nesta linha, a [figura 14](#) mostra os despachos estimados para Atibainha e Cachoeira, a partir de previsões meteorológicas, em relação aos reais de cada barragem. Como a derivação para montante a partir de Atibaia tomou como regra uma divisão igual de 50% para cada reservatório, impôs-se ao modelo que Atibainha e Cachoeira contribuíssem cada um com metade das vazões necessárias para cada ponto a jusante. Por este motivo, os hidrogramas despachados são essencialmente idênticos.

É interessante verificar que o modelo rebaixa os despachos decisórios a valores inferiores aos observados de fato. Esta natureza é intrínseca ao modelo acoplado e a forma como ele opera os reservatórios. Em situações reais, o atendimento a outorgas deve ser compatibilizado com os tempos de manobra de comportas hidráulicas e também com o tempo de propagação de cheias

Figura 14: Despachos calculados com previsões meteorológicas em relação às descargas reais



Fonte: autor

até as seções de jusante. Embora o modelo considere a segunda condição, ele não mantém manobras constantes. Por este motivo, os despachos oscilam com grande frequência. Matematicamente, a simulação visa atender as regras impostas como condições de contorno. Quando a maior mínima média diária é atendida em um passo via chuva-vazão, os reservatórios descarregam o mínimo previsto em outorga de $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$. Caso o dia em questão sinalize a necessidade de lançamento de mais volume d'água, o modelo responde com despachos automáticos que podem saltar de 0.25 para $1.50 \text{ m}^3/\text{s}$, por exemplo, ou mais. Esta constatação é esperada, já que não programou-se uma otimização conjunta de manobras, o que traria considerável complexidade à modelagem.

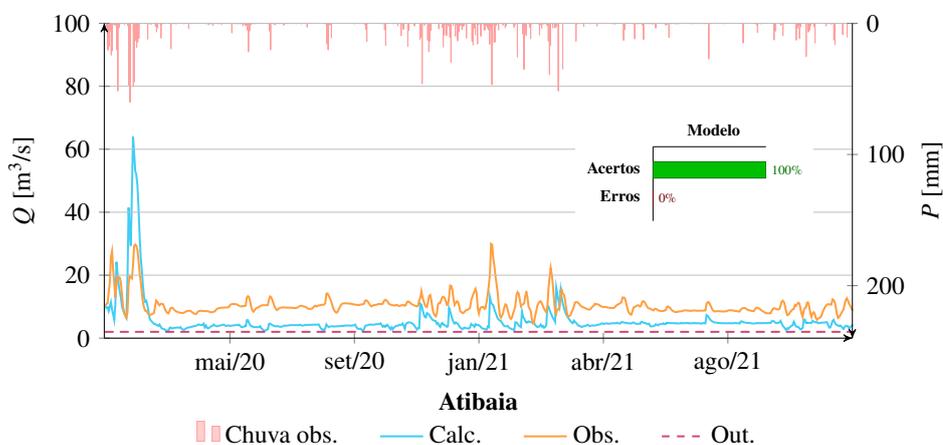
Apesar desta simplificação, os hidrogramas calculados e observados possuem padrões gerais semelhantes. Em regiões de pico de chuva durante o período úmido, ambas as curvas tendem a rebaixar, como é possível observar entre dezembro e fevereiro de 2021. Por outro lado, durante o período seco as descargas crescem e mantêm certos patamares, evidentes entre maio e outubro de 2021, por exemplo. Embora o hidrograma de despachos calculados seja supersensível a esta

regra, para ele e para o observado vale o mesmo: quando surgem picos de chuva acima, abaixo os despachos tendem a cair; em regiões em que os pluviogramas indicam falhas de seca, os despachos aumentam e assumem certas constantes.

A única exceção à observação levantada encontra-se em 08/02/20, dia em que o modelo despachou um excesso de quase $8 \text{ m}^3/\text{s}$ para as barragens somadas. Entende-se este dia como um *outlier* estatístico. A ocorrência destas anomalias será mais visível quando apresentado o cenário com chuvas observadas, em que cinco *outliers* de pico de descarga são identificados. Coincidentemente, estas ocorrências estão concentradas durante o período úmido, ao redor de dias com elevada concentração de chuvas. Para justificar a existência de tais desvios, é preciso lembrar que o modelo de Muskingum não-linear, embora robusto para traslado de hidrogramas reais, não está imune a erros físicos em casos em que as ordenadas de vazão saltam de um dia para outro. Possivelmente nesta data mencionada, o hidrograma obtido com o modelo SMAP apresentou variações bruscas que não foram bem recebidas pelo módulo de *routing*. Consequentemente, ao propagar os picos de cheia de jusante para montante, o método de Muskingum mal interpretou o amortecimento e levou o modelo a crer que as seções de controle “necessitavam” de volumes de água elevados, mesmo diante de chuvas que por si só supririam a demanda hídrica. Esta observação deve ser complementada com o fato de que modelos hidrológicos não são perfeitos ao representar o sistema físico. É preciso observar agora como as vazões a jusante responderam às decisões de despacho em relação ao atendimento de mínimas médias diárias.

Para o ponto de controle de Atibaia, com sua mínima média diária de $2 \text{ m}^3/\text{s}$, têm-se os seguintes resultados:

Figura 15: Vazões verificadas no ponto de controle de Atibaia após decisões de despacho com previsões

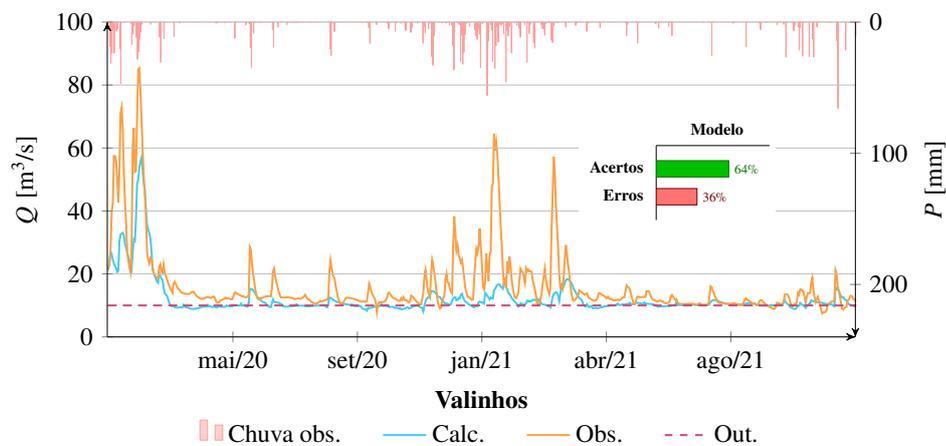


Fonte: autor

Uma vez que o hidrograma calculado em azul é resultado de um despacho transladado até a seção mais a parcela chuva-vazão convertida de chuvas reais menos as captações, nota-se que em picos de chuva existem picos de vazão, como esperado, já que a parcela calculada com o modelo SMAP intensifica o escoamento superficial. Em contrapartida, em períodos de maior seca o responsável por garantir o atendimento é o despacho. Dado que a curva calculada em azul não cruza a linha pontilhada outorgada em nenhum dia de simulação, observa-se que o modelo garantiu pelo menos o mínimo ao longo de todos os 677 dias simulados (e por isso conta com 100% de acerto). Como visto junto à [figura 14](#), a economia de despachos reflete o sumo objetivo de atender a outorga. Por isso, em muitos dias o hidrograma observado flutua acima de $2 \text{ m}^3/\text{s}$, sem infringir a regra, porém sem elevar-se demasiadamente para alcançar a curva real observada. Isto mostra que os despachos simulados foram econômicos e eficientes.

