

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC – UFABC
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL

MAÍRA CRISTINA DE OLIVEIRA SILVA

**CENÁRIO FUTURO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA NA
BACIA DO ALTO TIETÊ: SUBSÍDIO À GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS**

SANTO ANDRÉ – SP

2016

MAÍRA CRISTINA DE OLIVEIRA SILVA

**Cenário futuro da disponibilidade hídrica na Bacia do Alto Tietê:
subsídio à gestão dos recursos hídricos**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação da
Universidade Federal do ABC, como requisito
parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência e
Tecnologia Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. María Cleofé Valverde Brambila

Santo André

2016

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do ABC
Elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da UFABC
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Silva, Maíra Cristina de Oliveira

Cenário futuro da disponibilidade hídrica na Bacia do Alto Tietê :
subsídios à gestão dos recursos hídricos / Maíra Cristina de Oliveira
Silva. — 2016.

116 fls. : il.

Orientadora: Maria Cleofé Valverde Brambila

Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do ABC, Programa de
Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Santo André, 2016.

1. Projeções climáticas. 2. Disponibilidade hídrica. 3. Gestão dos
recursos hídricos. 4. Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (BHAT). 5. Mudanças
climáticas. I. Valverde Brambila, Maria Cleofé. II. Programa de
Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, 2016. III. Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Fundação Universidade Federal do ABC
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental
Avenida dos Estados, 5001 – Bairro Santa Terezinha – Santo André – SP
CEP 09210-580 · Fone: (11) 4996-0017
pgcta@ufabc.edu.br

FOLHA DE ASSINATURAS

Assinaturas dos membros da Banca Examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Maira Cristina de Oliveira Silva, realizada em 22 de junho de 2016:

Prof.(a) Dr.(a) **Maria Cleofé Valverde Brambila** (UFABC) – Presidente

Prof.(a) Dr.(a) **Melissa Cristina Pereira Graciosa** (UFABC) – Membro Titular

Prof.(a) Dr.(a) **Roger Rodrigues Torres** (UNIFEI) – Membro Titular

Prof.(a) Dr.(a) **Andréa de Oliveira Cardoso** (UFABC) – Membro Suplente

Prof.(a) Dr.(a) **Julio Pablo Reyes Fernandez** (INPE) – Membro Suplente

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, de acordo com as observações levantadas pela banca no dia da defesa, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

Santo André, 22 de setembro de 2016.

Assinatura do autor: Maira P.

Assinatura do orientador: Maria C. Volante Bromberg

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo apoio incondicional.

À professora Dr^a. María Cleofé Valverde Brambila, pela dedicação e suporte durante todo o mestrado.

Às queridas amigas Maryá Cristina Rabelo e Maria Gabriela Louzada Malfatti, pelo companheirismo, motivação e enorme ajuda.

Ao professor Dr. Leonardo Freire de Mello, que plantou em minha alma a sementinha da inclusão.

Aos professores Drs. Andréa de Oliveira Cardoso, Melissa Cristina Pereira Graciosa e Roger Rodrigo Torres, pela avaliação do trabalho e importantes colocações na banca.

À Fundação Universidade Federal do ABC, pela concessão da bolsa de mestrado.

A todos os que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta pesquisa.

“Não há ensino sem pesquisa e pesquisa sem ensino. Esses que fazeres se encontram um no corpo do outro. Enquanto ensino, continuo buscando, reprocurando. Ensino porque busco, porque indaguei, porque indago e me indago. Pesquiso para constatar, constatando intervenho, intervindo educo e me educo. Pesquiso para conhecer o que ainda não conheço e comunicar ou anunciar a novidade”.

Paulo Freire

RESUMO

Este estudo teve como objetivo analisar o comportamento futuro (*near-future*, de 2017 a 2039) da chuva e vazão na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (BHAT) e nas sub-bacias que a compõem: Tietê-Cabeceiras, Billings-Tamanduateí, Pinheiros-Pirapora, Penha-Pinheiros, Cotia-Guarapiranga e Juqueri-Cantareira. Para isso, empregou-se o Modelo Climático Global Atmosférico de Alta Resolução (AGCM) MRI-JMA desenvolvido pelo *Meteorological Research Institute* (MRI) do Japão e pela *Japanese Meteorological Agency* (JMA), para o cenário de emissões A2, pertencente ao Quarto Relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC-AR4). As saídas do modelo MRI-JMA possuem uma resolução de grade de 20 km na horizontal. Foram também utilizadas séries históricas de dados fluviométricos, pluviométricos e de temperatura do ar oriundos principalmente da Agência Nacional de Águas (ANA) e Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Para aferir a destreza do modelo MRI-JMA em representar a climatologia na bacia, foram avaliadas e corrigidas as saídas de precipitação e temperatura do modelo para o período presente (1979-2003). Posteriormente, com os dados observados de temperatura, foi calculada a Evapotranspiração Potencial (ETP) das sub-bacias, pelo método de *Thornthwite*. A fim de estimar as vazões futuras dos exutórios das sub-bacias foi construído um modelo hidrológico empírico, baseado na equação simplificada do balanço hídrico, por meio das variáveis observadas de precipitação, vazão e ETP. A partir das saídas de precipitação e temperatura do modelo climático MRI-JMA corrigidas para o período futuro (*near-future*), foram determinadas as vazões futuras (2017-2039). Os resultados das projeções do modelo indicam que a BHAT poderá ter um acréscimo na precipitação (5,9 mm) e temperatura (0,86°C) média mensal em relação à climatologia, para o período de 2017-2039. Dentre todas as sub-bacias, Pinheiros-Pirapora e Cotia-Guarapiranga terão a máxima anomalia positiva de temperatura (1,48°C) em julho. Já a sub-bacia Juqueri-Cantareira apresentará a maior anomalia positiva (27,18 mm) e negativa (-13,01 mm) de precipitação em dezembro e outubro, respectivamente. Em relação à vazão mensal futura na BHAT, para o período de 2017 a 2039, está projetada uma elevação durante a primavera (19,6%) e o verão (13,7%) e um decréscimo durante o inverno (-9%) e outono (-7%). O exutório da BHAT exibirá a máxima anomalia positiva em dezembro (44,89 m³/s) e a maior anomalia negativa em junho (-28,06 m³/s). A sub-bacia Juqueri-Cantareira terá o maior decréscimo da vazão no inverno (-18%), sendo que terá um aumento do deflúvio durante a primavera (30,7%) e o verão (17%). Deste modo, apesar das incertezas inerentes dos modelos climáticos e suas projeções, é fundamental gerenciar os recursos hídricos da bacia tendo em vista uma provável ampliação da variabilidade sazonal futura e diminuição da vazão durante o outono e o inverno.

PALAVRAS-CHAVE: Projeções climáticas. Disponibilidade hídrica. Gestão de recursos hídricos. Bacia Hidrográfica do Alto Tietê.

ABSTRACT

The aim of the present study was to analyse the future behavior (near-future, of 2017-2039) of rainfall and streamflow in the Upper Tietê River Basin (BHAT) and the sub-basins that compose it: Tietê–Cabeceiras, Billings–Tamanduateí, Pinheiros–Pirapora, Penha–Pinheiros, Cotia–Guarapiranga e Juqueri–Cantareira. For this purpose, the Global Climate Model Atmospheric High Resolution (AGCM) MRI-JMA developed by the Meteorological Research Institute (MRI) of Japan and the Japanese Meteorological Agency (JMA) for the emissions scenario A2 was used, belonging to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC-AR4). The choice of this model is due to the high spatial resolution of 20 km horizontal, allowing capture hydro-climatological characteristics of the sub-basin. We used observed database mainly of rainfall, temperature and streamflow, obtained from the National Water Agency (ANA) and the National Electric System Operator (ONS). To assess the ability of MRI-JMA model to represent the climatology in the sub-basins were evaluated and corrected the model outputs for precipitation and temperature variables for the present period (1979-2003). Posteriorly, with the data observed temperature was estimated evapotranspiration potential (ETP) of the sub-basins with the method of Thornthwaite. With a view to estimate future streamflow of sub-basins, it was built an empirical hydrological model based on simplified water balance equation, through the variables observed precipitation, streamflow and ETP. From the precipitation and temperature outputs of MRI-JMA model corrected for the future period, it was determined the future streamflow (2017-2039). The results of the model projections indicate that the Upper Tietê River Basin may have an increase in precipitation (5.9 mm) and temperature (0.86°C) monthly average relative to climatology, for the period 2017-2039. Among all sub-basins, Pinheiros–Pirapora and Cotia–Guarapiranga will have the maximum positive anomaly temperature (1.48°C) in July. Already, the sub-basin Juqueri–Cantareira will present the largest positive anomaly (27.18 mm) and negative (-13.01 mm) of rainfall in December and October, respectively. Regarding the future streamflow in BHAT, for the period 2017-2039, it is projected an increase in streamflow during the spring (19.6%) and summer (13.7%) and a decrease in streamflow during the winter (-9%) and fall (-7%). The exutório of BHAT will feature the largest positive anomaly in December (44.89 m³/s), and the largest negative anomaly in June (-28.06 m³/s). The sub-basin Juqueri–Cantareira will have the greatest decrease of streamflow in winter (-18%), and will increase during the spring (30.7%) and summer (17%). Thus, despite the uncertainties, it is important to manage the water resources of the basin considering a possible future expansion of the seasonal variability and decreased streamflow during the fall and winter.

PALAVRAS-CHAVE: Climate projections. Water availability. Water resources management. Upper Tietê River Basin.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação esquemática dos principais sistemas atmosféricos atuantes na região Sudeste. Tem-se na baixa troposfera: o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), a baixa pressão (B), o Complexo Convectivo de Mesoescala (CCM), a Frente Fria (FF), a Frente Quente (FQ), o Jato de Baixos Níveis (JBN) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Na alta troposfera: a Alta da Bolívia (AB) e os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs).....	11
Figura 2 – Anomalias da temperatura da superfície do mar representando (a) El Niño de 1998 e (b) o evento de La Niña de 1989. Os tons em azul indicam regiões com temperaturas abaixo da média e tons avermelhados evidenciam locais com temperaturas oceânicas acima da média	14
Figura 3 – Árvore das famílias do SRES à esquerda e aquecimento médio global projetado para os cenários de emissões do AR4 à direita.....	17
Figura 4 – Mapa da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (BHAT) e suas sub-bacias.....	21
Figura 5 – Grade do modelo climático MRI-JMA com os pontos do modelo	23
Figura 6 – Mapa da localização da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê com a distribuição dos postos pluviométricos, fluviométricos e postos de amostragem com séries históricas de temperatura do ar ..	24
Figura 7 – Fluxograma das etapas metodológicas para a estimativa da vazão.....	28
Figura 8 – <i>Boxplot</i> explicativo	31
Figura 9 – Representação dos processos hidrológicos envolvidos no balanço hídrico de uma bacia ...	33
Figura 10 – Representação da secção transversal de uma bacia hidrográfica e das variáveis hidrológicas envolvidas no seu balanço hídrico.....	34
Figura 11 – Mapa da localização e gráficos da climatologia sazonal (a) e padrão médio mensal de vazão (b) dos postos da sub-bacia Tietê-Cabeceiras, no período de 1961-2014.....	44
Figura 12 – Mapa da localização e gráficos da climatologia sazonal (a) e padrão médio mensal de vazão (b) dos postos da sub-bacia Billings-Tamanduateí, no período de 1961-2014	44
Figura 13 – Mapa da localização e gráficos da climatologia sazonal (a) e padrão médio mensal de vazão (b) dos postos da sub-bacia Juqueri-Cantareira, no período de 1961-2014	45
Figura 14 – Mapa da localização e gráficos da climatologia sazonal (a) e padrão médio mensal de vazão (b) dos postos da sub-bacia Penha-Pinheiros, no período de 1961-2014.....	46
Figura 15 – Mapa da localização e gráficos da climatologia sazonal (a) e padrão médio mensal de vazão (b) dos postos da sub-bacia Cotia-Guarapiranga, no período de 1961-2014	47
Figura 16 – Mapa da localização e gráficos da climatologia sazonal (a) e padrão médio mensal de vazão (b) dos postos da sub-bacia Pinheiros-Pirapora, no período de 1961-2014.....	48
Figura 17 – Gráfico do padrão médio mensal de chuva e vazão nas sub-bacias: (a) Tietê-Cabeceiras, (b) Penha-Pinheiros, (c) Billings-Tamanduateí, (d) Pinheiros-Pirapora, (e) Juqueri-Cantareira e (f) Cotia-Guarapiranga, no período de 1961-2014.....	50

Figura 18 – Gráfico da média mensal de chuva e vazão na Bacia do Alto Tietê no período de 1961-2014 (a) e no período de 1979-2003 (b).....	51
Figura 19 – Gráfico de variabilidade interanual e tendências de chuva (a) e vazão (b) na sub-bacia Tietê-Cabeceiras, no período de 1961-2014.....	52
Figura 20 – Gráfico da variabilidade interanual e tendências de chuva (a) e vazão (b) na sub-bacia Billings-Tamanduateí, no período de 1961-2014.....	53
Figura 21 – Gráfico de variabilidade interanual e tendências de chuva (a) e vazão (b) na sub-bacia Penha-Pinheiros, no período de 1961-2014	53
Figura 22 - Gráfico de variabilidade interanual e tendências de chuva (a) e vazão (b) na sub-bacia Pinheiros-Pirapora, no período de 1961-2014.....	54
Figura 23 - Gráfico de variabilidade interanual e tendências de chuva (a) e vazão (b) na sub-bacia Juqueri-Cantareira (a) e variabilidade interanual e tendência de chuva (c) e vazão (d) na sub-bacia Cotia-Guarapiranga, ambos para o período de 1961-2014.....	55
Figura 24 - Gráfico de variabilidade interanual e tendências de chuva (a) e vazão (b) na Bacia do Alto Tietê, no período de 1961-2014	56
Figura 25 – Gráfico de <i>Boxplots</i> da precipitação acumulada anual das sub-bacias do Alto Tietê, no período de 1961-2014	57
Figura 26 - Gráfico de <i>Boxplots</i> das médias anuais de vazão das sub-bacias do Alto Tietê, no período de 1961-2014.....	58
Figura 27 – Gráfico de climatologia sazonal do modelo climático MRI das sub-bacias Juqueri-Cantareira (a), Tietê-Cabeceiras (b), Penha-Pinheiros (c), Pinheiros-Pirapora (d), Billings-Tamanduateí (e) e Cotia-Guarapiranga (f), no período de 1979-2003	60
Figura 28 - Gráfico de climatologia sazonal do modelo climático MRI da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê, no período de 1979-2003	62
Figura 29 – Climatologia sazonal do modelo climático MRI-JMA corrigido nas sub-bacias: (a) Tietê-Cabeceiras, (b) Penha-Pinheiros, (c) Billings-Tamanduateí, (d) Pinheiros-Pirapora, (e) Juqueri-Cantareira e (f) Cotia-Guarapiranga, no período de 1979-2003.....	64
Figura 30 - Climatologia sazonal (a) e Variabilidade interanual (b) do modelo climático MRI-JMA corrigido da Bacia do Alto Tietê, no período de 1979-2003	65
Figura 31 – Padrão médio mensal da temperatura na Bacia do Alto Tietê, no período de 1979-2003 .	66
Figura 32 – Dispersão dos coeficientes na Bacia do Alto Tietê e linhas de tendências no período de 1979-2003	67
Figura 33 – Padrão médio mensal da vazão reconstruída com a equação de balanço hídrico na Bacia do Alto Tietê, no período de 1979-2003	68
Figura 34 – Padrão médio mensal da vazão reconstruída com a equação de balanço hídrico na Bacia do Alto Tietê, no período de 1979-2003	69

Figura 35 – Gráfico do padrão médio mensal da vazão reconstruída nas sub-bacias: (a) Billings-Tamanduateí, (b) Cotia-Guarapiranga, (c) Juqueri-Cantareira, (d) Penha-Pinheiros, (e) Pinheiros-Pirapora e (f) Tietê-Cabeceiras, no período de 1979-2003	72
Figura 36 – Padrão médio mensal de chuva nas sub-bacias: (a) Tietê-Cabeceiras, (b) Penha-Pinheiros, (c) Billings-Tamanduateí, (d) Pinheiros-Pirapora, (e) Juqueri-Cantareira e (f) Cotia-Guarapiranga....	74
Figura 37 – Climatologia sazonal (a) e Variabilidade interanual (b) de precipitação na Bacia do Alto Tietê.....	76
Figura 38 – Padrão médio mensal (a) e Variabilidade interanual (b) de temperatura da Bacia do Alto Tietê.....	77
Figura 39 – Padrão médio mensal de vazão observada e reconstruída nas sub-bacias: (a) Tietê-Cabeceiras, (b) Penha-Pinheiros, (c) Billings-Tamanduateí, (d) Pinheiros-Pirapora, (e) Juqueri-Cantareira e (f) Cotia-Guarapiranga.....	79
Figura 40 - Climatologia sazonal (a) da vazão na Bacia do Alto Tietê.....	80
Figura 41 – Mapa da Bacia do Alto Tietê e suas sub-bacias, com as variações percentuais das anomalias de vazão, no período de 2017 a 2039, para cada estação do ano e média mensal	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Localização dos postos pluviométricos, fluviométricos e de temperatura nas sub-bacias da BHAT.....	26
Tabela 2 - Localização dos postos pluviométricos, fluviométricos e de temperatura nas sub-bacias da BHAT.....	27
Tabela 3 - Fator de correlação (F_c) da evapotranspiração mensal de <i>Thornthwaite</i> em função da área de estudo (Bacia Hidrográfica do Alto Tietê) – latitude 23°S.....	32
Tabela 4 – Precipitação média mensal (mm) nas sub-bacias do Alto Tietê, no período de 1961-2014	49
Tabela 5 – Vazão média mensal (m^3/s) nas sub-bacias do Alto Tietê, no período de 1961-2014	49
Tabela 6 – Variabilidade interanual, tendências e p-valor das tendências lineares de precipitação e vazão das sub-bacias do Alto Tietê, no período de 1961 a 2014. Os valores em vermelho indicam um p-valor $\leq 0,05$, evidenciando uma tendência significativa estatisticamente.....	56
Tabela 7 - Erro médio (mm) da precipitação do modelo climático MRI-JMA para as sub-bacias do Alto Tietê, no período de 1979-2003	61
Tabela 8 - Temperatura média mensal (°C) do modelo climático MRI-JMA para as sub-bacias do Alto Tietê e erros médios do modelo e do modelo corrigido, no período de 1979-2003.....	66
Tabela 9 – Coeficientes de Determinação (R^2) e Coeficiente de Correlação (R) das equações de ajuste do balanço hídrico, para a Bacia do Alto Tietê, no período de 1979-2013	68
Tabela 10 – Vazões reconstruídas (m^3/s) das equações de ajuste do balanço hídrico para a Bacia do Alto Tietê e erros médios, no período de 1979-2013	69
Tabela 11 – Coeficientes de Determinação (r^2) e Coeficientes de Correlação (r) das equações de ajuste do balanço hídrico, para as sub-bacias do Alto Tietê, no período de 1979 a 2013	70
Tabela 12 – Equações polinomiais de quarta ordem de ajuste dos coeficientes do balanço hídrico simplificado nas sub-bacias do Alto Tietê, para o período de 1979 a 2003.....	71
Tabela 13 - Anomalia de precipitação (mm) média mensal do modelo climático MRI-JMA, para o período de 2017-2039	75
Tabela 14 - Anomalia de temperatura (°C) média mensal do modelo climático MRI-JMA, para o período de 2017-2039	77
Tabela 15 - Anomalia da vazão futura (m^3/s) média mensal do modelo climático MRI-JMA, para o período de 2017-2039	80
Tabela 16 – Tendências da variabilidade interanual da precipitação e vazão das sub-bacias do Alto Tietê simuladas pelo modelo climático MRI-JMA, para o período de 2017 a 2039.....	81
Tabela 17 – Outorgas de captação e lançamento de efluentes por setor econômico.....	83
Tabela 18 – Outorga de captação e lançamento de efluentes das sub-bacias do Alto Tietê	83

Tabela 19 – Capacidade das Estações de Tratamento de Água (ETA) e disponibilidade hídrica ($Q_{95\%}$) dos sistemas produtores da Bacia do Alto Tietê.....	83
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB – Alta da Bolívia

AGCM – Modelo Climático Global Atmosférico de Alta Resolução

AGRITEMPO – Sistema de Monitoramento Agrometeorológico

ANA – Agência Nacional de Águas

AR – Relatórios de Avaliação

AR4 – Quarto Relatório de Avaliação

AR5 – Quinto Relatório de Avaliação

ASAS – Anticiclone Tropical do Atlântico Sul

BHAT – Bacia Hidrográfica do Alto Tietê

CBHAT – Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê

CCM – Complexo Convectivo de Mesoescala

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CMIP5 – *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*

DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica

ENOS – El Niño Oscilação Sul

EP – Erro Percentual

EPM – Erro Padrão Médio

EQM – Erro Quadrático Médio

ET – Evapotranspiração Potencial

ETA – Estação de Tratamento de Água

ETP – Evapotranspiração Potencial

FAR – Primeiro Relatório de Avaliação

Fc – Fator de correlação

FF – Frente Fria

FQ – Frente Quente

FUSP – Fundação Universidade de São Paulo

GCM – Modelos Climáticos Globais

GrADS – *Grid Analysis and Display System*

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

IS92 – *Scenarios 92*

JBN – Jato de Baixos Níveis

JMA – *Japanese Meteorological Agency*

MRI – *Meteorological Research Institute*

OMM – Organização Mundial de Meteorologia

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

P – Precipitação

PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas

PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

Q – Vazão

R – Coeficiente de Correlação de Pearson

R² – Coeficiente de Determinação

RCP – *Representative Concentration Pathways*

REQM – Raiz do Erro Quadrático Médio

RMSP – Região Metropolitana de São Paulo

SA90 – *Scientific Assessment 90*

SAR – Segundo Relatório de Avaliação

Se – Erro Padrão da Estimativa

SMAP – *Soil Moisture Accounting Procedure*

SRES – *Special Report on Emissions Scenarios*

TAR – Terceiro Relatório de Avaliação

TSM – Temperatura da Superfície do Mar

UNFCCC – Convenção sobre Mudança Climática da Organização das Nações Unidas

VCANs – Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	4
3. REVISÃO DA LITERATURA	5
3.1 Mudanças climáticas no Brasil e no mundo	5
3.2 Mudanças climáticas e recursos hídricos	7
3.3 Padrões atmosféricos que influenciam a precipitação na Bacia do Alto Tietê	10
3.4 Modelos Climáticos Globais e cenários de emissões	15
4. DADOS E METODOLOGIA.....	20
4.1. Caracterização geral da área de estudo	20
4. 2. DADOS.....	22
4.2.1. O modelo climático MRI-JMA	22
4.2.2. Levantamento de dados observacionais	24
4.3. METODOLOGIA	25
4.3.1. Preenchimento e tratamento dos dados observados	29
4.3.2. Análise dos dados observacionais	29
4.3.3. Estimativa da Evapotranspiração Potencial (ETP).....	32
4.3.4. Estabelecimento da relação empírica para o cálculo da vazão	33
4.3.5. Avaliação e correção das saídas do modelo climático MRI-JMA para o período presente.....	38
4.3.6. Avaliação e correção das saídas do modelo climático MRI-JMA para o cenário futuro.....	41
4.3.7. Determinação da vazão para o período futuro.....	42
5. RESULTADOS.....	43

5.1. Avaliação das séries históricas fluviométricas e pluviométricas da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê.....	43
5.1.1. Climatologia das sub-bacias do Alto Tietê.....	43
5.1.2. Padrão médio mensal da chuva e vazão na Bacia do Alto Tietê	50
5.1.3. Variabilidade interanual e tendências de chuva e vazão nas sub-bacias do Alto Tietê.	52
5.2. Avaliação dos dados de precipitação do Modelo MRI-JMA para o período presente.....	59
5.2.1. Médias mensais das chuvas nas sub-bacias do Alto Tietê simuladas pelo Modelo MRI-JMA.....	59
5.3. Correção das saídas do modelo climático MRI-JMA	62
5.3.1. Correção das saídas de precipitação do modelo MRI-JMA para o período presente (1979-2003).....	63
5.3.2. Correção das saídas de temperatura do modelo MRI-JMA para o período presente (1979-2003).....	65
5.4. Cálculo da vazão: relação empírica a partir dos dados observados	66
5.5. Avaliação dos dados de precipitação e temperatura do modelo climático MRI-JMA para o cenário futuro de 2017 a 2039.....	72
5.5.1. Avaliação da precipitação na Bacia do Alto Tietê para o período futuro.....	73
5.5.2. Avaliação da temperatura na Bacia do Alto Tietê para o período futuro	76
5.6. Cenários futuros (2017-2039) de vazão na Bacia do Alto Tietê.....	78
5.7. Gestão dos recursos hídricos na Bacia do Alto Tietê no contexto das mudanças climáticas	82
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
8. APÊNDICES.....	105

1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água depende, em grande parte, do clima e, no Brasil sofrerá importantes alterações com as mudanças climáticas (MARENGO, 2008). Entende-se por mudanças climáticas as alterações significativas estatisticamente em um ou mais parâmetros climáticos (como a temperatura, precipitação ou ventos) ou na variabilidade, durante um extenso período, em que esses fenômenos ocorrerem, sendo ocasionada por processos naturais do próprio planeta ou por forçantes externas, incluindo variações na intensidade da radiação solar, ou ainda, pela ação antrópica (IPCC, 2007).

Segundo Marengo (2007), um clima mais quente implicará em mudanças importantes no regime de precipitação, que interferirão no ciclo hidrológico e nos recursos aquíferos. Pequenas variações no regime de chuvas devido à variabilidade ou mudanças climáticas podem ocasionar significativas alterações nas vazões da bacia hidrográfica, produzindo transformações no ambiente da bacia, o que resulta em modificações do ciclo hidrológico, interferindo, assim, na disponibilidade hídrica. Estas variações, ao longo do tempo, também alteram os condicionantes naturais que dão sustentabilidade ao meio natural, como a vegetação, gerando novos habitats em função da ocorrência de precipitação e temperatura (TUCCI & MENDES, 2006).

Nessa perspectiva, o conhecimento em diferentes escalas de tempo e espaço sobre os padrões predominantes de precipitação e temperatura e suas modificações é de extrema pertinência para o planejamento dos recursos hídricos e ambientais. Assim, tornou-se crescente o desenvolvimento de pesquisas que objetivam entender as mudanças climáticas, identificar e avaliar seus possíveis impactos ambientais, sociais e econômicos, assim como auxiliar na elaboração de medidas de mitigação e adaptação que minimizem as consequências adversas das mesmas (MARENGO, 2008).

Um dos rios mais importantes do estado de São Paulo e que poderá ter seu regime hídrico influenciado pelas alterações climáticas é o rio Tietê e seus afluentes. O rio Tietê tem sua nascente na Bacia do Alto Tietê, região mais povoada e com maior demanda de água do estado. A Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (BHAT) localiza-se na região sudeste do estado de São Paulo e engloba importantes cidades, contando com uma população de aproximadamente 20 milhões de habitantes e uma das maiores densidades demográficas do Brasil. A demanda por água na bacia é de aproximadamente o dobro de sua disponibilidade hídrica, classificando esta região como a mais crítica do estado (FUSP, 2009).

Recentemente, a BHAT sofreu uma das maiores crises de abastecimento hídrico da história. As vazões médias observadas nos primeiros meses do primeiro semestre de 2014 foram inferiores às mínimas já registradas desde 1930 (ANA, 2014a). O volume de água retido nos reservatórios do Sistema Cantareira, que abastece aproximadamente 10 milhões de habitantes da BHAT, chegaram a 12,8%, enquanto o volume de água retido em todos os reservatórios do Alto Tietê foi de 7,2%, com um volume de todo o sistema morto e útil de 28,19 hm³ (REIS, 2014). Em junho de 2015, o Sistema Cantareira teve uma vazão média de 13,64 m³/s, o que representa apenas 44% da vazão média histórica e mais do que o dobro da média registrada em junho de 2014, de 6,62 m³/s (ANA, 2015a).

De acordo com a ANA (2014a), entre os meses de outubro de 2013 e março de 2014 observaram-se vazões naturais afluentes excepcionalmente baixas para essa época, o que colaborou para que os reservatórios não alcançassem o volume de água aguardado. Segundo Coelho *et al.* (2015a), durante o verão 2013/2014 o estado de São Paulo recebeu somente 47,8% da chuva esperada pela climatologia e no ano de 2014 choveu apenas 25% da média acumulada anual da região, o que representa um déficit expressivo de precipitação.

Uma característica importante a ser destacada é que, pela primeira vez nos registros históricos de 1961-2015, a região apresentou déficit de chuva por quatro anos consecutivos. Outro fator que contribuiu para a estiagem foi o aumento de temperatura. De acordo com Marengo e Alves (2015), a região Sudeste registrou em 2014 temperaturas 2,5°C acima da média histórica de 1961-1990 e o ano de 2015 foi o mais quente já registrado desde 1850.

Além da baixa precipitação registrada nestes últimos anos, a região metropolitana de São Paulo sofre constantemente com escassez hídrica. Isso ocorre porque a região é o maior aglomerado urbano do país e está localizada em uma área de cabeceira, o que torna a procura por água muito superior à sua disponibilidade. Outro agravante é o aumento da demanda de água nas bacias hidrográficas vizinhas, reflexo do crescimento populacional e econômico do estado de São Paulo (LOMBA, 2005).

Estudos sobre prováveis cenários futuros de alterações nos padrões climáticos locais em bacias são fundamentais para verificar e compreender o comportamento desses sistemas com o passar do tempo, pois permitem estimar as demandas de água no futuro, melhorar as estratégias de adequação do uso múltiplo do recurso e definir políticas ambientais (MESCHIATTI *et al.*, 2012).

Pesquisas recentes desenvolvidas por Silveira *et al.* (2013a,b) e Hamada *et al.* (2012) sobre o desempenho das simulações de diferentes modelos climáticos globais nas regiões Sudeste, Nordeste setentrional e Bacia do Prata destacam o modelo climático global MRI-

JMA, desenvolvido pelo Instituto Meteorológico do Japão, como um dos melhores modelos globais, pois suas saídas apresentam elevada correlação em relação à precipitação observada nas regiões de estudo, sendo capaz de capturar os padrões de variação sazonal e interanual.

Deste modo, realizar um trabalho que utilize saídas do modelo climático MRI-JMA com projeções futuras, gerando cenários que proporcionem informações hidroclimatológicas da BHAT é de suma importância, visto que contribuirá para estabelecer panoramas futuros de possíveis comportamentos da dinâmica da bacia, ao longo dos anos, e para identificar os possíveis impactos negativos das mudanças climáticas nos sistemas hídricos do Alto Tietê e de bacias hidrográficas adjacentes. Além disso, poderá coadjuvar o planejamento e gerenciamento ambiental integrado na região.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar o comportamento futuro da vazão e das chuvas na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê, fornecendo subsídio para a gestão dos recursos hídricos na bacia. O estudo teve como base as projeções do modelo climático MRI-JMA e possui como objetivos específicos:

- Caracterizar os padrões sazonais e tendências hidrometeorológicas da bacia;
- Indicar a disponibilidade hídrica futura da Bacia do Alto Tietê no que se refere à quantidade de vazão e chuvas para cenários futuros derivado do modelo MRI-JMA;
- Identificar e examinar os principais impactos futuros da variabilidade hidroclimatológica na bacia;
- Coadjuvar para o planejamento ambiental integrado na bacia do rio Tietê, fornecendo dados e informações que colaborem para a adoção de ações que visem à proteção dos recursos naturais, viabilizem os usos múltiplos da água proveniente da bacia e integrem estratégias de mitigação e adaptação às mudanças climáticas na região.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Mudanças climáticas no Brasil e no mundo

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC (em inglês, *Intergovernmental Panel on Climate Change*), criado em 1988 pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), representa atualmente o principal órgão científico internacional sobre mudanças climáticas e seus possíveis impactos socioeconômicos e ambientais. De acordo com o IPCC (2007), mudança climática refere-se a qualquer alteração no clima durante um período de tempo, independente se for uma variação natural ou o resultado de uma atividade humana.

As mudanças climáticas podem desenvolver-se a partir da alteração do equilíbrio energético do sistema climático, como modificações na composição da atmosfera (alterações nas concentrações de gases causadores do efeito estufa e aerossóis), mudanças na radiação solar e nas propriedades da superfície da terra (alterações na cobertura e no uso da terra). Estas mudanças são expressas como uma forçante radiativa, que mede a influência que um fator, humano ou natural, tem para alterar o balanço de energia que entra e sai do sistema atmosférico terrestre, medindo também a importância deste fator como um potencial mecanismo na mudança do clima (IPCC, 2007).

Desde sua criação, o IPCC publicou cinco Relatórios de Avaliação (AR). O Primeiro Relatório de Avaliação (FAR), promulgado em 1990, trouxe evidências científicas que revelaram a importância das alterações climáticas como um tema merecedor de uma plataforma política entre os países para enfrentar suas consequências, desempenhando um papel decisivo na criação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climáticas – UNFCCC (em inglês, *United Nations Framework Convention on Climate Change*), tratado internacional chave para reduzir o aquecimento global e lidar com as consequências das alterações climáticas (IPCC, 2001).

O Segundo Relatório de Avaliação (SAR), editado em 1995, forneceu bases científicas para subsidiar as negociações que resultaram na adoção do Protocolo de Quioto em 1997. E o Terceiro Relatório de Avaliação (TAR), publicado em 2001, apresentou evidências de que a maior parte do aquecimento global observado nos últimos 50 anos é decorrente das atividades antrópicas, o que foi cientificamente reforçado com a divulgação do Quarto Relatório de Avaliação (AR4) em 2007 (AMBRIZZI *et al.*, 2014).

O Quarto e Quinto Relatórios de Avaliação asseguram que o aquecimento do sistema climático é inequívoco e que há mais de 90% de probabilidade de que o aquecimento global tenha sido causado pelas atividades humanas (IPCC, 2014b). De acordo com o Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC é muito provável que haja ondas de calor com maior frequência e duração, e é praticamente certo que ocorrerão extremos de temperatura quente com maior assiduidade e extremos de temperaturas frias com menor regularidade, em escala temporal diária e sazonal, na maioria das zonas continentais (IPCC, 2013).

Estudos demonstram que tais mudanças no clima do planeta, além de colocarem em risco a vida de grandes contingentes urbanos, podem desencadear epidemias e pragas e ameaçar a infraestrutura de abastecimento de água e luz. A agricultura também será bastante prejudicada, principalmente em regiões onde já se verifica escassez de água (MOTA *et al.*, 2011; MARENGO, 2006).

Entre os prováveis impactos das alterações climáticas na América do Sul destacam-se: o fato de que milhões de habitantes poderão ser afetados quanto à disponibilidade de água; as populações situadas em áreas costeiras serão prejudicadas pela elevação do nível do mar e por eventos extremos intensos; a provável redução da biodiversidade por força das mudanças que irão ocorrer nos padrões de uso do solo; a diminuição entre 20-80% da área das florestas tropicais úmidas da região; e também é esperado o aumento do número de casos de dengue, entre outras doenças ligadas a alterações climáticas (IPCC, 2007; IPCC, 2014a).

O Brasil é vulnerável às mudanças climáticas atuais e ainda mais às que se projetam para o futuro – especialmente em relação aos extremos climáticos, fenômenos climáticos raros, considerando o padrão natural de referência de distribuição estatística de um determinado local. Por possuir grandes dimensões territoriais, o Brasil pode sofrer impactos das mudanças climáticas de forma diferente em suas regiões, sendo que as áreas mais suscetíveis são a Amazônia, o Nordeste e a Bacia da Prata (MARENGO, 2007; MOTA *et al.*, 2011).

Na Amazônia, a média dos modelos de projeção do IPCC AR4 indica uma maior probabilidade de redução de chuva nas regiões nordeste e leste da Amazônia. Entretanto, de modo geral não é possível verificar uma tendência clara de aumento ou redução de precipitação, devido aos futuros cenários de desmatamento na região. Na região Nordeste também não é possível observar uma tendência clara de variação pluviométrica, mas caso ocorra a diminuição de chuvas, o principal prejuízo seria o aumento da seca e menor disponibilidade hídrica. A região poderá passar de zona semiárida a zona árida, o que traria

como consequência prejuízos à alimentação, sanidade e saúde da população local (MARENGO, 2007; MARENGO, 2008).

Já na Bacia da Prata e na região Sul do Brasil tem sido observado um acréscimo da chuva de até 10% por década desde 1950. Também foi identificada uma tendência de aumento na vazão do Rio Paraná e outros rios na região Sul e Sudeste do Brasil. Embora a precipitação acresça no futuro, em algumas regiões na Bacia da Prata poderá ocorrer déficit hídrico, pois elevadas temperaturas do ar podem levar ao acréscimo na evaporação ou evapotranspiração (MARENGO & DIAS, 2006; TUCCI & MENDES, 2006).

Segundo o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (AMBRIZZI *et al.*, 2014), as projeções climáticas globais e regionais para a região Sudeste indicam um aumento relativamente baixo da temperatura, entre 0,5 e 1°C até 2039. Para o período de 2041-2070, as tendências de acréscimo da temperatura continuam, variando entre 1,5 e 2°C, e acentuam-se no final do século (2071-2100), com valores entre 2,5 e 3°C. Já a precipitação até 2039 aumenta em torno de 5 a 10%. Em meados do século (2041-2070) continuam as tendências de elevação gradual da chuva, entre 15 e 20%, e, no final do século, apresentam um aumento de 25 a 30%.

Para o estado de São Paulo, os modelos climáticos indicam a intensificação de impactos já existentes, como ilhas de calor, inversões térmicas localizadas, bolsões de poluição e maiores diferenças locais no comportamento dos ventos. Também existem tendências para o acréscimo no número de dias quentes, redução no número de dias frios, aumento no número de noites quentes e diminuição do número de noites frias (MARENGO, 2007). Contudo, o principal risco advindo das mudanças climáticas será o aumento no número e intensidade das tempestades, o que causará enchentes, inundações e alterações no regime de vazão de importantes rios e reservatórios, prejudicando o abastecimento de água e energia elétrica (MALUF, 2011; YOUNG *et al.*, 2010).

3.2 Mudanças climáticas e recursos hídricos

A disponibilidade de água depende, em grande parte, do clima, pois alterações climáticas refletem nas modificações das variáveis: precipitação, temperatura, vento, radiação e umidade. Assim, o ciclo hidrológico apresenta grande importância devido à interação entre a superfície e a atmosfera (TUCCI & MENDES, 2006). As incertezas sobre o comportamento futuro do clima são expressivas no que se refere ao que ocorrerá com o ciclo hidrológico

(MARENGO & ALVES, 2015). O sistema climático é não linear e extremamente dinâmico, o que dificulta sua previsão quantitativa. Sob o ponto de vista hidrológico, a precipitação é responsável direta pelo fluxo das vazões nos rios, pois é a principal entrada de água nas bacias hidrográficas. Deste modo, previsões da ocorrência, intensidade e distribuição espacial da chuva em bacias hidrográficas é um pré-requisito importante em sistemas de recursos hídricos (HARDING & JOCHUM, 1995).

De acordo com o IPCC (2013), as consequências das mudanças climáticas no ciclo hidrológico não serão uniformes, acentuando o contraste de precipitação entre as estações e regiões secas e úmidas. Devido ao incremento de umidade na atmosfera é muito provável que, em regiões tropicais úmidas, a duração e extensão dos sistemas monçônicos¹ aumentem e intensifiquem-se. O aumento de umidade atmosférica também deverá influenciar em escala regional a variabilidade da precipitação relacionada ao fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS), considerado o modo dominante de variabilidade interanual no Pacífico tropical. Entretanto, não há previsões de variações do padrão espacial em que o ENOS ocorrerá. Estas alterações na precipitação influenciarão os sistemas hidrológicos, o que afetará a qualidade e a quantidade dos recursos hídricos (IPCC, 2013).

As projeções apontam que as mudanças climáticas diminuirão a qualidade da água bruta e causarão riscos para a qualidade da água potável, como consequência da integração dos seguintes fatores: aumento da temperatura e da evapotranspiração, elevação da concentração das cargas de sedimentos e nutrientes; maior concentração de contaminantes durante os períodos de seca; e interrupções e danos nos sistemas de drenagem e estações de tratamento de água e esgoto, durante enchentes e inundações. As projeções também indicam, com alto nível de confiança, uma redução substancial nos recursos de águas superficiais em regiões subtropicais, o que aumentará o conflito pelo uso da água em diversos setores. As mudanças climáticas também afetarão as taxas de recarga das águas subterrâneas e, consequentemente, os níveis de água subterrâneos (IPCC, 2014a).

O Brasil possui grandes extensões com climas, relevos, condições socioeconômicas e culturais diversos. Assim, a distribuição dos recursos naturais é bastante heterogênea, existindo regiões riquíssimas em disponibilidade hídrica até regiões semiáridas ou centros

¹As monções da América do Sul são sistemas de ventos úmidos cujo sentido se inverte sazonalmente de forma abrupta, devido ao gradiente horizontal de pressão entre a superfície terrestre e a atmosfera, sendo que as monções de verão podem causar chuvas torrenciais (VAREJÃO-SILVA, 2006).

urbanos com problemas de inundações. Deste modo, as mudanças climáticas impactarão o regime hidrológico das regiões hidrográficas brasileiras de formas diversas (SOUZA *et al.*, 2014, ANA, 2010).

Estima-se que a disponibilidade hídrica superficial do Brasil é de 91.071 m³/s e a vazão média equivale a 179.516 m³/s, o que representa aproximadamente 12% da disponibilidade mundial. Em 2010, a demanda consuntiva de água foi de 2.373 m³/s, sendo que o setor de irrigação foi o que mais requisitou, aproximadamente 54% do total. A região hidrográfica do Paraná, com vazão média de 11.831 m³/s e disponibilidade hídrica superficial de 5.956 m³/s, é responsável pela maior demanda hídrica do país e só o estado de São Paulo corresponde a 15,05% da demanda nacional (ANA, 2013; ANA, 2015b).

Uma decorrência importante da variabilidade climática é a ocorrência de não-estacionariedade das séries hidrológicas. As bacias hidrográficas das regiões Sul e Sudeste correspondem a 80% da capacidade instalada de geração hidrelétrica no Brasil. A não estacionariedade das séries hidrológicas pode ter impactos significativos na segurança energética brasileira, bem como no planejamento e operação das infraestruturas hídricas para o atendimento dos usos múltiplos da água na região, como irrigação, navegação, controle de inundações, abastecimento de água, entre outros (BRASIL, 2008; SOUZA *et al.*, 2014).

Na Bacia do rio Tietê, as tendências encontradas para as séries de precipitação não são estacionárias. O mesmo ocorre para as séries de vazão, que apresentam como características queda, de 1901 a 1970, e aumento sistemático a partir dos anos 70 até o presente, bem como elevação da taxa das vazões médias de montante para jusante (SOUZA *et al.*, 2014; TUCCI & MENDES, 2006). Por outro lado, observa-se em algumas regiões do Brasil, como a Bacia do Alto Tietê, uma gradativa e intensa diminuição nos índices pluviométricos a partir do segundo semestre de 2014, o que prejudicou a oferta de água para o abastecimento público, sobretudo no semiárido nordestino e nas regiões metropolitanas do Sudeste (ANA, 2015b).

O desafio do abastecimento em regiões metropolitanas está relacionado com a frequente sobreposição da utilização de fontes hídricas comuns, o que ocasiona conflito pelo uso da água. Além disso, o abastecimento de grandes centros urbanos ocorre por sistemas integrados que atendem concomitantemente vários municípios, o que resulta em maior complexidade para o seu planejamento e operação (ANA, 2014b).

Para evitar conflitos pelo uso da água e garantir maior segurança hídrica às atividades produtivas e aos sistemas de abastecimento, devem-se adotar estratégias para atender às demandas futuras por água, tais como: reforçar o planejamento ambiental, elaborar e executar projetos de infraestrutura hídrica e desenvolver ações de enfrentamento às mudanças

climáticas no setor hídrico. Estas ações abrangem incentivo às práticas de otimização do uso da água, apoio ao desenvolvimento de modelos climáticos, desenvolvimento de modelos hidroclimáticos para bacias hidrográficas e reforços ao Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (BRASIL, 2008; ANA, 2015b).

Portanto, desenvolver e analisar modelos climáticos globais e regionais para cenários atuais e futuros no Brasil é de suma importância, pois a análise de riscos climáticos deve ser considerada como instrumento de gestão dos recursos hídricos, de forma a contribuir com a mitigação e adaptação aos impactos das mudanças climáticas nos ciclos hidrológicos e otimizar os usos múltiplos da água (BRASIL, 2008).

