

GUILHERME DA SILVA RICARDO

**IMPACTO DE CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO REGIME HÍDRICO
DA BACIA HIDROGRÁFICA PASSO MAROMBAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Área de Concentração Tecnologia e Modelagem Ambiental, da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), como requisito parcial para obtenção de grau de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientação: Prof. Dr. Sílvio Luís Rafaeli Neto.

Coorientação: Prof^a. Dr^a. Cláudia Guimarães C. Campos

**LAGES
2018**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UDESC, com os dados fornecidos pelo autor.**

Ricardo, Guilherme da Silva

Impacto de cenários de mudanças climáticas no regime hídrico
da bacia hidrográfica Passo Marombas / Guilherme da Silva
Ricardo. -- 2018.

127 p.

Orientador: Sílvio Luís Rafaeli Neto

Coorientadora: Cláudia Guimarães Camargo Campos

Dissertação (mestrado) - Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de
Pós-Graduação , Lages, 2018.

1. Recursos hídricos. 2. Modelagem hidrológica. 3. Projeções
hidrológicas. 4. Disponibilidade hídrica. I. Neto, Sílvio Luís Rafaeli
II. Guimarães Camargo Campos, Cláudia. III. Universidade do
Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias,
Programa de Pós-Graduação . IV. Titulo.

GUILHERME DA SILVA RICARDO

**IMPACTO DE CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA HIDROLOGIA
DA BACIA HIDROGRÁFICA PASSO MAROMBA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Área de Concentração Tecnologia e Modelagem Ambiental, da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), como requisito parcial para obtenção de grau de Mestre em Ciências Ambientais.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Sílvio Luís Rafaeli Neto
Orientador

**Universidade do Estado de Santa Catarina
(UDESC)**

Prof. Dr^a. Cláudia Guimarães C. Campos
Coorientadora

**Universidade do Estado de Santa Catarina
(UDESC)**





Prof. Dr. Adilson Pinheiro
Avaliador Externo
**Fundação Universidade Regional de
Blumenau
(FURB)**

Prof. Dr. Celso Lopes de Albuquerque Jr
Avaliador Externo
**Universidade do Sul de Santa Catarina
(UNISUL)**

Lages, 05 de dezembro de 2018.

Dedico este trabalho aos meus pais Rita de Cássia da Silva Ricardo e Antônio Rebelo Ricardo, e a minha irmã Jéssica da Silva Ricardo.

AGRADECIMENTOS

Especialmente aos meus pais Antônio Rebelo Ricardo e Rita de Cássia da Silva Ricardo, e a minha irmã Jéssica da Silva Ricardo pela estrutura familiar sólida e pela cooperação que temos.

Ao meu orientador e amigo Professor Sílvio Luís Rafaeli Neto, pela confiança, incentivo e pelos ensinamentos concedidos em sala de aula e no âmbito do laboratório de hidrologia, desde a iniciação científica até a pós-graduação.

Aos amigos e colegas de pesquisa do Laboratório de Hidrologia do CAV/UDESC pelo trabalho em equipe, troca de conhecimentos, e apoio nas atividades desenvolvidas.

Às instituições Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), Agência Nacional das Águas (ANA) e Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável do Estado de Santa Catarina (SDS/SC) pelos dados utilizados nesta dissertação.

À Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, pelas oportunidades criadas a tantos jovens estudantes que buscam aperfeiçoar seus conhecimentos e construir uma carreira profissional e acadêmica.

À professora Cláudia Guimarães Camargo Campos pela coorientação e disponibilização de dados para uso nesta dissertação.

Aos bolsistas Laís Sartori e Bruno Schina pela dedicação e contribuição no desenvolvimento de etapas bases necessárias a elaboração desta dissertação.

A todos que, de alguma forma contribuíram para a realização desta dissertação de mestrado, que representa importante conquista acadêmica, profissional e pessoal.

Muito obrigado!

O pessimista queixa-se do vento, o otimista
espera que ele mude e o realista ajusta as velas.
(Willian George Ward)

RESUMO

RICARDO, Guilherme da Silva. Impacto de cenários de mudanças climáticas no regime hídrico da bacia hidrográfica passo marombas. 2018. 128 p. Dissertação (Mestrado)-Universidade do Estado de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Lages, 2018.

Os impactos futuro das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos no nível de bacia hidrográfica deverão variar em frequência e magnitude. Processos econômicos e sociais que utilizam água deverão se adaptar as mudanças futuras no comportamento hidrológico dos sistemas geográficos onde estão inseridos. O nível de adaptação da sociedade e a magnitude com que os recursos hídricos serão impactados, dependerá dos possíveis cenários de mudanças climáticas no futuro. O objetivo deste trabalho foi de avaliar os impactos das mudanças climáticas no regime hídrico da bacia hidrográfica Passo Marombas (BHPM), para os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 (intermediário) e RCP 8.5 (pessimista) publicados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Para isso as projeções climáticas geradas pelo modelo climático regionalizado ETA-HadGEM2-ES para os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5, foram aplicados ao modelo hidrológico HEC-HMS. As evidências dos impactos das mudanças climáticas no regime hídrico da BHPM foram constatadas a partir da comparação entre as vazões de referência máximas, médias e mínimas simuladas para os períodos futuros, que, correspondem aos futuros centrados em 2030, 2050, 2070 e 2090, e as mesmas vazões registradas pela estação fluviométrica Passo Marombas no período entre 1977 e 1990 denominado de período base. As simulações hidrológicas para o período futuro entre 2020 e 2099 (longo prazo) indicaram um aumento geral na vazão média de longo termo (QMLT) de 17,5% e 22,9% para os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente, quando comparadas a QMLT de 92,5 m³/s registrada no período base. Na situação mais crítica do cenário RCP 8.5 haverá uma redução percentual de 39,0% e 20,5% nas vazões referência Q₉₈ e Q₉₅ para o período de 2020 a 2039, seguida por redução de 39,9% e 13,4% para o período de 2040 a 2059. Para o cenário climático RCP 4.5 haverá aumento nas vazões de referência, mais discreto para a Q₉₈ em relação a Q₉₅ e Q₉₀, que apresentam incrementos acumulados de 39,0% e 44,6% no futuro centrado em 2070, em relação ao período base. A variação nas vazões simuladas deverá refletir no saldo hídrico da BHPM. O máximo excesso e déficit hídrico do período base de 525,8 mm e -581,6 mm registrados nos anos de 1982 e 1983, respectivamente, serão superados no futuro. De acordo com as simulações para o cenário RCP 8.5 no ano de 2097 o excesso hídrico será de 1114,8 mm seguido pelo déficit hídrico de -1053,6 em 2098. Os resultados demonstraram que os impactos das mudanças climáticas na hidrologia da BHPM serão observados no aumento da amplitude das vazões de referência e no saldo hídrico. Estas alterações confirmam a desregulação futura na hidrologia da bacia hidrográfica. As simulações da hidrologia futura são relevantes para a tomada de decisão no contexto do planejamento e implementação antecipada de ações em médio e longo prazo, com objetivo de reduzir os impactos futuros das mudanças climáticas nos recursos hídricos da BHPM.

Palavras-chave: Recursos hídricos. Modelagem hidrológica. Projeções hidrológicas, Disponibilidade hídrica.

ABSTRACT

RICARDO, Guilherme da Silva. **Impact of climate change scenarios on the water regime of the Marumbas watershed.** 2018. 128 p. Dissertation (Master)-University of the State of Santa Catarina, Postgraduate Program in Environmental Sciences, Lages, 2018.

The future impacts of climate change on water resources in the river basin level will be different in frequency and magnitude. Economic and social processes that need water must adapt to future changes in the hydrological situation of the geographic systems where they are inserted. The level of adaptation of society and the magnitude with which water resources will be impacted depends on the scenarios of climate change in the future. The objective of this study was to evaluate the impacts of climate change on the water regime of the Passo Marombas basin (BHPM), for the climate change scenarios RCP 4.5 (intermediate) and RCP 8.5 (pessimistic) published by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Then, the climate projections generated by the regionalized climate model ETA-HadGEM2-ES for the climate change scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5 were applied to the HEC-HMS hydrological model. Evidence of the effect of climate change on BHPM hydrology was found by comparing the simulated maximum, mean and minimum reference flows for the future periods, which correspond to the futures centered on 2030, 2050, 2070 and 2090, and the same flow rates recorded by the Passo Marombas fluvimetric station in the period between 1977 and 1990 called the base period. The hydrological simulations for the future period between 2020 and 2099 (long term) indicated a general increase in average long-term flow (Q_{MLT}) of 17.5% and 22.9% for the climate change scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5, respectively, when compared to Q_{MLT} of 92.5 m^3/s recorded in the base period. In the most critical situation of the RCP 8.5 scenario there will be a 39.0% and 20.5% reduction in the reference flows Q_{98} and Q_{95} for the period from 2020 to 2039, followed by a reduction of 39.9% and 13.4% for the period from 2040 to 2059. For the climate scenario RCP 4.5 there will be an increase in reference flows, more discrete for Q_{98} than Q_{95} and Q_{90} , which present cumulative increases of 39.0% and 44.6% in the future centered in 2070, in relation to the base period. The variation in simulations flows should reflect in the BHPM water balance. The maximum excess and water deficit of the base period of 525.8 mm and -581.6 mm recorded in 1982 and 1983, respectively, will be exceeded in the future. According to the simulations for scenario RCP 8.5, in the year 2097 the water excess will be 1114.8 mm followed by the water deficit of -1053.6 in 2098. The results showed that the impacts of climate change on hydrology of the BHPM will be observed in the increase of the reference flow amplitude and in the water balance. These changes confirm the future deregulation in the hydrology of the river basin. Future hydrology simulations are relevant for decision-making in the context of the medium-term and long-term planning and implementation of actions to reduce the future impacts of climate change on BHPM's water resources.

Keywords: Water resources. Hydrological modeling. Hydrological projections, Water availability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da representação de componentes do sistema climático em modelos numéricos.....	34
Figura 2 - Histórico e cenários de emissão de Gases de Efeito Estufa – GEE para os Caminhos Representativos de Concentrações – RCPs	39
Figura 3 - Esquema simplificado da associação de modelos hidrológicos e modelos climáticos.....	40
Figura 4 - Fluxograma geral da metodologia utilizada para avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos da BHPM	45
Figura 5 - Mapa de situação da BHPM em relação as bacias hidrográficas dos rios Canoas e Uruguai e Modelo Digital de Terreno e Hidrografia principal da BHPM..	46
Figura 6 - Localização da BHPM em relação as regiões hidrográficas do Estado de Santa Catarina.	47
Figura 7 - Espacialização das áreas dos municípios que estão contidas na bacia hidrográfica Passo Marombas.....	49
Figura 8 - Espacialização das declividades da bacia hidrográfica Passo Marombas.....	51
Figura 9 - Espacialização dos tipos de solo na bacia hidrográfica Passo Marombas.	52
Figura 10 - Espacialização dos subsistemas do sistema geográfico Passo Marombas como estrutura conceitual para modelagem hidrológica da BHPM.	54
Figura 11 - Espacialização estações pluviométricas utilizadas no estudo e suas respectivas áreas de influência conforme método dos polígonos de Thiessen.	56
Figura 12 - Espacialização das estações fluviométricas utilizadas no estudo e suas os subsistemas monitorados pelas estações fluviométricas.....	57
Figura 13 - Espacialização da grade de pontos onde foram gerados os dados de projeções climáticas do modelo climático ETA-HadGEM2-ES para a área BHPM.	58
Figura 14 - Fluxograma do processo de classificação supervisionada de imagens de satélite LANDSAT 8 utilizadas para quantificação das classes de uso da terra na BHPM.	62
Figura 15 - Esquema conceitual para aplicação do método SMA de modelagemhidrológica de séries contínuas em associação com o método <i>Linear Reservoir</i>	71
Figura 16 - Esquema conceitual para aplicação do método <i>Linear Reservoir</i> de modelagem hidrológica de séries contínuas em associação com o método SMA com destaque para os processos hidrológicos no interior do solo.	74
Figura 17 - Fluxograma conceitual calibração e validação de um modelo hidrológico....	77
Figura 18 - Fluxograma do processo de validação dos dados gerados pelo modelo climático ETA-HadGEM2-ES.....	82
Figura 19 - Esquema conceitual sobre a comparação dos cenários hidrológicos simulados em relação a condição hidrológica da bacia no período base.	83
Figura 20 - Uso e ocupação da terra na BHPM para o ano de 1986 [A].....	89
Figura 21 - Uso e ocupação da terra na BHPM para o ano de 2002 [B] e 2017 [C].....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados utilizados na metodologia do estudo por etapas e períodos.....	59
Tabela 2 - Classificação dos índices de qualidade e desempenho do modelo hidrológico utilizados para aferir a representatividade do modelo hidrológico após a sua calibração e validação.....	80
Tabela 3 - Parâmetros morfométricos e da rede de drenagem dos subsistemas W01 a W10 da BHPM.....	87
Tabela 4 - Parâmetros morfométricos e da rede de drenagem dos subsistemas W11 a W20 da BHPM.....	88
Tabela 5 - Evolução do uso e ocupação da terra na BHPM entre os anos 1986, 2002 e 2017.....	89
Tabela 6 - Média da Chuva total mensal no período da normal climatológica, de 1961 a 1990, para as estações pluviométricas utilizadas no estudo e seus os pontos equivalentes da malha de pontos com dados de projeção do modelo climático ETA-HadGEM2-ES.....	92
Tabela 7 - Fatores de correção utilizados para remoção do viés das séries de dados projetados pelo modelo ETA-HadGEM2-ES	93
Tabela 8 - Parâmetros do método de SMA e seus respectivos valores otimizados pelo modelo HEC-HMS durante o processo de calibração para os subsistemas W01 a W10.....	97
Tabela 9 - Parâmetros do método de SMA e seus respectivos valores otimizados pelo modelo HEC-HMS durante o processo de calibração para os subsistemas W11 a W20.....	97
Tabela 10 - Valores obtidos para os indicadores de desempenho do modelo nas etapas de modelagem.....	99
Tabela 11 - Vazão de referência no período base (1977-1990) e no período futuro (2020-2099) e suas respectivas porcentagens de alteração.....	107
Tabela 12 - Vazões de referência e vazão média de longo termo no período base e futuros centrados em 2030, 2050, 2070, 2090 para o cenário RCP 4.5 e porcentagem de alteração das vazões nos futuros centrados em relação ao período base.	109
Tabela 13 - Vazões de referência e vazão média de longo termo no período base e futuros centrados em 2030, 2050, 2070, 2090 para o cenário RCP 8.5 e porcentagem de alteração das vazões nos futuros centrados em relação ao período base.	112

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Dados normais de temperatura e chuva para a região de estudo segundo Altas Climático da Região Sul do Brasil – EMBRAPA (2012).....	48
Gráfico 2 - Saldo hídrico e vazão média de longo período para o período base 1977 a 1990, período utilizado na calibração do modelo hidrológico.....	63
Gráfico 3 - Média da Chuva total mensal no período da normal climatológica, de 1961 a 1990, para as estações pluviométricas utilizadas no estudo.....	91
Gráfico 4 - Média da Chuva total mensal no período da normal climatológica, de 1961 a 1990, para os pontos da malha de pontos com dados de projeção do modelo climático ETA-HadGEM2-ES equivalentes as estações pluviométricas utilizadas no estudo.....	92
Gráfico 5 - Média da Chuva total mensal da série de dados projetados pelo modelo ETA-HadGEM2-ES no periodo de 2007 a 2099 para o cenário de mudanças climáticas RCP 4.5 sem viés corrigido	94
Gráfico 6 - Média da Chuva total mensal da série de dados projetados pelo modelo ETA-HadGEM2-ES no periodo de 2007 a 2099 para o cenário de mudanças climáticas RCP 8.5 sem viés corrigido	94
Gráfico 7 - Média da Chuva total mensal da série de dados projetados pelo modelo ETA-HadGEM2-ES no periodo de 2007 a 2099 para o cenário de mudanças climáticas RCP 4.5 com viés corrigido	95
Gráfico 8 - Média da Chuva total mensal da série de dados projetados pelo modelo ETA-HadGEM2-ES no periodo de 2007 a 2099 para o cenário de mudanças climáticas RCP 8.5 com viés corrigido	95
Gráfico 9 - Hidrogramas em escala mensal simulado e observado no período de calibração 1977-1990.	100
Gráfico 10 -Hidrogramas em escala mensal simulado e observado no período de validação 1992-1997.	100
Gráfico 11 -Dispersão entre as vazões simuladas e observadas para o período de calibração do modelo hidrológico HEC-HMS.	101
Gráfico 12 -Dispersão entre as vazões simuladas e observadas para o período de validação do modelo hidrológico HEC-HMS.	101
Gráfico 13 -Erro percentual médio mensal nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 em comparação com os dados observados no mesmo período.	102
Gráfico 14 -Médias mensais das vazões observadas e simuladas para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 para o período entre 2007 a 2016.	103
Gráfico 15 -Boxplot das vazões médias mensais do período base e dos cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5.....	105
Gráfico 16 -Comparação entre as vazões médias mensais no período base, RCP 4.5 e RCP 8.5.....	106
Gráfico 17 -Comparação das curvas de permanência com as vazões de referência do período base e período futuro (2020-2099) para os cenários de mudanças climático RCP 4.5 e RCP 8.5.....	108
Gráfico 18 -Comparação das curvas de permanência em escala logarítmica com as vazões de referência do período base e período futuro (2020-2099) para os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5.....	108
Gráfico 19 -Comparação entre as curvas de permanência do período base e períodos dos futuros centrados 2030, 2050, 2070 e 2090 para o cenário RCP 4.5.....	110

Gráfico 20 -Comparação entre as curvas de permanência em escala logarítmica do período base e períodos dos futuros centrados 2030, 2050, 2070 e 2090 para o cenário RCP 4.5.....	110
Gráfico 21 -Comparação entre as curvas de permanência do período base e períodos dos futuros centrados 2030, 2050, 2070 e 2090 para o cenário RCP 8.5.....	112
Gráfico 22 -Comparação entre as curvas de permanência em escala logarítmica do período base e períodos dos futuros centrados 2030, 2050, 2070 e 2090 para o cenário RCP 8.5.....	113
Gráfico 23 -Evolução da vazão de referencia Q ₅ (a) e Q ₁₀ (b) nos futuros centrados em 2030, 2050, 2070 e 2090 para o período base e cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5.....	114
Gráfico 24 -Evolução da vazão de referencia Q ₅₀ (a) e Q _{MLT} (b) nos futuros centrados em 2030, 2050, 2070 e 2090 para o período base e cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5.....	115
Gráfico 25 -Evolução da vazão de referencia Q ₉₅ (a) e Q ₉₈ (b) nos futuros centrados em 2030, 2050, 2070 e 2090 para o período base e cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5.....	116
Gráfico 26 -Saldo hídrico no sistema bacia hidrográfica Passo Marombas nos futuros em 2030 (a) e 2050 (b) considerando a chuva e a vazão e evapotranspiração como a entrada e saídas do sistema.....	118
Gráfico 27 -Saldo hídrico no sistema bacia hidrográfica Passo Marombas nos futuros em 2070 (a) e 2090 (b) considerando a chuva e a vazão e evapotranspiração como a entrada e saídas do sistema.....	119

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Dados dos cenários de mudanças climáticas RCP's publicados no 5º Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC.....	38
Quadro 2 - Municípios da bacia hidrográfica Passo Marombas e suas respectivas áreas totais dentro da bacia e área relativa	49
Quadro 3 - Indicadores econômicos, sociais e ambientais para os municípios da BHPM.	50
Quadro 4 - Descrição dos grupos hidrológicos do solo.....	52
Quadro 5 - Métodos de simulação dos processos hidrológicos incluídos no modelo HEC-HMS.	67
Quadro 6 - Principais parâmetros exigidos para cada método de simulação de processos hidrológicos.....	68
Quadro 7 - Armazenamento de água pela interceptação da precipitação para diferentes tipos de vegetação superficial.	69
Quadro 8 - Armazenamento de água nas depressões da superfície do solo para diferentes declividades e cobertura do terreno.	70
Quadro 9 - Parâmetros necessários a aplicação do método SMA e sua descrição.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas
BH	Balanço Hídrico
BHPM	Bacia Hidrográfica Passo Marombas
CN	<i>Curve Number</i>
CAV	Centro de Ciências Agroveterinárias
CIRAM	Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina
ETP	Evapotranspiração
GCM	Modelo Climático Global
GEE	Gases do Efeito Estufa
GIS	Geographic Information System
GeoHMS	<i>Geospatial Hydrologic Modeling System</i>
HEC	<i>Hydrologic Engineering Center</i>
HMS	<i>Hydrologic Modeling System</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
INCT	Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia
MDT	Modelo Digital de Terreno
NS	Coeficiente de Nash-Sutcliffe
PBMC	Painel Brasileiro sobre Mudanças Climáticas
PBIAS	Percentual de Tendência
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
Q	Vazão
Q _{med}	Vazão média
Q _{MLT}	Vazão média de longo termo ou longo período
Q _{obs}	Vazão observada
Q _{sim}	Vazão simulada
Q _{med_{obs}}	Vazão média observada
Q _{med_{sim}}	Vazão média simulada
R ²	Coeficiente de Determinação
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i>
RCM	Modelo Climático Regional
RMSE	Raiz do Erro Médio Quadrático
RSR	Proporção da Raiz do Erro Médio Quadrático para o desvio padrão dos dados medidos
SC	Santa Catarina
SDS	Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável
SRES	<i>Spatial Report on Emissions Scenarios</i>
SMA	<i>Soil Moisture Accounting</i>
UDESC	Universidade do Estado de Santa Catarina
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1 OBJETIVO GERAL	29
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	29
2 REFERENCIAL TEÓRICO	31
2.1 A ERA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	31
2.2 ASPECTOS GERAIS DOS MODELOS CLIMÁTICOS E PROJEÇÕES CLIMÁTICAS.....	34
2.3 CENÁRIOS FUTUROS DE EMISSÃO DE GEE	36
2.4 ASPECTOS GERAIS DOS MODELOS HIDROLÓGICOS	39
2.5 INCERTEZAS ASSOCIADAS A MODELOS CLIMÁTICOS E MODELOS HIDROLÓGICOS.....	40
2.6 IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS RECURSOS HÍDRICOS	41
3 MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO	46
3.1.1 Região hidrográfica	47
3.1.2 Clima	48
3.1.3 Municípios da bacia.....	49
3.1.4 Aspectos econômicos e sociais	50
3.1.5 Declividade e tipo de solo	51
3.2 DISCRETIZAÇÃO DO SISTEMA EM SUBSISTEMAS PARA MODELAGEM	53
3.3 SÉRIES DE DADOS HISTÓRICOS E DADOS ESPACIAIS.....	55
3.3.1 Escala e resolução de trabalho dos dados	55
3.3.2 Dados utilizados	56
3.4 USO E OCUPAÇÃO DA TERRA	61
3.5 SALDO HIDRICO NO PERÍODO BASE	62
3.6 MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS	64
3.6.1 Modelo conceitual para modelagem hidrológica.....	65
3.6.2 Módulos do modelo hidrológico HEC-HMS e processos hidrológicos modelados	66
3.6.3 Métodos de cálculo dos processos hidrológicos simulados pelo modelo.....	67
3.6.4 Descrição dos métodos de cálculo utilizados e seus parâmetros	68
3.6.4.1 Canopy – Simple Canopy	68
3.6.4.2 Surface – Simple Surface	69
3.6.4.3 Loss – Soil Moisture Accounting (SMA)	70
3.6.4.4 Transform – Clark Unit Hydrograph	73
3.6.4.5 Linear Reservoir.....	74
3.6.4.6 Routing – Muskingum Cunge	75
3.6.5 Calibração e validação do modelo HEC HMS.....	76
3.6.6 Indicadores de desempenho do modelo hidrológico	78
3.7 CORREÇÃO VIÉS DAS SÉRIES DE DADOS PROJETADAS PELO MODELO CLIMÁTICO ETA-HADGEM2-ES	80
3.8 VALIDAÇÃO DO MODELO CLIMÁTICO ETA-HADGEM2-ES	81
3.9 AVALIAÇÃO DA HIDROLÓGICA FUTURA DA BACIA HIDROGRÁFICA PASSO MAROMBAS PARA OS CENÁRIOS DE PROJEÇÃO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS	82
3.9.1 Vazões de referência e vazão média de longo termo analisadas	83
3.9.2 Balanço hídrico.....	84
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	87
4.1 CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS E DA REDE DE DRENAGEM DOS SUBSISTEMAS DA BHPM.....	87
4.2 EVOLUÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA.....	88
4.3 ANÁLISE DAS SÉRIES DE DADOS PROJETADOS PELO MODELO CLIMÁTICO	91
4.3.1 Diferença entre as séries de dados projetados pelo modelo ETA-HadGEM2-ES e observadas nas estações pluviométricas utilizadas no estudo	91

4.3.2 Fatores de correção utilizados para correção do viés das séries de dados projetados pelo modelo ETA-HadGEM2-ES	92
4.3.3 Séries de dados projetados pelo modelo ETA-HadGEM2-ES	93
4.4 ANÁLISE DO PRINCIPAL MÉTODO DE CALCULO DOS PROCESSOS HIDROLÓGICOS.....	96
4.4.1 Método soil moisture accounting (SMA)	96
4.5 DESEMPENHO DO MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS	99
4.6 ANÁLISE DA VALIDAÇÃO DO MODELO CLIMÁTICO ETA-HADGEM2-ES NO PERÍODO DE 2007 A 2016 ...	102
4.7 ANÁLISE DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA HIDROLOGIA DA BACIA HIDROGRÁFICA PASSO MAROMBAS	104
4.7.1 Parte 1: Análise das vazões projetadas para o período futuro 2020 a 2099.....	104
4.7.2 Parte 2: Análise das vazões projetadas os futuros centrados	109
4.7.2.1 <i>Análise das vazões projetadas para o cenário de mudanças climáticas RCP 4.5</i>	109
4.7.2.2 <i>Análise das vazões projetadas para o cenário de mudanças climáticas RCP 8.5</i>	111
4.7.2.3 <i>Analise das diferenças nas vazões entre o período base e os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.</i>	113
4.7.3 Parte 3: Análise do Saldo hídrico	117
5 CONCLUSÃO.....	120
6 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	122

1 INTRODUÇÃO

Os eventos climáticos extremos de baixa probabilidade e altas consequências, em especial aqueles relacionados à água, deve ser a problemática do século XXI. Secas e chuvas em excesso causadas pela desregulação do clima e do ciclo hidrológico resultantes de mudanças climáticas devem variar em frequência e magnitude, por influência da combinação de temperatura e precipitação (MAZURCZYK et al., 2018), e com isso afetar pessoas, cidades, países e continentes ao redor do mundo.