O maior desafio neste problema prático, entretanto, não está necessariamente em atender o mínimo de Atibaia, mas sim o de Valinhos com $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Dada a [figura 16](#),

Figura 16: Vazões verificadas no ponto de controle de Valinhos após decisões de despacho com previsões



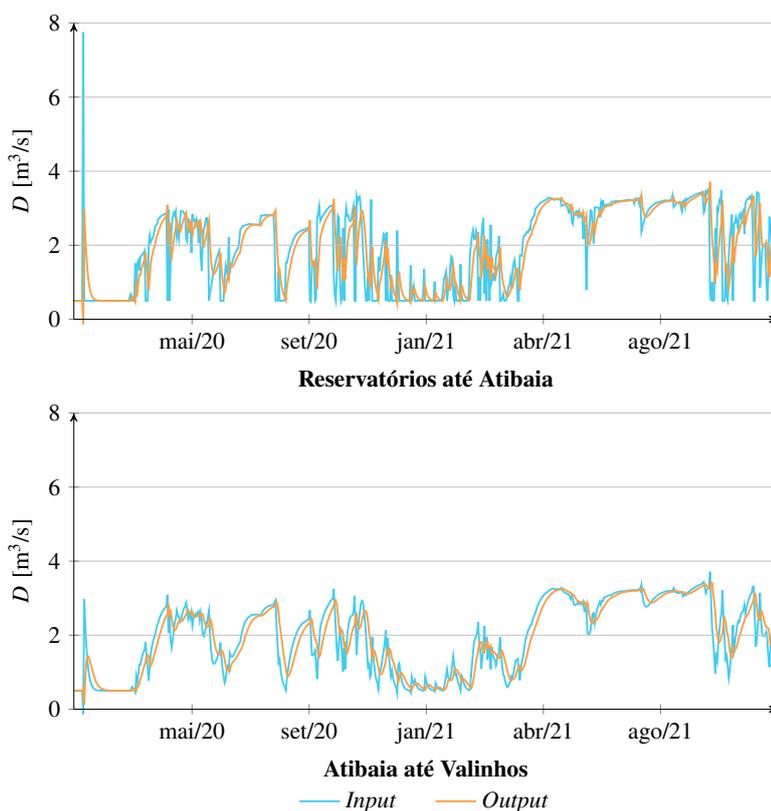
Fonte: autor

nota-se que o cenário inverteu-se, com 64% de acertos para o período estudado. A justificativa para estes desvios — dias em que mesmo com um despacho calculado de modo a atender o mínimo de 10, o observado cruza inferiormente a régua de outorga — foi antecipada anteriormente quando comentados os resultados de calibração. Em 242 de 677 dias o *routing* de jusante de descargas, mesmo ajustado para atender o mínimo, chegou até o ponto de controle de Valinhos um pouco abaixo em relação à parcela esperada. Como explicado, o modelo de Muskingum não comporta-se bem ao propagar hidrogramas de descargas de barragens, que pouco assemelham-se a hidrogramas naturais. Assim, as estimativas calculadas sofreram oscilações após percorrer

o trecho Atibainha/Valinhos e Cachoeira/Valinhos. É interessante complementar que o erro atribuído ao modelo de modo algum possui elevada magnitude. Enquanto o gráfico mostra que as infrações à outorga são ínfimas (já que a linha azul quando cruza a pontilhada, o faz a pequenas ordenadas), os resultados mostram que nestes 242 dias a média de vazão observada em Valinhos foi de $9.58 \text{ m}^3/\text{s}$, apenas quatro décimos inferior à mínima.

Uma possibilidade adicional para investigar o “quase atendimento” em certos dias em Valinhos é verificar o balanço de massa para o Muskingum não-linear de montante para jusante. Ao tomar unicamente os despachos decididos para o período simulado e transladá-los para Atibaia e então para Valinhos com as variáveis obtidas durante a etapa de calibração, pode-se observar os seguintes hidrogramas:

Figura 17: Hidrogramas despachados durante cenário de previsão, para análise de conservação de massa



Fonte: autor

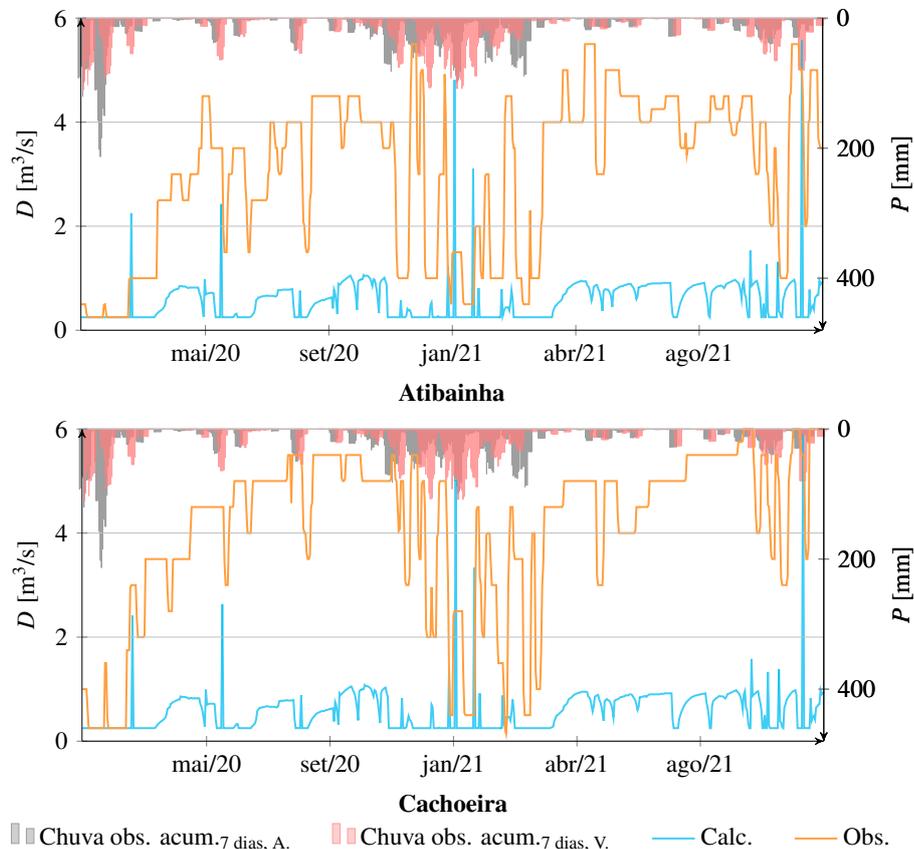
Exceto o pico anormal de 08/02, mencionado anteriormente, as curvas indicam translados e amortecimentos esperados fisicamente. Ao calcular o volume descarregado acumulado para o primeiro trecho, entre reservatórios e Atibaia, tomando o hidrograma de entrada e então o de saída, verifica-se uma acurácia de 99.5% entre as duas áreas aferidas. O mesmo percentual repete-se para os acumulados conforme as curvas de Atibaia até Valinhos. Esta análise de conser-

vação corrobora para o apontamento de que as módicas infrações constatadas dão-se a pequenas oscilações numéricas e não por perdas físicas de água durante o trecho fluvial.

Estes resultados indicam com favorabilidade que o modelo mostrou-se numericamente coerente ao sugerir despachos com previsões meteorológicas. Apesar de suas simplificações físicas, as regras estabelecidas em portarias foram cumpridas com notável frequência e com mínimos de desperdício de água. Embora esta comparação não inclua uma outra condicionante importante ao problema, a média móvel mínima de quinze dias (que será discutida mais a frente), os resultados obtidos mostram-se promissores. Vale apontar que, dada a natureza em que operam os reservatórios que compõem o Sistema Cantareira, as simulações com economia de água não impactam na regularização das duas barragens analisadas, que tradicionalmente trabalham a volumes razoavelmente abaixo de cotas limite de vertimento.