3.3. Padrões atmosféricos que influenciam a precipitação na Bacia do Alto Tietê

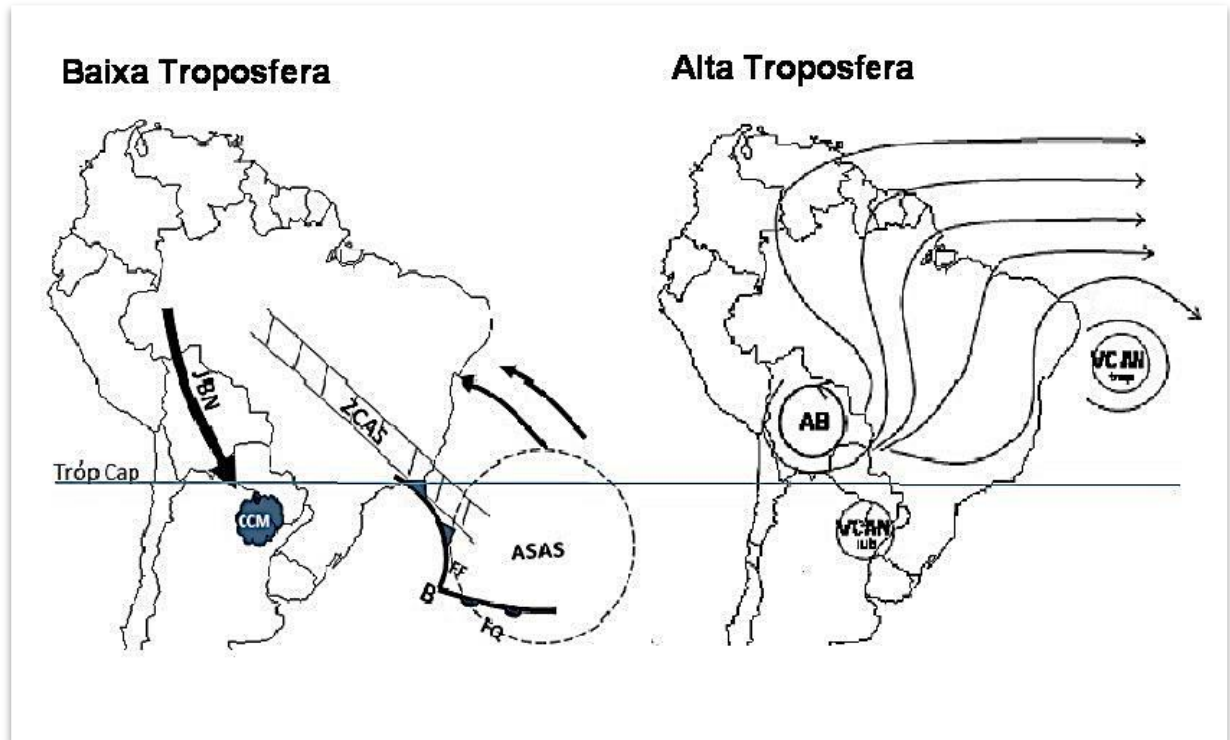
A distribuição espaço-temporal da precipitação é uma característica importante, pois influencia diretamente os aspectos físicos, biológicos e socioeconômicos de uma região. O conhecimento desse atributo contribui para subsidiar decisões quanto às medidas necessárias para minimizar os danos decorrentes da irregularidade das chuvas (MINUZZI *et al.*, 2007b). Assim, conhecer os sistemas meteorológicos que atuam direta ou indiretamente no regime pluvial da Bacia do Alto Tietê permitirá compreender o comportamento da precipitação na região, o que influi essencialmente em sua disponibilidade hídrica.

De modo geral, os principais sistemas atmosféricos que influenciam o clima e o padrão de chuvas na região Sudeste (Figura 1) e, conseqüentemente, na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê, são: a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs), o Anticiclone Tropical do Atlântico Sul (ASAS), a Alta da Bolívia (AB), os sistemas de frentes frias e quentes e as brisas marítimas e terrestres, bem como o fenômeno de variabilidade interanual El Niño Oscilação Sul (ENOS) (REBOITA *et al.*, 2010).

Na região Sudeste, a variabilidade sazonal de precipitação é tipicamente tropical, caracterizada por dois períodos bem definidos: um muito chuvoso, o verão, e o outro seco, o inverno. Os principais sistemas meteorológicos responsáveis pelo regime pluvial da região

são: a presença de frentes frias² de verão e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)³ (LIMA *et al.*, 2010).

Figura 1 - Representação esquemática dos principais sistemas atmosféricos atuantes na região Sudeste. Tem-se na baixa troposfera: o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), a baixa pressão (B), o Complexo Convectivo de Mesoescala (CCM), a Frente Fria (FF), a Frente Quente (FQ), o Jato de Baixos Níveis (JBN) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Na alta troposfera: a Alta da Bolívia (AB) e os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs)



Fonte: adaptado de Reboita *et al.*, 2010.

Durante o verão, o transporte da umidade nos baixos níveis troposféricos da ZCAS é afetado pela circulação associada ao Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), pois os eventos de chuva ocorrem quando os sistemas frontais e os ciclones subtropicais e extratropicais sobrepõem-se a ASAS. O intenso aquecimento radiativo da superfície nas regiões Amazônica e Centro-Oeste do Brasil contribuem para o desenvolvimento de atividade convectiva. Os movimentos convergentes associados à convecção, juntamente com o aquecimento diabático proveniente da liberação de calor latente por condensação promovem a

² Zona de transição entre duas massas de ar com propriedades distintas.

³ Banda de nebulosidade com orientação noroeste-sudeste com persistência mínima de quatro dias consecutivos e bem caracterizada durante os meses de verão (ALVES *et al.*, 2005).

ascensão do ar, contribuindo para o desenvolvimento de circulação anticiclônica em altos níveis, conhecido como Alta da Bolívia (AB) (REBOITA *et al.*, 2010).

Os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs) ⁴, que se formam próximos ao Nordeste do Brasil, estão frequentemente associados à AB. Os VCANs que afetam a região Sudeste com maior frequência se formam em latitudes tropicais e extratropicais sobre o oceano, Atlântico ou Pacífico Sul, e durante o seu ciclo de vida se deslocam até o Sudeste, ocasionando ventos e chuvas intensas. Além disso, também podem estar relacionados a episódios de geadas (LOURENÇO *et al.*, 1996).

Durante o verão, a AB contribui para a precipitação que ocorrem na região Centro-Oeste do Brasil, podendo estender-se até a região Sudeste, apresentando divergência na baixa troposfera e, na alta troposfera, movimentos verticais subsidentes nas zonas mais frias e confluência na área central do vórtice (NUNES *et al.*, 2009).

Os ventos alísios do nordeste da América do Sul deslocam-se em direção aos subtrópicos, transportando umidade, conhecidos como Jato de Baixos Níveis (JBN). O JBN é importante para a precipitação no centro-sul da América do Sul, porque a umidade transportada contribui para a formação de sistemas convectivos, especialmente os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) ⁵. O escoamento de noroeste do JBN pode convergir com o de nordeste induzido pela circulação do ASAS, resultando em uma banda de nebulosidade e intensificando a precipitação no Sudeste (REBOITA *et al.*, 2012).

Outro sistema que também induz a precipitação na Bacia do Alto Tietê no verão é a brisa marítima⁶ (VAREJÃO-SILVA, 2006). Apesar da brisa marítima na região não ser elevada, ela influencia a disponibilidade de umidade e as condições de temperatura, promovendo turbulências constantes, o que propicia chuvisco. Entretanto, quando interage com outros sistemas atmosféricos pode favorecer eventos de chuvas intensas. Sendo que, entre 1999-2002, 60% dos casos de enchentes ocorridos na região metropolitana de São Paulo estavam associados à penetração de brisa marítima (PEREIRA FILHO *et al.*, 2002).

⁴ Centros de baixa pressão originados na alta troposfera que possuem maior nebulosidade na direção do seu deslocamento e menores temperaturas em sua área central (FERREIRA *et al.*, 2009).

⁵ Aglomerados de nuvens que causam chuvas intensas e possuem tempo de vida médio de 12 horas.

⁶ Fenômeno de mesoescala originado pela diferença de temperatura diurna entre o continente e o oceano. Esta variação térmica gera um gradiente de pressão horizontal, com maior pressão sobre o oceano. A fim de restabelecer o equilíbrio térmico, o ar frio se desloca em direção ao continente (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Durante o inverno, as baixas precipitações estão associadas à atuação do ASAS – que se estende até o Sudeste do Brasil, inibindo a entrada de frentes e favorecendo a formação de nevoeiros e geadas – e à atuação dos VCANs que, dependendo de sua posição, podem ocasionar seca no estado de São Paulo (ITO & AMBRIZZI, 2000).

A principal fonte de variabilidade climática interanual global é o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS), um exemplo de interação oceano-atmosfera, que produz alterações na Temperatura da Superfície do Mar (TSM), na pressão, convecção tropical, vento e, sobretudo, na região do Oceano Pacífico, mas com reflexos em muitos lugares do globo, incluindo a região Sudeste. O ENOS é o aquecimento atípico do Oceano Pacífico Equatorial que, combinado com o enfraquecimento dos ventos alísios na mesma região, provoca mudanças na circulação atmosférica (GRIMM *et al.*, 1998).

Geralmente, os ventos alísios transportam uma parcela da água fria localizada ao longo da costa oeste da América do Sul até o centro do Oceano Pacífico Tropical, distribuindo, assim, a TSM no Oceano Pacífico mais fria ao leste e mais acalentada ao oeste. O fenômeno ENOS ocorre quando uma corrente de água tropical quente se move para o sul, aquecendo atipicamente a região centro-leste do Oceano Pacífico Tropical. O resultado é um aumento da pressão atmosférica no oeste do Pacífico e a diminuição da pressão ao leste, ocasionando o enfraquecimento dos ventos alísios e fortalecimento das contracorrentes, fazendo com que a água aquecida se dirija para a costa oeste da América do Sul (GRIMM *et al.*, 1998).

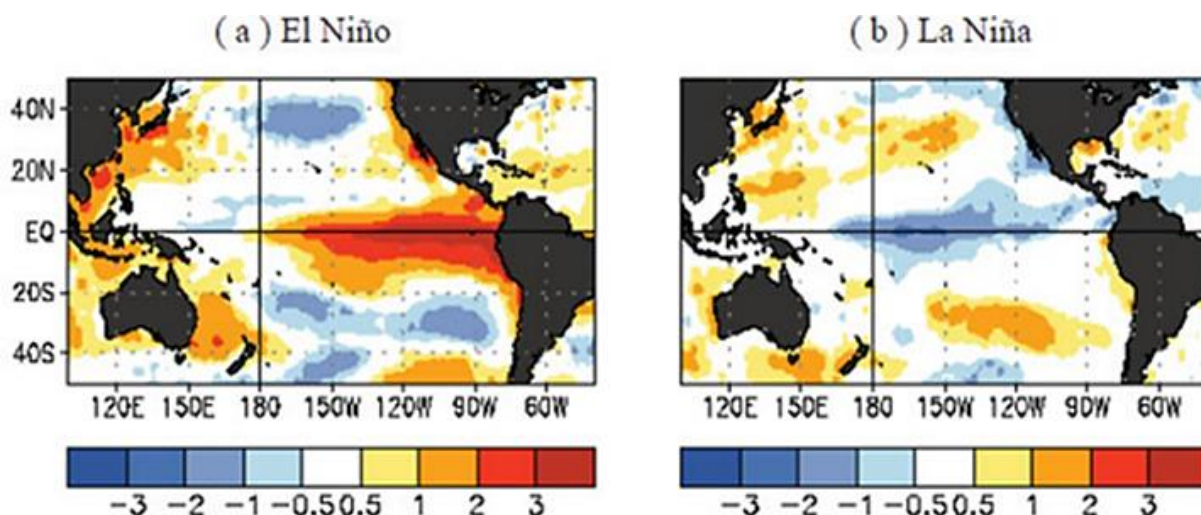
Assim, há variações dos fluxos de calor sensível e de vapor d'água próximo à superfície do Oceano Pacífico Equatorial para a atmosfera, e isto provoca mudanças na circulação atmosférica e na precipitação em escala global. Durante um ENOS classificado como forte, as temperaturas oceânicas podem variar entre 2 e 3,5°C acima do normal, entre a longitude de 180 graus (linha da data) e a costa da América do Sul, e essas áreas excepcionalmente quentes coincidem com as regiões de chuva tropical acima da média. Na região Sudeste o ENOS ocasiona o aumento da temperatura durante o verão e o inverno (OLIVEIRA *et al.*, 2001).

Normalmente, após o ENOS, os ventos alísios retornam ao estado normal. Entretanto, se eles ficarem mais fortes do que o habitual ocorrerá a fase oposta do ENOS, denominada La Niña. Este fenômeno é decorrente do arrefecimento das águas do Oceano Pacífico Equatorial e aumento na pressão atmosférica na região leste do Pacífico, por isso é conhecida como episódio frio ou fase positiva do ENOS (MINUZZI *et al.*, 2007a). Durante a La Niña, as temperaturas variam entre 1 e 3°C abaixo do normal, entre a longitude de 180 graus (linha da

data) e a costa da América do Sul, e essas regiões coincidem com as áreas de chuva tropical muito abaixo da média (OLIVEIRA *et al.*, 2001).

Na figura 2 é possível observar as anomalias de TSM em eventos de ENOS e La Niña. Embora o único impacto corroborado da La Niña na região Sudeste seja a diminuição de temperatura prevista para o verão, segundo Minuzzi *et al.* (2007a), eventos extremos de precipitação tendem a aumentar na região em episódios de La Niña, sobretudo em outubro e novembro do ano de início do fenômeno.

Figura 2 – Anomalias da temperatura da superfície do mar representando (a) El Niño de 1998 e (b) o evento de La Niña de 1989. Os tons em azul indicam regiões com temperaturas abaixo da média e tons avermelhados evidenciam locais com temperaturas oceânicas acima da média



Fonte: NOAA, 2015.

Em suma, as condições climáticas na região Sudeste apresentam grandes amplitudes térmicas e características transicionais entre sistemas tropicais e extratropicais, sendo uma zona de transição entre distintas massas de ar, como as correntes tropicais marítimas de leste-nordeste e as correntes de oeste-noroeste vindas da região Amazônica. A variabilidade interanual da região também é um aspecto marcante da distribuição temporal de chuva. Estes fatores dificultam as possibilidades de acerto das situações de tempo atmosférico, no que se refere ao seu comportamento futuro, o que reflete na dificuldade de planejamento para a gestão de recursos hídricos (NUNES *et al.*, 2009).

3.4 Modelos Climáticos Globais e cenários de emissões

Para lidar com os impactos das variações climáticas foi desenvolvida uma série de modelos numéricos com o objetivo de simular o passado, o presente e o futuro das diferentes regiões do globo. Estes modelos numéricos compreendem representações matemáticas formuladas a partir das equações diferenciais governantes do sistema climático, capazes de simular os processos que afetam o clima e tempo, bem como seu comportamento presente e futuro (ARAVÉQUIA & QUADRO, 2013). O avanço tecnológico computacional aliado ao aumento da compreensão dos processos físicos e químicos da atmosfera, que orientam o clima global, propiciou o aperfeiçoamento dos modelos numéricos que estão entre as ferramentas mais utilizadas para estudar as mudanças climáticas e os impactos das atividades antrópicas no clima (XIANFU, 2006).

Os modelos climáticos são baseados em princípios físicos que tentam reproduzir aspectos importantes do clima observado. O uso de supercomputadores possibilitou que os modelos possuíssem resolução cada vez mais detalhada, o que permite verificar alterações climáticas regionais. Estes aspectos contribuem para a confiança na adequação dos modelos em estudos de detecção e projeção das mudanças climáticas, apesar das incertezas em simular nuvens e representar processos de ciclo de enxofre e de fontes naturais e sumidouros (FLATO *et al.*, 2013).

De acordo com Betts *et al.* (2011), os modelos numéricos podem ser classificados em modelos globais, capazes de resolver equações sobre todo o globo sem se ater a particularidades locais, e modelos regionais, que representam fenômenos mais localizados com maior resolução e tendem a ser mais eficientes ao retratar o clima de uma área específica.

No que tange ao modelo climático global acoplado, o mundo é dividido em uma grande célula abrangendo toda superfície do planeta, oceanos e atmosfera, a partir da qual o modelo faz cálculos matemáticos baseados nas leis da física com ajuda de ferramentas da computação. Os modelos acoplados levam em conta a interação entre oceano e atmosfera e a troca de informações que envolvem fluxos cada vez mais complexos, como os processos biológicos (BETTS *et al.*, 2011).

Apesar dos modelos climáticos serem as ferramentas mais confiáveis para projeções do clima futuro, capazes de indicar às prováveis alterações climáticas, sabe-se que nenhum estudo é capaz de prever um evento climático futuro com precisão e tal fator se deve às incertezas relacionadas a: emissões de gases de efeito estufa; que variam de acordo com aspectos socioeconômicos; mudanças demográficas; fontes de energia; concentração de gases

na atmosfera e o tempo de emissão; transformações do uso e ocupação do solo; a variabilidade natural do tempo e do clima, que são caóticos por natureza e sensíveis a mudanças mínimas, que muitas vezes não podem ser mensuráveis; e incertezas da modelagem limitadas ao nosso conhecimento e compreensão sobre o sistema climático e a capacidade de modelá-lo (CHOU *et al.*, 2014; AMBRIZZI *et al.*, 2007).

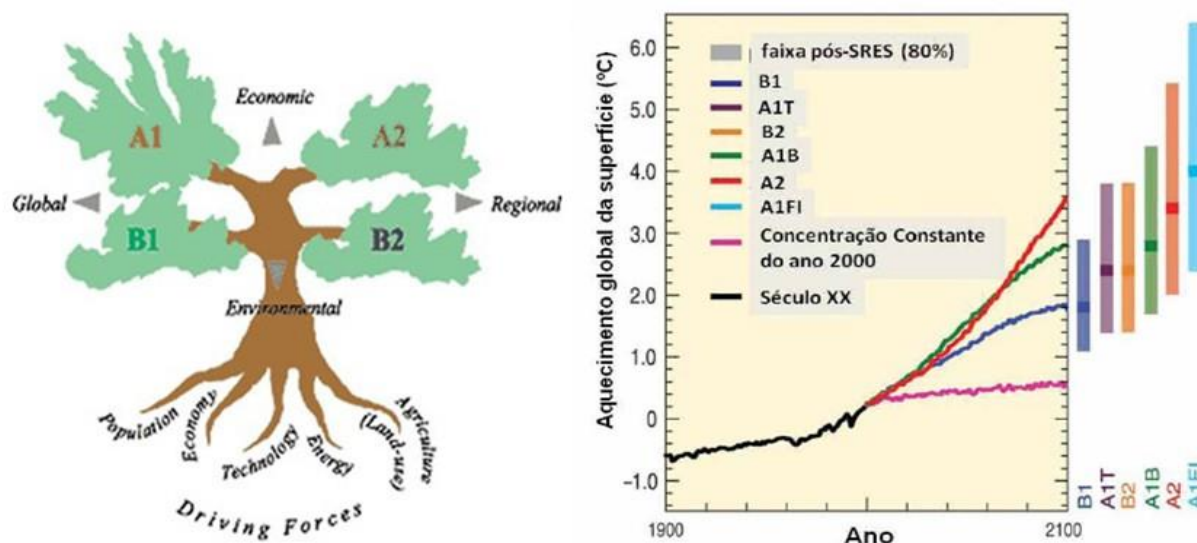
Outros fatores que podem agravar a imprecisão dos modelos é a escala temporal, pois muitos modelos globais do IPCC têm dados sazonais ou mensais, mas a identificação de eventos extremos só é possível com dados diários (AMBRIZZI *et al.*, 2007). Segundo Flato *et al.* (2013), as fontes de erros do modelo e incertezas dependem da escolha do método, do conjunto de dados limitados utilizados, de questões relacionadas à resolução e complexidade do modelo e da incerteza observacional em dados de avaliação e parametrizações.

Desde a década de 1990, o IPCC realizou uma série de estudos com os modelos climáticos globais dos principais centros de pesquisas e modelagem internacionais. Para estes estudos foram utilizados cenários de emissões em comum, que são representações de longo prazo de prováveis emissões de substâncias que têm efeito radiativo potencial, a partir da combinação e interação de assunção sobre forças controladas, como condições socioeconômicas, demográficas, mudanças tecnológicas, tendências políticas e econômicas locais e regionais, entre outras (NAKICENOVIC *et al.*, 2000).

O primeiro conjunto de cenários foi desenvolvido em 1990, o *Scientific Assessment 90* (SA90), composto por quatro cenários de emissão. Em seguida, foram desenvolvidos os cenários IPCC *Scenarios 92* (IS92), publicados como relatório suplementar e utilizados no Segundo Relatório (SAR), em 1996, com a representação de seis cenários. Em 2000 foi desenvolvido o *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES), utilizado no Terceiro Relatório (TAR), em, 2001 e no Quarto Relatório (AR4) em 2007.

De acordo com Nakicenovic *et al.* (2000), as estimativas de emissões de gases de efeito estufa do AR4 para o século XXI estão descritas em quatro cenários/famílias (Figura 3) com representações diferentes de aspectos demográficos, sociais, econômicos, ambientais e tecnológicos. A família A1 é caracterizada por rápido crescimento econômico, globalização dominante, introdução de tecnologias novas e eficientes com crescente interação social e cultural e redução de diferenças regionais, subdividida em três grupos de acordo com a ênfase tecnológica: A1FI (uso intensivo de fontes fósseis), o A1T (uso de fontes de energia não fóssil) e o A1B (equilíbrio entre todas as fontes).

Figura 3 – Árvore das famílias do SRES à esquerda e aquecimento médio global projetado para os cenários de emissões do AR4 à direita



Fonte: IPCC, 2007.

Na família B1, a estrutura econômica muda rapidamente com a economia de serviços e informação, bem como a introdução de tecnologias limpas, recursos eficientes e redução na utilização de materiais fósseis. O desenvolvimento econômico na família B2 é intermediário, com ênfase em soluções locais para sustentabilidade econômica, social e ambiental. O cenário A2 projeta um mundo com fortalecimento de identidades culturais regionais e um elevado crescimento populacional associado ao lento desenvolvimento tecnológico e baixos níveis de desenvolvimento econômico, com as concentrações de CO₂ crescentes até 2050 e depois decrescentes, chegando até 720 ppm em 2100 (NAKICENOVIC *et al.*, 2000).

Desde o AR4, os modelos climáticos continuaram sendo desenvolvidos e aprimorados, buscando representar de forma mais acurada os ciclos biogeoquímicos, microfísica das nuvens e as interações do ozônio e dos aerossóis na atmosfera, variáveis que podem ocasionar importantes alterações climáticas (FLATO *et al.*, 2013).

No Quinto Relatório (AR5) do IPCC fez-se uso das Vias de Concentração Representativas – RCPs (em inglês, *Representative Concentration Pathways*) como entrada para a geração dos cenários climáticos futuros. Os RCPs formam um conjunto de projeções com diferentes cenários de concentrações de gases de efeito estufa. Os RCPs não são cenários totalmente integrados, ou seja, não são um pacote completo de projeções socioeconômicas, de emissões e climáticas. São apenas conjuntos consistentes de projeções dos componentes da forçante radiativa, que irão servir como entrada para a modelagem do clima e da química atmosférica. Os RCP recebem seu nome a partir dos níveis das forçantes radiativas, assim,

RCP χ implica um cenário no qual a forçante radiativa corresponde a χ W.m⁻². O AR5 faz uso de quatro cenários de RCP, com forçantes radiativas de 2,6 W.m⁻², 4,5 W.m⁻², 6,0 W.m⁻² e 8,5 W.m⁻² (IPCC, 2013).

O RCP 2.6 é o cenário mais otimista em relação aos demais e projeta um cenário de emissões de gases do efeito estufa estabilizado pelos próximos dez anos, com aumento da temperatura terrestre entre 0,3 e 1,7°C e acréscimo do nível dos oceanos entre 26 e 55 centímetros de 2010 a 2100. O cenário RCP 4.5 projeta um aumento da temperatura terrestre entre 1,1 e 2,6 °C e no nível do mar entre 32 e 63 centímetros. O RCP 6.0 projeta um acréscimo da temperatura entre 1,4 e 3,1 °C e do nível do mar entre 33 e 63 centímetros. E o RCP 8.5 corresponde ao cenário mais pessimista e projeta altas emissões de gases de efeito estufa, com um aumento da superfície terrestre entre 2,6 e 4,8°C e aumento do nível dos oceanos entre 45 e 82 centímetros (IPCC, 2013).

Há elevada confiança de que os modelos climáticos reproduzem as características gerais do aumento da temperatura média da superfície em escala global anual e o desempenho dos modelos está ficando cada vez melhor, o que pode ser demonstrado com métricas quantitativas baseadas em observações históricas. Embora as projeções climáticas futuras não possam ser avaliadas diretamente, os modelos climáticos são baseados, em grande medida, em princípios físicos verificáveis e são capazes de reproduzir muitos aspectos importantes da resposta da variação do clima em função de sua forçantes. Desta forma, eles fornecem uma visualização cientificamente sólida da resposta do clima a diferentes cenários de forçante antropogênica (FLATO *et al.*, 2013).

Atualmente, ainda existem poucos estudos sobre a utilização de simulações de Modelos Climáticos Globais (GCM) e projeções futuras em modelos hidrológicos para estimativa da vazão, visando à análise da disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas brasileiras, especificamente na região da Bacia do Alto Tietê. A maioria das pesquisas utiliza modelos hidrológicos conceituais, como foi o caso de Silveira *et al.* (2014) e Schardong *et al.* (2014), que aplicaram o modelo conceitual *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP).

Entretanto, Milly *et al.* (2005) fizeram uso de um modelo hidrológico empírico para investigar os impactos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica sobre diferentes partes do globo, por meio do *ensemble* de 12 GCM, desenvolvidos para o AR4, incluindo o modelo MRI. O cenário de emissões adotado foi o A1B e para a região da Bacia do Prata-Paraná as análises de todos os modelos mostraram um aumento, entre 10 e 40%, dos valores médios da vazão na bacia para o período de 2041-2060, em relação ao padrão médio observado.

Já Silveira *et al.* (2014) avaliaram cenários futuros de vazão nos reservatórios brasileiros, visando caracterizar os impactos das mudanças climáticas no setor elétrico. Para isso, os autores fizeram uso de 6 GCM, pertencentes ao AR4, no período de 2010-2099, para os cenários de emissões A1B, B1 e A2. Os resultados nos reservatórios Itaipu e Nova Avanhandava, este último localizado na Bacia do rio Tietê, indicaram uma redução da vazão, sendo que o cenário A2, mais pessimista, estabeleceu uma variação percentual máxima de -4,8%, no Reservatório Nova Avanhandava, e de -3% em Itaipu, até o final do século.

Schardong *et al.* (2014) averiguaram os impactos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica do Sistema Cantareira, por meio da comparação entre as séries históricas observadas e a vazão reconstruída com as saídas de precipitação de 16 GCM do AR5, dentre eles o modelo MRI, para três cenários de emissões (RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5). Os resultados demonstraram uma tendência de acréscimo da vazão média no reservatório Jaguari-Jacareí e decréscimo nos demais reservatórios constituintes do Sistema Cantareira.

4. DADOS E METODOLOGIA

4.1. Caracterização geral da área de estudo

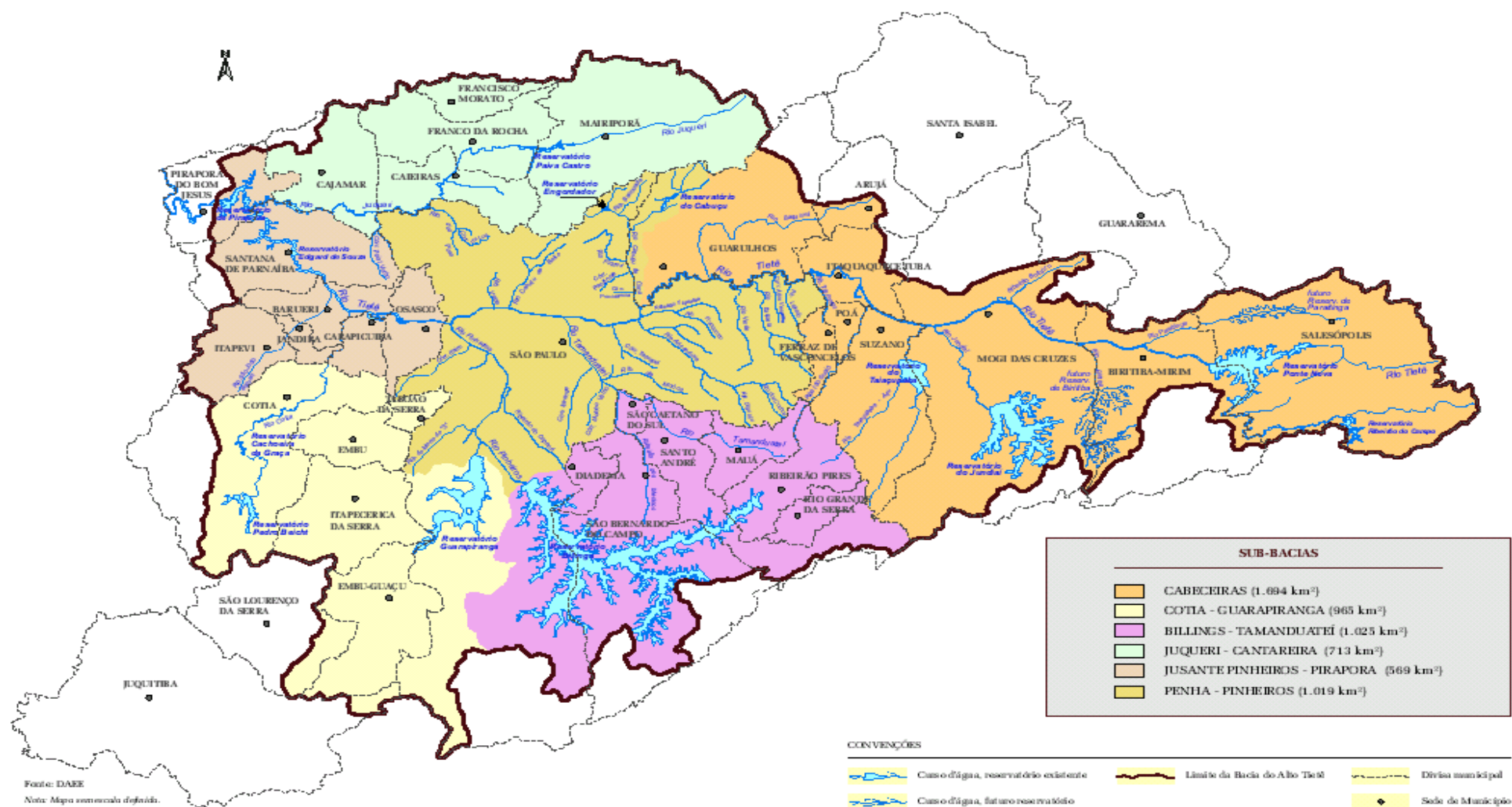
A Bacia do Alto Tietê está situada na região sudeste do estado de São Paulo, com uma área de drenagem de 5.868 km², formada por 34 municípios, uma população de aproximadamente 20 milhões de habitantes e com uma densidade demográfica média de 10.232 hab/km². Fazem parte da BHAT as cidades de São Paulo, Guarulhos, Osasco, todas as municipalidades da Região do Grande ABC, Barueri, Carapicuíba, Cotia, Suzano, Poá, Santana de Parnaíba, Biritiba Mirim, Pirapora do Bom Jesus, Jandira, Itaquaquecetuba, Mogi das Cruzes, Salesópolis e Paraibuna (FUSP, 2009; HIRATA *et al.*, 2001).

O Alto Tietê está inserido na região natural de planalto, composta pelo arcabouço geológico do maciço cristalino da Serra do Mar, formado por embasamento rochoso com grande heterogeneidade de litotipos. Localizada no bioma Mata Atlântica, a bacia apresenta as fitofisionomias: campos naturais, floresta ombrófila densa alto montana, floresta ombrófila densa sobre turfeira e algumas formações de várzeas com brejos nos cursos d'água (FUSP, 2001).

A BHAT tem uma precipitação total média de 1.400 mm/ano. Sua nascente é no rio Paraitinga, em Salesópolis, e seu talvegue estende-se até a barragem de Rasgão, no Reservatório de Pirapora. Os principais afluentes na margem direita são os rios Baquirivunguaçu, Cabuçu de Cima, Juqueri e Paraitinga, e, na margem esquerda, os rios Aricanduva, Biritiba-Mirim, Cotia, Pinheiros, São João do Barueri e Tamanduateí (FUSP, 2009).

A Bacia do Alto Tietê divide-se em seis sub-regiões hidrográficas: Tietê-Cabeceiras, Billings-Tamanduateí, Pinheiros-Pirapora, Penha-Pinheiros, Cotia-Guarapiranga e Juqueri-Cantareira (Figura 4).

Figura 4 – Mapa da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (BHAT) e suas sub-bacias



Fonte: DAEE, 2014.

4. 2. DADOS

4.2.1. O modelo climático MRI-JMA

O modelo empregado neste trabalho foi o Modelo Climático Global Atmosférico de Alta Resolução (AGCM) desenvolvido pelo *Meteorological Research Institute* (MRI) do Instituto Meteorológico do Japão e pela *Japanese Meteorological Agency* (JMA). Este modelo foi desenvolvido para fazer parte do conjunto de modelos climáticos de circulação global utilizados nos relatórios do IPCC para geração de projeções futuras (IPCC, 2007; IPCC, 2013).

O modelo MRI-JMA tem uma excelente representação de fenômenos em escala regional e clima local. Por meio do aumento da resolução horizontal, exibe de forma adequada os efeitos topográficos, de processos físicos e da interface continente/oceano, possibilitando um melhoramento das previsões na escala sinótica e sub-sinótica e mantendo a qualidade de reprodução do clima global (MIZUTA *et al.*, 2006).

As saídas do modelo do MRI-JMA possuem uma resolução de grade de 20 km horizontal, com o número de onda de truncamento triangular de 959 e 60 camadas verticais, com topo em 0.1 hPa. Atualmente, esta é a resolução mais alta de um AGCM usado em experimentos de aquecimento global (ALVES & PESQUERO, 2009). Devido à alta resolução do MRI-JMA do AR4, descrita anteriormente, optou-se por não usar o MRI-JMA do AR5 com os novos cenários RCPs disponíveis no *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5), pois a resolução é de $1,8^\circ \times 2,8^\circ$, aproximadamente 198 km x 308 km (PINHEIRO *et al.*, 2014), e para a escala espacial da BHAT não se teria uma simulação adequada.

Segundo Marengo *et al.* (2009), a maioria das incertezas associadas às projeções de modelos climáticos deve-se à inadequação das escalas espaciais que estes modelos utilizam para as representações físicas de processos, pois com uma grade de resolução relativamente baixa perde-se muitas informações para análise dos dados. Desta forma, um modelo com grade de resolução mais alta pode permitir uma melhor representação das condições hidrometeorológicas na Bacia do Alto Tietê.

O modelo MRI-JMA é o único modelo climático global de 20 km horizontais aplicado em estudos de mudanças climáticas globais com período de integração de até 25 anos e sua aplicação limita-se a um único experimento, desenvolvido para o AR4 (KITOH *et al.*, 2011). Neste trabalho foram utilizadas as saídas do modelo climático MRI-JMA (Figura 5),

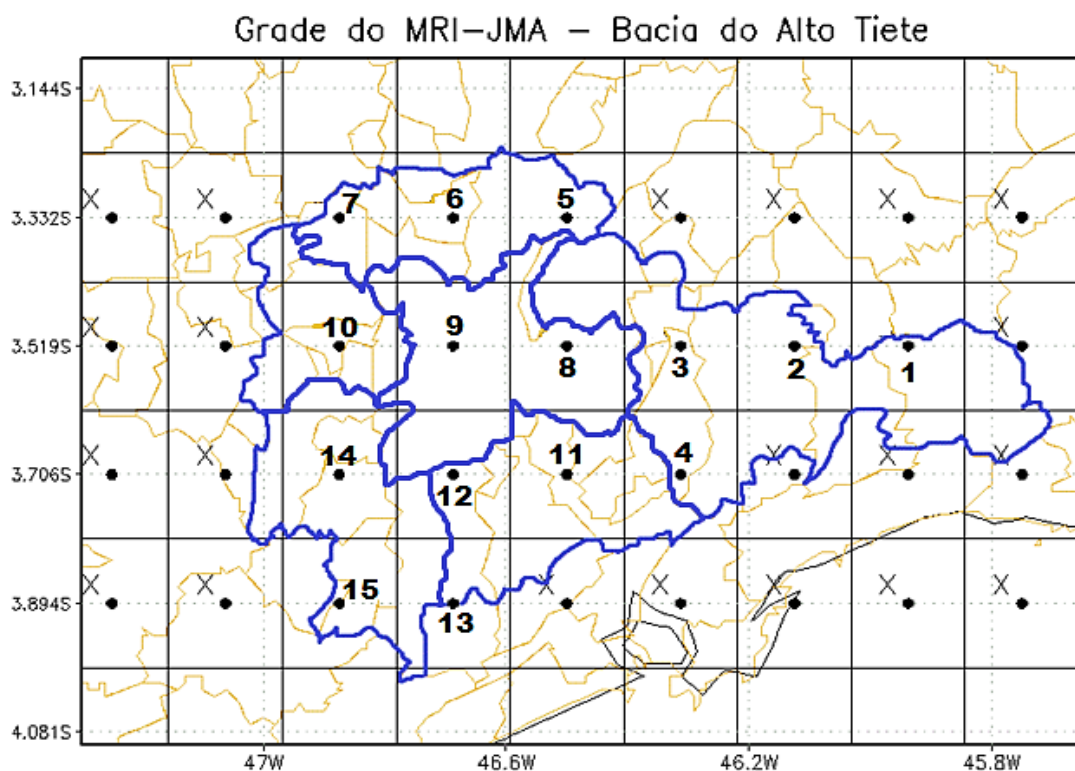
especificamente das variáveis de precipitação e temperatura do ar, na escala mensal, para os períodos 1979-2003 (clima) e 2017-2039 (*near-future*, cenário futuro), para o cenário de emissões A2 do AR4.

O cenário de emissões A2 é intermediário entre os seis cenários existentes, sendo o B1 o mais otimista e o A1F1 o mais pessimista. Entretanto, ele projeta um mundo com as maiores concentrações de CO₂ até 2050 (NAKICENOVIC *et al.*, 2000). Esta escolha deve-se ao fato de que a utilização de um cenário com maior anomalia climática contribuirá para subsidiar ações de adaptação e mitigação de caráter preventivo, além de ser a única rodada do modelo disponível em alta resolução.

Os dados do modelo foram processados utilizando o *Grid Analysis and Display System* (GrADS), *software* mais difundido no mundo para facilitar o acesso, manipulação e visualização de dados pontuais e em grades de modelos climáticos (DOTY, 1992).

A Figura 5 mostra a resolução espacial do modelo climático MRI-JMA na área da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. Cada ponto representa o centro da grade de resolução do modelo, que possui 20 km na horizontal. Para determinar a precipitação e temperatura de cada sub-bacias, trabalhou-se com as médias mensais da variável climática de todos os pontos de grade do modelo, que estão inseridos dentro de cada uma das sub-bacias.

Figura 5 – Grade do modelo climático MRI-JMA com os pontos do modelo

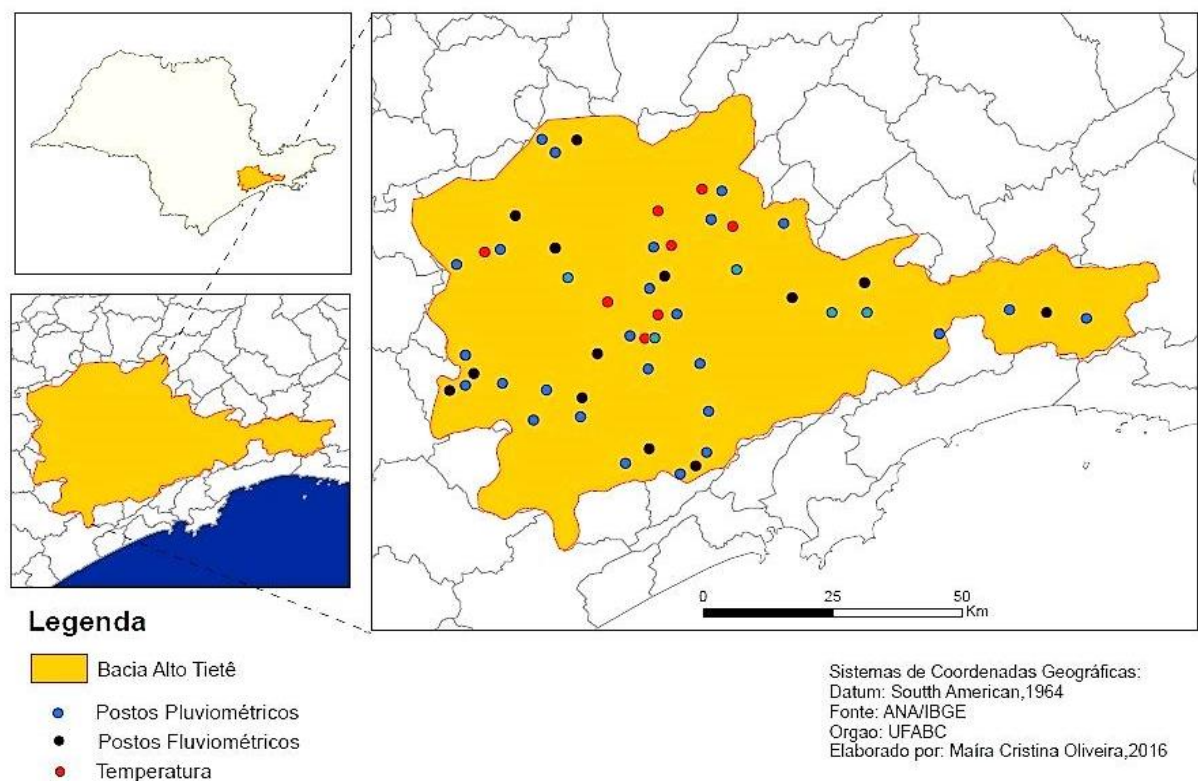


Para a Sub-bacia Tietê-Cabeceiras foram considerados os pontos 1, 2, 3 e 4. Na Sub-bacia Juqueri-Cantareira foram avaliados os pontos 5, 6 e 7. A Sub-bacia Penha-Pinheiros é formada pelos pontos 8 e 9. Já a Sub-bacia Pinheiros-Pirapora é composta pelo ponto 10. Para a Sub-bacia Billings-Tamanduateí foram contemplados os pontos 11, 12 e 13, e na Sub-bacia Cotia-Guarapiranga os pontos 14 e 15 (Figura 5).

4.2.2. Levantamento de dados observacionais

O primeiro procedimento realizado foi a obtenção de dados hidrometeorológicos diários das estações fluviométricas e pluviométricas existentes na bacia com longas séries históricas (Figura 6). Para uma boa representação climatológica, o conjunto de dados utilizados possui registros no período de 1961 a 2014, contendo 31 séries históricas de precipitação, 14 séries históricas de vazão e 8 séries históricas de temperatura (Tabela 1).

Figura 6 – Mapa da localização da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê com a distribuição dos postos pluviométricos, fluviométricos e postos de amostragem com séries históricas de temperatura do ar



De modo geral, o levantamento foi realizado por meio de inventários disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA), Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp). Também, foram utilizados dados de temperatura do ar mensal para as sub-regiões hidrográficas oriundos do INMET, do Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (AGRITEMPO), da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo.

4.3. METODOLOGIA

A fim de alcançar os objetivos propostos, foram realizados alguns procedimentos metodológicos que estão delineados na Figura 7. É importante ressaltar que o modelo climático MRI-JMA não simula algumas variáveis hidrológicas, como é o caso da vazão. Assim, para atingir os objetivos propostos foi construído um modelo hidrológico empírico para a estimativa da vazão, que teve como base os dados de precipitação e temperatura observados. Posteriormente o modelo empírico foi utilizado para gerar as vazões para um cenário futuro.

A seguir, todos os procedimentos metodológicos serão detalhados.

