PEDRO LUDOVICO BOZZINI

DESEMPENHO DE SISTEMAS COMPLEXOS DE RESERVATÓRIOS
COM PREVISÃO DE VAZÃO DERIVADA DE MODELOS CLIMÁTICOS
REGIONAIS

São Paulo
2019

PEDRO LUDOVICO BOZZINI

DESEMPENHO DE SISTEMAS COMPLEXOS DE RESERVATÓRIOS
COM PREVISÃO DE VAZÃO DERIVADA DE MODELOS CLIMÁTICOS
REGIONAIS

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. Arisvaldo Vieira Mello Junior

São Paulo
2019

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, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Bozzini, Pedro Ludovico

Desempenho de sistemas complexos de reservatórios com previsão de
vazão derivada de modelos climáticos regionais / P. L. Bozzini -- versão corr.

- São Paulo, 2019.

83 p.

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

1.Modelagem de recursos hídricos 2.Otimização 3.Operação de reservatório
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de
Hidráulica e Ambiental II.t.

AGRADECIMENTOS

A concretização desse trabalho não seria possível sem o apoio de inúmeras pessoas que, direta ou indiretamente, me deram valiosas contribuições que me permitiram chegar até aqui. Registro aqui agradecimentos a alguns desses nomes.

A Deus, meu eterno guia e sustento.

Ao professor Arisvaldo, que me orientou durante toda a realização do projeto e, em meio a prazos e desafios envolvidos, não deixou de me apoiar em outros projetos realizados.

Ao professor Rubem, que foi um dos mentores e incentivadores desse projeto.

Ao André, que mesmo distante, se dispôs a ajudar e contribuir com sua experiência.

À Sabesp, por permitir o uso dos dados que figuram nesse trabalho.

Ao Joaquin, pelo apoio e pelas valiosas contribuições na qualificação.

À toda a equipe do LabSid, que me incentivou, apoiou e garantiu um ambiente saudável para o desenvolvimento deste trabalho. Mais do que colegas, somos parceiros! Em especial, agradeço ao Cristiano pela mentoria, pelas excelentes ideias e constante apoio na realização das tarefas, ao João, por compartilhar seu conhecimento para a modelagem, à Carla pelo apoio com os dados geoespaciais e inspiração na busca de melhores interfaces, ao Daniel pelo apoio na obtenção dos dados, à Camila por sempre me orientar quanto aos procedimentos e à Satie, por toda sua solicitude.

A todos os meus professores, que com sua dedicação me formaram e inspiraram para chegar nesse ponto. Em particular, à toda equipe do PHA com quem convivi ao longo desse mestrado. Agradeço especialmente ao professor Zambon, que me orientou durante toda a graduação e me inspirou a seguir essa área.

À Wandréa pela paciência com minhas inúmeras visitas à secretaria e apoio em todos os procedimentos.

À Ligia, pelo amor, companheirismo e apoio que me foram fundamentais.

À minha família, em especial aos meus pais, Yára e Angelino, minha irmã, Léa, e minha avó, Guiomar, que me formaram e apoiaram incondicionalmente.

Aos meus amigos, pelos constantes incentivos.

“Restrictions breed creativity.”
(Mark Rosewater)

RESUMO

A crescente demanda pelo uso da água, aliada à preocupação quanto aos impactos ambientais, sociais e econômicos provocados pela expansão da infraestrutura, reforça a importância de medidas de gestão que garantam um melhor aproveitamento das estruturas existentes. Nesse contexto, os modelos de simulação e otimização se apresentam como uma importante ferramenta de gestão. Apesar de amplamente discutidos na academia, tais modelos enfrentam alguma resistência na aplicação por parte de operadores dos sistemas. O trabalho propõe um sistema de suporte a decisões que auxilie a operação de sistemas de reservatório a partir de previsões oriundas de modelos climáticos regionais. Buscou-se utilizar, sempre que possível, ferramentas de acesso público e estruturar o modelo de forma que possa ser facilmente replicado. A metodologia foi aplicada ao sistema Cantareira, buscando otimizar as vazões descarregadas para as bacias PCJ, de acordo com a outorga de 2017. Foram analisadas previsões de chuva dos modelos climáticos ETA, WRF e BAM. As precipitações foram utilizadas como dado de entrada do modelo chuva-vazão SMAP, para geração de previsão de vazões. Essas vazões, por fim, serviram de insumo para um modelo de alocação de água, fornecendo como resultado diretrizes para a operação. As previsões apresentam consideráveis diferenças em relação aos dados observados, tendo maior correlação nos primeiros dias de previsão. Há também melhora da correlação ao se considerar a precipitação acumulada para o horizonte de previsão. A ferramenta proposta se mostrou adequada para modelar o problema e facilmente replicável a outros casos.

Palavras-chave: Sistema de suporte a decisões, Sistema Cantareira, previsão de precipitação, modelo climático regional, ETA, SMAP, AcquaNet

ABSTRACT

The ever growing demand for water resources, along with concerns about the environmental, social and economical impact of the infrastructure expansion, reinforces the importance of management measures to ensure a better use of existing facilities. In this context, simulation and optimization models are important tools in water resources management. Although widely discussed in academia, such models face some resistance in its use by the system operators. This research proposes a decision support system to aid the operation of reservoir systems based on rainfall forecast from regional climate models. Whenever possible, the system used public access tools and it was designed to be easily replicated. The methodology was applied to the Cantareira system in order to optimize the downstream flows towards the PCJ basins, according to 2017's regulation. Rainfall forecast from the ETA, WRF and BAM climate models were analyzed. The rainfall was used as input for the SMAP runoff model, producing flow forecasting. These flow series served as input to a water allocation model, providing guidelines for the operation. The rainfall forecasts present considerable differences from the observed data, with higher correlation for the first days of forecast. Correlation is also improved when considering the cumulative precipitation along the forecast range. The proposed tool presented itself as a useful way to model the problem and could be easily applied to other cases.

Key-words: Decision support system, Cantareira system, rainfall forecast, regional climatic model, ETA, SMAP, AcquaNet

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema da grade E de Arakawa com pontos de massa (h) e vento (v) (Chou, 1996).	18
Figura 2 – Área de abrangência do modelo ETA com resolução de 40km (Cataldi, 2007).	19
Figura 3 – Estrutura do modelo SMAP diário (adaptado de Lopes et al., 1982).....	22
Figura 4 – Topologia do Sistema Cantareira (Fonte: Adaptado de ANA/DAEE, 2017b)	30
Figura 5 – Localização esquemática dos postos de controle nas Bacias PCJ (adaptado de ANA/DAEE, 2017a).	34
Figura 6 – Organização do sistema de suporte a decisões proposto.....	36
Figura 7 – Ferramentas utilizadas de acordo com a estrutura proposta	36
Figura 8 –Bacias hidrográficas delimitadas no estudo.	37
Figura 9 – Exemplo de previsão do total precipitado em 24h do modelo ETA com resolução de 40 km.	41
Figura 10 – Relação entre as previsões do modelo ETA e observações do radar na bacia Jaguari/Jacareí.	46
Figura 11 - Relação entre as previsões do modelo WRF e observações do radar na bacia correspondente ao reservatório Jaguari/Jacareí.....	47
Figura 12 - Relação entre as previsões do modelo BAM e observações do radar na bacia correspondente ao reservatório Jaguari/Jacareí.....	48
Figura 13 – Correlação com as observações de radar em função do horizonte de previsão.....	53
Figura 14 - Relação entre as precipitações acumuladas previstas pelo modelo ETA e observadas pelo radar.....	54
Figura 15 - Relação entre as precipitações acumuladas previstas pelo modelo WRF e observadas pelo radar.....	55
Figura 16 - Relação entre as precipitações acumuladas previstas pelo modelo BAM e observadas pelo radar.....	56
Figura 17 - Calibração do SMAP para a bacia Jaguari/Jacareí.....	59
Figura 18 - Calibração do SMAP para a bacia Cachoeira	60

Figura 19 - Calibração do SMAP para a bacia Atibainha	61
Figura 20 - Calibração do SMAP para a bacia Paiva Castro.....	62
Figura 21 - Calibração do SMAP para a bacia correspondente ao Posto Buenópolis.	65
Figura 22 - Calibração do SMAP para a bacia correspondente ao Posto Atibaia.	66
Figura 23 - Calibração do SMAP para a bacia correspondente ao Posto Valinhos...	67
Figura 24 – Otimização das descargas para o ponto de controle do Posto Buenópolis.	68
Figura 25 – Previsão de vazão no ponto de controle do Posto Valinhos considerando descargas mínimas (sem otimização).	69
Figura 26 – Otimização das descargas para o ponto de controle do Posto Valinhos.	69
Figura 27 – Operação sugerida pelo modelo para atendimento da restrição em Valinhos.....	70
Figura 28 – Previsão de vazão para o ponto de controle do Posto Valinhos considerando as previsões do modelo WRF.....	71
Figura 29 – Operação sugerida pelo modelo ao se considerar a função objetivo que minimiza a descarga nas barragens.....	71
Figura 30 – Operação sugerida pelo modelo ao se considerar a função objetivo que minimiza a diferença entre a vazão no ponto e o limite da outorga.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo das características dos reservatórios do Sistema Cantareira (Fonte: ANA, 2015).	31
Tabela 2 – Resumo das características dos túneis de transferência do Sistema Cantareira (Fonte: ANA, 2015).	31
Tabela 3 - Estações telemétricas utilizadas na análise.	38
Tabela 4 - Valores de evapotranspiração potencial (mm) utilizados	39
Tabela 5 – Coeficiente de correlação de Pearson para as análises na bacia correspondente aos reservatórios Jaguarí/Jacaré.	49
Tabela 6 – Coeficiente de correlação de Pearson para análises na bacia correspondente ao reservatório Cachoeira.	49
Tabela 7 – Coeficiente de correlação de Pearson para análises na bacia correspondente ao reservatório Atibainha.	50
Tabela 8 – Coeficiente de correlação de Pearson para análises na bacia correspondente ao reservatório Paiva Castro.	50
Tabela 9 – Coeficiente de correlação de Pearson para análises na bacia correspondente ao reservatório ao Posto Buenópolis.	51
Tabela 10 – Coeficiente de correlação de Pearson para análises na bacia correspondente ao Posto Valinhos.	51
Tabela 11 – Coeficiente de correlação de Pearson para análises na bacia correspondente ao Posto Atibaia.	52
Tabela 12 – Coeficiente de correlação de Pearson para valores de precipitação acumulada.	53
Tabela 13 – Coeficiente de ajuste linear para análises de precipitação acumulada .	57
Tabela 14 – Parâmetros do método de Muskingum	63
Tabela 15 – Parâmetros do modelo SMAP calibrados para as bacias estudadas. ...	63

LISTA DE ABREVIATURAS

- ANA: Agência Nacional de Águas
- CN: Curve Number
- CPTEC: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
- DAEE: Departamento de Água e Energia Elétrica do Estado de São Paulo
- GIS: Geographic Information System (Sistema de Informação Geográfica)
- INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- NCEP: National Centers for Environmental Predictions
- NSE: Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe
- LabSid: Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões
- PCJ: Piracicaba, Capivari e Jundiaí
- RMSP: Região Metropolitana de São Paulo
- SCS: Soil Conservation Service
- SIM: Sistema Integrado Metropolitano
- SMAP: Soil Moisture Accounting Procedure

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 Previsão Climática: Modelo ETA.....	18
3.1.1 Previsão de tempo: Outros modelos.....	20
3.1.2 Avaliação das previsões de precipitação	21
3.2 Transformação chuva-vazão: Modelo SMAP	22
3.3 Propagação de cheias em rios: método de Muskingam	26
3.4 Alocação de água: Software AcquaNet.....	27
3.5 Sistema Cantareira	29
3.5.1 Características do sistema	29
3.5.2 Outorga do Sistema Cantareira.....	32
4 MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1 Definição das bacias hidrográficas.....	36
4.2 Levantamento de dados.....	38
4.2.1 Chuva e vazão observadas	38
4.2.2 Características do sistema de reservatórios.....	38
4.2.3 Evapotranspiração potencial	39
4.3 Obtenção das previsões de precipitação	40
4.4 Calibração do modelo chuva-vazão.....	42
4.5 Geração de séries de vazão.....	42
4.6 Elaboração e simulação da rede do modelo de alocação.....	43
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
5.1 Previsões de precipitação a partir de modelo climático	46
5.2 Modelo chuva vazão	58
5.3 Modelo de alocação de água.....	68
6 CONCLUSÕES	73
7 CONSIDERAÇÕES PARA PROJETOS FUTUROS	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural finito essencial à vida. A Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997) estabelece que a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas. O aumento da população e, por consequência, da necessidade de produção de alimentos, energia e bens de consumo provocam um aumento da demanda e dos conflitos pelo uso da água (SCHARDONG, 2009b). Soma-se a isso a crescente importância da questão ambiental, que traz à discussão os impactos causados pela expansão dos sistemas de aproveitamento dos recursos hídricos. Dessa forma, tornam-se cada vez mais importantes as medidas de gestão que permitem um melhor aproveitamento das estruturas existentes (LABADIE, 2004).

