UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO

RAFAEL REZENDE NOVAIS

**Avaliação dos impactos das mudanças climáticas no regime hidrológico do Sistema
Cantareira**

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos (SP)

2016

RAFAEL REZENDE NOVAIS

**Avaliação dos impactos das mudanças climáticas no regime hidrológico do Sistema
Cantareira**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do título
de Mestre em Ciências: Engenharia Hidráulica e
Saneamento

Orientador: Prof^o Dr. João Luiz Boccia Brandão

São Carlos (SP)

2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Novais, Rafael Rezende
N935a Avaliação dos impactos das mudanças climáticas no
regime hidrológico do Sistema Cantareira / Rafael
Rezende Novais; orientador João Luiz Boccia Brandão.
São Carlos, 2016.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Hidráulica e Saneamento e Área de
Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2016.

1. MAGICC/SCENGEM. 2. SMAP. 3. sistema cantareira.
4. disponibilidade hídrica. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **RAFAEL REZENDE NOVAIS**.

Título da dissertação: Avaliação dos impactos das mudanças climáticas no regime hidrológico do Sistema Cantareira".

Data da defesa: 20/09/2016.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Davi Gasparini Fernandes Cunha**
(Orientador designado)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Rubem La Laina Porto**
(Escola Politécnica/EP-USP)

APROVADO

Prof. Dr. **Antonio Carlos Zuffo**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Profa. Associada **Maria Bernadete A. Varesche Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gratidão ao Universo por todas as oportunidades oferecidas a mim ao longo da minha vida e que me fizeram chegar às conquistas e aprendizados que alcancei até então;

Aos meus pais Luiz Carlos e Maria Luísa, pela compreensão nos momentos de impaciência, pelo carinho e apoio incondicional, por terem forjado a base de meu caráter e por proporcionarem a mim as condições de chegar onde cheguei, amo vocês;

Ao meu irmão Leonardo, que aqui em São Carlos acabou por se tornar um parceiro de quarto, e tenho certeza, de toda a vida. Mesmo nos momentos difíceis e de desentendimentos nos mantivemos fortes, unidos e com uma amizade pura e verdadeira;

À Rosa, muito obrigado por todo o carinho e por ser minha segunda mãe;

Ao Geólogo e pesquisador Novais, pai, seus estudos e fascínio pela atividade acadêmica me incentivaram a continuar firme na minha jornada, deixo aqui minha admiração;

Aos meus familiares, avôs e avós (em memória), Tio Waldemar, Tia Helena e família, e àqueles que mesmo não compartilhando o mesmo sangue, Tio Valdir, Tia Regina e família, considero parte de minha vida;

Ao Professor João Luiz Boccia Brandão, pela orientação, ensinamentos passados, serenidade no decorrer da pesquisa e à amizade criada, muito obrigado;

Aos amigos do Labsin, Marcelo, Marcão, Taís, Daysy, Loide, Tchê, Leandro, Anne, Pariconha, Aninha, Chapinha, Maria, Tatiane, Arlan, Rodrigo, Renata e Raquel, com quem dividi dias de trabalho, curtição, trocas de conhecimento e vivências importantes para o meu desenvolvimento científico;

Aos parceiros que tive a oportunidade de conviver na Rep. Cooperativa dos Loucos, Seu Jorge, Alecrim, Sergião, Marião, Diogo e Rogerinho, aprendi muito com todos vocês;

Aos amigos de longa data e àqueles feitos em São Carlos, Tiagão, Quixeramubim, Day, Fer, Ju, Cebola, Pauleta, Monstro, Teta, Vitória, Júlia, Carolzinha, Gui, Elias, Gabi, Leo Bermudinha, Leo, Dudu, Leila e todos que tive a oportunidade de conhecer aqui;

Ao Instituto Espiritual Xamânico Flor de Lótus, e todos que fazem e fizeram parte daquele lugar iluminado, tenho plena certeza e confiança na seriedade e na elevação das atividades lá realizadas. Saio de lá uma pessoa mais consciente, gratidão do fundo do meu coração por tudo;

Aos amigos de Viçosa, da EAB 2008, principalmente Corel, Bonja, Pango, Tamila, Agnes e Paulo por continuarem presentes em minha vida.

Ao Phillipe, amigo e conterrâneo com quem convivi durante essa minha jornada em São Carlos, aprendi muito com você, irmão, “tamo junto”;

À Dayane, pelo companheirismo desde o começo, uma amiga com quem aprendi muito e compartilhei momentos especiais. Muito obrigado pelo carinho em todos os momentos;

À Escola de Engenharia de São Carlos e ao Departamento de Hidráulica e Saneamento pela oportunidade de realizar o mestrado;

À Sá, Priscila, Rose e André, funcionários do departamento, pela atenção e informações;

Ao CNPQ, pela bolsa concedida.

“There are only two ways to live your life. One is as though nothing is a miracle. The other is as though everything is a miracle.”

Albert Einstein

RESUMO

NOVAIS, R. N. **Avaliação dos impactos das mudanças climáticas no regime hidrológico do Sistema Cantareira**. 2016. 167 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2016.

Com o quadro de escassez hídrica apresentado nos últimos anos no estado de São Paulo, cada vez é mais evidente a necessidade do planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos de forma racional, compartilhada e sustentável. Além do aumento da demanda por água devido ao contínuo crescimento populacional, somam-se, ao desafio da gestão integrada dos recursos hídricos, as alterações climáticas que vêm sendo observadas ao longo das últimas décadas. Diante a situação apresentada, essa pesquisa teve como objetivo avaliar, de forma quantitativa, as possíveis alterações no regime hidrológico no conjunto de reservatórios do Sistema Cantareira, em diferentes cenários de mudanças climáticas futuras. O simulador climático MAGICC/SCENGEN foi utilizado para estimar as alterações climáticas previstas para o ano de 2100 em dois diferentes cenários de emissões de gases de efeito estufa, A1FIMI e B2MES. As variações de temperatura e precipitação foram incorporadas às séries climatológicas observadas na região em estudo. Para simular o comportamento das bacias contribuintes ao Sistema Cantareira, foi selecionado o modelo hidrológico SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*). As séries alteradas de temperatura e precipitação serviram como dados de entrada do modelo hidrológico calibrado. As séries de vazões originadas desse processo, referentes aos dois cenários futuros A1FIMI e B2MES, foram comparadas às séries de vazões simuladas pelo modelo hidrológico no período de 1990 a 2010. Os resultados indicam queda no regime de vazões para os dois cenários futuros analisados, com diminuição mais acentuada para o cenário A1FIMI, de alta emissão de gases de efeito estufa. A diminuição nas vazões mostra-se preocupante, principalmente por se tratar do principal sistema de abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo, o que traz à tona a necessidade de repensar as medidas adotadas para a exploração dos recursos hídricos no Sistema Cantareira.

Palavras-chave: MAGICC/SCENGEN. SMAP. Sistema Cantareira. Disponibilidade hídrica.

ABSTRACT

NOVAIS, R. N. **Climate change impacts assessment on the hydrological regime of the Cantareira System.** 2016. 167 f. Master Thesis – São Carlos School of Engineering, São Paulo University. São Carlos, 2016.

The recent water shortages in the state of São Paulo, highlight the increasingly need for rational and sustainable water resources management. The increase in water demand due to continuous populational growth associated with climate changes observed in the past decades challenge the integrated management of water resources. Given this context, this research aimed to evaluate possible changes in the hydrological cycle of the Cantareira System reservoirs associated to different future climate change scenarios. A climate scenario generator (MAGICC / SCENGEN) was used to estimate the climate for the year 2100 with two different greenhouse gas emissions scenarios, A1FIMI and B2MES. Variations in temperature and precipitation were incorporated into climatological series observed in the study area. The SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure) hydrologic model was used to simulate the behavior of the Cantareira System catchment basins. The altered temperature and precipitation series were used as input data in the calibrated hydrologic model. The discharge series of the two future scenarios obtained were compared to discharges simulated in recent climate conditions (series from 1990 to 2010) with the same hydrologic model. The results show a drop in the discharge series for the two future scenarios analyzed, with more marked decrease for A1FIMI, a scenario with higher greenhouse gases emissions. The decrease in discharge rates is a concern, especially because the Cantareira System is the main water system to supply São Paulo's metropolitan area. This highlights a need to rethink the water use and management in the Cantareira System.

Keywords: MAGICC/SCENGEN. SMAP. Cantareira system. Water availability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração esquemática dos cenários desenvolvidos pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (<i>Special Report on Emissions Scenarios – SRES</i>) (Fonte: IPCC, 2000).....	36
Figura 2 – Quadro evolutivo da elevação de temperatura no decorrer do século para os cenários SRES (Fonte: IPCC, 2000).....	37
Figura 3 – Quadro evolutivo das emissões de gases de efeito estufa para as quatro famílias de cenário propostas pelo IPCC (Fonte: IPCC, 2000).....	37
Figura 4 – Esquematização de um modelo nas fases de um estudo hidrológico (Fonte: adaptado de Tucci, 2005).....	41
Figura 5 – Esquematização de uma bacia hidrográfica simulada por um modelo concentrado (a) e distribuído (b) e (c) (Fonte: Tucci, 2005).....	42
Figura 6 – Mundo real heterogêneo representado por um modelo homogêneo (Fonte: Wagener e Gupta, 2005).	43
Figura 7 - (a) Função com um único ponto extremo (b) Função com múltiplos picos (Fonte: Goldberg, 1989).....	48
Figura 8 – Processo de reprodução no método dos AG's.	49
Figura 9 – Troca de material genético por meio de <i>crossover</i> e posterior modificação de um gene de forma randômica pela mutação.	50
Figura 10 - Posição geográfica do Sistema Cantareira entre os estados de São Paulo e Minas Gérias.....	51
Figura 11 - Perfil esquemático do Sistema Cantareira. Fonte: ANA (2016).....	53
Figura 12 - Delimitação das sub-bacias do Sistema Cantareira.	54
Figura 13 - Uso e ocupação do solo na sub-bacia do Reservatório Cachoeira (Fonte: Bernardo e Nossack, 2015).	55
Figura 14 – Porcentagem das classes de uso do solo do Sistema Cantareira (Fonte: adaptado de Whately e Cunha, 2007).	56
Figura 15 – Posicionamento geográfico do Sistema Cantareira entre a RMSP e a bacia do Piracicaba reforça a relação conflituosa entre os usos da água.	61
Figura 16 - Fluxograma com as etapas da metodologia.	64
Figura 17 - Esquema físico do modelo SMAP com discretização mensal (Fonte: adaptado de Lopes et al., 1981).	68
Figura 18 - Disposição dos postos pluviométricos e meteorológicos na área de estudo.....	73

Figura 19 - Interface gráfica da função de Algoritmo Genético do <i>Optimization Tool</i> .	76
Figura 20 – Esquematização do método da roleta.	78
Figura 21 - (a) Interface gráfica do modelo MAGICC; (b) interface gráfica do gerador de cenários SCENGEN.	82
Figura 22 - Estrutura do <i>software</i> MAGICC/SCENGEN (Fonte: Wigley, 2008).	84
Figura 23 - Projeção anual de alteração na temperatura média global pelo MAGICC/SCENGEN.	85
Figura 24 - Projeção anual de alteração na precipitação média global pelo MAGICC/SCENGEN.	85
Figura 25 – Evolução do valor da função objetivo para a sub-bacia Atibainha.	92
Figura 26 - Evolução do valor da função objetivo para a sub-bacia Jaguari/Jacareí.	92
Figura 27 - Hidrogramas de afluência mensal observada e simulada do reservatório Jaguari/Jacareí.	97
Figura 28- Hidrogramas de afluência mensal observada e simulada do reservatório Cachoeira.	98
Figura 29- Hidrogramas de afluência mensal observada e simulada do reservatório Atibainha.	99
Figura 30 - Hidrogramas de afluência mensal observada e simulada do reservatório Paiva Castro.	100
Figura 31 - Análise de resíduos para a vazão média mensal afluenta ao reservatório Jaguari/Jacareí - (a) variação temporal dos resíduos (b) dispersão dos resíduos relativos em relação à vazão média mensal observada.	101
Figura 32- Análise de resíduos para vazão média mensal afluenta ao reservatório Atibainha - (a) variação temporal dos resíduos da vazão média mensal e (b) dispersão dos resíduos em relação à vazão média mensal observada.	101
Figura 33 – Curva de permanência das vazões observadas <i>versus</i> simuladas da sub-bacia Jaguari/Jacareí.	103
Figura 34 - Curva de permanência das vazões observadas <i>versus</i> simuladas da sub-bacia Atibainha.	103
Figura 35 – Sítio selecionado para representar as alterações na temperatura e precipitação na área do Sistema Cantareira.	105
Figura 36 – Quadrante de 2,5° x 2,5° cobrindo toda a área de contribuição do Sistema Cantareira.	106

Figura 37 - Alterações geradas pelo MAGICC/SCENGEN na precipitação para o ano de 2100.	107
Figura 38 - Variação da precipitação na sub-bacia Jaguari/Jacareí para os dois cenários futuros analisados.	108
Figura 39 - Variação da precipitação na sub-bacia Atibainha para os dois cenários futuros analisados.	109
Figura 40 - Alterações geradas pelo MAGICC/SCENGEN nas temperaturas mensais para o ano de 2100.....	111
Figura 41 – Variação da evapotranspiração na sub-bacia Jaguari/Jacareí para os dois cenários futuros analisados.	112
Figura 42 - Variação da evapotranspiração na sub-bacia Atibainha para os dois cenários futuros analisados.	112
Figura 43 - Curva de permanência das vazões afluentes dos cenários A1FIMI e B2MES no reservatório Jaguari/Jacareí.	115
Figura 44- Variação da vazão média mensal afluente no reservatório Jaguari/Jacareí para o cenário A1FIMI.	117
Figura 45 - Variação da vazão média mensal afluente no reservatório Jaguari/Jacareí para o cenário B2MES.	118
Figura 46 - Variação da vazão média mensal afluente ao reservatório Jaguari/Jacareí observada e nos cenários A1FIMI e B2MES.	119
Figura 47- Curva de permanência das vazões afluentes dos cenários A1FIMI e B2MES no reservatório Atibainha.	120
Figura 48 - Variação da vazão média afluente mensal no cenário A1FIMI no reservatório Atibainha.	121
Figura 49 - Variação da vazão média afluente mensal no cenário B2MES no reservatório Atibainha.	122
Figura 50 - Variação da vazão média mensal afluente ao reservatório Atibainha observada e nos cenários A1FIMI e B2MES.	123
Figura 51 – Variação percentual entre as vazões mensais do cenário de referência e o cenário A1FIMI.....	124
Figura 52 - Variação percentual entre as vazões mensais do cenário de referência e o cenário B2MES.	124
Figura 53 – Áreas de influência de cada estação pluviométrica nas sub-bacias do Sistema Cantareira.....	143

Figura 54 - Áreas de influência de cada estação climatológica nas sub-bacias do Sistema Cantareira.	145
Figura 55 – Hidrogramas de afluência mensal observada e simulada do reservatório Jaguari/Jacareí no período de validação do modelo hidrológico.	147
Figura 56 - Hidrogramas de afluência mensal observada e simulada do reservatório Cachoeira no período de validação do modelo hidrológico.	147
Figura 57 – Hidrogramas de afluência mensal observada e simulada do reservatório Atibainha no período de validação do modelo hidrológico.	148
Figura 58 – Hidrogramas de afluência mensal observada e simulada do reservatório Paiva Castro no período de validação do modelo hidrológico.	148

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Informações hidrológicas dos aproveitamentos do Sistema Cantareira (Fonte: adaptado de ANA/DAEE, 2013).	54
Tabela 2 - Áreas de municípios inseridos no Sistema Cantareira (Fonte: Whately e Cunha, 2007).	58
Tabela 3 – Vazões de retirada do Sistema Cantareira de acordo com suas prioridades (Fonte: DAEE, 2004).	59
Tabela 4 – Valor da constante de recessão KKT e número de meses necessário para o decaimento do escoamento básico para a metade de seu valor (Fonte: Lopes et al., 1981).	67
Tabela 5 – Estações pluviométricas selecionadas para o projeto.	69
Tabela 6 – Estações climatológicas selecionadas para o projeto.	72
Tabela 7 - Faixa de variação dos parâmetros calibráveis do modelo SMAP (Fonte: adaptado de Lopes, 1999).	75
Tabela 8 - Valores dos parâmetros utilizados para definir o Algoritmo Genético.	79
Tabela 9 - Modelos acoplados atmosfera/oceano de circulação global contidos no MAGICC/SCENGEN versão 5.3 (Fonte: adaptado de Adam, 2011).	86
Tabela 10 – Valores otimizados dos parâmetros do modelo hidrológico.	93
Tabela 11 – Parâmetros estatísticos para calibração do modelo hidrológico em cada uma das sub-bacias analisadas.	94
Tabela 12 – Desempenho dos coeficientes estatísticos para a avaliação de modelos hidrológicos em escala mensal.	95
Tabela 13 – Coeficientes estatísticos para validação do modelo hidrológico em cada uma das sub-bacias analisadas.	96
Tabela 14 - Ranking de classificação para a seleção dos modelos climáticos.	104
Tabela 15 - Seleção final dos melhores modelos climáticos para representar a região analisada.	105
Tabela 16 – Alteração na precipitação média mensal gerada pelo MAGICC/SCENGEN para o ano de 2100.	107
Tabela 17 – Precipitações anuais observadas e em dois cenários futuros para a sub-bacia Jaguari/Jacareí.	110
Tabela 18 - Precipitações anuais observadas e em dois cenários futuros para a sub-bacia Atibainha.	110

Tabela 19 - Alterações na temperatura média mensal geradas pelo MAGICC/SCENGEN para o ano de 2100.	111
Tabela 20 - Evapotranspirações anuais observadas e em dois cenários futuros para a sub-bacia Jaguari/Jacareí.	113
Tabela 21 - Evapotranspirações anuais observadas e em dois cenários futuros para a sub-bacia Atibainha.	113
Tabela 22 – Valores de $Q_{90\%}$, $Q_{95\%}$ e Q_{MLT} para os diferentes cenários analisados na sub-bacia Jaguari/Jacareí.	116
Tabela 23 – Variação percentual da vazão média afluente mensal no reservatório Jaguari/Jacareí para os dois cenários futuros analisados em comparação à vazão média mensal de referência.	118
Tabela 24 - Valores de $Q_{90\%}$, $Q_{95\%}$ e Q_{MLT} para os diferentes cenários analisados na sub-bacia Atibainha.	121
Tabela 25 - Variação percentual da vazão média afluente mensal no reservatório Atibainha para os dois cenários futuros analisados em comparação à vazão média mensal de referência.	122
Tabela 26 – Série de evapotranspiração mensal (mm) da Estação 1.	149
Tabela 27 - Série de evapotranspiração mensal (mm) da Estação 2.	149
Tabela 28 - Série de evapotranspiração mensal (mm) da Estação 3.	150
Tabela 29 - Série de evapotranspiração mensal (mm) da Estação 4.	150
Tabela 30 – Série mensal de precipitação da sub-bacia Jaguari/Jacareí.	151
Tabela 31 - Série mensal de precipitação da sub-bacia Cachoeira.	152
Tabela 32 - Série mensal de precipitação da sub-bacia Atibainha.	152
Tabela 33 - Série mensal de precipitação da sub-bacia Paiva Castro.	153
Tabela 34 - Série mensal de evapotranspiração da sub-bacia Jaguari/Jacareí.	155
Tabela 35 - Série mensal de evapotranspiração da sub-bacia Cachoeira.	156
Tabela 36 - Série mensal de evapotranspiração da sub-bacia Atibainha.	156
Tabela 37 - Série mensal de evapotranspiração da sub-bacia Paiva Castro.	157
Tabela 38- Série mensal de vazão afluente ao reservatório Jaguari/Jacareí	159
Tabela 39 - Série mensal de vazão afluente ao reservatório Cachoeira.	160
Tabela 40 - Série mensal de vazão afluente ao reservatório Atibainha	160
Tabela 41 - Série mensal de vazão afluente ao reservatório Paiva Castro.	161
Tabela 42 - Série mensal de precipitação da estação pluviométrica Barragem Cachoeira.	163
Tabela 43 - Série mensal de precipitação da estação pluviométrica Barragem Atibainha. ...	163

Tabela 44 - Série mensal de precipitação da estação pluviométrica Barragem Jaguari.	164
Tabela 45 - Série mensal de precipitação da estação pluviométrica Tapera Grande.	164
Tabela 46 - Série mensal de precipitação da estação pluviométrica Bairro Cuiabá.	165
Tabela 47 - Série mensal de precipitação da estação pluviométrica Água do Poço.	165
Tabela 48 - Série mensal de precipitação da estação pluviométrica Mato Mole.	166
Tabela 49 - Série mensal de precipitação da estação pluviométrica Fazenda Retiro.	166
Tabela 50 - Série mensal de precipitação da estação pluviométrica Monte Verde.	167
Tabela 51 - Série mensal de precipitação da estação pluviométrica Ponte Nova.	167
Tabela 52 - Série mensal de precipitação da estação pluviométrica Extrema.	168
Tabela 53 - Série mensal de precipitação da estação pluviométrica Fazenda Rabelo.	168
Tabela 54- Série mensal de precipitação da estação pluviométrica Sertãozinho.	169
Tabela 55 - Série mensal de precipitação da estação pluviométrica Joanópolis.	169

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	Algoritmo Genético
ANA	Agência Nacional de Águas
AR5	<i>Assessment Report 5</i>
CFSR	<i>Climate Forecast System Reanalysis</i>
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
ETA	Estação de Tratamento de Água
GAO	<i>Genetic Algorithm Optimization</i>
GCM	<i>General Climate Model / Global Climate Model</i>
HCFC	Hidroclorocarbonos
HFC	Hidrofluorocarboneto
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MAGICC	<i>Model for the Assessment of Greenhouse-Gas Induced Climate Change</i>
NCEP	<i>National Center for Environmental Prediction</i>
NSE	Coeficiente de <i>Nash-Sutcliffe</i>
N ₂ O	Óxido Nitroso
PBIAS	<i>Percent Bias</i>
PCJ	Piracicaba, Capivari e Jundiaí
PFC	Perfluorocarbono
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PIB	Produto Interno Brasileiro
RCM	<i>Regional Climate Model</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SCENGEN	<i>Scenario Generator</i>
SMAP	<i>Soil Moisture Accounting Procedure</i>
SO ₂	Dióxido de Enxofre
SRES	Special Report for Emissions Cenarios

LISTA DE SÍMBOLOS

A_d	Área de drenagem [Km^2]
C_{rec}	Coeficiente de recarga do aquífero [%]
E_2	Coeficiente de escoamento superficial [adimensional]
EB	Escoamento básico [m^3s^{-1}]
ER	Evapotranspiração real [mm]
ES	Escoamento superficial [m^3s^{-1}]
ET_o	Evapotranspiração de referência [mm]
e_a	Pressão de vapor atual [KPa]
e_s	Pressão de saturação de vapor [KPa]
G	Fluxo de calor no solo [$\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$]
KKT	Constante de recessão do escoamento básico [mês]
Q_{afluente}	Vazão média afluyente ao reservatório [m^3s^{-1}]
Q_{calc}	Vazão calculada [m^3s^{-1}]
$Q_{\text{defluente}}$	Vazão média defluente ao reservatório [m^3s^{-1}]
Q_M	Vazão média mensal [m^3s^{-1}]
Q_{MLT}	Vazão média de longo termo [m^3s^{-1}]
Q_{obs}	Vazão observada [m^3s^{-1}]
$Q_{\text{transferência}}$	Vazão média transferida do reservatório [m^3s^{-1}]
$Q_{90\%}$	Vazão com 90% de probabilidade de excedência [m^3s^{-1}]
$Q_{95\%}$	Vazão com 95% de probabilidade de excedência [m^3s^{-1}]
P	Precipitação [mm]
REC	Recarga do aquífero [mm]
R_n	Radiação líquida na superfície [$\text{MJ m}^{-2}\text{dia}^{-1}$]
R_{SOLO}	Reservatório superior do solo [mm]
R_{SUB}	Aquífero [mm]
SAT	Nível de saturação do solo [mm]
Vol	Volume [m^3]
ΔT	Variação da temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
ΔP	Variação da Precipitação [%]
T_u	Teor de umidade do solo [%]
γ	Constante psicrométrica [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	27
2.	OBJETIVOS	29
2.1.	Objetivo geral	29
2.2.	Objetivos específicos	29
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
3.1.	Mudanças Climáticas.....	31
3.2.	Modelos Climáticos	32
3.3.	Cenários Futuros do IPCC	34
3.4.	Impactos das alterações climáticas no ciclo hidrológico	38
3.5.	Modelos Hidrológicos	39
4.	ÁREA DE ESTUDO	51
4.1.	Uso e Ocupação do Solo.....	55
4.2.	Clima	56
4.3.	Municípios e População	57
4.4.	Usos da água no Sistema Cantareira.....	58
5.	METODOLOGIA	63
5.1.	Descrição Geral	63
5.2.	O modelo SMAP (<i>Soil Moisture Accounting Procedure</i>)	64
5.3.	Dados para a calibração do modelo SMAP	68
5.4.	Calibração dos parâmetros do modelo hidrológico	73
5.5.	Estimativa das alterações de temperatura e precipitação.....	81
5.6.	Geração de séries de vazão futura	89
5.7.	Avaliação da disponibilidade hídrica	90
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	91
6.1.	Otimização dos parâmetros do Modelo Hidrológico.....	91
6.2.	Seleção dos modelos climáticos	104
6.3.	Projeção das alterações climáticas no Sistema Cantareira	105
6.4.	Análise das séries de vazão futura	113
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	127

8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	131
	APÊNDICES.....	141

1. INTRODUÇÃO

Desde a década de 1980, evidências científicas sobre a possibilidade da mudança do clima no âmbito mundial vêm despertando interesse crescente no público e na comunidade acadêmica (MARENGO, 2008). Com o avanço de pesquisas e estudos sobre o tema, já existe no meio científico certo consenso de que a elevação dos níveis de gás carbônico na atmosfera, por emissão antrópica, tem contribuído de forma direta com as modificações nas condições climáticas históricas (IPCC, 2013).