Tabela 1 - Localização dos postos pluviométricos, fluviométricos e de temperatura nas sub-bacias da BHAT

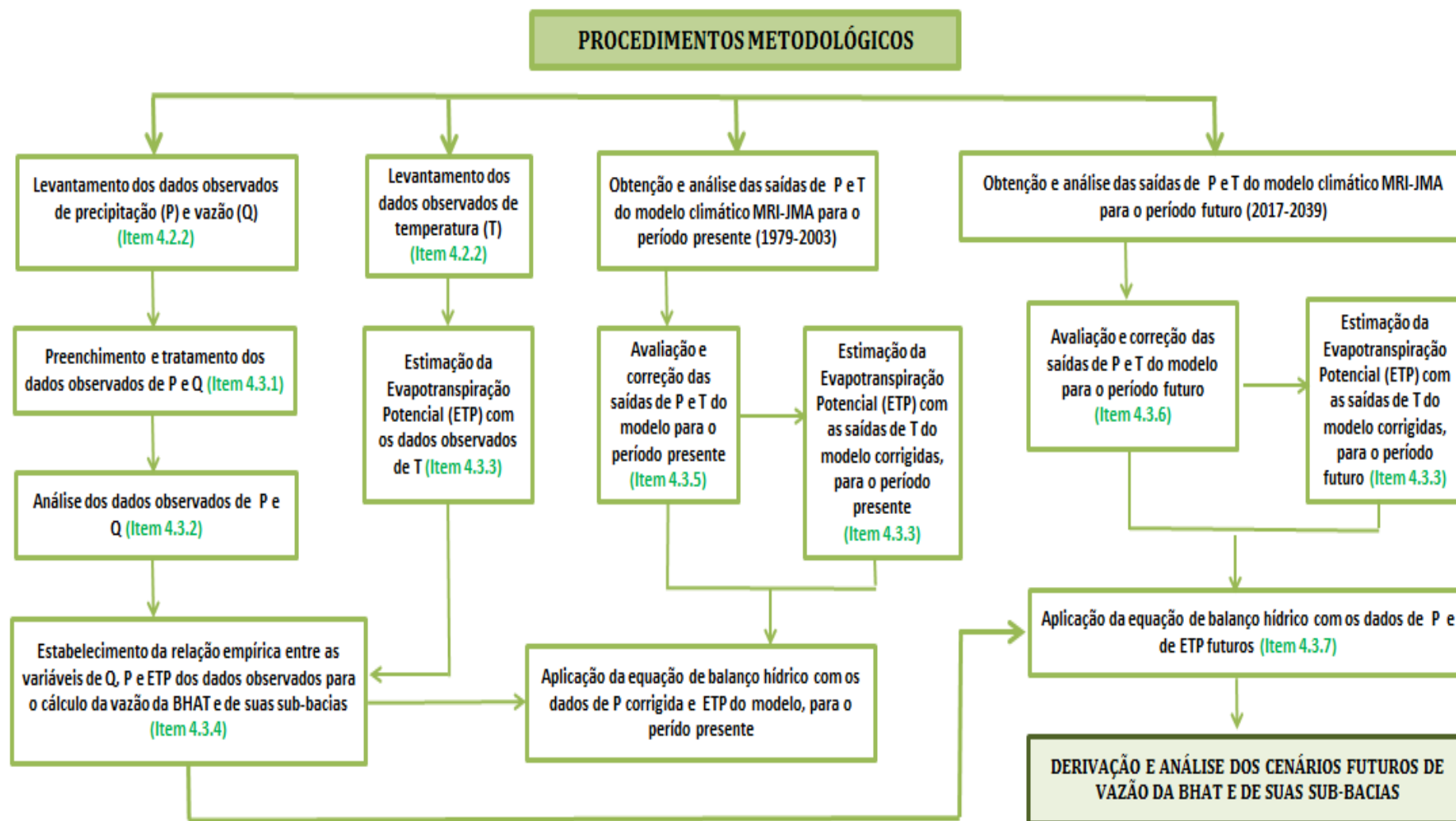
(Continua)

SUB-REGIÕES HIDROGRÁFICAS	MUNICÍPIO	POSTO	FONTE	NOME	CÓDIGO	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE
TIETÊ – CABECEIRAS	Biritiba Mirim	Pluviométrico	ANA	BIRITIBA MIRIM	2346101	23°34'	46°02'	760m
	Itaquaquecetuba	Pluviométrico	DAEE	MONTE BELO	E3-091	23°29'	46°22'	790m
	Mogi das Cruzes	Pluviométrico	ANA	VARINHAS	2346103	23°35'09''	46°15'20''	760m
	Salesópolis	Pluviométrico	DAEE	PONTE NOVA	E2-112	23°34'	45°58'	800m
	Salesópolis	Pluviométrico	DAEE	USINA SALESÓPOLIS	E2-131	23°34'	45°50'	790m
	Guarulhos	Pluviométrico	INMET	CUMBICA	83075	23°43'	46°46'	735m
	Mogi das Cruzes	Pluviométrico	DAEE	ESTALEIRO DAEE	E3-097	23°31'	46°12'	730m
	Guarulhos	Pluviométrico	DAEE	BOM SUCESSO	E3-002	23°25'	46°24'	770m
	Mogi das Cruzes	Fluviométrico	DAEE	SANTO ANGELO	3E-16	23°34'48''	46°13'28''	-
	Mogi das Cruzes	Fluviométrico	DAEE	ESTALEIRO DAEE	3,00E-08	23°30'54''	46°12'14''	730m
	Salesópolis	Fluviométrico	ONS	PONTE NOVA – ALTO TIETÊ	160	-	-	-
	Guarulhos	Temperatura	AGRITEMPO	GUARULHOS	-	23°43'	46°47'	746m
	Guarulhos	Temperatura	INMET	CUMBICA	83075	23°43'	46°46'	735m
BILLINGS – TAMANDUATEÍ	Mauá	Pluviométrico	DAEE	SERTÃOZINHO	E3-237	23°42'	46°29'	790m
	São Caetano do Sul	Pluviométrico	DAEE	VILA PROSPERIDADE	E3-085	23°37'	46°33'	730m
	São Caetano do Sul	Pluviométrico	DAEE	SÃO CAETANO DO SUL	E3-022	23°38'	46°35'	740m
	Santo André	Pluviométrico	DAEE	CAMPESTRE	E3-159	23°38'53''	46°32'47''	0m
	São Bernardo do Campo	Pluviométrico	DAEE	RECALQUE ABC	E3-142	23°45'	46°32'	840m
	São Bernardo do Campo	Pluviométrico	DAEE	RIO ACIMA	E3-244	23°41'	46°35'	760m
	São Bernardo do Campo	Pluviométrico	DAEE	RUDGE RAMOS	E3-150	23°40'	46°34'	780m
	São Bernardo do Campo	Fluviométrico	ONS	PEDRAS	116	-	-	-
	São Bernardo do Campo	Fluviométrico	ONS	BILLINGS	118	-	-	-
	São Caetano do Sul	Temperatura	CETESB	SÃO CAETANO DO SUL	86	23°37'	46°33'	745m
JUQUERI – CANTAREIRA	Franco da Rocha	Pluviométrico	DAEE	FRANCO DA ROCHA	E3-047	23°20'	46°41'	740m
	Franco da Rocha	Pluviométrico	ANA	FRANCO DA ROCHA	2346098	23°19'59''	46°43'58''	740m
	Franco da Rocha	Fluviométrico	CETESB	RESERVATÓRIO PAIVA CASTRO	JQUJ00900	-	-	-

Tabela 2 - Localização dos postos pluviométricos, fluviométricos e de temperatura nas sub-bacias da BHAT*(Conclusão)*

SUB-REGIÕES HIDROGRÁFICAS	MUNICÍPIO	POSTO	FONTE	NOME	CÓDIGO	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE
PENHA – PINHEIROS	São Paulo	Pluviométrico	DAEE	NOSSA SENHORA DO Ó	E3-033	23°28'	46°43'	790m
	São Paulo	Pluviométrico	DAEE	SANTO AMARO	E3-006	23°39'	46°42'	764m
	São Paulo	Pluviométrico	DAEE	INSTITUTO BIOLÓGICO	E3-090	23°35'	46°39'	760m
	São Paulo	Pluviométrico	DAEE	OBSERVATÓRIO IAG	E3-035	23°39'	46°38'	780m
	São Paulo	Pluviométrico	DAEE	CONGONHAS	E3-052	23°38'	46°39'	800m
	São Paulo	Pluviométrico	ANA	ERMELINDO MATARAZZO	2346100	23°38'51"	46°28'16"	730m
	São Paulo	Fluviométrico	ONS	TRAÇÃO	104	-	-	-
	São Paulo	Fluviométrico	ONS	PEDREIRAS	109	-	-	-
	São Paulo	Fluviométrico	ONS	GUARAPIRANGA	117	-	-	-
	São Paulo	Temperatura	AGRITEMPO	SÃO PAULO	-	23°50'	46°62'	746m
	São Paulo	Temperatura	IAG	OBSERVATÓRIO IAG	E3-035	23°39'	46°38'	780m
	São Paulo	Temperatura	INMET	MIRANTE DE SANTANA	83781	23°5'	46°61'	792m
COTIA – GUARAPIRANGA	São Paulo	Temperatura	AGRITEMPO	PARQUE ESTADUAL ALBERTO LOFRGREN	-	23°45'	46°63'	785m
	Itapecerica da Serra	Pluviométrico	DAEE	MOMBACA	E3-068	23°46'	46°50'	790m
	Itapecerica da Serra	Pluviométrico	DAEE	ALDEINHA	E3-014	23°47'	46°55'	860m
	Itapecerica da Serra	Pluviométrico	DAEE	ITAPECERICA DA SERRA	E3-016	23°43'	46°51'	910m
	São Paulo	Pluviométrico	DAEE	PARELHEIROS	E3-243	23°50'	46°44'	780m
	Cotia	Pluviométrico	DAEE	CACHOEIRA DA GRAÇA	E3-034	23°39'	46°57'	880m
	Cotia	Pluviométrico	DAEE	PEDRO BEICHT	E3-027	23°43'	46°58'	920m
	São Paulo	Fluviométrico	SABESP	GUARAPIRANGA	-	-	-	737m
PINHEIROS – PIRAPORA	Cotia	Fluviométrico	SABESP	CACHOEIRA DA GRAÇA	-	23°37'	46°57'	882m
	Cotia	Fluviométrico	SABESP	PEDRO BEICHT	-	23°43'	46°59'	933m
	Itapevi	Pluviométrico	DAEE	AMADOR BUENO	E3-263	23°32'	46°59'	770m
	Santana de Parnaíba	Pluviométrico	DAEE	SANTANA DE PARNAIBA	E3-020	23°27'	46°55'	720m
	Santana de Parnaíba	Fluviométrico	ONS	BOA ESPERANÇA	161	-	-	-
	Santana de Parnaíba	Fluviométrico	ONS	EDGARD DE SOUZA	190	-	-	-
	Barueri	Temperatura	INMET	BARUERI	86908	23°52'	46°87'	-

Figura 7 – Fluxograma das etapas metodológicas para a estimativa da vazão



4.3.1. Preenchimento e tratamento dos dados observados

Após a aquisição dos dados observados, eles foram padronizados e organizados em um novo banco de dados (planilha). Em registros de estações hidrometeorológicas é recorrente a existência de falhas devido a problemas operacionais, tais como a falta de observador, avarias nos equipamentos de medição e/ou imperícia do operador (SALVADOR & SANTOS, 2010). A técnica adotada para estimar os dados faltantes em séries de precipitação e vazão é conhecida como preenchimento de falhas (TUCCI & BELTRAME, 2001).

Os dados pluviométricos e fluviométricos faltantes das séries históricas foram preenchidos com a técnica de regressão linear múltipla (Equação 1):

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + \dots + a_n \cdot X_n \quad (1)$$

Em que as estações com dados faltantes foram classificadas como variáveis dependentes (Y) e estabeleceu-se uma relação com as variáveis independentes, séries com dados completos (X) nos postos vizinhos da mesma sub-bacia (n). Para o estabelecimento da equação da regressão linear múltipla, a série de dados faltantes e as séries utilizadas para preenchimento devem possuir um coeficiente de correlação igual ou superior a 0,80 (OLIVEIRA *et al.*, 2010).

4.3.2. Análise dos dados observacionais

Inicialmente foram avaliadas as séries históricas fluviométricas e pluviométricas por meio de técnicas estatísticas que ponderem os comportamentos médios e ciclos de padrões climatológicos anuais e sazonais, permitindo verificar tendências lineares ao longo do período estudado.

A OMM estabelece que para se determinar a climatologia de um local devem-se avaliar as normais climatológicas, ou seja, valores médios de uma variável climática para um período relativamente longo, uniforme e superior a três décadas consecutivas (NUNES & LOMBARDO, 1995). Neste trabalho foi avaliada a climatologia sazonal de precipitação das sub-bacias do Alto Tietê para o período de 1961 a 2014 e o padrão médio mensal de vazão para o mesmo período.

A variabilidade climática é a alteração dos parâmetros climáticos em torno da média climatológica, sem que haja mudança no clima, e é expresso a partir de um padrão estatístico,

sendo que a variabilidade interanual é a flutuação do parâmetro climático entre os anos de estudo. Por meio da variabilidade interanual é possível observar o comportamento padrão da variável de uma determinada região e estipular sua tendência, ou seja, a propensão estatística para manter um comportamento que sobe, desce ou se mantém nivelado ao longo dos anos. A tendência foi estimada por meio de uma função linear (Equação 2), na qual Y é a previsão para o período de análise, α é a intercepção no eixo Y , β é o coeficiente angular e X é o período de análise (PINTO & AGUIAR NETO, 2008; NUNES & LOMBARDO, 1995).

$$Y = \alpha + \beta X \quad (2)$$

A fim de verificar a significância estatística das tendências, considerou-se duas hipóteses: H_0 – Tendência linear = 0 e H_1 – Tendência linear $\neq 0$.

Para aceitar ou recusar a hipótese nula (H_0), estabelece-se o p-valor ou p-value, que é a probabilidade de se obter uma estatística de teste igual ou mais extrema que aquela observada em uma amostra, sob a hipótese nula. Em termos gerais, um valor-p pequeno significa que a probabilidade de obter um valor da estatística de teste como o observado é muito improvável, levando, assim, à rejeição da hipótese nula.

Quando se utiliza uma amostra para realizar inferência, pode-se cometer dois tipos de erro: erro tipo I, quando rejeitamos H_0 , e o erro tipo II, quando não rejeitamos H_0 . A probabilidade de cometermos um erro tipo I é chamada de nível de significância (α). Em estudos climatológicos, fixa-se o nível de significância (α) entre 5 e 10%. Assim, rejeita-se H_0 se o valor-p é menor que α . Quanto menor for o p-valor, maiores são as evidências para se rejeitar H_0 (SALVADOR & SANTOS, 2010). Neste trabalho, considerou-se α igual a 5%, desse modo, para p-valor $\leq 5\%$ rejeitou-se a hipótese nula, ou seja, considerou-se a tendência linear significativa estatisticamente.

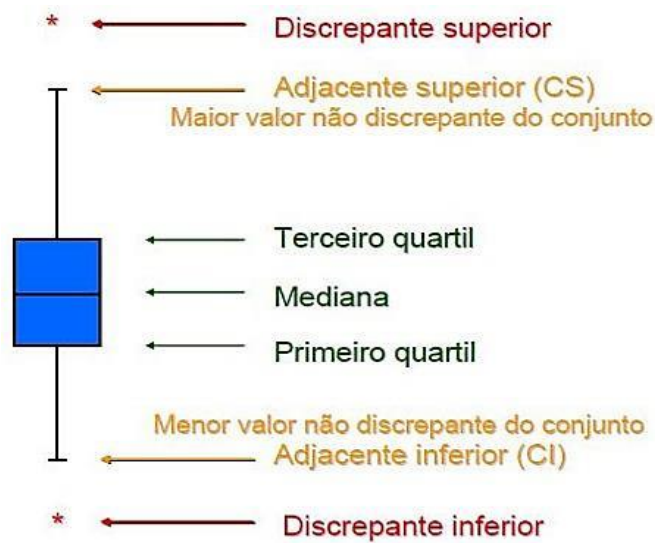
No trabalho também foi avaliada a variabilidade interanual da chuva e vazão para o período de 1961 a 2014 das séries históricas observadas e para o período presente (1979-2003) das saídas do modelo climático global MRI-JMA.

A representação da variabilidade climática é de grande relevância para examinar os impactos do clima nos recursos hídricos, pois o padrão de vazão é condicionado pela distribuição temporal das chuvas, e uma representação grosseira desta variabilidade comprometeria a identificação dos impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos. Assim, verificar se o padrão sazonal e anual das saídas de precipitação derivados do modelo apresenta pouco erro em relação ao observado é indicativo de que o modelo consegue simular

com qualidade os sistemas geradores de chuvas e suas ocorrências na área de estudo (SILVEIRA *et al.*, 2013a).

Os conjuntos de dados pluviométricos e fluviométricos observados também foram analisados por meio da técnica de *boxplot*, em que foi possível observar a presença de anos atípicos (*outlier*) e a variabilidade dos dados entre as sub-bacias. De acordo com Spiegel (1985), o *boxplot* consiste em subdividir a distribuição de medidas da amostra de acordo com a proporção das frequências observadas, e é representado da seguinte maneira (Figura 8).

Figura 8 – *Boxplot* explicativo



Fonte: adaptado de SPIEGEL, 1985.

Com o uso do *boxplot* é possível inferir características sobre o comportamento da mediana, os quartis, a variabilidade, a simetria dos dados observacionais, bem como eventos discrepantes (*outliers*). Para determinar a presença de dados discrepantes inferiores (Equação 3 e 4) e superiores (Equação 5 e 6), aplicou-se as seguintes expressões:

$$Q_1 - 3,0 \cdot f \leq Y_\alpha \leq Q_1 + 1,5f, \text{ sendo } f = Q_3 - Q_1 \quad (3)$$

$$Q_1 = X_k + \left[\frac{1(n+1)}{4} - k \right] (X_{k+1} - X_k) \quad (4)$$

$$Q_3 + 1,5 \cdot f \leq Y_\alpha \leq Q_3 + 3,0 \cdot f, \text{ sendo } f = Q_3 - Q_1 \quad (5)$$

$$Q_3 = X_k + \left[\frac{3(n+1)}{4} - k \right] (X_{k+1} - X_k) \quad (6)$$

Em que Y_a representa o *outlier*, Q_1 é o valor do primeiro quartil, Q_3 é o valor do terceiro quartil, n é o número total de elementos na amostra e K é a frequência acumulada da

classe anterior que contém o quartil (SPIEGEL, 1985). A análise do *boxplot* dos dados observados permitiu entender os comportamentos das sub-bacias do Alto Tietê e identificar anos anômalos com chuvas ou secas intensas.

4.3.3. Estimativa da Evapotranspiração Potencial (ETP)

A Evapotranspiração Potencial (ETP) corresponde à transformação da água de estado líquido para gasoso, obtido em condições padronizadas de cultivo (TUCCI & MENDES, 2006). Diversos métodos são disponíveis para determinar a ETP a partir de dados climatológicos. Neste trabalho, a evapotranspiração potencial foi calculada (Equação 7) com o método de *Thornthwaite* (1948):

$$ETP = Fc \cdot 16 \cdot \left(\frac{10T}{I} \right)^a \quad (7)$$

$$\text{Em que: } I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514} \quad (8)$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,7292 \cdot 10^{-2} + 0,49239 \quad (9)$$

Onde T representa a temperatura média mensal de um determinado mês, Fc o fator de correlação em função da latitude e do mês (Tabela 2), I o índice anual de calor e a o expoente de função do índice anual.

Tabela 3 - Fator de correlação (Fc) da evapotranspiração mensal de *Thornthwaite* em função da área de estudo (Bacia Hidrográfica do Alto Tietê) – latitude 23°S

MÊS	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Fc	1,15	1,00	1,05	0,97	0,95	0,89	0,94	0,98	1,00	1,09	1,10	1,17

Fonte: TUCCI & BELTRAME, 2001.

O método de *Thornthwaite* é o mais difundido mundialmente, pois se baseia apenas na variável dependente temperatura (TUCCI & MENDES, 2006). Definir a evapotranspiração potencial da bacia é de grande importância, pois a evapotranspiração e a precipitação são os principais componentes do ciclo hidrológico e para o gerenciamento dos recursos hídricos é

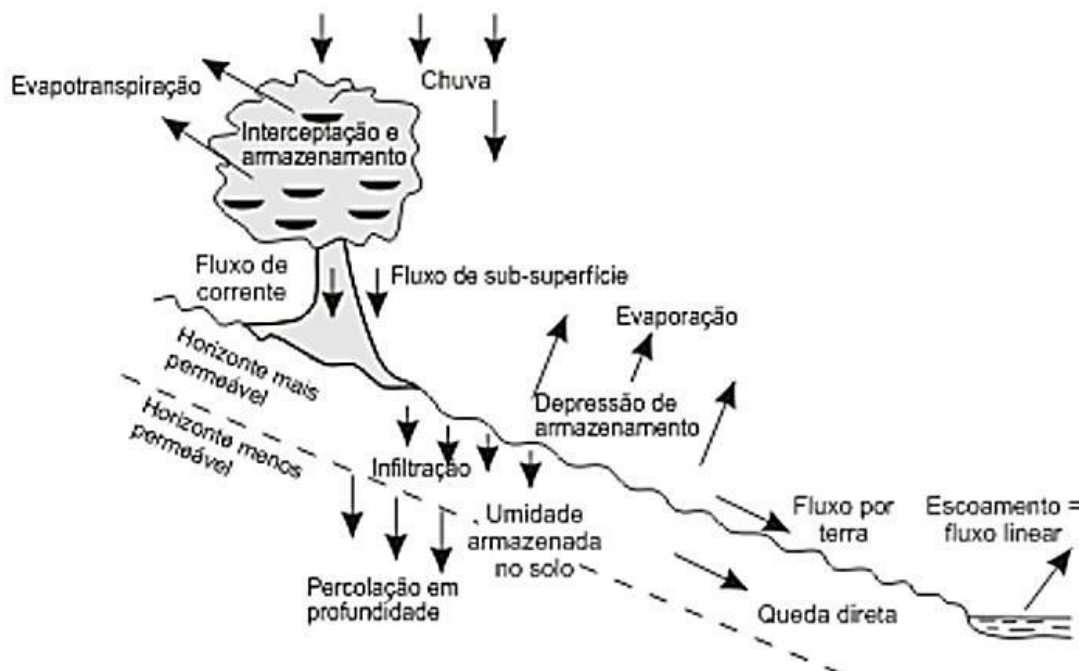
fundamental sua identificação, com vistas a determinar a quantidade de água disponível e se o balanço hídrico local possui uma taxa positiva ou negativa (SETTI *et al.*, 2000).

Com os valores mensais de temperatura observada e de temperatura do modelo climático para o período presente e futuro foram estabelecidos os valores de ETP das sub-bacias do Alto Tietê. O cálculo da ETP foi necessário para o desenvolvimento da equação empírica que estima a vazão.

4.3.4. Estabelecimento da relação empírica para o cálculo da vazão

Os estudos hidrológicos buscam avaliar a disponibilidade hídrica de uma região para a gestão destes recursos. A bacia hidrográfica é um importante espaço de avaliação do comportamento hídrico, pois nele ocorre uma série de processos que influenciam diretamente a disponibilidade hídrica (VILLELA & MATTOS, 1975). Na figura 9 é possível verificar os principais processos de entrada, circulação e saída da água em uma bacia hidrológica.

Figura 9 – Representação dos processos hidrológicos envolvidos no balanço hídrico de uma bacia

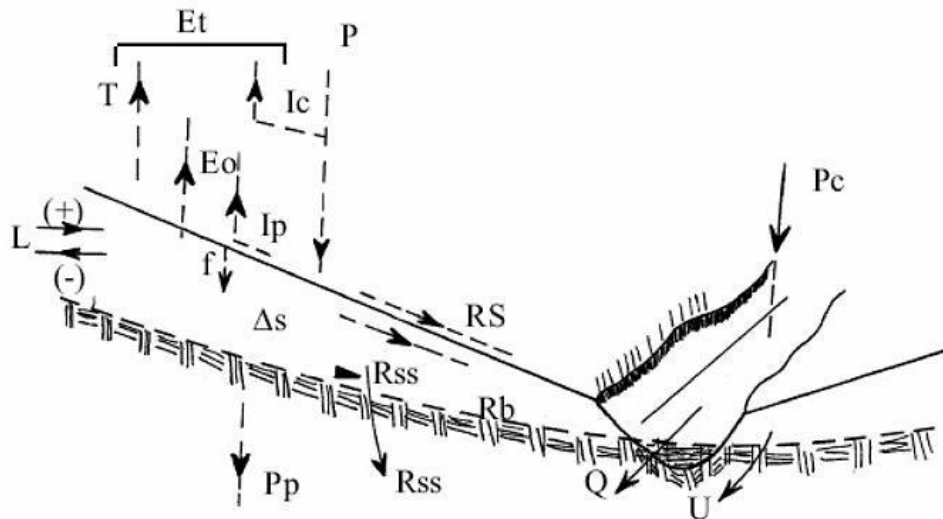


Fonte: adaptado de Carson & Kirkby (1972).

A soma dos processos de entradas e saídas de água em uma bacia corresponde ao seu balanço hídrico, e podem ser traduzidas quantitativamente sob a forma de uma relação matemática, denominada equação do balanço hídrico ou equação hidrológica (CHOW *et al.*, 1988). Esta equação representa a quantificação da água em diferentes fases no ciclo

hidrológico, para um determinado intervalo de tempo, reunindo um conjunto de variáveis hidrológicas que podem ser observadas na figura 10.

Figura 10 – Representação da secção transversal de uma bacia hidrográfica e das variáveis hidrológicas envolvidas no seu balanço hídrico



Fonte: Lima, 1986.

Onde, **P** é a precipitação total, **T** representa a transpiração, **Ic** corresponde à água interceptada pelas copas das árvores, **Ip** é a água da chuva interceptada pela vegetação, **Eo** corresponde a evaporação do solo e de superfícies líquidas, **Et** representa a evapotranspiração total, Δs é variação do armazenamento da água do solo, **Q** corresponde ao deflúvio, **L** representa o vazamento de água no freático, **U** é o vazamento de água que flui por fora do leito, **Pp** corresponde a percolação profunda, **RS** é o escoamento superficial em canais ou para superfície, **Rss** representa ao escoamento sub-superficial, **Rb** é o escoamento subterrâneo, **f** representa a infiltração e **Pc** é a precipitação direta nos canais.

Considerando todas as variáveis envolvidas no balanço hidrológico de uma bacia hidrográfica, para um determinado período de tempo, a equação hidrológica global será:

$$P = ET + Q + \Delta s \pm L + U \quad (10)$$

Em uma bacia hidrográfica ideal, onde todos os fluxos positivos e negativos são iguais a zero, ou seja, a diferença entre as entradas e saídas na bacia é nula, não ocorrem perdas por percolação profunda ou vazamentos. Em estudos hidrológicos de longo prazo, o balanço hídrico considera os processos hidrológicos sob a forma de totais mensais, assim, processos que se desenvolvem em intervalos curtos, não têm influência direta no balanço hídrico (LIMA, 1986). Assim, a equação hidrológica simplificada pode ser expressa como:

$$P_{(\text{mês})} - ET_{(\text{mês})} - Q_{(\text{mês})} + \Delta s_{(\text{mês})} = 0 \quad (11)$$

Desse modo, as variáveis hidrológicas precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial e armazenamento são processos dominantes para o balanço hídrico de uma bacia hidrográfica. Quando o estudo ocorre em uma bacia hidrográfica grande, em um longo período, acima de vinte anos, as diferenças de armazenamento podem ser consideradas desprezíveis (CHOW *et al.*, 1988). Portanto, a equação de balanço hídrico global simplificado é determinada por:

$$Q_{(\text{mês})} = P_{(\text{mês})} - ET_{(\text{mês})} \quad (12)$$

A aplicação da equação geral de balanço hídrico está condicionada à complexidade do estudo de uma bacia, e alguns modelos matemáticos simples são importantes ferramentas para os estudos hidrológicos, pois permitem estabelecer uma relação entre as variáveis evapotranspiração, precipitação e vazão. Entre eles estão os modelos empíricos de hidrologia, que se baseiam em equações matemáticas estabelecidas a partir da relação de parâmetros físicos de dados observados das variáveis hidroclimatológicas (VILLELA & MATTOS, 1975).



Os modelos empíricos de regressão em hidrologia podem ser aplicados para simular as implicações sobre uma variável dependente do balanço hídrico, como a vazão, em consequência de alterações nos valores de variáveis independentes, como a precipitação e a evapotranspiração. Nesses casos, os gráficos de dispersão dos dados das variáveis hidroclimatológicas são importantes ferramentas, uma vez que permitem equacionar essas relações cartesianas, possibilitando compreender os fenômenos hidrológicos presentes e, se possível, prever fenômenos futuros (MARCUSO, 2014).

Neste trabalho, o modelo empírico desenvolvido para o cálculo da vazão foi determinado a partir de coeficientes derivados da equação hidrológica global simplificada de uma bacia hidrográfica (Equação 12). Para isto, fez-se uso dos dados de precipitação e Evapotranspiração Potencial (ETP) média mensal da área da sub-bacia e de vazão afluente do exutório da sub-bacia.

Assim, foram construídos coeficientes que relacionam as variáveis Precipitação (P) e Evapotranspiração Potencial (ETP) (Equação 14) com as variáveis Vazão (Q) e Evapotranspiração Potencial (ETP) (Equação 15), em escala de tempo mensal dos dados observados. Esses coeficientes (Equação 14 e 15) foram derivados da equação de balanço hidrológico, conforme explicado nas equações seguintes:

$$Q_{(M\hat{E}S)} = P_{(M\hat{E}S)} - ETP_{(M\hat{E}S)} \quad (12)$$

$$\frac{Q_{(M\hat{E}S)}}{ETP_{(M\hat{E}S)}} = \frac{P_{(M\hat{E}S)}}{ETP_{(M\hat{E}S)}} - \frac{ETP_{(M\hat{E}S)}}{ETP_{(M\hat{E}S)}} \Rightarrow \frac{Q_{(M\hat{E}S)}}{ETP_{(M\hat{E}S)}} = \frac{P_{(M\hat{E}S)}}{ETP_{(M\hat{E}S)}} - 1 \quad (13)$$

Coef₂ Coef₁

$$Coef_1(M\hat{E}S) = \frac{P_{(M\hat{E}S)}}{ETP_{(M\hat{E}S)}} \quad (14)$$

$$Coef_2(M\hat{E}S) = \frac{Q_{(M\hat{E}S)}}{ETP_{(M\hat{E}S)}} \quad (15)$$

Estabelecido os coeficientes, procedeu-se a determinação das equações empíricas para estimar a vazão (Equação 16), expressa como uma função da precipitação e da evapotranspiração potencial.

$$Q_{(M\hat{E}S)} = f [P_{(M\hat{E}S)}, ET_{(M\hat{E}S)}] \quad (16)$$

Para isso, foram construídos gráficos de dispersão entre os coeficientes que relacionem os termos do balanço hídrico, ou seja, entre os fenômenos hidrológicos explicativos (precipitação e ETP) com o fenômeno hidrológico que se deseja explicar (vazão). No eixo *X* do gráfico é plotado o coeficiente que represente a variável hidrológica independente (precipitação e ETP) e no eixo *Y* deve ser registrado o coeficiente que represente a variável dependente (vazão).

Os modelos hidrológicos de regressão simulam relacionamentos entre as variáveis explicadas e explicativas. Essa interação deverá ser expressa de forma linear, equação da reta, ou não linear, como a equação logarítmica, potencial, polinomial e exponencial (MARCUIZZO *et al.*, 2011). Com a construção dos gráficos de dispersão entre os coeficientes, foram estipuladas diferentes linhas e curvas de ajuste entre os coeficientes. Os gráficos de dispersão com as suas respectivas equações de ajuste foram construídos para a BHAT e para cada uma das sub-regiões hidrográficas.

O critério para selecionar a equação foi a apresentação do melhor ajuste, ou seja, os maiores valores do Coeficiente de Determinação (r^2) e do Coeficiente de Correlação (r). O Coeficiente de Determinação (r^2) é uma medida de ajustamento de um modelo estatístico que demonstra a proporção da variação total dos dados em torno da média (NAGHETTINI & PINTO, 2007). O r^2 é dado pela relação entre a soma dos quadrados devidos à regressão

(Variância Explicada) e a soma total dos quadrados (Variância Total). Pode ser representado pela seguinte expressão (Equação 29):

$$r^2 = \frac{\text{Variância Explicada}}{\text{Variância Total}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad 0 \leq r^2 \leq 1 \quad (17)$$

Em que \hat{y}_i é o valor estimado da variável dependente, y_i representa o valor observado da variável dependente e \bar{y} corresponde a média da variável dependente. O r^2 varia entre 0 e 1, indicando quanto o modelo estatístico consegue explicar os valores observados, sendo que quanto mais próximo de 1, melhor é o ajuste. O Coeficiente de Correlação (r) é igual à raiz quadrada do Coeficiente de Determinação (r^2).

Já o Coeficiente de Correlação (r), indica a força da relação entre as variáveis determinadas e as variáveis indeterminadas e é expresso por um único valor para o conjunto de dados, padronizados dentro dos seus limites de variação da covariância. Ele pode variar de 1 e -1 , o que indica perfeitas correlações positivas e negativas, respectivamente. Para valores próximos a zero, a relação é baixa (NAGHETTINI & PINTO, 2007). Calcula-se r a partir da Equação 18, em que X representa a variável determinada e Y a indeterminada:

$$r_{X,Y} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - (\sum_{i=1}^n X_i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{1}{n}(\sum_{i=1}^n X_i)^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n Y_i^2 - \frac{1}{n}(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}} \quad (18)$$

A fim de verificar a significância estatística das equações de ajuste, aplicou-se o Teste de Hipótese – Teste F, medição para estabelecer se há uma relação funcional relevante entre a variável resposta e as variáveis independentes, ou seja, indicativo se a equação é significativa. A significância estatística deve ser estabelecida antes do uso da equação de ajuste para prever fenômenos futuros e seu valor pode ser definido matematicamente pela equação 30, onde, r^2 representa o Coeficiente de Determinação, n é tamanho amostral e k é o número de regressores (NAGHETTINI & PINTO, 2007).

$$F = \frac{r^2/k-1}{1-r^2/n-k} \quad (19)$$

A qualidade do ajuste de curvas também pode ser verificada em função do Erro Padrão da Estimativa (Se), que representa o desvio médio entre os valores reais e os valores previstos (Equação 20). O Se existirá sempre que a capacidade de explicação da curva produzida pela regressão não for exata e dependerá do desempenho da equação de ajuste em estabelecer os valores da variável dependente (MARCUIZZO *et al.*, 2011).

$$Se = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_R - Q_O)^2}{n-1}} \quad (20)$$

Em que, Q_R é a vazão reconstruída, Q_O representa a vazão observada e n é o número de observações.

Para examinar a capacidade da equação empírica em representar o balanço hídrico da BHAT e sub-bacias que a compõem, as vazões construídas com a equação empírica para o período presente (1979-2003) foram comparadas com a vazão observada no mesmo período por meio das métricas de: Erro Absoluto (EA), Erro Médio (BIAS), Erro Padrão Médio (EPM), Erro Quadrático Médio (EQM), Erro Percentual (EP) e Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), procedimentos explicados a seguir, no item 4.3.5.

4.3.5. Avaliação e correção das saídas do modelo climático MRI-JMA para o período presente

Examinar e avaliar o período presente das variáveis chuva e temperatura do modelo é muito importante, pois ajuda a compreender a capacidade do modelo em reproduzir o comportamento hidroclimatológico da bacia estudada e determinar o grau de incerteza do modelo (OLIVEIRA *et al.*, 2015). Esta validação foi realizada para as variáveis precipitação e temperatura no período presente (1979-2003), que foram comparadas com os dados observados na escala de tempo mensal, por meio das seguintes métricas:

- I. Erro Absoluto (EA), que quantifica a amplitude do erro:

$$E = |K_m - K_{Ob}| \quad (21)$$

- II. Erro Médio (BIAS), que quantifica o erro sistêmico do modelo:

$$BIAS = \frac{1}{M_{total}} \sum_{i=1}^{M_{total}} (K_m - K_{Ob}) \quad (22)$$

- III. Erro Percentual (EP), que é a representação percentual do erro relativo observado:

$$EP = \frac{1}{M_{total}} \sum_{i=1}^{M_{total}} \frac{|K_m - K_{Ob}|}{K_{Ob}} \times 100\% \quad (23)$$

- IV. Erro Padrão Médio (EPM), que corresponde à média do desvio padrão (σ^2):

$$EPM = \sqrt{\frac{1}{M_{total}} \sum_{i=1}^{M_{total}} \sigma^2} \quad (24)$$

- V. Erro Quadrático Médio (EQM), que quantifica o erro em função do número de observações (n):

$$EQM = \frac{1}{M_{total}} \sum_{i=1}^{M_{total}} \frac{(K_m - K_{Ob})^2}{n} \quad (25)$$

- VI. E a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), que quantifica o erro médio da previsão:

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{M_{total}} \sum_{i=1}^{M_{total}} (K_m - K_{Ob})^2} \quad (26)$$

Em que, K_m corresponde aos dados da variável simulada para o período presente do modelo MRI-MJA; K_{Ob} representa os dados observados da variável climática; e M_{total} é o número de anos analisado (SPIEGEL, 1985).

O desempenho do modelo climático pode ser avaliado apenas em relação às observações históricas, e para ter confiança nas projeções futuras de tal modelo, seu clima histórico deve ser bem-simulado (FLATO *et al.*, 2013). Assim, as análises dos erros associados às saídas do modelo climático para o período presente indicaram a destreza do modelo climático MRI-JMA em representar o padrão de precipitação e temperatura das sub-bacias do Alto Tietê.

Para remover as diferenças entre os dados observados e as saídas do modelo é fundamental testar alguns métodos de correção (OLIVEIRA *et al.*, 2015). Neste trabalho foram testados três métodos de correção, e as técnicas consistiram em utilizar os dados observados e as saídas obtidas pelo modelo climático MRI-JMA, para as variáveis climáticas precipitação e temperatura, no período presente, de 1979 a 2003. Para isso, as séries históricas e os dados simulados pelo modelo MRI-JMA foram divididas em dois períodos: de controle (1979-1991) e de avaliação (1992-2003).

A primeira técnica empregada para a correção foi a de remoção do erro médio mensal (Equação 27), no qual a variável climática corrigida é representada pela diferença entre as condições climáticas previstas e observadas no período de controle.

$$K_{(1992-2003)}^C = K_{(1992-2003)}^M - \left(K_{(1979-1991)}^N - K_{(1979-1991)}^J \right) \quad (27)$$

Em que K^C é a variável climática mensal do modelo corrigida para o período de avaliação; K^M é a variável climática mensal do modelo MRI-JMA para o período de avaliação; K^N corresponde à média mensal da variável climática do modelo no período de

controle; e K^J representa a média mensal observada da variável climática para o período de controle.

A segunda técnica testada para correção foi a Aplicação Direta (*Direct Approach*) utilizada por Lenderink *et al.* (2007) e Oliveira *et al.* (2015). Neste método (Equação 28 e 29), o comportamento pósterio da variável climática é obtido diretamente da simulação do modelo climático global MRI-JMA, promovendo variações na magnitude de acordo com as diferenças verificadas no passado entre a variável climática do modelo MRI-JMA e a variável climática observada na bacia. Esta técnica pode ser expressa matematicamente, em escala mensal, por duas métricas distintas:

$$K_{(1992-2003)}^{FC} = K_{(1992-2003)}^F \times \left(\frac{K_{(1979-1991)}^O}{K_{(1979-1991)}^C} \right) \quad (28)$$

$$K_{(1992-2003)}^{FC} = K_{(1992-2003)}^F + \left(\frac{K_{(1979-1991)}^O}{K_{(1979-1991)}^C} \right) \quad (29)$$

Em que K^{Fc} é o valor corrigido da variável climática no período de avaliação; K^F corresponde ao valor sem correção da variável climática no período de avaliação; K^C representa a variável climática média mensal do modelo no período de controle; e K^O é a variável climática média mensal observada para o período de controle.

O terceiro método testado foi a Aplicação de Mudança do Delta (*Delta Change Approach*), adotado por Graham (2000), Lenderink *et al.* (2007) e Oliveira *et al.* (2015). Nesta técnica assume-se que o mesmo padrão das variáveis climáticas observado no passado estará presente no futuro. As alterações vindouras na magnitude das variáveis climáticas serão estabelecidas em função da razão entre as médias mensais simuladas pelo modelo MRI-JMA no período de avaliação e controle. Esta técnica pode ser descrita por meio de duas equações:

$$K_{(1992-2003)}^{FC} = K_{(1979-2003)}^O \times \left(\frac{K_{(1992-2003)}^F}{K_{(1979-1991)}^C} \right) \quad (30)$$

$$K_{(1992-2003)}^{FC} = K_{(1979-2003)}^O + \left(\frac{K_{(1992-2003)}^F}{K_{(1979-1991)}^C} \right) \quad (31)$$

Em que K^{Fc} é o valor corrigido da variável climática no período de avaliação para um determinado mês; K^O é a variável climática média mensal observada para o período de controle, para um determinado mês, K^F é o valor sem correção da variável climática no

período de avaliação para um determinado mês; e K^C é a variável climática média mensal do modelo no período de controle para um determinado mês.

Posteriormente, os dados corrigidos simulados pelo modelo MRI-JMA para a Bacia do Alto Tietê, no período de avaliação (1992-2003), foram analisados com as métricas de EA (Equação 21), BIAS (Equação 22), EP (Equação 23), EPM (Equação 24), EQM (Equação 25), REQM (Equação 26) e o r (Equação 18).

Deste modo, foram identificadas as séries corrigidas das variáveis climáticas precipitação e temperatura no período de avaliação que mais se assemelharam com as variáveis climáticas observadas, possibilitando reconhecer qual é método de correção mais eficaz. Após detectar a técnica de correção adequada para cada variável climática, aplicou-se esta correção para as simulações do modelo MRI-JMA, para o período presente (1979-2003), em cada uma das sub-bacias.

4.3.6. Avaliação e correção das saídas do modelo climático MRI-JMA para o cenário futuro

Na avaliação das projeções no período futuro (2017-2039) calcularam-se as anomalias de precipitação e temperatura (Equação 32) para identificar se a projeção futura indica um aumento ou diminuição das variáveis em relação ao clima simulado pelo modelo no presente.

$$ANOMALIA = \frac{1}{M_{total}} \sum_{i=1}^{M_{total}} (K_F - K_{Mc}) \quad (32)$$

Em que, K_F é o valor mensal projetado pelo modelo no período futuro (2017-2039), K_{Mc} corresponde ao valor mensal estimado pelo modelo para período presente (1979-2003) e M_{total} representa o número total de observações.

Em seguida, foi realizada a correção dos valores da precipitação e temperatura para o período futuro (2017-2039). A técnica de correção adotada no período futuro é a mesma optada para o período presente, visto que esta conseguiu apresentar o menor erro em relação à temperatura e à chuva observada na região.

A correção das projeções futuras busca minimizar as incertezas dos erros sistemáticos encontrados no clima atual que também são projetados para o futuro, buscando eliminar o erro associado à modelagem climática. Entretanto, as correções na precipitação e temperatura implicam simplificações consideráveis, pois, ao considerar como dados as variações médias

sazonais das séries observadas, assume-se que os mesmos BIAS registrados no passado serão observados no futuro (LENDERINK *et al.*, 2007).

Outro fator importante a ser considerado é que os erros sistemáticos não se relacionam com as incertezas derivadas da quantidade de concentrações de gases de efeito estufa que os cenários de emissões – neste caso, o cenário A2 – projetam para o futuro.

4.3.7. Determinação da vazão para o período futuro

Após a correção dos dados de temperatura para o período futuro, foi calculada a Evapotranspiração Potencial (ETP) para o cenário futuro. A técnica proposta foi o método de Thornthwaite (1948), explicado no item 4.3.3.

Para a obtenção da vazão no período futuro (2017-2039) utilizaram-se as equações empíricas de balanço hídrico construídas com os dados observados de precipitação, temperatura e vazão, procedimento detalhado no item 4.3.4.

Assim, as vazões futuras da BHAT e das sub-bacias foram estabelecidas a partir dos dados de precipitação do modelo MRI-JMA corrigido para o período futuro (2017-2039) e a Evapotranspiração Potencial futura estimada para o período futuro (2017-2039). Os resultados indicaram possíveis cenários de variabilidade hidroclimatológica na Bacia do Alto Tietê, contribuindo para o planejamento ambiental e gerenciamento integrado dos recursos hídricos da bacia e sub-bacias que a compõem.

5. RESULTADOS

5.1. Avaliação das séries históricas fluviométricas e pluviométricas da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê

A seguir apresentam-se os resultados das análises dos dados observacionais de precipitação e vazão das séries históricas para o período de 1961 a 2014. As análises consistiram em verificar a climatologia sazonal, variabilidade interanual, tendências e presença de anos atípicos (*outliers*) das sub-bacias pertencentes à Bacia do Alto Tietê, de forma a compreender o padrão de precipitação e vazão das sub-bacias.