Ao considerar que a água é um recurso natural indispensável à manutenção da vida e dos ecossistemas terrestres, podemos inferir que o bem-estar das pessoas depende da capacidade do homem de garantir a disponibilidade e distribuição dos recursos hídricos frente as mudanças climáticas, em quantidade e qualidade adequadas às demandas das atuais e das futuras gerações.

Estudos e discussões no meio científico e político sobre as mudanças climáticas e seus efeitos sobre o clima, tem convergido para a necessidade de antecipar medidas de controle e ações estratégicas, que, deverão ser implementadas de forma articulada e em nível global com objetivo de reduzir os impactos das mudanças climáticas sobre o meio ambiente e a sociedade de forma geral.

As ações do homem para impedir a evolução dos impactos das mudanças climáticas sobre o meio ambiente estão limitadas a parcela dos agentes que contribuem para as mudanças climáticas em que o homem tem participação. Em termos práticos estas ações correspondem a redução das emissões de Gases do Efeito Estufa – GEE, provenientes principalmente da economia e matriz energética baseadas na queima de combustíveis fósseis. A outra parcela de agentes causadores das mudanças climáticas está vinculada a processos naturais, em que o homem ainda não possui instrumentos ou métodos para influenciar.

Berry e Chorley, (2013) explicam que a variabilidade do clima resultante de processos naturais é provocada parcialmente por forçantes externas como a variação na intensidade de radiação solar que atinge a terra, e parcialmente por forçantes internas como a erupção de vulcões.

A contribuição de origem antrópica é representada pela emissão de poluentes atmosféricos, alterações da superfície terrestre como o desmatamento, pelo aumento populacional e consumo de recursos naturais, desenvolvimento econômico a partir de fontes de energia não renováveis e pelo desmatamento para ampliar a agricultura.

De acordo com Wada et al., (2016) parte destes agentes como aumento da população e áreas agrícolas, elevaram a demanda mundial por água em seis vezes nos últimos 100 anos. A expectativa de pesquisadores é de que a demanda por água continue aumentando à medida que a população global cresça e a economia se desenvolva.

Compatibilizar a crescente demanda global por recursos hídricos com a disponibilidade hídrica futura, frente às mudanças climáticas e o aquecimento global, representa um desafio a ser buscado por todos. O investimento de recursos financeiros na ciência a partir da criação de instituições de pesquisa e incentivo das existentes, tem sido uma estratégia adotada por muitos países para gerar conhecimento e criar soluções inovadoras para enfrentar a problemática das mudanças climáticas.

Em nível global, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) criado em 1988, é a principal entidade relacionada as mudanças climáticas. No Brasil o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas (INCT para Mudanças Climáticas), criado em 2008 pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), é composto por uma rede de instituições e universidades brasileiras e estrangeiras que atuam em cooperação a partir de grupos de pesquisa.

O INCT para Mudanças Climáticas representa a força motriz da pesquisa sobre mudanças climáticas no Brasil. Espelhado no IPCC o INCT para Mudanças Climáticas está organizado em três eixos científicos principais: (i) base científica das mudanças ambientais globais; (ii) impactos-adaptação-vulnerabilidade; e (iii) mitigação e desenvolvimento de produtos tecnológicos.

Nesse contexto, este estudo está alinhado com os eixos científicos principais i e ii definidos pelo IPCC e assimilado pelo INCT para Mudanças Climáticas, pois se propõe a avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos no nível de bacia hidrográfica, a partir do uso de tecnologias como a modelagem hidrológica computacional aplicada a dados de projeções climáticas, para cenários específicos de forçantes antrópicas que resultem em mudanças no clima.

As informações geradas por este estudo também contribuem para a produção de conhecimento a partir da base científica, e poderá ser utilizada para de forma antecipada justificar as ações de adaptação necessárias a redução dos impactos causados pelas mudanças climáticas sobre os recursos hídricos no nível de uma bacia hidrográfica.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os impactos de cenários de mudanças climáticas sobre o regime hídrico no nível de bacia hidrográfica.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) representar o ciclo hidrológico da área de estudo a partir da aplicação da técnica de modelagem hidrológica;
- b) estruturar um modelo hidrológico a partir de uma estrutura conceitual para modelagem de unidades de resposta hidrológica a partir da discretização da bacia hidrográfica em subbacias e interbacias;
- c) aplicar os dados de cenários de projeções climáticas do modelo Eta-HadGEM2-ES ao modelo hidrológico para gerar séries futuras de vazão em seção fluviométrica de controle;
- d) avaliar os resultados do modelo hidrológico para cenários de projeção climática a partir das séries sintéticas de vazão;
- e) particionar o período de análise para avaliar o impacto das mudanças climáticas nas vazões de referência ao longo do tempo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico a seguir apresenta uma análise geral sobre estudos desenvolvidos acerca da temática mudanças climáticas e recursos hídricos e outros temas pertinentes. Os principais conceitos, instrumentos e métodos utilizados, além de resultados e conclusões obtidos por pesquisadores em estudos acerca do tema são registradas neste referencial. Dessa forma o leitor pode se situar em relação ao tema central desta dissertação, e com isso, compreender a necessidade e justificativa da sua elaboração.

2.1 A ERA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As mudanças climáticas evidenciaram a capacidade da civilização humana contemporânea de influenciar o meio ambiente em escala global (STEFFEN et al., 2011). A ideia de que o homem pode se tornar um agente de mudanças climáticas globais é justificada pelas atividades humanas exercerem potencial impacto sobre o meio ambiente. A partir disso, o conceito de uma nova era geológica denominada Antropoceno foi introduzida à comunidade científica no início do século XXI, com objetivo de destacar o potencial antrópico para a alteração da superfície do solo e atmosfera terrestre (CRUTZEN; STOERMER, 2000; CRUTZEN, 2002).

De acordo com Steffen et al., (2011) o período Antropoceno começou por volta de 1800, meio século após o início da revolução industrial e se consolidou no período de 1945 a 2000 conhecido como a Grande Aceleração Econômica. Alguns resultados deste período são a expansão da superfície terrestre utilizada para atividade humana intensa, passando de aproximadamente 10% para 30%, e o aumento exponencial da emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE), como o dióxido de carbono CO₂, metano CH₄ e o óxido nitroso N₂O (LAMBIN, E. F., GEIST, H. J., 2006).

O CO₂ é o principal GEE, sua concentração na atmosfera começou a ser medida com precisão e de forma contínua a partir de 1958, desde então apresentou aumento significativo passando de 315 partes por milhão (ppm) em 1958 a 364 ppm em 1997 (MACFARLING MEURE et al., 2006). Recentemente, um estudo publicado pelo grupo de pesquisadores do *Integrated Carbon Observation System (ICOS)*, revelou que a concentração de CO₂ na atmosfera teve um aumento exponencial de 277 ppm em 1750 para 402.8 ± 0.1 ppm em 2016 (QUÉRÉ, LE et al., 2018).

Nas últimas três décadas o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

(IPCC) tem alertado o mundo sobre a elevação da temperatura global em função da emissão de GEE. O 5º Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC concluiu que a temperatura média da terra aumentou em torno de 0,9 °C desde 1750, e prevê um cenário crítico com aumento de 4,8 °C até o fim do século XXI, caso as emissões de CO₂ seguirem as tendências observadas em escala global (IPCC, 2014).

Com o aumento da temperatura as áreas geladas do globo compostas por calotas polares, geleiras, lagos congelados e grandes áreas cobertas por neve e gelo, são diretamente afetadas. Denominadas de componente criosfera da terra, estas áreas têm sido amplamente utilizadas como indicadores dos impactos das mudanças climáticas. Recentemente as evidências do derretimento de geleiras e redução do tamanho das calotas polares na Antártica, são atribuídas à ampliação temporal da estação de derretimento resultante da desregulação térmica global (POELKING et al., 2014).

Em áreas continentais o derretimento de volumes significativos de água em estado sólido impacta no aumento do escoamento superficial nos rios em um curto espaço de tempo, enquanto no período de tempo mais longo, na escala de décadas a século, o escoamento superficial proveniente de água de desgelo das geleiras tenderá a uma diminuição drástica, o que reduz a disponibilidade hídrica (ALAVIAN et al., 2009).

As áreas que não dependem de água de desgelo para manutenção do escoamento superficial também são afetadas pelo aquecimento global. Schär et al., (2004) atribuem às mudanças climáticas, as ondas de calor no continente europeu no início dos anos 2000, que acompanhadas de déficits hídricos anuais na ordem de 30% (CIAIS et al., 2005), reduziram a vazão de rios a níveis críticos, o que impactou diretamente a econômica a partir da interrupção da navegação e irrigação de áreas agrícolas produtivas (BENISTON e DIAZ, 2004; SCHRÖTER, ZEBISCH e GROTHMANN, 2005).

Os impactos das mudanças climáticas também são observados na elevação do nível médio dos mares, resultado da expansão térmica (MCKAY, OVERPECK e OTTO-BLIESNER, 2011) e pelo descongelamento de calotas polares. As medições *in situ* realizadas por medidores de maré operantes desde 1900 indicam que o nível médio dos mares aumentou a uma taxa de aproximadamente 1,7 mm/ano (CHURCH e WHITE, 2011). A partir de 1990 o uso de dados de altimetria gerados por satélite, atualizou esta taxa para aproximadamente 3,2 mm/ano (ABLAIN et al., 2009; CHURCH e WHITE, 2011) o que no comparativo resultou em um aumento de 88,2% da taxa de elevação do nível médio dos mares.

As investigações e análises dos dados gerados no passado recente, sob a ótica das

mudanças climáticas, apontam que as alterações fisiográficas nas componentes atmosfera, biosfera, criossfera, hidrosfera e litosfera, com destaque para as quatro primeiras, resulta do aquecimento global antropogênico, que, já se encontra em curso e com alto potencial de irreversibilidade (PATTNER et al., 2008; FROLICHER e JOOS, 2010).

Solomon et al., (2009), sugere que a problemática do aquecimento global não deve ser pautada apenas na magnitude dos impactos, mas também no seu caráter de irreversibilidade, pelo menos até o fim do século XXI.

Apesar de algumas opiniões divergentes, a hipótese de que as mudanças climáticas são resultado das ações antropogênicas, e que o fenômeno do aquecimento global é a principal evidência das mudanças climáticas, é um consenso entre a comunidade científica mundial (ORESKES, 2005).

O aumento histórico nas emissões e concentração de GEE na atmosfera terrestre é a principal justificativa para o aquecimento global. Porém, a ciência explica que as mudanças climáticas não são resultado exclusivos da ação humana, processos de origem natural como erupções vulcânicas e mudanças nos ciclos de emissões de radiação solar pelo sol, são consideradas agentes de forçantes climáticas que induzem a desregulação do sistema climático terrestre, o que leva a um aumento da temperatura global.

Quantificar a parcela de contribuição dos agentes para mudança climática de origem antrópica tem sido o objetivo de estudos realizados por pesquisadores ao redor do mundo. Produzir resultados e conclusões confiáveis no sentido de provar que o ser humano tem participação e responsabilidade efetivas sobre as mudanças climáticas, é fundamental para equilibrar o ego de uma sociedade que usa os recursos naturais do planeta além da sua capacidade de suporte.

Na era das mudanças climáticas, o maior desafio da civilização é o de encontrar o equilíbrio na sua forma de usar os recursos naturais, para que num primeiro momento os impactos das mudanças climáticas sejam controlados, e no segundo momento reduzidos progressivamente ao longo tempo.

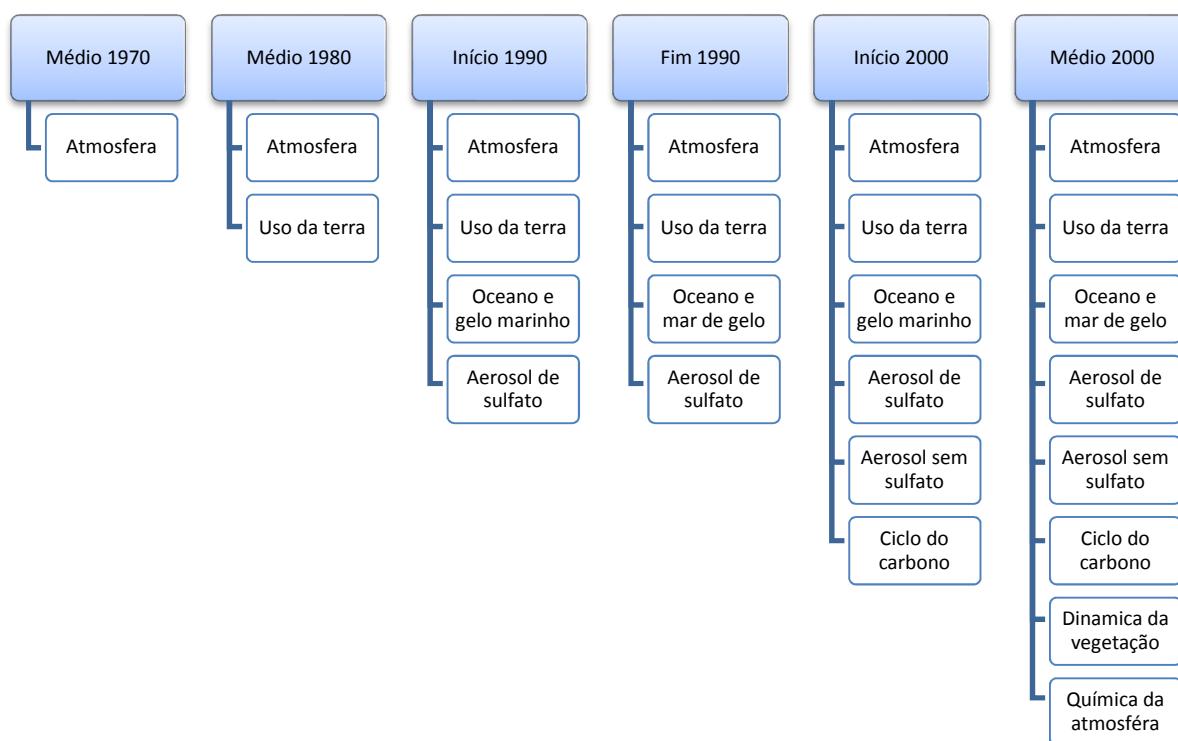
Tais avanços só poderão ser obtidos a partir de práticas econômicas sustentáveis baseadas na baixa emissão de GEE, em associação com a restauração em larga escala dos ecossistemas naturais degradados pelo homem ao longo de sua história, que exercem função primordial de capturar o CO₂ excessivo disponível na troposfera.

2.2 ASPECTOS GERAIS DOS MODELOS CLIMÁTICOS E PROJEÇÕES CLIMÁTICAS

Os estudos das mudanças climáticas a partir de modelos começaram a ser observados nos anos 1980. Um número reduzido de cientistas começou a produzir resultados a partir de seus próprios modelos cujo potencial estava limitado à capacidade de processamento dos computadores da época (SOCIETY, 2007).

Com o avanço tecnológico e do conhecimento sobre os elementos climáticos e da dinâmica da atmosfera, os modelos matemáticos numéricos evoluíram ao longo das últimas quatro décadas e se tornaram complexos ao simular condições de contorno para as componentes atmosfera, biosfera, criosfera e hidrosfera e seus respectivos processos. A evolução dos modelos climáticos no tempo pode ser observada na Figura 1.

Figura 1 - Evolução da representação de componentes do sistema climático em modelos numéricos.



Fonte: Adaptado de IPCC (2007).

Os modelos matemáticos numéricos que representam atmosfera, os oceanos e a superfície terrestre são conhecidos como Modelos de Circulação Geral, identificados pela

sigla em inglês (GCM). Os modelos climáticos estão fundamentados em princípios físicos para representar processos como as trocas de radiação e massa resultantes das interações do sistema climático global, em suas diferentes componentes (Barry e Chorley, 2013). A partir dos GCM's a ciência produziu resultados que são considerados as primeiras evidências das mudanças climáticas, posteriormente confirmadas por cientistas ao redor do mundo.

Os GMC's geram projeções climáticas para análise em escala global com resolução espacial simplificada geralmente igual ou superior a 100km, ou seja, a cada 100km² o modelo fornece um ponto de referência, o que forma uma grade com informações de variáveis climáticas como temperatura, radiação solar, precipitação, umidade relativa, entre outras variáveis distribuídas no tempo e no espaço. Isso permite ao usuário interpretar os dados e realizar análises do clima no sistema terrestre como um todo.

Os Modelos de Circulação Regional identificados pela sigla em inglês (RCM) geram projeções climáticas com maior detalhamento e são utilizados para análises regionais, esses modelos são uma alternativa aos GMC's, pois fornecem produtos com resolução espacial na faixa de 5 a 50km², o que aumenta a quantidade de informações geradas em função da densa malha de pontos no espaço. O refinamento da resolução espacial nos RCM's permitiu que informações locais como por exemplo a topografia, vegetação, áreas alagadas e costeiras, simplificadas nos GMC's, sejam consideradas como condições de contorno para geração das projeções climáticas.

Com isso, as informações obtidas como saídas do modelo climático regional, a partir da simulação de cenários de projeções climáticas, como por exemplo os cenários de emissão de Gases do Efeito Estufa – GEE, possuem maior representatividade em relação a área objeto de estudo para qual serão realizadas as análises da variabilidade no clima.

O aumento da resolução dos produtos da modelagem climática nos modelos RCM's, está baseada na técnica de *downscaling* de modelos GCM's (CHOU et al., 2014). As técnicas de *downscaling* são conceitualmente divididas em *dowscalling* estatístico e dinâmico e tem sido amplamente utilizada em trabalhos com a temática mudanças climáticas. Os autores, Hewitson (2001), Prudhomme et al., (2002) e Fowler et al., (2007), apresentam uma revisão técnica detalhada sobre *downscaling* em seus trabalhos.

No que tange aos modelos, eles são uma representação do mundo real. Beven (2011) destaca que os modelos climáticos são as principais ferramentas científicas para análise dos impactos das mudanças climáticas na terra. Os modelos são instrumentos para realizar projeções climáticas a partir de cenários específicos. No caso das mudanças

climáticas os cenários estão diretamente relacionados a emissão antropogênica de Gases do Efeito Estufa GEE (SAMPAIO e DIAS, 2014).

Projeções climáticas para regiões do globo terrestre, em diferentes escalas de detalhe, foram e são produzidas regularmente a partir de GMC's e RMC's para diferentes cenários de emissões de GEE.

No Brasil, projeções do clima para períodos do século XXI foram realizadas com objetivo de avaliar as variações climáticas nos diferentes biomas. De acordo com o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas – PBMC (2013), a região sul do Brasil será impactada pelas mudanças climáticas a partir do incremento de uma taxa entre 5 a 10% no volume total de chuva, além do aumento de até 1°C na temperatura média até o ano de 2040.

As projeções climáticas variam com a evolução dos cenários de emissões de GEE no tempo. No cenário mais grave ou pessimista, a temperatura média e volume total de chuva na região sul do Brasil projetadas para o período entre 2071 e 2100, poderão aumentar em até 3°C e 40%, respectivamente, em relação a sua condição de normalidade.

Em um nível mais regional, Lyra et al., (2017) avaliou as projeções climáticas com alta resolução para dois cenários futuros, um otimista e outro pessimista, para as principais metrópoles do sudeste do Brasil. Para o cenário pessimista, os resultados apontaram um incremento de 4°C e 8°C na temperatura média para os períodos de 2011-2040 e 2071-2100 respectivamente, além de uma redução significativa no volume total de chuva, principalmente para o período final do século XXI.

Ainda, de acordo com a autora, a cidade do Rio de Janeiro passará por uma redução de mais de 50% no volume anual de chuva, enquanto em São Paulo o impacto negativo ficará entre 40 e 50%.

2.3 CENÁRIOS FUTUROS DE EMISSÃO DE GEE

Um cenário é definido pela representação de uma situação futura, baseado em tendências ou pré-suposições de que um arranjo de situações que ao se desdobrar no tempo resulta em um cenário futuro.

Nos anos 2000 o IPCC divulgou projeções climáticas no 4º Relatório de Avaliação (AR4) a partir de cenários de emissão de GEE publicados no Relatório sobre Cenários de Emissão, em inglês *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES), que, representam potenciais descargas futuras para a atmosfera de substâncias que afetam o balanço de radiação da terra.

Os cenários foram divididos em famílias que representam padrões de desenvolvimento econômico e crescimento da população, desenvolvimento de tecnologias e outros fatores. As famílias são A1, A2, B1 e B2 onde ‘A’ e ‘B’ significam, respectivamente, baixo e alto comprometimento com o desenvolvimento sustentável, e ‘1’ e ‘2’ significam a integração ou fragmentação regional, respectivamente.

O cenário A1 representa um mundo integrado não sustentável, de rápido crescimento econômico, de populações a serem estabilizadas, de rápidas mudanças tecnológicas e de convergência entre regiões. Este cenário possui três variantes que assumem diferentes misturas de fontes de energia: (1) A1F1, no qual a ênfase tecnológica se dá por meio da intensificação do uso de combustíveis fósseis; (2) A1T, onde prevalecem as fontes energéticas não fósseis; e (3) A1B, onde há um equilíbrio entre todas as fontes (RASKIN et al., 2005; BARKER et al., 2007). A2 é um mundo muito heterogêneo, fragmentado e não sustentável. Registro de aumento significativo da população, as regiões e nações apresentam autossuficiência e preservação de identidades locais, associado a mudanças tecnológicas lentas.

O cenário B1 é um mundo com população estável com posterior declínio, integrado e sustentável que apresenta uma rápida mudança para uma economia de serviços e de tecnologias limpas, e a busca de soluções globais para problemas econômicos, sociais e ambientais. Por fim, B2 é um mundo onde a população aumenta continuamente, a uma taxa inferior ao A2. As regiões e nações buscam vários modelos de desenvolvimento com diversas iniciativas locais que balanceiam objetivos econômicos, sociais e ambientais para a sustentabilidade com foco em níveis locais e regionais (RASKIN et al., 2005).

Em 2013 o IPCC publicou o 5º Relatório de Avaliação (AR5) com os cenários utilizados nas pesquisas em mudanças climáticas. Os cenários foram estabelecidos para representar as forçantes radiativas futuras até o final do século XXI. As forçantes radiativas, expressas em W/m^2 (Watt por metro quadrado), que é uma unidade alternativa a unidade $^\circ\text{C}$ (graus célsius), representam uma forma de parametrizar a participação dos agentes climáticos para as mudanças climáticas, de origem natural ou antrópica, que emitam GEE e Aerossóis, e por consequência alteram o equilíbrio energético entre as entradas e saídas de energia do sistema atmosférico e terrestre.