Nos últimos anos a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) tem convivido sob grande stress hídrico devido à impossibilidade de atender toda a demanda plenamente. A grande densidade populacional, a má conservação dos mananciais, a localização na região de cabeceira e o compartilhamento da água com a bacia PCJ contribuem para a criticidade do problema. Como descrito por Cunha (2008) a disponibilidade hídrica por habitante na bacia do Alto Tietê é de aproximadamente 200 m³/hab.ano, valor inferior aos registrados nos estados do Nordeste brasileiro e também bastante distante do recomendado pela ONU, que considera como situação crítica disponibilidades abaixo de 1500 m³/hab.ano.

A RMSP é abastecida atualmente por seis grandes sistemas produtores: Cantareira, Guarapiranga, Alto Tietê, Rio Grande, Rio Claro e Cotia. Juntos, eles possuem uma capacidade nominal de 73,2 m³/s. O sistema Cantareira, o maior deles, é responsável por grande parte dessa capacidade, com 33 m³/s de produção nominal (SABESP, 2009).

O sistema, projetado com base no período crítico observado entre 1953 e 1954, viveu um período ainda mais crítico nos anos de 2013 e 2014, colocando em risco o pleno abastecimento da RMSP e demandando medidas emergenciais (SABESP, 2015). Diante do ocorrido buscam-se alternativas operacionais que permitam um melhor desempenho do sistema em situações de crise, otimizando as decisões de retirada e descarga para minimizar o risco de falhas no abastecimento.

De acordo com Schardong (2010) 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 (SCHARDONG, 2009b). Yeh (1985) e Labadie (2004) fazem uma extensa revisão sobre modelos aplicados à operação e planejamento de sistemas de reservatórios. Essas ferramentas cresceram em importância, com aumento de sua utilização na gestão de recursos hídricos nas últimas décadas (SIMONOVIC, 2009).

Apesar da inegável importância e dos constantes avanços, autores relatam dificuldades na introdução do uso desses modelos na tomada de decisão, verificando resistência por parte dos operadores. Os modelos são muitas vezes de difícil utilização ou a interpretação dos resultados é muito complexa (GOULTER, 1992 e PEZIJ, 2019). Há pouca confiança nos resultados dos modelos frente aos métodos tradicionais de simulação (GOULTER, 1992 e PEZIJ, 2019), os operadores preferem operar com base na própria experiência (SHEPHERD E ORTOLANO, 1996 e PEZIJ, 2019).

Parte dessa resistência se deve ao pouco ou nenhum envolvimento dos operadores no desenvolvimento do modelo (YEH, 1985 e LABADIE, 2004). Em alguns casos existem poucos incentivos para buscar a solução ótima (LABADIE, 2004), os operadores buscam apenas minimizar os erros (SHEPHERD E ORTOLANO, 1996).

Para uma melhor aceitação dos modelos Goulter (1992) sugere o desenvolvimento de interfaces mais intuitivas e amigáveis com o usuário. Shepherd e Ortolano (1996) e Labadie (2004) sugerem sistemas que, além da otimização, permitam ao usuário avaliar suas propostas de operação. Assim, facilita-se o ganho de confiança na ferramenta e permite que seja usada no treinamento de novos operadores.

Nesse sentido, modelos estocásticos são bastante complexos para uso pelos operadores dos reservatórios e a qualidade das previsões é alvo de críticas (BARROS, 2009). Os modelos atmosféricos globais e regionais são, atualmente, importantes ferramentas no estudo de sistemas de recursos hídricos (SCHARDONG, 2014) e apresentam-se como uma possível alternativa para a melhoria da operação,

permitindo a tomada de decisão com base em informações para um maior horizonte de tempo.

Este trabalho combina ferramentas de previsão de chuva e alocação de água para simular e otimizar a operação do Sistema Cantareira. Propõe-se um método que seja de fácil replicação, permitindo análises similares utilizando as ferramentas mais adequadas a cada caso. Espera-se que o estudo auxilie no desenvolvimento de uma ferramenta de boa aceitação e fácil utilização pelos operadores.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é propor um sistema de suporte a decisões que auxilie a operação de sistemas de abastecimento de água com base em previsões de modelos climáticos. A ferramenta será utilizada para avaliar a operação do Sistema Cantareira.

Considerando a variedade de modelos atmosféricos, hidrológicos e de alocação disponíveis e as diferentes abordagens que se podem utilizar, esse trabalho baseia-se nas seguintes premissas:

- O sistema deve ser modular, de modo que cada componente possa ser facilmente substituído por outro que o usuário julgar mais adequado para seu estudo de caso, sem prejuízo aos demais componentes;
- Os modelos e dados aqui utilizados devem, sempre que possível, ser de livre acesso e fácil obtenção e utilização, de modo que a análise realizada possa ser facilmente replicável para outras regiões;
- O método proposto deve levar em consideração a possibilidade de uso por parte dos operadores.

Assim, definem-se como objetivos específicos desta pesquisa:

- Definir previsões diárias de precipitação nas bacias do Sistema Cantareira a partir de resultados de um modelo atmosférico (ETA com resolução de 40 km, horizonte de 10 dias e rodadas diárias);
- Calibrar um modelo chuva-vazão (SMAP) para as bacias estudadas e utilizá-lo para obter previsões diárias de vazão nessas bacias;
- Elaborar uma rede de fluxo do Sistema Cantareira em modelo de alocação de água (AcquaNet) e avaliar seu desempenho ao utilizar como dado de entrada as vazões obtidas a partir das previsões do modelo climático.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Previsão Climática: Modelo ETA

O Modelo ETA foi desenvolvido pela Universidade de Belgrado e o Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia, entrando em operação no National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (Mesinger et al., 1988; Black, 1994). No Brasil, o modelo é mantido pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) que o utiliza para complementar a previsão numérica desde 1996 (Chou, 1996), tendo passado por diversas melhorias (Messinger et al., 2012).

Segundo Chou (1996), sendo um modelo regional, o ETA se propõe a prever de forma mais detalhada fenômenos associados a sistemas de mesoescala, como frentes, tempestades severas e decorrências da orografia.

O ETA é um modelo de ponto de grade. Na horizontal as equações são discretizadas para uma grade E de Arakawa (Arakawa e Lamb, 1977), como mostra a Figura 1. A resolução do modelo é dada pela distância (d) entre dois pontos adjacentes de massa (h) ou vento (v).

Figura 1 - Esquema da grade E de Arakawa com pontos de massa (h) e vento (v) (Chou, 1996).

Na vertical é utilizada a coordenada η (eta) proposta por Mesinger (1984, apud Mesinger, 1988), definida como:

$$\eta = \frac{p - p_t}{p_s - p_t} \left[\frac{p_{ref}(z_s) - p_t}{p_{ref}(0) - p_t} \right] \quad (1)$$

Onde z_s é a altitude da superfície e p é a pressão atmosférica. O índice s se refere à superfície, o índice t ao topo da atmosfera e o índice ref ao valor da pressão de uma atmosfera de referência. Essa coordenada é uma das principais características do modelo. Suas superfícies são aproximadamente horizontais, reduzindo assim os erros associados a derivadas horizontais, que tendem a ser elevados em regiões íngremes, como os Andes na América do Sul (Chou, 1996; Messinger, 1988).

O modelo utiliza como condições iniciais a análise do modelo global do NCEP. Essa análise é processada no modelo global do CPTEC para definir as condições de contorno ao longo da simulação (Chou, 1996; Cataldi, 2007; Moura, 2010). Os resultados, para a resolução de 40 km, são disponibilizados a cada 12 horas e com um horizonte de previsão de 10 dias. Dentre as variáveis disponíveis estão a temperatura, precipitação, pressão atmosférica, velocidade do vento e umidades relativa e específica. O domínio do modelo abrange quase toda a América do Sul, como mostra a Figura 2.

Figura 2 – Área de abrangência do modelo ETA com resolução de 40km (Cataldi, 2007).

A análise de Moura (2010) verificou que o modelo tende a superestimar as precipitações nas primeiras 24 horas, sendo esse desvio maior principalmente na região Norte do Brasil. O trabalho de Cataldi (2007) constatou que o modelo tende a

subestimar precipitações mais intensas (superior a 10 mm). O autor explica o fato pela relação entre a resolução do modelo e as dimensões desses eventos, que costumam ocorrer em poucos quilômetros.

Cataldi (2007) afirma em seu trabalho que as previsões de precipitação do modelo ETA são potencialmente úteis para a previsão de vazões. Outros trabalhos também aplicaram as previsões de precipitação do ETA para a previsão de vazões, como Collischonn (2007) e Barros (2009), e para aplicações na agricultura (VIEIRA JUNIOR, 2009).

3.1.1 Previsão de tempo: Outros modelos

No momento em que este trabalho foi escrito, as previsões do modelo ETA não estavam mais disponíveis ao público. Esse modelo foi o foco da maior parte do trabalho e a maioria das análises se baseia em suas previsões. No entanto, buscando manter-se fiel à premissa de utilizar dados públicos, foram avaliadas as previsões de dois outros modelos climáticos.

O Modelo Atmosférico Brasileiro (BAM – Brazilian Atmospheric Model) é um modelo global operado pelo CPTEC/INPE desde 2016. Seus resultados são utilizados como condição inicial de modelos regionais (INPE, 2016). O modelo é descrito em detalhes por Figueroa (2016), que apresenta o BAM como uma solução para deficiências verificadas em modelos utilizados anteriormente. Dentre as vantagens do modelo, Figueroa destaca a melhora na previsão para a região sudeste do Brasil.

O Weather Research and Forecasting Model (modelo WRF) foi desenvolvido num esforço conjunto de agências e universidades americanas para dar suporte à pesquisa e aplicações operacionais. O modelo, em sua terceira versão, é descrito em detalhes por Skamarock (2018). No Brasil, o modelo, que já era utilizado por alguns órgãos, teve sua operação adotada pelo INPE na ocasião das Olimpíadas de 2016, para prover previsões de onda e corrente (INPE, 2016). Desde então, tem sido aplicado em diversos estudos (Cardoso, 2018; Pellegrini, 2019; Loriato, 2018).

Além dos modelos descritos, existem outros com previsões disponíveis de acesso público. Esses modelos não foram objeto de estudo neste trabalho, mas ficam registrados como sugestão para outras pesquisas. São eles: o modelo COSMOS, do

INMET (INMET, 2019), o modelo GFS do NOAA (NOAA, 2019) e o modelo canadense GEM (RPN, 2019).

3.1.2 Avaliação das previsões de precipitação

Diversos métodos são utilizados para avaliar a qualidade das previsões de precipitação. Neste estudo, foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson. Esse coeficiente é uma medida da relação linear entre duas variáveis aleatórias (por exemplo, x – série de precipitações observadas e y – série de precipitações previstas). Kessler (1994) indica o coeficiente para analisar a relação entre duas formas de se estimar uma mesma grandeza, como é o caso da precipitação medida por um pluviômetro ou por um radar. O coeficiente pode ser calculado de acordo com a equação:

$$r = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}} \quad (2)$$

A interpretação do coeficiente requer cautela. Segundo Habib (2001), o coeficiente é sensível a valores extremos e parte da premissa de que as variáveis são normalmente distribuídas. A interpretação da magnitude da correlação pode ser feita através de categorias apresentadas na literatura (Taylor, 1990 e Mukaka, 2012), indicando correlação moderada para valores de r acima de 0,5, correlação forte para valores acima de 0,7 e muito forte para valores acima de 0,9. Apesar dessas faixas-guia, a mera interpretação do valor de r é insuficiente sem conhecer a natureza dos dados, tamanho da amostra e outros fatores que ajudem a interpretar a relação das variáveis (Taylor, 1990).

Neste trabalho, a relação entre as variáveis é conhecida. Sendo diferentes estimativas de uma mesma grandeza, as variáveis, plotadas uma em função da outra, deveriam se alinhar em uma reta de 45° ($y = x$) num cenário de medições perfeitas (Kessler 1994). Assim, pode-se avaliar a dispersão dos valores previstos em relação aos observados, ajustando-se uma reta com intersecção na origem ($y = a \cdot x$). Sendo y o valor previsto e x o observado, temos que para $a > 1$, existe tendência de a previsão superestimar o valor observado. Para $a < 1$, existe tendência de a previsão subestimar o valor observado.