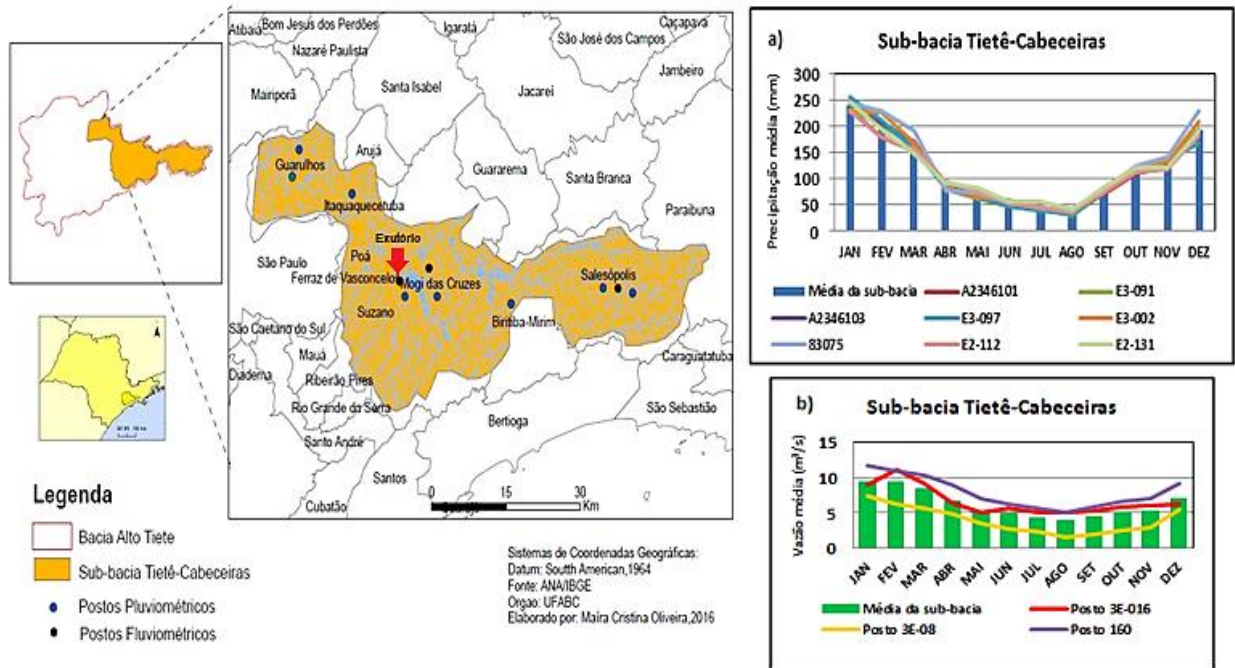
5.1.1. Climatologia das sub-bacias do Alto Tietê

A análise climatológica foi realizada para cada uma das sub-bacias pertencentes à Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (BHAT), para o período de 1961-2014. A Bacia do Alto Tietê divide-se em seis sub-regiões hidrográficas, que são: Tietê-Cabeceiras, Billings-Tamanduateí, Pinheiros-Pirapora, Penha-Pinheiros, Cotia-Guarapiranga e Juqueri-Cantareira.

A sub-bacia Tietê-Cabeceiras apresenta janeiro como o mês mais chuvoso, com precipitação média de 239,6 mm, e durante o mês de agosto, o mês menos chuvoso, a precipitação média é de 35,2 mm (Tabela 3). Apesar de a sub-bacia ter uma área extensa, as séries pluviométricas que estão inseridas na sub-bacia (Figura 11) exibiram um padrão chuvoso muito similar, sobretudo durante o inverno e a primavera.

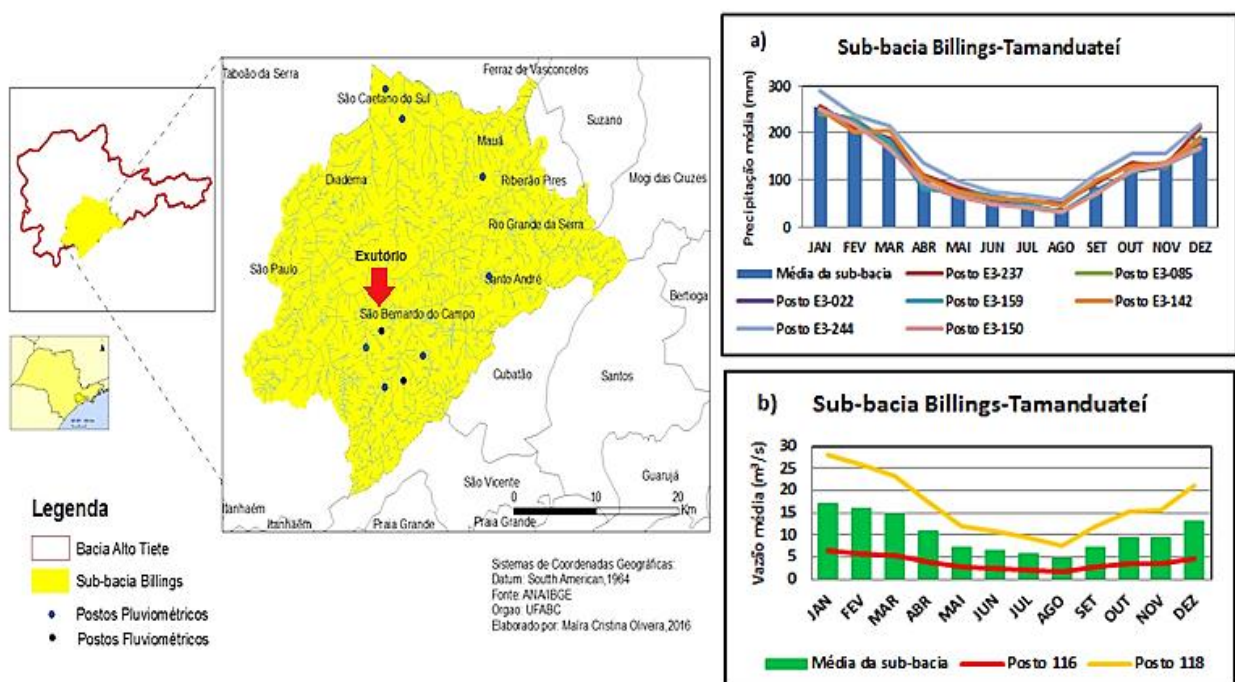
A sub-bacia Tietê-Cabeceiras tem uma vazão média anual de 6,17 m³/s, com 3,95 m³/s em agosto e 9,4 m³/s em janeiro, e possui os postos 160, E3-016 e E3-008 (Figura 11b). O Posto 160 – Ponte Nova/Alto Tietê, localizado no rio Tietê, é o exutório da sub-bacia e apresenta a maior vazão, com média anual de 7,87 m³/s, sendo 5,09 m³/s em agosto e 11,7 m³/s em janeiro. O Posto E3-008, localizado no rio Jundiaí, próximo da represa Jundiaí, tem menor vazão média de aproximadamente 4 m³/s, variando de 7,5 m³/s em janeiro a 1,6 m³/s em agosto. E o Posto E3-016, localizado no rio Tietê, exibe uma variação sazonal extremamente próxima à média da sub-bacia, com uma vazão média de 8,96 m³/s em janeiro e de 5,17 m³/s em agosto.

Figura 11 – Mapa da localização e gráficos da climatologia sazonal (a) e padrão médio mensal de vazão (b) dos postos da sub-bacia Tietê-Cabeceiras, no período de 1961-2014



Por outro lado, a sub-bacia Billings-Tamanduateí apresenta uma precipitação média de 254,7 mm em janeiro e aproximadamente 40,7 mm no mês de agosto – os valores de precipitação das estações variam em relação à média da sub-bacia (Figura 12a). O Posto E3-244 é o que possui maior precipitação de 288 mm em janeiro e 56 mm em agosto.

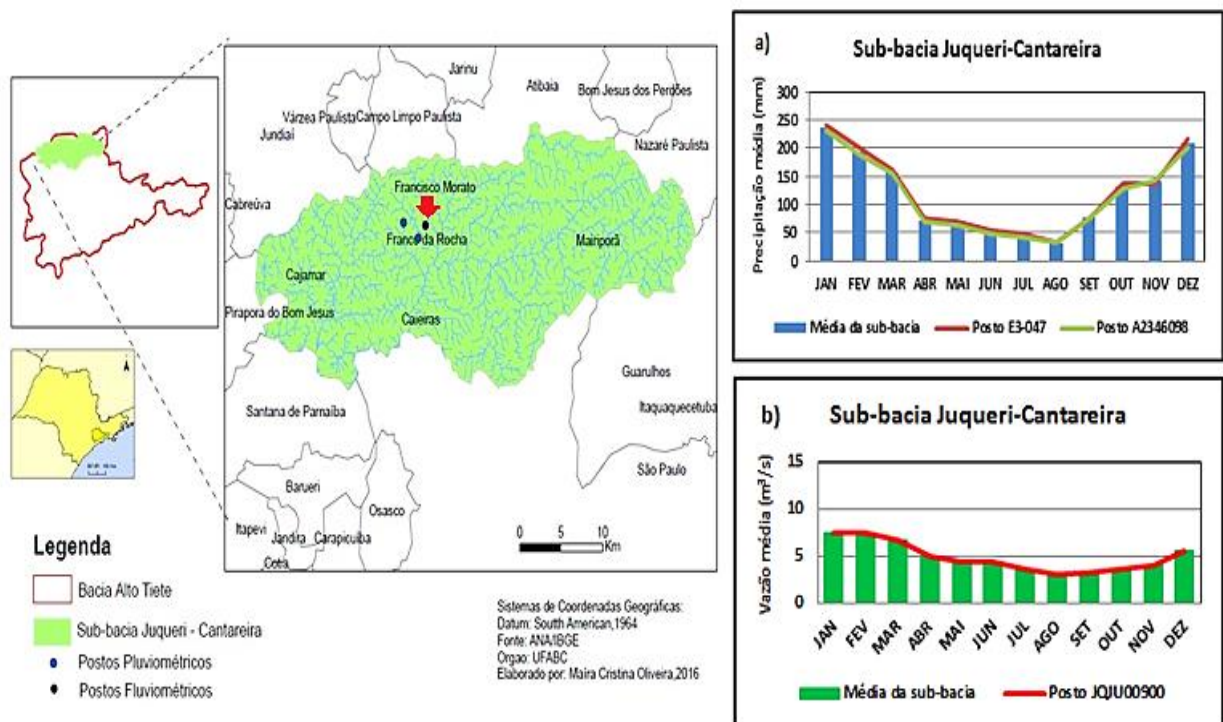
Figura 12 – Mapa da localização e gráficos da climatologia sazonal (a) e padrão médio mensal de vazão (b) dos postos da sub-bacia Billings-Tamanduateí, no período de 1961-2014



A sub-bacia apresenta uma vazão média de 17,2 m³/s, em janeiro, e 4,6 m³/s, em agosto, e tem os postos 116 e 118 (Figura 12b). O Posto 118 – Billings, pertencente ao rio Pinheiros, tem uma variação sazonal de 28 m³/s, em janeiro, e 7,7 m³/s, em agosto, e é o exutório da sub-bacia. Já o Posto 116 – Pedras, localizado no Rio das Pedras, próximo de Cubatão, tem pouca sazonalidade, variando de 6,3 m³/s, em janeiro, a 1,6 m³/s, em agosto, e sua vazão é de grande importância para o abastecimento do reservatório de Pedras.

Já a sub-bacia Juqueri-Cantareira (Figura 13a) possui todos os postos no município de Franco da Rocha e, devido à proximidade, as estações apresentam variações sazonais muito próximas das médias da sub-bacia. Nos meses de janeiro a sub-bacia tem uma precipitação média de 236,3 mm e em agosto de 35,2 mm. A vazão média da sub-bacia Juqueri-Cantareira é de 3,1 m³/s em agosto e 7,4 m³/s em fevereiro. O único posto fluviométrico da sub-bacia está localizado no rio Juqueri, e é afluente ao reservatório Paiva Castro, barragem que compõe o Sistema Cantareira (Figura 13b).

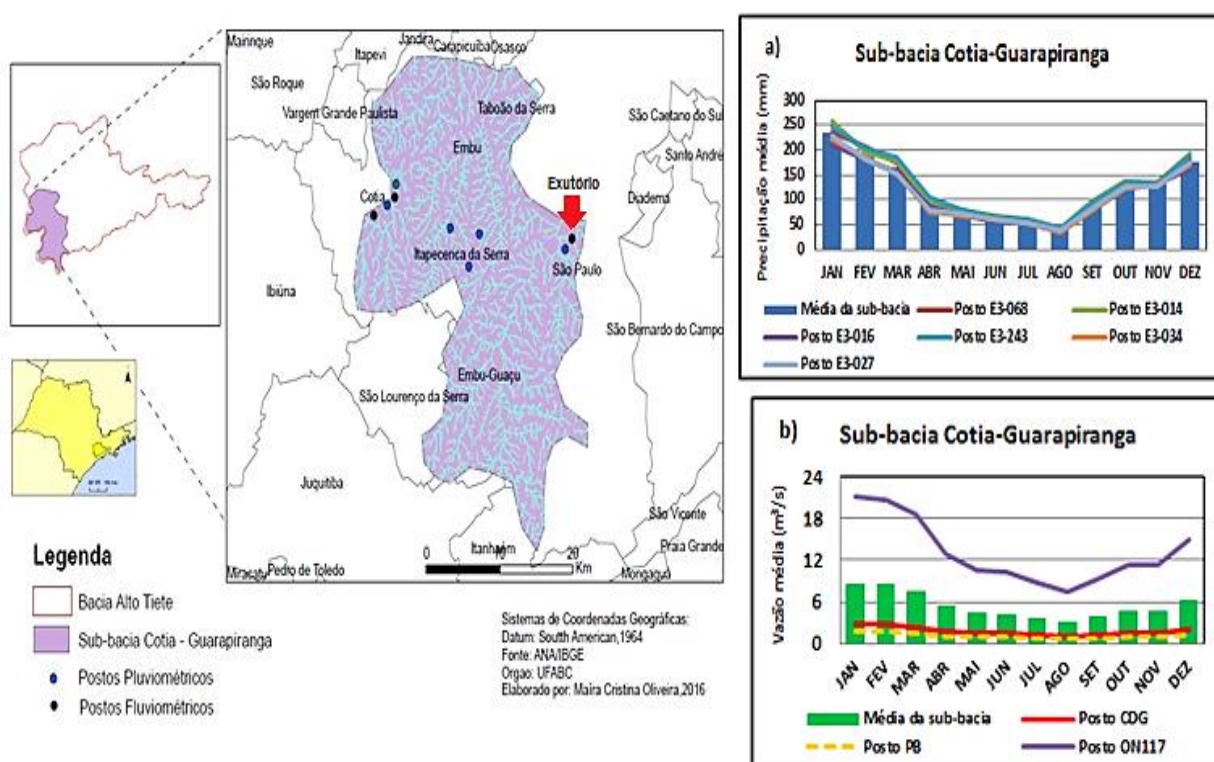
Figura 13 – Mapa da localização e gráficos da climatologia sazonal (a) e padrão médio mensal de vazão (b) dos postos da sub-bacia Juqueri-Cantareira, no período de 1961-2014



A sub-bacia Penha-Pinheiros possui a precipitação média mensal de janeiro de 233,8 mm e de agosto de 31,6 mm (Figura 14a). Todas as estações pluviométricas encontram-se no município de São Paulo e possuem muita similaridade, apesar de o Posto E3-090, localizado

de Cotia. Também está o posto ON117, posicionado na divisa entre a cidade de São Paulo e Cotia, que faz parte do Sistema de abastecimento do Guarapiranga e exutório da sub-bacia e que se encontra próximo ao posto 117 – Guarapiranga, na sub-bacia Penha-Pinheiros. A sub-bacia Cotia-Guarapiranga possui uma vazão média mensal de 8,58 m³/s, em janeiro, e 2,9 m³/s, em agosto. O posto ON117 apresenta uma vazão muito superior à do Sistema Alto Cotia, com uma vazão média mensal de 21,13 m³/s, em janeiro, e de 7,32 m³/s no mês de agosto.

Figura 15 – Mapa da localização e gráficos da climatologia sazonal (a) e padrão médio mensal de vazão (b) dos postos da sub-bacia Cotia-Guarapiranga, no período de 1961-2014

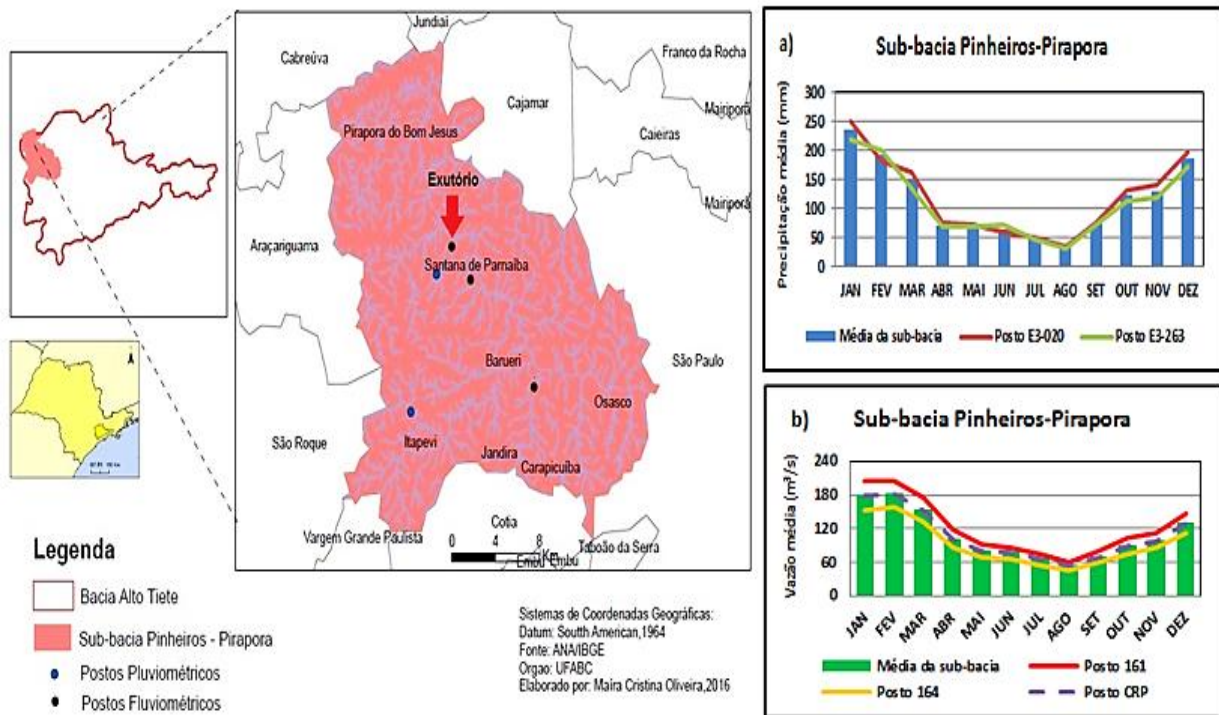


A última sub-bacia, Pinheiros-Pirapora (Figura 16a) tem dois postos pluviométricos, um no município de Itapevi e outro em Santana de Parnaíba, com variações sazonais próximas às médias da sub-bacia. Nos meses de janeiro a sub-bacia apresenta uma precipitação média de 234,1 mm e, em agosto, de 39,6 mm.

A sub-bacia Pinheiros-Pirapora tem os postos fluviométricos 164 – Boa Esperança, localizado no rio Parnaíba, CRP – Carapicuíba e 161- Edgard de Souza (Figura 16b), todos com tributários no rio Tietê. A sub-bacia possui uma vazão média de 181,27 m³/s, em fevereiro, e 53,9 m³/s, em agosto. O posto CRP tem uma vazão muito inferior às demais estações, com 181,32 m³/s, em fevereiro, e de 53,92 m³/s em agosto. O posto 161 é o ponto

com maior vazão e exutório de toda a Bacia do Alto Tietê, com uma vazão média mensal de 203,3 m³/s em janeiro e 61,4 m³/s em agosto.

Figura 16 – Mapa da localização e gráficos da climatologia sazonal (a) e padrão médio mensal de vazão (b) dos postos da sub-bacia Pinheiros-Pirapora, no período de 1961-2014



De modo geral, as sub-bacias do Alto Tietê apresentaram o comportamento climatológico típico da região Sudeste, onde o ciclo anual de chuva é bem definido, com o início do período chuvoso em outubro e um inverno de baixas precipitações. Segundo Alves *et al.* (2005), a primavera e o verão são as estações mais chuvosas na região metropolitana de São Paulo, e entre os meses de outubro e março ocorre mais de 80% do total anual de precipitação, o que é corroborado analisando os valores de precipitação média mensal das sub-bacias (Tabela 3).

Segundo a FUSP (2009), as regiões próximas ao interior da Bacia do Alto Tietê possuem menores índices pluviométricos, enquanto as áreas próximas a Serra do Mar apresentam maiores índices devido à brisa marítima. Esta afirmativa é legitimada, visto que a sub-bacia Penha-Pinheiros, localizada no interior da BHAT, tem a menor precipitação, enquanto a sub-bacia Billings-Tamanduateí exibe maior regime de chuva, sobretudo durante o verão e outono, em função de sua proximidade com o litoral do estado de São Paulo.

Tabela 4 – Precipitação média mensal (mm) nas sub-bacias do Alto Tietê, no período de 1961-2014

SUB-BACIA	TIETÊ - CABECEIRAS	JUQUERI - CANTAREIRA	PENHA - PINHEIROS	PINHEIROS - PIRAPORA	BILLINGS - TAMANDUATEÍ	COTIA - GUARAPIRANGA	BACIA DO ALTO TIETÊ
JAN	239,61	236,33	233,81	234,05	254,7	238,24	239,46
FEV	204,31	193,92	189,77	192,83	220,08	212,57	202,25
MAR	163,51	157,95	146,81	166,8	187,22	173,69	166
ABR	86,59	72,21	70,71	87,4	101,31	80,49	83,12
MAI	69,62	65,56	69,93	73,76	74,47	66,8	70,02
JUN	53,88	50,96	63,86	64,51	60,23	55,03	58,08
JUL	45,57	44,61	47,52	53,83	50,83	45,84	48,03
AGO	35,16	32,36	31,6	39,61	40,66	33,89	35,55
SET	77,8	76,4	72,68	87,38	86,84	76,5	79,6
OUT	117,33	132,28	121,67	128,42	128,51	120,07	124,71
NOV	128,66	140,52	128,63	131,2	135,2	134,19	133,07
DEZ	192,24	208,83	183,44	177,96	189,51	186,14	189,69
ANUAL	1414,27	1411,94	1360,42	1437,76	1529,56	1423,45	1429,57

Em relação ao padrão médio mensal de vazão nas sub-bacias pertencentes à BHAT, todas apresentam a mesma sazonalidade, com períodos de elevada vazão durante o verão, principalmente no mês de janeiro, e menores vazões durante o inverno, essencialmente em agosto. Os dados de vazão média mensal de todas as sub-bacias podem ser observados na Tabela 4. O padrão de distribuição da vazão nas sub-bacias possui grande variabilidade, sendo que a sub-bacia Pinheiros-Pirapora, onde se encontra o exutório da BHAT, apresenta maiores valores de vazão, e a sub-bacia Juqueri-Cantareira apresenta os menores valores.

Tabela 5 – Vazão média mensal (m³/s) nas sub-bacias do Alto Tietê, no período de 1961-2014

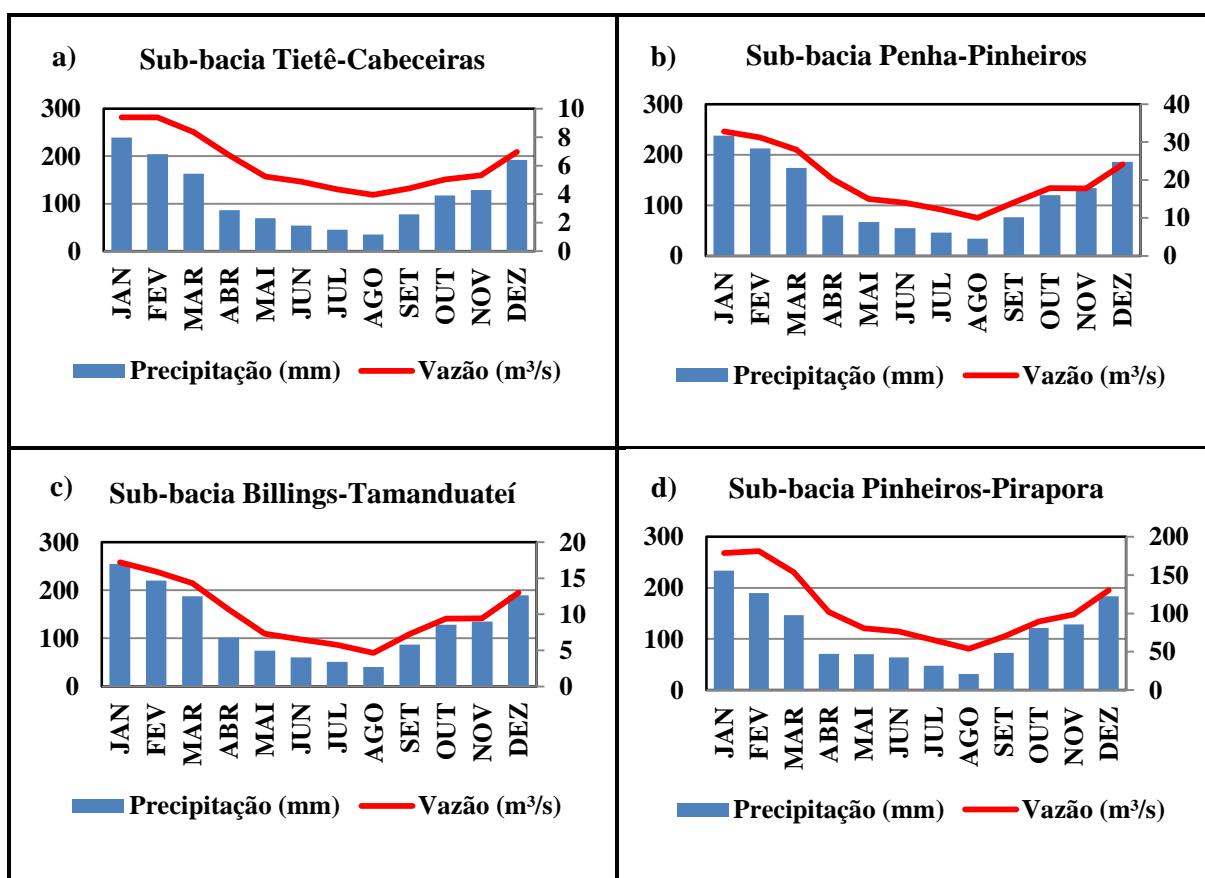
SUB-BACIA	TIETÊ - CABECEIRAS	JUQUERI - CANTAREIRA	COTIA - GUARAPIRANGA	PINHEIROS - PIRAPORA	PENHA - PINHEIROS	BILLINGS - TAMANDUATEÍ	BACIA DO ALTO TIETÊ
JAN	9,4	7,47	8,58	178,65	32,85	17,22	42,36
FEV	9,4	7,38	8,39	181,27	31,2	15,9	42,25
MAR	8,37	6,74	7,34	153,75	28,03	14,34	36,44
ABR	6,72	4,85	5,16	101,98	20,26	10,68	24,95
MAI	5,25	4,29	4,26	80,54	15,02	7,31	19,45
JUN	4,88	4,27	4,06	76,36	13,95	6,49	18,35
JUL	4,33	3,57	3,48	65,06	12,18	5,75	15,74
AGO	3,95	3,08	2,93	53,9	10	4,64	13,09
SET	4,41	3,22	3,67	69,73	14,11	7,28	17,08
OUT	5,03	3,64	4,62	89,43	17,87	9,38	21,67
NOV	5,32	3,96	4,54	98,43	17,82	9,44	23,26
DEZ	6,97	5,42	6,02	130,21	24,12	12,98	30,95
ANUAL	6,17	4,82	5,26	106,61	19,80	10,10	25,47

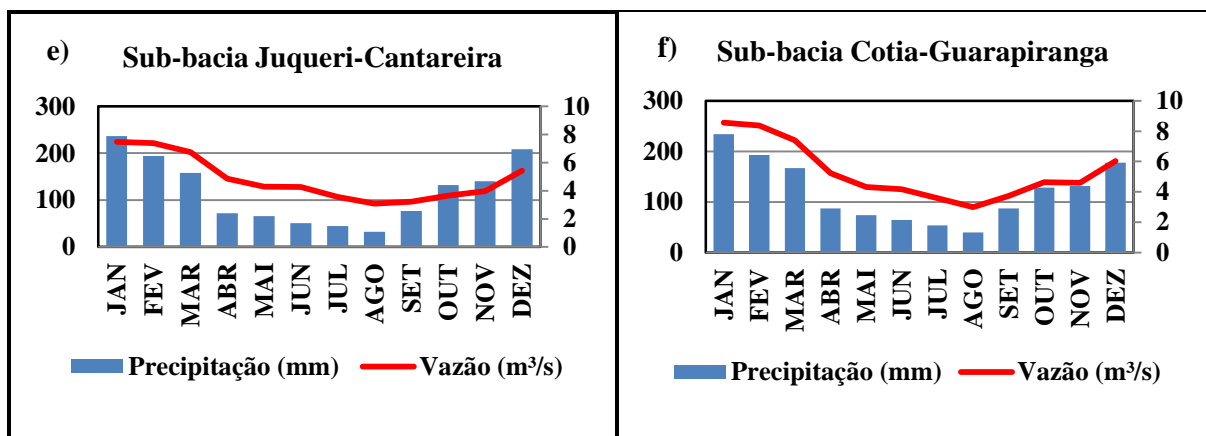
5.1.2. Padrão médio mensal da chuva e vazão na Bacia do Alto Tietê

Para a maior parte das sub-bacias, a variabilidade sazonal da precipitação acompanha o padrão da vazão. Entretanto, em algumas sub-bacias existe defasagem entre os meses com padrão de aumento/diminuição de chuva e aumento/diminuição da vazão. Isto pode ser observado nas sub-bacias Tietê-Cabeceiras (Figura 17a) e Pinheiros-Pirapora, nas quais o mês de máxima chuva é janeiro e o de máxima vazão é no mês de fevereiro (Figura 17d). Para todas as sub-bacias o mês de mínima vazão e precipitação é agosto.

De modo geral, a variação sazonal da precipitação e vazão em toda a Bacia do Alto Tietê segue próxima, sendo o inverno o período mais seco e com menor vazão e o verão o período mais chuvoso e com elevada vazão (Figura 18). De 1961 a 2014, no inverno (JJA) a BHAT apresentou uma vazão média mensal de 12,2 m³/s e uma precipitação média mensal de 47,2 mm, e no verão (DJF) uma vazão de 30 m³/s e precipitação de 210,46 mm (Figura 18a).

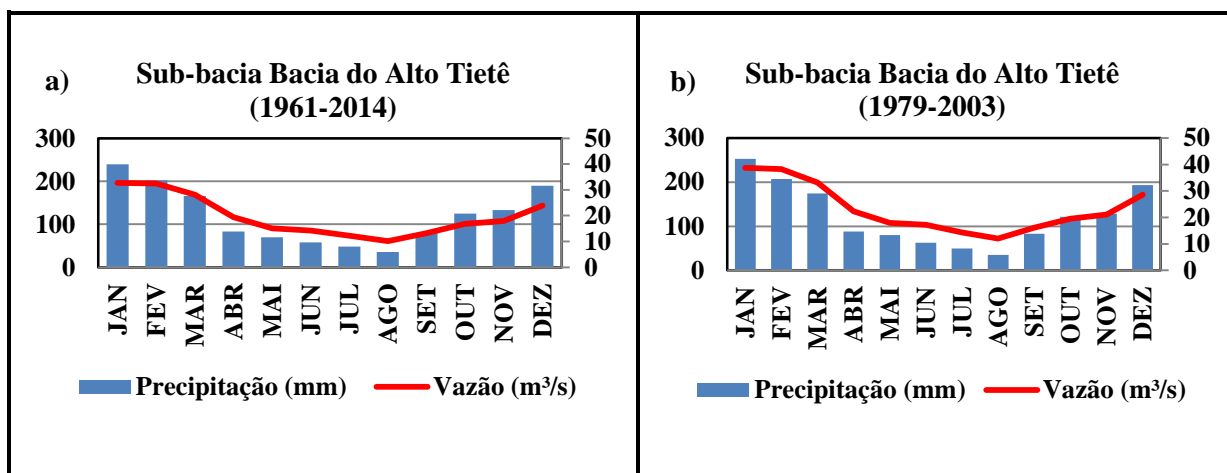
Figura 17 – Gráfico do padrão médio mensal de chuva e vazão nas sub-bacias: (a) Tietê-Cabeceiras, (b) Penha-Pinheiros, (c) Billings-Tamanduateí, (d) Pinheiros-Pirapora, (e) Juqueri-Cantareira e (f) Cotia-Guarapiranga, no período de 1961-2014





Também foi construído o padrão médio mensal de chuva e vazão para o período de 1979-2003, pois esta foi a climatologia de dados observados utilizada para validar as saídas de precipitação do modelo MRI-JMA. Tem-se que, de 1979 a 2003, a BHAT apresentou uma vazão média mensal de 17,26 m³/s e uma precipitação média mensal de 49 mm, e no verão demonstrou uma vazão de 42,4 m³/s e precipitação de 217,65 mm (Figura 18b).

Figura 18 – Gráfico da média mensal de chuva e vazão na Bacia do Alto Tietê no período de 1961-2014 (a) e no período de 1979-2003 (b)

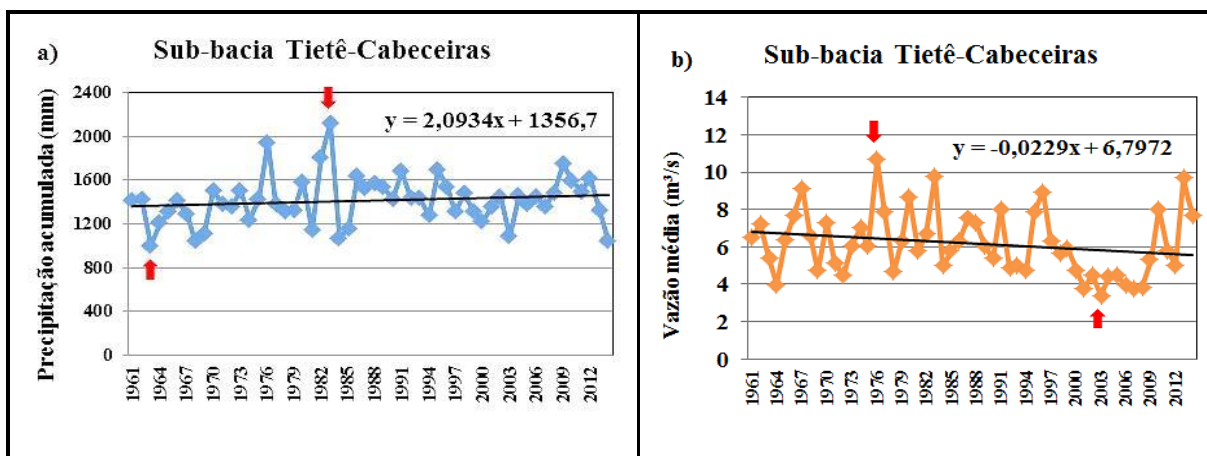


No período de 1979 a 2003 é possível observar um acréscimo da chuva e da vazão na bacia em relação à climatologia sazonal de 1961 a 2014. O aumento da vazão é verificado ao longo de todo o ano, com acréscimo de 29,15%. A intensificação do índice pluviométrico ocorreu, sobretudo, nos meses de dezembro e janeiro, o que influenciou na elevação da vazão durante o verão.

5.1.3. Variabilidade interanual e tendências de chuva e vazão nas sub-bacias do Alto Tietê

A sub-bacia Tietê-Cabeceiras apresenta uma precipitação média anual de 1414 mm e uma tendência de aumento médio da precipitação de 2,09 mm/ano (Figura 19a), no período de 1961 a 2014. Os anos mais chuvosos foram 1983 (2123,1 mm) e 1976 (1945 mm), e os anos menos chuvosos foram 1963 (1006 mm) e 1968 (1036,7 mm). Em relação à vazão, a sub-bacia tem uma vazão média mensal de 6,17 m³/s, com uma tendência de diminuição média de 0,02 m³/s ao ano (Figura 19b). Os anos com maiores vazões foram 1976 (10,6 m³/s) e 1983 (9,8 m³/s) e de menor vazão foram 2003 (3,3 m³/s) e 2007 (3,7 m³/s).

Figura 19 – Gráfico de variabilidade interanual e tendências de chuva (a) e vazão (b) na sub-bacia Tietê-Cabeceiras, no período de 1961-2014



A sub-bacia Billings-Tamanduateí possui uma chuva média anual de 1529,5 mm, com tendência de aumento de 2,19 mm/ano (Figura 20a). Os anos mais chuvosos foram 1983 (2094 mm), 1976 (2030,5 mm) e 1991 (2008,1 mm), e os anos menos chuvosos foram 1963 (997 mm), 2013 (1065,4 mm) e 1968 (1150,7 mm). A vazão média anual na sub-bacia (Figura 20b) é de 10,1 m³/s, com tendência de acréscimo de 0,02 m³/s por ano, com a menor vazão em 2003 (6,45 m³/s) e a maior vazão em 2010 (16,2 m³/s). O ano com maior/menor vazão na sub-bacia não corresponde ao mesmo ano com maior/menor precipitação.

A sub-bacia Penha-Pinheiros exibe uma precipitação média anual de 1423,4 mm, com tendência de crescimento anual de 3,62 mm (Figura 21a). O ano de 1983 é o mais chuvoso, com 2169,5 mm, e o ano de 1963 é considerado o menos chuvoso, com 952,7 mm. A vazão média da sub-bacia (Figura 21b) é de 19,8 m³/s ao ano, com tendência de aumento significativa estatisticamente de 0,09 m³/s. Os anos com menores vazões foram 1964 (12,1

m³/s), 1963 (12,27 m³/s) e 2003 (12,6 m³/s), e o ano com maior vazão foi 2012, com 32,2 m³/s. O ano com maior e menor vazão na sub-bacia não corresponde ao mesmo ano com maior e menor precipitação.

Figura 20 – Gráfico da variabilidade interanual e tendências de chuva (a) e vazão (b) na sub-bacia Billings-Tamanduateí, no período de 1961-2014

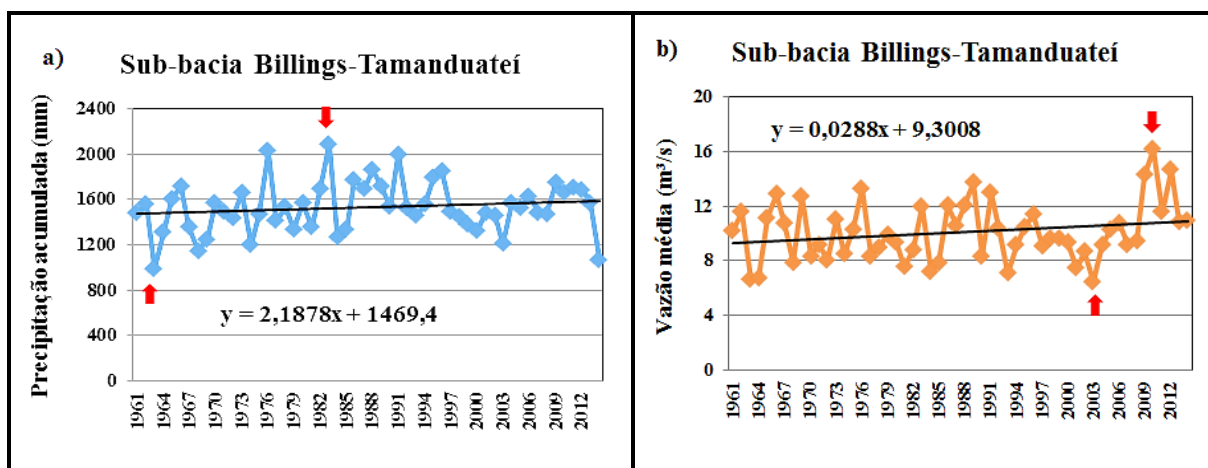
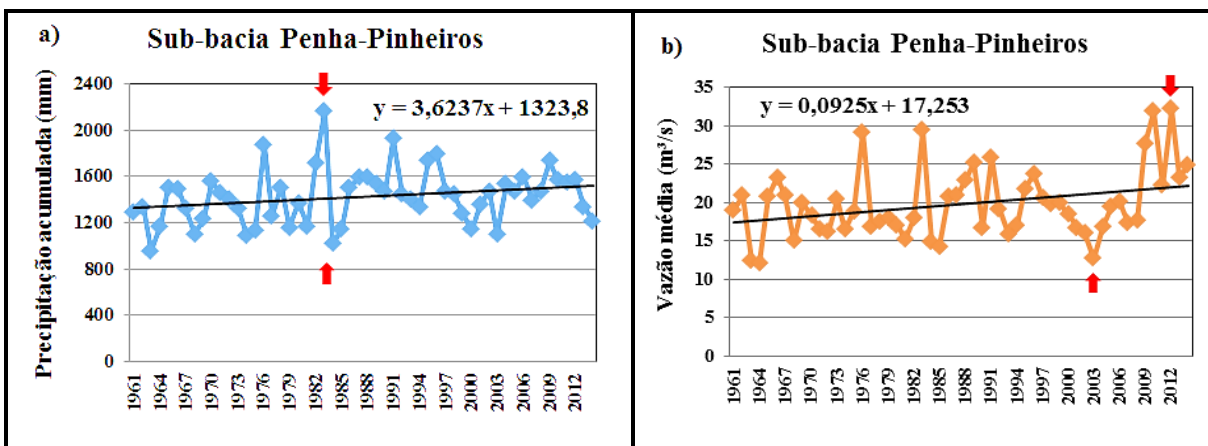


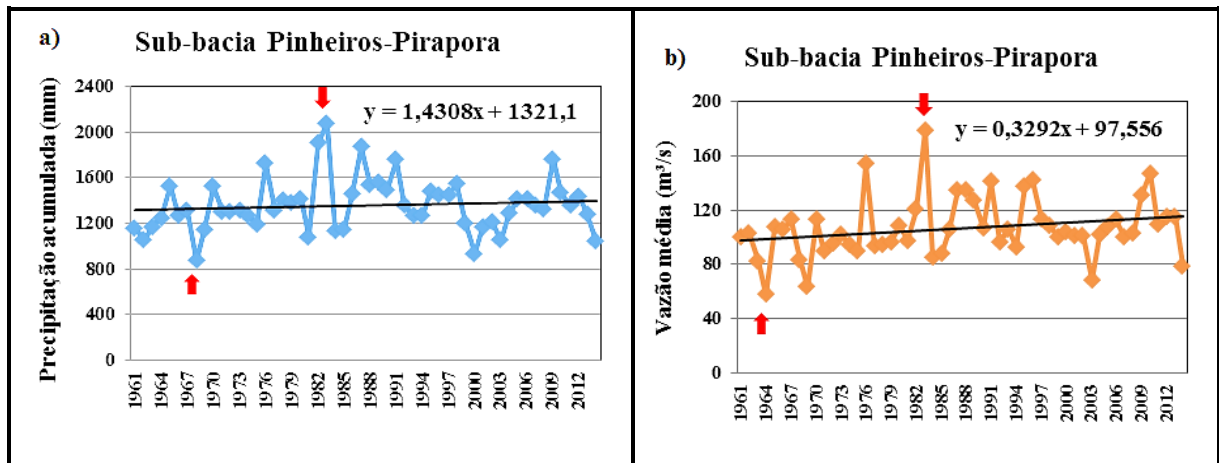
Figura 21 – Gráfico de variabilidade interanual e tendências de chuva (a) e vazão (b) na sub-bacia Penha-Pinheiros, no período de 1961-2014



A sub-bacia Pinheiros-Pirapora apresenta uma tendência de acréscimo na precipitação de 1,43 mm/ano, no período de 1961 a 2014, com uma precipitação média anual de 1360,4 mm (Figura 22a). Os anos mais chuvosos foram 1983 (2081,4 mm), 1982 (1903 mm) e 1987 (1872,1 mm), e os anos mais secos foram 1968 (869,3 mm) e 2000 (936,6 mm). Em relação à vazão, a sub-bacia tem uma tendência de aumento de 0,33 m³/s por ano, com uma vazão média anual de aproximadamente 106,6 m³/s (Figura 22b). Os anos com menores vazões foram 1964 (57 m³/s), 1969 (63,16 m³/s) e 2003 (68,66 m³/s), e os anos com maiores vazões foram 1983 (178,87 m³/s) e 1976 (154,4 m³/s). O ano de 1983, com maior vazão, corresponde

ao mesmo ano com maior precipitação na sub-bacia, mas o mesmo não foi observado como o ano de menor vazão e precipitação.