Os impactos das alterações nos ciclos naturais do clima na terra são intensos, podendo afetar a biodiversidade no planeta, assim como as dinâmicas e os processos biológicos importantes para a manutenção do meio ambiente (MARENGO, 2006). Contudo, um dos impactos mais relevantes dessas alterações para a sociedade são as mudanças na disponibilidade hídrica. Isso porque as modificações nos regimes de precipitação e temperatura, como efeito do aquecimento global, possuem influência direta no ciclo da água (ARNBJERG-NIELSEN, 2012; MENDOZA et al., 2015).

Adicionalmente, com o desenvolvimento das cidades e o intenso crescimento populacional, as demandas por água para abastecimento público, irrigação, uso industrial e outras atividades têm aumentado significativamente, tornando a partilha dos recursos hídricos um processo cada vez mais conflituoso. Como consequência, um dos grandes desafios da atualidade é a gestão da água de forma integrada, racional e sustentável. Esse cenário torna-se ainda mais complexo para os gestores e tomadores de decisão, diante a perspectiva dos impactos de alterações climáticas futuras (WATTS, 2010).

Acompanhando o desenvolvimento de grandes centros populacionais, a partir da década de 1970, fez-se necessário a implantação de sistemas de reservatórios para captação de água nas grandes cidades brasileiras. Nessa época, começa a ser construído o Sistema Cantareira, aproveitamento hídrico composto por quatro reservatórios, responsável pelo abastecimento de parte da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) (BRANDÃO, 2004).

Além de ser o maior sistema produtor de água da RMSP, o Cantareira também beneficia as cidades inseridas da Bacia do Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ) regularizando vazões e amortecendo possíveis cheias. Contudo, na última década alguns dos reservatórios constituintes do sistema vêm apresentando déficit hídrico. Segundo os Dados de Referência Acerca da Outorga do Sistema Cantareira (ANA/DAEE, 2013), foi constatado que no período

de 2004 a 2012, as vazões médias afluentes ao reservatório Jaguari-Jacareí, maior aproveitamento do Cantareira, atingiram reduções de 8% em relação à média histórica.

O déficit recorrente na última década no Sistema Cantareira, aliado ao aumento contínuo na demanda por água, faz com que a RMSPP venha passando, nos últimos anos, por uma escassez hídrica sem precedentes. Se por um lado, a pressão na demanda pelos recursos hídricos é capaz de provocar a diminuição da quantidade de água disponível, por outro, a situação pode piorar devido aos efeitos das mudanças climáticas.

O caráter duvidoso e de difícil previsão da disponibilidade hídrica futura, faz da análise de cenários e simulações de possíveis alterações no clima, uma importante ferramenta para a implementação de estratégias e políticas mitigadoras relativas ao uso racional e sustentável das águas. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é realizar uma avaliação das possíveis alterações no ciclo hidrológico do Sistema Cantareira a partir de diferentes cenários de emissão de gases de efeito estufa.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O principal objetivo desse estudo é avaliar as possíveis alterações no ciclo hidrológico do Sistema Cantareira, a partir de diferentes cenários futuros de emissão de gases de efeito estufa.

2.2. Objetivos específicos

- Calibração do modelo hidrológico e simulação para as sub-bacias contribuintes ao Sistema Cantareira;
- Estimativa das modificações nos regimes de precipitação e temperatura a partir de diferentes cenários futuros de emissão de gases de efeito estufa, para a área em estudo;
- Simulação das vazões futuras, mediante as alterações de temperatura e precipitação estimadas, nas sub-bacias contribuintes ao Sistema Cantareira;
- Avaliar os impactos das mudanças climáticas nas séries de vazões afluentes aos reservatórios do Sistema Cantareira.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Mudanças Climáticas

Os potenciais efeitos das mudanças na dinâmica climática global têm sido alvo de interesse da comunidade científica já há algum tempo. Com o objetivo de estimular as pesquisas a respeito dos cenários de mudanças climáticas para o futuro e entender os riscos induzidos por essas alterações na sociedade, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) estabeleceu o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*) (MARENGO, 2006).

A partir da criação do IPCC, estudos científicos vêm apresentando evidências de mudanças significativas no clima do planeta. Ainda que existam muitas incertezas nas previsões dessas mudanças, a confiança de que a temperatura global irá aumentar no decorrer das próximas décadas já é considerada uma realidade (MEEHL et al., 2007; RASMUSSEN et al., 2014). Além disso, existem fortes indícios de que há a influência humana nessas alterações, conforme afirma IPCC (2013). O Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC-AR5) aponta como *extremamente provável* (probabilidade de até 95%) que mais da metade do incremento observado na temperatura média global tenha sido causado pelo aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, advindos de atividades antrópicas (IPCC, 2013).

As mudanças climáticas têm potencial de alterar substancialmente os processos do ciclo hidrológico, como demonstrado em diversos estudos realizados em diferentes ambientes (BREKKE et al., 2009; FARJAD; GUPTA; MARCEAU, 2016; HAGUMA et al., 2014; SILVEIRA et al., 2014). Apesar do consenso de que modificações no clima global têm impacto direto nas fases do ciclo da água, é observada a existência de grande variabilidade nas estimativas dessas alterações, que podem variar de acordo com o local e os cenários futuros adotados (ARNELL; GOSLING, 2013).

No intuito de avaliar as consequências do aquecimento global, e de como diferentes cenários futuros de emissão de gases de efeito estufa podem influenciar nesse processo, modelos matemáticos, que buscam a representação do sistema climático global, têm sido desenvolvidos, esses são os denominados Modelos Globais Atmosféricos (GCM's - *Global Climate Models*) (WILBY, 2010).

Adam (2011) afirma que esses modelos são considerados pela maioria da comunidade científica a melhor ferramenta para a simulação do clima, já que levam em conta de forma quantitativa (numérica) o comportamento da atmosfera, dos oceanos e da vegetação e suas interações, permitindo a análise das respostas do meio ambiente aos diferentes cenários de futuros de emissão de gases de efeito estufa.

3.2. Modelos Climáticos

Os principais modelos climáticos atualmente propostos são os chamados Modelos de Circulação Geral, posteriormente denominados Modelos Climáticos Globais (*Global Climate Model/General Climate Model* – GCM). Em geral, seu objetivo é simular o clima presente e projetar o clima futuro a partir de cenários de forçantes antropogênicas, como emissões de aerossóis e gases de efeito estufa. Os GCM's simulam os processos climáticos a partir da discretização da atmosfera em uma malha de células tridimensionais, onde cada célula troca radiação, calor, umidade e massa com sua célula vizinha. O modelo realiza cálculos com base nas leis físicas que descrevem o movimento do ar, mudanças na pressão atmosférica, temperatura e a formação das chuvas. Nas versões mais recentes de GCM's o comprimento horizontal dessas células pode variar de 100 a 1000 km (STONE; KNUTTI, 2010; MARENGO; NOBRE; CHOU, 2011).

A maioria dos GCM's é capaz de simular processos climáticos em uma escala continental e prover com uma acurácia razoável o clima global. Porém, mesmo que nas últimas décadas a evolução computacional tenha permitido a sofisticação desses modelos, Dibike e Coulibaly (2005) afirmam que suas habilidades não se mostram consistentes na simulação das dinâmicas climáticas locais e de menor escala.

A organização de eventos climáticos locais é caracterizada por uma escala atmosférica inferior às células dos GCM's típicos. Alves e Marengo (2010) ressaltam as limitações da representação climática regional por esses modelos, principalmente para uma região heterogênea como a América do Sul, onde a topografia local tem grande influência sobre as distribuições de chuva e temperatura. Entretanto, alguns processos atmosféricos que operam em uma escala menor do que as células discretizadas pelos modelos gerais de circulação conseguem ser captados pelos GCM's através de aproximações, mais conhecidas como parametrização (EDEN et al., 2012). Ainda que a parametrização consiga assimilar alguns processos em escalas menores que os *grids* que compõe os modelos gerais de circulação, é preciso o uso de técnicas mais apuradas para a modelagem climática em menores escalas.

Para Pierce et al. (2014), principalmente em estudos de antecipação e adaptação de impactos de mudanças climáticas, há a demanda de informações em escalas da ordem de 10 km, muito menor que a proporcionada pelos GCM's. Essa questão torna-se ainda mais relevante no contexto das simulações hidrológicas, as quais são sensíveis a propriedades do solo, declividade e topografia, aspectos diretamente ligados a uma alta resolução espacial.

Muitos métodos têm sido desenvolvidos na tentativa de eliminar a divergência entre as escalas fornecidas pelos GCM's e as requeridas para estudos hidrológicos, que sejam aplicáveis no âmbito regional (STONE; KNUTTI, 2010). A partir dessa necessidade foi desenvolvido o *downscaling*. Essa técnica fundamenta-se na obtenção de informações atmosféricas de alta resolução, a partir de resoluções atmosféricas mais grosseiras, possibilitando a avaliação e formulação de estratégias para mitigar os impactos de mudanças climáticas locais (WILBY; FOWLER, 2010).

A técnica de *downscaling*, de acordo com Mendes e Marengo (2010), consiste na extração de dados climáticos de menor escala a partir de dados de saída de um Modelo Global Atmosférico (GCM). O objetivo do *downscaling* é diminuir a discrepância entre a escala dos GCM's tradicionais e a escala necessária para avaliações regionais de impactos das mudanças climáticas. A premissa da técnica é de que escalas climáticas globais exercem forte influência nas escalas locais (MARAUN et al., 2010). Como a resolução espacial dos GCMs varia entre 250 km até a ordem de milhares de quilômetros, enquanto as forçantes que afetam o clima regional ocorrem em uma maior resolução espacial, o *downscaling* pode levar a uma melhora significativa na modelagem climática local (BUONOMO et al., 2007; WERTH; CHEN, 2014)

Segundo Maraun et al. (2010) existem duas abordagens da técnica, o *downscaling* dinâmico e o estatístico. O dinâmico é o aninhamento de um Modelo Climático Regional (*Regional Climate Model* – RCM) em um Modelo Climático Global (*Global Climate Model* – GCM) para representar a dinâmica atmosférica em um *grid* de maior resolução, limitado por uma área de interesse, sendo as condições de contorno estabelecidas pelo GCM.

Os Modelos Climáticos Regionais (RCM), utilizados no *downscaling* dinâmico, assim como os GMC's, tem como fundamento a divisão da atmosfera em uma malha de células, porém, ao passo que o último possui resolução da ordem de centenas de quilômetros, os RCM's têm uma escala espacial mais fina, na ordem de dezenas de quilômetros. Dessa forma, são capazes de absorver características locais como topografia, vegetação, corpos hídricos e outros elementos que influenciam diretamente o clima em menor escala (WILBY; FOWLER, 2010).

Por outro lado, Fowler et al. (2007), define o *downscaling* estatístico como a relação entre climas regionais e globais que pode ser expressa por meio de uma função estocástica e/ou determinística, possibilitando a transformação de séries de dados climáticos globais para regionais. Ou seja, o estabelecimento de uma conexão estatística, entre os processos ocorridos em larga escala capturados pelos GCM's, e as variáveis e condicionantes locais, de interesse para os estudos de alteração climática (TIMBAL et al., 2008).

Quando comparado ao *downscaling* estatístico, o dinâmico possui como limitação a necessidade de maiores recursos econômicos e computacionais, além de possuir distorções nas suas condições de contorno associadas ao GCM utilizado em seu aninhamento (SARHADI et al., 2016).

3.3. Cenários Futuros do IPCC

As emissões futuras de gases de efeito estufa são resultados de um complexo sistema dinâmico, determinado por forçantes como desenvolvimento demográfico, desenvolvimento socioeconômico e mudanças tecnológicas. A evolução desses aspectos é de difícil previsibilidade e cercado de muitas incertezas, o que motiva a exploração de variados cenários socioeconômicos futuros.

Nesse sentido, cenários são imagens alternativas do desdobramento desses aspectos no decorrer do século e são ferramentas apropriadas para a análise de como o crescimento populacional, crescimento econômico, comportamento cultural e mudanças tecnológicas irão influenciar nas emissões de gases de efeito estufa. Com isso, os cenários fornecem a possibilidade de investigação das mudanças climáticas, oferecendo condição para avaliações de impactos, adaptações e estratégias mitigadoras.

Quatro diferentes narrativas de possíveis futuros foram desenvolvidas pelo IPCC para descrever de forma consistente as relações entre a evolução das emissões atmosféricas e seu contexto na sociedade. Essas narrativas, também conhecidas como SRES (*Special Report on Emissions Scenarios*), representam diferentes formas de evolução demográfica, econômica e tecnológica, e por si só não contém juízo de valor, ou seja, podem ser interpretadas por alguns como positiva e por outros, como negativa.

Todos os cenários baseados na mesma narrativa constituem uma “família de cenários” e foram divididos da seguinte forma segundo IPCC (2000):

Família A1: descreve um futuro com um rápido crescimento econômico, a população global atinge o pico na metade do século e declina posteriormente, juntamente com a introdução de novas tecnologias mais eficientes. A grande característica é a convergência entre as regiões de forma a intensificar as interações culturais e sociais, além de redução considerável nas diferenças de renda per capita. A família de cenários A1 subdivide-se em três grupos, que podem ser diferenciados de acordo com as alternativas tecnológicas para seus sistemas de energia: uso intensivo de combustível fóssil (A1FI); fontes de energia não fósseis (A1T); uso balanceado de energias renováveis e não renováveis (A1B).

Família A2: descreve um futuro com o mundo bastante heterogêneo, onde a regionalização é dominante. O incremento populacional é constante, o desenvolvimento econômico e tecnológico é fragmentando e lento, havendo pouca interação entre as regiões do globo.

Família B1: descreve um futuro com o mesmo pico populacional ocorrendo na metade do século e o posterior declínio assim como no cenário A1, porém com rápidas mudanças na estrutura econômica, convergindo para uma economia baseada em serviços e informação. Há a introdução de novas tecnologias sustentáveis e limpas. Tem como ênfase soluções globais econômicas, sociais e ambientalmente sustentáveis, além da igualdade social.

Família B2: descreve um futuro com a ênfase em soluções locais tanto sociais quanto econômicas, além de um desenvolvimento ambientalmente sustentável. Sugere um mundo com um crescimento contínuo, porém com taxas inferiores ao A2. O nível de desenvolvimento econômico é intermediário, e as mudanças tecnológicas ocorrerão mais lentas, embora mais diversificadas que nos cenários B1 e A1. Tem como orientação a proteção ambiental e a igualdade social.

No total, 40 cenários, igualmente válidos e sem uma probabilidade específica de ocorrência, compõe o quadro das imagens alternativas de desenvolvimento para o século 21. A Figura 1 apresenta a relação entre as narrativas e os cenários estabelecidos pelo IPCC.

Figura 1 – Ilustração esquemática dos cenários desenvolvidos pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Special Report on Emissions Scenarios – SRES*) (Fonte: IPCC, 2000).

Como são baseados em diferentes perspectivas do desenrolar das atividades humanas futuras, cada família de cenários resulta em uma evolução própria do aumento na concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, e consequentemente da elevação da temperatura média global. A Figura 2 e a Figura 3 ilustram respectivamente a evolução do acréscimo de temperatura no decorrer do século e a quantidade de CO₂ emitido anualmente, para cada família de cenários propostos pelo IPCC.

Figura 2 – Quadro evolutivo da elevação de temperatura no decorrer do século para os cenários SRES (Fonte: IPCC, 2000).

Figura 3 – Quadro evolutivo das emissões de gases de efeito estufa para as quatro famílias de cenário propostas pelo IPCC (Fonte: IPCC, 2000).

3.4. Impactos das alterações climáticas no ciclo hidrológico

Mesmo com evidências apontando a relação direta do aquecimento global com as emissões antrópicas de gases de efeito estufa, ainda há muitas incertezas relacionadas às consequências das mudanças climáticas no meio ambiente. Modelos climáticos têm apontado a intensificação do ciclo hidrológico e aumento da variabilidade climática como um dos possíveis efeitos do aquecimento global (SIVAPALAN et al., 2003). Entretanto, fenômenos como El Niño e La Niña têm influência direta na frequência, intensidade e duração dos eventos climáticos, dificultando a identificação do que seria apenas um aumento natural dessa variabilidade ou um processo antrópico (IPCC, 2012; WANG, 2014).

Apesar da variabilidade e as mudanças no clima fazerem parte do sistema terrestre (WOODWARD et al., 2016), estudos a partir da simulação de modelos indicam que com o aquecimento global, as chances de ocorrência de eventos extremos aumentam (KARL; KNIGHT; PLUMMER, 1995; TSONIS, 1996). Essa tendência de intensificação dos extremos climáticos é expressa na forma de mais eventos de secas prolongadas e um maior número de precipitações extremas. Outro elemento, que segundo Tsonis (2004), está incluído nas consequências do aquecimento global é o aumento da aleatoriedade no sistema climático. Devido à tendência do incremento de eventos extremos, ocorreria a elevação das flutuações climáticas, tornando o sistema mais complexo e diminuindo a sua previsibilidade.

Como os processos do ciclo hidrológico são dinâmicos e interativos, as alterações no comportamento do clima não afetariam somente variáveis climáticas como temperatura e precipitação (BOYER et al., 2010). As mudanças e o desequilíbrio no ciclo hidrológico tendem a afetar diversos aspectos da sociedade, desde a produção agrícola e energética até o controle de enchentes e a disponibilidade hídrica regional (ARNBJERG-NIELSEN, 2012; XU; SINGH, 2004)

Muitos estudos têm abordado como o aquecimento global pode afetar o regime de vazão dos rios e consequentemente a disponibilidade hídrica de reservatórios tanto para abastecimento humano quanto para geração de energia hidrelétrica (CHRISTENSEN et al., 2004; RAJE; MUJUMDAR, 2010). Em pesquisa realizada no Reservatório Wivenhoe, localizado no Rio Brisbane, sudeste da Austrália, Helfer, Lemckert e Zhang (2012) chegaram a valores de evapotranspiração até 14% mais elevados em um cenário futuro de alta emissão de gases de efeito estufa, o que mostra os possíveis efeitos do aquecimento global quanto à perda de água em reservatórios.

As respostas à incerteza sobre a gravidade dos impactos das mudanças climáticas requerem a tomada de decisões por parte dos atores públicos envolvidos na gestão dos recursos hídricos. Nesse contexto, entender as alterações na disponibilidade hídrica em um cenário futuro de mudanças climáticas e desenvolver estratégias de adaptação efetivas para a gestão das águas, desponta como um dos grandes desafios do século (WATTS, 2010).

A necessidade de compreender como as mudanças no clima global podem afetar a disponibilidade hídrica regional faz com que inúmeras metodologias sejam propostas para tal objetivo (ADAM, 2011; LOFGREN et al., 2013; SARHADI et al., 2016; TOUHAMI et al., 2015). Devido à divergência de escala entre os modelos climáticos e as informações necessárias para a modelagem hidrológica, a simulação dos impactos do aquecimento global no ciclo hidrológico requer a interação entre os efeitos climáticos do aumento da concentração de gases de efeito estufa e a resposta da bacia hidrográfica a essas alterações (XU; SINGH, 2004).

Um dos métodos amplamente utilizados para a avaliação da disponibilidade hídrica, em um futuro com mudanças climáticas, é o uso de cenários hipotéticos como entrada de modelos hidrológicos. Xu e Singh (2004) definem esse tipo de método da seguinte maneira: (i) Determinação dos parâmetros do modelo hidrológico da bacia hidrográfica em estudo a partir da calibração do mesmo; (ii) Perturbação das séries históricas climáticas de acordo com cenários de mudança climática, essas perturbações são incrementos na temperatura e precipitação observada (do tipo, $\Delta T = +1, +2, +4^{\circ}\text{C}$ e $\Delta P = \pm 10\%, \pm 20\%$); (iii) Simulação do modelo hidrológico, tendo como dados de entrada as séries climáticas perturbadas; (iv) Comparação das simulações na condição atual com o cenário futuro de mudanças climáticas.

Essa metodologia foi aplicada por Paiva, Collischonn e Schettini (2010) para analisar os impactos das mudanças climáticas em seis diferentes cenários, na bacia do Rio Quaraí, um dos tributários do rio Uruguai, localizado no estado do Rio Grande do Sul. Da mesma forma, Adam (2011), utilizando o *software* de simulação climática MAGICC/SCENGEN versão 5.3, avaliou a diferença entre três diferentes cenários de emissões de gases de efeito estufa na bacia do Rio Ibicuí, extremo oeste do estado do Rio Grande do Sul.

3.5. Modelos Hidrológicos

O ciclo hidrológico é o fenômeno natural de circulação da água em seus diferentes estados da matéria por todo o globo terrestre. A principal força motriz responsável por

impulsionar esse fenômeno é a energia solar, aliada à gravidade e ao movimento de rotação da terra. Quando observado em uma escala global, o ciclo é fechado, afinal, a quantidade de água no planeta é fixa. Porém, a água evaporada em determinada localidade não necessariamente precipita no mesmo local, uma vez que, os processos atmosféricos são dinâmicos e a superfície terrestre está em contínuo movimento. À medida que se considere a área de drenagem cada vez menor, fica evidente a percepção do ciclo hidrológico como um ciclo aberto (SILVEIRA, 2009).

A principal ferramenta empregada para a simulação dos componentes do ciclo da água e entender sua dinâmica em uma bacia hidrográfica é o modelo hidrológico. Essa ferramenta tem como princípio a formulação matemática dos processos que ocorrem no ciclo hidrológico. Dessa forma, tenta simular a reposta de uma bacia hidrográfica a um evento de precipitação, possibilitando antecipar cenários, como impactos da urbanização nos recursos hídricos e as consequências de eventos extremos na bacia (SARAIVA, 2010). Outros fenômenos, como alterações no regime hidrológico de uma bacia devido mudanças climáticas, também podem ser simulados pelos modelos, oferecendo assim, dados e informações necessárias para ações preventivas e/ou mitigadoras.

O uso de modelos hidrológicos no gerenciamento dos recursos hídricos é um campo de ação multidisciplinar, já que o planejador necessita de conhecimentos diversos para avaliar e quantificar os processos hidrológicos em suas diferentes etapas e tomar a decisão que melhor atenda a sociedade e a proteção dos recursos naturais (TUCCI, 2005). A Figura 4 apresenta as etapas metodológicas do planejamento, necessárias para quantificar os processos e auxiliar os atores envolvidos a avaliar as alternativas para o processo de tomada de decisão.

Figura 4 – Esquematização de um modelo nas fases de um estudo hidrológico (Fonte: adaptado de Tucci, 2005).

Os modelos hidrológicos podem ser classificados segundo alguns critérios encontrados na literatura, dentre as classificações das simulações hidrológicas, as principais são apresentadas abaixo, segundo Tucci (2005):

Estocástico e determinístico: se a chance da ocorrência de uma variável, ou o conceito de probabilidade é relevante na formulação do modelo, o processo é dito estocástico. Entretanto, caso o modelo seja regido por leis definidas que não a da probabilidade, sendo a porcentagem de chance de ocorrência das variáveis do processo ignorada, o modelo é dito determinístico. Uma forma de identificar o caráter determinístico ou estocástico de um modelo é através de seus dados de entrada e saída, se para os mesmos dados de entrada, são produzidos os mesmos dados de saída, o modelo é considerado determinístico, porém, quando leis estatísticas relacionam os dados de entrada com os de saída, o modelo é estocástico.

Concentrado e distribuído: quando a variabilidade espacial não é levada em conta, o modelo é concentrado, em contraponto, um modelo distribuído tem por caracterização a dependência do espaço e do tempo em sua formulação. Um modelo distribuído permite a análise da variabilidade do comportamento da bacia nas diferentes partes do sistema, o que não necessariamente irá refletir em diferenças nos valores simulados e observados, se comparados com o modelo concentrado. A Figura 5 mostra a diferença visual da modelagem concentrada, quando comparada com a distribuída.

Figura 5 – Esquemática de uma bacia hidrográfica simulada por um modelo concentrado (a) e distribuído (b) e (c) (Fonte: Tucci, 2005).

Conceitual e empírico: um modelo é dito conceitual quando sua formulação é feita baseada em processos físicos. Os empíricos, contudo, são aqueles em que os valores de saída são ajustados para se aproximarem aos dados observados, através de funções que não envolvem os aspectos físicos envolvidos.

3.5.1. Incertezas na modelagem hidrológica

Apesar de possibilitar a simulação de cenários futuros na bacia e auxiliar a tomada de decisões, os modelos hidrológicos possuem limitações. A quantidade e a qualidade dos dados hidrológicos, a dificuldade de formular matematicamente alguns processos, além da simplificação espacial e temporal das dinâmicas existentes no ciclo hidrológico são algumas das deficiências dos modelos quanto a sua aproximação com a realidade (TUCCI, 2005).