3.2 Transformação chuva-vazão: Modelo SMAP

O Soil Moisture Accounting Procedure (SMAP) é um modelo chuva-vazão proposto por Lopes et al. (1982). Os autores descrevem que os modelos hidrológicos disponíveis à época eram bastante complexos e dependiam de uma grande abundância e detalhamento de dados. Buscando atender a regiões onde a disponibilidade de dados era escassa, o SMAP é apresentado como um modelo simplificado: com poucos parâmetros, tendo essas relações com características físicas da bacia hidrográfica, e com funções de transferência preferencialmente lineares, buscando facilitar o processamento computacional do modelo.

É um modelo determinístico, concentrado e conceitual, segundo a classificação de Tucci (1998). A versão originalmente proposta, e utilizada nesse trabalho, considera uma discretização diária dos dados. Existem também versões considerando discretização horária e mensal. Na formulação diária apresentada por Lopes (1982) os processos são modelados através de três reservatórios lineares representando o armazenamento na superfície (Rsup), na camada superior do solo (Rsolo) e no aquífero subterrâneo (Rsub), conforme ilustra a Figura 3.

Figura 3 – Estrutura do modelo SMAP diário (adaptado de Lopes et al., 1982).

O escoamento superficial (Es) é baseado no método Curve Number (CN) do Soil Conservation Service (SCS). A formulação para os dados em milímetros (mm) é:

$$Es = \begin{cases} 0, & \text{se } P \leq AI \\ \frac{(P-AI)^2}{P-AI+S}, & \text{se } P > AI \end{cases} \quad (3)$$

$$S = 25,4 * \left(\frac{25400}{CN} - 254 \right) \quad (4)$$

Onde:

Es: escoamento superficial (mm);

P: precipitação (mm)

Al: Abstração inicial, parcela da chuva retida pela bacia antes que seja verificado o escoamento superficial (mm);

S: Abstração potencial (mm);

CN: Parâmetro relacionado com o solo, vegetação e condição de umidade da bacia.

Na prática, a equação anterior é simplificada e calculada em função da saturação e do armazenamento no solo:

$$S = Str - R_{solo} \quad (5)$$

Onde:

R_{solo}: armazenamento do reservatório superior do solo (mm);

Str: Saturação do solo (mm)

A cada passo de tempo o armazenamento no reservatório superficial é dado pela diferença entre o escoamento superficial (Es) e o escoamento direto (Ed):

$$R_{sup}(t + 1) = R_{sup}(t) + Es - Ed \quad (6)$$

$$Ed = R_{sup} * (1 - K2) \quad (7)$$

$$K2 = 0,5^{\frac{1}{K2t}} \quad (8)$$

Onde:

R_{sup}: armazenamento do reservatório superficial (mm);

Ed: escoamento direto (mm);

K2t: constante de recessão do escoamento superficial, equivalente ao número de dias em que a vazão cai pela metade na ausência de vazão de entrada (dias).

De forma análoga, o armazenamento no reservatório do solo (R_{solo}) é dado por:

$$R_{solo}(t + 1) = R_{solo}(t) + P - Es - Er - Rec \quad (9)$$

Onde:

(P - Es): parcela da chuva que infiltra no solo (mm);

Er: Evapotranspiração real (mm);

Rec: Recarga subterrânea (mm).

A evapotranspiração real é calculada da seguinte forma:

$$Er = \begin{cases} Ep, & \text{se } (P - Es) \geq Ep \\ (P - Es) + (Ep - (P - Es)) * Tu, & \text{se } (P - Es) < Ep \end{cases} \quad (10)$$

$$Tu = \frac{Rsolo}{Str} \quad (11)$$

Onde:

Ep: Evapotranspiração potencial (mm);

Tu: Teor de umidade do solo;

Str: Saturação do solo (mm)

Já a recarga do aquífero (Rec) é dada por:

$$Rec = \begin{cases} Crec * Tu * (Rsolo - (Capc * Str)), & \text{se } Rsolo \geq (Capc * Str) \\ 0, & \text{se } Rsolo < (Capc * Str) \end{cases} \quad (12)$$

Onde:

Capc: Capacidade de campo (%);

Crec: Coeficiente de recarga do reservatório subterrâneo (%)

Por fim, o armazenamento no aquífero (Rsub) é dado por:

$$Rsub(t + 1) = Rsub(t) + Rec - Eb \quad (13)$$

Onde Eb é o escoamento básico (mm), dado por:

$$Eb = Rsub * (1 - Kk) \quad (14)$$

$$Kk = 0,5^{\frac{1}{Kkt}} \quad (15)$$

Onde:

Kkt: Constante de recessão do escoamento básico, equivalente ao número de dias em que a vazão cai pela metade (dias).

Para a inicialização do modelo devem ser fornecidos o teor de umidade inicial e o Escoamento básico inicial. Assim, os valores iniciais do modelo são:

$$\begin{cases} R_{sup}(1) = 0 \\ R_{solo}(1) = T_{uin} * Str \\ R_{sub}(1) = \frac{E_{bin} * 86,4}{(1 - Kk) * Ad} \end{cases} \quad (16)$$

Onde:

Ad: Área de drenagem da bacia (km²);

Ebin: Escoamento básico inicial (m³/s);

Tuin: Teor de umidade inicial (%);

A vazão no exutório da bacia é calculada por:

$$Q = \frac{(Eb + Ed) * Ad}{86,4} \quad (17)$$

O modelo pode ser facilmente implementado em uma planilha de cálculo, embora existam também softwares que o incorporam. A calibração do modelo pode ser realizada de forma manual, automática ou semi-automática, onde a experiência do modelador é combinada com um algoritmo de otimização. Schardong (2009a) analisa uma série de algoritmos e apresenta um software para realizar a calibração automática do modelo, o SMAP.net, disponível para download na página do LabSid¹.

Para a avaliação da aderência do modelo à realidade, pode-se usar o coeficiente de eficiência do modelo de Nash-Sutcliffe (NSE) (NASH E SUTCLIFFE, 1970). O coeficiente compara o poder de predição do modelo em relação ao poder de predição da média. O NSE varia de $-\infty$ a 1. O valor 0 indica que o modelo explica a variável com mesma acurácia que a média. Valores positivos indicam melhor explicação por parte do modelo e valores negativos indicam que a variável é melhor explicada pela média.

¹ Disponível em <http://labsid.eng.br/software.aspx?id=13>

O coeficiente é calculado da seguinte forma:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q_{calc}^t - Q_{obs}^t)^2}{\sum_{t=1}^N (Q_{obs}^t - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (18)$$

Onde:

Q_{calc}^t : Vazão calculada pelo modelo no instante t ;

Q_{obs}^t : Vazão observada no instante t ;

$\overline{Q_{obs}}$: Vazão observada média.

3.3 Propagação de cheias em rios: método de Muskingam

Para as bacias a jusante das represas, a vazão no exutório não é função apenas da precipitação e características da região, mas também da operação dos reservatórios. O modelo chuva-vazão é utilizado para calcular as vazões incrementais em cada bacia, mas é necessário levar em conta as descargas em cada barragem. Considerando a distância entre as barragens e os pontos de controle e que a modelagem será realizada com discretização diária, um modelo para propagação da vazões ao longo do canal, acoplado ao modelo chuva-vazão, é essencial para se obter melhores resultados.

O método de Muskingam considera o armazenamento e baseia-se na equação da continuidade, indicando que a variação do armazenamento no canal é resultado da diferença entre as vazões no início e final do trecho (COLLISCHONN, 2013).

O método, conforme descrito por Collischonn (2013), depende apenas das vazões no início (I) e final (Q) do trecho, do intervalo de tempo (Δt), do tempo de trânsito ao longo do trecho do pico da onda de cheia (K) e de um fator de amortecimento adimensional (X). A vazão ao final de um trecho num determinado instante é uma média ponderada e pode ser calculada por:

$$Q_{t+\Delta t} = C1 * I_{t+\Delta t} + C2 * I_t + C3 * Q_t \quad (19)$$

Onde:

$Q_{t+\Delta t}$: vazão ao final do trecho no instante $t + \Delta t$;

$I_{t+\Delta t}$: vazão no início do trecho no instante $t + \Delta t$;

Q_t : vazão ao final do trecho no instante t ;

I_t : vazão no início do trecho no instante t .

Os pesos da ponderação ($C1$, $C2$ e $C3$) são calculados de acordo com as seguintes equações:

$$C1 = \frac{\Delta t - 2 * K * X}{2 * K * (1 - X) * \Delta t} \quad (20)$$

$$C2 = \frac{\Delta t + 2 * K * X}{2 * K * (1 - X) * \Delta t} \quad (21)$$

$$C3 = \frac{2 * K * (1 - X) - \Delta t}{2 * K * (1 - X) * \Delta t} \quad (22)$$

Satisfazendo:

$$C1 + C2 + C3 = 1 \quad (23)$$

Onde:

X: fator de amortecimento (adimensional);

K: tempo de trânsito do pico da onda de cheia (dias)

Δt : passo de tempo (dias).

3.4 Alocação de água: Software AcquaNet

O AcquaNet é um sistema de suporte a decisões desenvolvido pelo Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LabSid). Apresentado por Porto et al. (2003 e 2005), o software dispõe de um conjunto de modelos matemáticos desenvolvidos para analisar diferentes problemas relacionados ao aproveitamento de recursos hídricos. O software está disponível para download gratuito na página do LabSid² e é amplamente utilizado em estudos atuais (Farias, 2017; Faro, 2017; Lambiasi, 2017).

O software possui uma estrutura modular, permitindo resolver problemas de natureza diversa. É composto por um módulo base e módulos para análise de alocação de água, qualidade da água, irrigação, geração de energia elétrica e consideração de valores econômicos nas decisões de alocação.

Os módulos consistem em modelos de redes de fluxo, compostas por nós e arcos. Os nós podem representar reservatórios, demandas, pontos de controle e

² Disponível em <http://labsid.eng.br/software.aspx?id=14>

outros elementos de um sistema, enquanto os arcos representam as ligações entre esses nós, como trechos de rios, túneis de transferência, adutoras e similares. De acordo com Porto et al. (2005), o algoritmo busca minimizar o custo do transporte do fluxo através dos arcos, respeitando as restrições de transferências máxima e mínima, além de outras restrições da rede. A função objetivo é linear e pré-definida no sistema, seguindo a seguinte equação:

$$\text{Min } \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{ij} * q_{ij} \quad (24)$$

Atendendo à restrição de continuidade e conservação de massa:

$$\sum_{i \in I_j} q_{ij} - \sum_{k \in O_j} q_{jk} = 0 \quad (25)$$

E às restrições de vazão máxima e mínima em cada arco:

$$I_{ij} \leq q_{ij} \leq U_{ij} \quad (26)$$

Onde:

q_{ij} : vazão média entre o nó i e o nó j durante o intervalo de tempo considerado;

c_{ij} : custo (associado à prioridade) por unidade de vazão transferida entre os nós

i e j

N : número total de nós na rede

I_j : conjunto de todos os nós com arcos que se originam no nó i ;

O_j : conjunto de todos os nós com arcos que se originam no nó j ;

I_{ij} : vazão mínima no arco (i,j) ;

U_{ij} : vazão máxima no arco (i,j) .

O software possui uma interface gráfica simples, intuitiva e devidamente documentada, permitindo a modelagem de problemas complexos com relativa facilidade. (LabSid, 2015).

3.5 Sistema Cantareira

3.5.1 Características do sistema

O Sistema Integrado Metropolitano (SIM) da Sabesp é responsável pelo abastecimento de água de 35 dos 39 municípios da Região Metropolitana de São Paulo, atendendo cerca de 20 milhões de habitantes. O SIM é composto pelos Sistemas Produtores: Alto e Baixo Cotia, Alto Tietê, Guarapiranga, Rio Claro, Rio Grande, Ribeirão da Estiva, Embú-Guaçu e Cantareira (SABESP, 2015).

O Sistema Cantareira é o maior sistema produtor da RMSP (SABESP, 2018), contribuindo com 33 m³/s para a RMSP, abastecendo 8,8 milhões de pessoas nas zonas norte, central, leste e oeste da capital e nos municípios de Franco da Rocha, Francisco Morato, Caieiras, Guarulhos, Osasco, Carapicuíba, Barueri, Taboão da Serra, Santo André e São Caetano do Sul (ANA, 2016). É responsável por 47% da demanda da RMSP e 65% da demanda da capital (informação referente a dezembro de 2013) (SABESP, 2015).