Depois de apresentar e analisar os resultados para a simulação com previsões meteorológicas de sete dias, pode-se introduzir os dados obtidos para a modelagem com chuvas observadas, de “previsões ótimas”, ou também de “chuvas perfeitas”. Após substituir os dados de entrada, obteve-se as curvas abaixo:

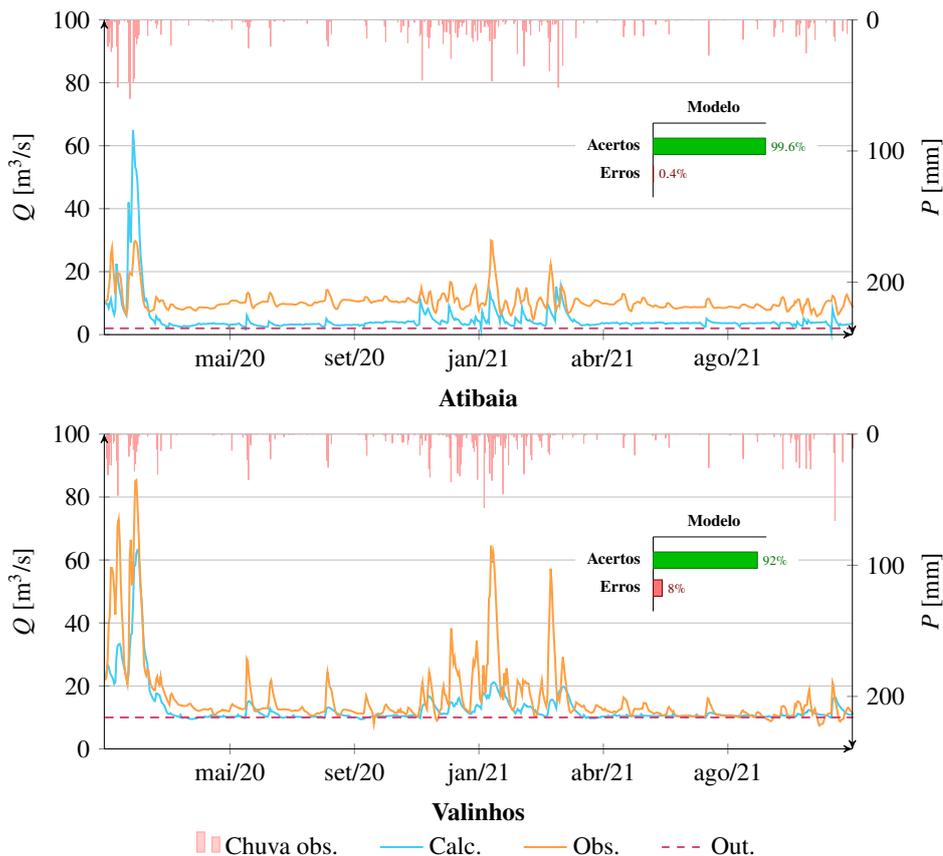
Figura 18: Despachos calculados com chuvas observadas em relação às descargas reais



Fonte: autor

Como antecipado, seja em Atibainha ou Cachoeira, cinco *outliers* são expressivos: um em março e outro em junho de 2020, dois em janeiro e um em novembro de 2021. Apesar destas ordenadas inconsistentes, devido a erros numéricos durante o processo de *routing*, é interessante pontuar que os demais despachos são coerentes com a dinâmica física. Durante o período seco as descargas aumentam, como esperado, e em excessos de chuva para o período úmido, em torno de janeiro de 2021, os despachos cessam ao mínimo estabelecido. Além disto, o perfil de descargas calculadas é ligeiramente rebaixado em relação ao obtido com previsões meteorológicas. O que isto indica, em consonância com a proposta deste cenário, é que tendo em mãos a melhor informação disponível para sua tomada de decisão, o operador de barragens irá manobrar os reservatórios com ainda maior precisão e racionalidade para atender as demandas. Observando agora o comportamento junto aos pontos de controle,

Figura 19: Vazões verificadas nos pontos de controle após decisões de despacho com observações



Fonte: autor

em Atibaia têm-se que, mesmo com despachos menores, o atendimento manteve-se constante. O erro verificado de 0.4% está associado a 3 dias de infração, coincidentemente em dias de *outlier*. Conjectura-se que, diante de despachos excessivos, o módulo de *routing* compactou

excessivamente o hidrograma durante o dia de decisão. Já que os picos isolados são rodeados por dias de mínima descarga, os valores adjacentes de $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ tendenciaram os picos de despacho a valores muito pequenos, o que ocasionou em parcelas insuficientes de despacho quando em Atibaia. Mesmo assim, os outros 674 dias calculados atenderam o mínimo de $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Em Valinhos os ganhos foram expressivos em relação ao cenário anterior. De um total de 64% de acertos com chuvas previstas (vide [figura 16](#)), atingiu-se agora 92% com chuvas observadas. Este aumento condiz com a hipótese de que com conhecimentos ótimos sobre a dinâmica de precipitações, o atendimento à outorga será ainda mais frequente. Assim como visto para o cenário anterior, os erros encontrados de 8%, em 52 dias, devem-se a oscilações numéricas que levaram a pequenas infrações à regra. A média de atendimento durante os dias pouco certos foi de $9.79 \text{ m}^3/\text{s}$. A [tabela 8](#) resume esta e as demais informações supracitadas:

Tabela 8: Performances de modelagem conforme cenário

Cenário de chuvas	Atibaia [%]		Valinhos [%]		Vazão infringida média [m^3/s]	
	Acertos	Erros	Acertos	Erros	Atibaia	Valinhos
Previstas	100	0	64	36	–	9.58
Observadas	99.6	0.4	92	8	1.32	9.79

Fonte: autor

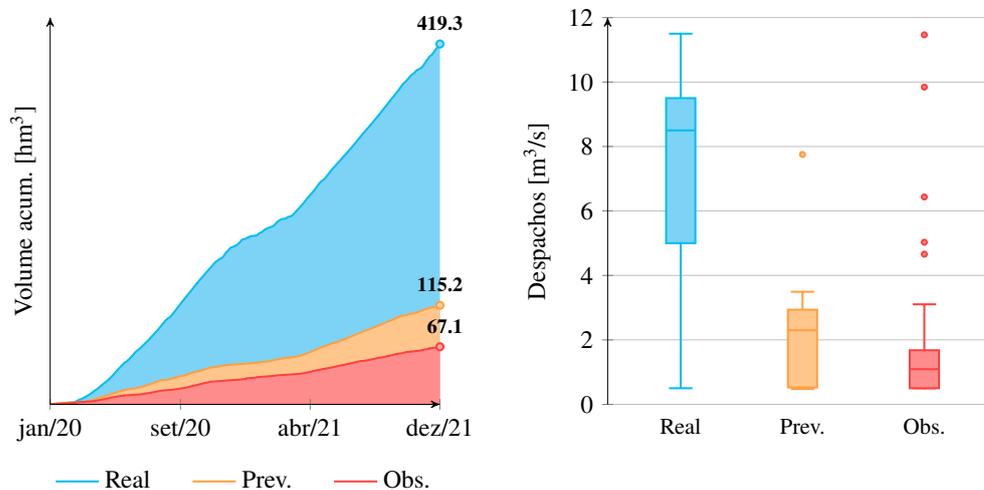
Para enriquecer esta discussão convém colocar os cenários simulados lado a lado e junto com os dados reais observados, sintetizar os comentários apresentados até o momento. Para tal, segue uma seção a parte.

4.2.1 Comparativo entre cenários

Uma forma de visualizar melhor a quantidade de despachos realizados em cada cenário é, além de estudar hidrogramas, calcular a área abaixo de cada um e aferir assim volumes despachados acumulados. Uma vez que o modelo atenta-se a atender unicamente a condição de mínima média diária em uma situação hipoteticamente especial em que é operado o Sistema Cantareira, os volumes descarregados para jusante com previsões meteorológicas somam cerca de 115.2 hm^3 (bilhões de litros) ao longo de dois anos de simulação, frente a 419.3 hm^3 reais para o mesmo período (vide [figura 20](#)). Mesmo sob a ressalva de que as operações observadas visaram atender a condição dupla de mínima média diária e móvel de 15 dias, a disparidade entre acumulados ainda é relevante, com uma redução de cerca de 72% entre simulado e real. Para o cenário ótimo, de previsões iguais às chuvas observadas, a economia de água é ainda maior, com um total de

67.1 hm³ e redução de quase 84%:

Figura 20: Relações entre os diferentes despachos de cada cenário. (À esquerda), volumes despachados acumulados e (à direita), distribuições de descargas através de *boxplots*