Genericamente, os modelos tentam representar a complexidade, a distribuição espacial e as interações da água, energia e vegetação por meio de equações matemáticas. A dificuldade

e as limitações humanas na conceptualização da realidade a partir de um sistema de funções e dados observados (*i.e.* precipitação, temperatura, etc.), necessários para o ajuste do modelo, representam uma das maiores incertezas na modelagem hidrológica (BEVEN, 2015; WAGENER; GUPTA, 2005).

Outra dificuldade inerente do processo de adequação dos modelos hidrológicos à realidade dos fenômenos do ciclo da água provém da variabilidade espacial dos dados de precipitação, uma vez que, muitos dos modelos adotam a homogeneidade temporal e espacial (ARNAUD et al., 2011). Os dados observados, utilizados para o ajuste do modelo, são apenas uma aproximação dos eventos reais, isso devido às limitações nos processos de detecção e monitoramento hidrológico. Consequentemente, as incertezas e as falhas provenientes dos dados de entrada, da estrutura do modelo e a não adequação espaço-temporal do monitoramento hidrológico (*i.e.* baixa densidade de estações climatológicas na área de estudo), são propagados nos resultados do modelo (NICOTINA et al., 2008; WAGENER; GUPTA, 2005). A Figura 6 ilustra a situação descrita, ou seja, a diferença da representatividade espacial e temporal do modelo, em contraste com a situação que ocorre no mundo real.

Figura 6 – Mundo real heterogêneo representado por um modelo homogêneo (Fonte: Wagener e Gupta, 2005).

3.5.2. Calibração de Modelos Hidrológicos

A qualidade das respostas fornecidas pelos modelos hidrológicos e a precisão das simulações de vazão dependem do processo de calibração. Essa etapa consiste na procura de valores ótimos dos parâmetros do modelo, de forma a aproximar os dados simulados dos dados observados no sistema real (GUO et al., 2014). Em alguns casos, os valores dos parâmetros do modelo podem ser determinados através de medições diretas de características da área de drenagem simulada. Contudo, na maioria das situações esses parâmetros são conceituações representativas de características abstratas de bacias hidrográficas. Portanto, sua determinação fica sujeita a processos de tentativa e erro ou métodos de calibração automática (YAPO; GUPTA; SOROOSHIAN, 1998)

Ainda que seja uma importante etapa da simulação dos modelos hidrológicos, a calibração não é o único elemento responsável por um bom desempenho do modelo (LOOPER; VIEUX; MORENO, 2012). A quantidade e a representatividade dos dados usados para ajuste e verificação do modelo hidrológico são fundamentais para permitir um resultado de qualidade. Quando os dados são confiáveis, os resultados da simulação podem ser próximos dos reais e assim, melhorar o desempenho do modelo (TUCCI, 2005).

Uma das etapas fundamentais do processo de otimização e calibração dos modelos hidrológicos é a seleção da função objetivo. Essa função, que pode ser utilizada tanto no processo de calibração como na análise da adequação do modelo à realidade, representa de forma numérica a medida da diferença entre os valores simulados e aqueles observados (HOGUE; GUPTA; SOROOSHIAN, 2006). Desse modo, o vetor composto pelos valores dos parâmetros que correspondem à maximização ou minimização da função objetivo, é o vetor solução no processo de otimização.

Dentre as principais funções objetivo utilizadas no processo de calibração de modelos hidrológicos, algumas são citadas a seguir:

i) Coeficiente de Nash-Sutcliffe:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{calc}^i - Q_{obs}^i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{med}^i - Q_{obs}^i)^2} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde Q_{calc}^i é a vazão calculada pelo modelo hidrológico para o mês correspondente ao índice i ; Q_{obs}^i a vazão observada no mês correspondente ao índice i ; Q_{med} a vazão média observada para o mês correspondente ao índice i e n a quantidade total de meses observados.

O parâmetro de eficiência Nash-Sutcliffe é uma estatística normalizada, que determina a magnitude relativa da variância residual em relação à variância dos dados observados (NASH; SUTCLIFFE, 1970). O ajuste desse coeficiente é mais sensível aos erros nas vazões máximas, uma vez que a diferença entre as vazões observadas e calculadas é uma função quadrática (COLLISCHONN; TUCCI, 2003).

A faixa de variação desse parâmetro vai de $-\infty$ a 1,0, sendo $NSE = 1,0$ o valor máximo de desempenho do modelo. Valores de 0,0 a 1,0 indicam um desempenho aceitável, enquanto que valores menores que 0,0 indicam que a média dos dados observados tem uma melhor representação que os valores simulados pelo modelo, o que torna o desempenho inaceitável (MORIASI et al., 2007).

ii) Viés Relativo (*Percent Bias* – PBIAS):

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}^i - Q_{calc}^i) \times (100)}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}^i)} \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde Q_{calc}^i é a vazão calculada pelo modelo hidrológico para o mês correspondente ao índice i ; Q_{obs}^i a vazão observada no mês correspondente ao índice i ; Q_{med} a vazão média observada para o mês correspondente ao índice i e n a quantidade total de meses observados.

A porcentagem de desvio da descarga líquida, ou viés relativo (*Percent Bias* – PBIAS), afirmam Gupta, Sorooshian e Yapo (1999), quantifica a tendência do desvio percentual da série simulada, em relação à série observada; o seu valor ótimo é 0,0, valores positivos indicam uma subestimativa do modelo, enquanto valores negativos indicam uma superestimativa.

iii) Função Inversa:

$$F = \left\{ \frac{1}{Q_{obs}^i} - \frac{1}{Q_{calc}^i} \right\}^2 \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde Q_{calc}^i é a vazão calculada pelo modelo hidrológico para o mês correspondente ao índice i ; e Q_{obs}^i a vazão observada no mês correspondente ao índice i .

A função inversa é mais utilizada no ajuste de vazões mínimas, já que dá maior importância às vazões menores. Portanto, é indicada no ajuste de períodos de estiagem (TUCCI, 2005).

iv) Erro Padrão (Root Mean Square Error – *RMSE*):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}^i - Q_{calc}^i)^2}{n}} \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde Q_{calc}^i é a vazão calculada pelo modelo hidrológico para o mês correspondente ao índice i ; Q_{obs}^i a vazão observada no mês correspondente ao índice i ; e n a quantidade total de meses observados.

Assim como o coeficiente de Nash-Sutcliffe, a otimização dessa função objetivo é mais sensível aos erros nas vazões máximas (COLLISCHONN; TUCCI, 2003).

v) Coeficiente de Determinação:

$$r^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}^i - \overline{Q_{obs}}) (Q_{calc}^i - \overline{Q_{calc}})}{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{obs}^i - \overline{Q_{obs}})^2 \right]^{0,5} \left[\sum_{i=1}^n (Q_{calc}^i - \overline{Q_{calc}})^2 \right]^{0,5}} \right\} \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde Q_{calc}^i é a vazão calculada pelo modelo hidrológico para o mês correspondente ao índice i ; Q_{obs}^i a vazão observada no mês correspondente ao índice i ; $\overline{Q_{obs}}$ a vazão média observada no período avaliado; $\overline{Q_{calc}}$ a vazão média simulada no período avaliado; e n a quantidade total de meses observados.

Mesmo não sendo utilizado amplamente como função objetivo no processo de calibração, o coeficiente de determinação ainda é usado com frequência na análise de adequação do modelo aos dados observados. O r^2 descreve a proporção da variância total dos dados observados que pode ser explicada pelo modelo (MORIASI et al., 2007); a faixa de valores para essa estatística varia de 0,0 a 1,0, sendo 0,0 a não existência de colinearidade e 1,0 uma colinearidade perfeita. Muito embora apresente dificuldade em detectar diferenças aditivas e/ou proporcionais, essa estatística continua a ser usada para determinar a qualidade da calibração de modelos. Devido a isso, valores elevados de r^2 podem ser obtidos até mesmo quando os valores simulados diferem em magnitude considerável dos observados (LEGATES; MCCABE, 1999)

De acordo com Shinma (2015), mesmo com diversas técnicas de otimização aplicáveis à calibração de modelos hidrológicos, alguns autores ainda preferem a calibração manual. No entanto, além de demandar mais tempo, os resultados da calibração manual são altamente dependentes da experiência do usuário, que também pode variar de uma região para outra (HOGUE; GUPTA; SOROOSHIAN, 2006). Porém, quando o modelo contém muitos parâmetros e o processo manual de tentativa e erro torna-se longo e complexo, o método automático pode ser uma alternativa mais viável (COLLISCHONN; TUCCI, 2003; SHINMA, 2015).

Das diversas técnicas automáticas de otimização que surgiram com o avanço tecnológico e a velocidade de processamento dos computadores, o método dos algoritmos genéticos (AG's) tem se destacado nas últimas décadas. Desenvolvido em 1975 por Holland na Universidade de Michigan, o método de busca dos algoritmos genéticos é baseado nos mecanismos de seleção natural, inspirada na Teoria da Evolução de Darwin. As informações e os conceitos apresentados nesse tópico, a respeito dos AG's, foram extraídos de Goldberg (1989), em seu livro *GENETIC ALGORITHMS in Search, Optimization & Machine Learning*.

A abordagem da técnica consiste em dois objetivos básicos, abstrair e explicar os processos adaptativos dos sistemas naturais e desenvolver sistemas artificiais que contenham os mecanismos mais importantes dos sistemas naturais.

Os algoritmos de busca randômica, classificação na qual estão inseridos os AG's, foram desenvolvidos para suprir a falta de robustez, presente em outros métodos de busca. De uma forma geral, os antigos métodos de busca solucionavam os problemas de otimização a

partir do conjunto de valores responsáveis por levar o gradiente da função objetivo a zero, sendo esta a noção elementar do cálculo para os pontos de mínimo e/ou máximo de uma função. Entretanto, esse mecanismo de busca possui fragilidades, principalmente quando se está tratando com funções mais complexas e de múltiplos pontos extremos. Nos mecanismos mais simples de busca, o usuário fica impossibilitado de diferenciar um ponto ótimo local do ponto ótimo global da função (Figura 7).

Figura 7 - (a) Função com um único ponto extremo (b) Função com múltiplos picos (Fonte: Goldberg, 1989).

É justamente nesse processo de busca de soluções em funções de múltiplos picos que os algoritmos genéticos se diferenciam. O mecanismo de um algoritmo genético básico não é de grande complexidade, entretanto, a sua simplicidade de operação e eficiência são duas das principais características da abordagem dos AG's. São três os operadores que compõe a estrutura de um algoritmo genético de forma simplificada:

i) Reprodução

ii) Crossover

iii) Mutação

No método, cada indivíduo da população (vetor) é representado por uma linha de código binário, em uma analogia aos genes de um cromossomo em um organismo vivo. Na reprodução cada indivíduo é replicado de acordo com o seu valor de função objetivo selecionada, com isso, maiores valores para a função objetivo indicam uma maior probabilidade de contribuir com seu código genético para as próximas gerações. Esse operador é uma versão artificial da teoria da seleção natural, em que os indivíduos mais adaptados ao meio têm uma taxa de sobrevivência maior e consequentemente se reproduzem mais. A Figura 8 apresenta um esquema de como funciona o operador de reprodução dos algoritmos genéticos.

Figura 8 – Processo de reprodução no método dos AG's.

O próximo operador do processo é o *crossover*, que se desenvolve em duas etapas. Primeiro os indivíduos provenientes da reprodução são pareados aleatoriamente, e então ocorre a troca do material genético entre esses pares, aumentando a diversidade genética na geração (Figura 9).

Mesmo com os processos de reprodução e *crossover* sendo capazes de gerar diversidade nos vetores solução e não restringindo a busca do algoritmo genético a uma pequena região da função objetivo, eventualmente algum material genético (dígito 1 ou 0 em uma localização específica) com potencial utilidade pode ser perdido no decorrer das

iterações. Nos algoritmos genéticos a mutação tem como objetivo evitar a perda irreversível desse material genético (Figura 9). Para isso, modificações aleatórias nos valores dos dígitos binários que compõe os indivíduos são realizadas.

Figura 9 – Troca de material genético por meio de *crossover* e posterior modificação de um gene de forma randômica pela mutação.

Os operadores de reprodução, *crossover* e mutação, componentes básicos das estruturas mais simples de algoritmos genéticos, que envolvem a geração randômica de números, cópia de vetores, e troca de “código genético” entre vetores, conferem aos AG’s sua robustez e eficiência. Esse conjunto de fatores, responsáveis por inserir a característica estocástica ao método, favorece a não convergência do algoritmo para um ponto de ótimo local, mas faz uma varredura em diferentes direções da função objetivo, na busca do vetor ótimo global.

4. ÁREA DE ESTUDO

Esta pesquisa foi realizada na área das bacias hidrográficas contribuintes ao Sistema Cantareira, maior sistema produtor de água da Região Metropolitana de São Paulo, com capacidade para abastecer 9 milhões de pessoas (ANA, 2016).

Localizado ao norte da cidade de São Paulo, entre as Serras da Mantiqueira e da Cantareira, sua área de contribuição total é de aproximadamente 2300 km², sendo 55% pertencente ao estado de São Paulo, enquanto os outros 45% ao estado de Minas Gerais. Toda essa área produtora de água é responsável por fornecer 33 m³/s para a RMSP, dos quais 31 m³/s são originados na bacia hidrográfica do PCJ, adjacente a RMSP, e apenas 2 m³/s provém da bacia hidrográfica do Alto Tietê, contida a RMSP (ANA/DAEE, 2013). A Figura 10 apresenta a localização geográfica do sistema.

Figura 10 - Posição geográfica do Sistema Cantareira entre os estados de São Paulo e Minas Geras.

O Cantareira é um aproveitamento hídrico constituído por seis reservatórios - Jaguari, Jacareí, Cachoeira, Atibainha, Paiva Castro e Águas Claras, conectados por 48 km de túneis e canais. Os reservatórios mais a montante do sistema são o Jaguari e Jacareí, que são interligados por um canal aberto de 670 metros de extensão, o que faz com que na prática funcione como um único represamento. Posteriormente, as águas são transferidas por gravidade para os reservatórios da Cachoeira e Atibainha, todos esses inseridos na Bacia Hidrográfica do PCJ.

Na passagem da represa de Atibainha para Paiva Castro, ocorre a transposição de águas para a Bacia do Alto Tietê. Por fim, para vencer o obstáculo natural da Serra da Cantareira, a água represada no Paiva Castro é bombeada pela Estação Elevatória de Santa Inês até o reservatório de Águas Claras. Esse último aproveitamento tem por finalidade apenas a regulação de vazão afluente constante à ETA de Guaraú, de onde a água segue por gravidade para abastecimento da RMSP. A Figura 11 mostra as ligações entre os reservatórios até a ETA de Guaraú, onde a água é tratada e encaminhada para o consumo.

Figura 11 - Perfil esquemático do Sistema Cantareira. Fonte: ANA (2016).

Essa pesquisa tem como objeto de estudo as quatro sub-bacias contribuintes aos reservatórios produtores de água do Sistema Cantareira - Jaguari-Jacaré, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro.

A área de drenagem de cada sub-bacia está delimitada na Figura 12 e informações hidrológicas dos aproveitamentos são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1- Informações hidrológicas dos aproveitamentos do Sistema Cantareira (Fonte: adaptado de ANA/DAEE, 2013).

Aproveitamento	Área de drenagem (km ²)	%	Produção de água (m ³ /s)
Jaguari/Jacareí	1239,00	54,27	22,00
Cachoeira	392,00	17,17	5,00
Atibainha	315,00	13,80	4,00
Paiva Castro	337,00	14,76	2,00
Total do sistema	2283,00	100,00	33,00

Figura 12 - Delimitação das sub-bacias do Sistema Cantareira.

4.1. Uso e Ocupação do Solo

Diferente de outros mananciais de abastecimento da RMSP como Billings e Guarapiranga, a área do Cantareira não conta com uma intensa ocupação urbana, porém, a alteração antrópica se faz presente na região devido às atividades econômicas ali desenvolvidas, principalmente a agropecuária (WHATELY; CUNHA, 2007)

Ainda de acordo com Whately e Cunha (2007), em 2003 mais da metade da área de contribuição do sistema era ocupada por campos antrópicos como pastagens e terrenos abandonados. Se adicionados a esses usos a agricultura, mineração e demais atividades antropogênicas, a alteração do território chega a 70%. O mapa de uso e ocupação do solo da área de drenagem do Reservatório Cachoeira (Figura 13), levantado por Bernardo e Nossack (2015), evidencia a vasta cobertura de pastagens no território.

Figura 13 - Uso e ocupação do solo na sub-bacia do Reservatório Cachoeira (Fonte: Bernardo e Nossack, 2015).

Essa presença intensiva de áreas de pastagem na região remete às atividades econômicas ali desenvolvidas no século passado, como a agropecuária e o cultivo de café. Entretanto, remanescentes da vegetação natural da Mata Atlântica, ainda podem ser

encontrados, principalmente nas áreas de cabeceira, no alto da Serra da Mantiqueira. Essas áreas de preservação, que representam cerca de 20% do território, são de grande importância por promover o constante fornecimento de água para os mananciais e concentrarem as nascentes dos principais rios formadores do Sistema Cantareira (WHATELY; CUNHA, 2007).

Na Figura 14 são apresentadas as classes de uso do solo e sua porcentagem em relação à área de drenagem total do Sistema Cantareira.

Figura 14 – Porcentagem das classes de uso do solo do Sistema Cantareira (Fonte: adaptado de Whately e Cunha, 2007).

4.2. Clima

As informações contidas nessa seção, referentes à climatologia da área de estudo, foram extraídas do Relatório Final – Plano de Bacias Hidrográficas 2004-2007 dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (SABESP 2007).

A bacia do Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ), na qual está inserida a porção do estado de São Paulo do Sistema Cantareira, apresenta de modo geral clima do tipo quente, temperado e chuvoso, pode ser dividida em três tipologias climáticas segundo a divisão internacional de Köppen:

- Subtipo Cfb - sem estação seca e com verões tépidos, nas porções baixas das bacias;
- Subtipo Cfa – sem estação seca e com verões quentes, nas partes médias da bacia;
- Subtipo Cwa - com inverno seco e verões quentes, nas porções serranas das cabeceiras. Sendo essa, a tipologia predominante na região do Sistema Cantareira.

Nos trechos de cabeceira dos rios formadores do rio Piracicaba, responsáveis por dar origem aos barramentos do Cantareira, o período chuvoso se estende de outubro a abril, enquanto a estiagem vai de maio a setembro. Ainda nessa região, a leste de Bragança Paulista, ocorrem os maiores índices pluviométricos da bacia do PCJ, chegando a valores que superam os 2.000 mm anuais.

No domínio mineiro do sistema, a ascensão orográfica ocasionada pelas cristas da Serra da Mantiqueira possui influência no elevado volume de chuva local. As condições geográficas como a faixa latitudinal e a proximidade com o oceano, reforçam o caráter de alto índice pluviométrico da região. De acordo com IBGE (2016), essa região mais elevada do PCJ, com altitudes acima de 900 m, tem como característica verões com temperaturas médias de 20° C e inverno com média inferior a 15°.

4.3. Municípios e População

A área de drenagem do Sistema Cantareira compreende um total de 12 municípios, sendo quatro deles no estado de Minas Gerais e oito em São Paulo, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Áreas de municípios inseridos no Sistema Cantareira (Fonte: Whately e Cunha, 2007).

Município/UF	Área total do município (ha)	Área inserida no sistema (ha)	%	%
Camanducaia/MG	52.737,70	49.791,70	94,40	21,80
Extrema/MG	24.294,30	24.256,40	99,80	10,60
Itapeva/MG	17.736,80	17.736,80	100,00	7,80
Sapuçaí-Mirim/MG	28.386,40	10.377,20	36,60	4,60
Bragança Paulista/SP	51.376,20	1.775,60	3,50	0,80
Caieiras/SP	9.349,90	1.859,80	19,90	0,80
Franco da Rocha/SP	13.700,20	699,40	5,10	0,30
Joanópolis/SP	37.134,30	37.134,30	100,00	16,30
Mairiporã/SP	32.032,60	25.854,70	80,70	11,30
Nazaré Paulista/SP	32.243,30	25.281,00	78,40	11,10
Piracaia/SP	39.174,30	26.876,70	68,60	11,80
Vargem/SP	14.270,00	6.306,00	44,20	2,80

No ano de 2006 a população residente nas sub-bacias do Cantareira era estimada em 180.000 habitantes, dos quais 97 mil no estado de Minas Gerais e 83 mil em São Paulo (WHATELY; CUNHA, 2007).

4.4. Usos da água no Sistema Cantareira

Para realizar o aporte de 33 m³/s de água e abastecer cerca de 46% da Região Metropolitana de São Paulo, aproximadamente 31 m³/s são transpostos da bacia do Rio Piracicaba para a bacia do Alto Tietê, que contribui com apenas 2 m³/s para o abastecimento da RMSP. Essa reversão de águas, embora traga alguns benefícios para a bacia do Piracicaba, como a regularização de vazões e o amortecimento de possíveis cheias, também provoca prejuízos. É inegável que a redução de cerca de 31 m³/s pode acarretar prejuízos para o desenvolvimento da região caso a questão não seja administrada de acordo com os princípios

da gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos (PORTO; PORTO; PALERMO, 2014).

Devido à importância desse conjunto de reservatórios para o abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo, a Agência Nacional de Águas (ANA) juntamente com o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) definiu critérios e procedimento técnicos, além de condições de operação dos reservatórios, tendo em vista o gerenciamento dos recursos hídricos do Sistema Cantareira através da Resolução Conjunta ANA/DAEE N° 428, de 04 de agosto de 2004, licença que também transferiu o papel de outorgante do sistema para o DAEE.

Com isso, a outorga emitida pela Portaria DAEE N° 1213, de 06 de agosto de 2004 e a resolução conjunta ANA/DAEE N° 428, de 04 de agosto de 2004 disciplinam a operação dos reservatórios, estabelecendo a metodologia para determinação das vazões a serem retiradas e sua distribuição entre a RMSP e a porção da bacia do rio Piracicaba a jusante do sistema (ANA/DAEE 2013). Os limites de vazão de retirada de água para a RMSP e as vazões que devem ser mantidas a jusante para a bacia do Piracicaba encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Vazões de retirada do Sistema Cantareira de acordo com suas prioridades (Fonte: DAEE, 2004).

		Demandas	
	RMSP	Bacia do Rio Piracicaba	Total
Prioridade	Vazão (m^3s^{-1})	Vazão (m^3s^{-1})	Vazão (m^3s^{-1})
Primária	24,80	3,00	27,80
Secundária	6,20	2,00	8,20
Total	31,00	5,00	36

Apresentado o quadro acima, fica evidente a relação conflitante entre os usuários da RMSP e os da Bacia do PCJ pelo uso da água. Tal conflito destaca-se por acontecer entre duas regiões de elevada importância econômica tanto para o estado de São Paulo quanto para o país.

A participação das bacias do PCJ no PIB brasileiro no ano de 2002 equivalia a 3,8% (SABESP 2007), enquanto a RMSP é caracterizada por possuir a maior concentração populacional brasileira, abrigando em 8.047 km^2 um contingente populacional de 19,7

milhões de habitantes, além de apresentar um PIB de 572,2 bilhões de reais correspondendo a 18,9% do PIB do país (SÃO PAULO, 2011).

Desde o final da década de 90 estudos apontam tendências de queda no regime de vazão dos rios Atibaia e Jaguari em postos fluviométricos à jusante do Sistema Cantareira, evidenciando a influência do conjunto de reservatórios na alteração do ciclo hidrológico da Bacia do Piracicaba (GROPPO et al., 2009; MORAES et al., 1998). O expressivo crescimento populacional e industrial da região teve como consequência o aumento significativo do consumo de água e do aporte de cargas de esgoto urbano e agroindustriais. Tais fatores associados à já citada diminuição de vazão são as mais prováveis causas da deterioração da Bacia do rio Piracicaba (GROPPO et al., 2006).

Schardong e Simonovic (2013) reforçam essa relação conflitante do uso da água pelos usuários da RMSP e da bacia do Piracicaba. Ao realizaram estudos de otimização multiobjectivo na operação do Sistema Cantareira relacionando o déficit de demanda para a RMSP ($f1$) com o impacto da qualidade da água no rio Atibaia à jusante do sistema ($f2$). Os resultados evidenciaram uma relação inversa entre $f1$ e $f2$, de forma que quanto menor o déficit na demanda, maior o impacto na qualidade da água à jusante do sistema.

Na Figura 15 fica evidenciada essa relação de disputa dos recursos hídricos entre a RMSP e a região da bacia do Piracicaba. Os rios Jaguari e Atibaia recebem a água a jusante do Sistema Cantareira, posteriormente esses dois tributários confluem e formam o rio Piracicaba, responsável por abastecer grande parte dessa região.

Figura 15 – Posicionamento geográfico do Sistema Cantareira entre a RMSP e a bacia do Piracicaba reforça a relação conflituosa entre os usos da água.

Atualmente o sistema é operado pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP). De acordo com a Portaria DAEE nº 1213, 06 de agosto de 2004, para a próxima renovação da outorga seria necessário o estabelecimento de algumas condicionantes, sendo uma delas a especificada no artigo 16 do referido documento:

“[...] Artigo 16 - A SABESP deverá providenciar, no prazo de até 30 (trinta) meses, estudos e projetos que viabilizem a redução de sua dependência do Sistema Cantareira, considerando os Planos de Bacia dos Comitês PCJ e Alto Tietê.”