Formado por uma série de reservatórios, túneis e canais, o sistema Cantareira desvia água de alguns cursos d'água da bacia do Rio Piracicaba para a bacia do rio Juqueri, na bacia do Alto Tietê (ANA, 2016). A topologia do sistema é apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Topologia do Sistema Cantareira (Fonte: Adaptado de ANA/DAEE, 2017b)

As represas Jaguari, Jacaré, Cachoeira e Atibainha estão localizados em cursos d'água homônimos, afluentes do rio Piracicaba. Os reservatórios Jaguari e Jacaré possuem um canal de interligação, de modo que funcionam conjuntamente como um único reservatório (ANA, 2015). Através dos Túneis 7, 6 e 5 a água é levada para o reservatório Paiva Castro, no Rio Juqueri, de onde é aduzida para o reservatório de Águas Claras, através da Estação Elevatória de Santa Inês. A seguir, a água é levada para a ETA Guaraú de onde, uma vez tratada, segue para a RMSP.

A Tabela 1 e a Tabela 2 reúnem as principais informações das estruturas do Sistema Cantareira.

Tabela 1 – Resumo das características dos reservatórios do Sistema Cantareira (Fonte: ANA, 2015).

	Jaguari/Jacareí	Cachoeira	Atibainha	Paiva Castro
Volume Total (hm³)	1.047,55	116,56	290,19	32,94
Volume Útil (hm³)	808,12	69,75	95,26	7,61
NA máximo maximorum (m)	845,11	825,21	788,02	749,44
NA máximo normal (m)	844,00	821,88	786,72	745,61
NA mínimo normal (m)	820,80	811,72	781,88	743,80
NA mínimo minimorum (m)	818,00	808,35	777,90	743,00

Tabela 2 – Resumo das características dos túneis de transferência do Sistema Cantareira (Fonte: ANA, 2015).

	Túnel 7	Túnel 6	Túnel 5
Ligação	Jacareí – Cachoeira	Cachoeira – Atibainha	Atibainha – Paiva Castro
Tipo	Torre de concreto com tomada d'água seletiva com 6 aberturas dispostas simetricamente em 3 pares	Estrutura de concreto com comporta de setor instalada na margem do reservatório	Estrutura de concreto com comporta de setor instalada na margem do reservatório
Dimensões da abertura da comporta	Largura: 1,5 m Altura: 8,0 m	Largura: 2,63 m Altura: 2,89 m	Largura: 2,61 m Altura: 3,37 m
Cota da soleira da abertura da comporta	Abertura 1 e 2: 818,0 m Abertura 3 e 4: 827,0 m Abertura 5 e 6: 836,0 m	808,35 m	775,25 m

3.5.2 Outorga do Sistema Cantareira

Segundo a ANA (2017), a vazão retirada para a RMSP do Sistema Cantareira era regido pela outorga concedida em 2004 pelo Departamento de Água e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE). Com prazo até 2014, a renovação da outorga foi adiada por conta regime hidrológico atípico registrado em 2014 e 2015, quando as vazões afluentes foram as mais baixas desde 1930. Assim, a outorga vigente à época foi estendida até 2017, quando foram emitidas resoluções conjuntas ANA/DAEE que concedem a outorga e dão diretrizes para a operação do sistema Cantareira.

A outorga atualmente vigente para o Sistema Cantareira foi definida através da resolução conjunta ANA/DAEE nº 926 (ANA/DAEE, 2017b). Segundo o documento, foi outorgada a retirada da vazão máxima média mensal de 33 m³/s para a RMSP. O documento estabelece uma série de contrapartidas por parte da SABESP, como investimentos na rede de postos de chuva e vazão, planos de operação no período de cheias e de seca, plano de gestão da demanda, contemplando controle de perdas e incentivo ao reúso, monitoramento da qualidade da água, entre outras.

A operação do sistema segundo a outorga é regulamentada pela resolução conjunta ANA/DAEE nº 925 (ANA/DAEE, 2017a). A resolução considera, para fins de cálculo de volume e vazão retirada do Sistema Cantareira, os reservatórios Jaguari/Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro. Ficam definidas as seguintes vazões mínimas instantâneas a jusante das barragens:

- Descarga para jusante do reservatório Paiva Castro, no rio Juqueri: 0,10 m³/s.
- Descarga para jusante dos reservatórios Jaguari/Jacareí, no rio Jaguari: 0,25 m³/s.
- Descarga para jusante dos reservatórios Cachoeira/Atibainha no rio Atibaia: 0,25 m³/s.

O documento define dois períodos hidrológicos, para guiar a operação:

- Período Úmido: de 1º de Dezembro de um ano a 31 de Maio do ano seguinte.
- Período Seco: de 1º de Junho a 30 de Novembro do mesmo ano.

A resolução também determina faixas de operação, que determinam o estado do sistema em função do volume total armazenado:

- Faixa 1: Normal – Volume útil acumulado maior ou igual a 60%.
- Faixa 2: Atenção – Volume útil acumulado maior ou igual a 40% e menor que 60%.
- Faixa 3: Alerta – Volume útil acumulado maior ou igual a 30% e menor que 40%.
- Faixa 4: Restrição – Volume útil acumulado maior ou igual a 20% e menor que 30%.
- Faixa 5: Especial – Volume útil acumulado menor que 20%.

Assim, a vazão de retirada para a RMSP segue os seguintes limites máximos médios mensais:

- Faixa 1: Normal – 33,0 m³/s
- Faixa 2: Atenção – 31,0 m³/s
- Faixa 3: Alerta – 27,0 m³/s
- Faixa 4: Restrição – 23,0 m³/s
- Faixa 5: Especial – 15,5 m³/s

Na operação nas faixas 2, 3 e 4 o limite é acrescido da vazão transposta da bacia do rio Paraíba do Sul. Em casos especiais as vazões de retirada podem ser revistas pelos órgãos gestores.

As vazões descarregadas para as Bacias PCJ (Piracicaba, Capivari e Jundiá), a jusante das barragens do Sistema Cantareira, são função do período hidrológico e da faixa de operação em que o sistema se encontra. As descargas devem atender a restrições de vazão mínima em postes de controle definidos na resolução, indicados na Figura 5.

Figura 5 – Localização esquemática dos postos de controle nas Bacias PCJ (adaptado de ANA/DAEE, 2017a).

Para o período úmido, valem as seguintes restrições:

- Faixas 1 e 2: vazão média móvel de 15 dias mínima de 12,0 m³/s no posto de controle de Captação de Valinhos, no rio Atibaia; de 3,0 m³/s no posto de controle de Atibaia, no rio Atibaia, e de 2,5 m³/s no posto de controle de Buenópolis, no rio Jaguari.
- Faixas 3 e 4: vazão média móvel de 15 dias mínima de 11,0 m³/s no posto de controle de Captação de Valinhos, no rio Atibaia; de 2,0 m³/s no posto de controle de Atibaia, no rio Atibaia, e de 2,0 m³/s no posto de controle de Buenópolis, no rio Jaguari.

Em ambos os casos a vazão média diária não pode ser inferior a 10,0 m³/s em Valinhos, 2,0 m³/s em Buenópolis e 2,0 m³/s em Atibaia.

No período seco, estando a operação nas faixas 1, 2, 3 ou 4, fica garantida às Bacias PCJ uma vazão média de 10,0 m³/s durante todo o período, equivalente a um volume de 158,1 hm³. Esse volume é liberado de acordo com solicitação das Bacias PCJ ao DAEE, atendendo às restrições de descarga mínima de cada represa e das vazões mínimas diárias em cada posto de controle.

Quando o sistema Cantareira estiver operando na faixa 5, independente do período hidrológico, vale a restrição de vazão mínima diária de 10,0 m³/s no posto de controle Captação de Valinhos, e de 2,0 m³/s no posto de controle de Buenópolis.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema de suporte a decisões proposto neste estudo consiste no acoplamento de três modelos distintos: um modelo de previsão de chuva, um modelo hidrológico de transformação chuva-vazão e um modelo de alocação de água. Cada modelo interage com os outros como modelos “caixa-preta”, ou seja, para um modelo são importantes as variáveis de entrada e saída dos demais, não o funcionamento interno de cada um. Assim, o sistema possui uma característica modular, como determinado nas premissas deste trabalho. A organização da ferramenta é apresentada na Figura 6 e as ferramentas utilizadas em cada caso estão listadas na Figura 7.

Figura 6 – Organização do sistema de suporte a decisões proposto.

Figura 7 – Ferramentas utilizadas de acordo com a estrutura proposta

4.1 Definição das bacias hidrográficas

A delimitação da região de estudo é o primeiro passo para a aplicação do método. A partir dela serão levantadas as informações necessárias para cada modelo.

A área deve englobar todas as estruturas de interesse e suas respectivas bacias hidrográficas.

Para o estudo de caso deste trabalho foram consideradas as represas Jaguari/Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro. Assim, englobam a região de estudo as bacias hidrográficas de cada reservatório, bem como a região a jusante das represas Jaguari/Jacareí, Cachoeira e Atibainha, onde encontram-se os postos de controle descritos nas regras de operação.

As bacias foram delimitadas a partir da Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2013 (ANA, 2013). As bacias foram agregadas de modo que cada estrutura de interesse estivesse associada a uma única bacia hidrográfica, embora esta não corresponda, necessariamente, a uma bacia ottocodificada. A delimitação das bacias é apresentada na Figura 8.

Figura 8 –Bacias hidrográficas delimitadas no estudo.

4.2 Levantamento de dados

4.2.1 Chuva e vazão observadas

Para fins de avaliação da previsão de chuva, calibração e validação do modelo chuva-vazão e avaliação dos resultados do modelo de alocação de água são necessárias informações de chuva e vazão observadas na região de estudo.

Para este estudo foram selecionadas estações telemétricas com pluviometria e fluviometria a montante de cada reservatório, a fim de aferir a vazão afluente a cada um deles, e os postos de controle descritos na resolução conjunta que regulamenta as descargas para as Bacias PCJ. A Tabela 3 indica os postos telemétricos utilizados.

Além dos dados de chuva das estações telemétricas, também foram obtidas observações realizadas com o radar meteorológico. Os valores levantados representam a chuva média em cada bacia, computada a partir das observações do radar meteorológico de Ponte Nova. Esses dados foram fornecidos pela SABESP.

Tabela 3 - Estações telemétricas utilizadas na análise.

Localização	Código	Posto	Fonte
Jaguari/Jacareí	F-25B	Rio Jaguari	DAEE
Cachoeira	3E-121	Rio Cachoeira em Piracaia	DAEE
Atibainha	3E-122	Rio Atibainha em Piracaia	DAEE
Paiva Castro	62346000	Paiva Castro Montante	ANA
Ponto de Controle – Atibaia	3E-063	Rio Atibaia em Atibaia	DAEE
Ponto de Controle – Buenópolis	3D-009	Rio Jaguari em Buenópolis	DAEE
Ponto de Controle – Valinhos	3D-007	Rio Atibaia Captação Valinhos	DAEE

Os dados possuem periodicidade variada. Todos, porém, foram consolidados na forma de médias e totais diários, a fim de uniformizar o intervalo de tempo e permitir a utilização dos modelos com discretização diária.

4.2.2 Características do sistema de reservatórios

Para a elaboração da rede de fluxo são necessárias informações sobre as estruturas que compõe o sistema de reservatórios. É preciso dispor dos níveis

máximos e mínimos, volumes operacionais e totais, curvas cota x volume e cota x área (caso seja considerada evaporação), curvas guia e informações das estruturas de descarga e transferência. Também são necessárias as demandas de retirada, as regras operativas que regem cada represa e quaisquer outras características relevantes para a operação do sistema..

Neste estudo, tais dados foram obtidos através das resoluções dos órgãos reguladores (ANA/DAEE, 2017a e ANA/DAEE, 2017b), que definem as restrições operativas do Sistema Cantareira, e documentos contendo o descritivo das principais estruturas que formam o sistema (ANA, 2016 e SABESP, 2015).

4.2.3 Evapotranspiração potencial

Para o cálculo da evapotranspiração real, no modelo SMAP, foram considerados os valores de evapotranspiração potencial descritos na Tabela 4. Esses valores foram obtidos através da plataforma Ciiagro Online (CIIAGRO, 2019), considerando o município em que a maior parcela da área da bacia está inserida.