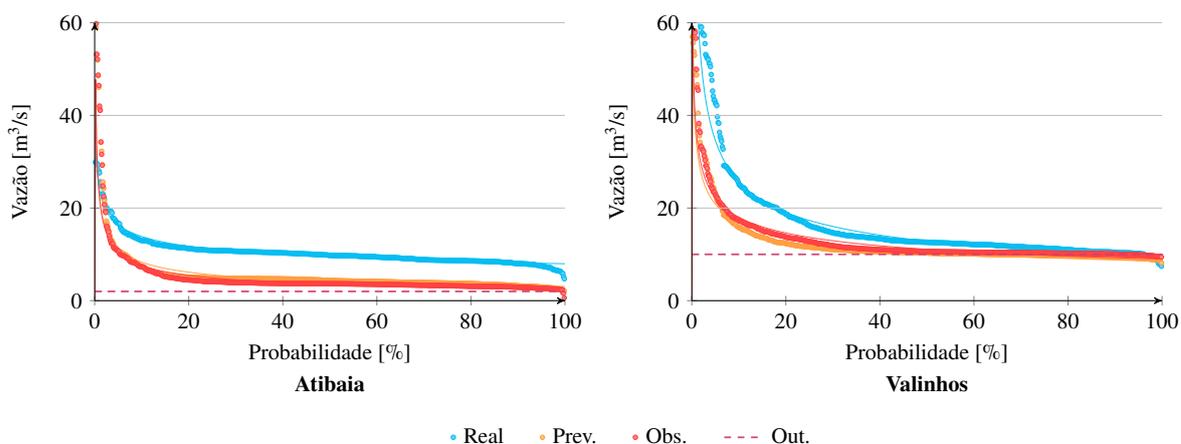


Fonte: autor

Com as distribuições representadas sob a forma de *boxplots*, é possível observar que, excluindo os *outliers*, os despachos somados de Atibainha e Cachoeira para o cenário de chuvas previstas e para chuvas observadas encontram-se todos entre a mínima de 0.25 e o primeiro quartil de despachos reais (igual a 5 m³/s). Esta composição evidencia que as modelagens trabalharam com um grande viés de economia de água. Mesmo com simplificações inerentes — para as manobras e para a média móvel — o modelo mostra como é possível otimizar a operação sem negligenciar a demanda pelo recurso hídrico, e mais além, atuar de forma racional e sustentável, características cada vez mais imprescindíveis à gestão hídrica consciente.

Em complemento à análise de erros e acertos de cada cenário, uma ponderação bastante pertinente é questionar a frequência com que o modelo garante em Atibaia e Valinhos vazões iguais ou superiores aos mínimos. Para responder a esta pergunta, pode-se recorrer a curvas de permanência, instrumentos gráficos bastante informativos em Hidrologia. De acordo com a [figura 21](#), primeiramente nota-se que a operação real, marcada de azul, garante com folga o mínimo de Atibaia sempre e assim, orienta suas descargas para atender Valinhos, cuja mínima é mais desafiadora. As operações simuladas, seja com previsões ou observações, possuem curvas bastante similares e que aproximam-se bem dos limites mínimos inferiores dado seus objetivos de otimização sem desperdício. Por meio de linhas de tendência, é possível aferir que o atendimento aos 2 m³/s de Atibaia é garantido com 100% de probabilidade em todos os cenários. Para Valinhos, por outro lado, calcula-se que o cenário real garante o mínimo de 10 m³/s ou mais com

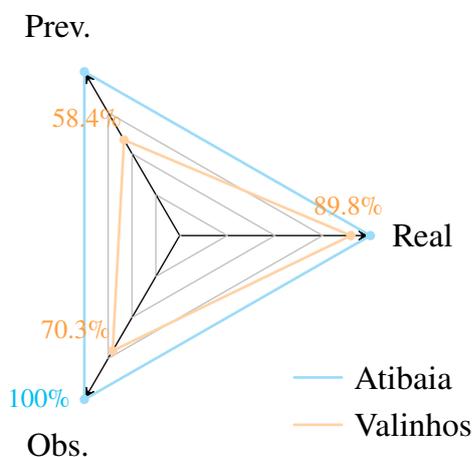
Figura 21: Curvas de permanência de vazões em Atibaia e Valinhos para os cenários analisados



Fonte: autor

probabilidade de 89.8%; o cenário com chuvas previstas, dado seu histórico de acertos, garante o mínimo em pelo menos 58.4% do tempo; já o cenário com chuvas observadas, mais preciso, atinge uma probabilidade de 70.3%. O gráfico abaixo mostra melhor estas leituras:

Figura 22: Probabilidades de atendimento aos mínimos de cada ponto de controle conforme cenário



Fonte: autor

É importante que a [figura 22](#) seja interpretada juntamente com a [tabela 8](#). A permanência de 58.4% para a simulação de previsões não impõe demérito à modelagem uma vez que quando não atinge o mínimo desejado, o modelo propõe vazões muito próxima de 10 m³/s. O mesmo vale para a simulação com dados observados.

Em resumo, o objetivo desta discussão é apresentar imparcialmente os resultados obtidos e apontar as qualidades e falhas constatadas com o modelo hidrológico acoplado. Ao longo de sua construção, buscou-se adaptar de forma fidedigna o problema de caso em torno das Bacias PCJ e suas especificidades, com o propósito de subsidiar à gestão de recursos hídricos com ferramentas

computacionais. Embora a otimização de manobras seja uma simplificação evidente porém pouco discutida neste trabalho, dada a complexidade que traria ao estudo, julgou-se pertinente entender melhor outra condição não abarcada junto às simulações, mas que é deveras importante para entender os despachos reais e como o uso de modelos hidrológicos pode complementá-los. Assim, para finalizar esta seção realizou-se um breve estudo em que a mínima média diária é substituída pela mínima média móvel de 15 dias como critério de atendimento de outorga.

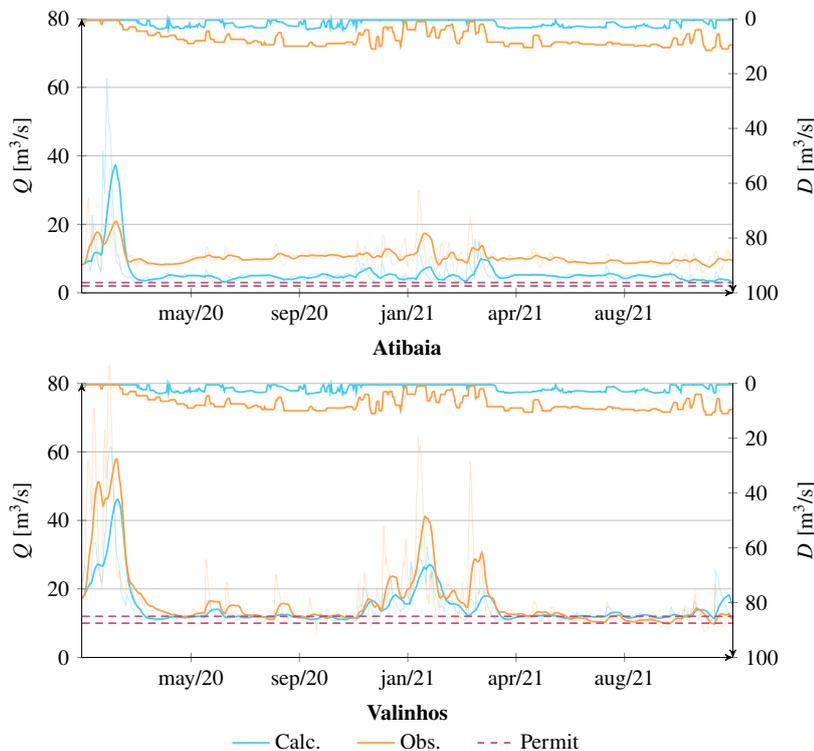
4.3 Estudo com médias móveis mínimas de 15 dias