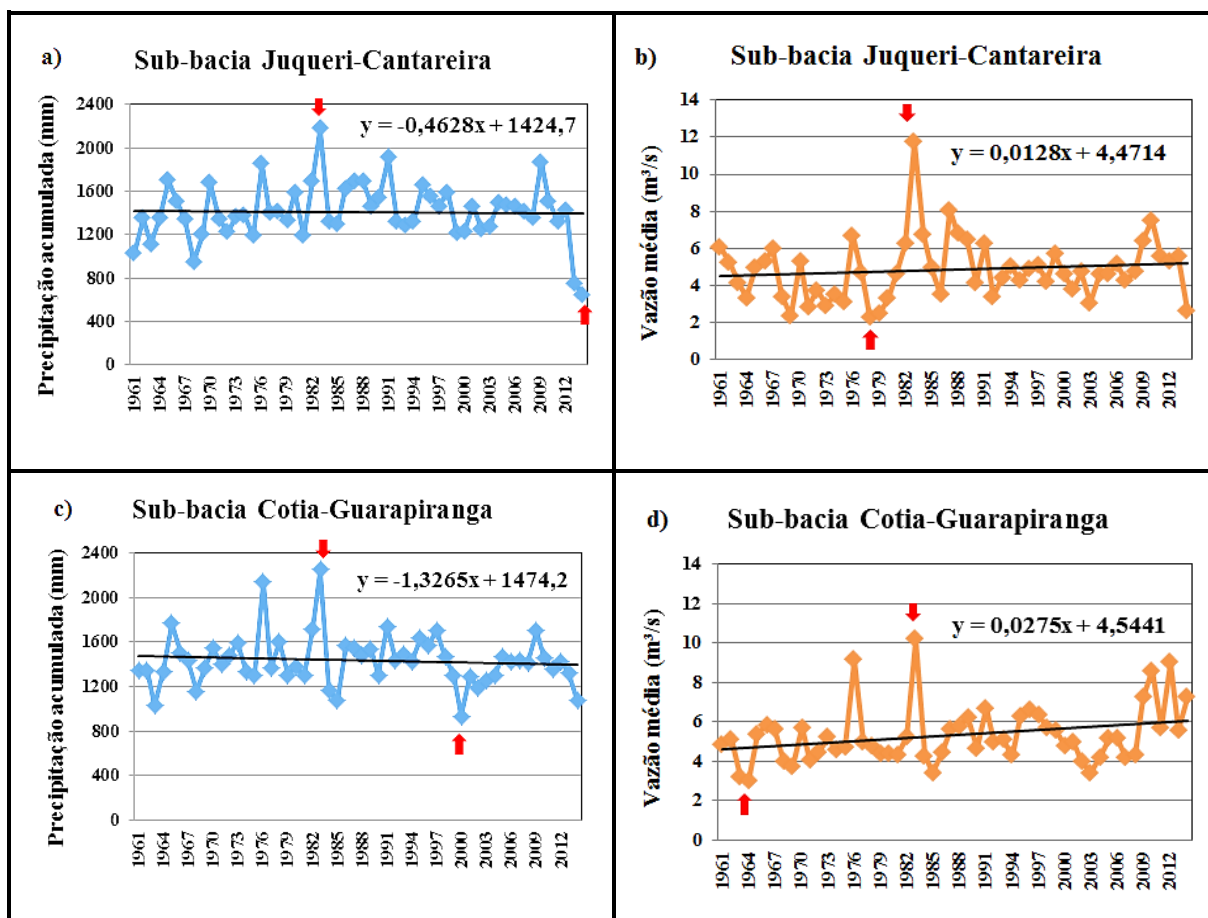
Figura 22 - Gráfico de variabilidade interanual e tendências de chuva (a) e vazão (b) na sub-bacia Pinheiros-Pirapora, no período de 1961-2014



A sub-bacia Juqueri-Cantareira exibe uma precipitação média anual de 1412 mm (Figura 23a), com tendência de decréscimo de 0,5 mm/ano, sendo as precipitações mínimas registradas de aproximadamente 646 mm (2014) e 756 mm (2013) e as máximas registradas de 2181,1 mm (1983) e 1912,2 mm (1991). Em relação à variabilidade interanual de vazão (Figura 23b), a sub-bacia tem uma ligeira tendência de aumento da vazão anual de 0,01 m³/s e sua vazão média anual é de 4,82 m³/s. Os anos com maiores vazões foram 1983 (11,8 m³/s) e 1987 (8,1 m³/s), e os anos com menores vazões foram 1978 e 1979, ambos com uma vazão de 2,3 m³/s, e 1969 com 2,4 m³/s. O ano de 1983, com maior vazão, corresponde ao mesmo ano com maior precipitação na sub-bacia, mas o mesmo não foi observado com os anos de menor vazão e o ano de menor precipitação.

E a sub-bacia Cotia-Guarapiranga possui uma precipitação média anual de 1437,8 mm, com uma tendência de diminuição de 1,36 mm/ano (Figura 23c). Os anos mais chuvosos foram 1983 (2253,5 mm), 1976 (2150,9 mm) e 1965 (1773,4 mm) e os anos mais secos foram 2000 (932 m³/s), 1963 (1031,1 m³/s) e 2014 (1072,7 m³/s). A sub-bacia Cotia-Guarapiranga tem uma vazão média anual de 5,3 m³/s, com uma tendência significativa de acréscimo de 0,03 m³/s por ano. Os anos com maiores vazões foram 1983 (10,22 m³/s), 1976 (9,2 m³/s) e 2012 (9,1 m³/s) e o ano com menores vazões foram 1964 (2,97 m³/s) e 1963 (3,2 m³/s).

Figura 23 - Gráfico de variabilidade interanual e tendências de chuva (a) e vazão (b) na sub-bacia Juqueri-Cantareira (a) e variabilidade interanual e tendência de chuva (c) e vazão (d) na sub-bacia Cotia-Guarapiranga, ambos para o período de 1961-2014



A sub-bacia Tietê-Cabeceiras é a única que apresenta aumento na tendência da precipitação e redução na tendência da vazão (Figura 19), enquanto as sub-bacias Juqueri-Cantareira e Cotia-Guarapiranga possuem uma tendência de diminuição da precipitação e aumento da vazão (Figura 23). Apenas as tendências de vazão das sub-bacias Cotia-Guarapiranga (Figura 23d) e Penha-Pinheiros (Figura 21b) exibem significância estatística. Todas as variações da variabilidade interanual e significâncias estatísticas das tendências podem ser observadas na Tabela 5.

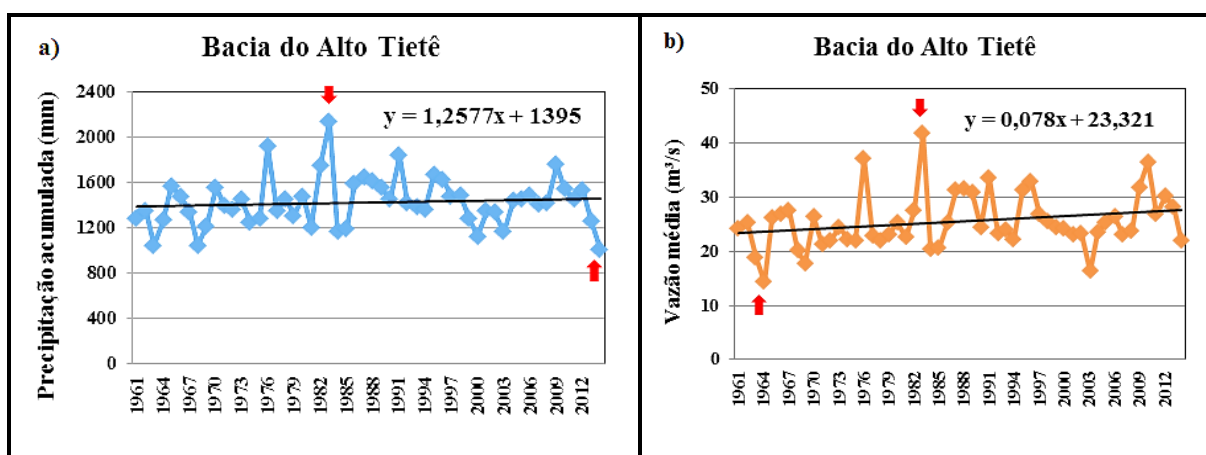
De modo geral, a precipitação acumulada anual da Bacia do Alto Tietê é de 1429,6 mm, e a variabilidade anual mostrou uma tendência de acréscimo de 1,26 mm/ano (Figura 24a). Os anos mais chuvosos foram 1983 (2150,4 mm), 1976 (1929 mm), 1991 (1837,3 mm) e 2009 (1763,2 mm). Já os anos mais secos foram 2013 (1012,1 mm), 1968 (1044,7 mm), 1963 (1045 mm) e 2000 (1131,1 mm).

Tabela 6 – Variabilidade interanual, tendências e p-valor das tendências lineares de precipitação e vazão das sub-bacias do Alto Tietê, no período de 1961 a 2014. Os valores em vermelho indicam um $p\text{-valor} \leq 0,05$, evidenciando uma tendência significativa estatisticamente

SUB-BACIA	VARIÁVEL	TENDÊNCIA		
		VARIAÇÃO	VALOR	P-VALOR
TIETÊ-CABECEIRAS	Precipitação	+	2,1 mm/ano	0,48
	Vazão	-	0,02 m³/s.ano	0,09
JUQUERI-CANTAREIRA	Precipitação	-	0,46 mm/ano	0,62
	Vazão	+	0,01 m³/s.ano	0,48
PINHEIROS-PIRAPORA	Precipitação	+	1,43 mm/ano	0,72
	Vazão	+	0,33 m³/s.ano	0,15
COTIA-GUARAPIRANGA	Precipitação	-	1,33 mm/ano	0,32
	Vazão	+	0,03 m³/s.ano	0,05
PENHA-PINHEIROS	Precipitação	+	3,62 mm/ano	0,16
	Vazão	+	0,09 m³/s.ano	0,04
BILLINGS-TAMANDUATEÍ	Precipitação	+	2,19 mm/ano	0,48
	Vazão	+	0,03 m³/s.ano	0,21
BACIA DO ALTO TIETÊ	Precipitação	+	1,26 mm/ano	0,78
	Vazão	+	0,08 m³/s.ano	0,14

A variabilidade interanual da vazão da BHAT (Figura 24b) mostrou uma tendência de acréscimo anual de 0,08 m³/s ao longo do período de 1961-2014. Os anos com menor vazão foram 1964 (14,35 m³/s) e 2003 (16,27 m³/s), e os com maiores vazões foram 1983 (42 m³/s), 1976 (37,2 m³/s) e 2010 (36,5 m³/s). O ano de 1983, com maior vazão, corresponde ao mesmo ano com maior precipitação na Bacia do Alto Tietê, mas o mesmo não foi observado como o ano de menor vazão e precipitação.

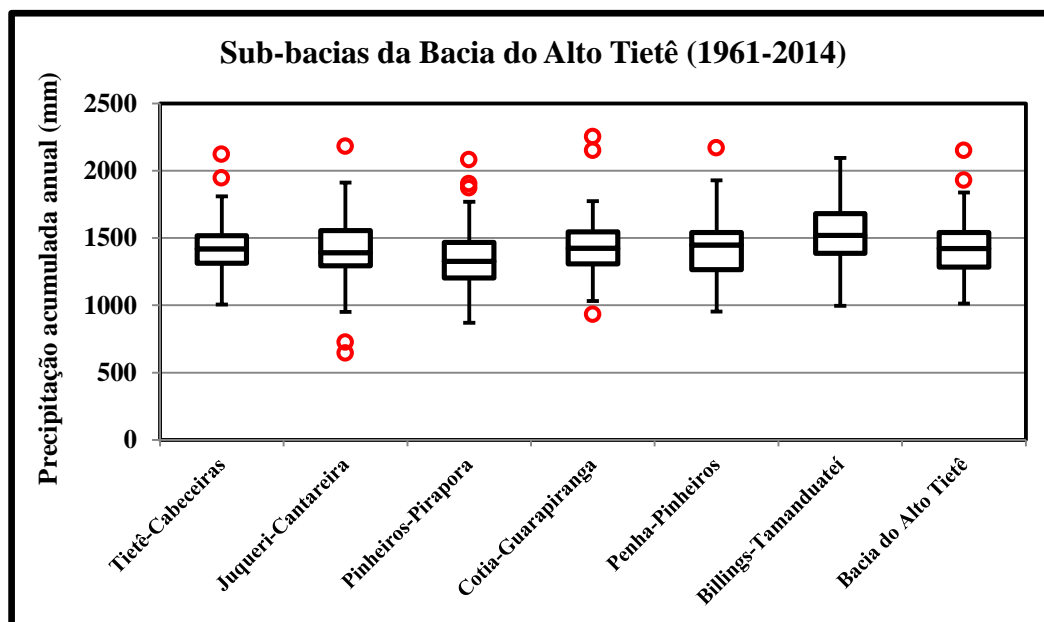
Figura 24 - Gráfico de variabilidade interanual e tendências de chuva (a) e vazão (b) na Bacia do Alto Tietê, no período de 1961-2014



Para identificar valores atípicos (*outliers*) e comparar as variabilidades na série de dados de chuva e vazão entre as sub-bacias foram construídos diagramas *boxplot* (Figura 25 e

Figura 26). Os dados de precipitação das sub-bacias possuem uma variabilidade de precipitação similar, sendo que a sub-bacia Billings-Tamanduateí apresenta maiores valores de precipitação e a sub-bacia Pinheiros-Pirapora menores valores, como foi verificado na análise sazonal (Figura 25).

Figura 25 – Gráfico de *Boxplots* da precipitação acumulada anual das sub-bacias do Alto Tietê, no período de 1961-2014



Os anos atípicos, considerados como os mais secos e identificados pelo *outlier* no diagrama de *boxplot*, ocorreram na sub-bacia Cotia-Guarapiranga, em 2000, e na sub-bacia Juqueri-Cantareira, nos anos de 2013 e 2014 (Figura 25). Entretanto, com exceção da sub-bacia Billings-Tamanduateí, que não contém *outliers* em sua série, todas as sub-bacias exibiram anos atípicos chuvosos. As sub-bacias Tietê-Cabeceiras e Cotia-Guarapiranga têm dois *outliers* que detectaram anos com muita precipitação, em 1976 e 1983. Dentre todas as sub-bacias, a sub-bacia Pinheiros-Pirapora possui o maior número de *outliers*, que detectaram como muitos chuvosos os anos de 1982, 1983 e 1987. A Bacia do Alto Tietê (BHAT) apresenta dois anos atípicos chuvosos, 1976 e 1983.

Os anos muito chuvosos de 1982, 1983 e 1987 foram caracterizados pela ocorrência em forte intensidade do fenômeno climático global El Niño, que favoreceu a formação de chuva na região. Entretanto, o ano de 1976, identificado como muito chuvoso na maioria das sub-bacias, foi marcado pela presença de uma La Niña de grande magnitude. Isso indica que, apesar do ENOS ser o principal fenômeno de variabilidade climática interanual global que afeta o Brasil, ainda não há um consenso sobre sua influência sobre a precipitação na região

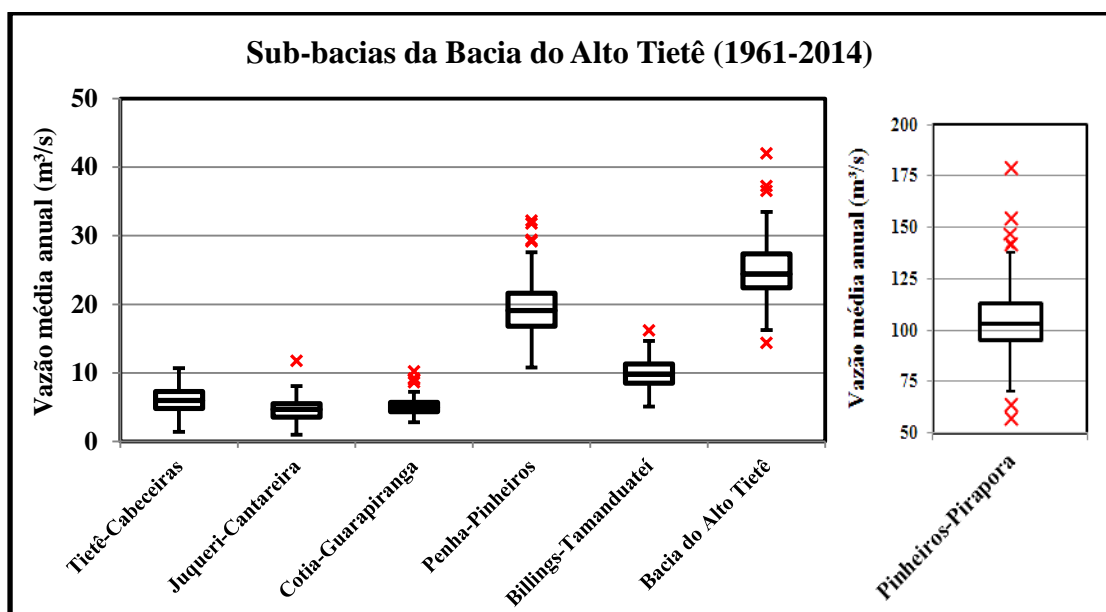
Sudeste. Apesar disso, o ENOS foi o principal sistema atmosférico que influenciou na precipitação em 1983, ano com máxima chuva em todas as sub-bacias.

No ano de 2000, classificado como muito seco, ocorreu uma La Niña de moderada intensidade. Entretanto, segundo Cavalcanti e Kouksy (2001), o principal motivo associado aos baixos índices pluviométricos na região foi a persistência e amplitude dos VCANs que se localizaram na região impedindo o deslocamento da ZCAS para o Sudeste. Outros fatores que também contribuíram para a estiagem foram as anomalias atmosféricas vinculadas às intensas atividades convectivas na região da Indonésia.

Já nos anos de 2013 e 2014, a principal causa relacionada aos baixos índices pluviométricos foi a circulação anticiclônica anômala sobre o Atlântico Sul que se estendeu sobre o Sudeste, transportando ar mais seco do que o normal para a região e bloqueando a migração de sistemas frontais de baixa pressão. Isso resultou na permanência e intensidade de um sistema de alta pressão atmosférica, que desviou o fluxo de umidade da Amazônia para a região Sudeste, processo realizado pelos JBN, além de reduzir o número de casos de ZCAS durante estes verões, especialmente nos meses de dezembro e janeiro. Também inibiu o deslocamento das frentes frias sobre São Paulo (COELHO *et al.*, 2015b).

As sub-bacias do Alto Tietê possuem uma grande variabilidade na distribuição dos dados, mostrando distintos comportamentos de vazão. A sub-bacia Pinheiros-Pirapora, exutório da bacia, apresenta maiores vazões, e a sub-bacia Juqueri-Cantareira apresenta menores valores (Figura 26).

Figura 26 - Gráfico de *Boxplots* das médias anuais de vazão das sub-bacias do Alto Tietê, no período de 1961-2014



Os únicos anos atípicos (*outliers*) que identificaram a presença de baixas vazões ocorreram na sub-bacia Pinheiros-Pirapora, em 1964 e 1969. Contudo, com exceção da sub-bacia Tietê-Cabeceiras, que não tem *outlier* em sua série, todas as sub-bacias exibiram anos atípicos com muita vazão. Dentre todas as sub-bacias, a sub-bacia Pinheiros-Pirapora possui o maior número de *outliers*, sendo que cinco deles detectaram anos com muita vazão. A Bacia do Alto Tietê apresenta apenas um ano atípico com baixa vazão (1964) e três anos anômalos com elevadas vazões, em 1976, 1983 e 2010.

5.2. Avaliação dos dados de precipitação do Modelo MRI-JMA para o período presente

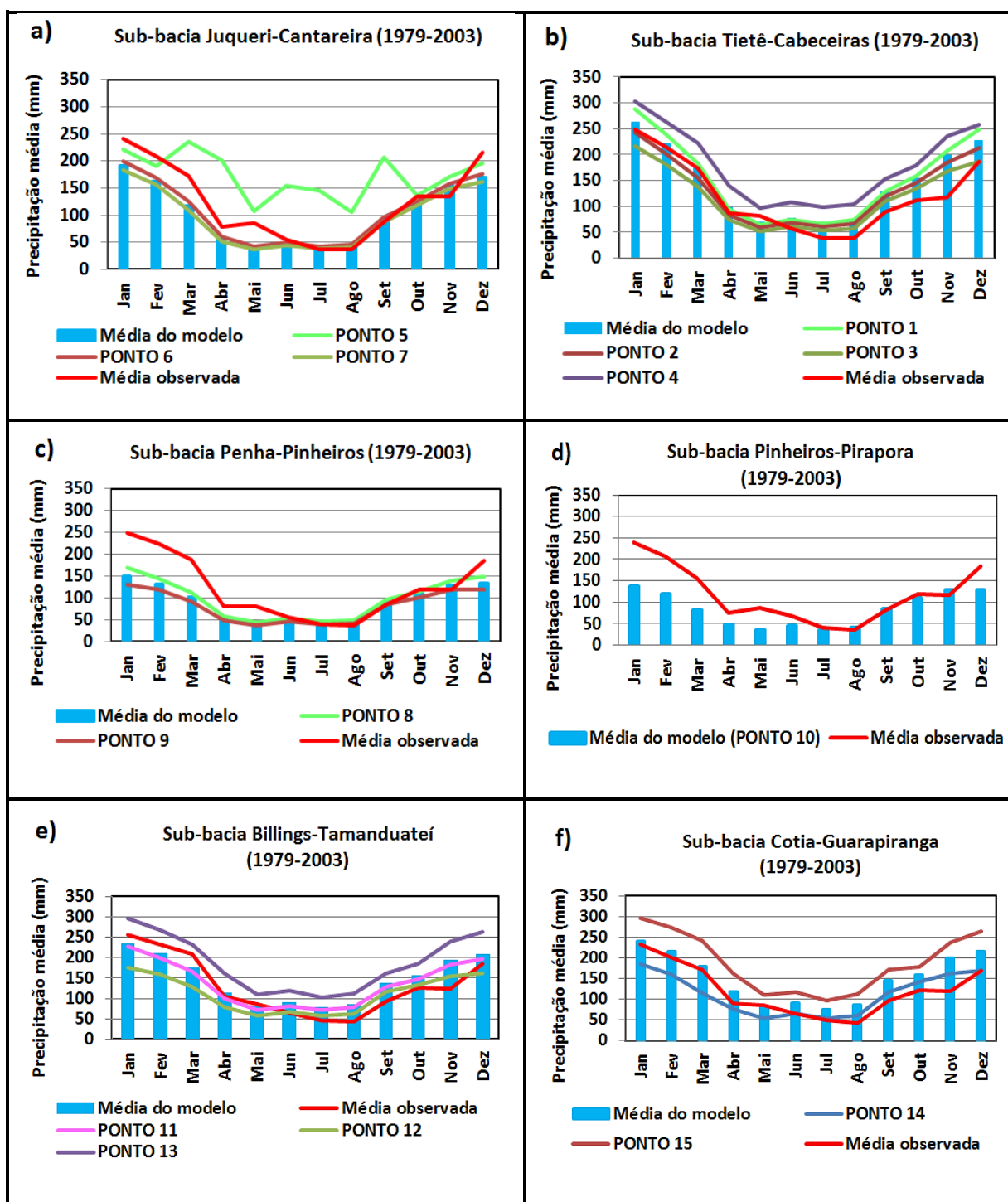
Nesta seção foram analisadas as médias mensais da chuva simuladas pelo modelo climático, para o período 1979-2013, e foram comparados com os dados observados, procedimentos detalhados no item 4.3.5. A fim de facilitar as análises, esta seção discute o desempenho do modelo por meio do Erro Médio (BIAS). As outras métricas para a avaliação do desempenho encontram-se no Apêndice A, para a precipitação, e no Apêndice B para a avaliação da variável temperatura.

5.2.1. Médias mensais das chuvas nas sub-bacias do Alto Tietê simuladas pelo Modelo MRI-JMA

A Figura 27 mostra as médias mensais da chuva simulada pelo modelo e a precipitação observada para cada uma das sub-bacias pertencentes à BHAT, para o período de 1979-2013. O modelo climático global MRI-JMA conseguiu representar a sazonalidade de chuva na região.

Na sub-bacia Juqueri-Cantareira (Figura 27a), somente o Ponto 5 do modelo climático não conseguiu identificar o comportamento sazonal da sub-bacia, que apresentou um padrão de distribuição completamente distinto ao da região. Por este motivo, a precipitação do Ponto 5 foi desconsiderada ao se estabelecer a precipitação média da sub-bacia. O modelo MRI-JMA subestima a chuva na sub-bacia durante o verão e outono. De modo geral, as saídas do modelo apresentaram menores erros no período de junho a setembro, sendo que o mês de junho obteve o menor erro (-1,37 mm). Os maiores erros foram registrados no primeiro trimestre do ano e o mês de janeiro obteve o maior erro, de -37,18 mm (Tabela 6).

Figura 27 – Gráfico de climatologia sazonal do modelo climático MRI das sub-bacias Juqueri-Cantareira (a), Tietê-Cabeceiras (b), Penha-Pinheiros (c), Pinheiros-Pirapora (d), Billings-Tamanduateí (e) e Cotia-Guarapiranga (f), no período de 1979-2003



Na sub-bacia Tietê-Cabeceiras (Figura 27b), o ponto 4 apresentou a maior precipitação na região, enquanto o ponto 3 apresentou a menor precipitação e possui menor erro em relação à precipitação observada. De modo geral, as saídas do modelo apresentaram menor erro no primeiro quadrimestre do ano, sendo no mês de maio o menor erro (-1,89 mm). Os

maiores erros ocorreram durante o último trimestre do ano, sendo que o mês de novembro teve o maior valor (69,89 mm).

As saídas do modelo climático conseguiram representar o padrão climatológico sazonal da sub-bacia Penha-Pinheiros (Figura 27c), apesar de subestimar a precipitação para a região, principalmente durante o verão e o outono. O mesmo é válido para a sub-bacia Pinheiros-Pirapora (Figura 27d). A sub-bacia Penha-Pinheiros obteve o maior erro em janeiro, (-90,77 mm), e o menor erro em julho (-4,62 mm), enquanto a sub-bacia Pinheiros-Pirapora exibiu o maior erro em janeiro (-95,75 mm) e o menor erro em novembro (-0,41 mm).

As saídas do modelo MRI-JMA também conseguiram representar o comportamento climático sazonal das sub-bacias Billings-Tamanduateí (Figura 27e) e Cotia-Guarapiranga (Figura 27f), apesar de superestimar a precipitação durante o segundo semestre do ano na sub-bacia Billings-Tamanduateí e superestimar a chuva na sub-bacia Cotia-Guarapiranga ao longo de todo o ano.

Na sub-bacia Billings-Tamanduateí, o Ponto 13 possui a precipitação muito acima da média observada, sendo que o mês de maio obteve o menor erro (4,49 mm) e o mês de novembro o maior erro (58,20 mm). Já na sub-bacia Cotia-Guarapiranga, o Ponto 15 apresentou a precipitação muito acima da média observada, sendo que o mês de março obteve o menor erro (2,57 mm) e o mês de novembro o maior erro (76,63 mm).

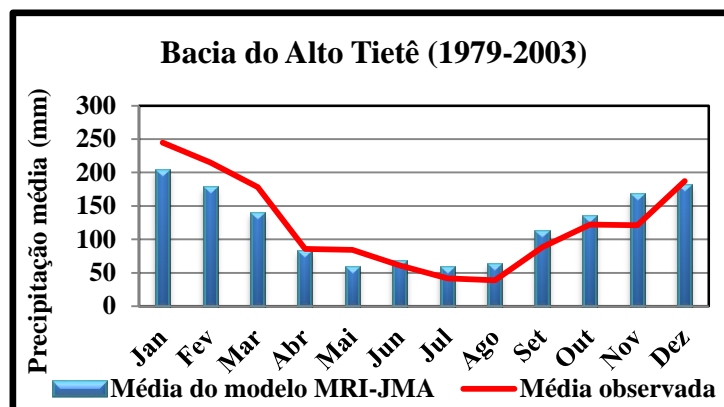
Tabela 7 - Erro médio (mm) da precipitação do modelo climático MRI-JMA para as sub-bacias do Alto Tietê, no período de 1979-2003

SUB-BACIA	TIETÊ - CABECEIRAS	JUQUERI - CANTAREIRA	PENHA - PINHEIROS	PINHEIROS - PIRAPORA	BILLINGS - TAMANDUATEÍ	COTIA - GUARAPIRANGA	BACIA DO ALTO TIETÊ
JAN	22,71	-37,18	-90,77	-95,75	-18,32	7,65	-21,62
FEV	17,74	-24,52	-87,46	-71,04	-11,64	24,10	-14,26
MAR	12,23	-33,54	-72,87	-62,74	-7,85	2,57	-16,90
ABR	13,13	-12,20	-28,30	-22,24	15,77	27,91	4,20
MAI	-1,89	-25,25	-27,39	-34,48	4,49	5,12	-9,96
JUN	25,30	-6,53	-6,77	-19,45	29,30	24,29	10,88
JUL	25,47	-1,37	-4,62	-11,32	26,30	22,41	12,99
AGO	40,45	13,39	9,77	8,24	44,38	45,64	30,52
SET	51,05	16,30	13,47	12,41	50,61	55,51	37,46
OUT	37,15	-9,06	-13,98	-14,32	23,69	41,41	15,43
NOV	69,89	17,15	-3,29	-0,41	58,20	76,63	43,96
DEZ	33,80	-35,30	-56,24	-56,23	18,54	42,54	2,09

De modo geral, o modelo MRI-JMA conseguiu identificar o padrão sazonal da BHAT (Figura 28), apresentando menor erro durante o inverno e maior erro durante o verão (Tabela 6). O modelo climático subestimou a precipitação na bacia durante o verão e outono e

superestimou no inverno e na primavera. A Bacia do Alto Tietê apresentou o maior erro em novembro (43,96 mm) e o menor erro em dezembro (2,09 mm).

Figura 28 - Gráfico de climatologia sazonal do modelo climático MRI da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê, no período de 1979-2003



5.3. Correção das saídas do modelo climático MRI-JMA

O modelo climático MRI-JMA apresentou um comportamento similar em relação à climatologia observada, no período de 1979 a 2003, mostrando ser capaz de representar os padrões de variação sazonal da Bacia do Alto Tietê e sub-bacias que a compõem, o que indica que o modelo pode simular uma precipitação futura provável, apesar das incertezas, e que sua escolha foi uma boa opção para investigar os efeitos das mudanças climáticas sobre a disponibilidade hídrica futura na região.

Entretanto, as saídas dos modelos climáticos não devem ser utilizadas de forma direta para a estimativa de disponibilidade hídrica. Assim, as saídas do modelo MRI-JMA foram corrigidas, com a finalidade de remover as diferenças entre o que foi simulado pelo modelo e o que foi observado.

Para definir o método de correção mais eficaz para as séries de precipitação e temperatura da Bacia do Alto Tietê foram testadas três técnicas de correção (item 4.3.3), para o período de 1979 a 2003.

Após os testes de correção, optou-se pela técnica de correção Aplicação Direta – DA2 (Equação 29) para a variável precipitação, visto que ela possui a maior correlação e menores erros, ou seja, maior semelhança com a série de dados de chuva observadas. Para a variável temperatura, o método adotado foi o de remoção do erro médio mensal (Equação 27), primeiro procedimento de correção testado e distinto do utilizado para a precipitação.

No Apêndice C encontra-se a tabela com os cálculos de avaliação dos métodos de correção para a precipitação e, no Apêndice D, para a temperatura.

5.3.1. Correção das saídas de precipitação do modelo MRI-JMA para o período presente (1979-2003)

O padrão médio mensal de precipitação de todas as sub-bacias do Alto Tietê apresentam similaridades sazonais que foram captadas pelo modelo climático. Com a correção da chuva é possível verificar uma maior semelhança entre as curvas de precipitação observada e de precipitação do modelo corrigidas, no período de 1979-2003 (Figura 29).

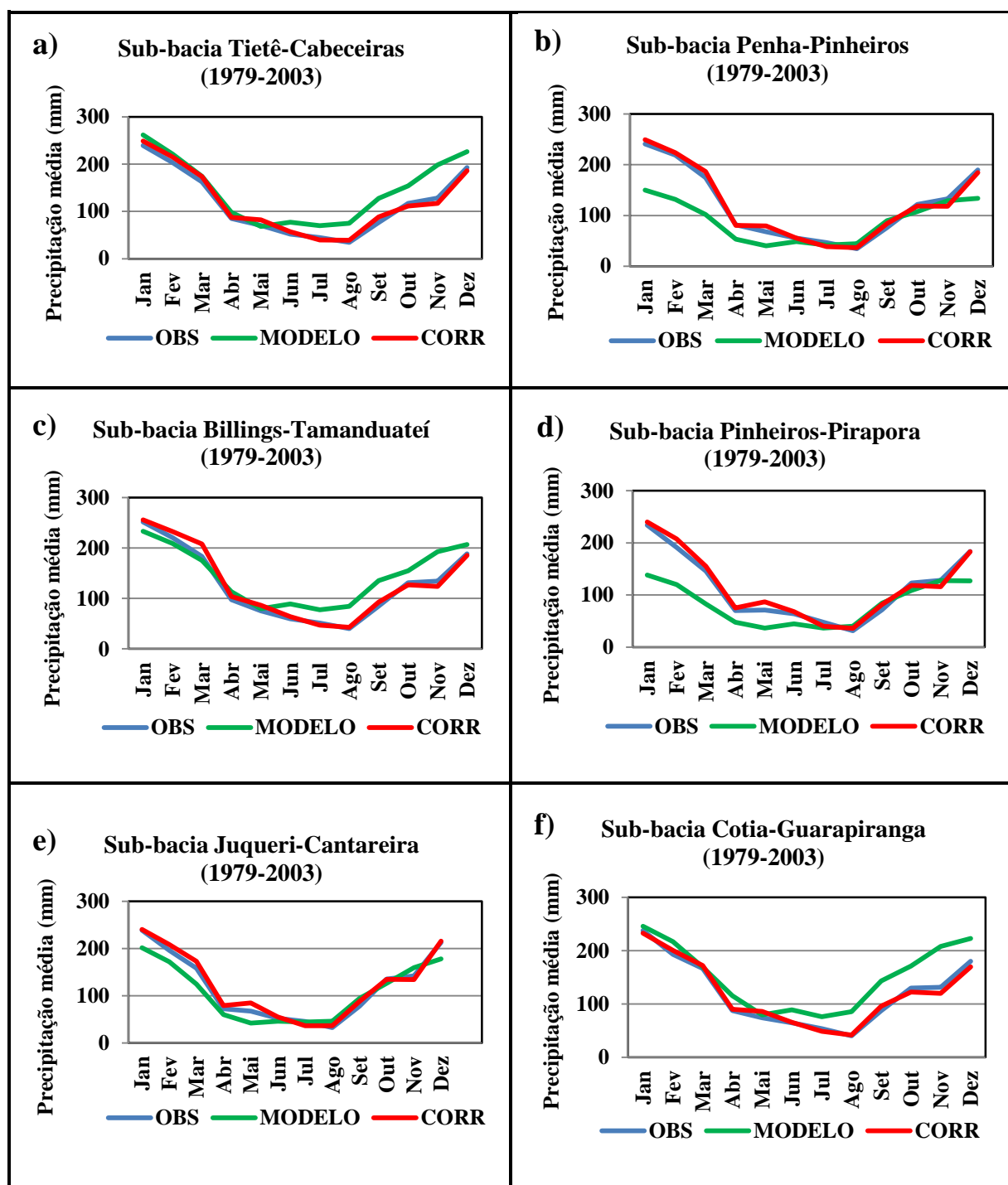
Nas sub-bacias Tietê-Cabeceiras (Figura 29a), Billings-Tamanduateí (Figura 29c) e Cotia-Guarapiranga (Figura 29f), a precipitação média mensal observada e do modelo são muito próximas para o primeiro semestre do ano. Contudo, durante o segundo semestre, o modelo superestima a precipitação na região. Com a correção, a precipitação média do modelo corrigida representa com maior exatidão a precipitação média observada nestas sub-bacias, exibindo menores erros.

Já nas sub-bacias Penha-Pinheiros (Figura 29b), Pinheiros-Pirapora (Figura 29d) e Juqueri-Cantareira (Figura 29e), a precipitação média mensal observada e do modelo estão próximas durante o segundo semestre do ano, embora, durante o primeiro semestre nestas regiões, o modelo subestima a precipitação. Desta forma, com a correção dos valores de chuva nas sub-bacias, a precipitação do modelo corrigida representa com maior precisão a precipitação observada.

De modo geral, na Bacia do Alto Tietê (Figura 30a), após a correção o modelo MRI-JMA aproxima-se mais a precipitação observada, diminuindo os erros e confirmando que as correções dos dados de chuva possibilitam representar a precipitação da bacia com maior acurácia, sobretudo no segundo semestre, no qual é possível observar maior defasagem entre os valores observados e o modelo antes da correção.

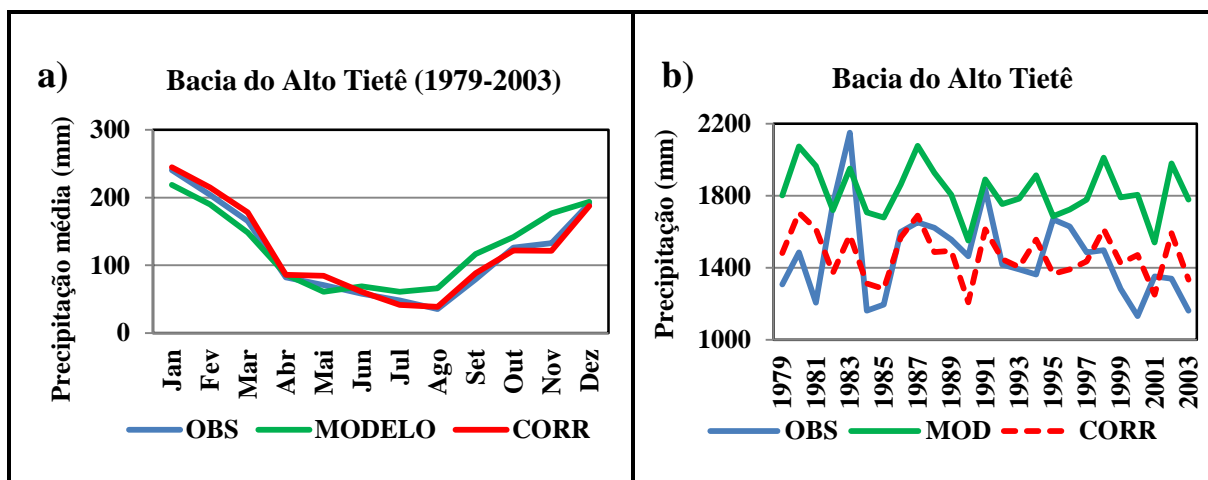
Em relação à variabilidade interanual, o modelo MRI-JMA consegue representar a tendência de aumento da precipitação na Bacia do Alto Tietê (Figura 30b), porém não consegue captar com primor a variabilidade interanual da chuva na bacia, especificamente os anos de chuva muito intensa, como foi o caso do ano 1983, mesmo com a precipitação do modelo corrigida.

Figura 29 – Climatologia sazonal do modelo climático MRI-JMA corrigido nas sub-bacias: (a) Tietê-Cabeceiras, (b) Penha-Pinheiros, (c) Billings-Tamanduateí, (d) Pinheiros-Pirapora, (e) Juqueri-Cantareira e (f) Cotia-Guarapiranga, no período de 1979-2003



Os modelos climáticos, em geral, têm dificuldade em simular anos extremos, sejam eventos de muita chuva ou de seca, o que não é exclusividade somente do modelo MRI-JMA. Esta dificuldade deve-se principalmente às parametrizações da convecção, adicionando a isto a baixa previsibilidade da região Sudeste.

Figura 30 - Climatologia sazonal (a) e Variabilidade interanual (b) do modelo climático MRI-JMA corrigido da Bacia do Alto Tietê, no período de 1979-2003

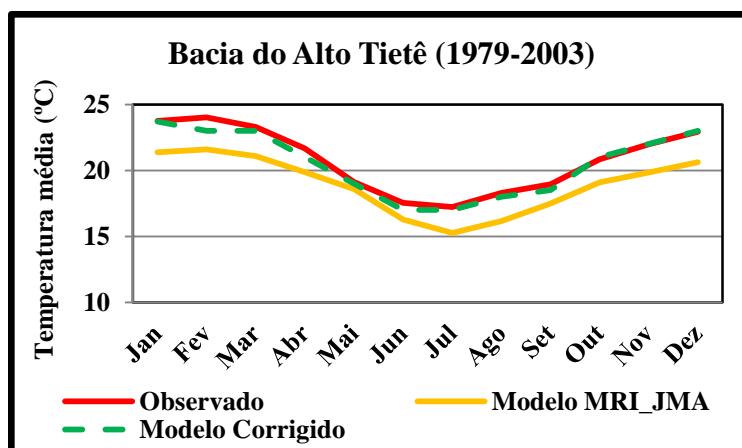


5.3.2. Correção das saídas de temperatura do modelo MRI-JMA para o período presente (1979-2003)

No que se refere às temperaturas, e com base nos dados observados, a Bacia do Alto Tietê apresenta o comportamento climatológico típico da região Sudeste, com temperaturas mais elevadas durante o primeiro trimestre do ano, sendo que o mês de fevereiro possui a maior média mensal de temperatura, $24,02^{\circ}\text{C}$. Já entre os meses de junho-agosto encontram-se as menores temperaturas, com a média mínima mensal registrada no mês de julho ($17,24^{\circ}\text{C}$).

O modelo climático global MRI-JMA conseguiu representar o padrão sazonal de temperatura na bacia, embora subestime a temperatura média mensal durante todo o ano, para o período de 1979-2003 (Figura 31 e Tabela 7). O modelo apresentou maior temperatura no mês de fevereiro ($21,6^{\circ}\text{C}$) e menor no mês de julho ($16,27^{\circ}\text{C}$). Por outro lado, as saídas do modelo exibiram menor erro durante o segundo trimestre do ano, sendo no mês de maio o menor erro ($-0,53^{\circ}\text{C}$), e no mês de fevereiro o maior erro ($-2,42^{\circ}\text{C}$).

Devido aos elevados valores de erro médio mensal foi necessário corrigir os dados de temperatura do modelo climático. Com a correção dos dados observa-se um decréscimo expressivo do erro em relação à temperatura observada. Assim, os dados de temperatura do modelo climático corrigido expuseram menores erros no último trimestre do ano, sendo que o mês de novembro obteve o menor erro ($0,01^{\circ}\text{C}$), e apresentou o maior erro em fevereiro, de $-1,02^{\circ}\text{C}$ (Tabela 7).

Figura 31 – Padrão médio mensal da temperatura na Bacia do Alto Tietê, no período de 1979-2003**Tabela 8** - Temperatura média mensal (°C) do modelo climático MRI-JMA para as sub-bacias do Alto Tietê e erros médios do modelo e do modelo corrigido, no período de 1979-2003

TEMPERATURA (°C)	OBSERVADA	MODELO	MODELO CORRIGIDO	ERRO DO MODELO	ERRO DO MODELO CORRIGIDO
JAN	23,74	21,37	23,70	-2,37	-0,04
FEV	24,02	21,60	23	-2,42	-1,02
MAR	23,30	21,08	23	-2,22	-0,30
ABR	21,66	19,86	21	-1,80	-0,66
MAI	19,11	18,58	19	-0,53	-0,11
JUN	17,53	16,27	17	-1,26	-0,53
JUL	17,24	15,25	17	-1,99	-0,24
AGO	18,29	16,16	18	-2,13	-0,29
SET	18,96	17,48	18,50	-1,48	-0,46
OUT	20,83	19,09	21	-1,74	0,17
NOV	21,99	19,85	22	-2,15	0,01
DEZ	22,94	20,62	23	-2,32	0,06

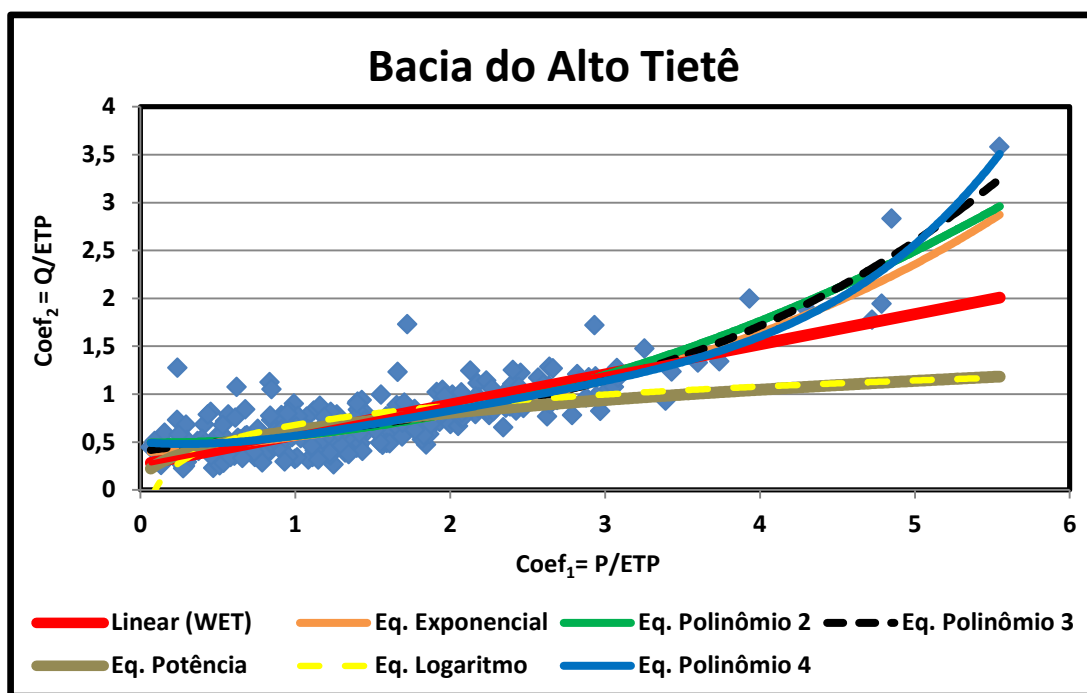
Tendo as temperaturas médias simuladas pelo modelo climático e as temperaturas médias mensais observadas para a BHAT e suas sub-bacias, calculou-se a evapotranspiração, seguindo a metodologia de *Thornthwaite*, explicada na seção 4.3.3, para dar continuidade ao cálculo da vazão.