De acordo com Foster et al., (2007) a forçante radiativa de um determinado agente climático é representada pela diferença entre a irradiância líquida na atmosfera no estado de referência, ou seja, sem a ação do agente perturbador, e do estado atual com a presença do agente emissor de GEE.

Os cenários foram denominados de Caminhos Representativos de Concentrações – RCP's, onde a palavra ‘representativos’ refere-se a um de muitos cenários possíveis, e a palavra ‘caminhos’, aos níveis de concentrações de interesse que não são apenas a concentração de longo prazo, mas a trajetória ao longo do tempo para alcançar tal resultado (MOSS et al., 2010).

Os RCP's publicados no AR5 são uma nova categoria de cenários, são cenários normativos que representam a evolução dos cenários exploratórios do AR4. A definição de cenários climáticos favorece a modelagem climática e a aplicação do resultado de cenários climáticos em pesquisas sobre impactos, adaptação e vulnerabilidade (MOSS et al., 2010).

Os cenários de mudanças climáticas RCP's são organizados em quatro caminhos de forçantes radiativas (Quadro 1) que estão vinculados a variáveis socioeconômicas e condições de desenvolvimento tecnológico sustentáveis ou não.

Quadro 1 - Dados dos cenários de mudanças climáticas RCP's publicados no 5º Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC.

Cenário	Forçante radiativa	Concentração (ppm)	Caminho	Modelo
RCP 8.5	> 8,5Wm ⁻² em 2100	> 1.370 CO ₂ equivalente em 2100	Aumento	MESSAGE
RCP 6.0	~ 6Wm ⁻² com estabilização após 2100	~ 850 CO ₂ equivalente com estabilização após 2100	Estabilização sem superação	AIM
RCP 4.5	~ 4.5Wm ⁻² com estabilização após 2100	~ 650 CO ₂ equivalente com estabilização após 2100	Estabilização sem superação	GCAM
RCP 2.6	Pico de ~ 3Wm ⁻² antes de 2100 e depois declínio	~ 490 CO ₂ equivalente antes de 2100 e depois declínio	Pico e declínio	IMAGE

Fonte: Adaptado de IPCC (2013).

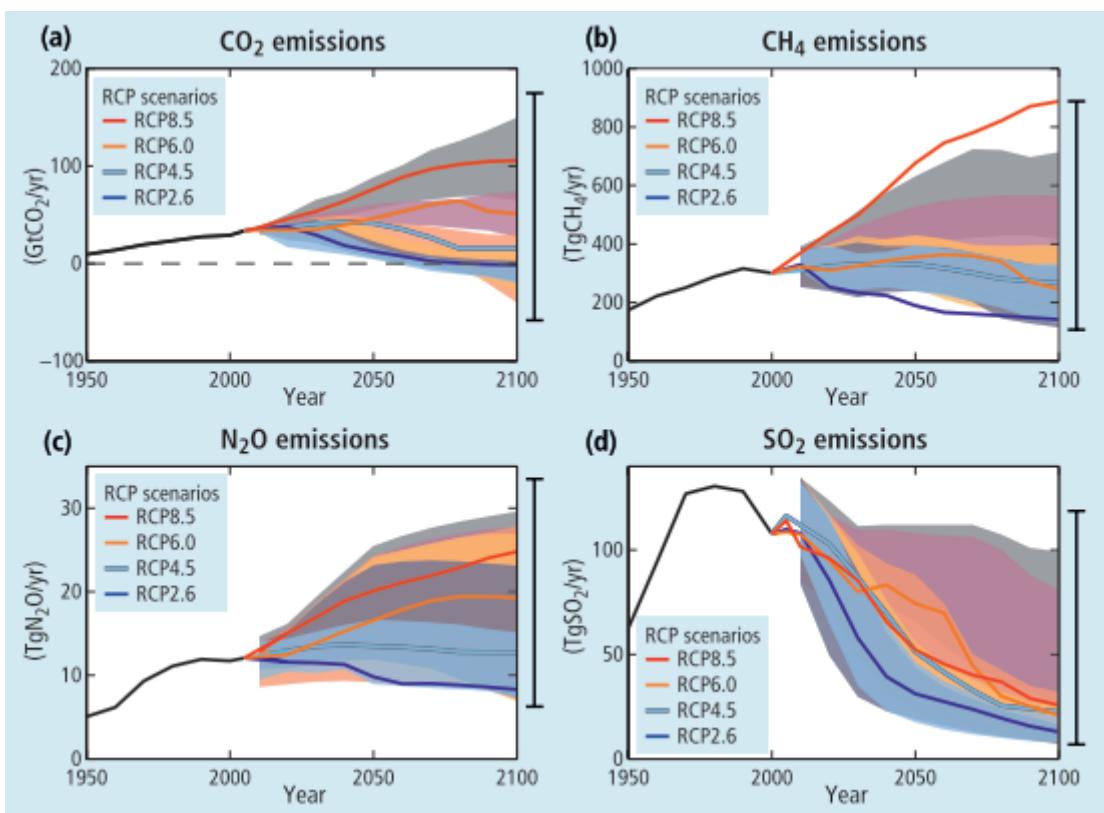
Os RCP's 4.5 e 6.0 representam cenários intermediários de forçantes radioativas, sua característica principal é a estabilização das emissões de GEE. Os RCP's 2.6 e 8.5 são opostos, o primeiro otimista em relação às emissões de GEE que deve ficar em patamares semelhantes aos atuais, portanto já é uma realidade. O cenário RCP 8.5 é o mais pessimista e está baseado em altas taxas de emissões de GEE.

A magnitude dos impactos ambientais em nível global dependerá do cenário que se concretizará ao longo do tempo. As quantidades de GEE, Gás Carbônico (CO₂) [a], Gás Metano (CH₄) [b], Óxido Nitroso (N₂O) [c] e Dióxido de Enxofre (SO₂) [d], projetados para o século XXI para cada cenário RCP, e seu histórico de emissão da segunda metade

do século XX são observados na Figura 2.

Para o cenário RCP 4.5 com forçante radiativa de $4,5 \text{ W/m}^2$, são estimados o aumento da temperatura média terrestre entre $1,1^\circ\text{C}$ e $2,6^\circ\text{C}$ e a elevação do nível médio do mar entre 32 e 63 centímetros. Ao considerar o cenário RCP 8.5 o incremento na temperatura média terrestre ficará entre $2,6^\circ\text{C}$ e $4,8^\circ\text{C}$ e a elevação do nível médio do mar entre 45 e 82 centímetros.

Figura 2 - Histórico e cenários de emissão de Gases de Efeito Estufa – GEE para os Caminhos Representativos de Concentrações – RCPs.



Fonte: Adaptado de IPCC (2014).

2.4 ASPECTOS GERAIS DOS MODELOS HIDROLÓGICOS

O modelo hidrológico pode ser considerado como um modelo ambiental, pois representa os processos de uma determinada realidade (STEYAERT, 1993). A escolha do modelo depende da disponibilidade de dados necessários para sua aplicação. Modelos hidrológicos de base física, distribuídos ou semi-distribuídos, conforme classificação resultante das discussões realizadas por Maidment (1993), Vertessy et al., (1993) e Tucci (1998), exigem quantidade extensa e detalhada de parâmetros para representar as condições

de contorno da área modelada e seus processos hidrológicos, de forma a garantir a fidelidade e qualidade na geração dos seus produtos (BEVEN, 1991).

Apesar dos desafios e complexidade, os modelos tem sido uma alternativa científica utilizada em larga escala para aferir os efeitos das mudanças climáticas sobre o meio ambiente. No que tange os recursos hídricos, a maioria dos modelos hidrológicos são utilizados em associação com os modelos climáticos, a partir do acoplamento fraco entre estes modelos (NETO; RODRIGUES, 2001). O acoplamento fraco significa que tanto o modelo climático quanto o modelo hidrológico não operam sobre a mesma base lógica. Um esquema simplificado da utilização de modelos climáticos e hidrológicos pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Esquema simplificado da associação de modelos hidrológicos e modelos climáticos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

A complexidade dos modelos e a manipulação de grande quantidade de dados espaciais e de séries históricas, além de possíveis erros sistemáticos na aplicação de técnicas e procedimentos para manipulação desses dados, geram fontes de incerteza em diferentes etapas do processo de modelagem climática e hidrológica.

Considerando que os produtos de saída da modelagem climática são utilizados como entrada para o modelo hidrológico, tais incertezas são transferidas entre os processos e acumuladas nele, o que pode levar a produtos inconsistentes e conclusões equivocadas.

2.5 INCERTEZAS ASSOCIADAS A MODELOS CLIMÁTICOS E MODELOS HIDROLÓGICOS

As incertezas associadas a modelos climáticos e modelos hidrológicos são consideradas como pontos a melhorar dentro do processo de aplicação de modelos em estudos diversos. Investigações realizadas por pesquisadores têm identificado as incertezas de cada etapa do processo de associação de modelos climáticos e hidrológicos.

Alguns estudos apontam que as incertezas são maiores na etapa que corresponde a modelagem climática, enquanto outros identificam que modelos hidrológicos possuem

incertezas relevantes e que devem ser controladas.

De acordo com Brigode et al., (2013) problemas na elaboração do modelo conceitual para modelagem hidrológica e na determinação de seus parâmetros são as principais incertezas da modelagem hidrológica.

Matott et al., (2009) e Ludwig et al., (2009) concordam com Brigode et al., (2013) em relação a determinação dos parâmetros morfológicos e dos processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica serem as principais fontes de incertezas dos modelos hidrológicos. Outro procedimento que gera incertezas na modelagem hidrológica está vinculado a calibração do modelo a partir de um conjunto parâmetros, pois em determinadas situações estes ou parte destes parâmetros não possuem significado físico, e, portanto, não representam os processos hidrológicos a serem simulados.

No caso dos modelos climáticos, os procedimentos como a remoção de viés das séries de dados das projeções dos modelos climáticos e o aumento da resolução pelas técnicas de *downscaling* são consideradas como as principais fontes de incertezas.

Teng et al., (2012) e Arnell (2011) avaliaram as incertezas decorrentes de GCM's em seus experimentos realizados com bacias hidrográficas da Austrália e Reino Unido respectivamente. Com base nos seus resultados, concluíram que as incertezas em relação as projeções climáticas, são consideravelmente maiores do que as incertezas do processo de parametrização do modelo hidrológico.

Por outro lado, um estudo com quatro GCM's e diferentes cenários de emissões associados a modelos chuva-vazão, avaliou as incertezas do processo de modelagem a partir das técnicas *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* e *Bayesian Model Averaging*. O estudo concluiu que as incertezas do modelo hidrológico são significativas e devem ser controladas e minimizadas (BASTOLA ET AL., 2011).

2.6 IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS RECURSOS HÍDRICOS

As mudanças climáticas são em grande parte representadas pela variação da distribuição espacial e temporal da precipitação e aumento das temperaturas. A combinação destes fatores impacta os recursos hídricos em sistemas geográficos como bacias hidrográficas, o que pode afetar os processos econômicos e sociais que dependem da água, como por exemplo a produção de alimentos, geração de energia, abastecimento público, lazer e outros.

A partir desta premissa, cientistas ao redor do mundo desenvolvem estudos

científicos a partir do uso de GCM's e RCM's em associação com modelos hidrológicos, com objetivo de quantificar o impacto futuro das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos. Um padrão metodológico tem sido observado nos estudos desenvolvidos para avaliar os impactos de mudanças climáticas em bacias hidrográficas. Mujumdar e Kumar (2012) descrevem este padrão como uma série de procedimentos que iniciam com a preparação de um modelo hidrológico que simule a hidrologia da área de estudo, normalmente representada pela bacia hidrográfica. Em seguida séries de dados de projeções climáticas realizadas com GMC's ou RMC's para diferentes cenários, são utilizadas como entrada do modelo hidrológico, sendo sua saída as séries de dados vazão simuladas para os períodos futuros. Este padrão tem sido utilizado em estudos para diferentes escalas.

Em escala global, a análise dos impactos das mudanças climáticas nas vazões apresentada por Milly, Dunne e Vecchia (2005), revelaram um aumento de 10 a 40% nas vazões da África equatorial oriental, na bacia do rio da Prata e nas altas latitudes da América do Norte e Eurásia. Por outro lado, o modelo utilizado no estudo projetou uma redução nas vazões do sul da África, sul da Europa, Oriente Médio e parte oeste da América do Norte, em cerca de 10 a 30%.

Marengo, (2008) avaliou as vazões futuras na América do Sul, na bacia do Prata, suas conclusões foram de aumento significativo nas vazões, na ordem de 20 a 40%, contrastando com uma redução prevista de -2 a -30% para a região norte e sudoeste do continente.

Análises regionais aplicadas para bacias hidrográficas também relevam impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos destas bacias. Perazzoli; Pinheiro; Kaufmann, (2013) realizaram uma análise regional da hidrologia de uma bacia próxima a BHPM e concluíram que entre o período futuro de 2071 e 2100 as vazões de referência Q_{90} , Q_{95} e Q_{98} , consideradas vazões mínimas, não serão impactadas. Entretanto, apesar das vazões mínimas não serem afetadas, o estudo sinalizou que as vazões médias mensais serão reduzidas em todos os meses do ano, com destaque para o mês de julho, que terá variação negativa de 72 e 69% para cenários de mudanças climáticas considerados pessimista e otimista respectivamente.

Natel (2017) avaliou os impactos dos cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5 para a bacia hidrográfica Alto Canoas, cujo as águas, assim como a bacia Passo Marombas também contribuem para o rio Canoas. Os resultados do seu estudo apontaram para um aumento geral da vazão na bacia em 13,49% e 13,19% no período de longo prazo (2020 a 2099) para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 respectivamente. A autora também

identificou um aumento na vazão média Q_{50} e redução das vazões Q_{95} e Q_{98} em ambos os cenários testados.

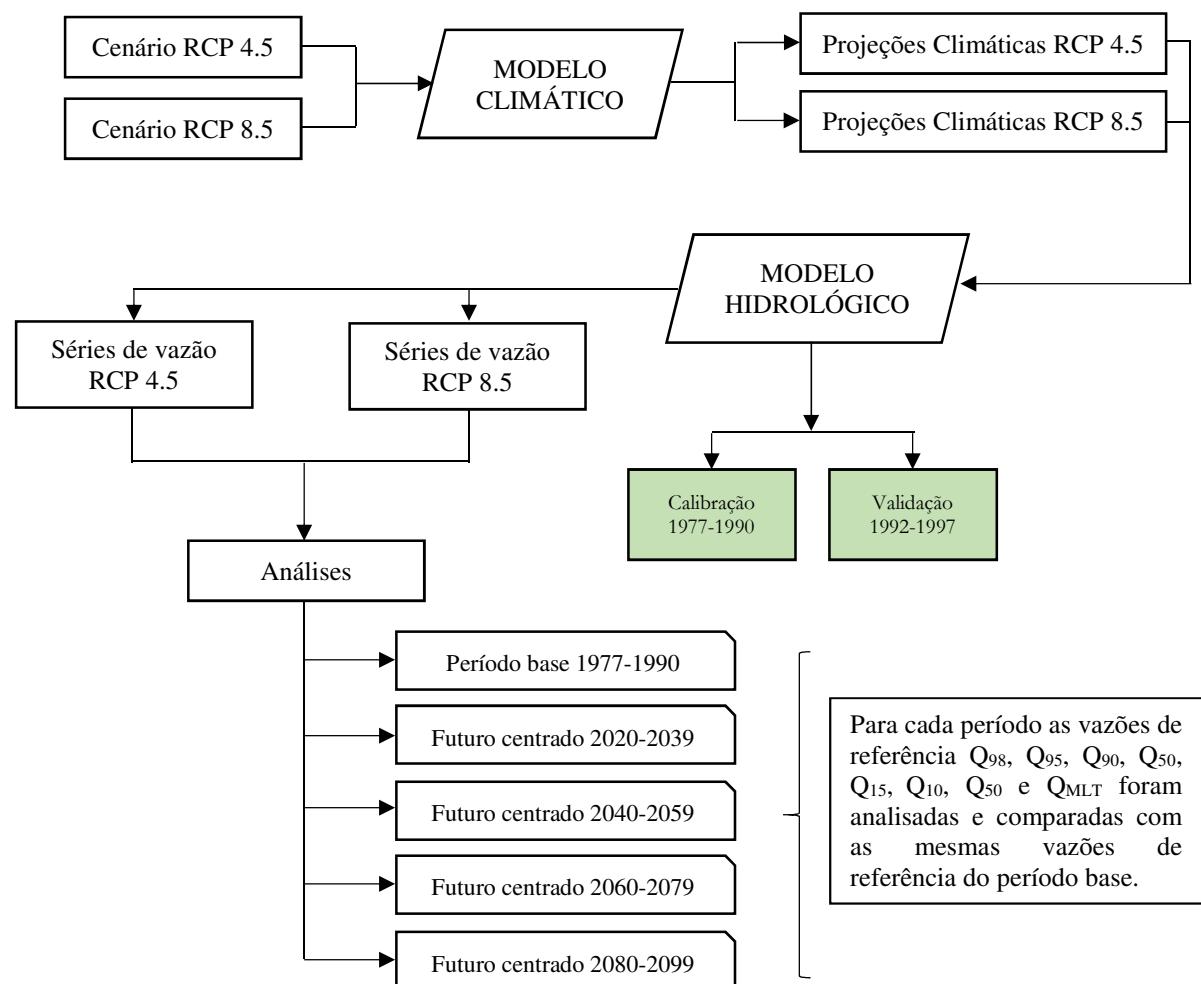
Os resultados obtidos recentemente pelos autores, para bacias hidrográficas próximas a BHPM, representam uma tendência a ser confirmada neste estudo. Além disso, tais estudos são importantes no sentido de validar os resultados obtidos para a bacia hidrográfica Passo Marombas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A avaliação dos impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos da Bacia Hidrográfica Passo Marombas (BHPM), foi realizada a partir da associação de modelos climáticos e suas projeções climáticas com um modelo hidrológico.

As análises e interpretação dos dados se concentraram nas séries de vazão simuladas pelo modelo hidrológico consideradas influenciadas pelas mudanças climáticas. Para fins de comparação, foi utilizado um período base contendo dados de vazão para a BHPM, que representa o comportamento hidrológico da bacia com nula ou reduzida alteração em função das mudanças climáticas. O esquema geral da aplicação do estudo está na Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma geral da metodologia utilizada para avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos da BHPM .



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

3.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO

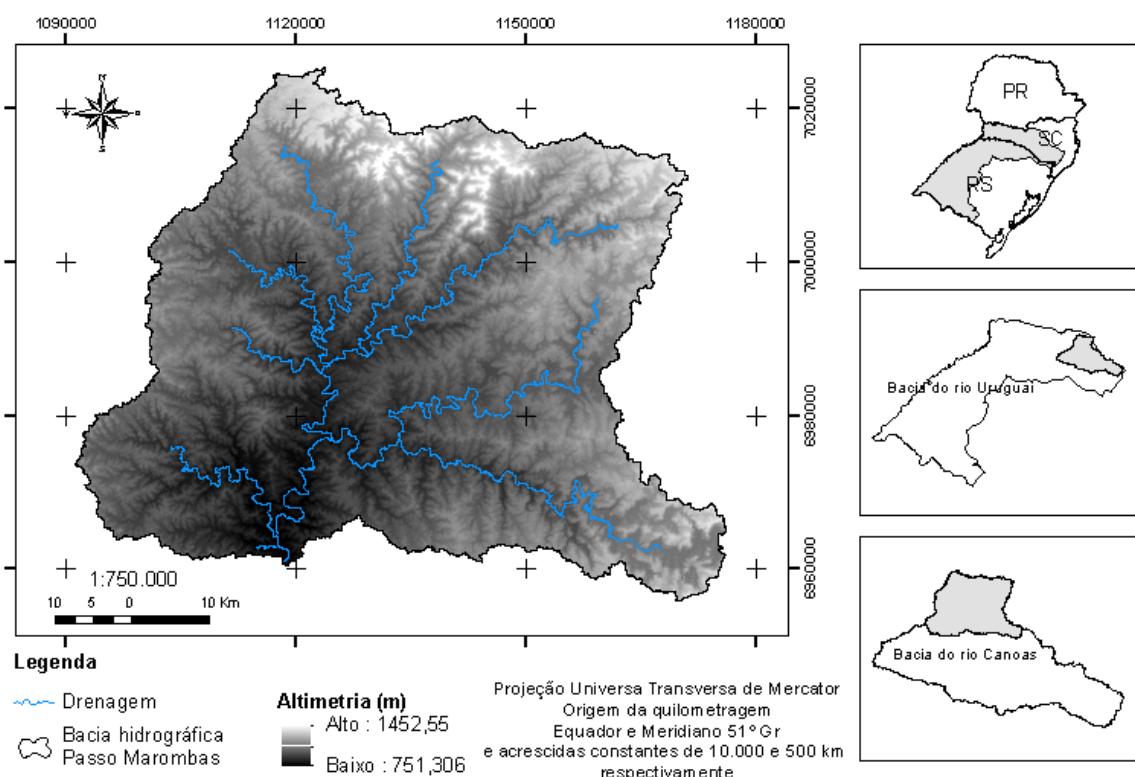
A área objeto de estudo é representada pelo sistema hidrográfico ou bacia hidrográfica Passo Marombas e seus subsistemas ou subbacias.

A bacia hidrográfica Passo Marombas (BHPM) está localizada entre as coordenadas geográficas $26^{\circ}45'20''$ e $27^{\circ}21'00''$ de latitude sul e entre $51^{\circ}02'10''$ e $50^{\circ}10'35''$ de longitude oeste, com área total de $3678,34 \text{ km}^2$, distribuída entre dez municípios do estado de Santa Catarina.

A BHPM está integrada ao sistema de drenagem da vertente do interior, que é um dos dois grandes sistemas de drenagem de Santa Catarina, sendo o outro o da vertente do litoral. Os grandes sistemas da vertente do interior e do litoral são separados pela borda da Serra Geral.

A BHPM é uma subbacia da bacia hidrográfica do rio Canoas, esta que tem grande relevância pois o rio Canoas, juntamente com o rio Pelotas, formam o rio Uruguai, que é um dos principais rios da América do Sul. Figura 5.

Figura 5 - Mapa de situação da BHPM em relação as bacias hidrográficas dos rios Canoas e Uruguai e Modelo Digital de Terreno e Hidrografia principal da BHPM.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

3.1.1 Região hidrográfica

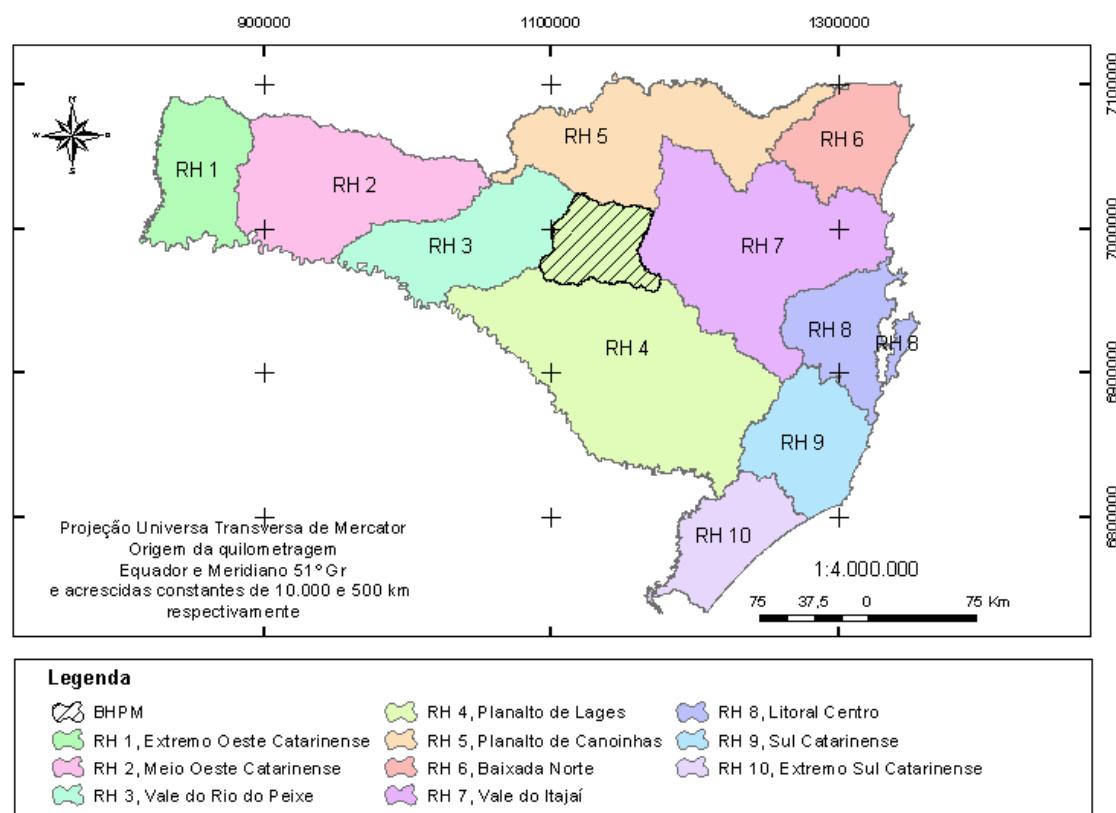
O estado de Santa Catarina é dividido em 10 (dez) Regiões Hidrográficas (RH's) para fins de gestão dos recursos hídricos. As Regiões Hidrográficas RH6, RH7, RH8, RH9 e RH10 representam sistema da vertente do litoral, que drenam suas águas para o oceano atlântico.