Tabela 4 - Valores de evapotranspiração potencial (mm) utilizados

Mês	Evapotranspiração potencial (mm)						
	Jaguari	Cachoeira	Atibainha	Paiva Castro	Posto Buenópolis	Posto Atibaia	Posto Vailinhos
Janeiro	147	147	158	158	141	127	140
Fevereiro	134	134	136	136	114	114	123
Março	105	103	111	111	113	104	113
Abril	76	74	77	77	86	77	88
Maio	57	57	58	58	59	56	62
Junho	50	48	52	52	45	47	52
Julho	48	49	48	48	50	50	54
Agosto	57	59	58	58	64	64	71
Setembro	80	81	80	80	87	82	91
Outubro	98	98	97	97	111	104	121
Novembro	110	109	111	111	112	105	122
Dezembro	125	124	133	133	141	126	142

4.3 Obtenção das previsões de precipitação

As previsões de chuva são o resultado do modelo de previsão e dado de entrada do modelo chuva-vazão. O modelo de previsão, por sua vez, requer como dado de entrada as características da região de estudo.

Para este estudo foram utilizados os resultados do modelo ETA com resolução de 40 km, disponibilizados pelo CPTEC. Os resultados possuem discretização diária e horizonte de 10 dias. Dessa forma, a única informação necessária é a delimitação da área de estudo para extrair os resultados de interesse do modelo.

Os resultados são obtidos na forma de chuva média em cada quadrícula da grade, com dimensões de 40 km x 40 km. Com o auxílio de um software de GIS é possível calcular a chuva média em cada bacia hidrográfica do estudo. A Figura 9 exemplifica uma previsão realizada pelo modelo ETA com resolução de 40 km.

Figura 9 – Exemplo de previsão do total precipitado em 24h do modelo ETA com resolução de 40 km.

Para o modelo ETA, foram obtidas previsões chuva diária de 09/01/2018 a 29/10/2018 para as bacias do Jaguari/Jacareí, Atibainha, Cachoeira e Paiva Castro. Para as demais bacias foram analisadas previsões de 08/03/2018 a 29/10/2018.

Para o modelo WRF com resolução de 5 km, foram obtidas previsões com horizonte de 3 dias, realizadas entre os dias 22/01/2019 a 21/05/2019 para todas as bacias.

Para o modelo BAM com resolução de 20 km, foram obtidas previsões com horizonte de 10 dias, realizadas entre os dias 01/01/2019 a 22/05/2019 para todas as bacias.

4.4 Calibração do modelo chuva-vazão

A calibração do modelo chuva-vazão consiste em encontrar, para cada bacia, os parâmetros do modelo que melhor representam a região estudada. Para a calibração são necessários dados observados de chuva e vazão em cada ponto de aplicação do modelo. Também são necessárias características da bacia como área de drenagem e cobertura do solo. No caso do modelo SMAP as características do solo são representadas pelos parâmetros de calibração. Para esse estudo, foram utilizadas as precipitações observadas pelo radar meteorológico. Os valores são corrigidos com base na precipitação medida por pluviômetros, de acordo com a metodologia descrita por Rocha Filho et. al (2013).

A calibração do modelo pode ser manual, automática ou semi-automática. Neste trabalho optou-se pela calibração semi-automática, com o auxílio da ferramenta Solver, do Excel, combinado com ajustes manuais para aprimorar a calibração.

Uma vez calibrado o modelo, seleciona-se outro período de dados observados para realizar a validação do modelo, avaliando a representatividade da solução encontrada.

Para fins de utilização do sistema proposto de forma automatizada, pode ser realizada uma calibração contínua, de modo que os parâmetros do modelo sejam atualizados conforme novos dados sejam registrados.

4.5 Geração de séries de vazão

Uma vez calibrado o modelo chuva-vazão, as previsões de precipitação podem ser utilizadas como dado de entrada, produzindo previsões de vazão.

No caso do modelo SMAP, as condições iniciais da bacia são um dado de entrada. Para melhorar a confiabilidade das vazões geradas pelo modelo é interessante “aquecer” o modelo com um período de dados observados, de modo que

as variáveis de estado do modelo estejam o mais próximas possível do real no instante em que se encerram os dados observados e se inicia a previsão.

Dessa forma, são utilizados dados de 30 dias de chuva observada na bacia em adição aos 10 dias de previsão para a geração das previsões de vazão.

Foi utilizado um parâmetro “Escoamento superficial inicial” (E_{sin}), de maneira análoga ao parâmetro E_{bin} . Esse parâmetro não está previsto na formulação original do SMAP, mas foi introduzido para permitir uma melhor aproximação do modelo aos cenários simulados, principalmente em condições mais úmidas. Uma alternativa seria iniciar a simulação em um ponto sem efeitos de eventos recentes, onde não se verifica escoamento direto. Mas, pensando na implementação de uma ferramenta de uso periódico, com número fixo de dias de aquecimento do modelo, o parâmetro se apresenta como uma solução viável. Assim, o valor inicial para o armazenamento do reservatório de superfície é calculado de acordo com a equação:

$$R_{sup}(1) = \frac{E_{sin} * 86,4}{(1 - K2) * Ad} \quad (27)$$

Além disso, pode-se calibrar os parâmetros “Teor de umidade inicial” (T_{uin}), “Escoamento básico inicial” (E_{bin}) e o parâmetro proposto, “escoamento superficial inicial” (E_{sin}), para cada novo conjunto de dados, a fim de melhor representar as condições iniciais da bacia.

4.6 Elaboração e simulação da rede do modelo de alocação

As vazões obtidas através do modelo chuva-vazão servem de dado de entrada para o modelo de alocação de água. Nele também são utilizadas as informações acerca das estruturas do sistema, como características dos reservatórios e regras de operação.

Neste trabalho a rede é composta por quatro reservatórios, representando as represas Jaguari/Jacaré, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro. São consideradas as vazões a jusante de cada um dos reservatórios e a vazão retirada do reservatório Paiva Castro para o abastecimento da RMSP.

O foco da análise são as descargas realizadas nas represas para atender à demanda das bacias PCJ. Assim, a retirada para abastecimento e a transferência

entre as represas é considerada de forma simplificada, a fim de se verificar apenas em que faixa da outorga se encontra o sistema Cantareira.

As simulações são diárias, com horizonte de 10 dias, de acordo com a previsão de chuva utilizada. A cada simulação são ajustados os parâmetros Ebin, Esin e Tuin do modelo SMAP para melhor representar as condições iniciais.

Uma vez realizada a simulação da operação do sistema nas novas condições, as vazões descarregadas pelas represas Jaguari/Jacareí, Atibainha e Cachoeira são otimizadas com o auxílio do Solver. Foram realizados dois tipos de otimização, com funções objetivo distintas. A primeira, minimizando a diferença entre a vazão prevista para o ponto de controle e a vazão mínima exigida:

$$FO = \min\{\sum(Q_{ponto} - Q_{mínima})^2\} \quad (28)$$

Onde:

Q_{ponto} : vazão prevista no ponto de controle;

$Q_{mínima}$: vazão mínima exigida pela outorga no ponto de controle.

A segunda, minimizando as vazões descarregadas pelas represas:

$$FO = \min\{\sum(D_{barragem} - D_{mínima})^2\} \quad (29)$$

Onde:

Q_{ponto} : descarga realizada pelas barragens;

$Q_{mínima}$: descarga mínima exigida pela outorga no ponto de controle.

Ambas atendo às restrições de descarga mínima nas barragens, vazões mínimas nos pontos e limitando as descargas das barragens às vazões limite dos pontos de controle. As restrições de transferência nos túneis também devem ser atendidas, mas, por simplificação, não foram modeladas. Isso pois os limites são maiores ou iguais ao limite de retirada definido pela outorga (ANA, 2016).

Para a represa Jaguari/Jacareí, são consideradas as vazões no ponto “Posto Buenópolis”. Para as represas Atibainha e Cachoeira são consideradas as vazões no ponto Posto Valinhos. Atendidas as restrições em Valinhos, devem estar contempladas também as restrições do ponto Posto Atibaia, pois são menos restritivas. Assim, é feita apenas uma verificação para confirmar o atendimento das

regras da outorga nesse ponto. Caso não seja atendida, as descargas são novamente otimizadas considerando também as restrições nesse ponto.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados obtidos em cada uma das etapas do estudo.

5.1 Previsões de precipitação a partir de modelo climático

Para cada um dos modelos climáticos analisados, foram construídas séries de previsão de chuva para cada bacia hidrográfica da região de estudo.

As séries foram então comparadas com as observações de estações pluviométricas e do radar meteorológico. O coeficiente de correlação de Pearson para cada comparação é apresentado abaixo, da Tabela 5 à Tabela 11. Essa comparação é ilustrada para a bacia Jaguari/Jacareí na Figura 10 (modelo ETA), Figura 11 (modelo WRF) e Figura 12 (modelo BAM).

Figura 10 – Relação entre as previsões do modelo ETA e observações do radar na bacia Jaguari/Jacareí.

Figura 11 - Relação entre as previsões do modelo WRF e observações do radar na bacia correspondente ao reservatório Jaguari/Jacareí.

Figura 12 - Relação entre as previsões do modelo BAM e observações do radar na bacia correspondente ao reservatório Jaguari/Jacareí.

A correlação entre as previsões e as observações foi bastante fraca em todos os casos. As comparações com o radar apresentaram correlações mais forte que as comparações com as estações pluviométricas. Essa diferença era esperada pois tanto os modelos de previsão como o radar meteorológico consideram a espacialização da chuva sobre a bacia. O modelo ETA apresentou as maiores correlações, seguido do modelo BAM e, por fim, o modelo WRF.

Tabela 5 – Coeficiente de correlação de Pearson para as análises na bacia correspondente aos reservatórios Jaguari/Jacareí.

	Jaguari/Jacareí					
	ETA40		WRF		BAM	
	Radar	Pluviômetro	Radar	Pluviômetro	Radar	Pluviômetro
Série Completa	0,3454	0,2287	0,0231	0,0801	0,2371	0,1888
1 dia à frente	0,6307	0,4237	0,3326	0,3213	0,5221	0,4636
2 dias à frente	0,5313	0,3660	0,5011	0,5140	0,4681	0,3665
3 dias à frente	0,3982	0,2602	0,3556	0,3536	0,4466	0,3501
4 dias à frente	0,3507	0,2495			0,4050	0,3500
5 dias à frente	0,2985	0,2112			0,2441	0,2034
6 dias à frente	0,3658	0,2712			0,2456	0,2068
7 dias à frente	0,2918	0,2252			0,1147	0,1305
8 dias à frente	0,1241	0,0509			0,0258	-0,0092
9 dias à frente	0,1237	0,0416			0,0392	-0,0020
10 dias à frente	0,1212	0,0653			0,0345	-0,0214
Valores acumulados	0,7037	0,4536	0,6573	0,6153	0,5446	0,5426

Tabela 6 – Coeficiente de correlação de Pearson para análises na bacia correspondente ao reservatório Cachoeira.

	Cachoeira					
	ETA40		WRF		BAM	
	Radar	Pluviômetro	Radar	Pluviômetro	Radar	Pluviômetro
Série Completa	0,3293	0,2834	0,0315	-0,0029	0,2339	0,2312
1 dia à frente	0,6485	0,4822	0,3071	0,2779	0,4122	0,3936
2 dias à frente	0,4534	0,3570	0,4369	0,4105	0,4146	0,3325
3 dias à frente	0,3024	0,2388	0,3721	0,3993	0,3814	0,3519
4 dias à frente	0,3574	0,3820			0,3132	0,3043
5 dias à frente	0,2930	0,2812			0,2228	0,2270
6 dias à frente	0,2423	0,1826			0,3089	0,2868
7 dias à frente	0,2726	0,2257			0,1957	0,1575
8 dias à frente	0,0591	0,0519			0,1101	0,1873
9 dias à frente	0,1918	0,1473			0,0817	0,1769
10 dias à frente	0,2201	0,2540			0,0856	0,0715
Valores acumulados	0,6371	0,7247	0,6502	0,6027	0,5281	0,6276

Tabela 7 – Coeficiente de correlação de Pearson para análises na bacia correspondente ao reservatório Atibainha.

	Atibainha					
	ETA40		WRF		BAM	
	Radar	Pluviômetro	Radar	Pluviômetro	Radar	Pluviômetro
Série Completa	0,2996	0,2750	-0,0325	-0,0120	0,3114	0,2780
1 dia à frente	0,6295	0,6029	0,3586	0,3143	0,5523	0,4898
2 dias à frente	0,4599	0,3826	0,5671	0,4692	0,5086	0,3355
3 dias à frente	0,2693	0,2553	0,4208	0,3755	0,4323	0,3390
4 dias à frente	0,3009	0,3112			0,3406	0,2729
5 dias à frente	0,2508	0,2253			0,3033	0,2509
6 dias à frente	0,2476	0,2586			0,3914	0,3708
7 dias à frente	0,2149	0,1668			0,2148	0,1774
8 dias à frente	0,0359	-0,0249			0,2226	0,2224
9 dias à frente	0,1302	0,1440			0,2110	0,2915
10 dias à frente	0,2087	0,2479			0,1387	0,1725
Valores acumulados	0,5392	0,5746	0,6549	0,6031	0,6354	0,6343

Tabela 8 – Coeficiente de correlação de Pearson para análises na bacia correspondente ao reservatório Paiva Castro.