5.4. Cálculo da vazão: relação empírica a partir dos dados observados

Para encontrar a equação empírica para o cálculo da vazão foram construídos gráficos de dispersão com base nos coeficientes da equação hidrológica, detalhados na seção 4.3.4, que estão em função dos dados observados de precipitação, vazão e ETP, para o período presente (1979-2003). Com isso, foram testadas diferentes linhas de ajuste com as suas respectivas equações, sendo estas as lineares (equação linear) e não lineares (equação potencial,

exponencial, logarítmica e polinomial de segunda, terceira e quarta ordem). A figura 32 mostra as linhas de ajuste para a dispersão dos coeficientes da Bacia do Alto Tietê, nas quais a equação deve estimar a vazão do exutório.

Figura 32 – Dispersão dos coeficientes na Bacia do Alto Tietê e linhas de tendências no período de 1979-2003



Assim, através da análise das diferentes linhas de ajuste que representam modelos de regressão, e em função dos coeficientes de determinação (r^2) e dos coeficientes de correlação (r), avaliou-se a qualidade do ajuste dos coeficientes do balanço hídrico para cada equação (Tabela 8). Tem-se que a equação logarítmica apresenta o pior ajuste entre os coeficientes, com r^2 de 0,36 e r de 0,6, ou seja, aproximadamente 36% da variação da vazão está relacionada com a variação nas variáveis precipitação e ETP, e estes coeficientes estão 60% correlacionados.

Já a equação polinomial de quarta ordem apresenta o melhor ajuste entre os coeficientes do balanço hídrico, com r^2 de 0,735 e r de 0,86, ou seja, aproximadamente 74% das variações da vazão podem ser explicadas por variações na precipitação e na ETP. Estes coeficientes estão 86% correlacionados.

Tabela 9 – Coeficientes de Determinação (R^2) e Coeficiente de Correlação (R) das equações de ajuste do balanço hídrico, para a Bacia do Alto Tietê, no período de 1979-2013

EQUAÇÃO	LINEAR	EXPONENCIAL	POTÊNCIA	LOGARITMO	POLINÔMIO 2	POLINÔMIO 3	POLINÔMIO 4
R^2	0,624	0,585	0,436	0,358	0,721	0,729	0,735
R	0,79	0,76	0,66	0,60	0,85	0,85	0,86

Deste modo, a equação de balanço hídrico para a Bacia do Alto Tietê foi composta por equações polinomiais de quarta ordem. Para a BHAT, a equação hidrológica foi representada pela seguinte expressão (Equação 33):

$$y = 0,0103x^4 - 0,0859x^3 + 0,289x^2 - 0,1406x + 0,4994 \quad (33)$$

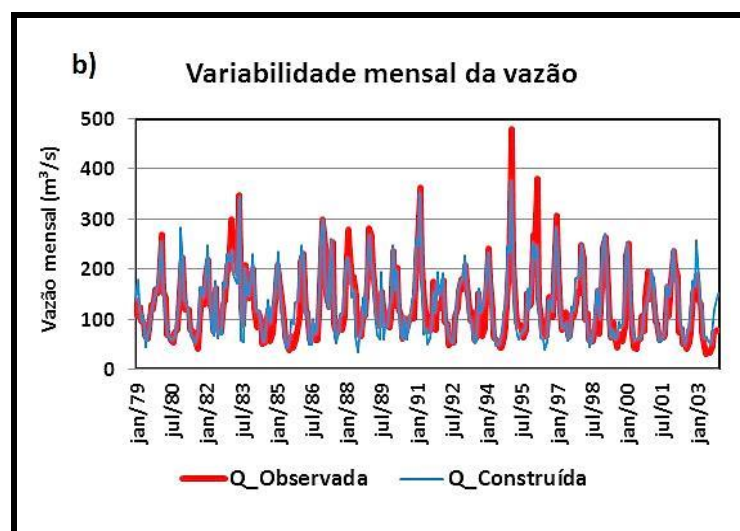
Em que, substituindo os valores de Y e X , se têm:

$$Q = \left(\frac{0,0103P^4}{ETP^4} - \frac{0,0859P^3}{ETP^3} + \frac{0,289P^2}{ETP^2} - \frac{0,1406P}{ETP} + 0,4994 \right) \times ETP \quad (34)$$

Posteriormente, utilizou-se esta mesma equação para derivar a vazão, tendo como base a precipitação corrigida e a evapotranspiração estimada com os dados do modelo MRI-JMA.

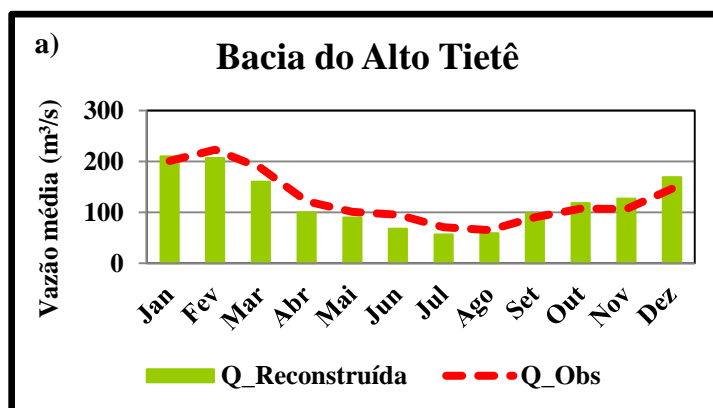
A fim de verificar a capacidade da equação empírica de representar a vazão média mensal do exutório da BHAT, foram reconstruídas as vazões com a equação empírica (Equação 33) e comparadas com os dados observados para o período de 1979-2003. Na Figura 33 é possível observar que o modelo hidrológico consegue representar a variabilidade mensal da vazão na bacia, apesar das dificuldades em retratar os meses muito chuvosos, como fevereiro de 1995 e março de 1996.

Figura 33 – Padrão médio mensal da vazão reconstruída com a equação de balanço hídrico na Bacia do Alto Tietê, no período de 1979-2003



A vazão média mensal (1979-2003) reconstruída pelo modelo empírico também conseguiu reproduzir a variação sazonal da vazão na BHAT (Figura 34), apesar de superestimar a vazão observada na primavera e no verão e subestimar durante o outono e inverno.

Figura 34 – Padrão médio mensal da vazão reconstruída com a equação de balanço hídrico na Bacia do Alto Tietê, no período de 1979-2003



Os erros da média mensal na vazão reconstruída podem estar associados à dificuldade do modelo empírico em capturar os valores extremos dos dados observados. Sendo que, o menor erro ocorreu no mês de agosto, de $-6,16 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto o maior erro positivo ($22,77 \text{ m}^3/\text{s}$) foi registrado em dezembro e o maior erro negativo ($-27,14 \text{ m}^3/\text{s}$) deu-se em junho (Tabela 10).

Tabela 10 – Vazões reconstruídas (m^3/s) das equações de ajuste do balanço hídrico para a Bacia do Alto Tietê e erros médios, no período de 1979-2013

	VAZÃO OBSERVADA (m^3/s)	VAZÃO RECONSTRUÍDA (m^3/s)	ERRO MÉDIO (m^3/s)
JAN	200,96	209,92	8,96
FEV	223,11	206,97	-16,14
MAR	187,44	160,52	-26,92
ABR	121,52	100,17	-21,35
MAI	101,04	89,99	-11,05
JUN	95,52	68,38	-27,14
JUL	71,20	56,54	-14,66
AGO	65,36	59,20	-6,16
SET	90,56	98,18	7,62
OUT	107,40	118,66	11,26
NOV	106,80	127,12	20,32
DEZ	146,56	169,33	22,77

Após esta etapa, o mesmo procedimento foi realizado para todas as sub-bacias, e criaram-se gráficos de dispersão com as respectivas equações de regressão de ajuste dos coeficientes do balanço hídrico simplificado.

Os valores do padrão médio mensal da vazão nos exutórios das sub-bacias, para o período de 1979 a 2003, adotados como vazão de referência para a construção dos coeficientes do balanço hidrológico, estão descritos no Apêndice F. Já as curvas de ajuste da equação polinomial de todas as sub-bacias pertencentes à BHAT podem ser observadas no Apêndice E.

Na Tabela 11 estão os Coeficientes de Determinação (r^2) e Coeficientes de Correlação (r) para as diferentes equações de ajuste testadas. Optou-se pela equação que apresentou o maior r^2 e r , sendo para todas as sub-bacias a equação polinomial de quarta ordem.

Na Sub-bacia Cotia-Guarapiranga, a equação polinomial de quarta ordem conseguiu o melhor ajuste dos coeficientes do balanço hídrico, de aproximadamente 70%. Já na Sub-bacia Juqueri-Cantareira teve-se o menor ajuste, de 31%. O baixo valor de r^2 pode estar relacionado ao fato de a sub-bacia apresentar poucos postos pluviométricos, localizados muito próximos, não sendo capaz de representar toda a precipitação na área da sub-bacia que contribui para a vazão no exutório (Figura 13).

Tabela 11 – Coeficientes de Determinação (r^2) e Coeficientes de Correlação (r) das equações de ajuste do balanço hídrico, para as sub-bacias do Alto Tietê, no período de 1979 a 2013

EQUAÇÃO		BILLINGS-TAMANDUATEÍ	COTIA-GUARAPIRANGA	JUQUERI-CANTAREIRA	PENHA-PINHEIROS	PINHEIROS-PIRAPORA	TIETÊ-CABECEIRAS
LINEAR	R^2	0,64	0,59	0,22	0,55	0,55	0,22
	R	0,80	0,77	0,47	0,74	0,74	0,47
EXPONENCIAL	R^2	0,52	0,51	0,18	0,48	0,52	0,18
	R	0,72	0,71	0,42	0,69	0,72	0,42
POTÊNCIA	R^2	0,48	0,37	0,08	0,34	0,37	0,10
	R	0,69	0,61	0,28	0,58	0,61	0,32
LOGARITMO	R^2	0,46	0,32	0,09	0,30	0,29	0,09
	R	0,68	0,57	0,30	0,55	0,54	0,30
POLINÔMIO 2	R^2	0,65	0,69	0,31	0,60	0,62	0,33
	R	0,81	0,83	0,56	0,77	0,79	0,57
POLINÔMIO 3	R^2	0,65	0,69	0,31	0,61	0,62	0,33
	R	0,81	0,83	0,56	0,78	0,79	0,57
POLINÔMIO 4	R^2	0,66	0,70	0,31	0,62	0,63	0,34
	R	0,81	0,84	0,56	0,79	0,79	0,58

É importante ressaltar que o melhor ajuste da equação empírica está diretamente relacionado com os dados observados utilizados, que devem representar da melhor maneira

possível o processo que se deseja estudar. Na Tabela 12 estão descritas as equações hidrológicas utilizadas para reconstruir a vazão em cada uma das sub-bacias.

Tabela 12 – Equações polinomiais de quarta ordem de ajuste dos coeficientes do balanço hídrico simplificado nas sub-bacias do Alto Tietê, para o período de 1979 a 2003

SUB-BACIA	EQUAÇÃO EMPÍRICA DE BALANÇO HIDROLÓGICO
BILLINGS-TAMANDUATEÍ	$y = -0,0044x^4 + 0,0437x^3 - 0,1145x^2 + 0,2944x + 0,1683$
COTIA-GUARAPIRANGA	$y = 0,0054x^4 - 0,0526x^3 + 0,2068x^2 - 0,1506x + 0,3399$
JUQUERI-CANTAREIRA	$y = 0,0016x^4 - 0,0196x^3 + 0,1072x^2 - 0,1612x + 0,2762$
PENHA-PINHEIROS	$y = -0,001x^4 + 0,0255x^3 - 0,0599x^2 + 0,2903x + 0,5369$
PINHEIROS-PIRAPORA	$y = 0,0052x^4 + 0,0442x^3 + 0,0365x^2 + 1,5742x + 4,6212$
TIETÊ-CABACEIRAS	$y = 0,0028x^4 - 0,0247x^3 + 0,1015x^2 - 1,1192x + 0,2563$

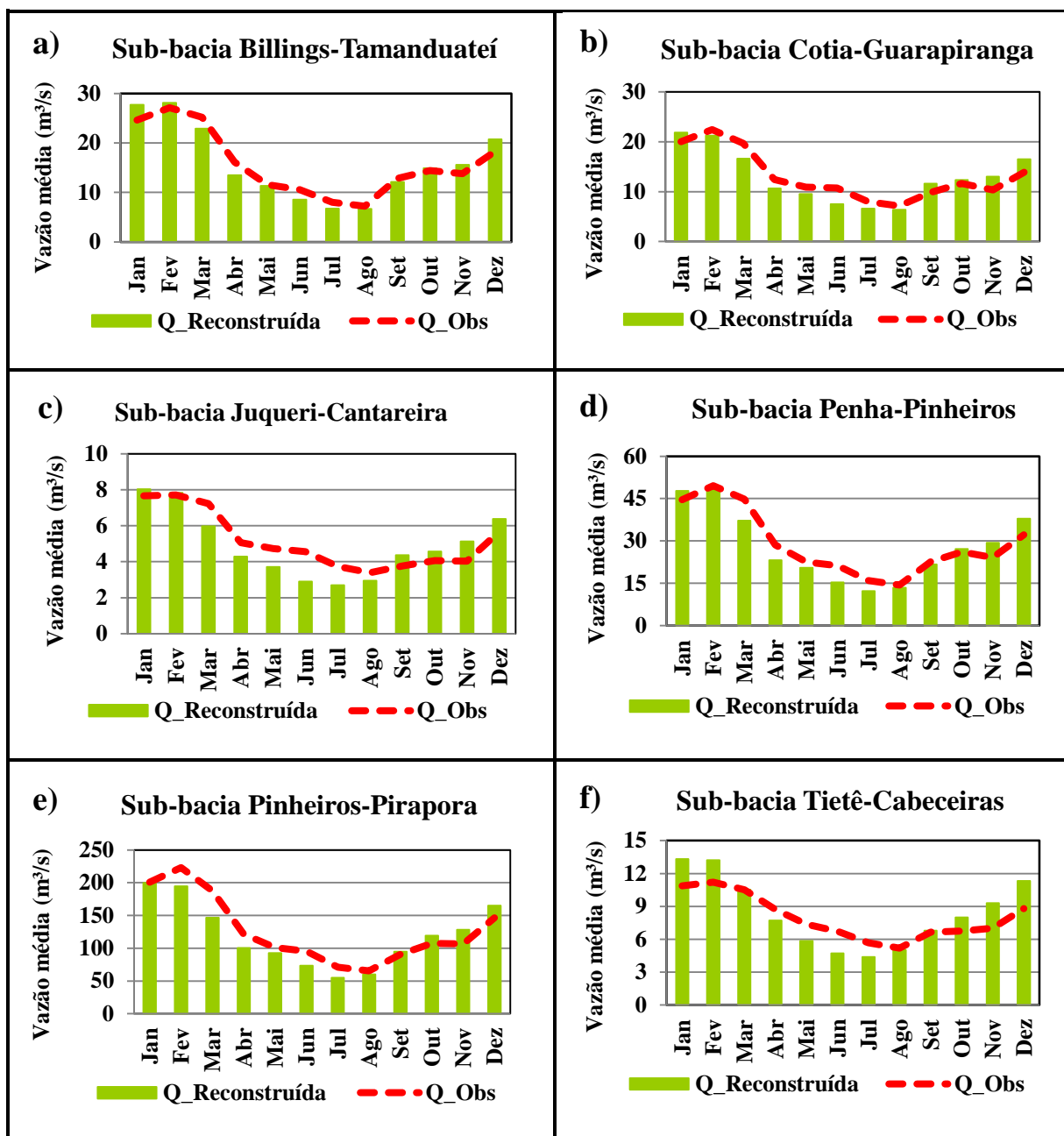
Para analisar a capacidade das equações empíricas em representar o balanço hídrico nas sub-bacias, foram reconstruídas as vazões com a equação de ajuste, com os dados observados, para o período presente de 1979 a 2003 (Figura 35).

Nas sub-bacias Cotia-Guarapiranga (Figura 35b), Penha-Pinheiros (Figura 35d) e Pinheiros-Pirapora (Figura 35e), as vazões reconstruídas com os dados observados subestimam a vazão durante o primeiro semestre do ano e superestimam a vazão ao longo do segundo semestre. Entretanto, na sub-bacia Juqueri-Cantareira (Figura 35c) ocorreu o inverso, as vazões reconstruídas subestimam a vazão no segundo semestre do ano e superestimam no primeiro semestre do ano.

Já na sub-bacia Billings-Tamanduateí (Figura 35a), as vazões reconstruídas subestimam a vazão no verão e apresentam valores médios mensais muito próximos ao da vazão observada. E na sub-bacia Tietê-Cabeceiras (Figura 35f) as vazões reconstruídas, com os dados observados, subestimam a vazão durante o inverno e superestimam nas demais estações do ano.

Para examinar o desempenho do modelo empírico em retratar a vazão observada nas sub-bacias também foram adotadas outras métricas de avaliação. No Apêndice G está a tabela com os cálculos dos erros para as vazões reconstruídas. Além disso, os valores do Teste de Hipótese – Teste F, que demonstram que as equações de ajuste foram significativas do ponto de vista estatístico, com exceção das equações para as sub-bacias Juqueri-Cantareira e Tietê-Cabeceiras.

Figura 35 – Gráfico do padrão médio mensal da vazão reconstruída nas sub-bacias: (a) Billings-Tamanduateí, (b) Cotia-Guarapiranga, (c) Juqueri-Cantareira, (d) Penha-Pinheiros, (e) Pinheiros-Pirapora e (f) Tietê-Cabeceiras, no período de 1979-2003



5.5. Avaliação dos dados de precipitação e temperatura do modelo climático MRI-JMA para o cenário futuro de 2017 a 2039

A seguir apresentam-se os resultados das análises das saídas de precipitação e temperatura do modelo climático MRI-JMA para o cenário de emissões A2 do AR4 do IPCC, para o período futuro de 2017 a 2039. As análises consistiram em verificar o padrão médio mensal, a variabilidade interanual e as tendências para toda a BHAT e para cada uma das sub-

bacias, de forma a compreender o comportamento futuro da precipitação e temperatura das sub-bacias, além de verificar os efeitos das mudanças climáticas sobre a disponibilidade hídrica futura na bacia.

5.5.1. Avaliação da precipitação na Bacia do Alto Tietê para o período futuro

A Figura 36 mostra os gráficos da média mensal de precipitação, para o período 2017-2039, gerados pelo modelo climático MRI-JMA, comparando com o simulado para o período controle (1979-2013) e os dados observados, para todas as sub-bacias da BHAT.

De acordo com o cenário futuro de precipitação do modelo MRI-JMA, no período de 2017 a 2039, é possível observar na sub-bacia Tietê-Cabeceiras que entre os meses de agosto e setembro haverá um possível acréscimo da precipitação na sub-bacia, e nos meses de janeiro, fevereiro e abril haverá um decréscimo (Figura 36a). No que se refere às anomalias (Tabela 12), calculadas em função ao clima simulado pelo modelo, o mês de abril possuirá maior anomalia média mensal negativa (-8,7 mm) e o mês de agosto possuirá maior anomalia média mensal positiva (17,24 mm), enquanto o mês de julho possuirá menor anomalia média mensal (-1,95 mm).

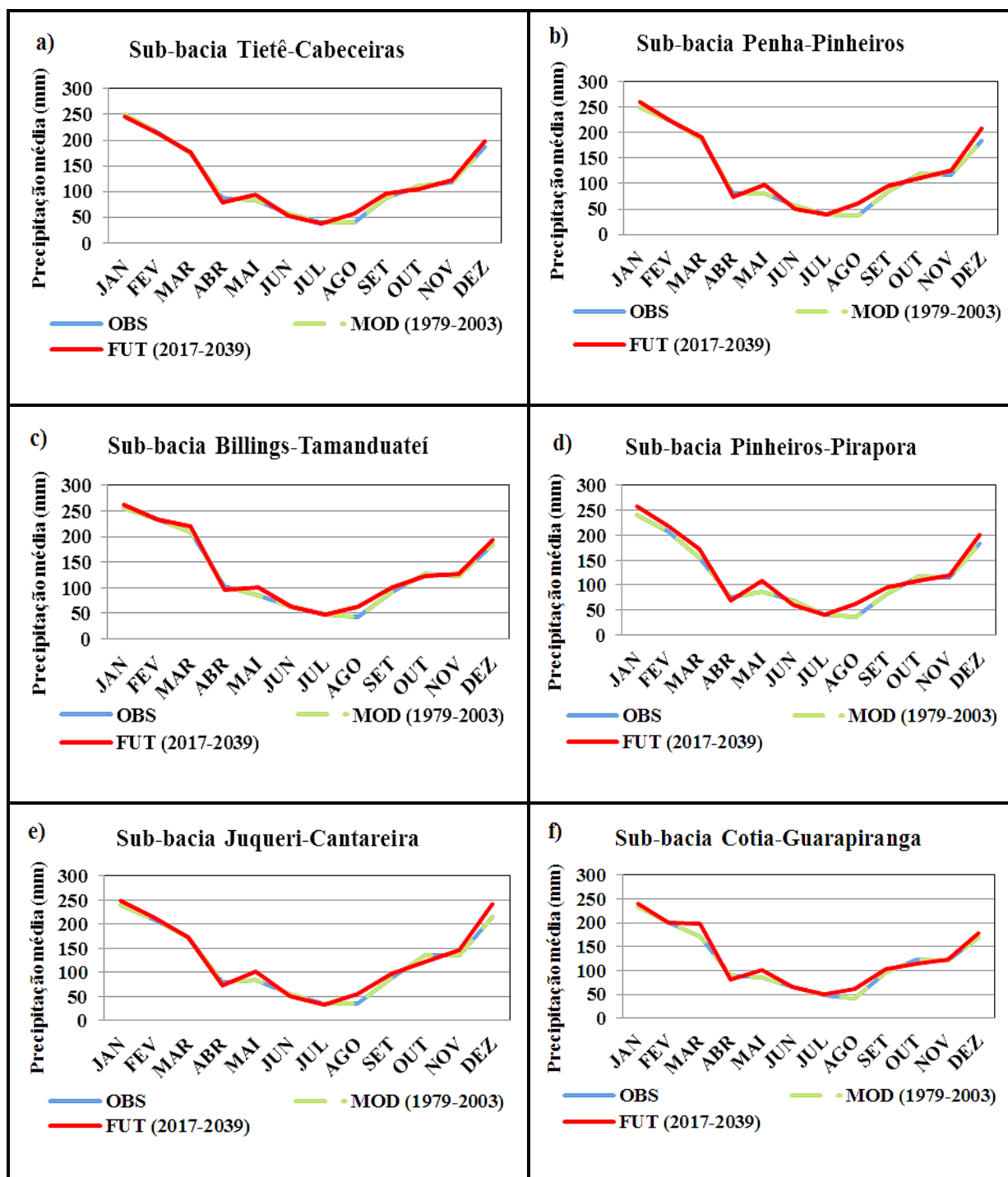
Em relação às anomalias da sub-bacia Penha-Pinheiros (Figura 36b), o mês de outubro possui maior anomalia média mensal negativa (-7,47 mm) e o mês de agosto possui maior anomalia média mensal positiva, de 24,97 mm, enquanto o mês de julho possui menor anomalia média mensal (-0,07 mm). Durante o verão verifica-se a maior anomalia de precipitação, com a anomalia média da estação de aproximadamente 11,54 mm (Tabela 12).

A sub-bacia Billings-Tamanduateí continuará exibindo a maior precipitação no mês de janeiro (263,1 mm), enquanto o mês de julho terá os menores índices pluviométricos, em torno de 47,8 mm (Figura 36c). No que se refere às anomalias (Tabela 12), o mês de abril possuirá maior anomalia média mensal negativa, cerca de -8 mm, e o mês de agosto maior anomalia média mensal positiva (20,52 mm), enquanto o mês de fevereiro exibirá menor anomalia média mensal, de aproximadamente 0,4 mm. Durante o inverno verifica-se a maior anomalia de precipitação.

Observando a climatologia sazonal futura da sub-bacia Pinheiros-Pirapora, tem-se que o mês de janeiro terá a maior precipitação (257,3 mm), enquanto o mês de julho terá os menores índices pluviométricos, em torno de 41,3 mm (Figura 36d). Entre os meses de novembro e março, sobretudo durante o verão, é possível constatar um aumento da precipitação. No que se refere às anomalias (Tabela 12), o mês de outubro possui maior

anomalia média mensal negativa (-10,4 mm) e o mês de agosto possui maior anomalia média mensal positiva (27,1 mm), enquanto o mês de julho possui menor anomalia média mensal, de 1,13 mm.

Figura 36 – Padrão médio mensal de chuva nas sub-bacias: (a) Tietê-Cabeceiras, (b) Penha-Pinheiros, (c) Billings-Tamanduateí, (d) Pinheiros-Pirapora, (e) Juqueri-Cantareira e (f) Cotia-Guarapiranga



As saídas futuras do modelo indicam que, na sub-bacia Juqueri-Cantareira, o mês de janeiro continuará exibindo a maior precipitação (249,6 mm), enquanto o mês de julho terá os menores índices pluviométricos, em torno de 32,3 mm (Figura 36e). Entre os meses de novembro e março é possível observar um acréscimo da precipitação e nos meses de junho-julho uma diminuição. No que se refere às anomalias (Tabela 12), o mês de outubro possui a maior anomalia média mensal negativa, em torno de -13 mm, e o mês de dezembro a maior anomalia média mensal positiva (27,2 mm), enquanto o mês de março possui a menor anomalia média mensal, de 0,5 mm. Durante o verão verifica-se a maior anomalia de precipitação, o valor médio da estação será de aproximadamente 13,55 mm.

Observando a climatologia sazonal futura da sub-bacia Cotia-Guarapiranga, tem-se que o mês de janeiro terá a maior precipitação (269,7 mm), enquanto o mês de julho os menores índices pluviométricos (Figura 36f). Entre os meses de julho-setembro e novembro-março é possível constatar um acréscimo da precipitação na sub-bacia. No que se refere às anomalias (Tabela 12), o mês de abril possuirá maior anomalia média mensal negativa, cerca de -9 mm, e o mês de março a maior anomalia média mensal positiva, de 25 mm, enquanto o mês de fevereiro terá a menor anomalia média mensal (0,43 mm). Durante o outono e inverno verificaram-se as maiores anomalias de precipitação, com médias em torno de 10 e 7 mm, respectivamente.

Tabela 13 - Anomalia de precipitação (mm) média mensal do modelo climático MRI-JMA, para o período de 2017-2039

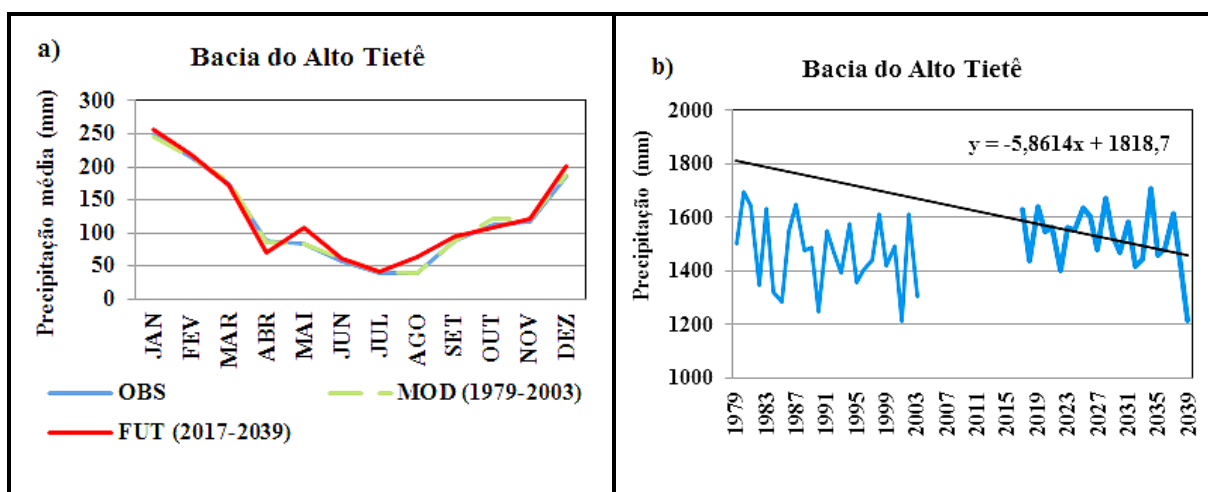
SUB-BACIA	PENHA-PINHEIROS	TIETÊ-CABECEIRAS	BILLINGS-TAMANDUATEÍ	JUQUERI-CANTAREIRA	COTIA-GUARAPIRANGA	PINHEIROS-PIRAPORA	BACIA DO ALTO TIETÊ
JAN	10,49	-4,23	7,00	9,20	7,05	17,11	12,60
FEV	0,19	-3,49	0,40	4,24	0,43	10,76	3,50
MAR	5,67	3,01	12,83	0,55	25,03	17,45	-5,46
ABR	-5,80	-8,70	-8,02	-5,58	-9,09	-5,23	-16,09
MAI	18,11	10,46	13,90	17,91	14,05	21,34	24,13
JUN	-5,09	-4,38	-0,49	-4,66	-1,08	-7,02	0,34
JUL	-0,07	-1,95	1,02	-3,99	2,26	1,13	-0,39
AGO	24,97	17,24	20,52	18,40	19,90	27,10	24,42
SET	11,93	7,16	8,90	9,04	6,74	12,69	6,17
OUT	-7,47	-7,14	-5,03	-13,01	-8,44	-10,41	-14,17
NOV	7,72	5,73	4,07	11,85	3,02	4,46	-1,20
DEZ	23,94	12,45	8,79	27,18	8,68	18,76	14,53

De modo geral, a Bacia do Alto Tietê possui uma tendência de diminuição da precipitação acumulada anual em torno de -5,86 mm/ano, entre os anos de 2017 e 2039 (Figura 37b). Observando o comportamento sazonal futuro da BHAT, tem-se um pequeno aumento da precipitação em relação à climatologia, sendo que o mês de janeiro continuará exibindo a maior precipitação (257,3 mm), enquanto o mês de julho exibe os menores índices

pluviométricos, em torno de 41,3 mm (Figura 37a). Durante o verão, é possível constatar um aumento da precipitação, que foi apurado com o cálculo das anomalias.

No que se refere às anomalias de precipitação (Tabela 12) na bacia, a menor anomalia positiva (0,39 mm) foi detectada em julho e a maior anomalia positiva (24,4 mm) deu-se em agosto. Por outro lado, a maior anomalia negativa (-16,1 mm) deve ocorrer em abril. Observa-se na BHAT que verão, outono e inverno apresentarão anomalias positivas, o que indica que essas estações serão mais chuvosas, enquanto a primavera possuirá anomalias negativas de precipitação, isto é, será menos chuvosa.

Figura 37 – Climatologia sazonal (a) e Variabilidade interanual (b) de precipitação na Bacia do Alto Tietê



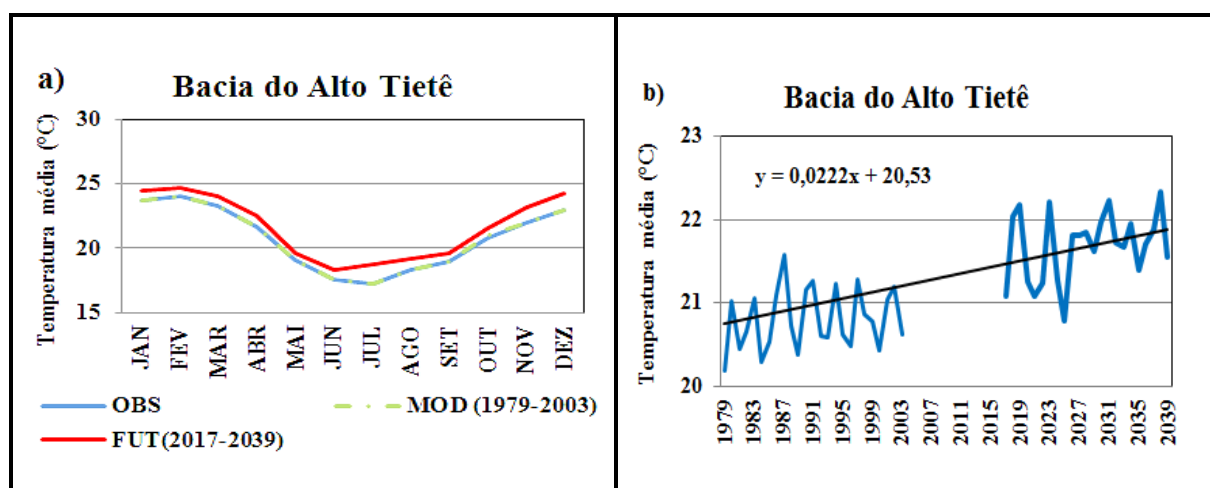
5.5.2. Avaliação da temperatura na Bacia do Alto Tietê para o período futuro

De acordo com as saídas do modelo climático MRI-JMA, a temperatura média mensal na Bacia do Alto Tietê, no período de 2017 a 2039, poderá ter uma elevação durante todos os meses do ano e, sobretudo, durante o inverno e o verão (Figura 38a). Este aumento de temperatura também é observado em todas as sub-bacias que pertencem à BHAT (Tabela 13). Para o período futuro, a Bacia do Alto Tietê apresentará uma anomalia positiva média mensal de aproximadamente 0,87°C, no período de 2017-2039 (Figura 38b). Todas as sub-bacias da BHAT terão uma tendência de elevação da temperatura média anual de aproximadamente 0,03°C por ano, para o período de 2017 a 2039, enquanto a BHAT exibirá uma tendência de aumento de 0,02°C/ano.

De acordo com os cenários futuros de temperatura do modelo, o ano de 2038 será o ano mais quente, com uma média anual em torno de 22,3°C. O mês de fevereiro continuará

sendo o mais quente, passando a ter uma média mensal de 24,74°C. Entretanto, o mês de julho deixará de ser o mais frio, dando lugar ao mês de junho, que terá uma temperatura média mensal de aproximadamente 18,3°C.

Figura 38 – Padrão médio mensal (a) e Variabilidade interanual (b) de temperatura da Bacia do Alto Tietê



As sub-bacias Pinheiros-Pirapora e Cotia-Guarapiranga apresentarão maiores anomalias positivas, de 1,48°C no mês de julho, sendo que esta última também exibirá a menor anomalia de temperatura, 0,48°C em maio. As maiores anomalias positivas de todas as sub-bacias ocorrerão em julho, indicando o acréscimo de temperatura durante o inverno. A Sub-bacia Billings-Tamanduateí terá as menores anomalias de temperatura.

Tabela 14 - Anomalia de temperatura (°C) média mensal do modelo climático MRI-JMA, para o período de 2017-2039

SUB-BACIA	PENHA-PINHEIROS	TIETÊ-CABECEIRAS	BILLINGS-TAMANDUATEÍ	JUQUERI-CANTAREIRA	COTIA-GUARAPIRANGA	PINHEIROS-PIRAPORA	BACIA DO ALTO TIETÊ
JAN	0,79	0,77	0,73	0,79	0,73	0,80	0,77
FEV	0,74	0,73	0,69	0,72	0,69	0,76	0,72
MAR	0,78	0,75	0,77	0,78	0,80	0,78	0,77
ABR	0,84	0,85	0,83	0,85	0,88	0,91	0,85
MAI	0,53	0,52	0,50	0,52	0,48	0,55	0,51
JUN	0,78	0,74	0,73	0,75	0,74	0,75	0,75
JUL	1,45	1,47	1,46	1,46	1,48	1,48	1,47
AGO	0,89	0,82	0,76	0,87	0,79	0,95	0,83
SET	0,61	0,58	0,58	0,64	0,60	0,65	0,60
OUT	0,68	0,72	0,66	0,80	0,67	0,81	0,72
NOV	1,23	1,23	1,18	1,27	1,23	1,34	1,23
DEZ	1,37	1,38	1,34	1,42	1,40	1,45	1,27

Na Bacia do Alto Tietê, a menor anomalia (0,51°C) ocorrerá em maio e a maior anomalia (1,47°C) ocorrerá em julho. Sazonalmente, é possível observar que, na BHAT, o

inverno possuirá a maior anomalia (média da estação $1,02^{\circ}\text{C}$), seguidos respectivamente pelo verão (média da estação $0,92^{\circ}\text{C}$), primavera (média da estação $0,85^{\circ}\text{C}$) e outono (média da estação $0,81^{\circ}\text{C}$).

No Apêndice H encontram-se os gráficos do padrão médio mensal de temperatura observado e simulado pelo modelo para o período presente e futuro, sem e com correção, para todas as sub-bacias da BHAT.

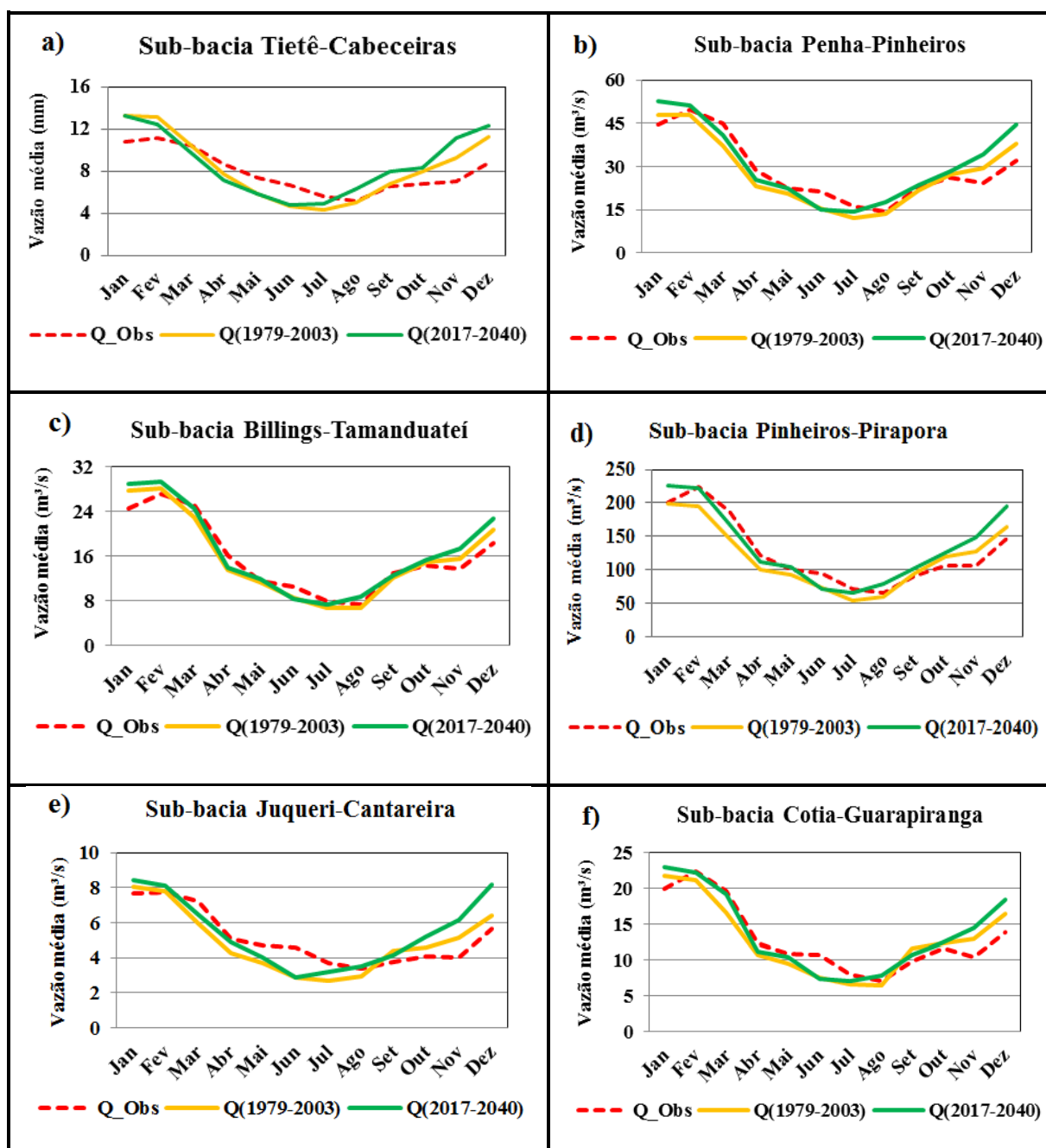
5.6. Cenários futuros (2017-2039) de vazão na Bacia do Alto Tietê

De acordo com as saídas das variáveis climáticas de precipitação e temperatura do modelo climático MRI-JMA corrigidas, para o cenário de emissões A2 do AR4/IPCC, e aplicando as equações empíricas obtidas com os dados observados, as vazões das sub-bacias do Alto Tietê apresentarão os seguintes comportamentos futuros para o período de 2017 a 2039:

- a) A Sub-bacia Tietê-Cabeceiras (Figura 39a) poderá ter em média uma diminuição da vazão entre os meses de março e julho e aumento para o resto do ano. Os meses com as maiores alterações nas vazões, em relação às vazões observadas, serão março (com acréscimo de $4,20 \text{ m}^3/\text{s}$) e junho (com um decréscimo de $1,85 \text{ m}^3/\text{s}$).
- b) As sub-bacias Billings-Tamanduateí (Figura 39c) e Pinheiros-Pirapora (Figura 39d) possivelmente apresentarão uma elevação da vazão durante o verão, sobretudo no mês de dezembro, com uma alta de $4,54$ e $47,75 \text{ m}^3/\text{s}$. Para a Sub-bacia Billings-Tamanduateí a maior diminuição da vazão ocorrerá no mês de abril ($-2,17 \text{ m}^3/\text{s}$) e na Sub-bacia Pinheiros-Pirapora será em junho ($-23,6 \text{ m}^3/\text{s}$).
- c) As sub-bacias Penha-Pinheiros (Figura 39b), Juqueri-Cantareira (Figura 39e) e Cotia-Guarapiranga (Figura 39f) terão uma diminuição média da vazão entre os meses de março e julho e aumento para o resto do ano. Os meses de junho terão o maior decréscimo da vazão, com $-6,2$, $-1,69$ e $-3,35 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. Os meses de dezembro possuirão o maior acréscimo da vazão, com $12,5$, $2,48$ e $4,53 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente.

Os dados de anomalia média mensal da vazão dos exutórios de todas as sub-bacias, para o período futuro, em relação à climatologia de 1979 a 2003, podem ser observados na Tabela 14.

Figura 39 – Padrão médio mensal de vazão observada e reconstruída nas sub-bacias: (a) Tietê-Cabeceiras, (b) Penha-Pinheiros, (c) Billings-Tamanduateí, (d) Pinheiros-Pirapora, (e) Juqueri-Cantareira e (f) Cotia-Guarapiranga



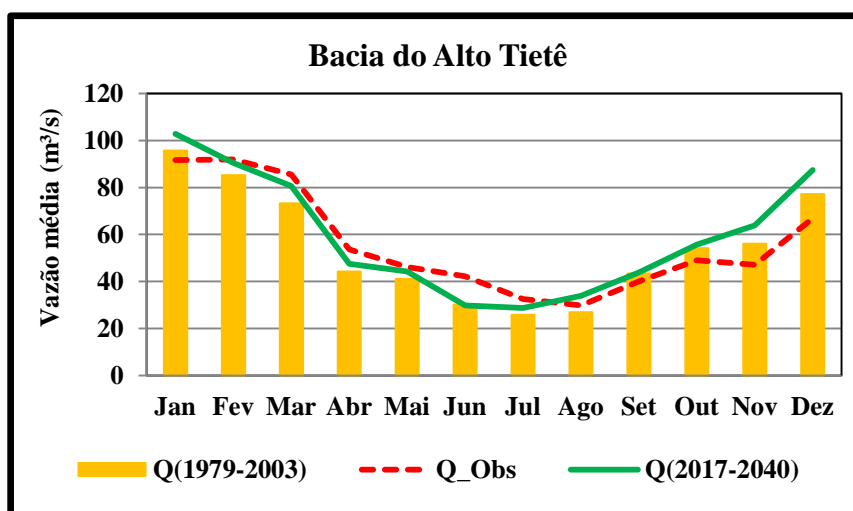
De modo geral, o padrão mensal de vazão na Bacia do Alto Tietê continuará exibindo as maiores médias em janeiro e as menores em julho (Figura 40). Para o período de 2017 a 2039, ocorrerá em média uma diminuição da vazão durante o primeiro semestre do ano, sobretudo no mês de junho, que terá um decréscimo em torno de 28,02 m³/s. No segundo semestre do ano ocorrerá um aumento da vazão em relação ao que foi observado principalmente nos meses de dezembro e novembro, que terão um acréscimo da vazão média de aproximadamente 48,62 e 38,67 m³/s, respectivamente.