A principal relação utilizada para guiar a regra de operação em torno de médias móveis foi expressa como

$$d = \left\{ \left[\left(\text{outorga}_{\text{dia}(2;10)} + \overline{\text{capt.}} \right) / 2 \right] - r \right\} + \left\{ \left[\text{outorga}_{15(3;12)} - \left(\sum_{i=1}^8 Q_{\text{obs. passado}(i)} + \sum_{i=1}^7 Q_{\text{calc. futuro}(i)} \right) / 15 \right] / 2 \right\} \quad (4.2)$$

Depois de empregar o mesmo conjunto de previsões meteorológicas de 7 dias e simular para o período de 2020 a 2021, obteve-se as seguintes curvas:

Figura 23: Médias móveis simuladas para Atibaia e Valinhos e seus despachos correspondentes

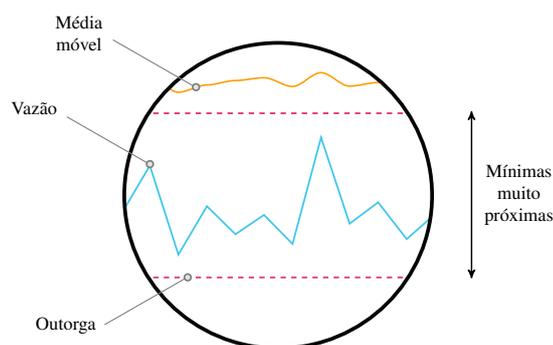


Fonte: autor

A [figura 23](#) destaca em seu eixo esquerdo as médias de 15 dias calculadas, em azul, e aquelas observadas, em laranja, e junto ao eixo direito (gráfico invertido que substitui pluviogramas) os respectivos despachos. Em linhas finas e opacas, plotou-se as vazões que culminaram em tais médias móveis, para referência. A linha tracejada inferior corresponde à mínima média diária (de 2 ou 10 m³/s) e a superior à mínima média móvel (de 3 ou 12 m³/s). Assim como observado de fato em Atibaia, os cálculos para a primeira seção de controle indicam atendimento à mínima móvel sem maiores dificuldades, já que o hidrograma destacado em azul somente cruza a linha pontilhada superior de outorga em um único dia (o último de simulação, em que registrou-se 2.94 m³/s). Em relação a Valinhos, por outro lado, o desafio de conciliar mínima diária e média móvel foi maior. Neste ponto, os acertos para a média móvel de quinze dias chegaram a 58.9% frente a 71.8% para a série de dados observados. Mesmo com a mínima diária sendo infringida em um dia apenas (em que o modelo registrou 9.99 m³/s e não 10), 278 dias verificaram médias móveis inferiores a 12 m³/s, com um atendimento médio de 11.64 m³/s, três décimos abaixo quando comparado ao ideal. Apesar disto, é importante destacar que o modelo operou sob a prerrogativa otimizadora, prezando por despachos econômicos (o que é visto quando analisadas as curvas de descarga superiores). Inclusive, os volumes descarregados acumulados culminam em 102.7 hm³ de água alocada, indicativo de que para a operação com regras conjuntas os dispêndios são ligeiramente menores que aqueles aferidos para a condição crítica de mínimas.

Este exercício mostra que o atendimento conjunto de regras outorgadas é um desafio à modelagem hidrológica e deve ser melhor apurado por meio de otimizações mais sofisticadas. Mesmo que as decisões reais sejam mais precisas, é importante destacar que o padrão de operação é bastante influenciado pelas portarias, que por sua vez são demasiadamente restritivas. Esta explicação é melhor aproveitada com a seguinte figura:

Figura 24: Relação entre as mínimas outorgadas e suas restrições práticas



Fonte: autor

Os despachos elevados constantes que foram vistos para os dados reais devem-se à existência de duas mínimas muito próximas entre si, o que inevitavelmente “estrangula” os hidrogramas despachados para cumprir ambas as restrições. Isto faz com que o operador de barragens atue com pouca liberdade para permitir que os hidrogramas de jusante oscilem a menor. Idealmente, seria mais proveitoso impor ao sistema uma mínima média diária mais distante em relação à mínima média móvel, para que dias de pico de vazão compensassem mais dias de recessão ainda mantendo um balanço em conformidade com a outorga. Como as réguas são próximas (de 2 para 3, ou 10 para 12), constantemente é preciso descarregar excessos de água para que, ao fazer o hidrograma ajustar-se entre as duas restrições, seja possível atender os outorgados. Esta observação é um complemento ao exposto nesta seção, pois considera-se que ela fomenta discussões de gestão tão importantes quanto àquelas obtidas a partir de resultados de modelagem.

Terminada a apresentação de resultados, temos insumos para concluir o trabalho e retomar seus apontamentos frente aos objetivos enumerados nesta pesquisa.

5 Conclusão

Com o objetivo geral de apresentar uma alternativa computacional que subsidiasse a gestão de recursos hídricos em bacias com escassez de água e regras complexas de operação de reservatórios, entende-se com os resultados alcançados que o modelo atende àquilo que se propõe. É necessário salientar que a modelagem hidrológica não possui meios de adaptar com perfeição os sistemas físicos naturais, de modo que inevitavelmente deve-se adotar simplificações. Por este mesmo motivo, o resultado de um modelo não deve ser interpretado como soberano para a tomada de decisão. Mesmo assim, sua construção serve para complementar a operação humana com metodologias científicas exatas, capazes de trazer informações e *insights* ao gerenciamento.

Por meio de uma condição única crítica, de atender às mínimas médias diárias de Atibaia e Valinhos ao longo de dois anos de simulação, observou-se que o modelo hidrológico acoplado a previsões meteorológicas obteve 100% de acertos em Atibaia, ou seja, garantiu pelo menos o mínimo em todos os 677 dias simulados, e indicou 64% de acertos em Valinhos, de modo que os 36%, ou 242 dias com médias abaixo de 10, somente não alcançaram a outorga por quatro décimos de m^3/s , em média. A fim de enriquecer ainda mais o estudo e mostrar que quando o evento chuvoso é conhecido com exatidão é possível obter resultados ainda mais favoráveis, realizou-se também uma simulação com chuvas observadas. Neste novo cenário, a taxa de acertos em Atibaia e Valinhos foi de respectivos 99.6% e 92%, sendo que os dias não alcançados em Valinhos, sub-bacia que impõe maior desafio ao modelo, somente não atingiram o mínimo por uma média de $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$. É pertinente pontuar que todos os atendimentos calculados foram feitos a partir de despachos ótimos, que indicaram grandes volumes de economia de água. Para o cenário de previsões, as reduções de descarga chegaram a 72% em relação aos dados reais, enquanto o cenário de chuvas observadas intensificou ainda mais esta queda para quase 84%.

É necessário destacar que existem melhorias necessárias para trabalhos futuros. Seja para mitigar a ocorrência de oscilações bruscas de despacho, que não condizem com a realidade de manobras de comporta, ou para atender ao requisito de demanda de mínimas médias móveis de 15 dias, deve-se impor ao modelo uma otimização multi-objetivo que reduza a quantidade de manobras e proponha hidrogramas de descarga mais constantes.

Feitas estas considerações, conclui-se que o trabalho trouxe materiais e inovações para avançar as discussões técnicas de gerenciamento assistidas por modelos computacionais. Em situações cada vez mais frequentes em que as demandas são crescentes e a alocação de água deve

ser garantida racionalmente a todos os usuários, o uso de modelos é essencial para enriquecer as práticas tradicionais de gestão.