Embora novas obras de reversão de água de outras bacias para a Região Metropolitana de São Paulo estejam em andamento, como por exemplo, a obra do Sistema Produtor São

Lourenço, com entrega prevista para outubro de 2017, que aportará 4,7 m³/s a região (DAEE 2013 *a*), o Sistema Cantareira ainda representa cerca de 46% da água disponibilizada à RMSP (DAEE 2013 *b*).

Nos últimos anos, a Agência Nacional de Águas (ANA) prorrogou por duas vezes a renovação da outorga do Cantareira. A primeira vez através da Resolução Conjunta ANA/DAEE nº 910/2014 que postergou a renovação que venceria em agosto de 2014, para a data de 31 de outubro de 2015 devido à *situação de excepcionalidade hídrica*. E pela segunda vez, por meio da Resolução Conjunta ANA/DAEE nº 1200/2015, adiou para 31 de maio de 2017 a renovação da outorga do sistema, alegando a necessidade de aperfeiçoamento das propostas até então apresentadas pelos órgãos gestores.

Ao longo do ano de 2014 os reservatórios do Sistema Cantareira apresentaram uma continua queda em seu armazenamento, que representou uma das maiores crises hídricas já vivenciadas na região. Em primeiro de outubro de 2013 o armazenamento disponível em todo o sistema era de 40% de seu volume total, considerado normal para a época do ano. Porém, com a falta de chuvas no período de dezembro a março, em meados de abril de 2014 o sistema apresentava 12,5% de sua capacidade. Tal fato obrigou os órgãos gestores a tomarem medidas emergenciais como a captação de água do volume morto e reduções de pressão na rede, para possibilitar a continuidade do abastecimento (PORTO; PORTO; PALERMO, 2014).

5. METODOLOGIA

5.1. Descrição Geral

Esta metodologia pretende avaliar as possíveis alterações no regime hidrológico do Sistema Cantareira, a partir da modificação nas séries de chuva e temperatura de suas sub-bacias contribuintes, tendo como base, cenários de mudanças climáticas futuras. O futuro estabelecido para essa pesquisa refere-se a uma janela de 20 anos, centrada no ano de 2100.

A simulação das alterações climáticas foi realizada pelo modelo MAGICC/SCENGEN versão 5.3. O software oferece como resultados, estimativas de modificações nos regimes de precipitação e temperatura média mensal, associada a cenários futuros de emissão de gases de efeito estufa (SRES) do IPCC. As modificações são representadas na forma de aumento ou redução percentual para as séries de precipitação, e em graus Celsius para as temperaturas médias mensais. Essas anomalias no clima futuro (ΔT e ΔP) foram incorporadas às séries mensais observadas, gerando séries futuras de precipitação e temperatura.

O modelo hidrológico utilizado para simular o comportamento das sub-bacias do Cantareira foi o SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*), que requer como dados de entrada séries mensais de precipitação e evapotranspiração, e entrega como dados de saída série de vazões no exutório de cada sub-bacia, que correspondem com as afluentes aos reservatórios do sistema. Para a aplicação do modelo foi preciso converter os dados de temperatura em evapotranspiração, o que foi feito pelo método Penman-Monteith. A calibração do modelo hidrológico foi feita a partir da função de Algoritmo Genético, contida no pacote de ferramentas *Toolbox Optimization*, do *software* Matlab, utilizando as séries observadas de precipitação, temperatura e vazão no período entre os anos de 1988 a 2010.

Com as séries de precipitação e evapotranspiração futuras, modificadas pelos acréscimos ou reduções previstas com o modelo climático para o ano de 2100, novamente foi feita a simulação hidrológica, que retornou como resposta séries de vazões afluentes futuras aos reservatórios do Sistema Cantareira.

As séries de vazões obtidas para os cenários futuros hipotéticos foram comparadas com as séries mensais de vazão de referência, correspondentes à situação climática atual. Essa comparação permitiu a avaliação dos impactos de possíveis mudanças climáticas no regime hidrológico do Cantareira.

O fluxograma referente à metodologia proposta é apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Fluxograma com as etapas da metodologia.

5.2. O modelo SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*)

O modelo hidrológico selecionado para essa pesquisa é o SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) (Lopes *et al.*, 1981). A partir do balanço de umidade nas diferentes camadas do solo, esse modelo é capaz de quantificar a vazão efluente no exutório da área de drenagem em estudo. O SMAP é um modelo determinístico, conceitual e concentrado do tipo

chuva vazão que contém uma estrutura relativamente simples e requer como dados de entrada, apenas séries de precipitação e evapotranspiração com intervalos de tempo mensal, a área de drenagem e as condições de contorno iniciais da bacia hidrográfica. Para a calibração do modelo, também há a necessidade do uso de séries mensais observadas de vazão.

O uso do SMAP como modelo hidrológico encontra-se difundido no país e é possível encontrar muitos trabalhos com resultados satisfatórios, como em Kwon et al. (2012) e Block et al. (2009). Originalmente, esse modelo foi desenvolvido para intervalo de tempo diário. Posteriormente, foram desenvolvidas versões com intervalos mensais e horários, realizando algumas modificações em sua estrutura (FADIGA et al., 2008).

Em sua discretização mensal, o modelo é constituído por dois reservatórios lineares virtuais que representam a camada superior do solo (*RSolo*) e o aquífero ou reservatório subterrâneo (*RSub*). Suas variáveis de estado são atualizadas mês a mês, de forma a realizar o balanço da umidade no solo, em acordo com a Equação 5.1 e a Equação 5.2:

$$RSolo_{(i+1)} = RSolo_{(i)} + P - (ER + ES + REC) \quad \text{Equação 5.1}$$

$$RSub_{(i+1)} = RSub_{(i)} + REC - EB \quad \text{Equação 5.2}$$

Onde *RSolo* é o reservatório superior do solo (mm); *RSub* o aquífero, ou o reservatório subterrâneo (mm); *i* representa o índice correspondente ao mês analisado (adimensional); *P* é a precipitação média incidente na área de drenagem (mm); *ER* a evapotranspiração real na área de drenagem (mm); *ES* o escoamento superficial no exutório da bacia (mm); *EB* o escoamento básico no exutório da bacia (mm); e *REC* representa a recarga do aquífero (mm);

Para a inicialização do modelo hidrológico, são definidas duas variáveis de estado (*RSolo₍₁₎* e *RSub₍₁₎*), para o estabelecimento das condições iniciais do reservatório superficial e subterrâneo no primeiro mês da simulação hidrológica, segundo a Equação 5.3 e Equação 5.4:

$$RSolo_{(1)} = Tu_{in} \times SAT \quad \text{Equação 5.3}$$

$$RSub_{(1)} = \frac{EB_{in} \times Ad \times 2630}{1 - KK} \quad \text{Equação 5.4}$$

Onde SAT representa a quantidade de água necessária para a saturação do solo (mm); Tu_{in} o teor de umidade do solo no início da simulação (adimensional); EB_{in} o escoamento de base no início da simulação (mm); Ad é a área de drenagem (km²); e KK representa a constante de recessão do escoamento básico (mês⁻¹).

No reservatório superior ($RSolo$) as saídas são representadas pela evapotranspiração real (ER) e pela recarga do aquífero (REC), representadas pela Equação 5.5 e Equação 5.6:

$$ER = EP \times Tu \quad \text{Equação 5.5}$$

$$REC = RSolo \times Tu^4 \times Crec \quad \text{Equação 5.6}$$

Onde EP é a evapotranspiração potencial (mm); Tu o teor de umidade do solo (adimensional); e $Crec$ o coeficiente de recarga do aquífero (adimensional).

O teor de umidade do solo é atualizado a cada mês, em função da quantidade de água presente no reservatório superior e a quantidade de água necessária para sua saturação, de acordo com a Equação 5.7.

$$Tu = \frac{RSolo}{SAT} \quad \text{Equação 5.7}$$

No balanço hídrico do modelo, a cada mês parte da precipitação incidente (P) na área de drenagem é responsável por gerar escoamento superficial (ES), que é função da taxa de umidade do solo (Tu) e do parâmetro ($E2$), exponencial da curva de escoamento superficial, através da fórmula Equação 5.8:

$$ES = P \times Tu^{E2} \quad \text{Equação 5.8}$$

O restante da lâmina precipitada ($P-ES$), é adicionada ao reservatório superior ($RSolo$), sendo dessa forma a parcela de entrada no balanço hídrico.

No reservatório subterrâneo ($RSub$), a parcela de entrada do balanço hídrico provem do reservatório superior do solo, sendo a recarga do aquífero (REC). Por sua vez, a saída é o escoamento básico (EB), que ocasiona o deplecionamento do nível d'água em $RSub$ a uma taxa constante KK , de acordo com a Equação 5.9.

$$EB = RSub \times (1 - KK) \quad \text{Equação 5.9}$$

A constante de recessão do escoamento básico (KK), que define o período de estiagem, tem sua unidade ajustada a partir da relação expressa na Equação 5.10:

$$KK = 0,5^{\left(\frac{1}{KKT}\right)} \quad \text{Equação 5.10}$$

Onde KKT é expresso em meses em que o escoamento básico decai para a metade de seu valor.

A Tabela 4 apresenta a associação do valor da constante de recessão com o tempo necessário para que a vazão básica diminua para a metade.

Tabela 4 – Valor da constante de recessão KKT e número de meses necessário para o decaimento do escoamento básico para a metade de seu valor (Fonte: Lopes et al., 1981).

Número de meses	Tempo de decaimento do escoamento básico	KKT
1	Muito rápido	0,5000
2	Rápido	0,7071
3	Médio	0,7937
4	Lento	0,8409
6	Muito lento	0,8909

Por fim, o eventual transbordo do reservatório do solo é transformado em escoamento superficial, que somado ao escoamento básico, compõe a vazão total no exutório da bacia. Conforme a Equação 5.11, o deflúvio total na área de drenagem é calculado.

$$Q_{calc} = \frac{(ES + EB) \times Ad}{2630} \quad \text{Equação 5.11}$$

A Figura 17 ilustra o esquema da versão mensal do modelo com os reservatórios superior e subterrâneo.

Figura 17 - Esquema físico do modelo SMAP com discretização mensal (Fonte: adaptado de Lopes et al., 1981).

5.3. Dados para a calibração do modelo SMAP

Os dados climatológicos e hidrológicos utilizados nessa pesquisa para a calibração e a simulação do SMAP, incluem séries de precipitação, vazão, velocidade do vento, temperaturas máxima e mínima, umidade relativa e radiação solar. As séries históricas mensais dos dados compreendem o período de 1988 a 2010 e foram obtidos através da

SABESP - Companhia de Saneamento Básico de São Paulo, ANA - Agência Nacional de Águas, DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica e NCEP/CFSR - *National Center for Environmental Prediction/Climate Forecast System Reanalysis*. Tal período foi selecionado devido à ausência de falhas nas séries históricas nos referidos anos. As séries históricas utilizadas nessa pesquisa estão disponíveis nos apêndices E, F e D e no anexo A e B.

5.3.1. Pluviometria

Estações pluviométricas registram a chuva em determinado período de forma pontual, e não distribuída. A fim de transformar tais eventos em uma precipitação média representativa da área de estudo diversos métodos são utilizados, sendo os mais usuais a média aritmética, método de Thiessen e o método das isoietas (BERTONI; TUCCI, 2009).

O método utilizado para o estudo foi o de Thiessen. Ao considerar a distribuição não homogênea dos postos pluviométricos na bacia, o método proporciona uma melhor estimativa da precipitação média em relação ao método da média aritmética.

As informações das estações pluviométricas selecionadas para essa pesquisa compõem o banco de dados da rede de monitoramento hidrometeorológico da Agência Nacional de Águas (ANA). No total, quinze estações pluviométricas com série histórica mensal foram escolhidas para representar a precipitação média local. A Tabela 5 apresenta as estações pluviométricas utilizadas. A distribuição dessas estações na área de estudo está esquematizada na Figura 18. No apêndice A é apresentada a delimitação das áreas de influência de cada posto pluviométrico.

Tabela 5 – Estações pluviométricas selecionadas para o projeto.

Estação	Código ANA	Longitude	Latitude
BARRAGEM ATIBAINHA	-	-46.40	-23.17
BARRAGEM CACHOEIRA	-	-46.32	-23.05
BARRAGEM JAGUARI	2246141	-46.42	-22.92
TAPERÁ GRANDE	2346134	-46.45	-23.32
BAIRRO CUIABÁ	2346402	-46.38	-23.25

ÁGUA DO POÇO	2346403	-46.17	-23.02
MATO MOLE	2246134	-46.23	-22.98
FAZENDA RETIRO	2246046	-46.12	-22.93
MONTE VERDE	2246138	-46.03	-22.87
PONTE NOVA	2246139	-46.05	-22.8
EXTREMA	2246135	-46.28	-22.77
FAZENDA RABELO	2246136	-46.17	-22.77
SERTÃOZINHO	2246137	-46.18	-22.68
JOANÓPOLIS	2246090	-46.27	-22.93
FRANCO DA ROCHA	2346098	-46.73	-23.33

5.3.2. Fluviometria

As séries de vazões médias mensais afluentes aos aproveitamentos Jaguari-Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro foram disponibilizadas através do documento Dados de Referência Acerca da Outorga do Sistema Cantareira (ANA/DAEE 2013). A série completa compreende dados mensais de 1930 a 2012, dentro desse período, diferentes metodologias foram utilizadas para aferir a vazão, sendo essas definidas de acordo com ANA/DAEE (2013), da seguinte forma:

a) No período de 1930 a 1993 as vazões foram obtidas segundo estudos hidrológicos realizados em 1995 pelo consórcio HIDROPLAN.

b) Entre janeiro de 1994 a dezembro de 2012 a determinação dos dados foi feita a partir de balanço hídrico com base em dados operacionais disponibilizados pela SABESP, segundo a Equação 5.12.

$$Q_{afluente,t} = Q_{defluente,t} + Q_{transferência,t} + \frac{(Vol_{final,t} - Vol_{inicial,t})}{\Delta t} \quad \text{Equação 5.12}$$

Onde $Q_{afluente,t}$ representa a vazão média afluente ao reservatório no intervalo de tempo t (dia ou mês); $Q_{defluente,t}$ a vazão média defluente ao reservatório no intervalo de tempo t (dia ou mês); $Q_{transferência,t}$ é a vazão média transferida do reservatório no intervalo de tempo t (dia ou mês).

mês) através dos túneis ou na Estação Elevatória Santa Inês; $Vol_{final,t}$ é o volume final do reservatório no intervalo de tempo t (dia ou mês); $Vol_{inicial,t}$ volume inicial do reservatório no intervalo de tempo t (dia ou mês); e Δt é o intervalo de tempo.

5.3.3. Evapotranspiração

Apesar de o modelo hidrológico utilizado requerer séries mensais de evapotranspiração, não se encontram disponíveis na região de estudo estações climatológicas com instrumentos capazes de realizar tal medida de maneira direta.

Com isso, foi necessária a conversão de séries de temperatura em séries de evapotranspiração. O método selecionado para a transformação foi o de Penman-Monteith, que possui um forte embasamento físico e calcula a evapotranspiração de referência (ET_o) a partir da Equação 5.13. Mais detalhes e informações sobre o método estão disponibilizados em Allen (1986).

$$ET_o = \frac{0,408 * \Delta * (R_n - G) + \gamma * \frac{900}{T+273} * \mu_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma * (1 + 0,34 * \mu_2)} \quad \text{Equação 5.13}$$

Onde ET_o representa a evapotranspiração de referência (mm/dia); R_n é a radiação líquida na superfície ($MJ \, m^{-2} \, dia^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo ($MJ \, m^{-2} \, dia^{-1}$); T é a temperatura média diária do ar ($^{\circ}C$); μ_2 é a velocidade média diária do vento a 2 m de altura ($m \, s^{-1}$); e_s é a pressão de saturação de vapor (kPa); e_a é a pressão de vapor atual (kPa); Δ é a declividade da curva de pressão de vapor no ponto correspondente a temperatura ($kPa \, ^{\circ}C^{-1}$); e γ é a constante psicrométrica ($kPa \, ^{\circ}C^{-1}$).

As séries históricas climatológicas, que contém os dados necessários para o cálculo da evapotranspiração de referência (temperatura do ar máxima e mínima, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa) provêm do *Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)* e são disponibilizadas pelo *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)*.

O CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*) é um sistema global acoplado atmosfera-oceano, que contém em sua base de dados informações climatológicas desde 1979 (NCEP/CFSR, 2016). O sistema integra informações de sensoriamento remoto e possui uma resolução espacial horizontal de 38 km, além de fornecer seus dados com resolução temporal

horária. Dessa forma, o CFSR tem sido classificado como uma das versões mais recentes de modelos numéricos de previsão de clima (JAJARMIZADEH et al., 2016; SAHA et al., 2010).

Maiores detalhes e informações adicionais sobre a base de dados meteorológicos do NCEP/CFSR são descritos em SAHA et al. 2010.

Os dados do NCEP/CSFR foram obtidos para o quadrante compreendido entre as latitudes 22.9° e 23.4° sul e entre as longitudes 46.22° e 46.70° oeste, abrangendo assim todos os reservatórios pertencentes ao Sistema Cantareira. No total, quatro estações meteorológicas estão inseridas na região selecionada. As coordenadas geográficas e as distribuições dessas estações nas bacias do Cantareira podem ser observadas na Tabela 6 e na Figura 18 Assim como para os dados de precipitação, as informações climatológicas foram divididas ao longo das bacias contribuintes pelo método de Thiessen. No apêndice B é apresentada a delimitação das áreas de influência de cada posto climatológico.

Tabela 6 – Estações climatológicas selecionadas para o projeto.

Estação	Longitude	Latitude
1	-46.25	-22.95
2	-46.56	-22.95
3	-46.25	-23.26
4	-46.56	-23.26

Figura 18 - Disposição dos postos pluviométricos e meteorológicos na área de estudo.

As séries históricas utilizadas nessa pesquisa estão disponíveis nos apêndices E, F e D e no anexo A.

5.4. Calibração dos parâmetros do modelo hidrológico

A calibração do modelo SMAP para as quatro sub-bacias formadoras do Sistema Cantareira (Jaguarí-Jacaré, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro) foi realizada separadamente. Os dados das séries históricas utilizadas estão compreendidos entre outubro de 1988 e janeiro de 2010 e foram divididos em três partes: aquecimento do modelo, calibração e validação.

A etapa de aquecimento do modelo foi realizada com os dados referentes a outubro de 1988 a outubro de 1990. Essa etapa tem por objetivo a autocorreção de algumas condições iniciais da bacia, como por exemplo, a umidade do solo no início da simulação. Para a

calibração do modelo SMAP com discretização mensal, Lopes (1999) recomenda séries de 2 a 9 anos de dados mensais, neste estudo, para a etapa de calibração foram usados dados de outubro de 1990 a outubro de 2005, totalizando 16 anos. Os dados referentes ao intervalo de outubro de 2005 a janeiro de 2010 serviram para a validação do modelo hidrológico.

5.4.1. Parâmetros Otimizados

Para calcular o deflúvio de forma concentrada no exutório da bacia, o modelo conta com seis parâmetros que definem a dinâmica dos reservatórios superior e subterrâneo, são eles:

- *Crec* - Coeficiente de recarga do reservatório subterrâneo (adimensional)
- *SAT* - Capacidade de saturação do solo (mm)
- *E2* - Expoente da curva de escoamento superficial (mês)
- *KKT* - Constante de recessão do escoamento básico (mês)
- *TUin* - Taxa de umidade inicial do solo (%)
- *EBin* - Escoamento básico inicial (mm)

Dos parâmetros apresentados, os quatro primeiros estão sujeitos à calibração, e podem ser associados a características físicas da bacia hidrográfica. Segundo Diniz (2008), a capacidade de saturação do solo (*SAT*), ou o nível máximo de água do reservatório superficial, é influenciado por fatores relacionados ao tipo e a profundidade do solo. Esse parâmetro tem forte correlação com o expoente da curva de escoamento superficial (*E2*), uma vez que está diretamente ligado a aspectos que tendem a facilitar o processo de deflúvio como a declividade, a forma da bacia e a sinuosidade dos cursos d'água.

Por outro lado, os parâmetros *TUin* e *EBin* são variáveis de estado inicial, não sendo, portanto, submetidos à calibração, mas atribuídos valores de acordo com o mês e a bacia em estudo. Como os valores desses dois parâmetros representam as condições iniciais da bacia,

Lopes (1999) recomenda que o período de calibração seja iniciado no fim do período de estiagem, já que nessa época tanto o teor de umidade do solo, quanto o escoamento básico, estão muito próximo de seus valores mínimos, facilitando sua escolha.

No decorrer da etapa de aquecimento do modelo, os valores desses dois parâmetros são autocorrigidos, exercendo maior influência apenas nos primeiros meses da simulação hidrológica. Mesmo que o valor inicial atribuído a essas duas variáveis não seja próximo do correto, o valor final da função objetivo não é comprometido de maneira significativa.

Na aplicação do modelo em bacias de variadas regiões brasileiras, Lopes (1999) obteve as faixas de variação dos parâmetros calibráveis. Os limites inferiores e superiores das faixas encontradas são descritos nas Tabela 7.

Tabela 7 - Faixa de variação dos parâmetros calibráveis do modelo SMAP (Fonte: adaptado de Lopes, 1999).

Parâmetro	Limite Inferior	Limite Superior
<i>Crec</i>	0,00	0,70
<i>SAT</i>	400,00	5000,00
<i>E2</i>	0,10	10,00
<i>KKT</i>	0,50	0,90

5.4.2. Função Objetivo

A otimização foi realizada de forma a encontrar valores dos parâmetros, tais que a diferença entre as vazões geradas pelo modelo e as vazões observadas afluentes aos reservatórios do Sistema Cantareira, fosse mínima. Para isso foi adotada como função objetivo a equação de Nash-Sutcliffe (NASH; SUTCLIFFE, 1970)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{calc}^i - Q_{obs}^i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{med}^i - Q_{obs}^i)^2} \quad \text{Equação 5.14}$$

Onde Q_{calc}^i é a vazão calculada pelo modelo hidrológico para o mês correspondente ao índice i ; Q_{obs}^i a vazão observada no mês correspondente ao índice i ; Q_{med} a vazão média observada para o mês correspondente ao índice i e n a quantidade total de meses observados.

5.4.3. Algoritmo de Calibração

Para a calibração do SMAP foi utilizado o *software Matlab*, que possui uma linguagem computacional de alto nível. O *software* contém vasta biblioteca de funções predefinidas, o que facilita a tarefa de realizar programações técnicas, além de torná-la mais eficiente (CHAPMAN, 2010). O programa apresenta como uma de suas funcionalidades o acesso a um compilado de funções elementares predeterminadas que podem ser acessadas através de uma interface gráfica, o que torna a interação entre o usuário e o aplicativo facilitada. Dentre as ferramentas existentes está o aplicativo *Optimization Tool*. Por meio desse, é possível resolver problemas de mínimo local a partir de diferentes técnicas de otimização automática de forma simples, sem necessitar de chamadas de linha de comando. Nessa pesquisa foi selecionada a técnica de Algoritmos Genéticos para a busca do ponto mínimo da função objetivo a ser otimizada.

A utilização do Algoritmo Genético pode ser feita diretamente através da janela gráfica apresentada na Figura 19, que é a interface gráfica principal do *Optimization Tool*.

Figura 19 - Interface gráfica da função de Algoritmo Genético do *Optimization Tool*.

Antes de iniciar o processo de otimização pelo Algoritmo Genético é necessária a especificação dos elementos básicos para a sua operação. A descrição desses elementos é feita à seguir:

Função Objetivo (*Fitness Function*) - é a função que se deseja otimizar, por padrão deve ser uma função de minimização. A função objetivo selecionada é a de Nash-Sutcliffe, Equação 5.14, entretanto, para que a minimização da função corresponda com a diminuição dos desvios das vazões simuladas em relação às vazões observadas, a função objetivo (*FF*) foi adaptada segundo a Equação 5.15.

$$FF = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{calc}^i - Q_{obs}^i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{med}^i - Q_{obs}^i)^2} \quad \text{Equação 5.15}$$

Número de Variáveis (*Number of Variables*) - número de variáveis independentes da função objetivo. Conforme o modelo hidrológico utilizado, o número de variáveis independentes a serem calibradas é quatro. Esse valor define o tamanho dos vetores solução, também chamados indivíduos.

Limite das Variáveis (*Bounds*) - valores máximos e mínimos, dentro dos quais o Algoritmo Genético faz a busca para a otimização dos vetores solução. Os limites estabelecidos para as variáveis do modelo são os apresentados na Tabela 7.

População (*Population*) - especifica o tamanho da população, ou seja, quantos vetores solução existirão em cada geração.

Seleção (*Selection*) – o operador de seleção determina quais serão os indivíduos escolhidos para fazerem parte da próxima geração, baseada nos valores da função objetivo de cada vetor solução; *Roleta (Roulette)* – esse método simula uma roleta, em que a área da roleta correspondente a cada indivíduo é proporcional ao seu nível de aptidão, ou seja, seu valor na função objetivo. O algoritmo então seleciona de forma aleatória uma secção da roleta, quanto maior a aptidão do indivíduo, maior a probabilidade dele ser selecionado (Figura 20).

Figura 20 – Esquematização do método da roleta.