As demais regiões hidrográficas compõem o sistema da vertente do interior contribuindo para a drenagem das bacias dos rios Uruguai e Paraná. A BHPM representa 16,15% da Região Hidrográfica 4 (RH4) denominada de Planalto de Lages.

A BHPM tem suas divisas topográficas ao norte com Região Hidrográfica (RH5) Planalto de Canoinhas, ao leste com a Região Hidrográfica (RH7) Vale do Itajaí e a oeste com a Região Hidrográfica (RH3) Vale do Rio do Peixe.

Em relação ao estado de Santa Catarina a BHPM está bem centralizada. A localização da BHPM em relação ao estado e as regiões hidrográficas de Santa Catarina, pode ser vista na Figura 6.

Figura 6 - Localização da BHPM em relação as regiões hidrográficas do Estado de Santa Catarina.



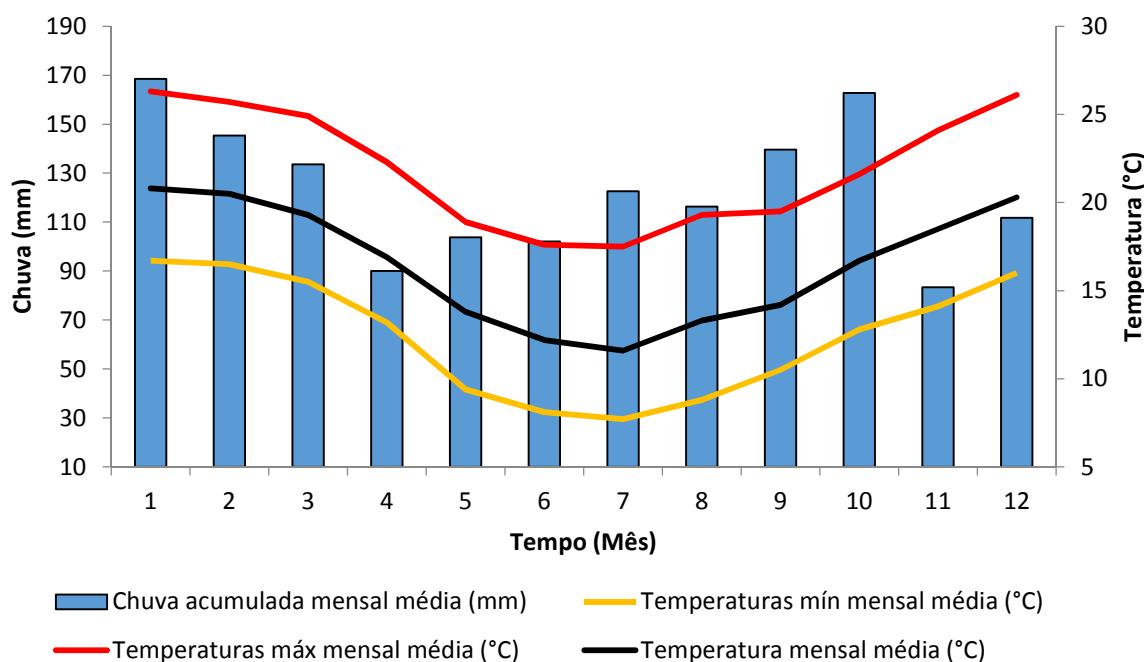
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

3.1.2 Clima

De acordo com o Atlas Climático da Região Sul do Brasil (2012) e considerando a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima da área de estudo é representado pelo tipo “Cfb”. O símbolo “Cfb” caracteriza as regiões de clima temperado propriamente dito, sempre úmido, ou seja, sem estação seca, com verão fresco e com temperatura média do mês mais frio menor que 18°C e temperatura média do mês mais quente inferior a 22°C.

Os meses mais frios e secos são os de junho, julho e agosto, demarcando as estações de verão e inverno. Os mais quentes e com maior índice de precipitação são janeiro, fevereiro e março. (Gráfico 1).

Gráfico 1 - Dados normais de temperatura e chuva para a região de estudo segundo Altas Climático da Região Sul do Brasil – EMBRAPA (2012).



Fonte: Adaptado de Atlas Climático da Região Sul do Brasil – EMBRAPA, 2012.

Quanto ao regime pluviométrico dos meses ao longo do ano, verifica-se um acumulado total de aproximadamente 1500 milímetros por ano, sendo os meses mais chuvosos, janeiro e fevereiro, onde podem ser atingidos 150 mm mensais em média.

A chuva é bem distribuída durante todo o ano não havendo secas ou estiagens prolongadas que possam afetar drasticamente a quantidade e disponibilidade de recursos hídricos nos principais cursos d’água.

3.1.3 Municípios da bacia

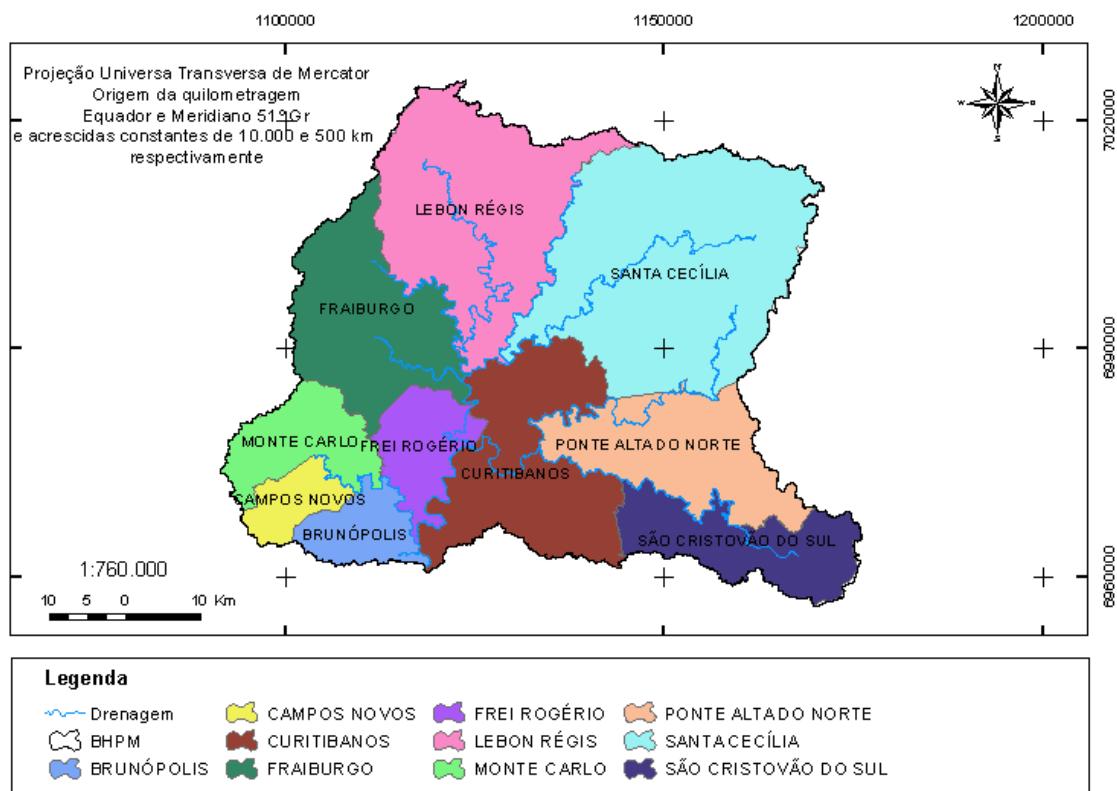
A BHPM é composta por dez municípios, cada qual compreende uma parte do território da bacia. A área de cada município pode ser observada no Quadro 2 e Figura 7.

Quadro 2 - Municípios da bacia hidrográfica Passo Marombas e suas respectivas áreas totais dentro da bacia e área relativa.

Município	Área ocupada na BHPM	
	Total (km²)	Relativa (%)
Brunópolis	125,788	3,419
Campos Novos	93,033	2,529
Curitibanos	480,361	13,059
Fraiburgo	429,810	11,684
Frei Rogério	160,595	4,365
Lebon Régis	651,718	17,717
Monte Carlo	192,553	5,234
Ponte Alta do Norte	372,149	10,117
Santa Cecília	930,787	25,304
São Cristóvão do Sul	270,927	7,364

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Figura 7 - Espacialização das áreas dos municípios que estão contidas na BHPM.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

3.1.4 Aspectos econômicos e sociais

A bacia hidrográfica Passo Marombas possui economia baseada na agricultura com destaque para a fruticultura e produção de grãos. Os setores florestal, madeireiro e agropecuário também têm expressão na economia, com destaque para produção de papel, avicultura e suinocultura bem como criação de gado.

Apesar de a economia ser diversificada grande parte da população dos municípios não possuem ocupação formal. O alto índice de desocupação faz com que parcela significativa da população possua renda mensal per capita limitada a meio salário mínimo ou inferior conforme Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE.

A escolarização para a faixa etária entre 6 e 14 anos é satisfatória para todos os municípios, entretanto os índices de desenvolvimento escolar são médios a baixos em relação ao estado de Santa Catarina. No nível de Brasil estes índices são considerados médios a altos. O mesmo pode ser observado no Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM).

Com relação ao esgotamento sanitário, verifica-se que alguns municípios, como por exemplo, Campos Novos, Fraiburgo, Ponte Alta do Norte e Santa Cecília possuem cobertura satisfatória quando comparados aos outros municípios da bacia, que claramente precisam avançar na questão. Os principais indicadores econômicos, sociais e ambientais que caracterizam os municípios da BHPM estão no Quadro 3.

Quadro 3 - Indicadores econômicos, sociais e ambientais para os municípios da BHPM.

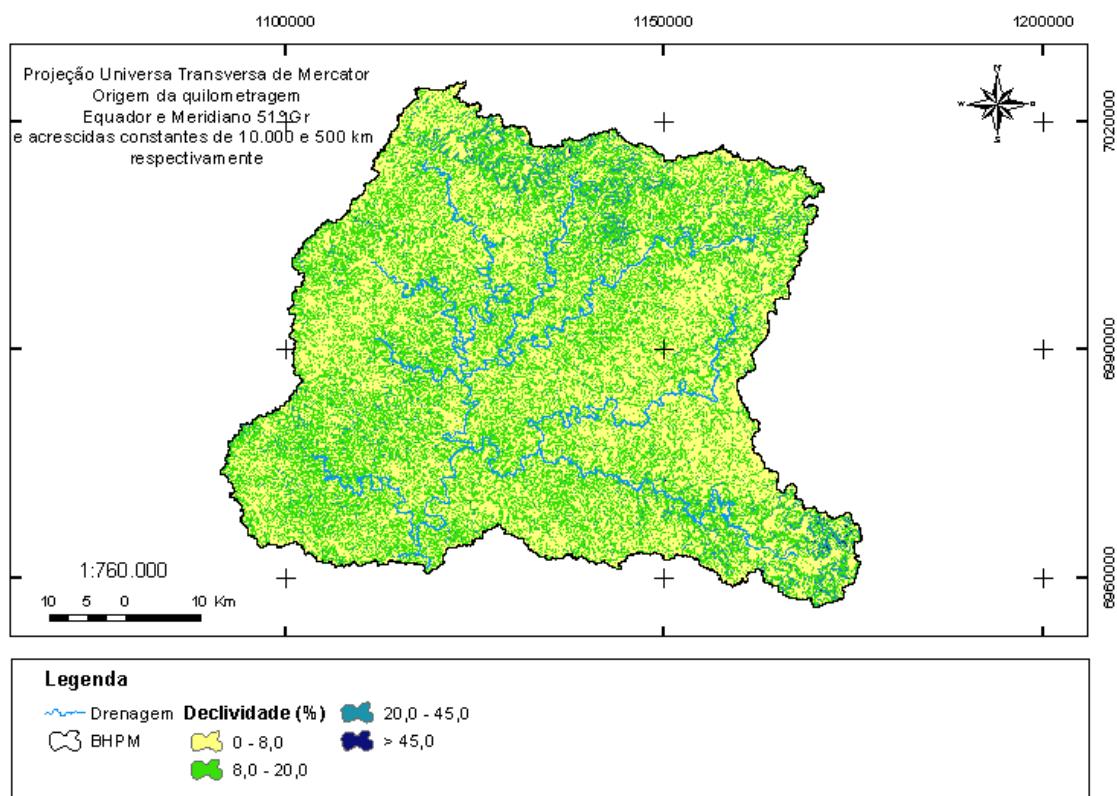
Município	Indicadores					
	Pop. estimada (2018)	Pop. ocupada (2016) (%)	Pop. renda mensal per capita até ½ salário mínimo (2010) (%)	Escolarização de 6 a 14 anos (2010) (%)	IDHM (2010)	Domicílios com esgotamento sanitário (2010) (%)
Brunópolis	2.473,0	11,0	43,4	98,7	0,661	39,4
Campos Novos	35.930,0	29,7	28,9	97,3	0,742	71,1
Curitibanos	39.595,0	25,2	31,7	97,7	0,721	65,5
Fraiburgo	39.299,0	25,8	29,6	98,1	0,731	70,0
Frei Rogério	2.077,0	15,7	39,5	100,0	0,682	36,4
Lebon Régis	12.099,0	11,2	37,3	95,3	0,649	49,1
Monte Carlo	9.824,0	19,6	33,5	98,6	0,643	45,3
Ponte Alta do Norte	3.408,0	27,3	34,9	97,9	0,689	84,1
Santa Cecília	16.741,0	29,6	33,5	96,8	0,698	76,2
São Cristóvão do Sul	5.499,0	26,2	43,9	97,3	0,665	59,7

Fonte: Adaptado de IBGE, 2018.

3.1.5 Declividade e tipo de solo

O relevo da bacia hidrográfica Passo Marombas é classificado como forte-ondulado e ondulado conforme classificação da EMBRAPA (2004). A declividade varia espacialmente nas áreas de cabeceira da bacia e distante da foz onde apresentam relevo mais declivoso, enquanto as áreas de vale próximas aos principais cursos d'água apresentam planícies onduladas e topos de morros achatados são favoráveis ao manejo do solo. Figura 8.

Figura 8 - Espacialização das declividades da bacia hidrográfica Passo Marombas.

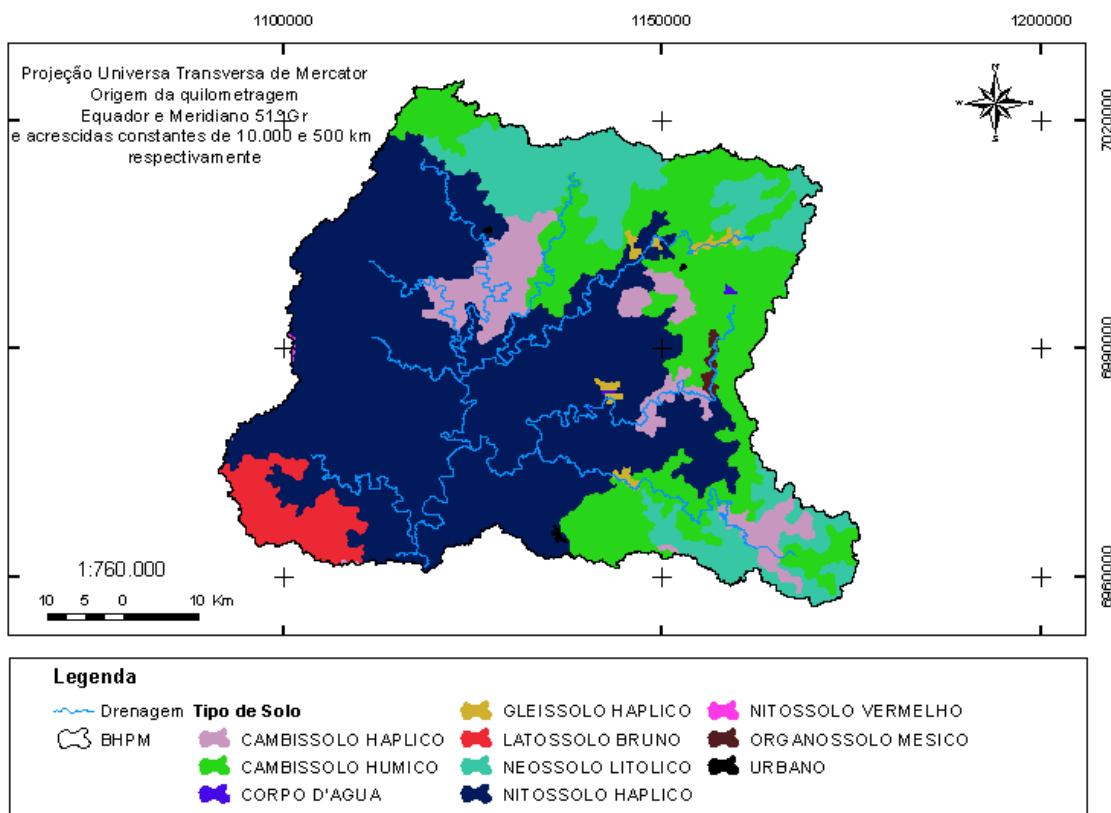


Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Os tipos de solo na bacia também variam espacialmente, ao todo são oito tipos de solo. São eles: Nitossolo Háplico (53,11%), Cambissolo Húmico (21,30%), Neossolo Litólico (13,50%), Cambissolo Háplico (7,05%), Latossolo Bruno (3,80%), Gleissolo Háplico (0,68%), Organossolo Mesico (0,30%), Nitossolo Vermelho (0,05%), a Área Urbanizada e Áreas Alagadas representam (0,10%) e (0,06%) respectivamente.

Os tipos de solo que predominam são o Nitossolo Háplico, Cambissolo Húmico e Cambissolo Háplico, juntos somam 87,91% da área total da bacia. Figura 9.

Figura 9 - Espacialização dos tipos de solo na bacia hidrográfica Passo Marombas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Sartori et. al., (2005) e Collischonn (2013) avaliaram diferentes tipos de solo considerando a sua interação com a água e os enquadram em grupos hidrológicos de solo. Quadro 4.

Quadro 4 - Descrição dos grupos hidrológicos do solo.

Grupo hidrológico	Descrição
Solos A	Solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração, como solos arenosos profundos com pouco silte e argila;
Solos B	Solos menos permeáveis que o anterior, por exemplo, solos arenosos menos profundos do que o tipo A e com permeabilidade superior à média;
Solos C	Solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, com porcentagem considerável de argila;
Solos D	Solos pouco profundos e contendo argilas expansivas, com muito baixa capacidade de infiltração.

Fonte: Adaptado de Collischonn, 2013.

De acordo com Sartori et. al., (2005), o tipo de solo Cambissolo Húmico está no grupo hidrológico C pois é um solo mineral, não hidromórfico, apresenta sequência de horizontes A-Bi-C marcado pela presença de minerais herdados do material original, pouco

intemperizado. O horizonte Bi pode ser pouco espesso, o que é característico em áreas de relevo muito acidentado ou com espessura relativamente grande, chegando a ultrapassar 1 metro quando ocorre em terrenos pouco declivosos. Apresentam alta erodibilidade associada ao potencial de escoamento superficial

O tipo de solo Neossolo Litólico, segundo Sartori et. al., (2005), são solos rasos, com espessura inferior a 50 cm. A sequência de horizontes mais comum é A-C-Cr ou A-C-R. Ocorrem em relevo fortemente ondulado ou montanhoso e são muito susceptíveis à erosão. O contato lítico com a superfície proporciona potencial escoamento superficial.

3.2 DISCRETIZAÇÃO DO SISTEMA EM SUBSISTEMAS PARA MODELAGEM

O particionamento de um sistema principal em subsistemas confirma uma estratégia para a identificação de áreas com características semelhantes, além de configurar um modelo conceitual onde a saída de matéria e energia do subsistema de montante torna-se a entrada do subsistema imediatamente a jusante num processo em série.

De acordo com Wand (1996), um sistema pode ser decomposto ou particionado em sub-sistemas cuja composição e estrutura são subconjuntos da composição e estrutura do sistema principal. A fragmentação de sistemas geográficos em subsistemas de resposta hidrológica é uma estratégia conceitual que objetiva prover os modelos hidrológicos de melhor representatividade.

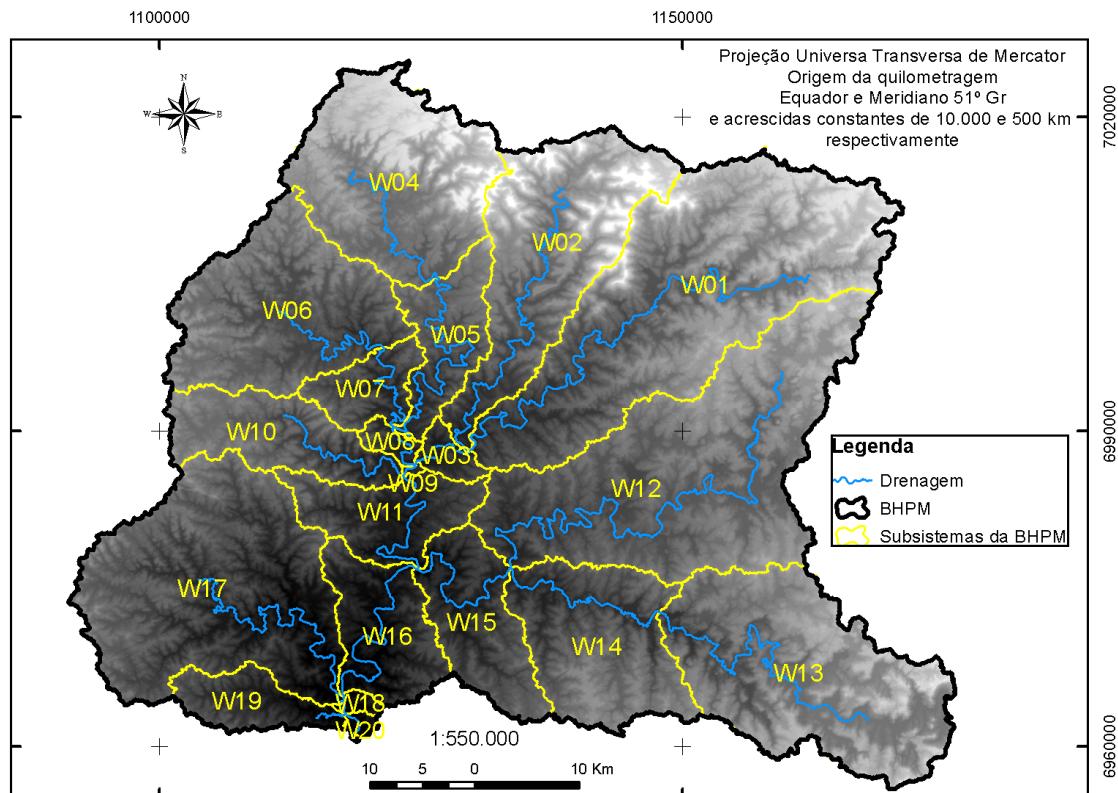
A modelagem do sistema hidrográfico a partir de subsistemas, permite que o modelador faça uma análise das partes do todo, o que facilita a investigação e descoberta de problemas e inconsistências nos resultados da modelagem por meio do isolamento dos subsistemas que não representam a realidade. Isso facilita o processo de correção destas inconsistências.