Referências

- AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ. **A realidade das Bacias PCJ**. [S.l.], 2022. Disponível em: <<https://plano.agencia.baciaspcj.org.br/>>. Acesso em: 07 out. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Resolução Conjunta ANA/DAEE Nº 925, de 29 de maio de 2017**. São Paulo, 2017. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/arquivos/resolucoes/2017/925-2017.pdf?174417>>. Acesso em: 07 out. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Resolução Conjunta ANA/DAEE Nº 926, de 29 de maio de 2017**. São Paulo, 2017. Disponível em: <<https://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2017/926-2017.pdf>>. Acesso em: 07 out. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Sistema Cantareira**. [S.l.], 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/sala-de-situacao/sistema-cantareira/sistema-cantareira-saiba-mais>>. Acesso em: 30 set. 2022.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 06, 2013.
- ÁVILA, L. *et al.* Comparative Evaluation of Five Hydrological Models in a Large-Scale and Tropical River Basin. **Water**, v. 14, n. 19, 2022.
- BADFAR, M. *et al.* Reverse Flood Routing in Rivers Using Linear and Nonlinear Muskingum Models. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 26, n. 06, 2021.
- BLOCK, P. J. *et al.* A Streamflow Forecasting Framework using Multiple Climate and Hydrological Models. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 45, n. 04, 2009.
- BORTOLIN, P. A. R. R. T. A. *et al.* Análise de diferentes funções-objetivo na calibração do modelo chuva-vazão SMAP. In: **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Florianópolis: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2017.
- BOZZINI, P. L. **Desempenho de sistemas complexos de reservatórios com previsão de vazão derivada de modelos climáticos regionais**. 83 p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
- BOZZINI, P. L.; JÚNIOR, A. V. M. Previsões de Precipitação de Modelos Atmosféricos como Subsídio à Operação de Sistemas de Reservatórios. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 01, 2019.
- BRASIL. **Lei Nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997**. Brasília, 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm>. Acesso em: 30 set. 2022.
- BRESSIANI, D. de A. *et al.* Effects of spatial and temporal weather data resolutions on streamflow modeling of a semi-arid basin, Northeast Brazil. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 03, n. 08, 2015.
- CAVALCANTE, M. R. G.; BARCELLOS, P. da C. L.; CATALDI, M. Flash flood in the mountainous region of Rio de Janeiro state (Brazil) in 2011: part I – Calibration watershed through hydrological SMAP model. **Natural Hazards**, v. 102, n. 03, 2021.

CENTRO DE PREVISÃO DO TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. **Modelo Regional ETA**. [S.l.], 2023. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/27.html>>. Acesso em: 17 abr. 2023.

CHEN, M.; CATALDI, M.; FRANCISCO, C. N. Application of Hydrological Modeling Related to the 2011 Disaster in the Mountainous Region of Rio de Janeiro, Brazil. **Climate**, v. 11, n. 03, 2023.

CHO, S. J. *et al.* Collaborative Watershed Modeling as Stakeholder Engagement Tool for Science-Based Water Policy Assessment in São Paulo, Brazil. **Water**, v. 15, n. 03, 2023.

CHOW, V. T. **Open channel hydraulics**. New York: McGraw-Hill, 1959.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1988.

COELHO, C. A. S. *et al.* The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, v. 46, n. 11, p. 3737–3752, 2016.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013.

CRISTINA, S. **Differential Evolution from Scratch in Python**. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://machinelearningmastery.com/differential-evolution-from-scratch-in-python/>>. Acesso em: 21 abr. 2023.

CUNGE, J. A. On the subject of flood propagation computation method (Muskingum method). **Journal of Hydraulic Research**, v. 07, n. 02, 1969.

DAS, A. Reverse stream flow routing by using muskingum models. **Sadhana**, v. 34, n. 03, p. 483–499, 2009.

DAS, S.; SUGANTHAN, P. N. Differential evolution: A survey of the state-of-the-art. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 15, n. 01, 2011.

DEHGHANIAN, N. *et al.* Evaluation of coupled ANN-GA model to prioritize flood source areas in ungauged watersheds. **Hydrology Research**, v. 51, n. 03, 2020.

DOMINGUES, L. M.; ABREU, R. C. de; ROCHA, H. R. da. Hydrologic impact of climate change in the Jaguari River in the Cantareira Reservoir System. **Water**, v. 14, n. 08, 2022.

DOOGE, J. C. I. Linear theory of hydrologic systems. In: **Technical bulletin no.1468**. [S.l.]: U. S. Department of Agriculture, 1973.

FIGUEROA, S. N. *et al.* The Brazilian Global Atmospheric Model (BAM): Performance for Tropical Rainfall Forecasting and Sensitivity to Convective Scheme and Horizontal Resolution. **Weather and Forecasting**, v. 31, n. 05, 2016.

GOLDING, B. W. NUMERICAL MODELS: Regional Prediction Models. In: **Encyclopedia of Atmospheric Sciences**. Cambridge: Academic Press, 2015. p. 241–245.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapa de cobertura da terra do Estado de São Paulo**. [S.l.], 2022. Disponível em: <<https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/cpla/mapa-de-cobertura-da-terra-do-estado-de-sao-paulo/>>. Acesso em: 02 nov. 2022.

- GUPTA, H. V. *et al.* Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. **Journal of Hydrology**, v. 377, n. 01, 2009.
- HADDAD, O. B. *et al.* Upstream flood pattern recognition based on downstream events. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, n. 05, 2018.
- HUBER, W. C.; DICKINSON, R. E. **Storm Water Management Model, Version 4: User's Manual**. [S.l.], 1992.
- IRRIGART ENGENHARIA. **Plano diretor para recomposição florestal visando a conservação da água nas Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí**. [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://agencia.baciaspcj.org.br/docs/plano-diretor-florestal/relatorio-final.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2022.
- JACOBI, P. R.; CIBIM, J.; LEÃO, R. de S. Crise hídrica na Macrometrópole Paulista e respostas da sociedade civil. **Estudos Avançados**, v. 29, n. 84, 2015.
- KARTERAKIS, S. M. *et al.* Application of linear programming and differential evolutionary optimization methodologies for the solution of coastal subsurface water management problems subject to environmental criteria. **Journal of Hydrology**, v. 342, n. 03, p. 270–282, 2007.
- KOTU, V.; DESHPANDE, B. **Data Science: Concepts and Practice**. Cambridge: Morgan Kaufmann, 2019.
- KOUSSIS, A. D. *et al.* Reverse flood routing with the inverted Muskingum storage routing scheme. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, n. 12, p. 217–227, 2012.
- LAZARO, L. *et al.* Assessing water scarcity narratives in Brazil – Challenges for urban governance. **Environmental Development**, v. 47, 2023.
- LEON, A. S.; BIAN, L.; TANG, Y. Comparison of the genetic algorithm and pattern search methods for forecasting optimal flow releases in a multi-storage system for flood control. **Environmental Modelling & Software**, v. 145, 2021.
- LEWIS, A.; RANDALL, M. Solving multi-objective water management problems using evolutionary computation. **J. Environ. Manage.**, p. 179–188, 2017.
- LI, J. *et al.* Predicting floods in a large karst river basin by coupling PERSIANN-CCS QPEs with a physically based distributed hydrological model. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 23, n. 03, 2019.
- LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. SMAP: a simplified hydrologic model. In: **Proceedings of the International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling**. Mississippi: Water Resources Publications, 1982.
- LOPES, T. R. *et al.* Hydrological modeling for the Piracicaba River basin to support water management and ecosystem services. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 103, 2020.
- MACIEL, G. M. *et al.* Daily Water Flow Forecasting via Coupling Between SMAP and Deep Learning. **IEEE Access**, v. 08, 2020.
- MCCARTHY, G. T. Unit hydrograph and flood routing. In: **Conference of the North Atlantic Division**. Connecticut: Army Engineer District, 1938.