	Paiva Castro					
	ETA40		WRF		BAM	
	Radar	Pluviômetro	Radar	Pluviômetro	Radar	Pluviômetro
Série Completa	0,2418	0,2149	0,0053	0,0252	0,2707	0,2418
1 dia à frente	0,5074	0,4166	0,4150	0,3830	0,5564	0,5074
2 dias à frente	0,3768	0,2965	0,5572	0,4759	0,5227	0,3768
3 dias à frente	0,2334	0,1954	0,3792	0,4513	0,4518	0,2334
4 dias à frente	0,1815	0,1527			0,3405	0,1815
5 dias à frente	0,2401	0,2428			0,2631	0,2401
6 dias à frente	0,0771	0,1574			0,2465	0,0771
7 dias à frente	0,2151	0,1892			0,1797	0,2151
8 dias à frente	-0,0455	-0,0285			0,1555	-0,0455
9 dias à frente	0,0923	0,0781			0,1108	0,0923
10 dias à frente	0,3391	0,1804			0,0759	0,3391
Valores acumulados	0,3490	0,4584	0,5781	0,5200	0,5165	0,3490

Tabela 9 – Coeficiente de correlação de Pearson para análises na bacia correspondente ao reservatório ao Posto Buenópolis.

	Posto Buenópolis					
	ETA40		WRF		BAM	
	Radar	Pluviômetro	Radar	Pluviômetro	Radar	Pluviômetro
Série Completa	0,2728	0,2821	0,1448	0,1142	0,2177	0,1145
1 dia à frente	0,5210	0,4362	0,4543	0,3836	0,4777	0,3800
2 dias à frente	0,4849	0,3917	0,4940	0,3790	0,4032	0,2042
3 dias à frente	0,3537	0,2527	0,4801	0,3441	0,4354	0,2871
4 dias à frente	0,2938	0,2435			0,4226	0,3219
5 dias à frente	0,3223	0,2798			0,1681	0,0153
6 dias à frente	0,2041	0,2070			0,1560	0,0329
7 dias à frente	0,1507	0,2785			0,1256	-0,0052
8 dias à frente	0,0146	0,2477			0,0656	-0,0121
9 dias à frente	0,1601	0,2567			0,0473	-0,0049
10 dias à frente	0,1214	0,3947			0,0282	-0,0146
Valores acumulados	0,3931	0,6200	0,6969	0,6160	0,4800	0,3095

Tabela 10 – Coeficiente de correlação de Pearson para análises na bacia correspondente ao Posto Valinhos.

	Posto Valinhos					
	ETA40		WRF		BAM	
	Radar	Pluviômetro	Radar	Pluviômetro	Radar	Pluviômetro
Série Completa	0,2629	0,1840	0,0809	0,0510	0,2513	0,2242
1 dia à frente	0,5320	0,4521	0,3920	0,2761	0,5588	0,4112
2 dias à frente	0,5098	0,3543	0,6054	0,4540	0,4582	0,3239
3 dias à frente	0,2814	0,1956	0,4751	0,3736	0,4900	0,3966
4 dias à frente	0,2964	0,1750			0,3708	0,3482
5 dias à frente	0,2952	0,1747			0,2221	0,1975
6 dias à frente	0,1420	0,1453			0,1595	0,1328
7 dias à frente	0,0650	0,0195			0,1159	0,1254
8 dias à frente	0,0445	0,1050			0,1120	0,1894
9 dias à frente	0,2214	0,0856			0,0814	0,1088
10 dias à frente	0,0500	-0,0387			0,0759	0,1023
Valores acumulados	0,1953	0,2577	0,6694	0,5663	0,4922	0,3932

Tabela 11 – Coeficiente de correlação de Pearson para análises na bacia correspondente ao Posto Atibaia.

	Posto Atibaia					
	ETA40		WRF		BAM	
	Radar	Pluviômetro	Radar	Pluviômetro	Radar	Pluviômetro
Série Completa	0,2612	0,2319	0,0973	0,1113	0,3077	0,2228
1 dia à frente	0,5955	0,4387	0,3877	0,4255	0,5833	0,4709
2 dias à frente	0,4589	0,3461	0,6038	0,4659	0,5060	0,4209
3 dias à frente	0,3352	0,1787	0,4023	0,3839	0,4580	0,3407
4 dias à frente	0,2547	0,2111			0,4174	0,2778
5 dias à frente	0,3680	0,2537			0,3150	0,1910
6 dias à frente	0,1803	0,3095			0,3176	0,2279
7 dias à frente	0,0107	0,0170			0,1913	0,1373
8 dias à frente	-0,0143	0,0737			0,1587	0,0550
9 dias à frente	0,1028	0,2172			0,2157	0,1203
10 dias à frente	0,1002	0,1756			0,0980	0,0639
Valores acumulados	0,1800	0,6740	0,7162	0,6306	0,5855	0,4900

As previsões foram então agrupadas pelo número de dias à frente, em relação ao dia em que o modelo de previsão foi rodado. É possível verificar que existe uma maior correlação nos primeiros dias de previsão, com forte decréscimo ao longo do horizonte de previsão. Esse decréscimo é mais acentuado nos modelos ETA e BAM, pois possuem maior horizonte de previsão. Verificou-se também que o modelo WRF apresenta melhora no segundo dia de previsão, com queda na correlação no dia posterior. Esse resultado está de acordo com o encontrado por Cataldi (2007), que explica a melhora pelo fato da inicialização dos modelos assumir valores iniciais irreais, que se ajustam nas primeiras horas de simulação, até atingirem valores mais próximos das observações. Esse comportamento é ilustrado pela Figura 13, que mostra a correlação das previsões com as observações de radar em função do horizonte de previsão para a bacia Jaguari/Jacareí.

Figura 13 – Correlação com as observações de radar em função do horizonte de previsão.

Os maiores valores de correlação foram encontrados ao se acumular a precipitação ao longo de todo o horizonte de previsão e comparar com as observações acumuladas ao longo do mesmo período. Esse resultado está de acordo com o encontrado por Cataldi (2007). A Tabela 3 apresenta o coeficiente de correlação de Pearson para valores de precipitação acumulada em todos os cenários.

Tabela 12 – Coeficiente de correlação de Pearson para valores de precipitação acumulada.

Bacia	ETA		WRF		BAM	
	Radar	Pluviômetro	Radar	Pluviômetro	Radar	Pluviômetro
Jaguari/Jacareí	0,7037	0,4536	0,6573	0,6153	0,5446	0,5426
Cachoeira	0,6371	0,7247	0,6502	0,6027	0,5281	0,6276
Atibainha	0,5392	0,5746	0,6549	0,6031	0,6354	0,6343
Paiva Castro	0,3490	0,4584	0,5781	0,5200	0,5165	0,4339
Posto Buenópolis	0,3931	0,6200	0,6969	0,6160	0,4800	0,3095
Posto Valinhos	0,1953	0,2577	0,6694	0,5663	0,4922	0,3932
Posto Atibaia	0,1800	0,6740	0,7162	0,6306	0,5855	0,4900

As análises indicaram correlação forte, acima de 0,7 em 3 do total de 42 casos. Foi verificada correlação moderada, acima de 0,6 em 19 e acima de 0,5 em 29 do total de 42 casos.

O modelo a apresentar maior correlação variou de bacia para bacia. O modelo ETA, que apresentou maior correlação para as bacias Jaguari/Jacareí e Cachoeira, indicou correlação bastante fraca para as bacias Posto Valinhos (Radar e Pluviômetro) e Posto Atibaia (Radar). O modelo WRF apresentou menor variação de desempenho de um bacia para outra e indicou correlação moderada, acima de 0,5, em todos os casos e acima de 0,6 em 11 dos 14 casos. O modelo BAM também apresentou menor variação de um bacia para outra, mas com correlação inferior à verificada para o modelo WRF.

A análise é ilustrada para a bacia Jaguari/Jacareí na Figura 14 (modelo ETA), na Figura 15 (modelo WRF) e na Figura 16 (modelo BAM).

Figura 14 - Relação entre as precipitações acumuladas previstas pelo modelo ETA e observadas pelo radar.

Figura 15 - Relação entre as precipitações acumuladas previstas pelo modelo WRF e observadas pelo radar.

Figura 16 - Relação entre as precipitações acumuladas previstas pelo modelo BAM e observadas pelo radar.

Esse resultado sugere que, embora as previsões apresentem baixo desempenho na estimativa de precipitação de um dia específico, o resultado do volume total de chuva prevista para o horizonte tende a apresentar mais aderência ao que é observado. Assim, as previsões teriam maior utilidade em cenários onde a decisão a ser tomada depende mais da estimativa de afluências médias em um período. É notável, no entanto, que existe um viés na amostra. Esses resultados seriam melhor aplicados com a utilização de alguma ferramenta de correção. O caso estudado utiliza as previsões de precipitação para gerar previsões de vazão e então decidir a operação da bacia com base no prognóstico para os dias à frente. O modelo chuva-vazão leva em consideração o estado hidrológico da bacia, de modo que existe algum amortecimento das discrepâncias da previsão de precipitação de um dia para outro. Além disso, a outorga considera para o período úmido a média móvel de 15 dias para verificar o atendimento dos limites de vazão nos pontos de controle. Dessa

forma, é justificável o uso de previsões com baixa correlação para um dia específico, mas com boa correlação para valores acumulados ao longo do horizonte de previsão.

Os gráficos também permitem uma análise visual do comportamento do coeficiente de ajuste linear. O valor representa a inclinação da reta ajustada à dispersão de pontos. Comparando-se com a reta de inclinação 45° , que teria um coeficiente de ajuste linear igual a 1, é possível identificar a tendência de cada modelo. A Tabela 13 mostra os valores encontrados para o coeficiente de ajuste linear em todos os cenários de comparação da precipitação acumulada ao longo do horizonte de previsão.

Tabela 13 – Coeficiente de ajuste linear para análises de precipitação acumulada

	ETA		WRF		BAM	
	Radar	Pluviômetro	Radar	Pluviômetro	Radar	Pluviômetro
Jaguari/Jacareí	0,1770	0,2367	0,6105	0,5715	2,3296	2,4242
Cachoeira	0,1716	0,2773	0,6658	0,7191	2,1257	2,1761
Atibainha	0,1671	0,2395	0,6797	0,4941	1,9321	1,4285
Paiva Castro	0,1906	0,2613	0,5746	0,5972	1,8443	2,0698
Posto Buenópolis	0,1650	0,2700	0,6290	0,7921	1,6167	2,1037
Posto Valinhos	0,1468	0,1940	0,5967	0,5358	1,3487	1,3206
Posto Atibaia	0,1184	0,1412	0,6368	0,7414	1,7001	2,0960

Os valores indicam uma forte tendência do modelo ETA a subestimar as observações e uma forte tendência do modelo BAM a superestimar as observações. De fato, no gráfico apresentado quase a totalidade dos pontos se encontram abaixo da reta de 45° para o modelo ETA e acima dela para o modelo BAM. No caso do modelo WRF, os valores indicam uma leve tendência a subestimar as observações. A análise gráfica mostra que existe pontos tanto acima como abaixo da reta de 45° . Esse fato destaca a importância da análise conjunta dos coeficientes de correlação e de ajuste linear. Mesmo com uma forte correlação, o coeficiente de Pearson não dá nenhuma informação sobre a proporção da relação entre as variáveis. Por outro lado, quando a correlação é fraca, aumenta-se a incerteza sobre a proporção indicada pelo coeficiente de ajuste linear. Nota-se, no entanto, que quando a magnitude do coeficiente de ajuste linear é muito expressiva, como nos casos dos modelos ETA e BAM, a tendência indicada pelo coeficiente é seguida mesmo para valores menores de correlação.

Essa análise, isolada, não determina se as previsões são ou não aplicáveis. Elas são, no entanto, úteis para se optar pela utilização de um modelo ou outro, ou ainda na interpretação dos resultados obtidos a partir dessas previsões. Para o caso estudado, as previsões do modelo WRF indicam maior proximidade das observações. Por outro lado, o conhecimento de que o modelo ETA tem uma forte tendência a subestimar as observações coloca o uso dessas previsões a favor da segurança (do ponto de vista de garantir as vazões mínimas). Numa aplicação onde a decisão envolvesse as vazões máximas, como no controle de cheias, as previsões do modelo BAM, com forte tendência de superestimar as observações, estariam mais à favor da segurança que as do modelo ETA

5.2 Modelo chuva vazão

Para cada uma das bacias foi calibrado o modelo SMAP diário. Os parâmetros calibrados foram str, crec, kkt e k2t. As condições iniciais Ebin, Esin e Tuin também são calibrados, mas esses valores são recalculados a cada simulação. Os parâmetros Ai e Capc foram estimados com base nas características da região, de acordo com os valores sugeridos pela literatura.