Para fins de modelagem e caracterização representativa do ambiente natural modelado em ambiente computacional, a bacia hidrográfica Passo Marombas foi discretizada em vinte unidades de resposta hidrológica. O processo de discretização foi realizado em ambiente SIG a partir do aplicativo HEC-GeoHMS. Os critérios utilizados foram o topográfico, o hidrológico e a área mínima de contribuição hidrológica para formar um canal de drenagem.

A divisão de um grande sistema e sistemas menores, gerou dez bacias hidrográficas e dez interbacias hidrográficas conforme definição de Back (2004). Cada um dos subsistemas possui um canal principal e um exutório para onde é direcionado todo o

fluxo de vazão. Os subsistemas foram caracterizados a partir dos seus parâmetros morfométricos e da rede de drenagem. O processamento automático gerou 20 subsistemas (Figura 10) com nomenclatura que varia de W01 a W20, onde W significa *Watershed*, termo em inglês para bacia hidrográfica.

Figura 10 - Espacialização dos subsistemas do sistema geográfico Passo Marombas como estrutura conceitual para modelagem hidrológica da BHPM.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Os principais parâmetros utilizados para caracterizar foram: Perímetro (P), Comprimento axial (Lx), Largura média (Lm), Cota máxima (Hmáx), Cota mínima (Hmín), Relevo Total (Rt), Comprimento do canal principal (L), Comprimento total dos canais de drenagem (Lt), Índice de sinuosidade (Is), Fator de forma (Kf), Coeficiente de compacidade (Kc) e Densidade de Drenagem (Dd). A descrição detalhada sobre cada um dos parâmetros supracitados pode ser obtida no trabalho de Pinto; Rossete (2005).

3.3 SÉRIES DE DADOS HISTÓRICOS E DADOS ESPACIAIS

3.3.1 Escala e resolução de trabalho dos dados

A realização deste estudo exigiu a utilização e manipulação de quantidade significativa de séries de dados históricos e dados espaciais. O nível de detalhe dos dados, representado pela escala temporal para as séries de dados históricos e escala espacial para os dados espaciais, limitam a interpretação das informações e conclusões uma vez que a precisão dos dados de entrada do modelo é transferida para os seus produtos.

Para as séries de projeções climáticas geradas pelo modelo climático regional ETA-HadGEM2-ES e séries de dados hidrológicos como chuva, vazão e evapotranspiração foi utilizada a escala temporal diária, o que caracteriza uma padronização da escala temporal para as séries de dados históricos.

No caso das variáveis chuva e vazão registradas nas estações de monitoramento pluviométrica e fluviométrica da BHPM, obteve-se as séries em escala horária. Os dados das projeções do modelo climático também foram obtidos em escala diária, o que representa maior detalhamento das projeções climáticas geradas.

Para os dados cartográficos, há uma variação na resolução espacial destes dados. As projeções climáticas fornecidas pelo modelo ETA-HadGEM-ES possuem resolução espacial com malha de 20 km^2 . As imagens orbitais do satélite LANDSAT 8, utilizada na classificação do uso e ocupação da terra, possuem resolução espacial de 30 km^2 e o Modelo Digital de Terreno (MDT) utilizado no processo de modelagem hidrológica e delimitação dos subsistemas para modelagem possui resolução espacial de 5 km^2 .

Os demais dados cartográficos como hidrográfica, perímetro da bacia hidrográfica Passo Marombas (BHPM) e perímetros das subbacias da BHPM estão vinculadas a resolução espacial do MDT, pois foram gerados a partir dele. Ademais destaca-se que para fins de gestão dos recursos hídricos e consolidação dos perímetros da BHPM e suas subbacias, a resolução espacial do MDT de 5 km^2 equivalente a escala absoluta de 1:20.000, possui nível de detalhamento adequado aos objetivos deste estudo.

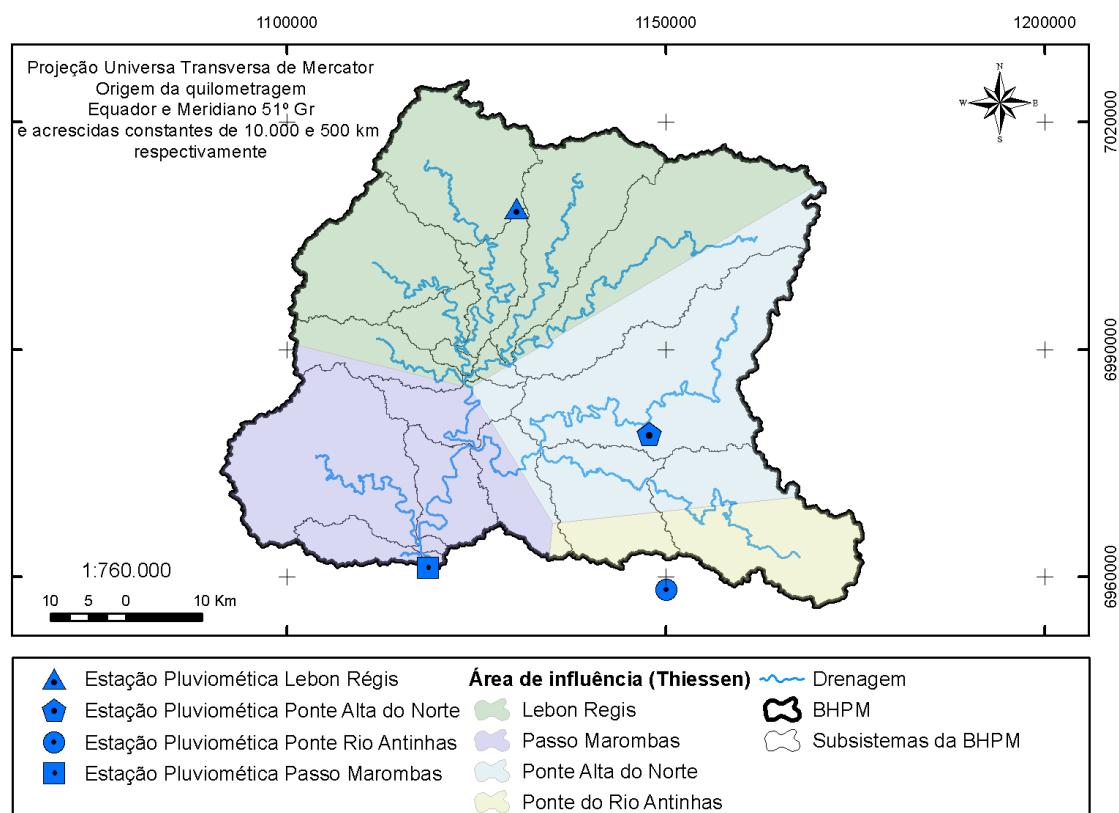
Apesar da variação nas resoluções espaciais verificada entre a imagem de satélite e modelo digital de terreno por exemplo, as escalas temporais dos dados climáticos e hidrológicos foram padronizadas na escala diária, o que tem grande relevância para o estudo, pois as análises hidrológicas estarão baseadas na escala de detalhe diária.

3.3.2 Dados utilizados

Os dados diários de chuva e vazão foram obtidos de séries históricas diárias disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas – ANA. As estações pluviométricas consultadas foram: Lebon Regis (código 2650019) coordenadas $26^{\circ}54'06''$ de latitude sul e $50^{\circ}39'33''$ de longitude oeste, Passo Marombas (código 2750009) coordenadas $27^{\circ}20'02''$ de latitude sul e $50^{\circ}45'12''$ de longitude oeste, Ponte Alta do Norte (código 2750010) coordenadas $27^{\circ}09'40''$ de latitude sul e $50^{\circ}28'08''$ de longitude oeste e Ponte Rio Antinhas (código 2750012) coordenadas $27^{\circ}20'43''$ de latitude sul e $50^{\circ}26'09''$ de longitude oeste.

A área de influência de cada estação pluviométrica foi calculada por meio da aplicação da técnica dos polígonos de Thiessen e podem ser observadas na Figura 11. A estação com maior influência na área de estudo é a estação Lebon Régis com 39,90%, seguida pelas estações Ponte Alta do Norte com 28,50%, Passo Marombas com 22,65% e Ponte Rio Antinhas com 8,95 % em relação a área total da BHPM.

Figura 11 - Espacialização das estações pluviométricas utilizadas no estudo e suas respectivas áreas de influência conforme método dos polígonos de Thiessen.



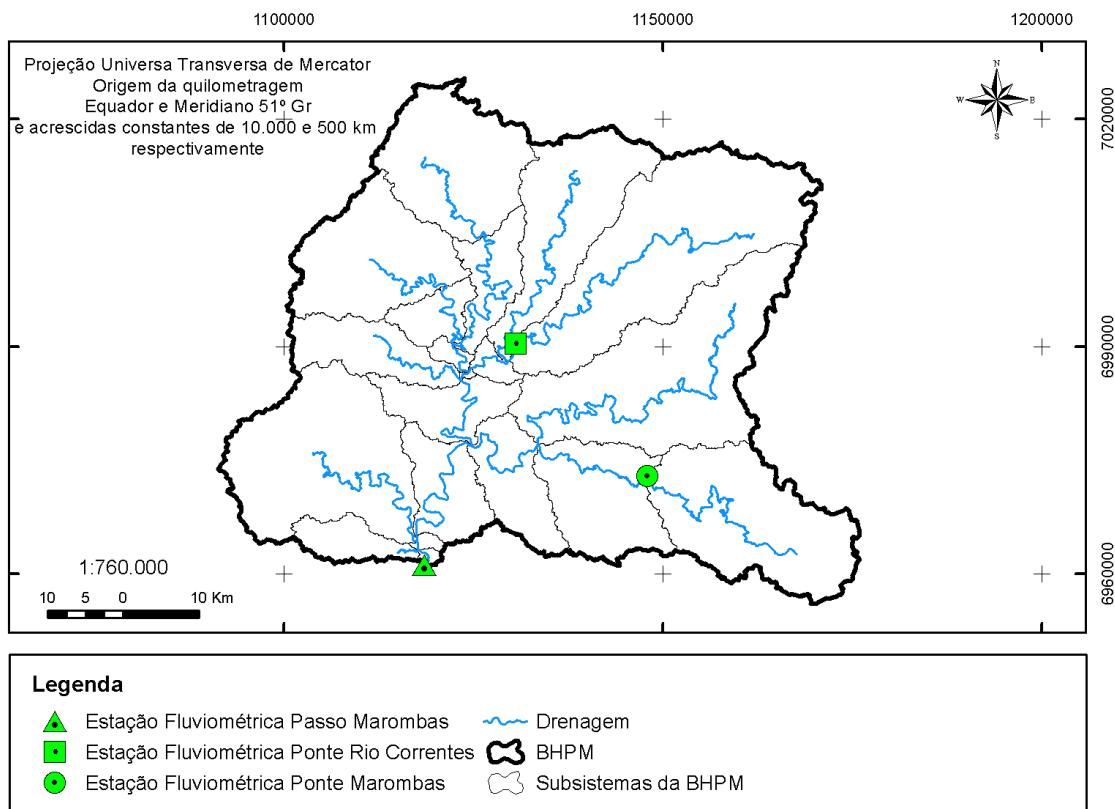
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

As estações com dados de vazão ou fluviométricas usadas foram: Passo Marombas (código 71498000) coordenadas 27°20'02" de latitude sul e 50°45'12" de longitude oeste, Ponte Marombas (código 71490000) coordenadas 27°12'55" de latitude sul e 50°27'54" de longitude oeste e Ponte Rio Correntes (código 71496000) coordenadas 27°04'00" de latitude sul e 50°39'00" de longitude oeste. Os dados hidrológicos diários de vazão foram obtidos da estação fluviométrica Passo Marombas (código 71498000).

A estação Passo Marombas tem maior relevância no estudo pois está localizada no exutório do sistema hidrográfico onde o modelo hidrológico foi calibrado e validado. O fluxo de vazão de todos os subsistemas do sistema hidrográfico Passo Marombas é contabilizado na estação Passo Marombas. A disponibilidade de séries dados históricos registrados desde a década de 1960 nesta estação, possibilitou a realização deste estudo.

Os dados da estação Passo Marombas foram aplicados ao modelo hidrológico em seus processos de calibração e validação. As demais estações foram usadas para avaliar o desempenho do modelo hidrológico nos subsistemas que as mesmas monitoram. A espacialização das estações fluviométricas está representada na Figura 12.

Figura 12 - Espacialização das estações fluviométricas utilizadas no estudo e seus sistemas e subsistemas monitorados.



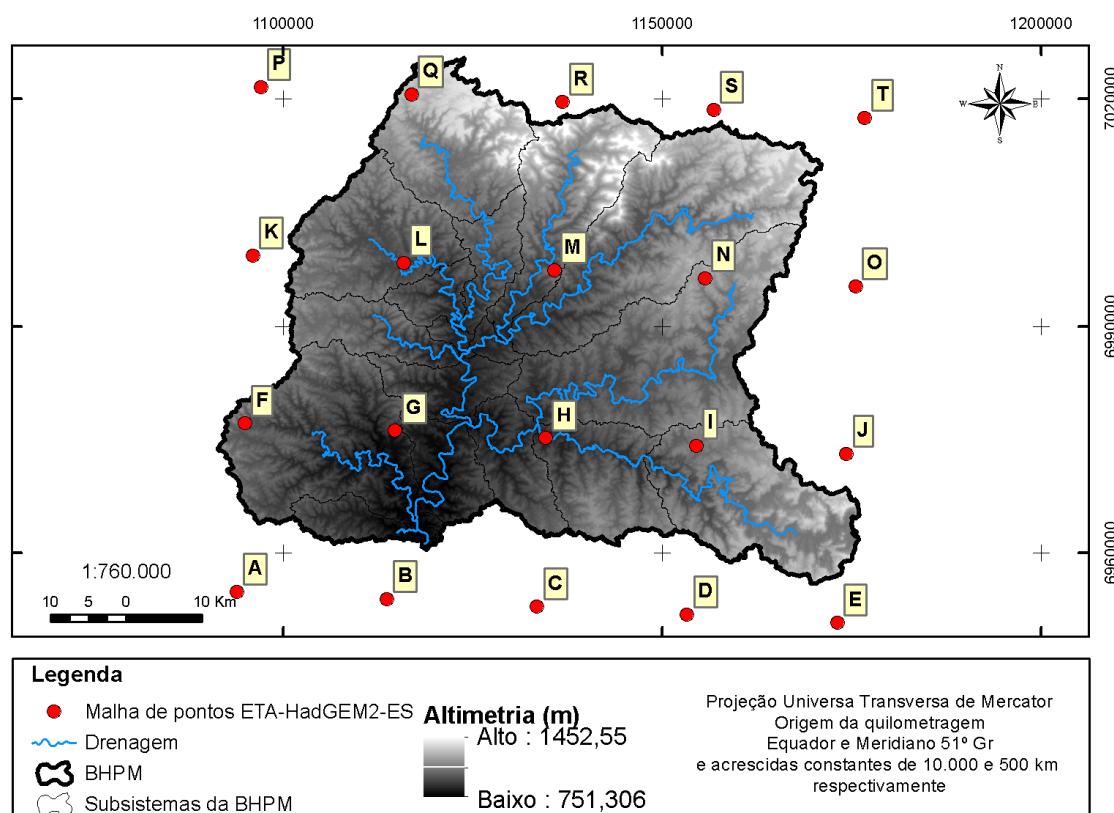
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Os dados climáticos de evapotranspiração foram obtidos a partir das séries de dados históricos da estação meteorológica da EPAGRI/CIRAM/INMET localizada no município de Lages – SC, nas coordenadas geográficas 27°08' de latitude sul e 50°34' de longitude oeste.

Os dados de projeções climáticas para cenários de mudanças climáticas foram obtidos de séries diárias das projeções o modelo climático regional ETA, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para detalhar as projeções climáticas do modelo climático global HadGEM2-ES do centro britânico *Hadley Centre*. Com resolução de 20 km o modelo ETA-HadGEM2-ES possui projeções para cenários de emissão de Gases de Efeito Estufa – GEE: RCP 4.5 e RCP 8.5. (BRASIL, 2016).

A partir da malha de pontos do modelo climático (Figura 13) foram selecionados quatro para serem utilizados como pontos equivalentes as localizações geográficas das estações pluviométricas utilizadas nesse estudo. Isso permitiu igualar os pontos de entrada de chuva do modelo hidrológico, tanto para os dados observados nas estações pluviométricas quanto para os dados gerados pelo modelo climático ETA-HadGEM2-ES.

Figura 13 - Espacialização da grade de pontos onde foram gerados os dados de projeções climáticas do modelo climático ETA-HadGEM2-ES para a área BHPM.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

O critério utilizado para seleção dos pontos da malha do modelo foi a proximidade do ponto da malha com o ponto geográfico onde estão instaladas as estações de monitoramento. Os pontos selecionados e sua estação pluviométrica equivalente são: ponto B (Estação Passo Marombas), ponto D (Estação Ponte Rio Antinhas), ponto I (Estação Ponte Alta do Norte) e ponto M (Estação Lebon Regis).

Os dados de projeções climáticas foram disponibilizados pelo Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE),

Os dados cartográficos, especialmente o Modelo Digital de Terreno (MDT) foram obtidos a partir do Levantamento Aerofotogramétrico do Estado de Santa Catarina disponível no Sistema de Informações Geográficas da Secretaria de Desenvolvimento Econômico Sustentável do Estado de Santa Catarina – SIG/SDS

As imagens orbitais utilizadas para diagnosticar o uso e ocupação da terra na BHPM foram obtidas a partir do programa de satélite de observação da terra de origem americana, conhecido como LANDSAT, para os anos de 1986, 2002 e 2017. As séries de dados históricos e dados espaciais foram utilizados em diferentes etapas da metodologia deste trabalho. A Tabela 1 apresenta informações sobre os principais dados utilizados.

Tabela 1 - Dados utilizados na metodologia do estudo por etapas e períodos.

Etapa	Dados	Fase/Período	Período/Data
Classificação orientada a objeto das imagens orbitais para diagnóstico do uso da terra	Imagens orbitais LANDSAT	-	1986; 2002; 2017
Correção de viés e validação do modelo climático regional ETA-HadGEM2-ES	Projeções climáticas do modelo ETA-HadGEM2-ES.	Período da normal climatológica	01/01/1961 – 31/12/1990
	Séries de dados históricos de chuva, vazão e evapotranspiração	Período base	01/01/1977 – 31/12/1990
Execução do modelo HEC-HMS	Hidrológicos -Chuva -Vazão -Evapotranspiração	Calibração Validação	01/01/1977 – 31/12/1990 01/01/1992 – 31/12/1997
Validação da vazão simulada pelo modelo hidrológico a partir das séries de projeção climática.	Hidrológicos -Vazão simulada	Validação	01/01/2007 – 31/12/2016
Simulação das vazões futuras a partir do modelo hidrológico	Hidrológicos -Vazões simuladas para cenários de mudanças climáticas	2030 2050 2070 2090	01/01/2020 – 31/12/2039 01/01/2040 – 31/12/2059 01/01/2060 – 31/12/2079 01/01/2080 – 31/12/2099

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Os períodos de dados selecionados para calibrar e validar o modelo hidrológico foram determinados a partir dos seguintes critérios, para calibração o período de 1977 a 1990 foi escolhido de acordo com a disponibilidade e dados e por estar dentro do período considerado como a Normal Climatológica, de 1961 a 1990, onde os efeitos das mudanças climáticas sobre o meio ambiente e recursos hídricos ainda não são evidentes.

Ter o modelo hidrológico calibrado no período da Normal Climatológica é importante, pois no caso de o processo de calibração do modelo hidrológico ser realizado em um período de dados sob influência das mudanças climáticas, isso afeta a representação dos processos hidrológicos feita pelo modelo hidrológico.

Nesta situação, ao se analisar as séries de dados simuladas pelo modelo hidrológico para o futuro, os impactos das mudanças climáticas poderão ser suavizados pelo fato de o modelo já estar calibrado em condições hidrológicas sob influência de mudanças climáticas, mesmo que estas sejam mínimas.

Outro critério relevante considerado para seleção do período de calibração do modelo foi a extensão temporal do período de calibração, de forma que os 14 anos selecionados pudesse representar períodos secos e úmidos na bacia. Esta variação natural do ciclo hidrológico, quando submetida ao processo de calibração do modelo, em tese, o deixa mais robusto e preparado para simular possíveis variações no ciclo hidrológico no futuro, em função das mudanças climáticas e seus impactos sobre os recursos hídricos da bacia.

Para a etapa de validação do modelo hidrológico, período de 6 anos entre 1992 e 1997, o critério utilizado para seleção do período foi o da disponibilidade de dados hidrológicos e climáticos.

Para a etapa de validação da vazão simulada pelo modelo a partir das séries de projeções climáticas, um período de 10 anos entre 2007 e 2016 foi selecionado. Este período foi escolhido por ser o maior período possível de dados de vazão observados contínuos e sem falhas, disponíveis na estação fluviométrica Passo Marombas.

A vazão simulada pelo modelo hidrológico a partir dos dados do modelo climático, especialmente para o período de 2007 a 2016, foram comparadas com as vazões observadas na estação Passo Marombas, isto permitiu testar a qualidade da simulação do modelo, de forma que se pudesse obter segurança para prosseguir com a simulação das vazões no futuro para o período de 2020 a 2099, estrategicamente separados em períodos centrados em 2030 (2020 a 2039), 2050 (2040 a 2059), 2070 (2060 a 2079) e 2090 (2080 a 2099).

3.4 USO E OCUPAÇÃO DA TERRA

A classificação do uso da terra na bacia hidrográfica Passo Marombas foi realizada a partir das imagens LANDSAT dos anos de 1986, 2002 e 2017. A imagem do ano de 1986 foi escolhida por estar temporalmente alocada no período de calibração do modelo hidrológico (1977-1990). Os dados obtidos com a classificação do uso da terra no ano de 1986 foram utilizados como condições de contorno do modelo hidrológico no processo de calibração do modelo.

O pareamento dos períodos de dados de uso do terra e calibração do modelo hidrológico faz com que a modelagem hidrológica seja mais confiável e representativa do mundo real, uma vez que o uso da terra impacta diretamente no comportamento hidrológico da bacia hidrográfica. Neste sentido, a análise do uso da terra tem grande relevância nos estudos hidrológicos, e ainda, sua alteração significativa ao longo do tempo influencia diretamente no comportamento hidrológico de bacias hidrográficas.

Para classificação das imagens LANDSAT foi utilizado o *software* ENVI 5.2, com a aplicação do método de classificação supervisionada, que tem como objetivo categorizar todos os pixels da imagem, atribuindo a cada pixel um valor relacionado ao mundo real, ou seja, uma determinada classe de uso da terra. Cada imagem é formada por um conjunto de bandas, cada qual com uma frequência no espectro do visível, além de uma banda na faixa do infravermelho.

A combinação de bandas destaca um ou mais elementos da imagem a partir da coloração destes elementos. Obter uma combinação de bandas que permita contrastar todas as classes de uso da terra facilita o processo de classificação supervisionada, pois a quantificação de todas as classes é realizada em uma única etapa de processamento, entretanto caso não haja distinção clara entre todas as classes de uso da terra, a classificação e quantificação das classes pode ser feita por partes.