- MCCUEN, R. H.; KNIGHT, Z.; CUTTER, A. G. Evaluation of the Nash–Sutcliffe Efficiency Index. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 11, n. 06, 2006.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 03, 1970.
- NEVES, G. L. *et al.* Evaluation of the impacts of climate change on streamflow through hydrological simulation and under downscaling scenarios: case study in a watershed in southeastern Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 11, 2020.
- OLIVEIRA, C. de P. M. **Plataforma de análise e simulação hidrológica — PLASH**. 180 p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- OTTO, F. E. L. *et al.* Factors other than climate change, main drivers of 2014/15 water shortage in southeast Brazil. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 96, n. 12, p. S35–S40, 2015.
- PELLEGRINI, C. C. *et al.* Análise do Desempenho do Modelo WRF num Episódio de Vento Intenso e Persistente num Grande Reservatório Tropical. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 01, 2019.
- PORTELE, T. C. *et al.* Ensemble-Tailored Pattern Analysis of High-Resolution Dynamically Downscaled Precipitation Fields: Example for Climate Sensitive Regions of South America. **Frontiers in Earth Science**, v. 09, 2021.
- PORTO, R. L.; PORTO, M. F. A.; PALERMO, M. A ressurreição do volume morto do Sistema Cantareira na Quaresma. **Revista DAE**, v. 62, n. 197, 2014.
- ROSSI, M. **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Instituto Florestal, 2017.
- ROZANOV, E.; CALVETTI, L.; FILHO, A. J. P. Ensemble Hydrometeorological Forecasts Using WRF Hourly QPF and TopModel for a Middle Watershed. **Advances in Meteorology**, v. 2014, 2014.
- SABESP. **Estratégias resilientes: um plano de adaptação às variações climáticas na gestão de recursos hídricos para o abastecimento da região metropolitana de São Paulo**. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/asabesp_doctos/livro_estrategias_resilientes.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2023.
- SAHU, M. K.; SHWETHA, H. R.; DWARAKISH, G. S. State-of-the-art hydrological models and application of the HEC-HMS model: a review. **Modeling Earth Systems and Environment**, 2023.
- SAINT-VENANT, A. J. C. B. de. Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et a l'introduction de marées dans leurs lits. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris**, v. 73, 1871.
- SANKARASUBRAMANIAN, A. *et al.* Improved water allocation utilizing probabilistic climate forecasts: Short-term water contracts in a risk management framework. **Water Resources Research**, v. 45, n. 11, 2009.

- SANTANA, R. F.; CELESTE, A. B. Stochastic reservoir operation with data-driven modeling and inflow forecasting. **Journal of Applied Water Engineering and Research**, v. 10, n. 03, 2021.
- SANTAROSA, L. V.; GASTMANS, D.; QUAGGIO, C. S. Stable isotope modeling of the groundwater discharge in complex watersheds of the state of São Paulo, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 120, 2022.
- SCHARDONG, A. **Aplicação de algoritmos evolucionários à gestão integrada de sistemas de recursos hídricos**. 185 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- SCHARDONG, A. *et al.* Modelo de Operação em Tempo Real para o Sistema Produtor do Alto Tietê. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 15, n. 02, 2010.
- SCHARDONG, A.; SIMONOVIC, S. P.; GARCIA, J. I. B. O possível efeito de mudanças climáticas e suas incertezas sobre afluências em sistemas de recursos hídricos. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 11, n. 02, 2014.
- SETTI, A. A. *et al.* **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2000. 207 p.
- SINGH, V. P. Hydrologic modeling: progress and future directions. **Geoscience Letters**, v. 15, n. 05, 2018.
- SOARES, M. C. Instrumentos de gestão em recursos hídricos. In: **Curso de Especialização a Distância em Elaboração e Gerenciamento de Projetos para a Gestão Municipal de Recursos Hídricos**. Fortaleza: Agência Nacional de Águas, 2015. Disponível em: <<https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/handle/ana/2553>>. Acesso em: 30 set. 2022.
- SOIL CONSERVATION SERVICE. SCS. In: **Hydrology, National Engineering Handbook, Soil Conservation Service, Supplement A, Section 4, Chap. 10**. Washington DC, 1956.
- SOUZA, J. D. S. de *et al.* Decision Support System for the Integrated Management of Multiple Supply Systems in the Brazilian Semiarid Region. **Water**, v. 15, n. 02, 2023.
- STORN, R.; PRICE, K. Differential evolution – A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. **Journal of Global Optimization**, v. 11, p. 341–359, 1997.
- TASSEW, B. G.; BELETE, M. A.; MIEGEL, K. Application of HEC-HMS Model for Flow Simulation in the Lake Tana Basin: The Case of Gilgel Abay Catchment, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. **Hydrology**, v. 06, n. 01, 2019.
- TEHRANI, M. J.; HADDAD, O. B.; LOÁICIGA, H. A. Application of particle swarm optimization to water management: an introduction and overview. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 281, 2020.
- THE SCIPY COMMUNITY. **scipy optimize: differential evolution**. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.differential_evolution.html>. Acesso em: 21 abr. 2023.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2005.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2015.

UFPB. **SWMM**. [S.l.], 2023. Disponível em: <<http://ct.ufpb.br/lenhs/contents/menu/assuntos/swmm>>. Acesso em: 15 abr. 2023.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **An Overview of Rainfall-Runoff Model Types**. [S.l.], 2017. Disponível em: <https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=339328&Lab=NERL>. Acesso em: 13 abr. 2023.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Storm Water Management Model (SWMM)**. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>>. Acesso em: 13 abr. 2023.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-HMS**. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>>. Acesso em: 13 abr. 2023.

USGS. **Water Cycle Diagrams**. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/water-cycle-diagrams>>. Acesso em: 25 out. 2023.

VATANKHAH, A. R. Evaluation of Explicit Numerical Solution Methods of the Muskingum Model. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 19, n. 08, 2014.

VIKHAR, P. A. Evolutionary algorithms: A critical review and its future prospects. In: **2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication**. Maharashtra: IEEE, 2016. p. 261–265.

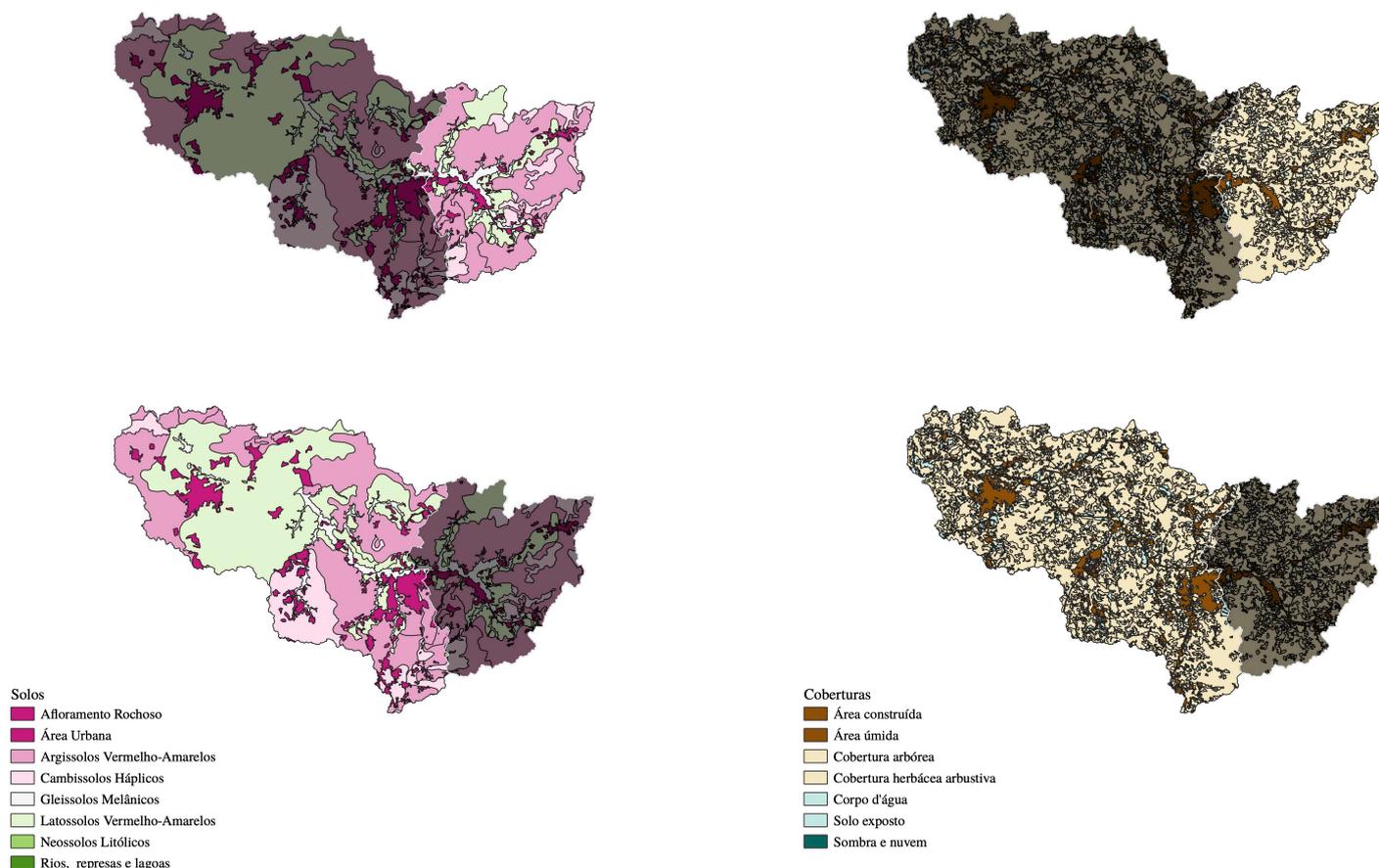
WANG, Y.; KARIMI, H. A. Impact of spatial distribution information of rainfall in runoff simulation using deep learning method. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 26, n. 09, 2022.