Tabela 15 - Anomalia da vazão futura (m³/s) média mensal do modelo climático MRI-JMA, para o período de 2017-2039

SUB-BACIA	TIETÊ- CABECEIRAS	PINHEIROS- PIRAPORA	PENHA- PINHEIROS	JUQUERI- CANTAREIRA	COTIA- GUARAPIRANGA	BILLINGS- TAMANDUATEÍ	BACIA DO ALTO TIETÊ
JAN	2,39	24,71	7,95	0,77	2,96	4,41	24,28
FEV	1,23	-1,78	1,63	0,37	-0,24	2,21	-3,84
MAR	-0,71	-18,60	-3,93	-0,75	-0,47	-0,63	-10,77
ABR	-1,52	-9,65	-3,04	-0,17	-1,31	-2,17	-13,90
MAI	-1,51	4,10	-0,06	-0,74	-0,60	0,42	-4,13
JUN	-1,85	-23,61	-6,20	-1,68	-3,36	-2,18	-28,06
JUL	-0,77	-5,35	-1,65	-0,56	-0,97	-0,70	-8,22
AGO	1,13	14,64	3,34	0,13	0,71	1,48	9,00
SET	1,37	11,56	0,72	0,40	0,83	-0,34	8,84
OUT	1,60	17,84	2,39	1,14	0,87	0,84	14,69
NOV	4,20	42,36	10,00	2,11	4,20	3,59	37,79
DEZ	3,60	47,75	12,53	2,48	4,54	4,54	44,89

A Bacia do Alto Tietê poderá ter uma tendência de diminuição da vazão média em torno de 0,18 m³/s por ano, no período de 2017 a 2039. A mesma tendência negativa será observada em todas as sub-bacias inseridas na BHAT.

Figura 40 - Climatologia sazonal (a) da vazão na Bacia do Alto Tietê



Na Tabela 15 encontra-se o resumo com os valores da tendência linear anual para as variáveis hidrológicas chuva e vazão. Para o período de 2017 a 2039, todas as sub-bacias do Alto Tietê apresentam uma tendência de decréscimo da precipitação e vazão. Dentre elas, a

sub-bacia Pinheiros-Pirapora possui a maior tendência de diminuição da precipitação (-9,05 mm/ano) e da vazão (-0,2 m³/s por ano).

Por se tratar de uma série com menos de 30 anos, não foram avaliadas as significâncias estatísticas das linhas de tendência.

Tabela 16 – Tendências da variabilidade interanual da precipitação e vazão das sub-bacias do Alto Tietê simuladas pelo modelo climático MRI-JMA, para o período de 2017 a 2039

SUB-BACIA	VARIÁVEL	VALOR DA TENDÊNCIA
TIETÊ-CABECEIRAS	Precipitação	-5,08 mm/ano
	Vazão	-0,005 m ³ /s.ano
JUQUERI-CANTAREIRA	Precipitação	-7,01 mm/ano
	Vazão	-0,01 m ³ /s.ano
PINHEIROS-PIRAPORA	Precipitação	-9,05 mm/ano
	Vazão	-0,2 m ³ /s.ano
COTIA-GUARAPIRANGA	Precipitação	-6,2 mm/ano
	Vazão	-0,03 m ³ /s.ano
PENHA-PINHEIROS	Precipitação	-7,62 mm/ano
	Vazão	-0,05 m ³ /s.ano
BILLINGS-TAMANDUATEÍ	Precipitação	-4,92 mm/ano
	Vazão	-0,02 m ³ /s.ano
BACIA DO ALTO TIETÊ	Precipitação	-5,86 mm/ano
	Vazão	-0,18 m ³ /s.ano

A propensão de diminuição da vazão média anual nas sub-bacias do Alto Tietê no período de 2017-2039, derivada do MRI-JMA, para o cenário de emissões A2, coincidiu com os resultados obtidos por Silveira *et al.* (2014) e Schardong *et al.* (2014), que utilizaram um modelo hidrológico conceitual e saídas dos modelos climáticos globais do AR4 e AR5, respectivamente, para estimar a vazão em áreas próximas da BHAT.

Silveira *et al.* (2014) identificaram uma anomalia negativa da vazão nos reservatórios de Itaipu e de Nova Avanhandava – SP, para o período de 2010-2099, enquanto Schardong *et al.* (2014) verificaram um decréscimo da vazão no Reservatório Paiva Castro, pertencente ao Sistema Cantareira, durante os anos de 2013/2014. A semelhança entre os resultados alcançados indicam que as simulações dos modelos climáticos globais possuem concordância em relação aos impactos das mudanças climáticas na região.

Nos Apêndices de I a O encontram-se as tabelas com os dados mensais de vazão, para o período futuro (2017-2039) da BHAT e para cada uma de suas sub-bacias.

5.7. Gestão dos recursos hídricos na Bacia do Alto Tietê no contexto das mudanças climáticas

O gerenciamento de recursos hídricos visa harmonizar e solucionar conflitos resultantes do uso intensivo da água em bacias hidrográficas. Este gerenciamento é um compromisso entre os usos múltiplos da água e a conservação de suas funções ecológicas. O principal instrumento de gestão empregado é a outorga do uso da água, que depende da disponibilidade hídrica da bacia (SORIANO *et al.*, 2016). A outorga é uma autorização, mediante a qual o Poder Público outorgante faculta ao outorgado o direito de uso da água, por prazo determinado, nos termos e condições expressas no respectivo ato. A outorga é considerada um instrumento de comando e controle e está condicionada às prioridades de uso estabelecidas nos planos de bacias (BRASIL, 1997).

Segundo Ribeiro (2011), a função da outorga será ratear a água disponível entre as demandas existentes ou potenciais, trazendo contribuições ao crescimento econômico, à equidade social e à sustentabilidade ambiental, mantendo uma vazão ecológica. De modo geral, a outorga é concedida após avaliações quanto à compatibilidade entre demandas hídricas e a disponibilidade hídrica, assim como pelas finalidades do uso múltiplo e a degradação causada nos recursos hídricos. A outorga, enquanto instrumento de gestão, deve assegurar, ainda, a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, com vistas ao desenvolvimento sustentável e à prevenção e defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou antropogênica (SORIANO *et al.*, 2016).

Segundo CHAT (2014a), na Bacia do Alto Tietê existem 1754 outorgas (Tabela 16), o que totaliza uma vazão de 89,36 m³/s outorgados para captação, sendo que 64,5% das outorgas de direito de uso da água são destinadas ao abastecimento público e lançamento de efluentes domésticos, 32,8% são destinadas para uso industrial e 2,7% é destinado à irrigação. Da vazão outorgada para consumo (Tabela 17), 38,3% são originários da sub-bacia Juqueri-Cantareira, o principal sistema produtor da RMSP.

Tendo em vista a forte sazonalidade da demanda de água na Região Metropolitana, devido à variação de temperatura, a segurança hídrica de mais de 20 milhões de habitantes depende que os sistemas de abastecimento sejam operados de forma flexível, respeitados os limites superiores das vazões médias anuais dos sistemas produtores (CBHAT, 2015). A Bacia do Alto Tietê conta com oito sistemas produtores principais, totalizando uma disponibilidade hídrica de aproximadamente 68 m³/s. Na Tabela 18 é possível observar a capacidade dos sistemas de tratamento de água dos principais sistemas produtores da BHAT e

suas respectivas disponibilidades hídricas, representadas pela vazão $Q_{95\%}$, que indica os valores maiores ou iguais às vazões observadas em 95% do tempo.

Tabela 17 – Outorgas de captação e lançamento de efluentes por setor econômico

SETOR	OUTORGA DE CAPTAÇÃO		OUTORGA DE LANÇAMENTO	
	Quantidade	Vazão (m³/s)	Quantidade	Vazão (m³/s)
AGRÍCOLA	195	0,84	38	0,2
INDUSTRIAL	436	9,5	713	8,22
URBANO	123	78,94	154	26,75
OUTROS	15	0,08	53	0,18
TOTAL	769	89,36	953	35,35

Fonte: adaptado de CBHAT (2014a).

Tabela 18 – Outorga de captação e lançamento de efluentes das sub-bacias do Alto Tietê

SUB-BACIA	OUTORGA DE CAPTAÇÃO		OUTORGA DE LANÇAMENTO	
	Quantidade	Vazão (m³/s)	Quantidade	Vazão (m³/s)
TIETÊ-CABECEIRAS	245	17,85	161	8,14
JUQUERI-CANTAREIRA	56	34,25	86	1,63
PENHA-PINHEIROS	37	3,46	92	4,5
BILLINGS-TAMANDUATEÍ	57	8,76	120	10,3
COTIA-GUARAPIRANGA	38	15,57	50	0,42
PINHEIROS-PIRAPORA	40	1,52	103	9,26
SEM INFORMAÇÃO UTM	296	7,95	346	1,11
BACIA DO ALTO TIETÊ	796	89,36	958	35,35

Fonte: adaptado de CBHAT (2014a).

Tabela 19 – Capacidade das Estações de Tratamento de Água (ETA) e disponibilidade hídrica ($Q_{95\%}$) dos sistemas produtores da Bacia do Alto Tietê

SISTEMA PRODUTOR	CAPACIDADE DAS ETAs (M³/s)	VAZÃO $Q_{95\%}$ (M³/s)
CANTAREIRA	33	29,9
GUARAPIRANGA-BILLINGS	14	12,95
ALTO TIETÊ	15	14,2
RIO GRANDE	5,5	3,95
RIO CLARO	4	4,35
ALTO COTIA	1,3	1,5
BAIXO COTIA	1,1	1
RIBEIRÃO DA ESTIVA	0,1	0,1
TOTAL	73,9	67,95

Fonte: adaptado de CBHAT (2015).

Na sub-bacia Tietê-Cabeceiras encontram-se os aproveitamentos do Sistema Alto Tietê e Rio Claro. Os aproveitamentos do Alto Tietê (Ponte Nova, Paraitinga, Biritiba, Jundiaí e Taiaçupeba) controlam uma área de drenagem de aproximadamente 920 km², com uma vazão média de 19,9 m³/s. Já o Sistema Produtor do Rio Claro conta com uma área de drenagem de 245 km² e uma vazão média de 5,5 m³/s (CBHAT, 2014b).

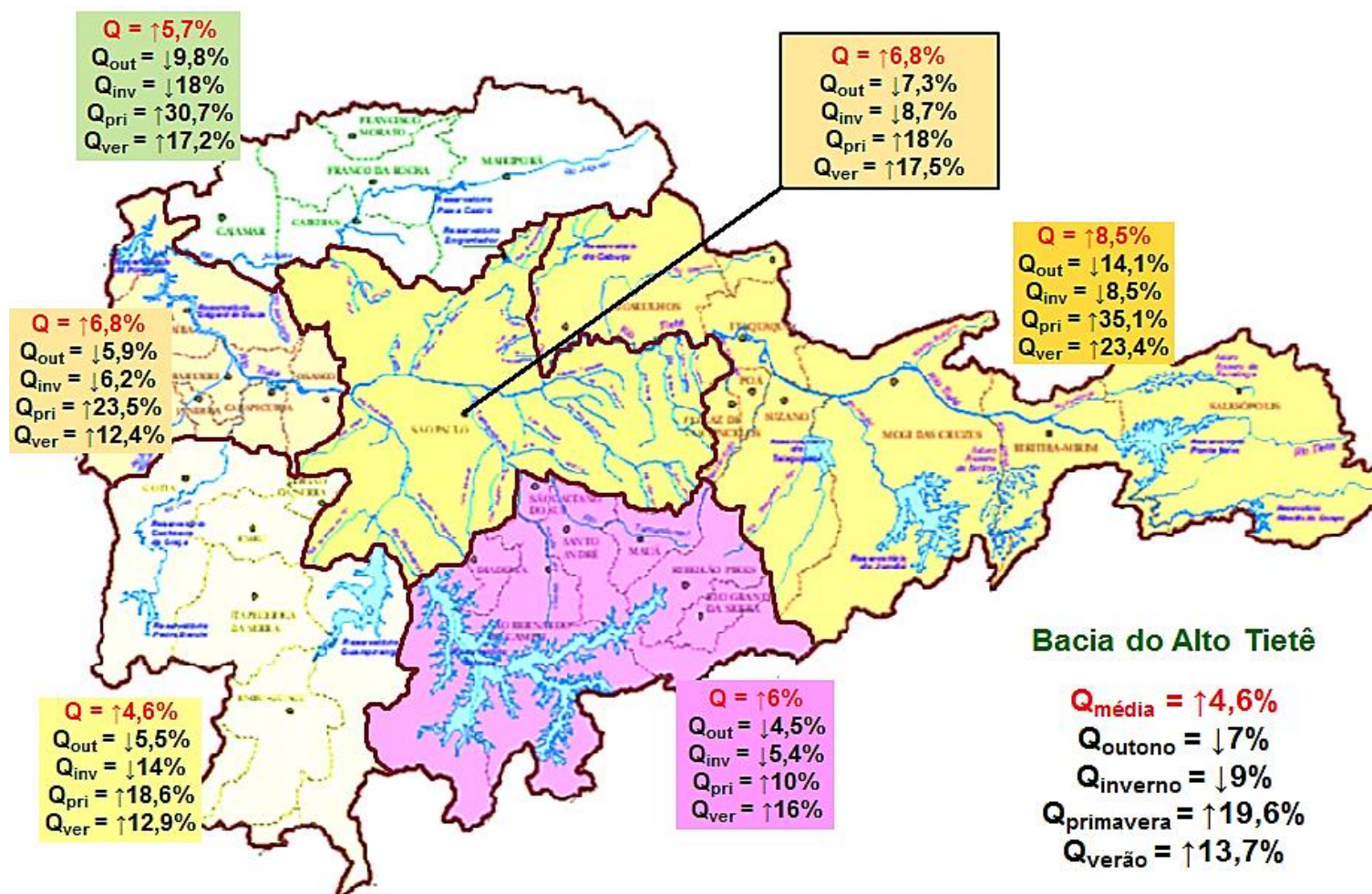
Neste trabalho, considerou-se o exutório da sub-bacia Tietê Cabeceiras o ponto com máxima vazão, ou seja, o posto localizado próximo ao aproveitamento Ponte Nova, que faz parte do Sistema Alto Tietê. Considerando o cenário futuro de vazão derivado do modelo MRI-JMA, para o período de 2017 a 2039, na sub-bacia Tietê-Cabeceiras, provavelmente haverá um aumento médio mensal de 8,5% da vazão, embora no inverno tenha um decréscimo da vazão de aproximadamente 8,5% e de -14,1% durante o outono (Figura 41).

Esta sub-bacia é a segunda com maior demanda de água e quantidade de outorgas na BHAT (Tabela 17) e sua demanda é voltada, sobretudo, para abastecimento urbano e agrícola. Desta forma, se o cenário futuro exposto se estabelecer, é provável que ocorram déficits hídricos durante o outono e inverno, o que pode resultar em conflitos para os usos múltiplos da água e prejuízos para a agricultura da região, conhecida como o cinturão verde de São Paulo.

Na sub-bacia Billings-Tamanduateí há o Sistema Billings, projetado principalmente para atender a geração de energia elétrica. O Reservatório Billings recebe, através de bombeamento, as vazões oriundas da bacia do rio Pinheiros (FUSP, 2009). O exutório da sub-bacia encontra-se no posto Billings, e nesta sub-região há o maior número de outorgas para lançamento de efluentes (Tabela 17). O cenário futuro para essa sub-bacia estabelece pouca diferença da vazão futura em relação à climatologia para o período de 2017 a 2039, em relação ao observado, embora indique um aumento de 16% da vazão durante o verão (Figura 41).

Já na sub-bacia Penha-Pinheiros localiza-se a cidade de São Paulo; os reservatórios desta região têm como principal finalidade regularizar a vazão recebida de outras sub-bacias, como da sub-bacia Billings-Tamanduateí. O seu maior número de outorgas está relacionado ao lançamento de efluentes, e alguns à captação para abastecimento industrial. Apesar de a projeção mostrar um pequeno declínio da vazão durante o inverno, o cenário futuro estabelece um aumento de aproximadamente 17,5% da vazão durante o verão e de 18% na primavera (Figura 41). Apenas em dezembro está prevista uma anomalia positiva de 12,53 m³/s. Como esta região tem como característica principal ser intensamente urbanizada, o acréscimo da vazão e precipitação durante o verão poderá ocasionar enchentes e inundações.

Figura 41 – Mapa da Bacia do Alto Tietê e suas sub-bacias, com as variações percentuais das anomalias de vazão, no período de 2017 a 2039, para cada estação do ano e média mensal



Fonte: adaptado de DAEE, 2014.

Na sub-região Cotia-Guarapiranga há o Sistema Cotia e o Reservatório Guarapiranga. O primeiro é composto por duas estações de tratamento de água e três barragens: Pedro Beicht, Isolina Superior e Isolina Inferior. O segundo tinha como propósito regularizar as vazões oriundas da bacia Guarapiranga. Atualmente, o reservatório Guarapiranga é utilizado, sobretudo, para abastecer as regiões sul e sudoeste da RMSP (FUSP, 2009).

O posto fluviométrico localizado próximo ao reservatório Guarapiranga foi classificado como exutório da sub-bacia. O panorama futuro para a sub-bacia exibirá um aumento de aproximadamente 18,57% da vazão na primavera, e uma redução de -14% no inverno (Figura 41). Estas variações da vazão podem trazer distintos impactos na primavera e no inverno e, por isso, devem-se adotar medidas que compatibilizem os usos múltiplos da água na sub-bacia, ao longo de todo o ano, respeitando a provável alteração da vazão nesses períodos do ano.

Na região hidrográfica Juqueri-Cantareira estão os reservatórios Paiva Castro e Águas Claras, que fazem parte do Sistema Cantareira, responsável pela transposição das águas do Alto Piracicaba para a bacia do Alto Tietê, principal manancial de abastecimento da RMSP. De acordo com o cenário futuro proposto, a sub-bacia Juqueri-Cantareira será a mais vulnerável, visto que terá a maior alteração da vazão média no inverno, primavera e verão. Além disso, a sub-bacia faz parte do sistema de abastecimento mais importante da RMSP. Para o período de 2017 a 2039, em média, o posto afluente ao reservatório Paiva Castro terá uma redução de 18% da vazão durante o inverno e uma elevação de aproximadamente 30,75% na primavera e 17,8% no verão (Figura 41), o que poderá implicar futuros déficits hídricos, além de riscos de novos transbordamentos do reservatório Paiva Castro, como ocorreu em março de 2016.

Por fim, a sub-bacia Pinheiros-Pirapora, que é a região mais a jusante da bacia do Alto Tietê, onde encontra-se a barragem de Rasgão. Esta região hidrográfica não é tão urbanizada quanto as suas vizinhas a montante, mas pela sua localização, no extremo jusante da BHAT, acaba concentrando todos os efeitos de montante (FUSP, 2009). A principal mudança da vazão no posto fluviométrico próximo ao reservatório Edgar de Souza, considerado exutório da sub-bacia, será o aumento de aproximadamente 23,54% da vazão durante a primavera (Figura 41).

De modo geral, com base no cenário futuro estabelecido na Bacia do Alto Tietê, está projetado um aumento médio da vazão durante o verão e decréscimo no inverno para o período de 2017-2039. Entretanto, como a BHAT apresenta grande extensão, os impactos das mudanças climáticas nas sub-bacias que a compõem terão diferentes intensidades e

consequências. Nas sub-bacias Billings-Tamanduateí, Penha-Pinheiros e Pinheiros-Pirapora, o impacto predominante estará relacionado ao aumento médio da vazão, essencialmente na primavera e no verão. Em contrapartida, nas sub-bacias Tietê-Cabeceiras, Cotia-Guarapiranga e Juqueri-Cantareira, o principal impacto será a diminuição da vazão no outono e inverno, o que é preocupante, justamente pelo fato destas serem as três principais sub-bacias que abastecem a RMSP. Assim, é importante adotar medidas de gerenciamento de recursos hídricos objetivando aumentar a capacidade de respostas aos diferentes impactos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica das sub-bacias da BHAT.

A necessidade de analisar o abastecimento de água em São Paulo é um exercício contínuo. As intensas atividades que acontecem no espaço urbano geram uma elevada demanda de água, além das necessidades básicas da população, uso para lazer, bem como a concessão para uso industrial, o que cria um quadro complexo de competição por água. O abastecimento de água deve ser planejado de forma integrada, visando a uma maior segurança hídrica para a região. A segurança hídrica considera a garantia da oferta de água para o abastecimento humano e para as atividades produtivas, em situações de seca ou desequilíbrio entre a oferta e a demanda do recurso. O conceito também abrange medidas de gestão relacionadas ao enfrentamento dos riscos associados às estiagens e cheias.

Assim, apesar das incertezas inerentes às projeções dos modelos climáticos, sua utilização para inferir sobre a disponibilidade hídrica futura pode contribuir para mitigar os efeitos provocados pelas mudanças climáticas e pactuar ações coordenadas entre os gestores dos recursos hídricos na Bacia do Alto Tietê e em bacias vizinhas. Deste modo, possibilita a adoção de vazões de referência que levam em conta os prováveis impactos das mudanças climáticas na região.

Considerando o acelerado processo de expansão urbana na RMSP e o atraso na implantação de infraestrutura adequada ao ritmo de crescimento das cidades, estas não encontram-se atualmente preparadas para os efeitos das mudanças climáticas. Para que os impactos negativos das mudanças climáticas e os possíveis impactos que eles ocasionarão sejam precavidos, ou que ocorram em menor intensidade, é essencial a adoção de medidas de gestão preventivas.

O escopo da gestão preventiva engloba as diretrizes de ação que objetiva prevenir, mitigar, preparar, alertar e responder os impactos da variabilidade hidroclimatológica na BHAT. As ações devem estar relacionadas a medidas essencialmente de prevenção, destinadas a evitar que o dano aconteça, ou na diminuição de sua intensidade por meio da

avaliação e redução das vulnerabilidades, evitando as possíveis consequências negativas mediante diferentes ações planejadas e realizadas antecipadamente.

As principais medidas que os órgãos gestores da bacia podem adotar visando ao cenário de estiagem na região, durante o outono e o inverno, são: elaboração e intensificação dos projetos e programas de incentivo à redução de consumo, por meios de multas, programas de bonificação e promoção da educação ambiental; otimização dos processos e programas de combate às perdas do sistema de abastecimento; estímulos econômicos e fiscais ao consumo de água de reuso para indústrias; transferência de água tratada de sistemas produtores vizinhos para a área atendida pelo Sistema Cantareira e Alto Cotia; maior rigor e controle ao estabelecer novas outorgas, principalmente de captação nas sub-bacia Tietê-Cabeceira, Juqueri-Cantareira e Cotia-Guarapiranga; reflorestamento das áreas de mananciais; e ampliação do Programa Produtor de Água, que apoia projetos que reduzem a erosão e assoreamento de mananciais e resulta na melhoria da quali-quantitativa hídrica (SORIANO *et al.*, 2016; SABESP, 2015).

Já as medidas relacionadas com o cenário de aumento da vazão na bacia durante a primavera e o verão deverão estar ligadas a desastres naturais, como casos de deslizamento, enchentes e inundações. As principais medidas que os órgãos gestores da bacia, em conjunto com as prefeituras e a defesa civil devem adotar são voltadas à gestão de risco de desastres, como as construções de piscinões e barragens; melhoria dos sistemas de alerta de desastres; limpezas periódicas dos córregos; desocupação de moradias irregulares; promoção do saneamento ambiental; entre outras.

Em suma, entende-se que as medidas preventivas desenvolvidas com a finalidade de promoção da prevenção e adaptação trazem contribuições significativas para o planejamento voltado à redução dos impactos das mudanças climáticas, sobretudo no que tange a problemas crônicos já existentes na BHAT, como inundações e dificuldades em suprir a demanda de água, e que somente agravar-se-iam diante da confirmação do cenário de aumento da vazão durante a primavera e verão e redução ao longo do outono e inverno. Assim, é visível a necessidade de os órgãos gestores das sub-bacias adotarem estas medidas com vistas a aumentarem sua capacidade de resposta aos impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos na região.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As mudanças climáticas ocasionarão alterações nas variáveis atmosféricas precipitação e temperatura, afetando, assim, a disponibilidade hídrica em muitas regiões do globo. Considerando a relevância deste tema, e o fato de que a Bacia do Alto Tietê encontra-se em situação de escassez hídrica, este trabalho objetivou analisar o comportamento futuro da chuva e vazão na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (BHAT), com base nas projeções do modelo climático global MRI-JMA. Para isso, foram avaliadas a precipitação e vazão dos dados observacionais das séries históricas e das simulações do modelo climático.

Os resultados das análises das séries históricas para o período de 1961 a 2014 mostram que a BHAT tem uma precipitação média anual de 1429,6 mm, com uma tendência de acréscimo de 1,26 mm/ano. O padrão de distribuição das chuvas nas sub-bacias é similar, sendo que a sub-bacia Billings-Tamanduateí apresenta maiores valores de precipitação e a sub-bacia Pinheiros-Pirapora apresenta os menores valores. A BHAT registrou anos atípicos chuvosos, 1976 e 1983, identificados através de *outliers* do *boxplot*. Os únicos anos atípicos de seca em todas as sub-bacias foram 2000, na sub-bacia Cotia-Guarapiranga, e 2013 e 2014, na sub-bacia Juqueri-Cantareira. Todas as sub-bacias exibiram anos atípicos chuvosos, com exceção da sub-bacia Billings-Tamanduateí, que não teve *outlier* em sua série.

A Bacia do Alto Tietê tem a vazão média anual de aproximadamente 25,5 m³/s, com tendência de acréscimo anual de 0,08 m³/s. As sub-bacias do BHAT possuem uma grande variabilidade na distribuição dos dados, mostrando distintas quantidades de vazão. A sub-bacia Pinheiros-Pirapora apresenta maiores vazões e a sub-bacia Juqueri-Cantareira apresenta as menores vazões. A BHAT contém um ano atípico com baixa vazão (1964) e três anos anômalo com muita vazão, em 1976, 1983 e 2010. O único *outlier* que identificou a presença de um ano com baixas vazões ocorreu na sub-bacia Pinheiros-Pirapora, em 1964 e 1969. Contudo, com exceção da sub-bacia Tietê-Cabeceiras, que não tem anos anômalos em sua série, todas as sub-bacias exibiram anos atípicos com muita vazão, sendo que a sub-bacia Pinheiros-Pirapora possui o maior número de *outliers*.

Para a maior parte das sub-bacias, o padrão sazonal da precipitação acompanha o padrão da vazão, em que o verão apresenta elevada precipitação e vazão e o inverno apresenta menores valores. O ano de 1983, em que ocorreu um El Niño de forte intensidade, é o ano com maior precipitação e vazão da BHAT. Entretanto, os anos com as menores vazões e precipitações na bacia não correspondem aos mesmos. Em suma, a precipitação e vazão

observadas na Bacia do Alto Tietê exibiram uma tendência de aumento, para o período 1961-2014, e uma climatologia sazonal de chuva típica da região Sudeste.

Quanto às saídas do modelo climático global MRI-JMA, para o período presente (1979-2003), foram encontrados os seguintes resultados: o modelo conseguiu identificar o padrão sazonal da BHAT, subestimando a precipitação na bacia durante o verão e outono e superestimando a chuva no inverno e na primavera. De modo geral, houve menores erros durante o inverno e maiores erros no verão. A BHAT apresentou o maior erro médio em novembro (43,95 mm) e o menor erro em dezembro (2,09 mm). E dentre todas as sub-bacias, a de Pinheiros-Pirapora exibiu o maior (-95,75 mm) e menor (-0,41 mm) erro médio, em janeiro e março, respectivamente.

O modelo climático MRI-JMA exibiu elevada similaridade em relação à climatologia observada, no período de 1979 a 2003, mostrando que é capaz de representar o padrão sazonal climatológico das sub-bacias. Isso indica que o modelo pode simular uma precipitação futura mais provável, apesar das incertezas. A fim de reduzir os erros sistemáticos do modelo climático, as saídas de precipitação e temperatura do modelo, para o período presente e futuro, foram corrigidas.

O modelo MRI não simula vazão, desta forma, para determinar a vazão futura na bacia, foi construído um modelo hidrológico empírico baseado na equação de balanço hídrico simplificada, por meio da relação empírica entre as variáveis observadas de vazão, precipitação e ETP, estimada pelo método de Thornthwite, para o período presente (1979-2003).

De acordo com as saídas de precipitação do modelo climático MRI-JMA, para o cenário de emissões A2, no período de 2017 a 2039, a Bacia do Alto Tietê terá um pequeno aumento médio mensal da precipitação, em torno de 5,9 mm. Embora esteja projetada uma anomalia positiva da precipitação média mensal na bacia, todas as sub-bacias da BHAT provavelmente exibirão uma tendência de diminuição da chuva, o que já vem ocorrendo desde 2009. Analisando as anomalias de precipitação, teremos que no mês de agosto ocorrerá a maior anomalia média positiva (24,42 mm) e outubro terá a maior anomalia negativa, de -14,17 mm. Todas as sub-bacias apresentarão acréscimo na precipitação média mensal, sobretudo durante o verão. A sub-bacia Juqueri-Cantareira exibirá a maior anomalia positiva (27,18 mm) e negativa (-13,01 mm) de precipitação nos meses de dezembro e outubro, respectivamente.

Já as saídas de temperatura do modelo indicam que a Bacia do Alto Tietê e todas as sub-bacias terão um aumento de temperatura no período de 2017 a 2039. A BHAT expressará

um aumento de aproximadamente 0,86°C. Em julho ocorrerá a maior elevação de temperatura na bacia, de 1,47°C, e em maio a menor, de 0,51°C. No mês de julho haverá a maior anomalia de temperatura para todas as sub-bacias, sendo que as sub-bacias Cotia-Guarapiranga e Pinheiros-Pirapora terão o maior aumento de temperatura, de 1,48°C.

Em relação à vazão futura, no período de 2017 a 2039, possivelmente ocorrerá um acréscimo da vazão média durante a primavera e o verão e uma diminuição no inverno e no outono, para todas as sub-bacias. A Bacia do Alto Tietê possuirá a maior anomalia positiva em dezembro (44,89 m³/s) e a maior anomalia negativa em junho (-28,06 m³/s). A sub-bacia Juqueri-Cantareira terá um acréscimo da vazão durante a primavera (30,7%) e o verão (17,2%), sendo que no inverno terá uma diminuição de 18% da vazão.

De modo geral, a alteração dos valores da precipitação e a elevação da temperatura na bacia implicarão o aumento da variabilidade sazonal da vazão, o que é um forte indicativo de que a Bacia do Alto Tietê, de acordo com o cenário de emissões A2 do modelo estudado, estará mais suscetível a problemas de abastecimento hídrico durante o inverno e mais propensa a casos de enchentes e inundações no verão, entre 2017 e 2039. Isso refere-se, sobretudo, à sub-bacia Juqueri-Cantareira, que compõe o Sistema Cantareira, principal conjunto de reservatórios que abastece a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

A sub-bacia Juqueri-Cantareira apresenta uma tendência de diminuição da vazão desde 2010 e, de acordo com o cenário futuro proposto pelo trabalho, terá a maior oscilação percentual da vazão futura, o que tornará a região mais propensa a eventos de escassez hídrica no outono e inverno, podendo resultar em graves problemas para o fornecimento de água na RMSP, como ocorreu nos anos de 2013, 2014 e 2015.

Apesar das incertezas associadas ao modelo climático, as projeções climáticas são importantes ferramentas de planejamento ambiental e é fundamental que as instituições realizem uma gestão integrada dos recursos hídricos, que vise a ações com enfoque preventivo, a fim de que a região tenha maior segurança hídrica e aumente sua capacidade de resposta aos impactos das mudanças climáticas.

As projeções de mudança nos regimes e distribuição de chuva derivadas dos modelos climáticos globais não são conclusivas, e as incertezas ainda são grandes, pois dependem da área de estudo e dos modelos avaliados. Assim, sugere-se para trabalhos futuros estudar outros modelos climáticos globais de alta resolução para a região da bacia, bem como a utilização de modelos climáticos regionais, que apresentam uma resolução espacial mais alta do que a fornecida por um modelo global.

Os modelos climáticos regionais são capazes de identificar as especificidades climáticas locais e têm um grande potencial para serem utilizados em estudos sobre os impactos da mudança climática na gestão e operação dos recursos hídricos, de forma a contribuir para o aumento da segurança hídrica na Bacia do Alto Tietê. Os modelos climáticos ainda apresentam dificuldade em realizar projeções mais confiáveis, devido à descon sideração das transformações no uso e ocupação do solo na região. Dessa forma, também é importante averiguar o crescimento urbano futuro na bacia e sua influência nas variáveis climáticas, hidrológicas e no aumento da demanda de água.

Outra proposta que também permitiria melhorar a caracterização hidroclimatológica futura da bacia é o aperfeiçoamento do modelo hidrológico empírico empregado, o que pode ser feito por meio de dados observados mais robustos; metodologias mais precisas para identificação da evapotranspiração e correção das saídas do modelo climático; modelos que reconstruam a vazão para cada estação do ano; e englobando outros fatores que influenciam na vazão, como a infiltração, a variação do armazenamento da água do solo e as características geomorfológicas da região. Além disso, é importante investigar o desempenho de outros tipos de modelos hidrológicos como, por exemplo, os modelos empíricos de chuva-vazão, os modelos numéricos conceituais e os modelos de inteligência artificial, a fim de identificar quais modelos conseguem representar de forma mais apropriada a dinâmica hidrológica na Bacia do Alto Tietê.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA (BRASIL). **Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: resultado por estado**. Brasília: ANA, 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA (BRASIL). **Boletim de Monitoramento dos Reservatórios do Sistema Cantareira / Agência Nacional de Águas, Superintendência de Usos Múltiplos e Eventos Críticos**. Bol. Mon. Sistema Cantareira, Brasília, n.4, p. 1-14, nov. 2015a.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA (BRASIL). **Boletim de Monitoramento dos Reservatórios do Sistema Cantareira / Agência Nacional de Águas, Superintendência de Usos Múltiplos e Eventos Críticos**. Bol. Mon. Sistema Cantareira, Brasília, v.09, n.11, p. 1-11, nov. 2014a.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA (BRASIL). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: 2013**. Brasília: ANA, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA (BRASIL). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2014**. Brasília: ANA, 2014b.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA (BRASIL). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras**. Edição Especial. Brasília: ANA, 2015b.

ALVES, L.M.; MARENGO, J.A.; CAMARGO JR., H.; CASTRO, C. Início da estação chuvosa na região Sudeste do Brasil: Parte 1 – Estudos observacionais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n.3, p.385-394, 2005.

ALVES, L.; PESQUERO, J. Previsões de Mudanças Climáticas para América do Sul: Resultados da Aplicação do “Earth Simulator”. **Boletim do Grupo de Pesquisa em Mudanças Climáticas – GPMC**. Número 7, p.2-4, 2009.

AMBRIZZI, T.; ARAÚJO, M.; DIAS, P. L. S.; WAINER, I. Introdução e principais questões discutidas. In: PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (PBMC). **Base**

científica das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [Ambrizzi, T., Araujo, M. (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: COPPE, Cap.1, 2014.

AMBRIZZI, T.; ROCHA, R.P.; MARENGO, J.A.; PISNITCHENCO, I.; NUNES, L.A.; FERNANDEZ, J.P.R. **Cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais.** Relatório 3. CPTEC/INPE; IAG/USP; FBDS. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Biodiversidade e Florestas. Diretoria de Conservação da Biodiversidade. 108 pp, 2007.

ARAVÉQUIA, J. A.; QUADRO, M. F. L. **Aspectos gerais da previsão numérica de tempo e clima.** Cachoeira Paulista: CPTEC, 2013, 57p.

BETTS, R.; NOBRE, C.; KAY, G.; SAMPAIO, G.; CHOU, S. IN: MARENGO, J. A.; NOBRE, C.; CHOU, S.; TOMASELLA, J.; SAMPAIO, G.; ALVES, L. M.; OBREGON, G.; SOARES, W.; BETTS, R.; KAY, G. **Riscos das Mudanças Climáticas no Brasil.** Relatório de pesquisa, 2011.

BRASIL, Ministério da Ciência e Tecnologia. **Plano Nacional sobre Mudança do Clima - PNNMC.** Brasília (DF), 2008.

BRASIL. **Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.** Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989.

CARSON, H.A.; KIRKBY, M.J. **Hillslope form and process.** Cambridge, Univ. Press, 1972.

CAVALCANTI, I. F. A.; KOUKSY, V. E. Drought in Brazil during summer and fall of 2001 and associated circulation features. **Climanálise**, 1: 1-10, 2001.

CHOU, S. C.; NOBRE, P.; MAIA, A.; FREITAS, E.; SAMPAIO, G.; CAVALCANTI, I. F. A.; CEBALLOS, J.; GAN, M. A.; COSTA, M. H.; BOTTINO, M. J.; CAMARGO, R.; FIGUEIROA, S. N.; SOARES, W.; PIMENTA, F.; VALVERDE, M. Avaliação de modelos globais e regionais climáticos. In: PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (P BMC). **Base científica das mudanças climáticas**. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [Ambrizzi, T., Araujo, M. (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: COPPE, Cap.1, 2014.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. **Applied hydrology**. New York: McGraw Hill, 1988, 571p.

COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, Online, DOI 10.1007/s00704-015-1540-9, 09, July 2015a.

COELHO, C. A. S.; OLIVEIRA, C. P.; AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S.; CARPENEDO, C. B.; CAMPOS, J. L. P. S.; TOMAZIELLO, A. C. N.; PAMPUCH, L. A.; CUSTÓDIO, M. S.; DUTRA, L. M. M.; ROCHA, R. P.; REBBEIN, A. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**. DOI 10.1007/s00382-015-2800-1, V. x, Aug, 2015b.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ (CBHAT). **Conheça a Bacia do Alto Tietê – Outorgas de Usos da Água**, 2014a.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ (CBHAT). **Conheça a Bacia do Alto Tietê – Sistemas de abastecimento de água**, 2014b.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ (CBHAT). **Relatório de Situação dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê - UGRHI 06**, ano base 2014, FBHAT, 2015.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). **Relatório de Crise Hídrica, Estratégia e Soluções - CHESS para a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP)**. SABESP, São Paulo, 2015.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA (DAEE). **Bacia do Alto Tietê**. Disponível em: <<http://www.dae.sp.gov.br/>>. Acesso em: 03 de abr. de 2014.

DOTY, B.E. **Using the Grid Anlysis and Display System Center for Ocean-Land-Atmosphere Interactions (COLA)**. Maryland, University of Maryland, jan 1992.

FERREIRA, N. J.; RAMÍREZ, M. V.; GAN, M. A. Vórtices ciclônicos de altos níveis que atuam na vizinhança do Nordeste do Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; JUSTI DA, M. G. A.; SILVA DIAS, M. A. F. **Tempo e clima**. São Paulo: Oficina de textos, Cap. 3, 2009.

FLATO, G., J. MAROTZKE, B. ABIODUN, P. BRACONNOT, S.C. CHOU, W. COLLINS, P. COX, F. DRIQUECH, S. EMORI, V. EYRING, C. FOREST, P. GLECKLER, E. GUILYARDI, C. JAKOB, V. KATTSOV, C. REASON AND M. RUMMUKAINEN. Evaluation of Climate Models. In: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [STOCKER, T.F., D. QIN, G.-K. PLATTNER, M. TIGNOR, S.K. ALLEN, J. BOSCHUNG, A. NAUELS, Y. XIA, V. BEX AND P.M. MIDGLEY (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (FUSP). **Plano da Bacia do Alto Tietê - Relatório Final CBHAT**, 2009.

GRAHAM, L. P. **Large-scale hydrological modeling in the Baltic basin**. Division of Hydraulic Engineering, Dept of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Report TRITA-AMI PHD 1033, Stockholm, 2000.

GRIMM, A M., S. E. T. FERRAZ E J. GOMES. Precipitation anomalies in Southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. **Journal Climate**, v. 11, p.2863-2880, 1998.

HAMADA, E.; MAIA, A. H. N.; GHINI, R.; THOMAZ, M. C.; GONÇALVES, R. R. V.; LANA, J. T. O. Precipitações projetadas pelos modelos climáticos globais do Quarto Relatório do IPCC para o Sudeste do Brasil. In: **Workshop sobre mudanças climáticas e problemas fitossanitários**, Embrapa Meio Ambiente, São Paulo, 2012.

HARDING, R. J.; JOCHUM, A. M. Atmospheric and hydrological processes and models at the soil-vegetation-atmosphere interface. **J. Hydrology**, v. 166, n. 3-4, 1995.

HIRATA, R.; FERREIRA, L. Os aquíferos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. **Rev. Bras. de Geociências**, 31, 2001.p. 43-50.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación Del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático**, 2013.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2001: The Scientific Basis-Summary for Policymakers and Technical Summary of the Working Group I Report**. Cambridge Univ. Press, 2001.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014, p. 1-32a.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014b.

ITO, E. R. K.; AMBRIZZI, T. **Climatologia da posição da alta subtropical do atlântico sul para os meses de inverno**. In: XI CONGRESSO LATINOAMERICANO E IBERICO DE METEOROLOGIA, 2000, Rio de Janeiro. A Meteorologia Brasileira além do ano 2000. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, p.860-865, 2000.

KITOH, A.; KUSUNOKI, S.; NAKAEGAWA, T. Climate change projections over South America in the late 21st century with the 20 and 60 km mesh Meteorological Research Institute atmospheric general circulation model (MRI-AGCM), **J. Geophys. Res.**, v. 116, D06105, doi:10.1029/2010JD014920, 2011.

LIMA, W. P. **Princípios de Hidrologia Florestal para o Manejo de Bacias Hidrográficas**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1986, 241p.

LIMA, K. C.; SATYAMURTY, P.; FERNÁNDEZ, J. P. R. Large-scale atmospheric conditions associated with heavy rainfall episodes in southeast Brasil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 101, n. 1- 2, p. 121-135, 2010.

LENDERINK, G.; BUIHAND, A.; DEURSEN, W. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. **Hydrology and Earth System Science**, v. 11, n. 3, p. 1145-1159, 2007.

LOMBA, C. **A escassez hídrica na Região Metropolitana de São Paulo**. 2005. Disponível em:

<<http://xiisimpurb2011.com.br/app/web/arq/trabalhos/49135652c8d6c0635d42ba62335649ef.pdf>>. Acesso em: 02 de abr. de 2014.

LOURENÇO, M. C. M.; FERREIRA, N. J.; GAN, M. A. Vórtices ciclônicos em altos níveis de origem subtropical. **Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, v. 1, n. especial 10 anos, p.163-167, 1996.

MALUF, R. (Coord.); ROSA, T. (Coord.). **Mudanças climáticas, desigualdades sociais e populações vulneráveis no Brasil: construindo capacidades - subprojeto populações.** Relatórios Técnicos 5, Volume I e II, maio de 2011.

MARCUZZO, F. F. N. Modelagem Hidrológica Utilizando Regressão: Conceituação Matemática, Logaritmização e Avaliação. In: XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2014, Natal. **Anais ABRH.** Porto Alegre: ABRH, 2014. p. 1-10.

MARCUZZO, F. F. N.; ANDRADE, L. R.; MELO, D. C. R. Métodos de Interpolação Matemática no Mapeamento de Chuvas do Estado do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 4, 2011, p.793-804.

MARENGO, J. Água e mudanças climáticas. **Revista estudos avançados**, 22 (63), p.83-96, 2008.

MARENGO, J. **Caracterização do clima no século XX e cenários climáticos no Brasil e na América do Sul para o século XXI** derivados dos modelos globais do clima do IPCC. CPETEC/INPE, 2007.

MARENGO, J. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definições das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI.** Brasília: MMA, 2006.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Crise hídrica em São Paulo em 2014: seca e desmatamento. **Geosp – Espaço e Tempo (Online)**, v. 19, n. 3, p. 485-494, 2015.

MARENGO, J.A, AMBRIZZI, T., ROCHA, R.P;ALVES, L.M., CUADRA, S.V.; VALVERDE, M., FERRAZ, S.E.T.; TORRES, R.R.; SANTOS, D.C. Future change of climate in South America in the late XXI century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climatology Dynamics**, 2009.

MARENGO, J.; DIAS, P. Mudanças climáticas globais e seus impactos nos recursos hídricos. In: Rebouças, A. C.; Braga, B.; Tundisi, J. G. (Ed.) **Águas doces no Brasil: capital**

ecológico, uso e conservação. 3. ed. São Paulo: Instituto de Estudos Avançados da USP, Academia Brasileira de Ciências, p.63-109, 2006.

MESCHIATTI, M.; FONTOLAN, M.; PENEREIRO, J.; FERREIRA, D. caracterização estatística de tendências em séries anuais de dados hidro-climáticos no estado de São Paulo. **Revista Geografia Acadêmica**, v.6, n.1 (xiii), 2012. p. 52-64.

MILLY, P. C. D.; DUNNE, K. A.; VECCHIA, A.V. Global pattern of trends in streamflow e water availability in a changing climate. **Nature**, v. 438, Nov., 2005.

MINUZZI, R. B.; SEDIYAMA, G. C.; BARBOSA, E. M.; COSTA, J. M. N.; VIANELLO, R. L. Influência da La Niña na estação chuvosa da Região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.22, n.3, p.345-353, 2007a.

MINUZZI, R. B.; SEDIYAMA, G. C.; BARBOSA, E. M.; MELO JÚNIOR, J. C. F. Climatologia do comportamento do período chuvoso da Região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.22, n.3, p.338-344, 2007b.

MIZUTA, R.; OOUCHI, K.; YOSHIMURA, H.; NODA, A.; KATAYAMA, K.; YUKIMOTO, S.; HOSAKA, M.; KUSUNOKI, S.; KAWAI, H.; NAKAGAWA. M. 20-km-mesh global climate simulation using JMA-GSM model mean climate states. **Meteor. Soc. Japan**, 84, 165185, 2006, p.165-185.