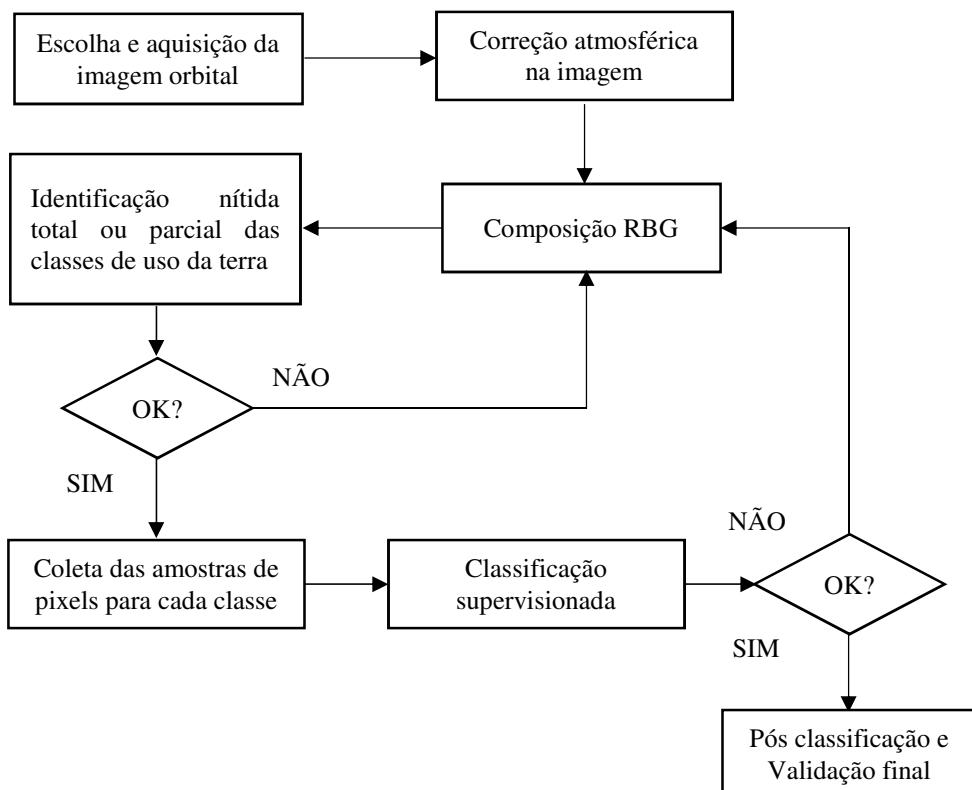
Primeiro usa-se a combinação de bandas para destacar um grupo de classes de uso do solo, por exemplo agricultura e campo, em seguida estas classes são quantificadas e recortadas da imagem por meio da aplicação de ferramentas de geoprocessamento em ambiente SIG. Segundo, uma nova combinação de bandas é feita para identificar o restante das classes da imagem, cobrindo toda a área da bacia hidrográfica.

Caso necessário este processo pode ser feito em três ou mais combinações de bancas, ou seja, em partes, de forma que se possa identificar com clareza cada classe de uso da terra, e fazer sua quantificação.

A classificação supervisionada por partes é um procedimento que requer tempo para executar as técnicas de processamento, porem resultou em uma quantificação fidedigna das áreas ocupadas por cada classe de uso da terra na BHPM. As principais classes de uso da terra classificadas para a bacia hidrográfica Passo Marombas foram: Agricultura, Água, Área Urbana, Campo, Mata Nativa e Reflorestamento.

Um esquema do processo de classificação supervisionada de imagens de satélite pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 - Fluxograma do processo de classificação supervisionada de imagens de satélite LANDSAT 8 utilizadas para quantificação das classes de uso da terra na BHPM.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

3.5 SALDO HIDRICO NO PERÍODO BASE

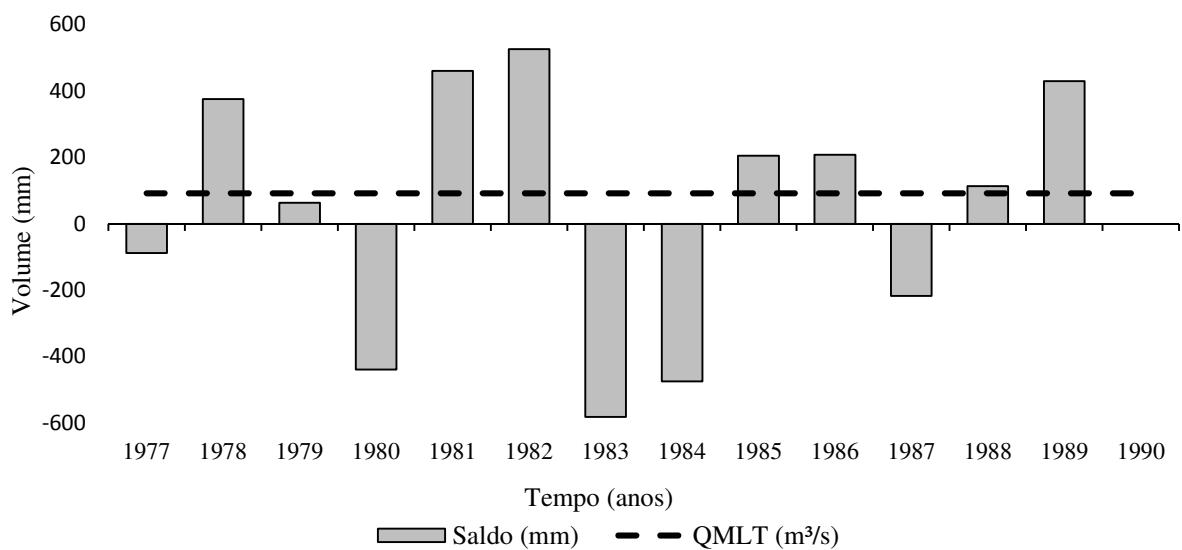
O saldo hídrico para o período base, semelhante ao período usado para a calibração do modelo hidrológico que inicia em 01/01/1977 e acaba em 31/12/1990, foi realizado para compreender a variabilidade hidrológica da bacia hidrográfica Passo Marombas em termos de períodos secos e úmidos. Esta análise permite verificar em quais anos houve déficit ou excesso hídrico, sendo que em anos com excesso há tendência de haver maior

armazenamento de água no reservatório subterrâneo da bacia hidrográfica.

A análise do saldo hídrico também é importante no sentido de verificar a sazonalidade hidrológica do período base, utilizado na comparação com os períodos de vazões simuladas nos futuros centrados em 2030, 2050, 2070 e 2090.

O saldo hídrico da BHPM está calculado pelo balanço hídrico simplificado, representado pelos volumes de água que entram e que saem da bacia. A entrada é representada pela chuva, e as saídas são representadas pela evapotranspiração real e vazão no exutório da bacia.

Gráfico 2 - Saldo hídrico e vazão média de longo período para o período base 1977 a 1990, período utilizado na calibração do modelo hidrológico.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Em análise ao gráfico do saldo hídrico verifica-se que há um comportamento sazonal em termos de quantidade de água que fica reservada na bacia. Alguns anos apresentam excesso hídrico, como 1981 e 1982, e outros déficit como 1983 e 1984. O maior excesso hídrico de 525,8 mm foi registrado no ano de 1982, e o maior déficit hídrico no ano de 1983.

O modelo hidrológico calibrado para o período com variação do saldo hídrico da bacia, o torna capaz de simular tais variações hidrológicas a partir de suas simulações. A vazão média de longo termo (Q_{MLT}) para o período base é de 92,5 m³/s.

Os volumes registrados no saldo hídrico e Q_{MLT} no período base são utilizados para comparação dos saldos hídricos e Q_{MLT} nos períodos dos futuros centrados.

3.6 MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS

O modelo HEC-HMS (*Hydrological Engineering Center - Hydrologic Modeling System*) é um modelo matemático empírico/conceitual e determinístico (TUCCI, 1998). Foi desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros das Forças Armadas dos Estados Unidos (*United States Army Corps of Engineers - USACE*) a partir do Centro de Engenharia e Hidrologia. A última versão do aplicativo foi utilizada neste estudo (HEC-HMS 4.2.1).

Este modelo foi desenvolvido com o objetivo de simular o processo de chuva-vazão em bacias hidrográficas (USACE, 2000). O modelo gera hidrogramas e informações referentes ao comportamento hidrológico de um sistema hidrográfico e seus subsistemas, como por exemplo volume de deflúvio, vazão superficial, vazão subsuperficial e subterrânea, infiltração e percolação entre outras variáveis.

O aplicativo HEC-HMS possui uma extensão denominada de HEC-GeoHMS (*Geospatial Hydrologic Analysis*), que opera mediante acoplamento forte com o SIG ArcGIS segundo classificação discutida por Neto; Rodrigues (2001). A partir do HEC-GeoHMS dados espaciais como o Modelo Digital de Terreno (MDT) foram processados para construção do modelo conceitual para a modelagem hidrológica, que consiste em definir o sistema hidrográfico a ser modelado e seus subsistemas.

A ferramenta HEC-GeoHMS usa o MDT e demais dados espaciais fornecidos pelo modelador para criar uma hierarquização entre os subsistemas, de forma a conectá-los por meio de uma topologia criada a partir de índices, e códigos de identificação para cada subsistema, trechos de drenagens confluência de canais e outros. Além disso, a ferramenta calcula parâmetros morfométricos, da rede de drenagem, e alguns parâmetros hidrológicos para cada um dos subsistemas a serem modelados otimizando o trabalho do modelador.

Após construção do modelo conceitual em ambiente Sistema de Informações Geográficas - SIG ArcGiS, um pacote de dados foi configurado e exportado para ser acessado pelo HEC-HMS. Esta transferência de arquivos entre plataformas distintas configura a relação lógica fraca entre o modelo HEC-HMS e o SIG ArcGIS.

Uma situação oposta de acoplamento lógico forte, seria representada pela operação integrada do modelo hidrológico com o SIG, ambos sob a mesma plataforma. O acoplamento forte reduz a possibilidade de erros sistemáticos, pois não há necessidade de empacotamento das informações geradas no ambiente SIG e transferência para o modelo. Todo o processo é realizado em um único ambiente de processamento de dados.

3.6.1 Modelo conceitual para modelagem hidrológica

O modelo conceitual definido para o sistema hidrográfico Passo Marombas é composto por subsistemas hidrográficos que estão apoiados no conceito de bacia hidrográfica e interbacia hidrográfica. De acordo com Tucci (2009), entende-se bacia hidrográfica como uma área de captação natural da água que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída. Interbacia hidrográfica é uma bacia que recebe fluxo de água de bacias a montante (BACK, 2014).

Na hidrologia, a unidade espacial mais utilizada para a modelagem hidrológica é a bacia hidrográfica. Uma bacia hidrográfica também pode ser entendida como um sistema ou sistema geográfico que possui entrada(s), seus componentes, e saída(s). Sistema ainda pode ser definido como um conjunto de componentes que interagem entre si para um determinado fim (NETO, 2000).

A construção do modelo conceitual é automatizada pela ferramenta HEC-GeoHMS, que processa o Modelo Digital de Terreno (MDT) para delimitar as principais áreas de contribuição hidrológica para uma rede de drenagem com nível de detalhe específico. Quanto mais detalhada for a rede de drenagem, maior será o número de bacias e interbacias hidrográficas, consequentemente maior será a quantidade de parâmetros a serem informados ao modelo.

O modelo conceitual para a BHPM foi elaborado a partir de uma rede de drenagem representativa dos principais cursos d’água da bacia. As características hidrológicas, pedológicas e de uso da terra para cada subsistema ou subbacia foram determinadas e informadas ao modelo hidrológico. O conjunto das informações representa as condições de contorno naturais ou antropizadas que condicionam a hidrologia naquele sistema ou subsistema hidrográfico.

As respostas hidrológicas dos subsistemas estão diretamente relacionadas com estas condições de contorno. Portanto, a fragmentação de grandes sistemas geográficos em subsistemas de resposta hidrológica menores é uma estratégia conceitual que objetiva prover os modelos hidrológicos de melhor representatividade, uma vez que há diferenças morfométricas entre os subsistemas.

Com a discretização da bacia em sistemas, pode-se fazer uma leitura e análises das partes do todo, e com isso identificar quais estão sendo modelados com êxito e quais precisam de ajustes em seus parâmetros para que representem o mundo real.

3.6.2 Módulos do modelo hidrológico HEC-HMS e processos hidrológicos modelados

O HEC-HMS 4.2.1 é constituído por módulos e pode ser operado a partir do uso dos seguintes módulos principais: o módulo bacia hidrográfica, o módulo meteorológico, o módulo de especificações de controle e o módulo de dados de séries temporal.

O módulo bacia hidrográfica é o principal, a partir dele é definido a estrutura espacial conhecida como modelo conceitual para modelagem hidrológica, que exerce o papel da representação física da bacia modelada. Dentro deste módulo, existe o módulo de subbacia, as subbacias são as partes do todo, para cada uma são definidos os métodos matemáticos utilizados para simular os processos das componentes do ciclo hidrológico.

Os principais processos do ciclo hidrológico a serem modelados são: a interceptação e acumulo de água da chuva pela vegetação (*Canopy Method*); a retenção e detenção superficial de água nas depressões e micro depressões representada pela rugosidade do terreno (*Surface Method*); as perdas de água por infiltração, percolação e armazenamento de água nas camadas do solo (*Loss Method*); a transformação de escoamento superficial direto em vazão (*Transform Method*); o escoamento subsuperficial ou escoamento de base e o escoamento subterrâneo que ocorre respectivamente nas camadas superficiais e profundas do solo, bem como a transferência de água entre as camadas do solo (*Baseflow Method*); e da propagação da água nos canais de drenagem (*Routing Method*) (USACE, 2015c).

O módulo meteorológico é utilizado para organizar e armazenar as séries de dados históricos no modelo, como a precipitação e a evapotranspiração (USACE, 2015b).

O módulo de especificações de controle permite incluir a data e horário de início e fim dos períodos das etapas de modelagem como a calibração (01/01/1977 as 00:00hs – 31/12/1990 as 24:00), validação (01/01/1992 as 00:00hs – 31/12/1997 as 24:00), a validação da vazão simulada pelo modelo hidrológico a partir das séries de projeção climática (01/01/2007 a 00:00hs – 31/12/2016) e a simulação das vazões futuras a partir do modelo hidrológico (01/01/2020 – 31/12/2099).

O passo de tempo em que se efetuam os cálculos da transformação da chuva em vazão, neste estudo utilizado a escala temporal diária, também é determinado no modulo especificações de controle. O passo de tempo diário está alinhado com a frequência de observação dos dados das séries de dados históricos de chuva, vazão e projeções do modelo climático, todos em escala diária.

O módulo de dados de séries temporal é destinado ao armazenamento e

organização das séries de dados históricos, para que possam ser acessados pelo modelo.

3.6.3 Métodos de cálculo dos processos hidrológicos simulados pelo modelo

Para cada processo a ser modelado existem algoritmos que representam o fenômeno hidrológico, desenvolvidos por pesquisadores e incorporados ao modelo. Cada método exige um conjunto de parâmetros para sua execução, a seleção do método depende da disponibilidade de dados sobre a área de estudo.

O objetivo do estudo também deve ser considerado na seleção dos métodos de cálculos dos processos hidrológicos, simulações de eventos hidrológicos de curta duração como eventos extremos de inundação usam métodos diferentes dos utilizados em simulações de dados contínuos que representem a variabilidade hidrológica para um longo período de tempo, geralmente anos ou décadas.

Os principais métodos possíveis de simulação dos processos hidrológicos incluídos no modelo estão apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 - Métodos de simulação dos processos hidrológicos incluídos no modelo HEC-HMS.

Processo	Principais métodos	
Canopy	Simple Canopy	Gridded Simple Canopy
Surface	Simple Surface	Gridded simple Surface
Loss	Deficit Constant Green and Ampt Gridded Deficit Constant Gridded Green and Ampt Gridded SCS Curve Number	Gridded Soil Moisture Accounting Initial and Constant Curve Number Smith Parlange Soil Moisture Accounting
Transform	Clark Unit Hydrograph Kinematic Wave Mod Clark	SCS Unit Hydrograph User Specified S-Graph User Specified Unit Hydrograph
Baseflow	Bounded Recession Constant Monthly	Linear Reservoir Nonlinear Boussinesq
Routing	Kinematic Wave Muskingum-Cunge	Modified Puls Straddle Stagger

Fonte: Adaptado de USACE, 2015b.

A representação dos processos de perdas de água (*Loss*) por infiltração, percolação, retenção e detenção de água no solo, assim como armazenamento e fluxos no interior do solo, pode ser feita de forma simplificada ou complexa, isso depende do tipo de método de cálculo dos processos hidrológicos escolhido. Os métodos de perda de água denominados de *Curve Number (CN)* e *Soil Moisture Accounting (SMA)* são métodos

distintos, cada um possui um objetivo.

O primeiro é mais simples, e geralmente aplicado para simulação de eventos curtos com objetivo de simular preferencialmente as vazões a partir da contribuição do escoamento superficial. A sua determinação requer informações como uso da terra, tipo de solos e grupo hidrológico do solo.

O segundo é fortemente recomendado para uso na simulação de séries contínuas, ou seja, longos períodos. É mais complexo pois representa os diferentes processos da relação da água com o solo. Os parâmetros a serem informados ao método são difíceis de serem mensurados e/ou onerosos para se obter a partir de medições em campo.

3.6.4 Descrição dos métodos de cálculo utilizados e seus parâmetros

Os métodos de cálculo dos processos hidrológicos foram escolhidos a partir do objetivo da modelagem hidrológica, que é a simulação hidrológica de séries contínuas para longo período. Os métodos utilizados em cada processo, assim como seus parâmetros, podem ser observados no Quadro 6.

Quadro 6 - Principais parâmetros exigidos para cada método de simulação de processos hidrológicos.

Processo	Método	Principais parâmetros exigidos	
Canopy	Simple Canopy	Initial Storage (%)	Max Storage (mm)
Surface	Simple Surface	Initial Storage (%)	Max Storage (mm)
Loss	Soil Moisture Accounting (SMA)	Soil (%)	Soil Percolation (mm/hr)
		Groundwater 1 (GW 1) (%)	GW 1 Storage (mm)
		Groundwater 2 (GW 2) (%)	GW 1 Percolation (mm/hr)
		Max Infiltration (mm/hr)	GW 1 Coefficient (hr)
		Impervious (%)	GW 2 Storage (mm)
		Soil Storage (mm)	GW 2 Percolation (mm/hr)
		Tension Storage (mm)	GW 2 Coefficient (hr)
Transform	Clark Unit Hydrograph	Time of Concentration (hr)	Storage Coefficient (hr)
Base Flow	Linear Reservoir	Groundwater 1 Initial (m ³ /s)	Groundwater 2 Initial (m ³ /s)
		Groundwater 1 Coefficient (hr)	Groundwater 2 Coefficient (hr)
Routing	Muskingum-Cunge	Length (m)	Manning's n
		Slope (m/m)	Width (m)

Fonte: Adaptado de USACE, 2015b.

3.6.4.1 Canopy – Simple Canopy

O método *Simple Canopy* representa a parcela da precipitação que é interceptada pela vegetação arbustiva e árvores. Os parâmetros *Initial Storage (%)* e *Max Storage (mm)*

representam respectivamente a condição inicial de água armazenada na vegetação, ou seja, sua condição de umidade inicial, e a capacidade total de reservação por interceptação.

A capacidade de armazenamento de água varia com o tipo e estrutura da vegetação. Bennett et al., (2000) sugere valores para o cálculo da interceptação da água da chuva na vegetação. Estes valores podem ser observados no Quadro 7.

Quadro 7 - Armazenamento de água pela interceptação da precipitação para diferentes tipos de vegetação superficial.

Tipo de vegetação	Interceptação (mm)
Vegetação em geral	1,270
Gramíneas e árvores deciduais	2,032
Árvores que não perdem as folhas e árvores coníferas	2,540

Fonte: Adaptado de Bennett et. al., 2000.

Para cada subbacia da BHPM foram calculadas as interceptações de água pela vegetação superficial de forma ponderada, a partir do cruzamento das informações quantitativas de classes de uso da terra definidas no item 4.4 e das interceptações por tipo de vegetação. Com isso obteve-se um valor único ponderado que representa a interceptação média de água pela vegetação em cada subbacia.

Esta informação foi obtida a partir das técnicas de geoprocessamento aplicadas sobre o arquivo vetorial de uso da terra. Para fins de quantificação do armazenamento de água pela interceptação da precipitação para diferentes tipos de vegetação, a classe de uso da terra Agricultura foi considerada como Vegetação Geral, a classe Campo foi considerada como Gramíneas e árvores deciduais e as classes Reflorestamento e Mata Nativa foram consideradas como Árvores que não perdem as folhas e árvores coníferas.

3.6.4.2 Surface – Simple Surface

O método *Simple Surface* representa a parcela da precipitação que é retida nas depressões e micro rugosidades na superfície do solo. Os parâmetros *Initial Storage (%)* e *Max Storage (mm)* representam a condição inicial do preenchimento das depressões e rugosidades do solo, enquanto o *Max Storage (mm)* define a quantidade de água que pode ser armazenada na superfície do solo nas mesmas depressões e rugosidades do terreno.

Os armazenamentos de água nas depressões da superfície do solo e rugosidade do terreno variam de acordo com a declividade e tipos de cobertura do solo. Fleming (2002),

sugere valores padrões para o cálculo do armazenamento de água a partir da declividade e cobertura da superfície do terreno, para serem utilizados no processo de quantificação do parâmetro *Max Storage (mm)* de forma ponderada. Estes valores podem ser observados no Quadro 8.

Quadro 8 - Armazenamento de água nas depressões da superfície do solo para diferentes declividades e cobertura do terreno.

Descrição	Declividade (%)	Armazenamento (mm)
Pavimento ou área impermeabilizada	NA	3,18-6,35
Terreno plano e frouxo ou rugoso	0-5	50,8
Inclinação moderada a suave	5-30	6,35-12,70
Inclinação suave a íngreme	>30	1,02

Fonte: Adaptado de Fleming, 2002.

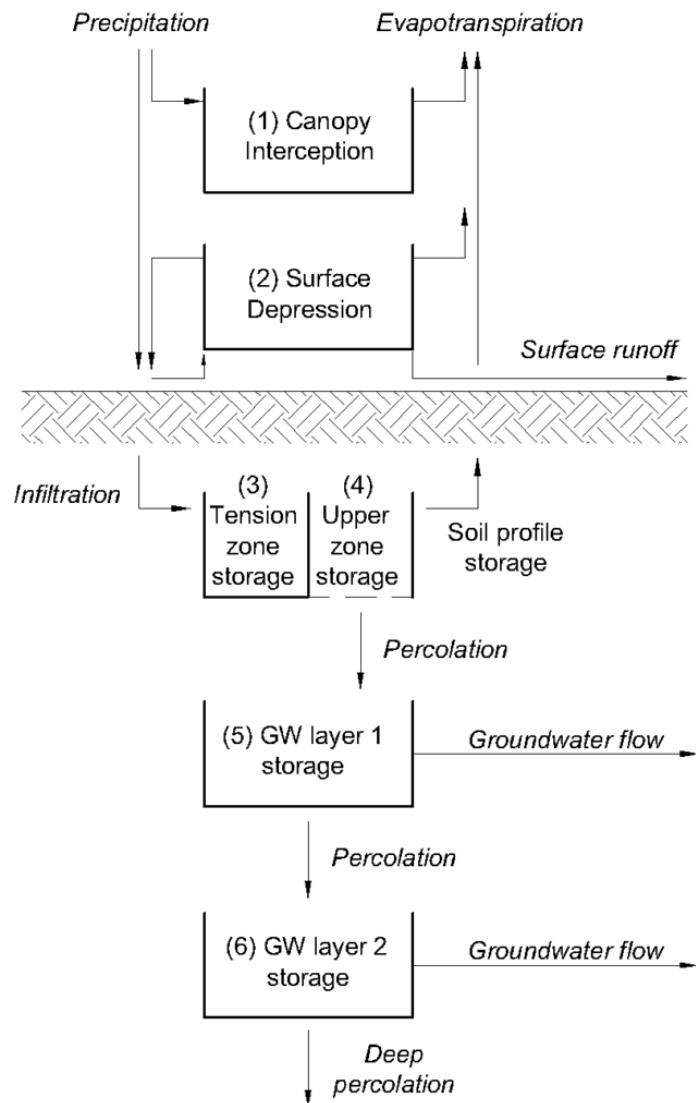
Considerando que a área impermeabilizada na BHPM tem pouca expressão quando comparada a área total da bacia, a estimativa do volume de armazenamento de água nas depressões da superfície do solo foi calculada para cada subbacia da BHPM a partir da declividade média da subbacia obtida conforme item 4.1.5.

3.6.4.3 Loss – Soil Moisture Accounting (SMA)

O método SMA é utilizado em modelagem de séries contínuas por ser completo na representação dos processos hidrológicos que ocorrem no solo. É o principal método utilizado neste estudo, pois possui alta representatividade em relação a hidrologia da área de estudo.

O algoritmo SMA usa uma série de reservatórios de armazenamento para simular o volume atual de água em cada componente terrestre do ciclo hidrológico. O modelo conceitual de funcionamento do método pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 - Esquema conceitual para aplicação do método SMA de modelagem hidrológica de séries contínuas.



Fonte: USACE, 2015b.

De forma geral, os reservatórios representados no modelo conceitual são *Canopy Storage* (1) (Precipitação interceptada pela vegetação em geral), *Surface Storage* (2) (água retida nas depressões e rugosidade da superfície), *Soil Storage* (3) e (4) (água armazenada nas primeiras camadas de solo) e *Groundwater Layer 1 Storage* (5) e *Groundwater Layer 2 Storage* (6) (variação no fluxo de vazão superficial e subterrânea).