Apêndice

Variáveis SMAP adotadas

Como mencionado em 3.2.4, a abstração inicial A_i necessária ao módulo chuva-vazão SMAP, assim como a capacidade de campo c_{apc} , podem ser definidas depois de conhecer o padrão de tipo de solo e uso e ocupação observados nas Bacias PCJ. Com o mapa pedológico de São Paulo obtido de Rossi (2017) e informações de cobertura disponibilizadas pela Coordenadoria de Planejamento Ambiental paulistana (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2022), verifica-se os seguintes padrões geográficos:

Figura 25: (À esquerda), tipos de solos observados nas Bacias; (à direita), perfis de uso e ocupação



Fonte: autor

Por meio de uma contagem de percentuais de áreas (vide tabela 9), constata-se que em Atibaia cerca de 58% de sua extensão é caracterizada por um solo tipo argissolo, enquanto em Valinhos 36% são argissolos e 38% são latossolos. Conforme orientam Lopes, Braga e Conejo (1982), para perfis predominantemente argilosos pode-se utilizar uma capacidade de campo de 50%. In-

clusive, como em Atibaia vê-se que 47% e 44% de sua cobertura superficial consistem em porções arbóreas e herbáceas arbustivas, enquanto em Valinhos estas proporções somam cerca de 34% e 49%, após consultar os referidos autores utilizou-se para abstração inicial o equivalente a 2.5 mm, próprio de coberturas vegetais tipo campo. A tabela abaixo sintetiza tais informações:

Tabela 9: Percentuais de área total conforme tipo de solo e cobertura superficial nas Bacias PCJ (complemento à [figura 25](#))

Solo [% de área total]			Cobertura vegetal [% de área total]		
Tipo	Atibaia	Valinhos	Tipo	Atibaia	Valinhos
Afloramento Rochoso	0.57	0.19	Área construída	4.86	9.25
Área Urbana	5.58	10.42	Área úmida	0.11	0.23
Argissolos	58.18	36.64	Cobertura arbórea	47.39	33.91
Cambissolos	11.53	10.37	Cobertura herbácea arbustiva	44.04	49.45
Gleissolos	6.72	4.15	Corpo d'água	0.41	0.90
Latossolos	17.22	38.17	Solo exposto	3.10	6.25
Neossolos	0.13	0.05	Sombra e nuvem	0.09	0.01
Rios, represas e lagoas	0.07	0.01			

Fonte: autor

Em relação à constante kkt de recessão do escoamento básico, [Lopes, Braga e Conejo \(1982\)](#) indicam a escolha de um valor tal que represente o tempo em dias em que a vazão básica observada nas sub-bacias cai a metade de seu valor inicial. Após testes com o modelo codificado, verificou-se que as capacidades de saturação ótimas, após calibração de 4 meses, seja em Atibaia ou Valinhos, assumem valores iguais ou superiores a 1,000 mm, o que favorece a escolha de uma constante igual a 60 dias (equivalente a uma recessão de vazões considerada “rápida”).

Para adotar valores de evapotranspiração potencial E_p , tomou-se como base o estudo da empresa [Irrigart Engenharia \(2017\)](#), contratada pela Agência das Bacias PCJ para elaboração de um plano diretor para recomposição florestal. Depois de selecionar o posto pluviométrico E3-074 de Atibaia (23°09' S e 46°33' O), a consultora estudou e levantou os seguintes dados mensais de temperatura e evapotranspiração (vide [tabela 10](#)). Os dados mensais consultados foram transformados conforme o número específico de dias para cada mês simulado, a fim de converter evapotranspirações mensais para diárias.

Tabela 10: Temperaturas médias e evapotranspirações potenciais mensais em Atibaia

Mês	Dias	Temperatura média [°C]	E_p mensal [mm]
Jan	30	24.8	128.42
Fev	28	25.3	122.55
Mar	31	24.5	120.21
Abr	30	23.0	93.13
Mai	31	19.3	57.88
Jun	30	18.4	47.50
Jul	31	18.2	47.48
Ago	31	19.7	59.41
Set	30	21.6	77.39
Out	31	23.6	105.95
Nov	30	23.9	111.51
Dez	31	24.8	131.31

Fonte: adaptado de [Irrigart Engenharia \(2017\)](#)

Parâmetros ajustados para evolução diferencial

A forma mais eficiente de justificar os parâmetros selecionados para uso com o algoritmo de evolução diferencial de calibração é contextualizando a ferramenta utilizada para tal. Visto que todos os códigos desta dissertação foram escritos em Python, recorreu-se a uma biblioteca robusta disponível *online* chamada *scipy*. Com ela, o autor utilizou um conjunto de códigos pré-escritos em uma função chamada `optimize.differential_evolution` ([THE SCIPY COMMUNITY, 2023](#)). Sua estrutura encontra-se destacada abaixo, assim como os parâmetros mais importantes:

```
scipy.optimize.differential_evolution(func, bounds, args=(),
    strategy='best1bin', maxiter=10, popsize=15, tol=0.01, mutation=(0.5,1),
    recombination=0.7, seed=None, callback=None, disp=False, polish=True,
    init='latinhypercube', atol=0, updating='immediate', workers=1, constraints=(),
    x0=None, *, integrality=None, vectorized=False)
```

O termo `func` corresponde ao coeficiente de Nash-Sutcliffe ajustado para minimizar o termo que é subtraído de 1. Em sua rotina, o modelo acoplado ora emprega 12 parâmetros para calibrar, ora 9, 3, ou 2. O método de evolução diferencial entende este número de variáveis como N .

`strategy`, por outro lado, diz respeito à lógica de mutação preferida, como explica [Cristina \(2023\)](#). A escolha de `best1bin` significa que o vetor selecionado junto à população, para ser perturbado ([SCHARDONG, 2011](#)), será aquele de menor custo (ou seja, “best”); o número de vetores para mutação será “1”; o tipo de cruzamento seguirá experimentos binomiais independentes (“bin”). `maxiter` igual a 10 ditará o número máximo de avaliações que o algoritmo aplicará sobre a função objetivo, equivalente a $(\text{maxiter} + 1) * \text{popsize} * N$.

O multiplicador `popsize`, que define o número de indivíduos em uma geração conforme a regra `popsize * N`, foi mantido em 15. O termo `tol`, igualado a 0.01 para definir o critério de convergência, também foi escolhido conforme sugere o método. Estes parâmetros, e também `mutation` (cujo intervalo é utilizado para combinar linearmente os vetores durante a mutação) e `recombination` (que indica a probabilidade de cruzamento de uma variável), não foram editados, seguindo os valores *default* indicados pelo método. De um modo geral, julgou-se adotar valores-padrão pois estes foram suficientes para uma convergência satisfatória, com a qual o modelo realizou as calibrações necessárias sem divergir ou resultar em erros numéricos.

Dados e *scripts*

Com o objetivo de garantir transparência científica e permitir àqueles interessados a reprodução deste estudo e suas simulações, divulga-se aqui o código-fonte, dados e resultados reunidos durante a modelagem realizada. Os *scripts* em Python encontram-se versionados em um repositório público armazenado no GitHub[®], enquanto os dados e resultados estão disponíveis na plataforma HydroShare.



Scripts



Dados e resultados