MOTA, R.; HARGRAVE, J.; LUEDEMANN, G.; GUTIERREZ, M. **Climate change in Brazil: economics, social and regulatory aspects.** Brasília: IPEA, 2011.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística.** Belo Horizonte: CPRM, 2007, 552 p.

NAKICENOVIC, N., et al. **Special Reports on Emission Scenarios – SRES**, edited by N. Nakicenovic and R. Swart. Cambridge Univ. Press, New York, 2000.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). Climate Prediction Centre. **El Niño Oscilação Sul (ENOS) e La Niña**. Disponível em: <http://www.cpc.noaa.gov/products/analys_monitoring/>. Acesso em: 15 de ago. de 2015.

NOBRE, C.; YOUNG, A.; SALDIVA, P.; MARENGO, J.; NOBRE, A.; ALVES JR., S.; SILVA, G.; LOMBARDO, M. **Vulnerabilidades das megacidades brasileiras às mudanças climáticas: Região Metropolitana de São Paulo**. Campinas: UNICAMP; São Paulo: INPE, 2010.

NUNES, L. H.; LOMBARDO, M. A. A questão da variabilidade climática: Uma reflexão crítica. **Instituto Geológico**. São Paulo, n. 16 (1/2) jan/dez, p. 21 – 31, 1995.

NUNES, L. H.; VICENTE, A. K.; CANDIDO, D. H. Clima da região Sudeste do Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; JUSTI DA, M. G. A.; SILVA DIAS, M. A. F. **Tempo e clima**. São Paulo: Oficina de textos, Cap. 16, 2009.

OLIVEIRA, G. O. **O El Niño e você: o fenômeno climático**. São José dos Campos: Editora Transtec, 2001.

OLIVEIRA, L. F. C.; FIOREZE, A. P.; MEDEIROS, A. M. M.; SILVA, A. S. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.14, n.11, p.1186–1192, 2010.

OLIVEIRA, G. G.; PEDROLLO, O. C.; CASTRO, N. M. dos R. As incertezas associadas às condições climáticas obtidas pelo modelo eta cptec/hadcm3: avaliação comparativa entre os dados simulados e observados de precipitação, evapotranspiração e vazão na bacia hidrográfica do Rio Ijuí, Brasil. **Rev. bras. meteorol.**, São Paulo, v. 30, n. 1, p. 101-121, mar. 2015.

PEREIRA FILHO, A. J.; HAAS, R.; AMBRIZZI, T. Caracterização de eventos de enchentes na bacia do Alto Tietê por meio do radar meteorológico e da modelagem numérica de mesoescala. **Anais**. XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz de Iguaçu-PR, 2002.

PINHEIRO, J. U.; NEVES, J. A.; CHAVES, R. C.; MENDES, M.; BARRETO, N. J. C. Avaliação de modelos do CMIP5 que melhor expressam a atuação dos Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VACNS) no Nordeste Brasileiro (NEB). **Revista Brasileira de Geografia Física**, vol.07, n.05, p.891-904, 2014.

PINTO, J. E. S.; AGUIAR NETO, A. O. Climatologia aplicada: Escalas do Clima. In: PINTO, J. E. S.; AGUIAR NETO, A. O. **Clima, Geografia e Agrometeorologia: Uma Abordagem Interdisciplinar**. São Cristovão: Ed. UFS, Aracaju. Fundação Quêdo Teixeira, p 157-172, 2008.

REBOITA M.S., GAN M. A., ROCHA R. P., AMBRIZZI T. Regimes de Precipitação na América do Sul: Uma Revisão Bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.2, p.185-204, 2010.

REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul. **Terræ Didática**, v.8, n.1, p.34-50, 2012.

REIS, S. Acabou a cota do volume morto do Alto Tietê. **GGN**, São Paulo, p.14, 20 nov. 2014.

RIBEIRO, W. C. Oferta e estresse hídrico na Região Metropolitana de São Paulo. **Estudos avançados**, São Paulo, v.25, n.71, 2011.

SALVADOR, M. A.; SANTOS, L. S. F. C. Análise da precipitação na cidade de São Paulo no período de 1961-2009. **Revista Brasileira de Climatologia**, São Paulo, ano 6, v. 7, Sept, 2010.

SCHARDONG, A.; SIMONOVIC, S. P.; GARCIA, J. I. B. O possível efeito de mudanças climáticas e suas incertezas sobre afluências em sistemas de recursos hídricos. **REGA**, Vol. 11, nº. 2, p. 53-65, jul./dez, 2014.

SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F. W.; CHAVES, A. G. M.; PEREIRA, I. C. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL; Agência Nacional de Águas – ANA, 2ª ed., 2000.

SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. A.; CABRAL, S. M.; LEMOS, W. E. D.; PORTO, V. C. Avaliação de desempenho dos modelos do CMIP5 quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no século XX sobre a região Nordeste do Brasil, Amazônia e Bacia do Prata e análise das projeções para o cenário RCP8.5. **Rev. bras. meteorol.**, São Paulo, v. 28, n. 3, Sept. 2013a.

SILVEIRA, K. C.; SOUZA FILHO, F. A. DE.; LAZARÓ, Y. M. C. Avaliação de Desempenho dos Modelos de Mudança Climática do IPCC-AR4 Quanto a Sazonalidade e os Padrões de Variabilidade Interanual da Precipitação Sobre o Nordeste do Brasil, Bacia do Prata e Amazônia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.18 n.1 –Jan/Mar, p.177-194, 2013b.

SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. A.; LOPES, J. E. G.; BARBOSA, P. S. F.; TIEZZI, R. O. 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, n.4, Out/Dez, p. 59-71, 2014.

SORIANO, E.; LONDE, R. L.; GREGORIO, L. T.; COUTINHO, M. P.; SANTOS, L. B. L. Crise hídrica em São Paulo sob o ponto de vista dos desastres. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 21-42, mar., 2016.

SOUZA, E. B.; MANZI, A. O.; SAMPAIO, G., CANDIDO, L. A. *et al.* Mudanças climáticas de curto e longo prazo: projeções, reversibilidade e atribuição. In: PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (P BMC). **Base científica das mudanças climáticas**. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [Ambrizzi, T., Araujo, M. (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: COPPE, Cap.9, 2014.

SPIEGEL, M. R. **Estatística**. São Paulo: Schaum McGraw-Hill. 2.Ed., 1985.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, Nova Iorque, v.38, n.1, p.55-94, 1948.

TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, F. S. Evaporação e Evapotranspiração. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, ABRH, p. 253-287, 2001.

TUCCI, C.; MENDES, C. **Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica**. Brasília: MMA, 2006.

VAREJÃO-SILVA, M.A. **Meteorologia e Climatologia**. INMET: Recife, 2006.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill. 1975, 245p.

XIANFU, L. **Guidance on the development of regional climate scenarios for vulnerability and adaptation assessment within the Framework of National Communications from Parties not Included in Annex I to the United Nations Framework Convention on Climate Change**. National Communications Support Programme. UNDP-UNEP-GEF, New York, USA, p.1-41, 2006.

YOUNG, A.; HOGAN, D. Dimensões Humanas das Mudanças Climáticas: Vulnerabilidade as Enchentes e Inundações na Região Metropolitana de São Paulo. **XVII Encontro Nacional de Estudos Populacionais**, ABEP, realizado em Caxambú – MG Brasil, de 20 a 24 de setembro de 2010.

8. APÊNDICES

APÊNDICE A – Tabela de avaliação do desempenho do modelo em representar a precipitação nas sub-bacias com os cálculos do Coeficiente de Correlação de Pearson (r), Erro Absoluto (EA), Erro Percentual (EP), Erro Padrão Médio (EPM), Erro Quadrático Médio (EQM) e Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM)

Sub-bacia	Juqueri-Cantareira	Tietê-Cabeceiras	Penha-Pinheiros	Billings-Tamanduateí	Cotia-Guarapiranga	Pinheiros-Pirapora	BACIA DO ALTO TIETÊ
r	0,59	0,62	0,52	0,55	0,56	0,48	0,6
EA	58,17	61,71	60,11	61,68	62,01	62,1	54,47
EP	46,99	51,2	49,55	47,16	51,49	52,9	44,51
EPM	55,75	64,28	44,78	59,77	62,56	44,29	55,3
EQM	6122,41	6053,15	7103,74	6385,31	6283,86	7329,99	4998,38
REQM	78,25	77,8	84,28	79,91	79,27	85,62	70,7

APÊNDICE B – Tabela de avaliação do desempenho do modelo em representar a temperatura nas sub-bacias com os cálculos do Coeficiente de Correlação de Pearson (r), Erro Absoluto (EA), Erro Percentual (EP), Erro Padrão Médio (EPM), Erro Quadrático Médio (EQM) e Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM)

Sub-bacia	Juqueri-Cantareira	Tietê-Cabeceiras	Penha-Pinheiros	Billings-Tamanduateí	Cotia-Guarapiranga	Pinheiros-Pirapora	BACIA DO ALTO TIETÊ
r	0,83	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,83
EA	1,98	1,99	1,98	1,98	1,98	1,97	1,98
EP	9,52	9,52	9,51	9,52	9,52	9,52	9,52
EPM	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,2	1,21
EQM	5,48	5,48	5,48	5,48	5,48	5,47	5,48
REQM	2,34	2,33	2,34	2,33	2,34	2,34	2,34

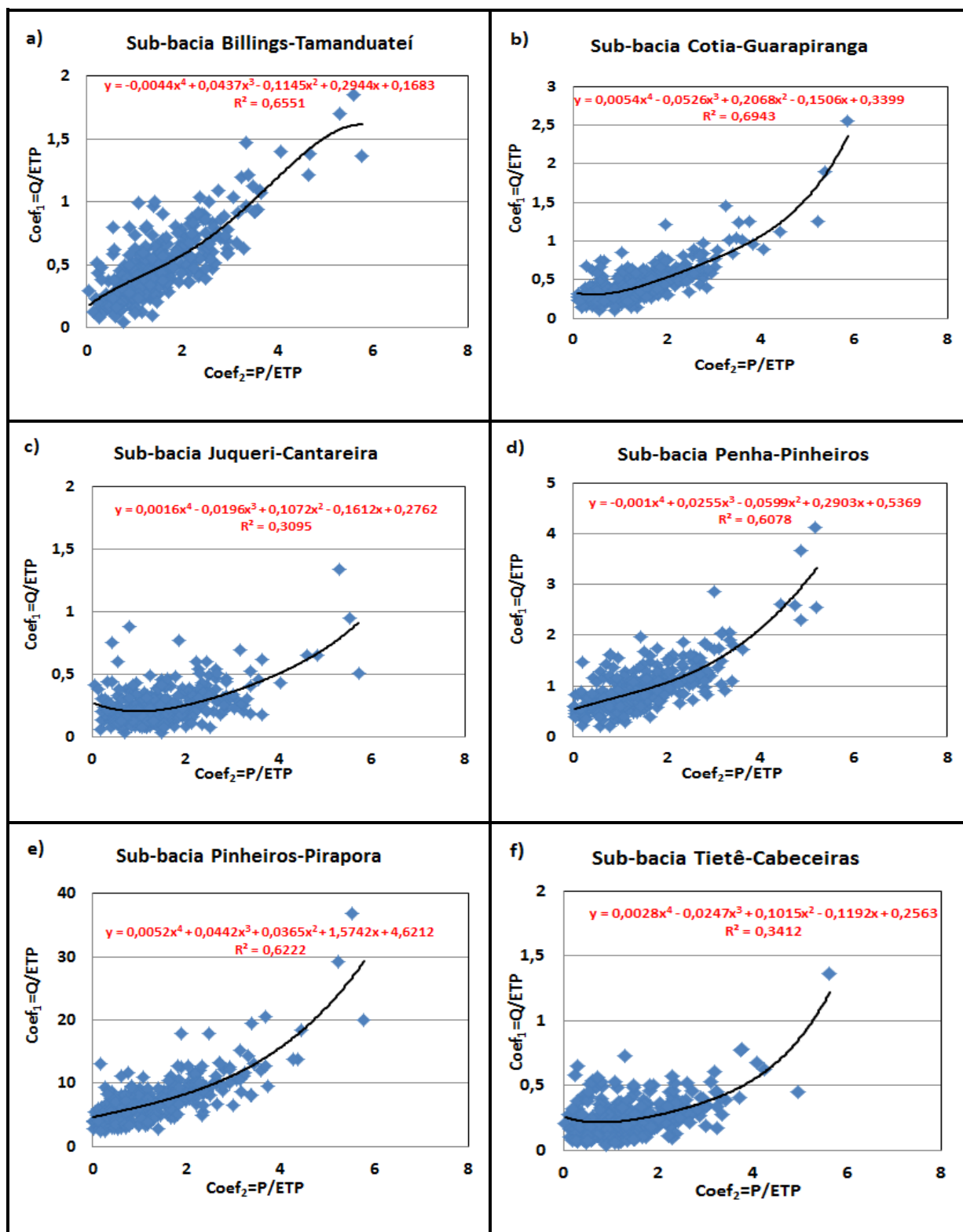
APÊNDICE C – Tabela com os cálculos dos testes de correção da precipitação, com as técnicas de: Remoção do erro médio mensal – REMM (Equação 27), *Direct Approach* – DA (Equação 28) e *Direct Approach* –DA2 (Equação 29), *Delta Change Approach* – DCA (Equação 30) e *Delta Change Approach* – DCA2 (Equação 31). Em vermelho encontram-se os valores com menores erros e maior correlação

Métrica	DCA	DCA2	DA	DA2	REMM
<i>r</i>	0,62	0,64	0,57	0,68	0,68
EA	52,37	52,04	59,37	50,75	51,82
EP	45,10	44,82	51,12	43,70	44,63
EPM	66,08	63,61	79,09	50,28	54,38
EQM	5464,92	5141,21	7308,19	4087,93	4115,08
REQM	73,93	71,70	85,49	63,94	64,15

APÊNDICE D – Tabela com métricas dos testes de correção da temperatura, com as técnicas de: remoção do erro médio mensal – REMM (Equação 27), *Direct Approach* – DA (Equação 28) e *Direct Approach* –DA2 (Equação 29), *Delta Change Approach* – DCA (Equação 30) e *Delta Change Approach* – DCA2 (Equação 31). Em vermelho encontram-se os valores com menores erros e maior correlação

	DCA	DCA2	DA	DA2	REMM
<i>r</i>	0,82	0,82	0,87	0,84	0,88
EA	1,31	1,34	1,02	2,21	0,99
EP	6,24	6,36	4,85	10,51	4,71
EPM	1,55	1,53	1,24	1,20	1,19
EQM	2,78	2,71	1,74	6,47	1,65
REQM	1,67	1,65	1,32	2,54	1,29

APÊNDICE E – Gráfico das curvas polinomiais, equações de balanço hídrico e coeficiente de determinação (R^2) das sub-bacias: (a) Billings-Tamanduateí, (b) Cotia-Guarapiranga, (c) Juqueri-Cantareira, (d) Penha-Pinheiros, (e) Pinheiros-Pirapora e (f) Tietê-Cabeceiras, no período de 1979-2003



APÊNDICE F – Padrão médio mensal da vazão (m³/s) nos exutórios das sub-bacias do Alto Tietê, para o período de 1979 a 2003

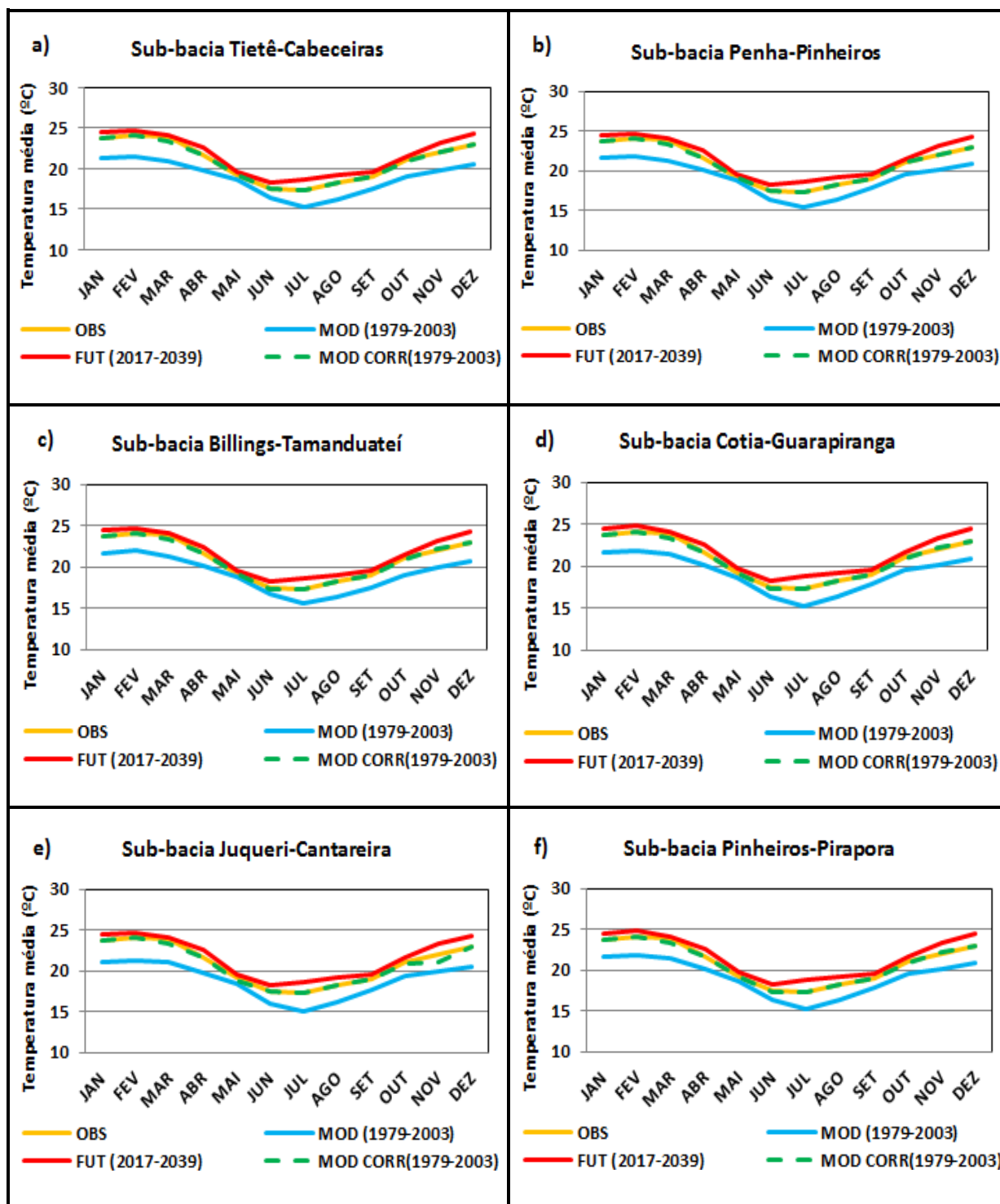
SUB-BACIA	TIETÊ- CABECEIRAS	PINHEIROS- PIRAPORA	PENHA- PINHEIROS	JUQUERI- CANTAREIRA	COTIA- GUARAPIRANGA	BILLINGS- TAMANDUATEÍ	BACIA DO ALTO TIETÊ
JAN	10,88	200,96	44,6	7,67	20	64,28	200,96
FEV	11,2	223,11	49,56	7,72	22,42	64,05	223,11
MAR	10,52	187,44	44,84	7,24	19,68	65,74	187,44
ABR	8,72	121,52	28,56	5,06	12,44	40,76	121,52
MAI	7,36	101,04	22,52	4,74	10,92	30,31	101,04
JUN	6,72	95,52	21,28	4,57	10,72	26,7	95,52
JUL	5,68	71,2	16	3,73	8	20,9	71,2
AGO	5,2	65,36	14,36	3,39	7,12	18,92	65,36
SET	6,64	90,56	22,68	3,77	9,84	32,47	90,56
OUT	6,76	107,4	26,08	4,06	11,64	37,73	107,4
NOV	7	106,8	24,12	4,03	10,32	34,9	106,8
DEZ	8,8	146,56	32,16	5,68	13,88	47,77	146,56

APÊNDICE G – Tabela de avaliação da vazão reconstruída pelo modelo hidrológico empírico para as sub-bacias do Alto Tietê, para o período de 1979 a 2003

SUB-BACIA	JUQUERI- CANTAREIRA	TIETÊ- CABECEIRAS	PENHA- PINHEIROS	BILLINGS- TAMANDUATEÍ	COTIA- GUARAPIRANGA	PINHEIROS- PIRAPORA	BACIA DO ALTO TIETÊ
<i>r</i>	0,58	0,60	0,81	0,85	0,84	0,83	0,89
EA	7,23	6,93	19,04	10,15	8,22	127,26	10,55
EP	38,27	36,17	25,65	25,13	23,17	21,88	18,71
EPM	7,48	6,91	23,55	12,22	9,98	157,71	13,05
EQM	87,79	76,14	660,26	173,92	127,04	30747,10	192,02
REQM	9,37	8,73	25,70	13,19	11,27	175,35	13,86
<i>Se</i>	0,10	0,10	0,14	0,08	0,13	0,19	0,08
Teste - F	1,41	1,45	1,13	1,13	1,26	1,22	1,10

* Considerou-se o F crítico de 1,28.

APÊNDICE H – Padrão médio mensal da temperatura observada e simulada pelo modelo no período presente (1979-2003) e futuro (2017-2039) nas sub-bacias: (a) Tietê-Cabeceiras, (b) Penha-Pinheiros, (c) Billings-Tamanduateí, (d) Cotia-Guarapiranga, (e) Juqueri-Cantareira e (f) Pinheiros-Pirapora



APÊNDICE I – Vazão (m³/s) média mensal e anual da sub-bacia Billings-Tamanduateí para o período futuro (2017-2039)

ANO	JAN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEC	MÉDIA
2017	34,63	21,78	41,44	9,48	11,12	5,83	4,57	9,13	10,06	20,80	16,88	27,33	17,75
2018	25,91	28,76	20,83	10,37	10,00	5,59	7,83	10,14	13,66	14,46	19,28	26,37	16,10
2019	21,95	22,41	34,58	16,52	16,32	9,97	8,55	12,17	13,28	10,74	17,66	22,40	17,21
2020	30,51	28,92	22,65	12,39	12,52	12,41	6,90	7,12	22,17	11,77	14,61	19,78	16,81
2021	25,12	31,43	26,34	15,51	10,37	11,59	10,79	5,60	17,08	11,53	13,40	22,63	16,78
2022	32,50	25,11	19,21	13,23	8,93	8,95	10,16	10,88	12,24	12,48	18,17	15,21	15,59
2023	29,04	33,09	21,32	16,31	9,38	7,89	5,74	9,65	12,95	26,55	19,09	20,04	17,59
2024	35,36	32,60	20,36	13,15	15,86	7,99	4,45	5,54	13,54	14,72	13,70	24,18	16,79
2025	32,45	22,99	24,95	12,06	12,47	9,96	8,01	11,54	15,11	12,15	14,81	29,75	17,19
2026	29,07	22,81	26,01	14,10	11,40	9,53	10,29	9,22	9,79	15,26	21,30	30,24	17,42
2027	27,70	19,83	25,53	14,92	11,85	9,78	6,96	8,82	11,51	17,93	18,87	22,90	16,38
2028	52,12	25,34	28,45	13,77	12,75	7,82	5,99	8,25	8,80	21,31	17,05	20,88	18,54
2029	32,26	23,13	23,12	14,71	11,30	7,30	8,74	9,71	12,95	16,21	17,23	23,09	16,65
2030	24,82	28,87	17,20	13,25	12,68	7,93	13,04	11,22	9,44	14,53	18,35	24,47	16,32
2031	23,39	31,41	30,04	16,02	8,71	7,12	4,76	9,99	13,34	14,44	22,25	28,37	17,48
2032	29,80	30,15	22,07	10,89	8,52	6,57	8,05	10,24	11,43	13,84	15,68	20,69	15,66
2033	21,02	29,25	17,63	15,50	14,07	5,28	6,98	9,81	18,54	11,85	19,01	23,62	16,05
2034	32,19	33,41	26,88	13,19	13,15	12,58	6,16	7,12	14,44	12,68	22,36	21,32	17,96
2035	24,71	34,67	23,10	16,11	15,25	6,02	8,27	7,11	12,22	13,96	16,31	20,88	16,55
2036	37,59	24,92	25,87	11,46	12,07	8,10	4,96	6,34	9,76	15,90	16,73	23,78	16,46
2037	20,15	47,49	26,91	14,39	10,03	11,54	6,64	9,57	13,14	17,35	16,26	27,34	18,40
2038	23,11	39,00	19,46	13,59	13,12	8,37	7,13	7,70	8,56	17,90	20,10	19,83	16,49
2039	26,85	23,10	24,69	14,27	11,44	5,51	5,14	6,93	8,76	15,22	13,44	20,08	14,62
MÉDIA	29,23	28,72	24,72	13,70	11,88	8,42	7,40	8,86	12,73	15,37	17,50	23,27	16,82

APÊNDICE J – Vazão (m³/s) média mensal e anual da sub-bacia Cotia-Guarapiranga para o período futuro (2017-2039)

ANO	JAN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEC	MÉDIA
2017	29,20	17,63	27,56	7,93	9,62	5,00	5,50	7,59	8,65	17,64	14,41	20,50	14,27
2018	22,06	23,90	18,19	9,60	8,81	5,06	6,91	8,65	11,28	12,20	15,52	20,94	13,59
2019	18,19	17,73	28,46	12,32	14,15	8,46	7,10	10,32	11,09	9,28	15,15	18,47	14,23
2020	24,73	21,59	18,17	10,00	10,74	11,62	6,78	6,00	18,84	10,54	12,70	17,18	14,08
2021	18,66	24,64	20,45	12,30	8,80	9,89	9,51	6,93	16,46	9,07	11,52	17,37	13,80
2022	25,67	20,35	14,22	9,78	6,68	8,74	8,47	9,24	10,33	10,62	14,69	13,22	12,67
2023	22,08	24,32	17,75	12,45	8,30	6,54	6,51	7,90	10,71	20,46	15,36	16,90	14,11
2024	29,50	24,98	15,73	10,29	14,19	6,63	4,86	6,65	12,70	11,63	11,92	20,56	14,14
2025	24,15	18,11	20,42	9,53	11,25	9,22	7,70	10,07	12,51	9,60	13,53	23,88	14,17
2026	22,67	17,48	20,20	11,25	9,54	7,91	10,20	7,35	8,34	12,40	17,78	24,31	14,12
2027	23,34	15,07	20,12	10,99	9,97	8,31	5,99	7,25	9,34	15,02	15,07	18,83	13,28
2028	35,07	19,05	22,36	10,91	9,13	6,49	6,64	7,08	7,95	16,74	14,37	16,70	14,37
2029	24,15	17,30	17,96	12,78	9,46	6,53	7,59	8,43	10,94	13,51	13,90	19,24	13,48
2030	20,96	21,48	13,81	11,54	11,71	6,79	12,48	9,45	7,73	11,59	15,48	18,51	13,46
2031	19,39	22,35	22,24	12,13	7,99	6,01	6,75	8,08	11,06	12,73	18,85	21,19	14,06
2032	24,03	22,78	18,35	9,30	7,48	5,79	7,21	8,80	9,56	10,79	12,87	17,40	12,86
2033	17,28	22,55	13,98	11,35	13,26	5,35	6,20	7,99	15,38	10,48	15,43	19,17	13,20
2034	27,98	25,15	21,81	12,59	11,90	10,42	5,31	6,62	12,23	10,80	19,29	17,19	15,11
2035	19,59	27,13	19,10	12,81	12,85	5,26	7,22	6,96	10,55	11,47	13,47	17,02	13,62
2036	28,27	18,42	20,42	9,31	9,70	6,99	5,89	7,08	8,25	12,96	14,23	19,42	13,41
2037	16,96	34,30	18,94	10,94	8,19	10,33	7,13	8,11	11,75	14,16	13,23	21,47	14,63
2038	18,92	29,89	15,57	10,32	11,55	7,11	5,96	7,70	7,43	13,52	16,15	15,72	13,32
2039	20,64	16,81	19,97	11,61	8,93	6,14	5,55	8,68	7,67	11,94	11,32	16,39	12,14
MÉDIA	23,19	21,87	19,38	10,96	10,18	7,42	7,11	7,95	10,90	12,57	14,62	18,76	13,74

APÊNDICE K – Vazão (m³/s) média mensal e anual da sub-bacia Juqueri-Cantareira para o período futuro (2017-2039)

ANO	JAN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEC	MÉDIA
2017	9,94	6,78	6,85	4,26	3,53	2,65	3,49	3,00	3,72	7,80	5,76	10,67	5,70
2018	7,02	7,54	6,42	4,95	3,64	2,33	3,05	3,33	4,31	5,04	6,02	10,32	5,33
2019	7,06	7,42	8,19	4,86	7,14	3,17	3,13	4,57	4,27	4,35	6,17	8,47	5,74
2020	9,37	7,50	7,23	4,10	3,91	2,81	3,57	2,95	8,07	5,12	5,83	6,30	5,56
2021	7,07	8,86	6,14	5,23	4,07	4,13	2,97	4,27	6,65	3,70	5,20	8,48	5,56
2022	9,55	7,62	5,44	5,08	2,94	2,25	3,10	3,81	4,13	4,86	5,35	6,06	5,02
2023	8,06	8,97	6,18	4,99	3,90	3,12	3,73	3,20	4,29	6,64	5,51	7,71	5,53
2024	12,30	7,98	5,38	4,91	4,59	2,83	3,03	4,39	4,53	4,66	5,71	9,40	5,81
2025	8,16	7,17	6,03	4,34	4,04	2,57	2,22	3,03	5,21	4,29	6,46	11,05	5,38
2026	7,41	7,68	6,33	5,16	4,17	2,91	2,89	3,17	3,38	5,20	7,89	8,30	5,37
2027	9,00	6,25	6,87	4,70	3,69	3,32	2,68	2,88	3,50	5,35	7,09	6,57	5,16
2028	11,48	7,49	7,14	5,03	3,21	2,58	3,69	3,53	3,88	6,62	6,65	7,71	5,75
2029	7,61	7,37	6,52	5,49	3,43	2,88	2,55	2,68	3,63	5,31	5,32	8,52	5,11
2030	8,65	7,24	6,04	5,43	4,46	2,64	3,15	3,41	3,03	5,26	6,65	8,44	5,37
2031	7,57	8,78	7,44	5,28	3,54	2,61	3,92	2,84	4,31	5,97	7,30	8,71	5,69
2032	8,82	9,96	7,30	4,54	2,99	2,78	3,36	3,45	3,43	4,27	5,75	7,80	5,37
2033	7,71	7,63	5,65	4,44	5,71	2,64	2,57	3,35	5,23	4,94	6,66	7,65	5,35
2034	9,43	8,71	6,89	6,71	5,33	3,05	2,77	3,33	3,55	4,36	7,83	9,75	5,97
2035	7,23	8,70	6,05	4,86	2,85	2,66	2,80	3,71	4,57	4,28	5,38	6,74	4,99
2036	8,97	7,39	7,10	4,18	4,48	2,43	3,51	4,25	3,39	5,00	6,06	9,01	5,48
2037	6,68	11,34	6,25	4,45	3,21	3,63	4,51	2,67	4,42	5,46	5,69	8,65	5,58
2038	7,91	10,78	5,81	4,62	4,08	2,74	2,97	4,06	3,28	6,39	6,47	7,71	5,57
2039	7,59	7,40	6,99	5,55	3,11	3,56	3,29	5,26	2,85	4,45	5,30	7,82	5,26
MÉDIA	8,46	8,11	6,53	4,92	4,00	2,88	3,17	3,53	4,24	5,19	6,18	8,34	5,46

APÊNDICE L – Vazão (m³/s) média mensal e anual da sub-bacia Penha-Pinheiros para o período futuro (2017-2039)

ANO	JAN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEC	MÉDIA
2017	63,04	40,30	52,94	16,91	22,22	10,70	10,48	18,91	20,42	40,64	31,58	52,54	31,72
2018	45,98	46,74	39,69	21,14	21,75	11,28	16,28	19,70	22,84	27,69	35,41	56,01	30,38
2019	41,62	43,32	54,80	29,13	36,75	17,36	15,38	28,48	26,63	21,72	34,73	46,36	33,02
2020	58,05	50,79	46,89	24,22	23,48	17,56	15,20	13,03	45,76	23,94	31,16	35,75	32,15
2021	41,96	56,08	41,09	25,62	20,57	21,55	19,30	13,47	36,83	19,26	26,96	44,88	30,63
2022	62,24	46,28	34,40	19,50	15,95	12,97	18,12	23,78	23,96	24,79	31,08	32,96	28,84
2023	50,60	55,91	37,65	27,64	21,84	13,36	12,79	19,31	24,77	40,80	33,24	41,28	31,60
2024	72,85	46,24	33,39	23,18	25,82	13,60	10,06	12,96	27,19	26,56	28,27	48,12	30,69
2025	50,68	43,00	38,87	21,43	22,60	16,14	13,34	19,07	32,02	21,66	33,58	55,68	30,67
2026	47,71	46,38	40,55	27,09	21,20	17,23	16,60	19,07	16,90	30,26	43,80	53,22	31,67
2027	53,58	37,64	41,03	24,67	21,72	19,16	14,42	17,24	20,62	30,70	40,08	39,58	30,04
2028	79,06	47,54	46,32	28,85	21,27	15,37	14,11	15,03	19,84	36,55	36,36	41,64	33,50
2029	50,71	46,33	40,39	31,87	19,71	14,12	16,35	17,06	20,26	31,06	29,32	46,27	30,29
2030	49,04	46,42	31,26	27,44	24,28	15,16	21,19	21,86	15,85	30,15	36,02	49,13	30,65
2031	44,68	55,57	47,01	30,24	19,14	13,48	12,55	19,08	24,52	30,97	43,06	49,18	32,46
2032	54,34	61,21	42,87	22,11	16,25	13,60	16,09	19,74	19,89	24,78	31,42	43,03	30,45
2033	43,92	48,30	33,77	27,20	27,04	11,53	13,62	19,45	31,44	25,03	37,40	45,18	30,32
2034	60,31	55,95	42,88	28,06	30,45	19,29	11,63	15,43	23,05	23,65	44,18	46,33	33,43
2035	44,55	53,94	36,91	27,49	18,02	11,75	15,73	15,65	23,40	25,89	31,39	39,28	28,67
2036	59,14	45,68	46,42	21,41	23,55	13,77	11,83	15,24	17,59	28,03	32,56	48,13	30,28
2037	36,17	77,84	41,06	25,09	18,29	21,18	14,12	16,01	24,56	31,18	32,55	49,33	32,28
2038	47,71	69,56	34,37	26,09	24,22	14,35	11,94	17,84	14,59	32,84	37,67	41,05	31,02
2039	48,97	45,82	41,95	25,25	16,64	12,16	11,46	16,87	15,99	27,79	27,55	44,73	27,93
MÉDIA	52,47	50,73	41,15	25,29	22,29	15,07	14,46	18,01	23,87	28,52	34,32	45,64	30,99

APÊNDICE M – Vazão (m³/s) média mensal e anual da sub-bacia Pinheiros-Pirapora para o período futuro (2017-2039)

ANO	JAN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEC	MÉDIA
2017	272,68	167,72	178,31	78,97	102,01	50,12	50,65	85,34	87,60	177,19	140,08	244,80	136,29
2018	204,57	199,57	179,88	93,51	107,69	51,16	75,25	93,20	99,70	123,78	152,12	230,90	134,28
2019	209,09	188,91	212,92	131,28	171,42	79,69	67,54	124,25	123,51	100,60	161,63	181,41	146,02
2020	244,54	211,56	180,96	111,03	115,72	86,59	72,47	56,33	189,85	110,46	141,54	166,50	140,63
2021	179,26	313,89	159,99	112,98	91,45	109,71	86,69	62,34	173,18	82,40	118,28	195,88	140,50
2022	259,78	185,65	141,22	85,66	65,97	60,44	78,62	120,95	107,02	114,08	138,04	159,10	126,38
2023	203,78	222,57	159,71	117,65	94,74	62,52	58,73	85,60	107,62	179,38	143,49	177,07	134,41
2024	322,42	207,96	136,29	105,12	135,02	61,38	47,84	61,02	116,17	113,46	128,52	216,80	137,67
2025	231,04	198,52	184,72	100,34	109,82	77,06	64,85	88,89	128,21	95,80	147,26	237,90	138,70
2026	196,26	206,21	182,17	114,21	92,21	81,21	82,97	80,76	75,06	130,13	194,44	216,31	137,66
2027	225,85	158,84	173,26	102,14	101,27	93,13	63,85	75,78	83,35	134,74	163,86	171,54	128,97
2028	292,50	187,96	191,67	125,17	87,76	75,07	64,78	68,08	89,28	156,09	156,80	178,11	139,44
2029	205,60	186,07	171,80	142,66	90,15	69,85	73,16	72,48	86,17	140,64	131,54	205,31	131,28
2030	217,95	200,37	132,76	123,26	111,18	75,03	96,43	96,30	71,84	122,92	164,56	204,25	134,74
2031	212,64	255,80	184,22	129,73	88,41	58,64	57,39	87,34	108,80	142,12	183,68	190,20	141,58
2032	249,50	251,94	175,32	97,08	85,95	61,02	71,69	92,11	87,08	110,09	141,31	195,82	134,91
2033	193,07	194,72	146,38	116,73	128,19	55,03	61,58	88,09	139,31	113,97	160,15	199,42	133,05
2034	270,59	251,59	178,05	125,10	176,05	90,56	52,18	67,07	95,31	106,02	183,89	207,96	150,36
2035	194,32	226,57	171,16	119,31	79,06	53,81	69,80	67,55	103,04	113,78	140,04	175,67	126,18
2036	251,18	183,49	191,66	92,18	94,97	62,75	57,34	69,77	77,24	124,11	145,24	216,20	130,51
2037	168,67	380,58	162,56	108,57	85,40	114,34	66,76	69,60	111,16	135,04	137,70	231,62	147,67
2038	207,06	312,51	151,88	113,11	113,82	65,73	53,32	81,55	64,58	139,05	160,29	165,40	135,69
2039	194,20	191,20	178,19	112,78	71,05	56,57	52,26	80,99	71,69	116,62	119,42	189,84	119,57
MÉDIA	226,37	221,05	170,66	111,24	104,32	71,80	66,35	81,54	104,21	125,32	150,17	198,17	135,93

APÊNDICE N – Vazão (m³/s) média mensal e anual da sub-bacia Tietê-Cabeceiras para o período futuro (2017-2039)

ANO	JAN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEC	MÉDIA
2017	13,81	10,92	8,82	8,21	6,25	4,08	3,74	5,51	6,35	8,22	11,10	8,24	7,94
2018	13,70	17,90	9,53	6,96	5,40	5,57	4,75	4,20	5,06	7,95	9,32	11,61	8,50
2019	15,41	10,92	13,23	5,52	5,69	3,79	3,94	6,87	6,02	11,28	9,70	15,91	9,02
2020	11,04	11,35	8,62	6,62	6,00	3,86	4,89	6,10	7,14	7,86	12,02	15,30	8,40
2021	9,88	10,99	12,75	7,70	7,50	5,43	4,93	12,60	7,81	6,55	10,10	12,40	9,06
2022	13,69	12,77	10,21	6,31	5,37	5,39	4,73	4,62	18,74	7,05	9,61	9,14	8,97
2023	11,65	11,80	9,83	7,80	4,94	6,80	6,76	4,77	10,62	6,06	7,92	12,52	8,46
2024	15,90	12,47	8,23	6,50	5,22	4,37	5,97	8,54	7,44	7,22	11,31	8,70	8,49
2025	12,93	15,34	8,82	7,80	6,58	4,74	4,56	6,48	7,85	13,81	12,70	10,87	9,37
2026	17,53	13,48	8,30	6,86	6,01	4,49	3,48	4,60	8,35	8,54	8,53	13,87	8,67
2027	14,27	10,06	9,09	6,54	6,44	5,22	4,95	6,50	11,87	6,41	9,65	17,00	9,00
2028	13,06	9,83	10,33	7,64	6,90	5,52	5,08	6,83	5,50	8,24	14,29	13,30	8,88
2029	12,07	9,20	9,42	6,61	5,92	5,55	4,50	5,95	7,43	8,65	13,19	11,46	8,33
2030	20,06	12,76	9,80	7,29	5,05	4,60	4,75	4,91	5,97	11,90	12,30	11,22	9,22
2031	13,73	10,65	10,19	7,84	5,90	4,51	5,54	6,92	6,82	8,39	10,19	12,20	8,57
2032	11,42	10,57	8,04	7,78	6,32	4,48	8,59	8,33	4,98	8,89	10,41	14,96	8,73
2033	10,41	12,06	10,96	8,41	5,80	4,36	4,60	6,89	7,86	8,60	17,27	15,44	9,39
2034	11,92	12,91	9,87	6,47	4,92	4,42	4,94	7,10	6,62	7,66	9,83	11,30	8,16
2035	10,34	11,71	8,11	7,23	6,29	4,08	4,21	5,93	12,34	7,42	11,17	11,69	8,38
2036	15,65	14,29	10,37	8,62	5,66	6,49	3,74	4,97	9,67	6,99	16,43	11,05	9,49
2037	10,96	15,25	9,68	7,59	5,46	3,95	4,93	4,95	7,11	7,31	10,64	11,23	8,26
2038	16,15	12,50	11,46	6,18	5,58	4,49	4,24	4,96	5,32	8,11	9,42	13,02	8,45
2039	9,55	16,23	9,95	7,07	5,33	5,82	5,06	6,97	7,30	9,05	10,46	12,83	8,80
MÉDIA	13,27	12,43	9,81	7,20	5,85	4,87	4,91	6,33	8,01	8,36	11,20	12,40	8,72

APÊNDICE O – Vazão (m³/s) média mensal e anual da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê para o período futuro (2017-2039)

ANO	JAN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEC	MÉDIA
2017	265,18	178,38	234,09	75,32	91,83	47,31	51,67	75,49	84,65	169,06	134,89	234,81	136,89
2018	198,99	212,24	164,73	90,70	85,91	48,30	65,90	80,36	99,75	116,84	153,03	235,32	129,34
2019	178,70	185,12	239,55	123,18	147,02	76,46	64,92	105,53	109,66	91,98	145,66	194,82	138,55
2020	243,16	218,56	184,47	96,57	101,26	86,97	63,55	57,22	177,77	99,09	128,86	155,84	134,44
2021	193,53	231,58	181,27	115,03	90,11	97,60	82,40	64,65	147,81	85,38	112,60	194,73	133,06
2022	260,84	206,98	142,59	91,74	69,43	64,59	76,93	91,86	102,47	102,27	139,98	135,17	123,74
2023	219,38	251,59	157,24	120,69	85,29	61,34	60,43	78,03	106,87	182,40	148,11	172,58	137,00
2024	293,07	230,34	144,10	98,30	120,92	59,78	46,22	62,82	114,25	118,35	118,49	213,33	135,00
2025	236,67	183,77	173,94	93,02	104,85	76,78	61,55	82,66	125,02	92,79	136,69	243,65	134,28
2026	214,31	186,61	186,09	111,41	90,70	78,03	74,47	75,99	74,61	125,08	183,07	225,74	135,51
2027	225,05	157,71	182,08	102,24	93,70	81,71	58,62	70,42	92,86	134,72	163,92	179,45	128,54
2028	328,58	206,90	196,05	111,07	90,54	64,89	62,48	65,77	79,86	163,14	152,72	179,00	141,75
2029	229,21	188,38	178,55	124,23	87,97	60,06	68,84	73,76	93,56	129,47	132,70	198,71	130,45
2030	208,51	202,45	128,53	111,71	106,17	64,70	95,55	89,42	69,03	126,05	150,19	211,17	130,29
2031	189,65	229,01	205,70	125,52	76,04	56,67	61,29	76,09	106,91	126,33	186,09	222,97	138,52
2032	227,52	241,87	178,74	90,74	69,91	56,63	66,50	83,84	88,69	109,20	132,26	179,49	127,12
2033	182,15	213,80	137,45	116,07	122,29	50,04	56,34	76,95	138,16	103,77	154,69	191,49	128,60
2034	263,37	250,76	190,31	119,57	115,62	92,85	49,70	64,23	105,63	103,81	188,84	191,51	144,68
2035	193,16	253,64	172,85	118,30	97,87	50,02	65,18	65,77	97,88	110,39	134,21	173,55	127,74
2036	263,98	201,85	200,01	89,66	101,64	62,82	55,87	67,27	74,10	122,49	136,35	207,72	131,98
2037	159,97	307,05	181,89	107,91	80,73	93,20	67,46	72,25	107,44	136,65	135,53	216,36	138,87
2038	199,36	272,40	145,48	107,12	104,37	63,81	52,97	73,69	65,85	145,11	161,77	176,60	130,71
2039	211,18	188,12	182,56	109,06	81,69	57,94	53,17	80,71	69,64	120,56	115,20	155,20	118,75
MÉDIA	225,46	217,35	177,75	106,49	96,34	67,50	63,57	75,43	101,41	122,39	145,47	195,18	132,86