Reprodução (*Reproduction*) - essa opção determina como o Algoritmo Genético cria novos indivíduos (vetores solução) a cada geração; **Elitismo (*Elite Count*)** - especifica o número de indivíduos que têm garantia de sobrevivência para a próxima geração; **Fração de *Crossover* (*Crossover Fraction*)** - determina a fração da próxima geração que é produzida por *Crossover*, essa fração pode variar de 0 a 1.

Cruzamento (*Crossover*) – combina dois indivíduos para formar um novo indivíduo para a próxima geração; **Crossover Uniforme (*Scattered*)** - função que cria randomicamente um vetor binário do mesmo tamanho dos indivíduos (vetores solução). Para as posições onde o vetor binário tem valor de 1, é escolhido o elemento da mesma posição do primeiro indivíduo, enquanto para as posições com valor 0 no vetor binário são escolhidos os valores do segundo indivíduo. Desta forma, é produzido um novo vetor solução com o valor de cada parâmetro igual ao de um ou outro dos indivíduos selecionados da geração anterior.

Mutação (*Mutation*) – esse operador realiza pequenas mudanças aleatórias nos indivíduos da população, aumentando a variedade genética, o que faz com que aumente o espaço de busca por regiões ótimas; **Uniforme (*Uniform*)** - com essa função de mutação, o algoritmo seleciona alguns elementos do vetor que serão destinados a mutação,

posteriormente esses elementos são substituídos por um número aleatório selecionado uniformemente, dentro dos limites estabelecidos para as variáveis.

Critério de parada (*Stopping Criteria*) - opção que determina quando o algoritmo genético deve parar suas operações na busca de um melhor vetor solução. Podem ser definidos cinco critérios: Gerações (*Generations*) - número máximo de gerações produzidas; Tempo Limite (*Time Limit*) - tempo máximo o qual o algoritmo continua a rodar antes de determinar a solução ótima; Valor Limite da Solução Objetivo (*Fitness Limit*) - se o valor da função objetivo para um determinado vetor solução for menor que um valor especificado, o algoritmo encerra; *Stall Generations* - caso a média do valor da função objetivo não seja alterada em um número específico de gerações, o algoritmo encerra as iterações; *Stall Time Limit* - se não houver diminuição no melhor valor da função objetivo em um determinado intervalo de tempo, o processo é finalizado. Empregando os cinco critérios citados de forma conjunta, quando algum deles é atingido, o algoritmo estabelece o encerramento das iterações e apresenta o vetor solução responsável pelo menor valor da função objetivo.

A Tabela 8 mostra as opções escolhidas no projeto para a execução do Algoritmo Genético, os parâmetros que não estão definidos na Tabela 8 receberam valores padrão do *Optimization Tool*.

Tabela 8 - Valores dos parâmetros utilizados para definir o Algoritmo Genético.

Função Objetivo	$F.F = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{calc}^i - Q_{obs}^i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{med}^i - Q_{obs}^i)^2}$	
Número de Variáveis	4	
Limite das Variáveis [<i>Crec</i> ; <i>SAT</i> ; <i>E2</i> ; <i>KKT</i>]	Superior	[0,70;5000,00;10,00;0,90]
	Inferior	[0,00;400,00;0,10;0,50]
Tamanho da População Inicial	400	
Tipo de Seleção	Roleta	
Reprodução	Elitismo	40,00
	Taxa de Crossover	0,80
Tipo de Crossover	Crossover Uniforme (<i>Scattered</i>)	
Mutação	Uniforme	

Critérios de Parada	Número de Gerações para Parada	400
	Tempo Limite	Infinito
	Solução Limite	-Infinito
	Stall Generation	50
	Stall Time Limit	Infinito

5.4.4. Avaliação do desempenho do modelo hidrológico

A avaliação do desempenho do modelo quanto sua capacidade em simular as vazões observadas foi feita de forma quantitativa, por meio de três coeficientes estatísticos:

i) Coeficiente de Nash-Sutcliffe – NSE:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{calc}^i - Q_{obs}^i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{med}^i - Q_{obs}^i)^2} \quad \text{Equação 5.16}$$

Onde Q_{calc}^i é a vazão calculada pelo modelo hidrológico para o mês correspondente ao índice i ; Q_{obs}^i a vazão observada no mês correspondente ao índice i ; Q_{med} a vazão média observada para o mês correspondente ao índice i e n a quantidade total de meses observados.

ii) Porcentagem de Desvio (*Percent Bias*) - PBIAS:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}^i - Q_{calc}^i) \times (100)}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}^i)} \quad \text{Equação 5.17}$$

Onde Q_{calc}^i é a vazão calculada pelo modelo hidrológico para o mês correspondente ao índice i ; Q_{obs}^i a vazão observada no mês correspondente ao índice i ; Q_{med} a vazão média observada para o mês correspondente ao índice i e n a quantidade total de meses observados.

iii) Coeficiente de determinação - r^2

$$r^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}^i - \overline{Q_{obs}}) (Q_{calc}^i - \overline{Q_{calc}})}{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{obs}^i - \overline{Q_{obs}})^2 \right]^{0,5} \left[\sum_{i=1}^n (Q_{calc}^i - \overline{Q_{calc}})^2 \right]^{0,5}} \right\} \quad \text{Equação 5.18}$$

Onde Q_{calc}^i é a vazão calculada pelo modelo hidrológico para o mês correspondente ao índice i ; Q_{obs}^i a vazão observada no mês correspondente ao índice i ; $\overline{Q_{obs}}$ a vazão média observada no período avaliado; $\overline{Q_{calc}}$ a vazão média simulada no período avaliado; e n a quantidade total de meses observados.

Em complemento à análise quantitativa, a avaliação do desempenho do modelo hidrológico também foi feita de forma qualitativa, através da análise visual do hidrograma das vazões observadas em comparação com o hidrograma das vazões simuladas, da dispersão temporal dos resíduos e da dispersão dos resíduos em relação à vazão observada.

5.5. Estimativa das alterações de temperatura e precipitação

As estimativas de alteração no regime de precipitação e nas temperaturas médias mensais foram realizadas com base em dois cenários de emissões de gases de efeito estufa definidos pelo IPCC.

Um deles referente à família de cenários A1, o cenário A1FIMI, é caracterizado por alta taxa de emissões atmosféricas, uso intenso de combustíveis fósseis e por um processo de globalização acelerado. O segundo cenário pertence ao grupo B2, o cenário B2MES, que descreve um futuro com mudanças tecnológicas diversificadas e pautado na sustentabilidade econômica, social e ambiental, portanto, com uma menor taxa de emissão de gases de efeito estufa.

A avaliação das alterações climáticas para os dois cenários citados foi feita para uma janela de 20 anos, centrada no ano de 2100, dessa forma o período futuro hipotético analisado compreende o intervalo entre os anos de 2090 e 2110.

5.5.1. O modelo MAGICC/SCENGEN

Para simular as alterações de temperatura e precipitação na região de estudo, foi utilizado o modelo MAGICC/SCENGEN (*Model for the Assessment of Greenhouse Gas Induced Climate Change/Scenario Generator*) versão 5.3 (Figura 21).

Figura 21 - (a) Interface gráfica do modelo MAGICC; (b) interface gráfica do gerador de cenários SCENGEN.

O *software*, que é a combinação do modelo climático MAGICC com a base de dados de cenários climáticos SCENGEN, foi um dos primeiros modelos a serem usados como ferramenta norteadora para os Relatórios de Avaliação do IPCC (*IPCC Assessment Reports*), quanto às políticas climáticas (SCHLOSSER et al., 2013).

De acordo com Wigley (2008) o MAGICC/SCENGEN é um modelo acoplado de ciclo de gases e clima e, na sua versão 5.3, possui em sua base de dados modelos gerais de circulação (*General Circulation Model - GCM*), consistentes com as principais diretrizes do Quarto Relatório de Avaliação do Grupo de Trabalho 1 (*Fourth Assessment Report, Working Group 1 (AR4)*) do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*) (IPCC 2007).

Apesar do MAGICC (*Model for the Assessment of Greenhouse-Gas Induced Climate Change*) não ser considerado um GCM, faz uso de uma série de modelos reduzidos para simular o comportamento dos GCM's de uma maneira tridimensional (HULME et al., 2000). Em outras palavras, o programa pode ser definido como um conjunto conexo de modelos

simplificados que, coletivamente pertencem ao gênero de Modelos Climáticos Simplificados, como definidos por Harvey et al, (1997).

Meinshausen, Raper e Wigley (2011) apontam como característica do MAGICC sua capacidade de prover flexibilidade quanto aos diferentes tipos de resposta, observados nos mais sofisticados modelos climáticos, enquanto sua abordagem tem como enfoque a simplificação das equações dos processos físicos e biológicos fundamentais para a representação do clima.

Por sua vez, o SCENGEN (*Scenario Generator*), segundo Hulme et al. (2000), não é considerado um modelo climático, mas um banco de dados que contém o resultado de inúmeros experimentos com GCM's, assim como um conjunto de dados climáticos globais observados. Esse banco de dados é manipulado pelo SCENGEN, utilizando informações sobre taxa e a magnitude de aquecimento global, sendo direcionado pelas escolhas do usuário quanto aos cenários de mudanças climáticas e suas características.

Para isso, o SCENGEN utiliza uma versão do método *pattern scaling*, descrita por Santer et al. (1990), para produzir padrões espaciais de mudança climática a partir do banco de dados de GCM's contidos no diretório do MAGICC (WIGLEY, 2008). A Figura 22 traz o fluxograma que descreve a estrutura e a configuração do modelo MAGICC/SCENGEN.

Figura 22 - Estrutura do *software* MAGICC/SCENGEN (Fonte: Wigley, 2008).

A partir da escolha de cenários de emissão de gases de efeito estufa, o *software* permite ao usuário determinar as mudanças na concentração de CO₂ atmosférico, a temperatura média global e o nível do mar entre os anos de 1990 e 2100, resultantes de emissões antrópicas de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), halocarbonos (*i.e.* HCFCs, HFCs, PFCs) e dióxido de enxofre (SO₂) (HULME et al., 2000).

Como resultado o modelo oferece valores de alteração da temperatura média em graus Celsius (°C) e alterações percentuais de precipitação em diferentes partes do globo. Adam (2011) sugere que essa é uma vantagem do MAGICC/SCENGEN, ao fornecer como resultados prováveis anomalias nas variáveis climáticas e não apenas dados brutos de modelos climáticos.

O resultado das alterações climáticas é apresentado através de grades de 2,5° x 2,5°; que dividem todo o globo terrestre (Figura 23 e Figura 24).

Figura 23 - Projeção anual de alteração na temperatura média global pelo MAGICC/SCENGEN.

Figura 24 - Projeção anual de alteração na precipitação média global pelo MAGICC/SCENGEN.

Dentre os GCM's presentes no diretório do software, o usuário tem a opção de selecionar quais farão parte da simulação nas alterações futuras do clima. A Tabela 9 apresenta os 20 modelos acoplados atmosfera/oceano de circulação global contidos no MAGICC/SCENGEN.

Tabela 9 - Modelos acoplados atmosfera/oceano de circulação global contidos no MAGICC/SCENGEN versão 5.3 (Fonte: adaptado de Adam, 2011).

Nome SCENGEN	País	Nome	Instituição
BCCRBCM2	Noruega	Bergen Climate Model, version 2	Bjerknes Centre for Climate Research (BCCR), Univ. of Bergen
CCSM--30	EUA	Community Climate System Model, version 3.0	National Center for Atmospheric Research (NCAR)
CCCMA-31	Canadá	Canadian Centre for Climate Modelling & Analysis's	Canadian Centre for Climate Modelling & Analysis's
CNRM-CM3	França	CNRM-CM3	Centre National de Recherches Météorologiques, Météo France
CSIRO-30	Austrália	CSIRO Mark 3.0	CSIRO
MPIECH-5	Alemanha	ECHAM5/MPI-OM	Max Planck Institute for Meteorology
ECHO---G	Alemanha/Coreia	ECHO-G = ECHAM4 + HOPE-G	Meteorological Institute of the University of Bonn, Institute of KMA and Model and Data Group
FGOALS1G	China	FGOALS1.0	Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences
GFDLCM20	EUA	CM2.0-AOGCM	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory - NOAA
GFDLCM21	EUA	CM2.0-AOGCM	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory - NOAA
GIS--EH	EUA	GISS ModelE-H	Goddard Institute for Space Studies (GISS), NASA
GIS--ER	EUA	GISS ModelE-H	Goddard Institute for Space Studies (GISS), NASA
INMCM-30	Russia	INMCM3.0	Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Science
IPSL-CM4	França	IPSL-CM4	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)

MIROC-HI	Japão	MIROC3.2 (Model for Interdisciplinary Research on Climate)	CCSR/NIES/FRCGC
MIROCMED	Japão	MIROC3.2 (Model for Interdisciplinary Research on Climate)	CCSR/NIES/FRCGC
MRI-232A	Japão	MRI-CGCM2.3.2	Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency
NCAROCM1	EUA	Parallel Climate Model	National Center for Atmospheric Research NCAR
UKHADCM3	Inglaterra	HADCM3	Hadley Centre for Climate Prediction and Research
UKHADGEM	Inglaterra	Hadley Center Global Environmental Model, v.1	Hadley Centre for Climate Prediction and Research

5.5.2. Seleção dos GCM's

Ainda há muitas incertezas quanto às projeções das mudanças climáticas, principalmente em regiões tropicais, o que é refletido nas diversas perspectivas de alterações no clima de acordo com diferentes modelos climáticos. Uma das dificuldades de se prever com confiabilidade o clima futuro, provém das incertezas associadas aos próprios modelos de circulação geral (GCM), uma vez que cada um desses projeta diferentes mudanças climáticas futuras em resposta aos mesmos cenários de emissão de gases de efeito estufa impostos (ZHOU; XIE, 2015)

De acordo com Wigley (2008), para muitas aplicações do MAGICC/SCENGEN, é útil considerar não somente a aplicação de um único GCM, mas a média a partir de um conjunto de modelos. A abordagem multi-modelo proporciona um melhor desempenho da simulação climática, isso porque distorções e incertezas de cada GCM são canceladas mutuamente (QIAO et al., 2014).

Giorgi e Mearns (2002) afirmam que dois critérios podem ser utilizados para verificar a confiabilidade de simulações de alteração climática por um conjunto de GCM's. O primeiro é baseado na habilidade de um GCM em representar o clima presente, quanto melhor o desempenho do modelo para esse quesito, mais confiável é sua simulação da alteração

climática futura. O segundo critério tem como premissa a convergência das simulações por diferentes modelos a partir de um dado cenário. Maior convergência implica maior confiabilidade, indicando pequena sensibilidade às diferenças entre modelos.

Para minimizar as distorções inerentes aos modelos climáticos, foi selecionado um conjunto de GCM's contidos no MAGICC/SCENGEN para simular o clima futuro. O procedimento empregado para a escolha dos modelos foi uma adaptação daquele estabelecido por Wigley (2008), e é descrito a seguir.

O MAGICC/SCENGEN é capaz de calcular algumas medidas de desempenho, para avaliar cada modelo quanto a sua capacidade em representar o clima atual. Isso é feito a partir da comparação, entre os dados de saída de temperatura e precipitação de cada modelo com a base de dados contida no próprio *software*, que contempla dados de temperatura e precipitação observados no período de 1979 a 1990.

A precipitação anual foi o parâmetro utilizado para a análise das medidas estatísticas, ou seja, séries anuais de precipitação observadas no período entre 1979 a 1990 foram comparadas com aquelas geradas pelo modelo. A precipitação é mais difícil de ser modelada que a temperatura, logo, o uso dessa variável torna o processo de seleção dos modelos mais rigoroso.

As três medidas de desempenho utilizadas para a avaliação da confiabilidade dos modelos climáticos, são:

i) *pattern correlation* - representa a correlação entre o clima presente observado e o clima presente modelado. Quanto mais próximo de 1, maior a confiabilidade do modelo.

ii) *RMSE (root mean square error)* – é a raiz dos desvios quadráticos médios. Quanto mais próximo de 0, maior a confiabilidade do modelo.

iii) *bias* - representa o desvio do modelo, é a média da diferença entre o modelo e o observado. Quanto mais próximo de 0, maior a confiabilidade do modelo.

Após o cálculo das estatísticas de desempenho de cada modelo, a metodologia é aplicada da seguinte forma:

1. As medidas de desempenho são “ranqueadas” de acordo com seu valor, esse *ranking* pode variar a cada parâmetro. Para *pattern correlation*, quanto mais próximo de 1, melhor a

colocação; para *RMSE*, quanto mais próximo de 0 melhor a colocação; para *bias*, quanto mais próximo de 0, melhor a colocação;

2. O grupo dos 8 melhores modelo recebem nota 1, o grupo dos 4 modelos intermediários recebem nota 0, enquanto o grupo dos 8 piores modelos recebem nota -1;

3. É feito o somatório das notas para cada modelo, obtendo um *ranking* final, referente às três medidas de desempenho analisadas.

Por fim, o conjunto dos melhores modelos é representado por aqueles que obtiveram as 8 maiores notas, integrando dessa forma o conjunto de GCM's responsáveis por simular as alterações climáticas futuras para a área analisada no estudo.

5.6. Geração de séries de vazão futura

Após a calibração do modelo hidrológico, e das estimativas das futuras alterações climáticas definidas pelo MAGICC/SCENGEN, a próxima etapa da metodologia tem por objetivo a geração de séries de vazão afluente aos reservatórios constituintes do Sistema Cantareira no cenário hipotético futuro selecionado (janela de 20 anos centrada em 2100).

Para isso, as anomalias climáticas (ΔT e ΔP) definidas pelo MAGICC/SCENGEN foram incorporadas às séries observadas de temperatura e precipitação compreendidas no período de 1990 a 2010. A partir das séries de temperatura modificada, séries mensais de evapotranspiração foram recalculadas pelo método de Penman-Monteith, mantendo constantes as séries dos outros parâmetros do modelo (velocidade do vento, umidade relativa e radiação solar).

Com as séries de precipitação e evapotranspiração perturbadas servindo como dados de entrada, uma nova simulação do modelo hidrológico SMAP foi realizada. Como resultado da simulação, séries mensais de vazão para cada uma das quatro sub-bacias analisadas foram geradas. Essas séries sintéticas indicam a resposta do modelo hidrológico aos dois cenários futuros propostos de mudança climática, e correspondem a vazões afluentes mensais aos quatro reservatórios constituintes do Cantareira, no período entre 2090 a 2110.

5.7. Avaliação da disponibilidade hídrica

A avaliação da disponibilidade hídrica das bacias contribuintes ao Sistema Cantareira se deu através de quatro critérios. Após a geração das séries de vazão nos dois cenários futuros do IPCC, para cada uma das quatro bacias contribuintes do sistema, foi feita a estimativa das vazões $Q_{95\%}$ e $Q_{90\%}$ (vazão com probabilidade de 95% e 90% de excedência), a vazão média mensal Q_M , a vazão média de longo período Q_{MLT} .

Os parâmetros supracitados foram estimados tanto para as séries de vazões futuras, quanto para as séries de vazões simuladas pelo modelo hidrológico nas condições climáticas atuais, de forma a fazer uma comparação entre essas.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Otimização dos parâmetros do Modelo Hidrológico

As séries de dados observados das quatro sub-bacias do Sistema Cantareira estendem-se pelo período de 1988 até 2010. Sendo que o período de 1990 a 2005 foi selecionado para a calibração e o período de 2005 até 2010 foi utilizado para a validação do modelo hidrológico. Os anos de 1988 e 1989 serviram para o aquecimento do modelo, com isso, tenta-se atenuar os efeitos das condições iniciais das bacias nas vazões dos anos subsequentes.

6.1.1. Calibração

A otimização dos quatro parâmetros calibráveis do modelo hidrológico foi feita de forma automática, através da função de Algoritmos Genéticos do pacote de funções *Optimization Tool*, contido no *software* Matlab. Como algumas funções do algoritmo genético possuem caráter estocástico, para a busca do mínimo global da função objetivo, foram realizadas 10 tentativas de otimização para cada bacia, totalizando 40 iterações do modelo hidrológico.

A Figura 25 e a Figura 26 ilustram a evolução dos vetores solução das sub-bacias Atibainha e Jaguari/Jacareí. É possível observar o decaimento do valor médio da função objetivo, na busca pelo mínimo global da função. Após determinado número de gerações em que a média permanece constante, o processo é interrompido, e o vetor responsável pelo menor valor da função objetivo foi adotado como vetor solução.

Figura 25 – Evolução do valor da função objetivo para a sub-bacia Atibainha.

Figura 26 - Evolução do valor da função objetivo para a sub-bacia Jaguarí/Jacaré.

Após a calibração e a definição dos vetores soluções, foi definido o valor dos quatro parâmetros calibráveis do modelo hidrológico para cada sub-bacia estudada. Os valores resultantes são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores otimizados dos parâmetros do modelo hidrológico.

Sub-Bacia	Parâmetros Calibráveis			
	<i>Crec</i>	SAT	E2	KKT
Jaguari/Jacareí	0,0206	2379,8	5,72	0,50
Cachoeira	0,0095	5000	10,00	0,71
Atibainha	0,0086	5000	9,49	0,50
Paiva castro	0,0082	5000	10,00	0,50

O processo de calibração automática empregado tem por objetivo a minimização dos desvios da variável de saída analisada, que para esse estudo é a vazão efluente na bacia. Na tentativa de maximizar a função objetivo, o algoritmo não avalia o efeito individual de cada parâmetro sobre o valor dessa função, mas leva em conta o efeito conjunto dessas variáveis como um vetor solução. Dessa forma, o valor incoerente de um determinado parâmetro pode ser compensado pelo valor de outro parâmetro, resultando assim uma série de valores inconsistentes com a realidade física da bacia (CHARIZOPOULOS; PSILOVIKOS, 2016; GREEN; VAN GRIENSVEN, 2008; NETO et al., 2014).

Percebe-se que alguns dos valores obtidos para os parâmetros foram exatamente iguais aos fixados como limite de variação do modelo, como no caso da saturação (SAT) que atingiu o valor de 5000 mm, para três das sub-bacias estudadas. Esse fato pode estar relacionado com a distorção do significado físico dos parâmetros, dificultando uma melhor calibração das bacias.

Outro fator que deve ser ponderado, no que refere aos valores encontrados na calibração, é a característica concentrada do SMAP, que não permite a variação espacial dos parâmetros ao longo da bacia. Neto et al. (2014) ressaltam que a adoção de um valor único para representar o comportamento de toda bacia, pode afetar de forma substancial a simulação do balanço hídrico nas bacias hidrográficas.

Na Tabela 11 estão expressos os parâmetros estatísticos utilizados para avaliar a adequação da modelagem hidrológica com os dados observados.

Tabela 11 – Parâmetros estatísticos para calibração do modelo hidrológico em cada uma das sub-bacias analisadas.

Sub-Bacia	Parâmetros Estatísticos (Calibração)		
	NSE	PBIAS (%)	r ²
Jaguari/Jacareí	0,66	-4,29	0,82
Cachoeira	-0,26	-46,15	0,71
Atibainha	0,57	-2,37	0,72
Paiva Castro	0,18	-5,80	0,59

O desempenho do modelo em cada bacia foi classificado a partir das faixas de valores especificados por Moriasi et al. (2007) (Tabela 12). Dessa forma, para o coeficiente de Nash-Sutcliffe, as sub-bacias Jaguari/Jacareí e Atibainha apresentaram desempenho considerado bom e satisfatório respectivamente, enquanto Paiva Castro e Cachoeira obtiveram valores de NSE inferiores a 0,5, sendo consideradas como insatisfatórias. Segundo o mesmo autor, calibrações com valores de NSE superiores a 0,0, ainda possuem desempenho minimamente aceitáveis. Porém, valores negativos, como o encontrado para a sub-bacia Cachoeira, indicam que a média dos dados observados tem uma melhor representação que os valores simulados pelo modelo, tornando o desempenho inaceitável.

Os valores de NSE das sub-bacias Jaguari/Jacareí e Atibainha foram similares, porém um pouco inferiores, aos encontrados por Oliveira, Pedrollo e Castro (2014) ao simular vazões mensais com o modelo SMAP na bacia do rio Ijuí, no estado do Rio Grande do Sul. Kwon et al. (2012) também aplicando o SMAP para simulação de vazões mensais na bacia do Iguatu, localizada no estado do Ceará, alcançou valor de 0,72 para o coeficiente de Nash-Sutcliffe. Todavia, o tamanho da área de drenagem das bacias hidrográficas do rio Ijuí e do Iguatu podem ter contribuído para melhores resultados do coeficiente de Nash-Sutcliffe que nas sub-bacias Jaguari/Jacareí e Atibainha. Segundo Neto et al. (2014) em grandes bacias ocorre a amortização dos fenômenos hidrológicos associados à dinâmica da água no solo, enquanto que em bacias menores os processos hidrológicos se desenvolvem de maneira mais rápida, o que pode provocar instabilidade e maiores dificuldades do modelo em representar o sistema. Esse fato contribui para justificar o melhor desempenho alcançado na calibração da sub-bacia Jaguari/Jacareí, com uma área de 1239 km², da ordem de três a quatro vezes maior que as outras sub-bacias desse estudo.

Para a porcentagem de desvio, ou viés relativo da série (PBIAS), todas as sub-bacias foram enquadradas com desempenho muito bom, exceto a Cachoeira, que com um valor de -

46,15% obteve classificação insatisfatória. O valor negativo observado nos desvios relativos das bacias atesta para a superestimativa da série simulada em comparação à observada, ou seja, em todas as bacias houve uma tendência média da vazão simulada ser maior que a vazão observada. Esse fato pode ser observado na comparação visual dos hidrogramas de vazão simulada *versus* observada (Figura 27, Figura 28, Figura 29 e Figura 30).