Quando possível, utilizou-se um período de um ano de dados para a calibração, iniciando-se no período seco. Para as bacias dos pontos de controle, não dispunha-se de observações do radar meteorológico para todo o período, por isso foi utilizado um período menor para a calibração (cerca de 6 meses).

Foi utilizado o Solver do Excel para realizar a calibração, buscando um valor ótimo para o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe. Os valores encontrados eram então submetidos a análise visual, com posterior ajuste manual dos parâmetros. O procedimento foi repetido sucessivas vezes, até se obter uma calibração considerada adequada.

A calibração obtida para cada bacia está ilustrada na Figura 17 (Jaguari/Jacareí), na Figura 18 (Cachoeira), na Figura 19 (Atibainha) e na Figura 20 (Paiva Castro).

Figura 17 - Calibração do SMAP para a bacia Jaguari/Jacareí

Figura 18 - Calibração do SMAP para a bacia Cachoeira

Figura 19 - Calibração do SMAP para a bacia Atibainha

Figura 20 - Calibração do SMAP para a bacia Paiva Castro

Para as bacias dos pontos de controle nas bacias PCJ, posto Buenópolis, Posto Valinhos e Posto Atibaia, o modelo SMAP foi calibrado em conjunto com a aplicação do método de Muskingum. Os valores para o tempo de trânsito do pico de cheia foram determinados avaliando os hidrogramas de descarga nas barragens e os hidrogramas nos pontos de controle. Para garantir a estabilidade do método, o canal foi dividido em trechos. Em cada caso, foi utilizado o menor número de trechos em que foi verificada a estabilidade numérica do método. A Tabela 14 mostra os valores utilizados para os parâmetros do método do Muskingum.

Tabela 14 – Parâmetros do método de Muskingum

Trecho	Intervalo de tempo	Amortecimento da onda de cheia (X)	Tempo de trânsito do pico de cheia (K)	Número de trechos
Jaguari a Buenópolis	1 dia	0,3	4,2	4
Cachoeira a Atibaia	1 dia	0,3	2,6	3
Atibainha a Atibaia	1 dia	0,3	4,9	5
Atibaia a Valinhos	1 dia	0,3	3,5	4

O valor comparado com as vazões observadas, para cálculo do parâmetro de eficiência, é a soma da vazão calculada pelo modelo SMAP com a descarga diária das barragens, propagada até o ponto de controle através do método de Muskingum. A calibração obtida é ilustrada na Figura 21 (Posto Buenópolis), na Figura 22 (Posto Atibaia) e na Figura 23 (Posto Valinhos).

Os valores calibrados para os parâmetros do modelo SMAP estão descritos na Tabela 15.

Tabela 15 – Parâmetros do modelo SMAP calibrados para as bacias estudadas.

Bacia	str	crec	kkt	K2t	Ai	Capc	NSE
Jaguari/Jacareí	613 mm	0,002	30 dias	1,0 dia	2,5 mm	0,4	0,6660
Cachoeira	655 mm	0,001	30 dias	2,2 dias	2,5 mm	0,4	0,4386
Atibainha	478 mm	0,001	30 dias	1,8 dia	2,5 mm	0,4	0,3747
Paiva Castro	579 mm	0,002	50 dias	1,9 dia	2,5 mm	0,4	0,2258
Posto Buenópolis	1027 mm	0,050	80 dias	4,0 dias	2,5 mm	0,4	-0,3968
Posto Atibaia	400 mm	0,050	55 dias	10 dias	2,5 mm	0,4	0,2937
Posto Valinhos	800 mm	0,050	40 dias	10 dias	2,5 mm	0,4	-0,8208

Todos os valores encontrados para os parâmetros se encontram dentro das faixas recomendadas pela literatura. O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe apresentou bons valores para alguns dos casos, mas indicou valores negativos para

outros. A análise visual, em conjunto com o coeficiente, permite obter mais informações sobre o ajuste. Isso porque o coeficiente é bastante sensível a valores extremos. Nos casos das bacias dos pontos de controle, é possível ver pelo gráfico que as vazões calculadas pelo modelo são bastante próximas das observadas em boa parte do período considerado (Figura 21, Figura 22 e Figura 23). A diferença ocorre, principalmente, na porção central do gráfico, quando ocorre uma chuva bastante intensa, ocasionando um pico de vazão bastante acentuado, que não foi verificado nas vazões observadas com tanta intensidade. Ao se desconsiderar esse trecho, o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe apresenta valores elevados (maior que 0,6) para as três bacias.

A divergência se deve, em parte, à origem dos dados utilizados para a calibração. As precipitações de radar, por vezes, superestima as chuvas ocorridas na bacia, gerando picos irreais. Por outro lado, vazões de estações pluviométricas por vezes não registram chuvas ocorridas em outros pontos da bacia, quando são verificados picos nas vazões observadas, mas não nas vazões calculadas pelo modelo. Também existem incertezas nos valores de vazão observada em função da curva-chave ou das medições propriamente ditas.

O entendimento do comportamento do modelo também é essencial na sua aplicação. O ajuste pode representar bem o comportamento da bacia na ocorrência de chuvas moderadas, mas não na de chuvas extremas. Também pode obter valores imprecisos para os picos de vazão, mas modelar bem a recessão do escoamento. Como veremos a seguir, o ajuste encontrado para os parâmetros do SMAP representa bem o comportamento das bacias em alguns períodos, mas diverge consideravelmente em outros. A superestimativa das vazões em resposta às precipitações elevadas, nas bacias intermediárias, induzem descargas menores dos reservatórios para jusante das bacias. Isso força uma decisão conservadora na análise de alocação, em que o modelo opta por armazenar a água nos reservatórios. Valores de vazões abaixo das exigidas pela regra operacional, nos pontos de controle, poderão ser compensados no próximo passo de análise, uma vez que o modelo de otimização será rodado a cada dia com horizonte futuro de 10 dias. Identificar os aspectos que estão ou não sendo bem representados pelo modelo ajudará a interpretar os resultados e avaliar a utilidade da operação proposta.

Figura 21 - Calibração do SMAP para a bacia correspondente ao Posto Buenópolis.

Figura 22 - Calibração do SMAP para a bacia correspondente ao Posto Atibaia.

Figura 23 - Calibração do SMAP para a bacia correspondente ao Posto Valinhos.

5.3 Modelo de alocação de água

O modelo foi estruturado de modo a permitir a rápida simulação de qualquer período com dados disponíveis a partir da seleção apenas da data de início.

Para o período com previsões disponíveis do modelo ETA, as vazões geradas pelo modelo chuva-vazão, nos pontos de controle, se encontravam, na maior parte do tempo, acima das vazões mínimas exigidas pela outorga. Desse modo, a otimização do modelo para ambas as funções objetivo resultava na redução das descargas para o valor mínimo. A Figura 24 ilustra um desses cenários para o ponto de controle do Posto Buenópolis. É possível notar que a própria vazão básica é superior ao limite exigido pela outorga. Assim, mesmo cessando o escoamento superficial, a restrição ainda é atendida.

Figura 24 – Otimização das descargas para o ponto de controle do Posto Buenópolis.

Já para o ponto de controle do Posto Valinhos, é possível observar melhor o comportamento do modelo em períodos onde a descarga mínima não é suficiente para atender aos limites da outorga. A Figura 25 ilustra um desses cenários. Com a previsão de pouca chuva para os próximos dias, a previsão de vazão decai, indicando o não atendimento do limite da outorga ao final do horizonte de previsão. Otimizando as descargas, o modelo sugere uma redução da vazão nos primeiros dias, mas

posteriormente aumenta a descarga para garantir o atendimento da restrição ao final do período. O cenário após a otimização está representado na Figura 26. A operação sugerida pelo modelo está representada na Figura 27. As linhas contínuas indicam valores observados, as linhas tracejadas indicam valores calculados pelo modelo.

Figura 25 – Previsão de vazão no ponto de controle do Posto Valinhos considerando descargas mínimas (sem otimização).

Figura 26 – Otimização das descargas para o ponto de controle do Posto Valinhos.

Figura 27 – Operação sugerida pelo modelo para atendimento da restrição em Valinhos.

Foram também analisados cenários para o período com previsões disponíveis dos modelos WRF e BAM. A Figura 28 mostra um caso similar ao anterior, em que a baixa previsão de chuva indica o não atendimento da restrição ao final do período. Avaliando as duas funções objetivos, ambas sugerem operações que atendem a restrição, mas com características bastante distintas. A Figura 29 mostra a operação resultante da função objetivo que minimiza as descargas das barragens. A Figura 30 mostra a operação resultante da função objetivo que minimiza a diferença entre a vazão calculada para o ponto e a vazão exigida pela outorga.

No caso da função objetivo que minimiza as descargas, o volume total descarregado é menor e a variação da vazão é mais suave. O aumento da descarga é iniciado com alguns dias de antecedência em relação à otimização realizada com a outra função objetivo. Essa operação sugerida requer um número maior de manobras de alteração de vazão.

No caso da função objetivo que minimiza a diferença para o limite da outorga, o volume total descarregado é ligeiramente maior. O pico de descarga é mais elevado, se igualando ao limite imposto ao modelo. O número de manobras é menor, mas envolve uma transição bastante brusca da vazão. A descarga é feita mais próxima ao dia previsto de falha de atendimento da outorga.

Figura 28 – Previsão de vazão para o ponto de controle do Posto Valinhos considerando as previsões do modelo WRF.

Figura 29 – Operação sugerida pelo modelo ao se considerar a função objetivo que minimiza a descarga nas barragens.

Figura 30 – Operação sugerida pelo modelo ao se considerar a função objetivo que minimiza a diferença entre a vazão no ponto e o limite da outorga.

6 CONCLUSÕES

A metodologia proposta neste estudo permitiu estruturar uma ferramenta que, tendo como insumo previsões de precipitação de modelos climáticos, fornece diretrizes para a operação de um sistema de reservatórios.

A análise das previsões obtidas indicou que existe grande imprecisão nas precipitações previstas por modelos climáticos. Também foi constatado que a qualidade das previsões é maior nos primeiros dias de previsão, com queda de qualidade nos dias subsequentes. Ao se acumular as previsões de precipitação ao longo do horizonte de previsão, foram obtidos resultados muito melhores de correlação com os valores observados. O resultado sugere que, apesar das imprecisões, as previsões são aplicáveis em cenários em que a decisão depende do volume de chuva esperado ao longo de um período, com menor impacto do valor em cada dia específico.

O modelo ETA apresentou forte tendência a subestimar as observações. O modelo BAM indicou forte tendência a superestimá-las. Já o modelo WRF apresentou leve tendência de subestimar as observações. O conhecimento do comportamento de cada modelo é essencial na interpretação de resultados gerados a partir de suas previsões.

A calibração do modelo chuva vazão permitiu representar o comportamento da bacia. Foram verificadas imprecisões, que indicam cautela na análise dos resultados. O modelo, porém, se mostrou como uma ferramenta útil para as análises propostas,

A otimização da alocação de água indicou a possibilidade de se obter diretrizes para a operação do sistema quanto às vazões descarregadas para as bacias PCJ. O comportamento das funções objetivo propostas foi distinto. Minimizar as descargas resultou num volume descarregado menor, mas com um maior número de manobras. Minimizar a diferença entre a vazão no ponto e o limite da outorga resultou em menos manobras, mas com alterações de vazão mais bruscas.

O sistema de suporte a decisões proposto atendeu às premissas de livre acesso, facilidade de obtenção de dados e de utilização. Assim, a análise realizada possa ser facilmente replicada e adaptada para outros sistemas de recursos hídricos, em regiões distintas. Na forma como foi desenvolvida, a ferramenta permite a fácil

simulação de alternativas diferentes às propostas pelo modelo, dando ao operador a chance de avaliar sua operação e utilizar sua experiência em adição aos resultados do modelo. A ferramenta se mostrou como um possível subsídio a operação real, sendo necessário, no entanto, considerações sobre aspectos como automação da obtenção de previsões e elaboração de uma interface intuitiva e acessível aos operadores.