O reservatório *Soil Storage* possui um compartimento denominado *Tension Zone Storage* (3), que representa o volume de água que fica retida nas partículas de solo. A outra parte deste reservatório, *Upper Zone Storage* (4), representa o volume de água que percola para o reservatório inferior e/ou que também pode se perder por evaporação.

A transferência de volumes de águas entre os reservatórios é regida pelos processos de infiltração e percolação, bem como pela pressão da água sobre ela mesma a partir da saturação dos reservatórios. A percolação profunda, ou *Deep Percolation*, representa o volume de água que é direcionado para o aquífero profundo, e que, portanto, não é computado na vazão.

Recentemente os autores (SINGH; JAIN, 2015) e (AWA; OU; RAUDE, 2018) publicaram seus estudos com modelagem hidrológica a partir da simulação de dados contínuos com o método SMA. Ambos os autores obtiveram bom desempenho em suas modelagens registrando índices de qualidade do modelo hidrológico considerados bons, tanto para a etapa de calibração quanto para a de validação do modelo hidrológico.

(BENNETT; PETERS, 2000), fazem uma descrição detalhada do método SMA em seus trabalhos. O primeiro faz uma análise conceitual sobre o método seguida pela aplicação prática do método SMA para duas bacias hidrográficas, uma bacia pequena ($1,92 \text{ km}^2$) com escoamentos reduzidos e localizada no estado do Texas nos Estados Unidos, e outra bacia com área mais significativa ($49,90 \text{ km}^2$) localizada no estado da Georgia, também nos Estados Unidos. O autor demonstrou por meio de seu estudo que o algoritmo obteve bom desempenho ao simular os processos hidrológicos para as diferentes bacias hidrográficas.

(FLEMING; NEARY, 2004) publicaram um estudo focado em duas formas de se estimar e determinar os parâmetros necessários a execução do método SMA, uma a partir de análise espaciais da bacia hidrográfica e rede de drenagem, executada em ambiente SIG, a outra foi feita a partir da análise gráfica e analítica de séries de dados históricos da bacia, principalmente das series de vazão, precipitação e evapotranspiração.

A aplicação prática foi realizada para uma bacia hidrográfica com $2,4 \text{ km}^2$. O autor concluiu que é possível parametrizar o método SMA e obter desempenho satisfatório para as duas formas testadas.

A parametrização de cada reservatório do modelo conceitual proposto pelo método *Soil Moisture Accounting* (SMA) é feita a partir de 14 parâmetros, que podem ser entendidos a partir do Quadro 9.

Quadro 9 - Parâmetros necessários a aplicação do método SMA e sua descrição.

Parâmetro	Descrição
Soil (%)	Condição inicial de saturação do solo
Groundwater 1 (%)	Condição inicial de saturação da primeira camada do solo
Groundwater 2 (%)	Condição inicial de saturação da segunda camada do solo
Max Infiltration (mm/hr)	Máxima taxa de infiltração possível no solo
Impervious (%)	Área impermeabilizada que converte a chuva em escoamento superficial sem perdas.
Soil Storage (mm)	Máxima quantidade de água que pode ser armazenada no solo
Tension Storage (mm)	Porção da quantidade de água armazenada no solo perdida somente por evapotranspiração
Soil Percolation (mm/hr)	Taxa de percolação do solo
GW 1 Storage (mm)	Volume de armazenamento de água na primeira camada do solo
GW 1 Percolation (mm/hr)	Taxa de Percolação que sai da primeira camada do solo e entra na segunda camada do solo
GW 1 Coeficiente (hr)	Tempo de atraso para escoamento subsuperficial contribuir para a vazão nos canais
GW 2 Storage (mm)	Volume de armazenamento de água na segunda camada do solo
GW 2 Percolation (mm/hr)	Taxa de Percolação na segunda camada do solo em direção ao aquífero
GW 2 Coeficiente (hr)	Tempo de atraso para escoamento subterrâneo contribuir para a vazão nos canais

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

A estimativa e determinação dos parâmetros do método SMA foi obtida a partir de análises gráficas e analíticas das séries de dados históricos de vazão, precipitação e evapotranspiração, bem como a partir da aplicação de técnicas de geoprocessamento em ambiente Sistema de Informações Geográficas (SIG), executadas para os arquivos espaciais da BHPM e seus atributos.

3.6.4.4 Transform – Clark Unit Hydrograph

O método Clark Unit Hydrograph está fundamentado na translação e atenuação do movimento da água na bacia hidrográfica. A translação representa o movimento da água em função do efeito da gravidade. A atenuação é resultado das forças de atrito e efeitos do armazenamento de água nos canais de forma que retardam o fluxo de água na bacia. Os parâmetros que configuram este método são o *Time of Concentration (hr)* e o *Storage Coefficient (mm)*. O primeiro ajusta o tempo de resposta da bacia entre a chuva efetiva, aquela que gera escoamento superficial, e a vazão no exutório. O segundo representa um índice do armazenamento temporário do excesso de precipitação na bacia hidrográfica à

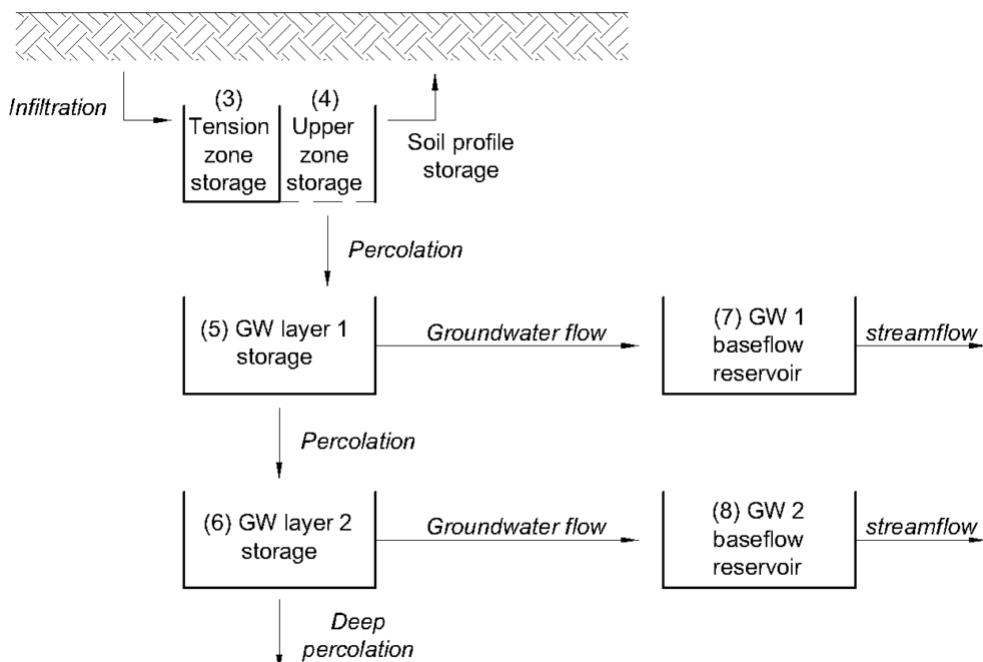
medida que este excesso de água é drenado para o ponto de saída.

3.6.4.5 Linear Reservoir

Este método de representação do fluxo de base, é utilizado em conjunto com o método do *Soil Moisture Accounting (SMA)*. O método considera que há dois reservatórios, um nas primeiras camadas do solo conectado em série ao reservatório *Groundwater Layer 1 Storage* do método SMA, e outro mais profundo também conectado em série ao *Groundwater Layer 2 Storage*. (Figura 16).

A vazão de saída do reservatório *Groundwater Layer 1 Storage* (5) é direcionada para o reservatório *Groundwater Layer 1 Baseflow Reservoir* (7), e a vazão do *Groundwater Layer 2 Storage* (6) é direcionada para o reservatório *Groundwater Layer 2 Baseflow Reservoir* (8). As saídas dos dois reservatórios do *Baseflow Reservoir* (7) e (8) são combinadas para formar o fluxo de base, ou seja, o escoamento subterrâneo da BHPM.

Figura 16 - Esquema conceitual para aplicação do método *Linear Reservoir* de modelagem hidrológica de séries contínuas em associação com o método SMA com destaque para os processos hidrológicos no interior do solo.



Fonte: USACE, 2015b.

Nesse contexto as variáveis *Groundwater Initial* (m^3/s) e *Groundwater Coefficient* (hr) aplicadas aos dois reservatórios, são parâmetros que regulam a contribuição

da vazão básica ou subterrânea, de forma quantitativa e temporal. O parâmetro *Groundwater Initial (m³/s)* determina a vazão inicial de contribuição da água do subsolo para o hidrograma de vazão no canal de drenagem.

O parâmetro *Groundwater Coefficient (hr)* representa o tempo em que a água fica retida no solo antes de começar a contribuir para a vazão no canal de drenagem. Como é medido em horas, dá uma noção do tempo de resposta da subbacia em termos de contribuição da vazão subterrânea para a vazão no canal de drenagem.

A vazão subterrânea tem grande relevância para manutenção dos recursos hídricos na bacia hidrográfica, em períodos de longa estiagem a reservação de água no subsolo garante um fluxo mínimo de vazão na rede de drenagem. Dessa forma, a parametrização correta dos métodos que simulam a contribuição subterrânea para a vazão nos canais tem participação significativa para o bom desempenho da modelagem hidrológica, principalmente nas vazões mínimas ou básicas.

3.6.4.6 Routing – Muskingum Cunge

O método *Muskingum Curnge* apesar de ser fácil de usar, requer alguns parâmetros difíceis de serem estimados ou determinados. Os parâmetros *Length (m)* comprimento do canal, *Slope (m/m)* declividade do canal, foram determinados automaticamente pelo HECGeoHMS durante a execução das ferramentas de geoprocessamento para elaboração do modelo conceitual para modelagem hidrológica.

O parâmetro *Width (m)*, largura da seção transversal do canal, foi definido a partir da análise visual em ambiente SIG sobre Ortofotos com resolução espacial de um metro datadas de 2012. Como a largura dos canais é variável ao longo dos seus trechos, obteve-se a média da largura para três pontos do canal principal de cada subbacia, representados pelo alto, médio e baixo curso do canal.

O parâmetro *Manning* ou coeficiente de *Manning*, representa a resistência que o leito do rio oferece ao escoamento da água em função da presença de rochas, areia e/ou a combinação dos dois. Para estimar este parâmetro usou-se o estudo realizado por BARNES (1967) que determinou e catalogou o coeficiente de *Manning* de 50 trechos de canais nos Estados Unidos. No estudo o autor descreve as características dos canais estudados como comprimento total do canal, área de drenagem a partir do ponto de análise, entre outros.

O autor também descreve como são as margens do canal e as condições de terreno com relação a ocorrência de vegetação, tipo de vegetação, e do fundo do canal com relação

a pedras, pedregulhos, areia e outros. Além disso também estão disponíveis no documento intitulado “*Roughness Characteristics of Natural Channels*” as fotografias das seções analisadas, que serviram de comparação para a estimativa dos coeficientes de *Manning* dos canais principais de drenagem das subbacias da BHPM modeladas neste estudo.

3.6.5 Calibração e validação do modelo HEC HMS

É importante destacar que, como qualquer modelo hidrológico, o HEC-HMS precisa ser calibrado e validado para que o seu grau de representatividade seja determinado por indicadores de qualidade.

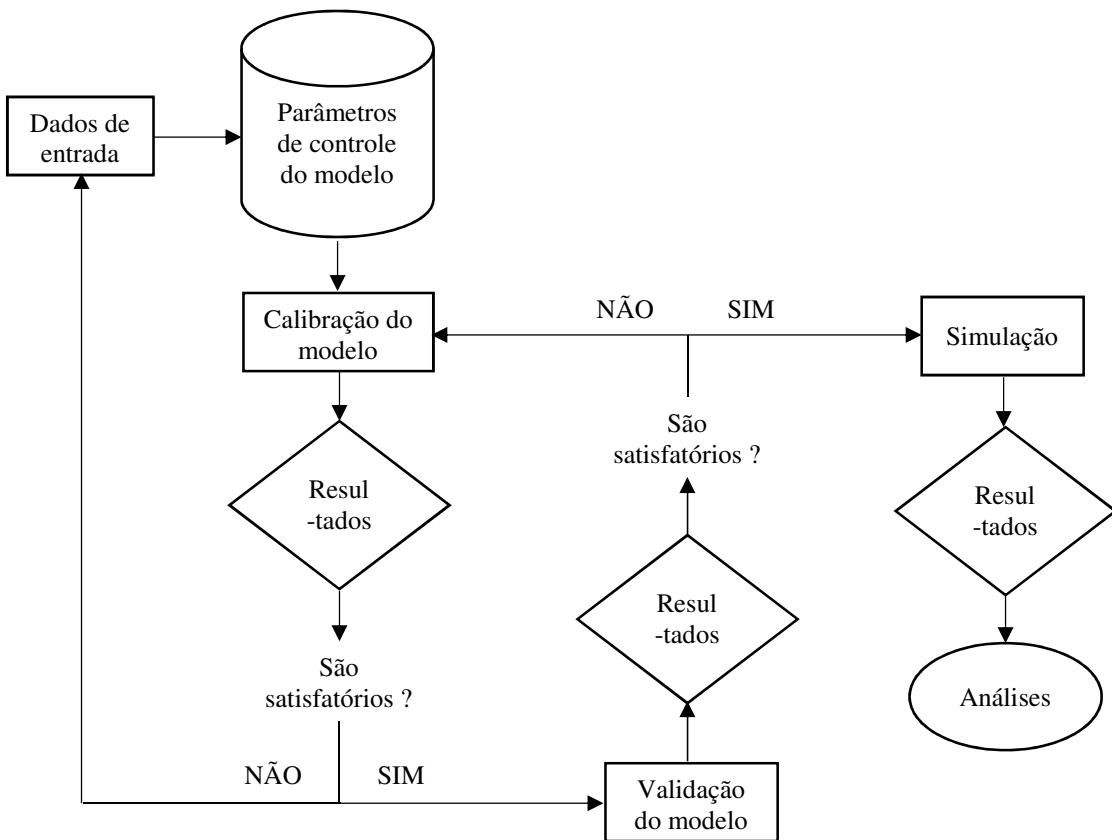
Na modelagem hidrológica, a calibração ajusta os valores dos parâmetros informados ao modelo, até que os resultados calculados coincidam com os valores da variável conhecida, e que se deseja simular para um determinado ponto de controle (COLLISCHONN; TUCCI, 2003). No caso deste estudo o ponto de controle é a estação fluviométrica Passo Marombas que monitora a vazão no rio Marombas.

A instrumentalização de bacias hidrográficas por meio da instalação de estações de monitoramento fluviométrico nos principais canais de drenagem, é importante para o processo de calibração e validação de modelos hidrológicos. A geração de séries contínuas de dados históricos de vazão e precipitação em diferentes pontos da bacia para o mesmo período e escala temporal, auxilia o processo de calibração uma vez que o modelo hidrológico pode ser calibrado simultaneamente em um ou mais pontos de controle.

A validação do modelo a partir de múltiplos pontos de controle, cada um representando o comportamento hidrológico de um subsistema do sistema principal, pode ser considerada uma estratégia conceitual para avaliar individualmente as partes do todo. Para o caso de um subsistema não representar o mundo real, a calibração deste subsistema pode ser feita separadamente do todo, utilizando o seu ponto de controle.

A calibração e validação do modelo hidrológico foi realizada para os períodos de 01/01/1977 a 31/12/1990 e 01/01/1992 a 31/12/1997 respectivamente. O ponto de controle utilizado para estas etapas da modelagem, com dados de vazão disponível, está localizado nas coordenadas 27°20'02" de latitude sul e 50°45'12" de longitude oeste, que corresponde ao local onde está instalada a estação fluviométrica Passo Marombas (código 71498000).

Figura 17 - Fluxograma conceitual para calibração e validação de um modelo hidrológico.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

O método utilizado para a calibração disponível no HEC-HMS foi o *Unvariante-Gradiente Algorithm*. Esse método faz sucessivas correções no parâmetro em um processo iterativo com objetivo otimiza-lo, melhorando sua influência no produto final do modelo, a série de vazão simulada. A equação de calibração é representada na Equação 1.

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k \quad (1)$$

Onde X^k representa o parâmetro otimizado com a função objetivo $f(X^k)$ submetido a iteração k . O valor para Δx^k representa o parâmetro otimizado numa determinada iteração k que está referenciada entre valores máximo e mínimo, definidos pelo usuário do modelo.

A função objetivo é aproximada pela série de Taylor. Equação 2.

$$f(x^{k+1}) = f(x^k) + (x^{k+1} - x^k) \cdot \frac{df(x^k)}{dx} + \frac{(x^{k+1} - x^k)^2}{2} \cdot \frac{d^2f(x^k)}{dx^2} \quad (2)$$

Onde $f(X^{k+1})$ é a função objetivo na iteração k .

Aqueles parâmetros de entrada dos métodos de cálculo dos processos hidrológicos que são muitas vezes difíceis de obter em campo, estes foram ajustados no processo de calibração com objetivo de dar-lhes o significado físico compatível com a realidade que representa.

A eficiência e desempenho do modelo foi testado a partir de indicadores de desempenho aplicados sobre as séries de dados de vazão simulados pelo modelo no período de calibração e validação do modelo hidrológico. Foram usados os principais indicadores de desempenho aplicados em estudos de modelagem hidrológica.

3.6.6 Indicadores de desempenho do modelo hidrológico

Os indicadores de desempenho do modelo hidrológico permitiram avaliar se a série de dados de vazão simulados pelo modelo hidrológico para o período de calibração e validação, está representando o mundo real quando comparada com dados de vazão observados para o mesmo período.

Os seguintes índices de desempenho e medidas estatísticas foram usados: Coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (NS), Proporção da Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) para o desvio padrão dos dados medidos (RSR), Coeficiente de Determinação (R^2) e Percentual de Tendência (PBIAS).

As suas expressões são apresentadas nas Equações 3, 4, 5 e 6 sendo a vazão observada representada pela Q_{obs} , a vazão simulada pelo modelo representada por Q_{sim} e os valores médios das vazões observadas e simuladas representados respectivamente como $Q_{m\acute{e}d_{obs}}$ e $Q_{m\acute{e}d_{sim}}$, sendo n o número de observações.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{sim_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{m\acute{e}d_{obs_i}})^2} \quad (3)$$

$$RSR = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{sim_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{m\acute{e}d_{obs_i}})^2}} \quad (4)$$

$$P_{BIAS} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n Q_{sim_i} - \sum_{t=1}^n Q_{obs_i}}{\sum_{t=1}^n Q_{obs_i}} \right) * 100 \quad (5)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{média_{obs_i}})(Q_{sim_i} - Q_{média_{sim_i}})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{média_{obs_i}})^2 * \sum_{i=1}^n (Q_{sim_i} - Q_{média_{sim_i}})^2} \quad (6)$$

A função objetivo coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (NS) é referência para avaliação de modelos hidrológicos (BRIGHENTI; BONUMÁ; CHAFFE, 2016). O método consiste em uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variância residual, ou seja, o ruído, em comparação com a variância dos dados mensurados.

O valor de NS pode variar de menos infinito a um. Um NS igual a 1 representa o valor ótimo e podemos considerar que o modelo reproduz fielmente o comportamento do sistema modelado, quando comparado aos dados observados. Valores de NS entre 0,75 e 1,00 remetem a um desempenho do modelo hidrológico classificado como Muito Bom. Valores de NS entre 0,65 e 0,70 e entre 0,50 e 0,65 consideram o modelo Bom e Satisfatório respectivamente. Valores de NS menores ou iguais a 0 indicam que o modelo não possui representatividade do sistema modelado e que a média dos dados observados pode fornecer previsão mais acertadas do que as simuladas pelo modelo hidrológico.

O indicador RSR, de acordo com Moriasi et al., (2007) padroniza a raiz do erro médio quadrático usando o desvio padrão das observações. O RSR pode variar de 0, considerado valor ótimo onde o modelo possui alto desempenho e representatividade do mundo real, até um grande valor positivo. Portanto quanto menor o RSR, menor a raiz do RMSE, consequentemente melhor será o desempenho do modelo hidrológico.

A função Percentual de Tendência (P_{BIAS}) tem valor ótimo próximos a 0, indicando boa precisão e representatividade do modelo. Valores positivos indicam tendência percentual do modelo de subestimação e valores negativos indicam tendência percentual de superestimação (GUPTA; SOROOSHIAN; YAPO, 1998, MORIASI et al., 2007). Para o Coeficiente de Determinação R^2 sua variação é de 0 a 1, onde 0 indica que não há correlação entre as variáveis testadas, e 1 representa correlação perfeita.

A utilização combinada dos indicadores de qualidade aumenta a capacidade de o modelador provar que seu modelo está dentro dos padrões de qualidade para representar o mundo real. Moriasi (2007), apresenta as faixas dos indicadores NS, RSM e PBIAS com suas respectivas classificações de qualidade. Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação dos índices de qualidade e desempenho do modelo hidrológico utilizados para aferir a representatividade do modelo hidrológico após a sua calibração e validação.

Qualidade do modelo	RSR	NS	PBIAS (%)
Muito bom	$0,00 < \text{RSR} < 0,50$	$0,75 < \text{NS} \leq 1,00$	$\text{PBIAS} < \pm 10$
Bom	$0,50 < \text{RSR} < 0,60$	$0,65 < \text{NS} \leq 0,70$	$\pm 10 < \text{PBIAS} < \pm 15$
Satisfatório	$0,60 < \text{RSR} < 0,70$	$0,50 < \text{NS} \leq 0,65$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} \leq \pm 2$
Insatisfatório	$\text{RSR} > 0,70$	$\text{NS} \leq 0,00$	$\text{PBIAS} \geq \pm 25$

Fonte: Adaptado de Moriasi et al., 2012.

3.7 CORREÇÃO DO VIÉS DAS SÉRIES DE DADOS PROJETADAS PELO MODELO CLIMÁTICO ETA-HADGEM2-ES

A correção do viés das séries de dados projetadas pelo modelo climático regionalizado ETA-HadGEM2-ES foi necessária, pois a comparação preliminar entre as séries de dados brutos do modelo climático para o período considerado como normal climatológica (1961 a 1990) e as séries de dados observados em estações de monitoramento para o mesmo período, revelou diferenças significativas entre as médias mensais simuladas pelo modelo e observadas nas estações de monitoramento.

A rigor, as séries de dados do modelo climáticos para o período da normal climatológica para a BHPM deveria ser semelhante aos dados observados nas estações de monitoramento. A diferença entre os dados projetados e os observados representa uma fonte de incerteza do modelo climático. Nesse sentido a correção do viés das séries de dados projetados pelo modelo climático são uma forma de reduzir tais incertezas.

Para isso, tanto a séries de dados projetados pelo modelo climático quanto as séries de dados observadas foram confrontados. Como resultado dessa análise obteve-se um fator de correção, que multiplicado na série de dados projetados pelo modelo, termo a termo, a aproxima dos dados observados.

Este fator é definido por mês, considerando a sazonalidade dos dados ao longo do ano, e foram determinados separadamente para as séries de dados de projeções climáticas do modelo para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. Oliveira; Pedrollo; Castro (2015), usaram este mesmo método de correção de viés, que usa a equação 7.

$$V_{corr_{i,k,j}} = V_{sim_{i,k,j}} * \left[\frac{V_{obs_k}(61 - 90)}{V_{sim_k}(61 - 90)} \right] \quad (7)$$

Onde: $V_{corr_{i,k,j}}$ é o valor da variável corrigida para o período de avaliação, no dia

i , no mês k , no ano j ; $V_{sim_{i,k,j}}$ é o valor da mesma variável simulada no mesmo período, dia, mês, ano; $V_{obs_k}(61 - 90)$ é a média observada da variável, no período da normal climatológica, no mês k ; $V_{sim_k}(61 - 90)$ é a média simulada da variável, no período da normal climatológica, no mês k . As variáveis submetidas a correção de viés foram a Evapotranspiração e a Precipitação.

Para precipitação foram utilizadas as estações pluviométricas Lebon Regis (código 2650019), Passo Marombas (código 2750009), Ponte Alta do Norte (código 2750010) e Ponte Rio Antinhas, todas influentes na área de estudo.

Para evapotranspiração foi utilizada a estação meteorológica da EPAGRI/CIRAM/INMET localizada no município de Lages, a cerca de 100 km, em linha reta, da área de estudo. A estação de Lages foi utilizada para correção do viés da variável evapotranspiração pois não se obteve séries de dados históricos de evapotranspiração para o período base, em quantidade e qualidade suficientes, próximos a área de estudo.