Quanto ao coeficiente de determinação (r^2), valores acima de 0,5 são aceitos como satisfatórios (SANTHI et al., 2002). Uma vez que todas as sub-bacias atingiram valores maiores que 0,59, o desempenho para esse critério foi considerado satisfatório a bom.

Tabela 12 – Desempenho dos coeficientes estatísticos para a avaliação de modelos hidrológicos em escala mensal.

Desempenho	Parâmetro Estatístico	
	NSE	PBIAS (%)
Muito Bom	$0,75 < NSE \leq 1,00$	$PBIAS < \pm 10$
Bom	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfatório	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Insatisfatório	$0,50 \leq NSE$	$PBIAS \geq \pm 25$

6.1.2. Validação

No processo de validação o modelo é operado novamente, dessa vez, porém, os parâmetros calibráveis assumem os valores encontrados na etapa de calibração. Os resultados então são comparados com o restante da série de vazões mensais observada.

Portanto, após a calibração ter sido realizada no período de 1990 a 2005, os valores ótimos obtidos para cada parâmetro calibrável foram utilizados para uma nova rodada de simulação do modelo hidrológico. White e Chaubey (2005) destacam a importância desse processo na modelagem hidrológica, uma vez que a validação ao ser realizada em um período que não o utilizado na calibração, é capaz de avaliar se o modelo foi calibrado para apenas um conjunto específico de dados, ou se realmente consegue representar o sistema hidrológico analisado.

A série de dados mensais compreendida entre os anos de 2005 e 2010 foi utilizada para a validação do modelo, os valores dos coeficientes estatísticos encontrados nessa etapa estão na Tabela 13.

Tabela 13 – Coeficientes estatísticos para validação do modelo hidrológico em cada uma das sub-bacias analisadas.

Sub-Bacia	Coeficientes Estatísticos (Validação)		
	NSE	PBIAS (%)	r ²
Jaguari/Jacareí	0,45	-13,95	0,88
Cachoeira	-1,21	-74,44	0,71
Atibainha	0,59	-18,78	0,72
Paiva Castro	-1,20	-13,83	0,81

A simulação do modelo hidrológico no período de 2005 a 2010 apresentou uma qualidade inferior dos parâmetros estatísticos, em relação ao período de calibração. Para o PBIAS a piora ocorreu em todas as sub-bacias, passando da faixa de valores muito bons, segundo classificação de Moriasi et al. (2007), para uma faixa de valores de bom a satisfatório.

O coeficiente de Nash-Sutcliffe apresentou comportamento divergente. Para a sub-bacia Atibainha, o valor obteve uma ligeira melhora, passando de 0,57 para 0,59. Entretanto, a diminuição desse coeficiente para a sub-bacia Jaguari/Jacareí foi mais acentuada, chegando a um valor de 0,45. Apesar de Moriasi et al. (2007) classificar valores de NSE abaixo de 0,5 como insatisfatórios, tal valor não é uma unanimidade. Outros autores apontam que valores de NSE maiores que 0,36 são considerados satisfatórios (COLLISCHONN, 2001; MOTOVILOV, 1999).

Para o coeficiente de determinação (r²), de uma forma geral, houve melhora. Ao passo que as sub-bacias Cachoeira e Atibainha mantiveram constante os valores da etapa de calibração, Jaguari/Jacareí e Paiva Castro obtiveram um aumento considerável nessa estatística para o período da validação. Indicando com isso, um aumento da correlação entre os dados observados e os simulados para o período da validação.

6.1.3. Análise visual da calibração

Além da análise do processo de otimização através dos parâmetros estatísticos, também se faz importante a verificação visual dos hidrogramas gerados no processo. Dessa forma, é possível fazer a comparação dos resultados através dos parâmetros estatísticos com o comportamento dos hidrogramas.

A seguir são apresentados os hidrogramas das vazões observadas *versus* simuladas do período de calibração, nos reservatórios Jaguari/Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro (Figura 27, Figura 28, Figura 29 e Figura 30). Os hidrogramas correspondentes ao período de validação do modelo estão disponíveis no apêndice C.

Figura 27 - Hidrogramas de afluência mensal observada e simulada do reservatório Jaguari/Jacareí.

A sub-bacia Jaguari/Jacareí foi a que apresentou melhores respostas ao processo de calibração, tanto nos valores alcançados pelos parâmetros estatísticos, quanto na análise visual do hidrograma de vazão observada e simulada. De uma maneira geral, a vazão simulada mostrou-se superior à observada, principalmente entre os anos de 1996 a 1999, o que refletiu no valor negativo do PBIAS. A dificuldade do modelo hidrológico em representar alguns picos de vazão dentro da série analisada, impossibilitou o NSE atingir maiores valores, uma vez que, por ser uma estatística proporcional ao quadrado do desvio das vazões, é muito sensível a diferenças nos valores extremos. Contudo, o modelo assimilou de forma satisfatória a sazonalidade da sub-bacia, conseguindo responder aos comportamentos da variação da vazão, ocasionando um elevado r^2 .

Figura 28- Hidrogramas de afluência mensal observada e simulada do reservatório Cachoeira.

A calibração da sub-bacia Cachoeira foi a que apresentou respostas de menor qualidade, com os valores de seus coeficientes estatísticos considerados insatisfatórios, exceto para o coeficiente de determinação (r^2). Na comparação de seus hidrogramas simulados e observados, fica evidente a superestimativa das vazões simuladas (sobreposição da vazão simulada em relação à observada), como consequência, tem-se um elevado valor negativo do viés relativo (PBIAS). É possível perceber que o modelo, apesar de não simular corretamente os valores de vazão observados, foi capaz de reproduzir o comportamento sazonal da bacia hidrográfica, produzindo uma alta correlação entre a vazão simulada e observada. Na análise visual da Figura 28 fica clara a não sensibilidade do coeficiente de determinação em detectar diferenças proporcionais ou aditivas entre séries, com isso, valores elevados de r^2 podem ser obtidos, mesmo quando os valores simulados diferem em magnitude dos observados, conforme apontam Legates e McCabe (1999).

A sub-bacia Atibainha atingiu resultados semelhantes à sub-bacia Jaguari/Jacareí, porém com um desempenho um pouco inferior, o que pode ser concluído ao se comparar os valores dos coeficientes estatístico obtidos por cada uma. Ainda assim, seu processo de calibração foi considerado satisfatório. Por sua vez, a sub-bacia Paiva Castro não alcançou

valores elevados em seus parâmetros estatísticos, tendo o desempenho considerado insatisfatório, assim como a sub-bacia Cachoeira.

Figura 29- Hidrogramas de afluência mensal observada e simulada do reservatório Atibainha.

Figura 30 - Hidrogramas de afluência mensal observada e simulada do reservatório Paiva Castro.

As melhores respostas ao processo de calibração foram obtidas pelas sub-bacias Jaguari/Jacareí e Atibainha, sendo suas calibrações consideradas boas e satisfatórias respectivamente. Ainda que ambas tenham alcançado valores elevados para os coeficientes estatísticos analisados, o modelo hidrológico, assim como para as sub-bacias Cachoeira e Paiva Castro, superestimou as vazões simuladas.

Para uma análise complementar dos hidrogramas observados e simulados, a Figura 31 e a Figura 32 mostram a variação temporal dos resíduos das vazões e a dispersão dos resíduos relativos em relação à vazão média mensal observada, das sub-bacias Jaguari/Jacareí e Atibainha, respectivamente.

(a)

(b)

Figura 31 - Análise de resíduos para a vazão média mensal afluyente ao reservatório Jaguari/Jacareí - (a) variação temporal dos resíduos (b) dispersão dos resíduos relativos em relação à vazão média mensal observada.

(a)

(b)

Figura 32- Análise de resíduos para vazão média mensal afluyente ao reservatório Atibainha - (a) variação temporal dos resíduos da vazão média mensal e (b) dispersão dos resíduos em relação à vazão média mensal observada.

Conforme constatado nos valores dos parâmetros estatísticos e na análise visual, a tendência de superestimativa na vazão simulada também é confirmada pela observação da

dispersão dos resíduos. Principalmente na Figura 31(b) e na Figura 32(b), é de se notar a maior concentração de pontos abaixo do eixo que corta o valor 0,00, o que demonstra o viés negativo dos resíduos. Outro aspecto observado é o posicionamento dos resíduos, no gráfico da sub-bacia Jaguari/Jacareí, em uma faixa mais estreita de valores, se comparada com a sub-bacia Atibainha, comprovando o melhor desempenho do modelo hidrológico para a sub-bacia Jaguari/Jacareí.

Apesar do modelo hidrológico apresentar um viés negativo na análise dos resíduos, esse comportamento não é observado de forma homogênea ao longo de toda séries temporal. Na análise da Figura 31(a) e Figura 32(a) é observado que a variação temporal dos resíduos também contém períodos de subestimativa das vazões simuladas, como entre os anos de 1995 a 1997 para a sub-bacia Atibainha.

Contudo, a análise das curvas de permanência das vazões reforça a tendência de sobreposição das vazões simuladas. É possível observar na Figura 33 e Figura 34 o deslocamento da curva de vazões simuladas acima das vazões observadas.

Por fim, pelo fato de terem apresentado os menores desvios das vazões simuladas em relação às observadas e atingido valores satisfatórios nos parâmetros estatísticos utilizados (NSE, PBIAS e r^2), apenas as sub-bacias Jaguari/Jacareí e Atibainha foram selecionadas para a análise das séries de vazão futura. Os valores dos parâmetros do modelo, dessas duas sub-bacias, contidos na Tabela 10, foram mantidos e utilizados nas simulações hidrológicas futuras.

Figura 33 – Curva de permanência das vazões observadas *versus* simuladas da sub-bacia Jaguari/Jacareí.

Figura 34 - Curva de permanência das vazões observadas *versus* simuladas da sub-bacia Atibainha.

6.2. Seleção dos modelos climáticos

Na tentativa de minimizar as incertezas inerentes à modelagem climática, um conjunto de GCMs foi selecionado para simular as respostas às emissões de gases de efeito estufa. A metodologia proposta foi elaborada por Wigley (2008) e consiste na avaliação conjunta, para cada modelo, de três estatísticas de desempenho, são elas: *pattern correlation*, *RMSE* e *bias*.

Os modelos climáticos contidos no MAGICC/SCENGEN foram “ranqueados” de acordo com o valor de cada uma dessas medidas. A Tabela 14 apresenta a classificação de cada modelo em relação às medidas de desempenho.

Tabela 14 - Ranking de classificação para a seleção dos modelos climáticos.

Modelos	<i>Pattern Correlation</i>	<i>Ranking</i>	<i>RMSE</i>	<i>Ranking</i>	<i>BIAS</i>	<i>Ranking</i>
BCCRBCM2	-0,033	-1	1,325	-1	1,110	-1
CCCMA-31	0,061	-1	0,480	1	-0,445	0
CCSM--30	0,568	0	1,421	-1	-1,398	-1
CNRM-CM3	0,010	-1	0,847	0	0,438	1
CSIRO-30	0,644	1	0,806	0	-0,635	0
ECHO---G	0,459	0	0,295	1	-0,012	1
FGOALS1G	0,414	0	0,309	1	0,235	1
GFDLCM20	0,475	0	0,579	0	-0,520	0
GFDLCM21	0,994	1	0,744	0	-0,707	0
GISS--EH	0,907	1	0,533	1	-0,325	1
GISS--ER	-0,787	-1	0,921	0	-0,688	0
INMCM-30	0,411	0	1,836	-1	-1,827	-1
IPSL_CM4	0,771	1	1,505	-1	-1,500	-1
MIROC-HI	0,164	-1	0,931	-1	0,517	0
MIROCMED	0,848	1	0,617	0	-0,605	0
MPIECH-5	0,768	1	0,889	0	-0,882	-1
MRI-232A	0,391	0	0,466	1	-0,232	1
NCARPCM1	0,337	0	1,896	-1	-1,885	-1
UKHADCM3	0,330	-1	0,318	1	0,103	1
UKHADGEM	0,072	-1	4,146	-1	3,338	-1

Posteriormente, as notas de cada medida foram somadas, resultando em um *ranking* final. Para essa pesquisa, foram selecionados os 8 melhores modelos classificados no *ranking* final. O resultado com a seleção dos modelos escolhidos é listado na Tabela 15.

Tabela 15 - Seleção final dos melhores modelos climáticos para representar a região analisada.

Modelos	Ranking Final
GISS--EH	3
ECHO---G	2
FGOALS1G	2
MRI-232A	2
CSIRO-30	1
GFDLCM21	1
MIROCMED	1
UKHADCM3	1

6.3. Projeção das alterações climáticas no Sistema Cantareira

As estimativas das alterações no regime de precipitação (ΔP) e temperatura (ΔT) para o ano de 2100 foram geradas pelo modelo MAGICC/SCENGEN e cobrem uma grade de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ do globo terrestre, essa célula está representada na Figura 35 pela área hachurada em vermelho. A escala espacial foi suficiente para inserir as quatro sub-bacias analisadas no mesmo quadrante de alterações climáticas, com isso, as variações na precipitação e na temperatura média mensal são uniformes para todo o Sistema Cantareira.

Figura 35 – Sítio selecionado para representar as alterações na temperatura e precipitação na área do Sistema Cantareira.

A Figura 36 apresenta a posição geográfica do Cantareira e sua completa inserção no sítio de mudanças climáticas gerado pelo MAGICC/SCENGEN.

Figura 36 – Quadrante de 2,5° x 2,5° cobrindo toda a área de contribuição do Sistema Cantareira.

No total foram realizadas 48 simulações com o modelo climático. Para cada um dos dois cenários futuros analisados (A1FIMI e B2MES), foram obtidas alterações percentuais na precipitação de cada mês e alterações brutas na temperatura média mensal. A Figura 37 e a Figura 40, e a Tabela 16 e a Tabela 19 mostram essas variações mensais de precipitação e temperatura, nos cenários A1FIMI e B2MES, para a área de estudo.

Figura 37 - Alterações geradas pelo MAGICC/SCENGEN na precipitação para o ano de 2100.

Tabela 16 – Alteração na precipitação média mensal gerada pelo MAGICC/SCENGEN para o ano de 2100.

	Alterações na precipitação (%)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
A1FIMI	22,10	17,30	6,50	2,40	12,10	-20,50	8,50	-20,00	-33,30	3,50	9,20	-23,50
B2MES	12,00	9,40	2,80	1,90	4,50	-11,60	4,00	-12,70	-21,00	2,00	5,90	-13,90

Da análise dos resultados de variação de precipitação entre os dois cenários futuros selecionados, apresentados na Figura 37 e na Tabela 16, é possível observar as maiores modificações ocorrendo no cenário A1FIMI em relação ao B2MES. Por ser um cenário de alta emissão de gases de efeito estufa, essa tendência já era esperada para o A1FIMI.

Quanto às variações no regime pluviométrico decorrentes do cenário A1FIMI, apesar da grande heterogeneidade nas alterações, alguns meses obtiveram destaque na análise. Entre os meses de outubro a abril, período considerado chuvoso na região, há aumento da precipitação, com uma variação positiva na chuva chegando a 22,1% para o mês de janeiro. A exceção desse período fica para o mês de dezembro, em que há previsão de queda acentuada na precipitação de até 23,5%. Já para período de maio a setembro, as variações negativas se sobressaíram, com a diminuição da precipitação para o mês de setembro atingindo 33,30%.

Na Figura 38 e na Figura 39 são exibidos os totais precipitados mensais nas sub-bacias Jaguari/Jacareí e Atibainha, nos dois cenários analisados e o total precipitado observado. A precipitação mensal observada é referente ao período compreendido entre os anos de 1990 e 2010, enquanto a precipitação mensal nos cenários A1FIMI e B2MES é referente aos anos de 2090 a 2110 (janela de 20 anos centrada em 2100).

Figura 38 - Variação da precipitação na sub-bacia Jaguari/Jacareí para os dois cenários futuros analisados.

Figura 39 - Variação da precipitação na sub-bacia Atibainha para os dois cenários futuros analisados.

O impacto das anomalias na alteração do total precipitado fica evidente, principalmente para os meses de janeiro, fevereiro, setembro e dezembro. Em janeiro e fevereiro, meses que aconteceram as maiores anomalias positivas, houve o deslocamento visível do total precipitado, tanto no cenário A1FIMI quanto no B2MES, em relação à precipitação observada. Em contraste, os meses de setembro e dezembro, sofreram as maiores diminuições na chuva mensal.

As Tabela 17 e Tabela 18 apresentam as precipitações médias anuais e o desvio padrão correspondentes ao período observado (1990 a 2010), e aos dois cenários futuros, (janela de 20 anos centrada em 2100), nas duas sub-bacias analisadas.

Na sub-bacia Jaguari/Jacareí, para o cenário A1FIMI a precipitação média anual foi acrescida em 2,64% com relação aos dados observados, indicando que o aumento das precipitações nos meses com alterações positivas, prevaleceu sobre a diminuição nos meses com alterações negativas. Ainda para o mesmo cenário, o desvio padrão aumentou em 2,75%, indicando um aumento, mesmo que pequeno, da variabilidade climática em um futuro com aquecimento global.

Esses dois índices foram alvo de menores variações no cenário B2MES, onde a precipitação média aumentou 0,97% e o desvio padrão elevou em 0,67%, se comparados com os verificados no cenário A1FIMI.

Por estarem inseridos no mesmo sítio de mudança climática proposto pelo MAGICC/SCENGEN, e sujeitos às mesmas alterações no regime de precipitação, os resultados da precipitação média anual e do desvio padrão na sub-bacia Atibainha, foram muito semelhantes aos encontrados para a sub-bacia Jaguari/Jacareí.

Tabela 17 – Precipitações anuais observadas e em dois cenários futuros para a sub-bacia Jaguari/Jacareí.

	Precipitação Anual (mm)					
	Observada		B2MES		A1FIMI	
	Total (mm)	Variação (%)	Total (mm)	Variação (%)	Total (mm)	Variação (%)
Média	1562,90	-	1578,10	+0,97	1604,30	+2,64
Desvio Padrão	186,70	-	188,00	+0,67	191,90	+2,75

Tabela 18 - Precipitações anuais observadas e em dois cenários futuros para a sub-bacia Atibainha.

	Precipitação Anual (mm)					
	Observada		B2MES		A1FIMI	
	Total (mm)	Variação (%)	Total (mm)	Variação (%)	Total (mm)	Variação (%)
Média	1631,28	-	1647,73	+1,01	1675,59	+2,72
Desvio Padrão	198,22	-	199,87	+0,83	204,64	+3,24

Da mesma forma que para a precipitação, o cenário A1FIMI mostrou maiores anomalias para as alterações de temperatura que o cenário B2MES, conforme indica a Figura 40 e a Tabela 19. A evolução temporal dos acréscimos de temperatura obteve comportamento semelhante nos dois cenários analisados, sendo constatado para todos os meses o incremento na temperatura. O mês de agosto registrou as maiores anomalias, chegando a variações de 5,6 °C para o cenário A1FIMI e 3,3 °C para o B2MES.

Figura 40 - Alterações geradas pelo MAGICC/SCENGEN nas temperaturas mensais para o ano de 2100.

Tabela 19 - Alterações na temperatura média mensal geradas pelo MAGICC/SCENGEN para o ano de 2100.

	Alterações na temperatura (°C)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
A1FIMI	4,12	3,70	3,91	3,70	4,25	4,66	4,89	5,64	5,24	4,98	4,14	4,43
B2MES	2,39	2,14	2,27	2,06	2,40	2,65	2,85	3,34	3,03	2,96	3,03	2,54

Esse incremento da temperatura média, nos cenários futuros de mudança climática, influenciou de forma direta na evapotranspiração, consequentemente houve aumento da evapotranspiração para todos os meses do ano, como pode ser visto na Figura 41 e na Figura 42. É de se destacar as maiores alterações de evapotranspirações nos meses de agosto, setembro e outubro, reflexo das elevadas variações de temperatura atingidas nesses meses.

Como as maiores anomalias de temperatura ocorreram no A1FIMI, foi também nesse cenário em que houve um maior desvio das séries de evapotranspiração futura, em relação à observada.

Figura 41 – Variação da evapotranspiração na sub-bacia Jaguarí/Jacaré para os dois cenários futuros analisados.

Figura 42 - Variação da evapotranspiração na sub-bacia Atibainha para os dois cenários futuros analisados.

Os valores encontrados para a evapotranspiração anual média e o desvio padrão correspondentes ao período observado (1990 a 2010), e aos dois cenários futuros analisados, são apresentados nas Tabela 20 e Tabela 21.

Nos dois cenários as estatísticas relativas à evapotranspiração aumentaram em relação aos dados observados. Os resultados da variação da evapotranspiração anual no cenário A1FIMI foram semelhantes aos encontrados por Helfer, Lemckert e Zhang (2012) em estudos realizados no Reservatório Wivenhoe, localizado no Rio Brisbane, sudeste da Austrália, que observaram aumentos de até 14% na evapotranspiração média anual.

Se comparada à precipitação, as variações nas estatísticas de evapotranspiração foram maiores, o que pode sinalizar uma maior sensibilidade dessa variável aos possíveis efeitos de futuras mudanças climáticas.

Tabela 20 - Evapotranspiraões anuais observadas e em dois cenários futuros para a sub-bacia Jaguari/Jacareí.

	Evapotranspiração Anual (mm)					
	Observada		B2MES		A1FIMI	
	Total (mm)	Variação (%)	Total (mm)	Variação (%)	Total (mm)	Variação (%)
Média	1143,40	-	1253,00	+9,59	1325,90	+15,96
Desvio Padrão	88,90	-	91,20	+2,61	96,80	+8,88

Tabela 21 - Evapotranspiraões anuais observadas e em dois cenários futuros para a sub-bacia Atibainha.

	Evapotranspiração Anual (mm)					
	Observada		B2MES		A1FIMI	
	Total (mm)	Variação (%)	Total (mm)	Variação (%)	Total (mm)	Variação (%)
Média	1136,34	-	1236,43	+8,81	1307,60	+15,07
Desvio Padrão	85,04	-	92,98	+9,34	98,65	+16,00

6.4. Análise das séries de vazão futura

Dentre as sub-bacias analisadas nesse estudo, aquelas que alcançaram os melhores resultados na calibração do modelo SMAP, foram a Jaguari/Jacareí e a Atibainha, dessa

forma, optou-se por realizar a simulação das vazões em futuros cenários de mudanças climáticas apenas para essas duas sub-bacias. As sub-bacias Cachoeira e Paiva Castro foram descartadas dessa análise, uma vez que, devido aos grandes desvios entre vazões observadas e simuladas, não seria possível uma comparação coerente com as vazões dos respectivos cenários futuros.

As anomalias climáticas obtidas através do MAGICC/SCENGEN foram incorporadas às séries observadas de precipitação e temperatura das sub-bacias Jaguari/Jacareí e Atibainha, correspondentes ao período de 1990 a 2010. Com isso, foram geradas séries futuras mensais de precipitação e temperatura para os dois cenários analisados, A1FIMI e B2MES. Após a conversão de séries de temperatura em séries de evapotranspiração, o modelo hidrológico, já calibrado, passou por uma nova etapa de simulação, dessa vez, sendo utilizadas como dados de entrada as séries alteradas (futuras) de precipitação e evapotranspiração. Como resultado, foram originadas quatro séries de vazões, duas séries de diferentes cenários futuros, para cada uma das duas bacias analisadas. Tais séries são as possíveis vazões futuras (janela de 20 anos centrada no ano de 2100).

A avaliação dos impactos de mudanças climáticas no regime hidrológico do Sistema Cantareira foi baseada na comparação entre as séries de vazões futuras, com uma série de vazões de referência. Ainda que a calibração das duas sub-bacias utilizadas nessa análise tenha sido satisfatória, há uma incerteza inerente a esse processo, por isso foi decidido adotar como vazão de referência as vazões simuladas provenientes da calibração, ao invés das vazões observadas. Essa escolha foi feita para que houvesse uma base de comparação compatível entre o cenário climático presente e os futuros, uma vez que as vazões simuladas foram superestimadas, conforme apresentado na Figura 33 e na Figura 34. Com isso, tentou-se minimizar a incorporação das incertezas e de erros intrínsecos da calibração, na análise dos impactos no regime hidrológico do Sistema Cantareira.

Foram calculadas e analisadas as vazões $Q_{90\%}$ e $Q_{95\%}$, a vazão média de longo termo (Q_{MLT}) e a vazão média mensal, para a série de vazões de referência e para as séries de vazão dos dois cenários futuros de mudança climática. Essas estatísticas foram então comparadas.

Os resultados para as estatísticas referentes à sub-bacia Jaguari/Jacareí estão apresentados na Figura 43, Figura 44, Figura 46 e na Tabela 22 e Tabela 23.

Figura 43 - Curva de permanência das vazões afluentes dos cenários A1FIMI e B2MES no reservatório Jaguari/Jacareí.

A análise visual da curva de permanência das vazões da sub-bacia Jaguari/Jacareí evidencia a diminuição na vazão para os dois cenários analisados, com o A1FIMI apresentando maiores reduções que o B2MES. Esse fato era esperado, uma vez que as maiores anomalias climáticas ocorreram no cenário A1FIMI. Ainda que a precipitação média anual tenha se elevado, o aumento ainda maior nas taxas de evapotranspiração foi responsável direto por essa queda nas vazões. Na Tabela 22 são exibidas as porcentagens relativas de diminuição das vazões $Q_{90\%}$, $Q_{95\%}$ e Q_{MLT} para a sub-bacia Jaguari/Jacareí.