7 CONSIDERAÇÕES PARA PROJETOS FUTUROS

Este estudo se desenvolveu em um contexto de programa de mestrado. Apesar de considerar que os objetivos, propostos tendo em mente os prazos e normas do programa, foram atingidos, entende-se que há espaço para aprofundar a pesquisa. Pode-se avaliar diferentes cenários e desenvolver pontos que não foram contemplados, seja pela limitação do escopo, seja por terem surgido como conclusão da pesquisa realizada. Aqui são listadas algumas das ideias, na esperança de que possam estimular e nortear futuros projetos.

Neste estudo, foram utilizadas as previsões do modelo ETA. Como mencionado, as previsões do modelo ETA, nesse momento, não se encontram disponíveis ao público. Além disso, diferentes modelos apresentam diferentes tendências. Avaliar o comportamento do sistema proposto ao se utilizar previsões de outros modelos como insumo, como os modelos BAM e WRF, permitiria um melhor entendimento da aplicabilidade dessas previsões na operação do sistema.

Para a análise dos modelos de previsão de chuva foram utilizados dois parâmetros relativamente simples. A adequação dessas previsões pode ser aferida em mais detalhes com o uso de outros parâmetros como o PBIAS (porcentagem de viés), RMSE (erro médio quadrático), POD (probabilidade de detecção), FAR (falso alarme), fBIAS (viés de frequência) e o próprio NSE, utilizado na análise do modelo chuva-vazão. Também seria interessante aplicar uma ferramenta de correção de viés e avaliar a adequação das previsões juntamente com o uso dessa ferramenta.

O horizonte das previsões disponíveis e as características do sistema induziram o estudo a focar nas descargas das represas do sistema Cantareira para atendimento das demandas nas bacias PCJ. Dispondo-se de previsões com um horizonte maior ou aplicando-se em outros contextos, pode-se avaliar a utilidade da ferramenta para outros usos.

Embora tenha reconhecido a importância de uma interface intuitiva para que modelos ganhem mais espaço em aplicações reais, este trabalho se limitou a avaliar os resultados da modelagem matemática. O desenvolvimento de uma interface e o entendimento de outros fatores que possam melhorar a aceitação do modelo por parte dos técnicos é um campo a ser explorado.

Nesse sentido, um maior contato com os operadores é essencial. Durante essa pesquisa foram obtidas, de modo informal, impressões de um modelo similar por parte de alguns técnicos. Uma avaliação mais ampla e estruturada junto a operadores pode permitir um melhor entendimento de como as decisões são tomadas, como as ferramentas são aplicadas e quais os espaços para melhora dos modelos existentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA – Agência Nacional de Águas, DAEE- Departamento de Águas e Energia Elétrica. **Dados de referência acerca da outorga do sistema Cantareira**. 30 abr 2016. Disponível em:

<http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sof/Renovacao_Outorga/DDR_Sistema_Cantareira.pdf>. Acesso em: 26 de Janeiro de 2018

ANA - Agência Nacional de Águas; DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica. **Resolução conjunta ANA/DAEE nº925, de 29 de maio de 2017**. 2017a. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2017/925-2017.pdf>>. Acesso em 29 de Janeiro de 2018

ANA - Agência Nacional de Águas; DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica. **Resolução conjunta ANA/DAEE nº926, de 29 de maio de 2017**. 2017b. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2017/926-2017.pdf>>. Acesso em 29 de Janeiro de 2018

ANA – Agência Nacional de Águas. **Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2013**. Disponível em:

< <https://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/metadata.show?uuid=7bb15389-1016-4d5b-9480-5f1acdadd0f5> > Acesso em: 11 de Novembro de 2019

ANA – Agência Nacional de Águas. **Renovação da Outorga do Sistema Cantareira**. 18 de Outubro de 2017. Disponível em: <<http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/sala-de-situacao/sistema-cantareira/renovacao-da-outorga-do-sistema-cantareira>>. Acesso em 29 de Janeiro de 2018

ARAKAWA, Akio; LAMB, Vivian R. **Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model**. Methods in computational physics, v. 17, p. 173-265, 1977.

BARROS, Mario TL et al. **Climate Flow Forecast Model for the Brazilian Hydropower System**. In: World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers. 2009. p. 1-9.

BLACK, Thomas L. **The new NMC mesoscale Eta model: Description and forecast examples**. *Weather and forecasting*, v. 9, n. 2, p. 265-278, 1994.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997. **Da Política Nacional de Recursos Hídricos**. Brasília, DF: 8 de Janeiro de 1997

CATALDI, Marcio et al. **Análise de Previsões de Precipitação obtidas com a utilização do modelo ETA como insumo para modelos de previsão semanal de vazão natural**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 12, n. 3, p. 5-12, 2007.

CARDOSO, Bruno César Teixeira et al. **Estudo da eficiência da previsão numérica do tempo de curto prazo para o município de Maceió/AL, utilizando o modelo WRF**. 2018.

CHOU, Sim-Chan. **Modelo regional ETA**. Climanálise—Boletim de Monitoramento e Análise Climática, v. 1, 1996.

CIIAGRO – Centro integrado de informações agrometeorológicas. **Ciiagro Online**. Disponível em: < <http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/> >
Acesso em 12 de Setembro de 2019.

COLLISCHONN, Walter et al. **Medium-range reservoir inflow predictions based on quantitative precipitation forecasts**. Journal of hydrology, v. 344, n. 1, p. 112-122, 2007.

COLLISCHONN, Walter; DORNELLES, Fernando. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: Editora ABRH, 2013.

CUNHA, Vanessa Dias da. **Estudo para proposta de critérios de qualidade da água para reuso urbano**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-02022009-182058/>>. Acesso em: 22 de Agosto de 2016.

FARIAS, Emmanuel Eduardo Vitorino de; CURI, Wilson Fadlo; DINIZ, Laudízio da Silva. **São Francisco river Integration Project, Eastern Axis: losses analysis and performance indicators**. RBRH, v. 22, 2017.

FARO, Guilherme T. C.; GARCIA, Joaquin I. B. **Simulação dos critérios operacionais do sistema cantareira para avaliação do programa acquanet na**

modelagem de problemas complexos de alocação de água. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2017

GOULTER, I. C. **Systems analysis in water-distribution network design: From theory to practice.** Journal of Water Resources Planning and Management, v. 118, n. 3, p. 238-248, 1992.

HABIB, Emad; KRAJEWSKI, Witold F.; CIACH, Grzegorz J. **Estimation of rainfall interstation correlation.** Journal of Hydrometeorology, v. 2, n. 6, p. 621-629, 2001.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Previsão Numérica.** Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/vime>>. Acesso em: 08 de Novembro de 2019.

INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **CPTEC lança novo modelo global e investe para se manter como referência mundial em previsões para a região tropical.** Informativo INPE – n.6, 2016. Disponível em <<http://www.inpe.br/informativo/06/nota.01.php>>. Acesso em: 02 de Junho de 2019

KESSLER, Edwin; NEAS, Barbara. **On correlation, with applications to the radar and raingage measurement of rainfall.** Atmospheric Research, v. 34, n. 1-4, p. 217-229, 1994.

LABADIE, John W. **Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review.** Journal of water resources planning and management, v. 130, n. 2, p. 93-111, 2004.

LABSID – Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões (USP). **AcquaNet - Manual do AcquaNet** 2013. 12 ago. 2015. Disponível em: <<http://www.labsid.eng.br/software/ManualAcquaNet2013.pdf>>. Acesso em: 04 de Janeiro de 2018.

LAMBIASI, Layla; GROSS, Alexandre; MONZONI, Mario. **Estimation of the economic loss associated with the potential water scarcity due to climate**

change over a river basin in northeast Brazil: guiding policy-making process on a tangible scientific basis. 2017.

LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. **SMAP: A simplified hydrologic model.** In: Applied Modeling in Catchment Hydrology Water Resources Publications, Littleton, Co. 1982, p. 167–176.

LORIATO, Ayres Geraldo et al. **Inventário de emissões com alta resolução para a região da grande Vitória utilizando o Sistema de Modelagem Integrada WRF-SMOKE-CMAQ.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 33, n. 3, p. 521-536, 2018.

MESINGER, Fedor et al. **The step-mountain coordinate: model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of an Appalachian redevelopment.** Monthly Weather Review, v. 116, n. 7, p. 1493-1518, 1988.

MESINGER, Fedor et al. **An upgraded version of the Eta model.** *Meteorology and Atmospheric Physics*, v. 116, n. 3-4, p. 63-79, 2012.

DE MOURA, RILDO GONÇALVES et al. **Avaliação do modelo regional ETA utilizando as análises do CPTEC e NCEP.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 25, n. 1, p. 46-53, 2010.

MUKAKA, Mavuto M. **A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research.** Malawi Medical Journal, v. 24, n. 3, p. 69-71, 2012.

NASH, J. Eamonn; SUTCLIFFE, Jonh V. **River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles.** Journal of hydrology, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration. **Global Forecast System (GFS).** Disponível em: <<https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forcast-system-gfs>>. Acesso em 08 de Novembro de 2019

PELLEGRINI, Cláudio C. et al. **Análise do Desempenho do Modelo WRF num Episódio de Vento Intenso e Persistente num Grande Reservatório Tropical.** Revista Brasileira de Meteorologia. n. 34. p. 121-138. 2019.

PEZIJ, Michiel et al. **The role of evidence-based information in regional operational water management in the Netherlands.** Environmental science & policy, v. 93, p. 75-82, 2019.

PORTO, R. L. L., ROBERTO, A. N., SCHARDONG, A., MELLO JÚNIOR, A. V., TEIXEIRA, C. A., OLIVEIRA, C. P. M. **Sistema de suporte a decisão para análise de sistemas de recursos hídricos. Métodos numéricos em recursos hídricos**, v. 6, p. 93-240, 2003.

PORTO, R. L. L. et al. **Acquanet: arquitetura, estratégias e ferramentas.** XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, v. 20, 2005.

ROCHA FILHO, K.; CONDE, Flavio; ANDRIOLI, Cristiane Pires. **Correção em tempo real da precipitação estimada por um radar meteorológico com uma rede de superfície.** Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, 2013.

RPN – Recherche en Prevision Numerique. **The Global Environmental Multiscale (GEM) model.** Disponível em:

< http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/rpn/gef_html_public/index.html > Acesso em 08 de Novembro de 2019

SABESP Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Estudos de Cheias para Avaliação dos Volumes de Espera dos Aproveitamentos do Sistema Cantareira**, São Paulo - SP. 2009.

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **CHESS - Crise Hídrica, Estratégia e Soluções da Sabesp.** 30 abr. 2015. Disponível em: < http://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/crisehidrica/chess_crise_hidrica.pdf>.

Acesso em: 24 de Abril de 2017.

SABESP Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Mananciais**. Disponível em <<http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=31>>. Acesso em: 15 de Janeiro de 2018.

SCHARDONG, A. et al. **Comparação de algoritmos evolucionários na calibração de modelo chuva-vazão - SMAP**. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009.

SCHARDONG, André et al. **Desempenho do modelo AcquaNetXL na alocação de água em sistemas de recursos hídricos complexos**. Eng. Agríc., Jaboticabal, v. 29, n. 4, p. 705-715, 2009.

SCHARDONG, André ; GARCIA, L.A.V. ; PORTO, Rubem La Laina ; MELLO JUNIOR, A. V. . **Modelo de operação em tempo real para o sistema produtor do Alto Tietê**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 15, p. 37-48, 2010.

SCHARDONG, Andre; SIMONOVIC, Slobodan P.; GARCIA, Joaquin IB. **O possível efeito de mudanças climáticas e suas incertezas sobre afluições em sistemas de recursos hídricos**. REGA – v. 11, n. 2, p. 53-65, 2014

SHEPHERD, Anne; ORTOLANO, Leonard. **Water-supply system operations: Critiquing expert-system approach**. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 122, n. 5, p. 348-355, 1996.

SIMONOVIC, Slobodan P. **Managing water resources: methods and tools for a systems approach**. Routledge, 2012.

SKAMAROCK, William C. et al. **A description of the advanced research WRF version 3**, NCAR Technical Note. National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA, 2008.

TAYLOR, Richard. **Interpretation of the correlation coefficient: a basic review**. Journal of diagnostic medical sonography, v. 6, n. 1, p. 35-39, 1990.

TUCCI, Carlos EM et al. **Modelos hidrológicos**. UFRGS, 1998.

VIEIRA JUNIOR, Pedro Abel et al. **Previsões meteorológicas do Modelo Eta para subsidiar o uso de modelos de previsão agrícola no Centro-Sul do Brasil**. Ciência Rural, v. 39, n. 2, 2009.

YEH, William W.-G. **Reservoir management and operations models: A state-of-the-art review**. Water resources research, v. 21, n. 12, p. 1797-1818, 1985.