Tabela 22 – Valores de $Q_{90\%}$, $Q_{95\%}$ e Q_{MLT} para os diferentes cenários analisados na sub-bacia Jaguari/Jacareí.

	$Q_{90\%}$		$Q_{95\%}$		Q_{MLT}	
	Vazão (m ³ /s)	Variação (%)	Vazão (m ³ /s)	Variação (%)	Vazão (m ³ /s)	Variação (%)
Referência	11,92	-	9,81	-	25,42	-
B2MES	10,80	-9,43	9,08	-7,40	23,58	-7,27
A1FIMI	10,14	-14,91	8,19	-16,47	22,82	-10,24

Todas as vazões de referência analisadas sofreram reduções nos cenários futuros de mudança climática. Quando comparadas dentro de um mesmo cenário, as vazões diminuíram em porcentagens similares, porém, quando a comparação é feita entre os cenários A1FIMI e B2MES as diferenças são nítidas. Para a $Q_{95\%}$, enquanto no cenário B2MES as reduções foram de 7,40%, o cenário de alta emissão de gases de efeito estufa, A1FIMI, chegou a reduções de 16,47%.

A Figura 44 e a Figura 45 apresentam as vazões médias mensais do cenário de referência e dos cenários futuros e a Tabela 23 traz as variações percentuais entre a vazão média mensal de referência e os cenários futuros. Os maiores déficits na vazão ocorreram no período compreendido entre os meses de agosto a janeiro, com variações negativas de até 34,62% para o mês de dezembro no cenário A1FIMI. Isso provavelmente se deve ao fato das anomalias climáticas negativas mais intensas terem ocorrido nos meses de agosto, setembro e dezembro, o que ocasionou um déficit no balanço hídrico propagado até o mês de janeiro.

Em contrapartida, no período entre fevereiro e julho, as estimativas de acréscimos no regime pluviométrico fizeram com que as diferenças entre as vazões de referência e a dos cenários futuros fossem pequenas. Para esse período, apesar do aumento da evapotranspiração, em alguns meses as vazões futuras chegaram a ser maiores que as de referência.

Embora o quadro geral dessa pesquisa aponte um decréscimo nas vazões em cenários futuros de alterações climáticas, o panorama dos estudos de impactos do aquecimento global no ciclo hidrológico é divergente (ARNELL; GOSLING, 2013; NÓBREGA et al., 2011; THOMPSON; GREEN; KINGSTON, 2014). Nóbrega et al. (2011) analisando os impactos de futuras mudanças climáticas no regime de vazões na bacia do Rio Grande, localizada entre os estados de São Paulo e Minas Gerais, observou incremento de até 9% na vazão anual.

Resultados similares foram observados por Mello et al. (2008) na bacia do Rio Paracatu – MG, em que houve tendência de aumento significativo nos valores das vazões mínimas de referência ($Q_{7,10}$). Por outro lado, Valério e Fragoso (2015) obtiveram reduções de até 80% na $Q_{90\%}$ para a bacia do Rio Paraguaçu, na Bahia, em um futuro centrado no ano de 2070. Todos esses resultados comprovam a heterogeneidade no que se refere aos impactos das mudanças climáticas e o caráter duvidoso de um futuro baseado em cenários com alta emissão de gases de efeito estufa.

Figura 44- Variação da vazão média mensal afluente no reservatório Jaguari/Jacareí para o cenário A1FIMI.

Figura 45 - Variação da vazão média mensal afluente no reservatório Jaguari/Jacareí para o cenário B2MES.

Tabela 23 – Variação percentual da vazão média afluente mensal no reservatório Jaguari/Jacareí para os dois cenários futuros analisados em comparação à vazão média mensal de referência.

	Variação da vazão mensal (%)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
A1FIMI	-13,67	0,70	-0,52	-5,63	1,90	-5,45	3,26	-10,30	-30,86	-20,68	-17,53	-34,62
B2MES	-9,06	-1,13	-2,18	-3,88	-0,70	-3,64	1,33	-6,73	-19,86	-12,96	-10,79	-22,43

O quadro comparativo das vazões de referência, do cenário A1FIMI e do cenário B2MES é apresentado na Figura 46. De uma forma geral, as vazões médias mensais no cenário A1FIMI foram menores que as do cenário B2MES. Muito embora, para os meses de fevereiro, março e maio as vazões do B2MES chegaram a valores superiores ao do A1FIMI. Isso pode ser explicado pelas variações positivas na precipitação, maiores para o cenário A1FIMI, principalmente nos meses de janeiro, fevereiro e maio.

Figura 46 - Variação da vazão média mensal afluyente ao reservatório Jaguarí/Jacaré observada e nos cenários A1FIMI e B2MES.

Os resultados de vazões $Q_{90\%}$ e $Q_{95\%}$, vazão média de longo termo (Q_{MLT}) e vazão média mensal, referentes à sub-bacia Atibainha são apresentados na Figura 47, Figura 48, Figura 49, e na Tabela 24.

Figura 47- Curva de permanência das vazões afluentes dos cenários A1FIMI e B2MES no reservatório Atibainha.

Como o Sistema Cantareira está inserido por completo em apenas uma célula de alteração climática proposta pelo MAGICC/SCENGEN, as anomalias nos regimes de precipitação e temperatura foram iguais para todas as bacias contribuintes. Dessa forma, as alterações futuras no regime hidrológico da sub-bacia Atibainha, foram muito similares aos obtidos para a sub-bacia Jaguari/Jacareí.

Assim como para a Jaguari/Jacareí, através da análise da curva de permanência na sub-bacia Atibainha, fica evidente a redução das vazões nos cenários futuros A1FIMI e B2MES. A Tabela 24 traz os resultados de variação da $Q_{90\%}$, $Q_{95\%}$ e Q_{MLT} nos cenários estudados, enquanto a Tabela 25 apresenta as variações percentuais na vazão média mensal entre o cenário de referência e os dois cenários futuros propostos.

Tabela 24 - Valores de $Q_{90\%}$, $Q_{95\%}$ e Q_{MLT} para os diferentes cenários analisados na sub-bacia Atibainha.

	$Q_{90\%}$		$Q_{95\%}$		Q_{MLT}	
	Vazão (m ³ /s)	Variação (%)	Vazão (m ³ /s)	Variação (%)	Vazão (m ³ /s)	Variação (%)
Referência	3,40	-	2,92	-	6,26	-
B2MES	3,05	-10,42%	2,66	-8,78%	5,83	-6,84%
A1FIMI	2,95	-13,46%	2,52	-13,51%	5,61	-10,46%

Quanto aos valores de vazão média mensal, é possível observar algumas divergências entre as duas sub-bacias analisadas. Para a Atibainha, as vazões nos cenários A1FIMI e no B2MES obtiveram valores inferiores que as do cenário de referência em todos os meses, diferentemente da sub-bacia Jaguari/Jacareí, que para alguns meses, as vazões dos cenários futuros foram superiores às vazões de referência.

Figura 48 - Variação da vazão média afluyente mensal no cenário A1FIMI no reservatório Atibainha.

Figura 49 - Variação da vazão média afluente mensal no cenário B2MES no reservatório Atibainha.

Tabela 25 - Variação percentual da vazão média afluente mensal no reservatório Atibainha para os dois cenários futuros analisados em comparação à vazão média mensal de referência.

	Variação da vazão mensal (%)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
A1FIMI	-8,23	-2,05	-4,41	-9,14	-3,97	-15,96	-5,70	-11,21	-22,81	-11,31	-10,22	-28,26
B2MES	-4,19	-1,46	-3,75	-6,70	-5,38	-12,00	-5,45	-7,71	-14,08	-5,89	-4,83	-16,68

Figura 50 - Variação da vazão média mensal afluyente ao reservatório Atibainha observada e nos cenários A1FIMI e B2MES.

Outro aspecto notado, ao se comparar os quadros de vazões médias mensais em ambas as bacias (Figura 44, Figura 45, Figura 48 e Figura 49), é a variação percentual mais homogênea para a sub-bacia Atibainha. Na sub-bacia Jaguari/Jacareí, mesmo com o aumento das evapotranspirações mensais nos dois cenários de mudanças climáticas, as vazões no período entre janeiro e maio mantiveram-se muito próximas às vazões de referência. Esse comportamento pode indicar uma maior assimilação da sub-bacia Jaguari/Jacareí a alteração positiva do regime de chuvas ocorrida no mesmo período, uma vez que mesmo com o aumento da evapotranspiração, a vazão manteve-se praticamente constante. Já para a sub-bacia Atibainha, mesmo com a elevação do total precipitado nos meses de janeiro a maio, houve uma tendência de diminuição das vazões médias no referido período, indicando uma resposta ao aumento da evapotranspiração, porém, não à elevação do regime de chuvas.

Essa maior sensibilidade da sub-bacia Jaguari/Jacareí às anomalias climáticas também pode ser percebida no período de setembro a dezembro. As reduções no total precipitado, associadas a uma elevação mais intensa na evapotranspiração, nesse período, ocasionou a queda da vazão para os cenários futuros. Entretanto, essa redução da vazão foi mais acentuada na sub-bacia Jaguari/Jacareí que na sub-bacia Atibainha, como pode ser observado nos gráficos da Figura 51 e Figura 52.

Figura 51 – Variação percentual entre as vazões mensais do cenário de referência e o cenário A1FIMI.

Figura 52 - Variação percentual entre as vazões mensais do cenário de referência e o cenário B2MES.

Outra possível consequência dessa maior sensibilidade às alterações do regime pluviométrico, por parte da sub-bacia Jaguarí/Jacaré, é notada ao se comparar a Tabela 22 com a Tabela 24. A redução da $Q_{95\%}$ no cenário A1FIMI foi de 16,47% na Jaguarí/Jacaré, enquanto que na Atibainha foi de 13,51%. Essa diferença, mesmo que pequena, pode ser

resultado da maior assimilação dos efeitos de anomalias climáticas na sub-bacia Jaguari/Jacareí, principalmente sobre as vazões mínimas.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O principal objetivo da metodologia aplicada nesse trabalho foi avaliar o impacto de futuras mudanças climáticas no regime hidrológico do Sistema Cantareira. O modelo chuva-vazão utilizado para simular as sub-bacias constituintes do sistema foi o SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*), que teve seus parâmetros calibrados a partir de algoritmos genéticos.

A princípio a análise das mudanças no regime hidrológico seria realizada nas quatro sub-bacias contribuinte ao Cantareira, entretanto, o processo de calibração foi considerado satisfatório apenas para as sub-bacias Jaguari/Jacareí e Atibainha, e somente essas passaram pela etapa de simulação das alterações no clima. Por ser um modelo do tipo concentrado, o SMAP não é capaz de representar a variabilidade espacial existente dentro da bacia, adotando um valor único para os parâmetros responsáveis por simular os processos hidrológicos. Esse pode ter sido um aspecto fundamental para a dificuldade do modelo em representar adequadamente todas as bacias contribuintes. Além disso, outro ponto a se destacar sobre o desempenho não satisfatório das calibrações para as sub-bacias Cachoeira e Paiva Castro é a respeito de suas escalas. Em bacias hidrográficas menores, os fenômenos hidrológicos possuem processos mais dinâmicos e com uma menor amortização que em grandes bacias, o que dificulta a padronização de respostas coerentes do modelo hidrológico, portanto, o tamanho relativamente pequeno das sub-bacias Cachoeira e Paiva Castro pode ter sido outro obstáculo no ajuste de suas vazões simuladas.

As anomalias climáticas previstas para o ano de 2100 na região estudada indicam um aumento de temperatura em todos os meses. Já para as alterações no regime de chuvas, os resultados são variáveis, com alguns meses sofrendo reduções no total precipitado, enquanto em outros foi verificado um acréscimo na precipitação. As alterações climáticas mais intensas, tanto positivas quanto negativas, foram encontradas para o cenário de alta emissão de gases de efeito estufa, o A1FIMI. No cenário B2MES, com condições ambientais mais favoráveis, as alterações foram mais brandas.

Da mesma forma que para as modificações na temperatura e nas precipitações, as mudanças no regime de vazão para o cenário A1FIMI foram mais acentuadas que no B2MES. Embora nos dois cenários tenha-se constatado reduções na $Q_{90\%}$, $Q_{95\%}$ e na Q_{MLT} , os impactos no A1FIMI foram mais intensos. Outro aspecto notado nas respostas do regime de vazão às alterações climáticas foi uma maior sensibilidade da sub-bacia Jaguari/Jacareí às mudanças no regime de precipitação. Ao passo que a sub-bacia Atibainha obteve modificações mais tênues

em suas vazões mensais, a sub-bacia Jaguari/Jacareí apresentou alterações mais intensas, em concordância com as anomalias na precipitação.

Esse decréscimo acentuado das vazões, principalmente nos meses do período chuvoso (outubro, novembro e dezembro) é preocupante, uma vez que é a vazão afluyente nesse período a responsável por elevar o nível de água nos reservatórios e mantê-lo em níveis seguros para o período de estiagem. A previsão desses impactos no ciclo hidrológico é ainda mais preocupante em decorrência do local atingido, a região do Sistema Cantareira.

Nos últimos anos, o maior sistema produtor de água da Região Metropolitana de São Paulo, tem passado por uma diminuição da disponibilidade hídrica, obrigando os gestores do sistema a adotarem medidas como captação de água do volume morto, redução da pressão na rede e fontes alternativas de abastecimento. A redução na oferta de água devido a possíveis mudanças climáticas, associada a um aumento contínuo da demanda, pode tornar as crises hídricas uma constante na cidade de São Paulo, caso não sejam tomadas medidas a partir de uma gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos.

Algumas ressalvas devem ser feitas em consideração à metodologia aplicada. A aplicação do modelo hidrológico SMAP, apesar de ter conseguido simular de forma satisfatória as duas bacias analisadas, contém algumas limitações e incertezas associadas à calibração de seus parâmetros. Consequentemente, tais incertezas são propagadas na simulação das vazões futuras. Contudo, a unanimidade na redução das vazões para as duas sub-bacias analisadas, reforça a tendência de diminuição da disponibilidade hídrica em um futuro com mudanças climáticas.

Outro ponto a ser considerado é a confiabilidade nos modelos climáticos em representar o clima futuro. Mesmo que tenha sido selecionado um conjunto de GCMs, visando uma diminuição das distorções inerentes aos modelos climáticos, a projeção das anomalias ainda contém incertezas. Dessa forma, as estimativas de mudanças no regime de precipitação e temperatura são tendências esperadas no decorrer do século e não certas absolutas quanto ao clima futuro.

Diante as considerações apresentadas, são apresentadas algumas recomendações para futuras pesquisas:

- A modelagem das bacias contribuintes ao Sistema Cantareira a partir de outros modelos hidrológicos de maior complexidade, com capacidade de representar a variabilidade espacial das áreas em estudo. Há a necessidade de mais pesquisas e entendimento da dinâmica dos processos hidrológicos para a área em questão,

principalmente por se tratar de um aproveitamento hídrico estratégico para duas das principais regiões econômicas do estado de São Paulo.

- Utilização de outros modelos climáticos para as previsões de alterações futuras no clima. Como uma das fontes de incerteza dessa pesquisa é a quantificação de anomalias nas precipitações e temperatura, faz-se importante o uso de diferentes modelos climáticos para efeito de comparação com as pesquisas já existentes.
- Como aparentemente a sensibilidade da sub-bacia Jaguari/Jacareí às anomalias climáticas foi maior que na sub-bacia Atibainha, recomenda-se a realização de estudos de sensibilidade das respostas de vazão do modelo SMAP quanto à variabilidade dos dados de entrada e a correlação com os parâmetros físicos do modelo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAM, K. N. Análise dos Impactos de Mudanças Climáticas nos Regimes de Precipitação e Vazão na Bacia do Rio Ibicui. 2011. 147 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisa Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ALLEN, R. G. A Penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 112, n. 4, p. 348–368, 1986.

ALVES, L. M.; MARENGO, J. Assessment of regional seasonal predictability using the PRECIS regional climate modeling system over South America. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 100, n. 3, p. 337–350, 2010.

ANA. Agência Nacional de Águas, site, 2016. Disponível em: <http://www2.ana.gov.br/Paginas/default.aspx> Acesso em: 28/01/2016

ANA/DAEE. Agência Nacional de Águas e Departamento de Águas e Energia Elétrica. Dispõe sobre as condições de operação dos reservatórios Jaguari-Jacareí, Cachoeira e Atibainha, localizados na Bacia do Rio Piracicaba, pertencentes ao Sistema Cantareira. Resolução Conjunta ANA/DAEE Nº 428, de 04 de agosto de 2004.

ANA/DAEE. Agência Nacional de Águas e Departamento de Águas e Energia Elétrica. Dados de referência acerca da outorga do Sistema Cantareira. v 1.0, 2013.

ANA/DAEE. Agência Nacional de Águas e Departamento de Águas e Energia Elétrica. Dispõe sobre a prorrogação do prazo de vigência da outorga de direito de uso de recursos hídricos do Sistema Cantareira para a SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Resolução Conjunta ANA/DAEE Nº 910, de 07 de julho de 2014.

ANA/DAEE. Agência Nacional de Águas e Departamento de Águas e Energia Elétrica. Resolução Conjunta ANA/DAEE Nº 1200, de 22 de outubro de 2015.

ARNAUD, P. et al. Sensitivity of hydrological models to uncertainty in rainfall input. **Hydrological Sciences Journal**, v. 56, n. 3, p. 397–410, 2011.

ARNBJERG-NIELSEN, K. Quantification of climate change effects on extreme precipitation used for high resolution hydrologic design. **Urban Water Journal**, v. 9, n. 2, p. 57–65, 2012.

ARNELL, N. W.; GOSLING, S. N. The impacts of climate change on river flow regimes at the global scale. **Journal of Hydrology**, v. 486, p. 351–364, 2013.

BERNARDO, P. M.; NOSSACK, F. A. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE**. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...** João Pessoa - PB: 2015

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: Hidrologia, Ciência e Aplicação. Edited by: Tucci, C. E. M. 4ª Ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2009.

BEVEN, K. Facets of uncertainty: epistemic uncertainty, non-stationarity, likelihood, hypothesis testing, and communication. **Hydrological Sciences Journal**, v. 6667, n. April, p. 150527103244004, 2015.

BLOCK, P. J. et al. A streamflow forecasting framework using multiple climate and hydrological models. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 45, n. 4, p. 828–843, 2009.

BOYER, C. et al. Impact of climate change on the hydrology of St. Lawrence tributaries. **Journal of Hydrology**, v. 384, n. 1-2, p. 65–83, 2010.

BRANDÃO, J. L. B. Modelos para operação de sistemas reservatórios com usos múltiplos. 2004. 160 p. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

BREKKE, L. D. et al. Assessing reservoir operations risk under climate change. **Water Resources Research**, v. 45, n. 4, p. 1–16, 2009.

BUONOMO, E. et al. On the robustness of changes in extreme precipitation over Europe from two high resolution climate change simulations. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 133, n. Fevereiro, p. 65–81, 2007.

CHAPMAN, S. J. Programação em MATLAB para Engenheiros. 2ª Ed. São Paulo: CENGAGE Learning, 2011

CHARIZOPOULOS, N.; PSILOVIKOS, A. Hydrologic processes simulation using the conceptual model Zygos: the example of Xynias drained Lake catchment (central Greece). **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 9, p. 777, 2016.

CHRISTENSEN, N. S. et al. The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado River basin. **Climatic Change**, v. 62, n. 1-3, p. 337–363, 2004.

COLLISCHONN, W. Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. 2001. 270 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisa Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico Walter. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 3, p. 27–39, 2003.

DAEE. Departamento de Águas e Energia Elétrica. Outorga do SISTEMA CANTAREIRA. Portaria DAEE Nº 1213, de 06 de agosto de 2004.

DAEE. Departamento de Águas e Energia Elétrica. 2013 a. COBRAPE – Cia. Brasileira de Projetos e Empreendimentos. Plano Diretor de Aproveitamento de Recursos Hídricos para a Macrometrópole Paulista, no Estado de São Paulo – Relatório Final Volume II.

DAEE. Departamento de Águas e Energia Elétrica. 2013 b. COBRAPE – Cia. Brasileira de Projetos e Empreendimentos. Plano Diretor de Aproveitamento de Recursos Hídricos para a Macrometrópole Paulista, no Estado de São Paulo – Relatório Final Volume I.

DIBIKE, Y. B.; COULIBALY, P. Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: Comparison of downscaling methods and hydrologic models. **Journal of Hydrology**, v. 307, n. 1-4, p. 145–163, 2005.

DINIZ, L. S. Regionalização de Parâmetros de Modelo Chuva-Vazão Usando Redes Neurais. 2008. 213 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisa Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

EDEN, J. M. et al. Skill, correction, and downscaling of GCM-simulated precipitation. **Journal of Climate**, v. 25, n. 11, p. 3970–3984, 2012.

FADIGA, F. M. et al. Modelos de previsão de vazões para a bacia incremental à UHE Itaipu. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 2, p. 65–75, 2008.

FARJAD, B.; GUPTA, A.; MARCEAU, D. J. Annual and Seasonal Variations of Hydrological Processes Under Climate Change Scenarios in Two Sub-Catchments of a Complex Watershed. **Water Resources Management**, v. 30, n. 8, p. 2851–2865, 2016.

FOWLER, H. J.; BLENKINSOP, S.; TEBALDI, C. Linkin climate change modelling to impact studies: recent advances ins downscaling techniques for hydrological modelling. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. December 2007, p. 1547–1578., 2007.

FREIRE, C. C.; OMENA, S. P. F. Princípios de Hidrologia Ambiental. Ministério da Ciência e Tecnologia, 2005.

GOLDBERG, D. E. Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning. Alabama: Addison Wesley, 413 p., 1989.

GIORGI, F.; MEARNS, L. O. Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the “Reliability Ensemble Averaging” (REA) method. **Journal of Climate**, v. 15, n. 10, p. 1141–1158, 2002.

GREEN, C. H.; VAN GRIENSVEN, A. Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds. **Environmental Modelling and Software**, v. 23, n. 4, p. 422–434, 2008.

GROPPO, J. D. et al. Estudo de Tendência de Parâmetros de Qualidade de Água na Bacia do Rio Piracicaba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 3, p. 79–87, 2006.

GROPPO, J. D. et al. Análise do Efeito da Operação das Barragens do Sistema Cantareira no Regime Hidrológico do Rio Piracicaba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 1, p. 41–51, 2009.

GUO, J. et al. Multi-objective optimization of empirical hydrological model for streamflow prediction. **Journal of Hydrology**, v. 511, p. 242–253, 2014.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 4, n. 2, p. 135–143, 1999.

HAGUMA, D. et al. Optimal Hydropower Generation Under Climate Change Conditions for a Northern Water Resources System. **Water Resources Management**, v. 28, n. 13, p. 4631–4644, 2014.

HARVEY, D. et al. An Introduction to Simple Climate Models used in the IPCC Second Assessment Report. IPCC Technical Paper II. 1997

HELPER, F.; LEMCKERT, C.; ZHANG, H. Impacts of climate change on temperature and evaporation from a large reservoir in Australia. **Journal of Hydrology**, v. 475, p. 365–378, 2012.

HOGUE, T. S.; GUPTA, H.; SOROOSHIAN, S. A “User-Friendly” approach to parameter estimation in hydrologic models. **Journal of Hydrology**, v. 320, n. 1-2, p. 202–217, 2006.

HULME, M. et al. Using a Climate Scenario Generator for Vulnerability & Adaptation Assessments: Magicc and Scengen Version 2 . 4 Workbook. 2000.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, site, 2016. Disponível em: http://atlasescolar.ibge.gov.br/images/atlas/mapas_brasil/brasil_clima.pdf Acesso em: 28/02/2016

IPCC. Climate Change 2000: Summary for Policymakers - Special Report Emission Scenarios. A Special Report of IPCC Working Group III. **Intergovernmental Panel on Climate Change**, p. 27, 2000.

IPCC. Climate Change 2007: The Scientific Basis-Contribution of Working Group 1 to the IPCC Fourth Assessment Report. Cambridge University Press. **Intergovernmental Panel on Climate Change**, 2007.

IPCC. Climate Change, Disaster Risk, and the Urban Poor. **Intergovernmental Panel on Climate Change**, p. 594, abr. 2012.

IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Intergovernmental Panel on Climate Change**, p. 33, 2013.

JAJARMIZADEH, M. et al. Prediction of Surface Flow by Forcing of Climate Forecast System Reanalysis Data. **Water Resources Management**, v. 30, n. 8, p. 2627–2640, 2016.

KARL, T. R.; KNIGHT, R. W.; PLUMMER, N. Trends in high-frequency climate variability in the twentieth century. **Nature**, v. 377, n. 6546, p. 217–220, 21 set. 1995.

KWON, H. H. et al. Uncertainty assessment of hydrologic and climate forecast models in Northeastern Brazil. **Hydrological Processes**, v. 26, n. 25, p. 3875–3885, 2012.

LEGATES, D. R.; MCCABE, G. J. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resour. Res.**, v. 35, n. 1, p. 233–241, 1999.

LOFGREN, B. M. et al. Methodological approaches to projecting the hydrologic impacts of climate change. **Earth Interactions**, v. 17, n. 22, 2013.

LOOPER, J. P.; VIEUX, B. E.; MORENO, M. A. Assessing the impacts of precipitation bias on distributed hydrologic model calibration and prediction accuracy. **Journal of Hydrology**, v. 418-419, p. 110–122, 2012.

LOPES, J. E. G.; BRAGA JÚNIOR, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. Simulação hidrológica: aplicação de um modelo simplificado. In: Anais do III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, v.2, 42-62, Fortaleza, 1981.

LOPES, J. E. G. Manual Modelo SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure). 1999.

MARAUN, D. et al. Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. **Reviews of Geophysics**, v. 48, n. 2009RG000314, p. 1–38, 2010.

MARENGO, J. A. Mudanças Climáticas Globais e seus Efeitos sobre a Biodiversidade. Caracterização do Clima Atual e Definição das Alterações Climáticas para o Território Brasileiro ao Longo do Século XXI. Ministério do Meio Ambiente - MMA, Secretaria de Biodiversidade e Florestas, 2006.

MARENGO, J. A. Água e Mudanças Climáticas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 83–96, 2008.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; CHOU, S. C. . Riscos das Mudanças Climáticas no Brasil - Análise Conjunta Brasil-Reino Unido sobre os Impactos das Mudanças Climáticas e do Desmatamento na Amazônia. p. 56, 2011.

MEEHL, G. A. et al. The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climatic change research. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 88, n. 9, p. 1383–1394, 2007.

MEINSHAUSEN, M.; RAPER, S. C. B.; WIGLEY, T. M. L. Emulating coupled atmosphere-

ocean and carbon cycle models with a simpler model, MAGICC6 - Part 1: Model description and calibration. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 11, n. 4, p. 1417–1456, 2011.

MELLO, E. L. et al. Effect of the climate change on the water availability in the Paracatu river basin. **Eng. Agríc. Jaboticabal**, v. 28, n. 4, p. 635–644, 2008.

MENDES, D.; MARENGO, J. A. Temporal downscaling: A comparison between artificial neural network and autocorrelation techniques over the Amazon Basin in present and future climate change scenarios. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 100, n. 3, p. 413–421, 2010.

MENDOZA, P. A. et al. Effects of Hydrologic Model Choice and Calibration on the Portrayal of Climate Change Impacts. **Journal of Hydrometeorology**, v. 16, n. 2, p. 762–780, abr. 2015.

MORAES, J. M. et al. Trends in hydrological parameters of a southern Brazilian watershed and its relation to human induced changes. **Water Resources Management**, v. 12, n. 4, p. 295–311, 1998.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

MOTOVILOV, Y. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 98-99, p. 257–277, 1999.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I-a Discussion of Principles*. **Journal of Hydrology**, v. 10, p. 282–290, 1970.

NCEP/CSFR. National Centers for Environmental Prediction/Climate Forecast System Reanalysis, site, 2016. Disponível em: <http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.1/>

NETO, J. O. M. et al. Simulação hidrológica escalar com o modelo SWAT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 2003, p. 177–188, 2014.

NICOTINA, L. et al. On the impact of rainfall patterns on the hydrologic response. **Water Resources Research**, v. 44, n. 12, p. 1–14, 2008.

NÓBREGA, M. T. et al. Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 2, p. 585–595, 2011.

OLIVEIRA, G. G. DE; PEDROLLO, O. C.; CASTRO, N. M. D. R. O Desempenho das Redes Neurais Artificiais (RNAs) para Simulação Hidrológica Mensal. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 2, p. 251–265, 2014.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; SCHETTINI, E. B. C. Climate Change Impacts on River Quaraí Flow. In: *Modelling the Impact of Climate Change and Water Resources*. Edited by: Fung, C. F., Lopez, A., and New, M. John Wiley&Sons, 2010. 209 pp.

PIERCE, D. W.; CAYAN, D. R.; THRASHER, B. L. Statistical Downscaling Using Localized Constructed Analogs (LOCA)*. **Journal of Hydrometeorology**, v. 15, p. 2558–2585, 2014.

PORTO, R. L.; PORTO, M. F. A.; PALERMO, M. A ressurreição do volume morto do sistema Cantareira na Quaresma. **Revista DAE**, v. 62, n. 197, p. 18–25, 2014.

QIAO, L. et al. Climate Change and Hydrological Response in the Trans-State Oologah Lake Watershed-Evaluating Dynamically Downscaled NARCCAP and Statistically Downscaled CMIP3 Simulations with VIC Model. **Water Resources Management**, v. 28, n. 10, p. 3291–3305, 2014.

RAJE, D.; MUJUMDAR, P. P. Reservoir performance under uncertainty in hydrologic impacts of climate change. **Advances in Water Resources**, v. 33, n. 3, p. 312–326, 2010.

RASMUSSEN, R. et al. Climate Change Impacts on the Water Balance of the Colorado Headwaters: High-Resolution Regional Climate Model Simulations. **Journal of Hydrometeorology**, v. 15, n. 3, p. 1091–1116, jun. 2014.

SABESP – Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo. Plano de Bacias Hidrográficas 2004-2007 dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí – Relatório Final: Diagnósticos e Prognósticos. SHS – Consultoria e Projetos de Engenharia, 2007

SAHA, S. et al. The NCEP climate forecast system reanalysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 91, n. 8, p. 1015–1057, 2010.

SANTER, B. D. et al. Developing Climate Scenarios from Equilibrium GCM Results. **Max Planck Institute for Meteorologie**, 1990.

SANTHI, C. et al. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. **Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)**, v. 37, n. 5, p. 1169–1188, 2002.

SÃO PAULO – Governo do Estado de São Paulo. Por Dentro da Região Metropolitana de São Paulo – RMSP. Emplasa, 2011

SARAIVA, I. S. Regionalização de Parâmetros de Modelos De Simulação Hidrológica para Emprego em Bacias Hidrográficas sem Monitoramento Fluviométrico. 2010. 139 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2010.

SARHADI, A. et al. Water resources climate change projections using supervised nonlinear

and multivariate soft computing techniques. **Journal of Hydrology**, v. 536, p. 119–132, 2016.

SCHARDONG, A.; SIMONOVIC, S. P. **Avanços em Algoritmos Genéticos Evolucionários para Otimização Multiobjetivo**. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...**Bento Gonçalves - RS: 2013

SCHLOSSER, C. A. et al. Quantifying the likelihood of regional climate change: A hybridized approach. **Journal of Climate**, v. 26, n. 10, p. 3394–3414, 2013.

SHINMA, T. A. Avaliação de Incertezas na Calibração Automática do Modelo SWMM. 2015. 212 p. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica.. In: Hidrologia, Ciência e Aplicação. Edited by: Tucci, C. E. M. 4ª Ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2009.

SILVEIRA, S. et al. Análise das projeções de vazões nas bacias do setor elétrico brasileiro usando dados do IPCC-AR4 para o século XXI. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, p. 59–71, 2014.

SIVAPALAN, M. et al. IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. **Hydrological Sciences Journal**, v. 48, n. 6, p. 857–880, 2003.

STONE, D. A. S.; KNUTTI R.. Wheater and Climate. In: Modelling the Impact of Climate Change and Water Resources. Edited by: Fung, C. F., Lopez, A., and New, M. John Willey&Sons, 2010. 209 pp.

THOMPSON, J. R.; GREEN, A. J.; KINGSTON, D. G. Potential evapotranspiration-related uncertainty in climate change impacts on river flow: An assessment for the Mekong River basin. **Journal of Hydrology**, v. 510, p. 259–279, 2014.

TIMBAL, B.; HOPE, P.; CHARLES, S. Evaluating the consistency between statistically downscaled and global dynamical model climate change projections. **Journal of Climate**, v. 21, n. 22, p. 6052–6059, 2008.

TOUHAMI, I. et al. Assessment of climate change impacts on soil water balance and aquifer recharge in a semiarid region in south east Spain. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 619–629, 2015.

TSONIS, A. A. Widespread increases in low-frequency variability of precipitation over the past century. **Nature**, v. 382, n. 6593, p. 700–702, 22 ago. 1996.

TSONIS, A. A. Is Global Warming Injecting Randomness Into the Climate System ? **EOS Trans Am Geophys Union**, v. 85, n. 38, p. 361–364, 2004.

TUCCI, C. E. M.. Modelos Hidrológicos. 2ª Ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2005.

VALÉRIO, E. L. S.; FRAGOSO, C. R. Avaliação dos efeitos de mudanças climáticas no regime hidrológico da bacia do rio Paraguaçu , BA. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 872–887, 2015.

WAGENER, T.; GUPTA, H. V. Model identification for hydrological forecasting under uncertainty. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 19, n. 6, p. 378–387, 2005.

WANG, X. Advances in separating effects of climate variability and human activity on stream discharge: An overview. **Advances in Water Resources**, v. 71, p. 209–218, 2014.

WATTS, G. Climate Change and Water Availability. In: Modelling the Impact of Climate Change and Water Resources. Edited by: Fung, C. F., Lopez, A., and New, M. John Wiley&Sons, 2010. 209 pp.

WERTH, D.; CHEN, K.-F. The Application of a Statistical Downscaling Process to Derive 21st Century River Flow Predictions Using a Global Climate Simulation. **Water Resources Management**, v. 29, p. 849–861, 2014.

WHATLEY, M.; CUNHA, P. Diagnóstico Socioambiental Participativo do Sistema Cantareira. São Paulo: ISA, 2007

WHITE, K. L.; CHAUBEY, I. Sensitivity Analysis, Calibration, and Validations for a Multisite and Multivariable Swat Model1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 41, n. 5, p. 1077–1089, 2005.

WIGLEY, T. M. L. MAGICC / SCENGEN 5 . 3 : USER MANUAL (version 2). n. version 2, 2008.

WILBY, R. L. Evaluating climate model outputs for hydrological applications. **Hydrological Sciences Journal**, v. 55, n. 7, p. 1090–1093, 2010.

WILBY, R. L., FOWLER, H. J. Regional Climate Downscaling. In: Modelling the Impact of Climate Change and Water Resources. Edited by: Fung, C. F., Lopez, A., and New, M. John Wiley&Sons, 2010. 209 pp.

WOODWARD, G. et al. The effects of climatic fluctuations and extreme events on running water ecosystems. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 371, n. 1694, p. 20150274, 19 maio 2016.

XU, C. Y.; SINGH, V. P. Review on regional water resources assessment models under stationary and changing climate. **Water Resources Management**, v. 18, n. 6, p. 591–612, 2004.

YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Multi-objective global optimization for

hydrologic models. **Journal of Hydrology**, v. 204, n. 1-4, p. 83–97, 1998.

ZHOU, Z.-Q.; XIE, S.-P. Effects of climatological model biases on the projection of tropical climate change. **Journal of Climate**, p. 151019113427001, 2015.

APÊNDICES

APÊNDICE A – DIVISÃO DAS BACIAS CONTRIBUINTE AO SISTEMA CANTAREIRA PELO MÉTODO DOS POLÍGONOS DE THIESSEN – ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS.

Figura 53 – Áreas de influência de cada estação pluviométrica nas sub-bacias do Sistema Cantareira.

APÊNDICE B – DIVISÃO DAS BACIAS CONTRIBUINTES AO SISTEMA CANTAREIRA PELO MÉTODO DOS POLÍGONOS DE THIESSEN – ESTAÇÕES CLIMATOLÓGICAS.

Figura 54 - Áreas de influência de cada estação climatológica nas sub-bacias do Sistema Cantareira.

APÊNDICE C – HIDROGRAMAS DE AFLUÊNCIA MENSAL OBSERVADA E SIMULADA PARA O PERÍODO DE VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO.

Figura 55 – Hidrogramas de afluência mensal observada e simulada do reservatório Jaguari/Jacaré no período de validação do modelo hidrológico.

Figura 56 - Hidrogramas de afluência mensal observada e simulada do reservatório Cachoeira no período de validação do modelo hidrológico.

Figura 57 – Hidrogramas de afluência mensal observada e simulada do reservatório Atibainha no período de validação do modelo hidrológico.

Figura 58 – Hidrogramas de afluência mensal observada e simulada do reservatório Paiva Castro no período de validação do modelo hidrológico.

APÊNDICE D – SÉRIES HISTÓRICAS MENSAIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Tabela 26 – Série de evapotranspiração mensal (mm) da Estação 1.

Estação 1												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
1988	132,09	65,34	93,98	61,64	52,83	47,27	53,37	94,68	120,62	96,48	109,14	132,50
1989	98,34	80,12	85,51	75,90	55,14	41,65	59,64	82,00	94,31	110,92	121,12	112,71
1990	117,81	107,57	106,34	84,08	59,62	55,19	52,89	78,03	98,82	113,12	135,16	123,17
1991	104,00	92,23	76,47	64,66	59,65	54,58	61,61	88,86	110,39	128,35	136,56	145,67
1992	122,82	97,55	99,33	76,68	67,07	65,03	63,48	88,12	90,17	111,53	103,05	128,39
1993	125,95	84,39	92,57	77,85	61,38	48,37	71,73	96,99	113,87	139,92	156,45	129,05
1994	110,34	126,30	81,83	73,68	63,76	56,88	70,52	104,10	144,50	139,42	129,75	137,08
1995	125,76	89,31	93,97	77,34	54,88	53,09	66,28	102,46	110,44	118,50	115,62	121,33
1996	116,78	99,58	80,92	75,02	50,46	54,46	58,83	90,52	91,38	113,20	104,01	132,01
1997	93,44	107,28	89,72	68,11	56,00	52,95	68,45	104,63	130,18	129,14	111,61	131,28
1998	122,91	92,48	94,20	83,34	55,04	50,10	65,15	97,62	122,64	102,64	112,35	125,33
1999	113,02	93,79	96,27	74,21	62,60	49,03	61,37	91,40	112,34	94,75	107,23	130,90
2000	112,54	87,54	83,37	82,74	63,31	70,21	68,23	106,37	96,51	154,97	129,76	127,46
2001	146,27	114,12	121,38	101,08	66,67	67,64	89,25	110,65	112,47	150,23	139,51	118,44
2002	111,97	84,51	115,81	85,37	67,21	63,04	72,64	117,21	109,93	192,12	129,80	144,44
2003	108,61	126,02	92,95	86,18	69,79	71,51	81,88	95,42	127,43	135,86	135,58	145,63
2004	120,28	96,62	103,80	81,95	53,57	55,08	57,51	94,96	144,94	115,66	131,78	131,97
2005	98,84	110,42	99,91	89,34	68,11	62,41	65,47	119,14	97,45	134,16	116,16	104,68
2006	128,63	99,28	105,34	77,25	57,47	57,84	81,34	112,03	110,47	104,03	108,81	99,16
2007	74,52	105,98	117,01	78,98	57,89	65,42	72,69	106,36	138,48	151,23	115,23	116,91
2008	98,60	105,04	89,88	66,35	52,13	49,59	75,65	92,48	102,61	111,31	108,30	120,43
2009	90,94	96,72	94,78	71,37	62,45	44,33	54,20	78,62	89,78	87,62	115,57	98,70
2010	113,86	117,74	104,20	70,33	55,18	54,22	66,05	95,44	117,55	109,53	120,36	115,34

Tabela 27 - Série de evapotranspiração mensal (mm) da Estação 2.

Estação 2												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
1988	144,04	82,27	104,17	72,41	59,44	51,84	59,81	104,95	139,42	111,21	128,11	146,58
1989	103,65	87,90	93,68	83,15	60,15	46,68	64,47	90,74	105,31	129,23	136,77	130,19
1990	123,75	118,21	114,16	91,28	66,38	61,40	59,88	89,12	114,09	128,77	150,11	138,57
1991	122,81	104,50	82,95	71,40	64,91	59,67	68,91	99,27	128,12	141,73	152,44	158,75
1992	137,92	107,25	106,23	87,58	73,97	71,72	73,27	102,34	100,54	128,24	117,75	147,22
1993	134,42	95,06	101,98	86,13	68,70	53,98	79,35	107,18	128,41	158,36	174,04	147,64
1994	124,11	131,61	96,51	84,58	69,49	62,38	80,04	119,00	166,57	157,32	147,15	149,57
1995	134,68	94,98	102,00	83,14	60,31	57,64	72,05	115,15	130,98	131,99	131,24	138,27
1996	123,61	107,41	90,85	81,74	56,72	60,10	65,61	102,52	103,57	129,11	114,67	139,54
1997	102,47	114,06	102,37	77,04	62,93	55,78	73,60	116,77	142,44	149,35	125,26	140,20
1998	132,46	100,89	101,83	89,48	59,78	57,08	72,98	109,71	141,95	122,39	135,12	137,98
1999	123,38	107,22	105,28	79,56	68,25	53,05	70,76	103,52	123,38	107,27	122,16	142,61
2000	120,80	95,63	94,65	89,53	68,12	77,24	76,37	118,57	112,70	176,39	149,24	142,87
2001	157,33	122,19	129,64	113,05	73,91	76,74	102,06	126,68	133,67	164,49	157,55	130,02
2002	121,79	94,71	122,30	94,39	75,37	71,71	81,32	132,47	126,49	223,15	147,09	163,39
2003	120,21	133,40	107,77	96,22	76,86	78,06	92,29	109,04	147,43	153,69	155,96	166,69
2004	132,43	106,35	113,57	90,42	59,66	59,67	65,52	107,55	167,03	133,08	148,49	146,48
2005	108,70	122,70	113,98	95,66	74,16	66,87	73,79	131,98	112,88	151,47	134,85	121,67
2006	143,08	110,77	116,21	87,95	64,44	65,98	89,06	127,15	126,87	123,88	129,95	111,97
2007	84,10	113,45	123,53	87,13	63,25	70,44	79,51	118,92	160,30	171,26	131,53	132,97
2008	111,28	113,25	96,76	72,63	55,59	54,80	82,28	104,01	119,37	128,39	125,35	139,54
2009	99,75	105,03	106,07	80,57	69,14	49,74	60,25	87,51	97,80	102,70	125,37	109,24
2010	120,36	122,21	112,45	77,79	59,66	59,87	74,58	108,48	136,58	125,78	140,05	132,38

Tabela 28 - Série de evapotranspiração mensal (mm) da Estação 3.

Estação 3												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maiο	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
1988	129,86	64,47	98,54	56,18	50,52	46,50	50,79	95,43	113,04	88,95	103,18	134,74
1989	102,55	86,02	86,10	76,28	53,46	41,40	57,26	78,43	87,46	90,69	118,02	114,27
1990	121,51	111,78	110,92	86,94	61,41	57,01	52,26	75,81	93,86	109,18	134,53	120,21
1991	102,66	95,73	80,63	65,54	60,68	57,58	63,58	88,20	98,60	124,16	130,56	151,83
1992	120,62	104,29	103,70	82,50	72,09	72,38	64,14	83,43	88,73	102,91	98,09	128,21
1993	127,99	92,07	95,58	80,50	63,12	51,62	75,78	96,79	103,45	137,06	153,18	135,76
1994	112,74	130,27	81,56	72,44	66,67	59,86	75,54	98,51	134,60	129,42	131,90	141,56
1995	125,40	92,12	95,58	77,77	54,77	55,05	68,56	99,80	100,64	108,54	110,89	125,93
1996	119,74	97,12	78,72	73,77	49,07	54,15	53,02	85,25	83,96	106,67	98,65	135,73
1997	94,35	110,99	94,27	70,09	58,16	57,57	71,91	105,44	123,92	119,06	100,51	133,23
1998	127,36	94,50	94,98	83,07	55,42	51,36	63,75	95,43	109,08	94,00	103,55	124,52
1999	114,00	92,96	100,29	73,03	63,59	46,48	58,24	88,09	109,67	81,79	103,48	134,34
2000	114,53	90,27	86,15	82,88	64,72	74,63	67,55	103,09	91,71	143,72	124,75	123,76
2001	147,07	116,46	121,89	101,67	64,70	67,41	88,58	105,66	100,96	147,88	131,77	120,13
2002	114,46	88,38	119,96	86,25	66,99	63,32	68,58	113,28	103,23	173,51	128,49	140,58
2003	112,80	129,95	97,64	88,46	74,89	77,10	89,74	90,56	111,43	128,95	135,70	141,90
2004	112,81	95,17	100,91	79,72	53,70	56,99	59,33	88,92	130,83	108,49	123,24	129,77
2005	98,16	102,89	97,79	86,71	70,48	66,63	66,22	120,69	87,93	124,06	113,00	109,11
2006	138,05	104,06	107,94	80,54	59,10	62,64	87,49	114,36	105,19	93,46	107,68	100,89
2007	77,53	108,73	121,70	80,80	57,18	71,34	73,08	97,46	129,37	131,86	113,76	112,28
2008	101,25	108,40	91,59	65,79	52,45	50,62	78,68	87,56	93,72	103,50	102,46	111,60
2009	92,78	100,73	99,52	69,41	63,09	45,94	50,08	73,12	80,40	77,63	113,20	99,20
2010	112,87	120,79	105,38	67,36	56,35	53,95	62,20	86,56	105,54	98,60	115,54	107,09

Tabela 29 - Série de evapotranspiração mensal (mm) da Estação 4.

Estação 4												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maiο	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
1988	136,14	73,13	104,18	61,02	54,24	48,09	53,82	100,89	122,49	94,31	111,71	143,62
1989	101,99	88,00	90,26	78,75	55,60	43,22	59,27	84,54	93,43	103,56	128,42	121,81
1990	123,53	117,96	113,59	90,68	63,41	58,83	56,13	81,13	101,93	116,68	140,82	124,81
1991	111,74	99,89	82,75	68,14	62,09	59,02	66,49	93,67	109,02	130,45	139,82	155,49
1992	126,80	107,35	106,95	87,52	74,82	73,20	68,99	91,50	92,86	112,44	105,30	136,20
1993	129,10	97,89	100,92	84,80	65,34	52,75	80,15	103,34	113,07	144,58	162,14	140,52
1994	118,67	132,56	88,22	77,71	68,80	61,42	79,48	105,85	146,72	137,54	138,82	147,82
1995	129,65	93,11	99,18	80,29	56,77	55,91	70,24	105,25	111,76	116,38	118,97	133,31
1996	121,86	100,66	83,87	77,06	51,65	56,22	56,03	91,18	90,45	115,45	104,19	138,06
1997	98,83	111,60	100,95	74,52	61,17	56,86	73,43	110,01	131,31	129,40	107,75	134,88
1998	131,95	98,13	96,01	84,94	56,05	53,45	67,40	103,64	119,75	103,03	116,60	130,34
1999	117,81	103,91	103,43	74,45	66,39	47,40	62,18	94,10	113,32	86,99	111,37	137,23
2000	117,69	93,12	91,28	86,83	66,22	76,35	71,95	109,26	99,71	158,12	136,73	131,93
2001	152,12	120,33	125,02	109,51	67,77	71,22	93,81	113,53	112,47	155,22	139,12	123,61
2002	117,45	92,88	123,13	90,07	71,64	68,85	73,57	123,45	113,08	193,61	135,11	148,56
2003	116,49	133,68	104,47	93,19	77,71	78,99	93,45	97,44	121,91	138,58	144,74	150,46
2004	119,85	100,88	104,83	84,55	54,54	58,06	62,06	96,27	143,07	116,50	133,44	139,83
2005	102,06	109,23	104,98	89,40	72,09	67,26	69,51	126,00	96,51	133,86	121,21	114,36
2006	146,46	111,10	112,72	85,77	63,07	66,16	89,36	121,96	112,70	103,65	119,86	104,45
2007	78,02	111,51	125,86	84,14	59,52	72,38	74,65	105,98	140,75	142,49	120,06	121,12
2008	106,81	111,74	94,45	68,19	53,03	52,34	81,27	92,95	104,12	109,81	109,53	123,15
2009	94,22	104,38	104,59	74,63	65,86	48,44	53,17	77,72	82,98	83,73	115,89	100,82
2010	114,60	121,62	109,03	70,88	57,53	55,62	65,79	94,14	115,53	106,61	126,19	116,65

Tabela 30 – Série mensal de precipitação da sub-bacia Jaguari/Jacareí.

[illegible]

Tabela 32 - Série mensal de precipitação da sub-bacia Atibainha.

[illegible]

Tabela 35 - Série mensal de evapotranspiração da sub-bacia Cachoeira.

[illegible]

Tabela 36 - Série mensal de evapotranspiração da sub-bacia Atibainha.

[illegible]

Tabela 40 - Série mensal de vazão afluente ao reservatório Atibainha

[illegible]

[illegible]

ANEXO B – SÉRIES HISTÓRICAS MENSAIS DE PRECIPITAÇÃO DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS.

Tabela 42 - Série mensal de precipitação da estação pluviométrica Barragem Cachoeira.

[illegible]

Tabela 43 - Série mensal de precipitação da estação pluviométrica Barragem Atibainha.

[illegible]

Tabela 45 - Série mensal de precipitação da estação pluviométrica Tapera Grande.

[illegible]

Tabela 46 - Série mensal de precipitação da estação pluviométrica Bairro Cuiabá.

[illegible]

Tabela 47 - Série mensal de precipitação da estação pluviométrica Água do Poco.

[illegible]

Tabela 48 - Série mensal de precipitação da estação pluviométrica Mato Mole.

[illegible]

Tabela 49 - Série mensal de precipitação da estação pluviométrica Fazenda Retiro.

[illegible]

Tabela 52 - Série mensal de precipitação da estação pluviométrica Extrema.

[illegible]

Tabela 53 - Série mensal de precipitação da estação pluviométrica Fazenda Rabelo.

[illegible]

Tabela 54- Série mensal de precipitação da estação pluviométrica Sertãozinho.

[illegible]

Tabela 55 - Série mensal de precipitação da estação pluviométrica Joanópolis.

[illegible]