Apesar da distância entre a estação de Lages e a área de estudo, a altitude da estação meteorológica de Lages, de 937,73 metros, é comparável a altitude média da área de estudo, de 1.101,92 metros, sendo a altitude um dos fatores condicionantes da evapotranspiração.

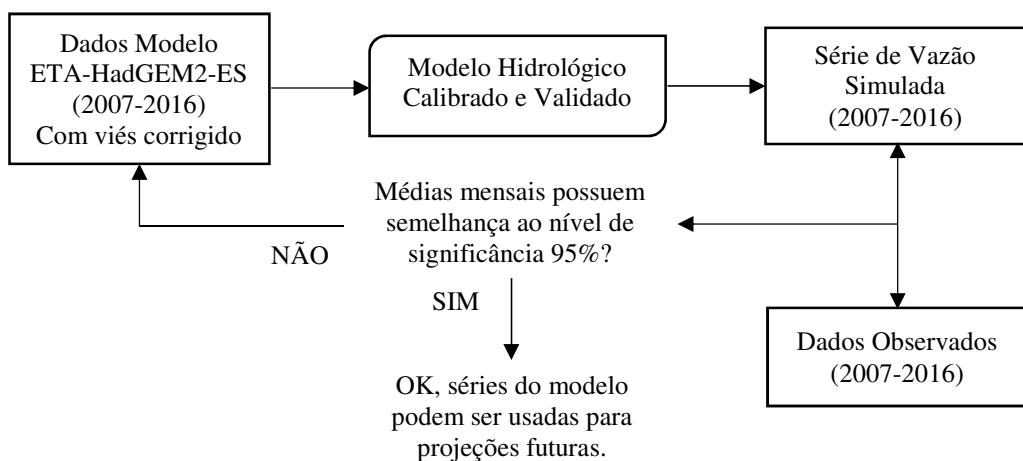
Os fatores de correção gerados a partir das análises feitas sobre as séries projetadas e observadas do período da normal climatológica (1961 a 1990), foram aplicados as séries de dados projetados pelo modelo climático para o futuro. A correção de viés é fundamental para que as séries de dados projetados pelo modelo ETA-HadGEM2-ES possuam maior representatividade em relação ao comportamento das variáveis para a área de estudo. Com isso minimiza-se as incertezas aderidas aos dados do modelo climático.

3.8 VALIDAÇÃO DO MODELO CLIMÁTICO ETA-HADGEM2-ES

A validação do modelo climático foi realizada a partir da verificação das vazões simuladas pelo modelo hidrológico para as séries de dados de projeções climáticas oriundo do modelo, já com viés corrigido, para um período de dez anos consecutivos, entre as datas de 01/01/2007 – 31/12/2016.

O esquema geral utilizado na validação do modelo climático pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 - Fluxograma do processo de validação dos dados gerados pelo modelo climático ETA-HadGEM2-ES.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

As séries de vazão simulada e de dados observados, ambos para o período entre 2007 e 2016, foram avaliadas pelo teste estatístico de Kolmogorov-Smirnov.

A partir do teste de Kolmogorov-Smirnov, verificou-se que as variâncias dos dados simulados e observados não diferem estatisticamente para o intervalo de confiança de 95%. Esta conclusão aumenta a certeza de que o modelo hidrológico associado aos dados do modelo climático pode produzir dados e informações relevantes para a avaliação dos impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos da BHPM.

3.9 AVALIAÇÃO DA HIDROLÓGICA FUTURA DA BACIA HIDROGRÁFICA PASSO MAROMBAS PARA OS CENÁRIOS DE PROJEÇÃO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A condição hidrológica futura da bacia hidrográfica Passo Marombas foi avaliada a partir da comparação entre as vazões observadas no período base (1977 – 1990) e as vazões projetadas para o período futuro (2020 – 2099) para os cenários de projeções climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5.

O período base é semelhante ao período de calibração do modelo hidrológico, este período foi selecionado por ser a série de dados históricos de vazão contínua mais longa possível, e sem falhas. As vazões projetadas para o futuro pelo modelo hidrológico, até o fim do século XXI, foram organizadas em futuros centrados: 2030 (2020 a 2039), 2050 (2040 a 2059), 2070 (2060 a 2079) e 2090 (2080 a 2099).

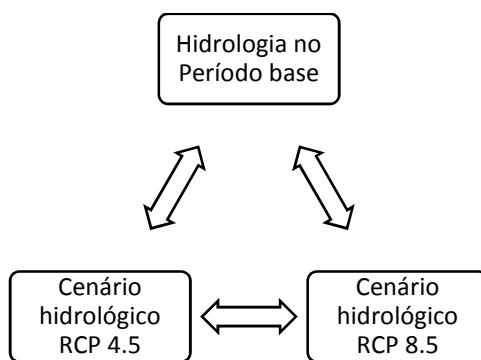
Para testar a hipótese de que a hidrologia da bacia hidrográfica Passo Marombas será alterada pelos impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos, as vazões de referências mínimas e máximas, bem como a vazão média de longo termo (Q_{MLT}) foram calculadas para o período base e para os períodos dos futuros centrados. As vazões simuladas no futuro foram comparadas entre si e com as do período base. (Figura 19)

A quantificação da variação nas vazões simuladas pelo modelo hidrológico para o futuro em relação ao período base, gerou as evidências necessárias para atestar que as mudanças climáticas impactam no comportamento das vazões de referência e na Q_{MLT} da BHPM. Esta comparação permitiu testar a hipótese levantada por este estudo. As vazões foram analisadas em escala diária e para o mesmo ponto de referência, o exutório da bacia hidrográfica Passo Marombas.

3.9.1 Vazões de referência e vazão média de longo termo analisadas

A vazão de referência representa a vazão que é igualada ou excedida em determinada porcentagem do tempo, obtida com base em série histórica de dados de vazão. As vazões de referência analisadas podem ser divididas em três grupos. O primeiro é o grupo das vazões mínimas, representado pelas vazões de referência Q_{98} , Q_{95} e Q_{90} , o segundo grupo, das vazões máximas é composto pelas vazões de referências Q_5 , Q_{10} e Q_{15} , o terceiro grupo contempla a vazão de referência Q_{50} ou vazão modal, e a vazão média de longo termo Q_{MLT} , que representa a vazão média para a série histórica analisada.

Figura 19 - Esquema conceitual sobre a comparação dos cenários hidrológicos simulados em relação a condição hidrológica da bacia no período base.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

As vazões de referência são calculadas a partir da Curva de Permanência de vazão,

trata-se de um gráfico que informa com que frequência a vazão de dada magnitude foi igualada ou excedida durante o período de dados de vazão analisados. A vazão média de longo termo é calculada pela média aritmética das vazões de toda a série histórica do período avaliado.

3.9.2 Balanço hídrico

O balanço hídrico simplificado também foi utilizado como método para avaliar a hidrologia da bacia hidrográfica Passo Marombas, tanto no período base como para os cenários futuros RCP 4.5 e RCP 8.4.

A equação do balanço hídrico está apoiada no princípio da conservação de massas (Equação da Continuidade), segundo Curtarelli; Silva; Ferreira (2010) a equação representa o volume de água armazenada na bacia, em milímetros, em função do balanço quantitativo entre o que entra e o que saí do sistema geográfico.

A principal entrada é a precipitação, em milímetros, sendo as saídas a evapotranspiração, também em milímetros, e a vazão no exutório da bacia convertida em volume para fins de aplicação da formula do balanço hídrico simplificado. (Equação 8)

$$BH = P - Q - ETP \quad (8)$$

Onde: BH corresponde a variação no armazenamento de água na bacia em milímetros, P corresponde a precipitação na bacia, em milímetros, Q representa a vazão convertida em milímetros e ETP a evapotranspiração real na bacia em milímetros.

A conversão da vazão no exutório da bacia, de metros cúbicos por segundo (m^3/s) para milímetros (mm) é fundamental para aplicação da formula do balanço hídrico. A conversão é feita a partir da formula. (Equação 9).

$$Q_{(mm)} = Q_{\left(\frac{m^3}{s}\right)} * \frac{2592000}{A} * 1000 \quad (9)$$

Onde: Q é a vazão em m^3/s , A corresponde a área da bacia hidrográfica Passo Marombas em m^2 , 2592000 é fator de conversão de segundos para mês e 1000 o fator de correção de metros para milímetros.

Para o período base, a precipitação foi calculada a partir da média aritmética do total precipitado, em mm. O método dos Polígonos de Thiessen foi utilizado para cálculo

da precipitação ponderada considerando as estações pluviométricas Lebon Régis, Ponte Alta do Norte, Passo Marombas e Ponte Rio Antinhos com os seus respectivos pesos 39,90%, 28,50%, 22,65% e 8,95 % em relação a área total da bacia hidrográfica Passo Marombas.

A vazão foi obtida a partir da série de dados históricos da estação fluviométrica Passo Marombas.

A evapotranspiração, em mm, foi calculada pelo método Penman-Monteith, conforme a Equação 10.

$$ETP = \frac{0,408 \cdot S \cdot (Rn - G) + \frac{\gamma \cdot 900 \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{T + 273}}{S + \gamma \cdot (1 + 0,34U_2)} \quad (10)$$

Onde: S é a declividade da curva de pressão de vapor na temperatura do ar, em $KPa/^{\circ}C$, RN é radiação líquida total diária em $MJ \cdot M^2/d$, G é o fluxo de calor no solo em $MJ \cdot M^2/d$, γ é a constante psicrométrica igual a 0,063 $KPa/^{\circ}C$, U_2 é velocidade do vento a 2 metros de altura do solo em m/s, e_s é a pressão de saturação de vapor em KPa, e_a é a pressão parcial de vapor em KPa e T a temperatura média do ar em $^{\circ}C$.

Para os cenários futuros, tanto para precipitação quanto para evapotranspiração, foram utilizadas as séries de dados projetados pelo modelo ETA-HadGEM2-ES com viés corrigido, em mm. A partir das series de dados de precipitação e evapotranspiração a vazão futura foi simulada pelo modelo hidrológico para os futuros centrados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERÍSTICAS MORFOMETRICAS E DA REDE DE DRENAGEM DOS SUBSISTEMAS DA BHPM

Os subsistemas modelados são classificados em bacias e interbacias hidrográficas (BACK, 2004). Os subsistemas W05, W07, W08, W09, W11, W14, W15, W16, W18 e W20 (Figura 10) são interbacias que recebem a vazão sistemas a montante.

Os subsistemas foram arranjados automaticamente a partir da rede de drenagem principal processada no HEC-GeoHMS. Cada canal ou trecho de canal possui sua área de contribuição hidrológica.

Os parâmetros morfométricos e da rede de drenagem calculados para cada um dos subsistemas podem ser analisados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Parâmetros morfométricos e da rede de drenagem dos subsistemas W01 a W10 da BHPM.

Parâmetro	Unid.	W01	W02	W03	W04	W05	W06	W07	W08	W09	W10
Área Total	Km ²	551,6	281,2	22,1	287,7	98,2	275,9	61,0	15,0	1,7	132,0
Perímetro	Km	210,7	152,0	36,9	131,0	92,6	131,6	61,5	27,9	9,9	103,9
Comp. Axial	Km	47,31	34,0	7,4	21,7	20,8	23,9	12,7	6,0	2,4	23,6
Largura média	Km	11,6	8,2	2,9	13,2	4,7	11,5	4,7	2,4	0,7	5,5
Coef. de compacidade	-	2,5	2,5	2,2	2,1	2,6	2,2	2,2	2,0	2,0	2,5
Fator de forma	-	0,2	0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,3	0,4	0,3	0,2
Altura maxima	m	1431,6	1452,5	988,5	1366,0	1258,1	1157,2	1061,7	1006,7	896,8	1184,9
Altura mínimaa	m	841,3	841,3	829,2	965,0	856,9	869,5	856,9	829,2	825,6	825,6
Comp. do canal principal	Km	94,2	75,8	10,1	48,4	52,8	37,0	21,1	11,8	3,2	42,2
Sinuosidade	Km	1,9	2,2	1,3	2,2	2,5	1,5	1,6	1,9	1,3	1,7
Cota máxima do canal principal	m	1326,0	1385,0	944,3	1295,5	1254,7	1028,9	1045,2	1000,7	839,7	1146,5
Cota mínima do canal principal	m	841,3	841,3	829,2	965,0	856,9	869,5	856,9	829,2	825,6	825,6
Declividade canal principal	%	5,1	7,1	11,3	6,8	7,5	4,3	8,9	14,5	4,3	7,6
Comprimento total dos canais	km	1246,7	611,7	53,8	675,1	224,4	464,3	155,9	43,0	6,6	191,4
Densidade de drenagem	km/ km ²	2,2	2,1	2,4	2,3	2,2	1,6	2,5	2,8	3,7	1,4
Tempo de concentração	hr	3,9	3,2	0,9	2,5	2,6	2,3	1,5	0,9	0,5	2,3
Relevo total	m	590,3	611,2	159,3	401,0	401,1	287,6	204,7	177,4	71,2	359,2

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Tabela 4 - Parâmetros morfométricos e da rede de drenagem dos subsistemas W11 a W20 da BHPM.

Parâmetro	Unid.	W11	W12	W13	W14	W15	W16	W17	W18	W19	W20
Área	Km ²	110,1	513,7	363,0	208,0	130,1	121,5	426,3	7,2	65,3	5,6
Perímetro	Km	91,9	207,7	151,8	114,6	91,7	87,7	157,5	17,6	68,1	14,7
Comp. Axial	Km	20,6	44,7	30,3	22,9	20,0	17,2	28,3	4,8	17,4	3,4
Largura média	Km	5,3	11,4	11,9	9,0	6,5	7,0	15,0	1,5	3,7	1,6
Coef. de compacidade	-	2,4	2,5	2,2	2,2	2,2	2,2	2,1	1,8	2,3	1,7
Fator de forma	-	0,2	0,2	0,3	0,4	0,3	0,4	0,5	0,3	0,2	0,4
Altura máxima	m	1048,4	1295,5	1304,7	1133,3	1069,6	1037,0	1146,4	894,0	1007,7	899,6
Altura mínima	m	786,9	849,5	884,1	849,5	786,9	753,4	753,4	753,4	753,4	751,4
Comp. do canal principal	Km	29,9	108,8	66,3	36,0	32,8	33,9	61,9	4,7	27,2	3,5
Sinuosidade	Km	1,4	2,4	2,1	1,5	1,6	1,9	2,1	1,0	1,5	1,0
Cota máxima do canal principal	m	1044,1	1294,6	1193,5	1091,5	1068,8	1032,9	1108,4	879,3	995,6	847,0
Cota mínima do canal principal	m	786,9	849,5	884,2	849,5	786,9	753,4	753,4	753,4	753,4	751,4
Declividade do canal principal	%	8,6	4,0	4,6	6,7	8,5	8,2	5,7	26,2	8,8	27,0
Comprimento total dos canais	km	240,1	1248,3	935,9	567,5	299,8	297,8	840,8	17,2	138,4	11,7
Densidade de drenagem	km/ km ²	2,1	2,4	2,5	2,7	2,3	2,4	1,9	2,3	2,1	2,0
Tempo de concentração	hr	1,8	4,4	3,2	2,1	1,9	2,0	3,0	0,5	1,7	0,4
Relevo total	m	261,0	445,9	420,6	283,7	282,7	283,6	393,0	140,6	254,3	148,1

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

4.2 EVOLUÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA

A análise da evolução do uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica entre os anos 1986, 2002 e 2017 resultou na ampliação em mais de 17% da área agrícola, em contraste com a redução de 16% da área de mata nativa. A classe campo também reduziu consideravelmente, cerca de 23%, enquanto a classe reflorestamento avançou aproximadamente 21% entre 1986 e 2017.

O avanço das classes de uso da terra de origem antrópica sobre as classes de uso da terra de origem natural, como mata nativa e campos nativos, é um processo identificado por autores em muitos estudos. Estas alterações, quando significativas, interferem no ciclo hidrológico da área que teve a condição de cobertura do solo alterada.

A evolução da classe florestas sobre a classe campos pode, por exemplo, influenciar na evapotranspiração, que é uma das principais saídas do sistema geográfico bacia hidrográfica. A redução das áreas de mata nativa também pode influenciar no balanço hidrológico, uma vez que há uma tendência de redução do armazenamento e interceptação

de água na bacia em função da perda de vegetação natural.

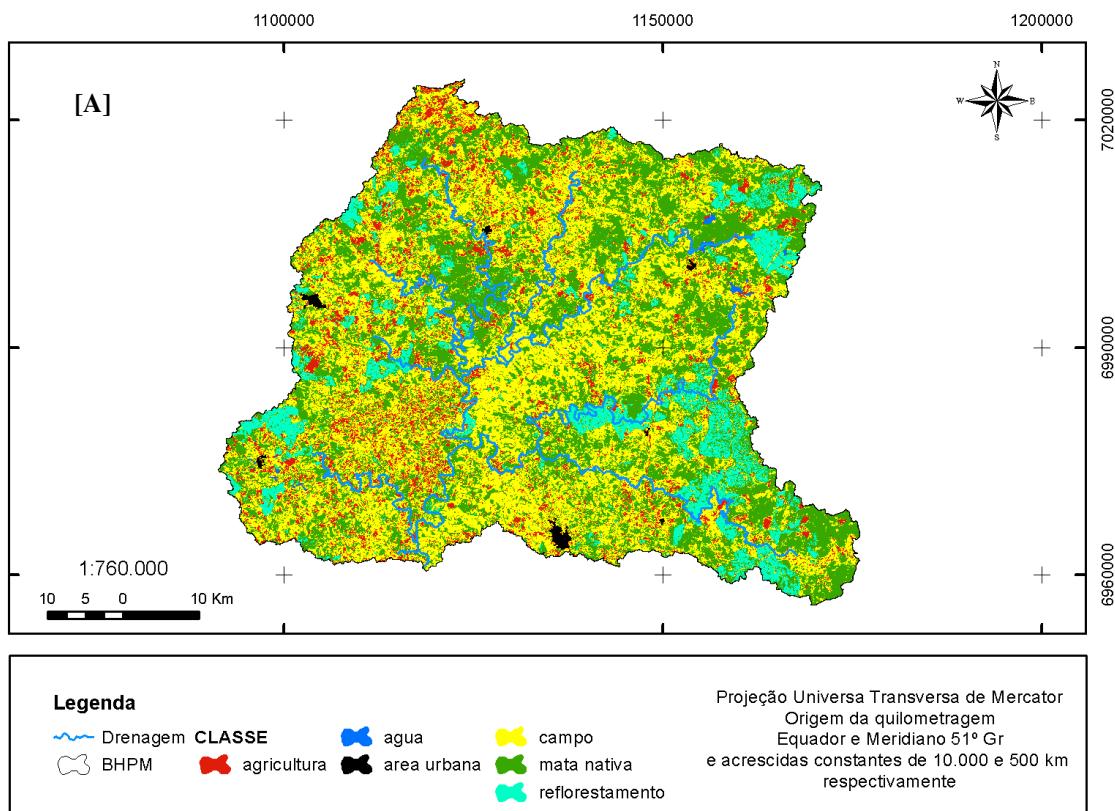
Os valores absolutos e percentuais das áreas das classes de uso da terra nos anos 1986, 2002 e 2017 assim como a variação nos valores entre estes anos, podem ser observados na Tabela 5. A espacialização das classes de uso do solo na bacia hidrográfica Passso Marombas para os anos supracitados pode ser observada nas Figuras 20 e 21.

Tabela 5 - Evolução do uso e ocupação da terra na BHPM entre os anos 1986, 2002 e 2017.

Classe de uso da terra	Área (km ²)			Área (%)			Variação da área (%)		
	1986	2002	2017	1986	2002	2017	1986 a 2002	2002 a 2017	Acumulada 1986 a 2017
Área Urbana	13,55	24,54	31,40	0,37	0,67	0,85	0,30	0,19	0,49
Água	13,18	24,18	20,40	0,36	0,66	0,55	0,30	-0,10	0,20
Agricultura	364,66	762,12	1016,50	9,91	20,72	27,63	10,81	6,92	17,72
Campo	1534,77	1197,95	694,46	41,72	32,57	18,88	-9,16	-13,69	-22,84
Mata Nativa	1441,78	1244,31	846,69	39,20	33,83	23,02	-5,37	-10,81	-16,18
Reflorestamento	308,65	423,64	1067,27	8,39	11,52	29,01	3,13	17,50	20,62

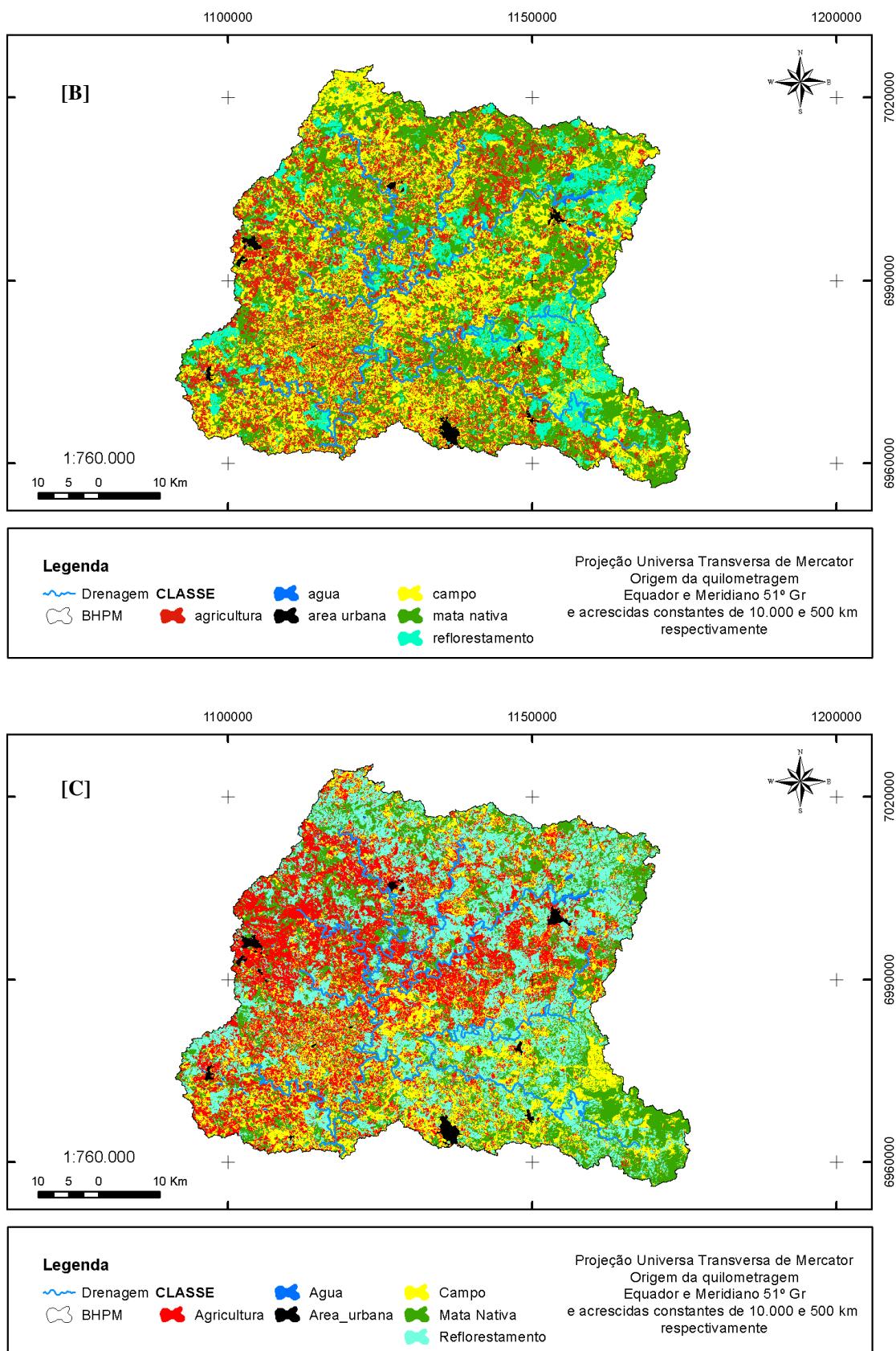
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Figura 20 - Uso e ocupação da terra na BHPM para o ano de 1986 [A].



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Figura 21 - Uso e ocupação da terra na BHPM para o ano de 2002 [B] e 2017 [C].



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Considerando o exposto acima, verificou-se que a BHPM possui alterações significativas no seu uso e ocupação da terra, ao longo do período analisado, e que tais alterações corroboram para a alteração da hidrologia da bacia.

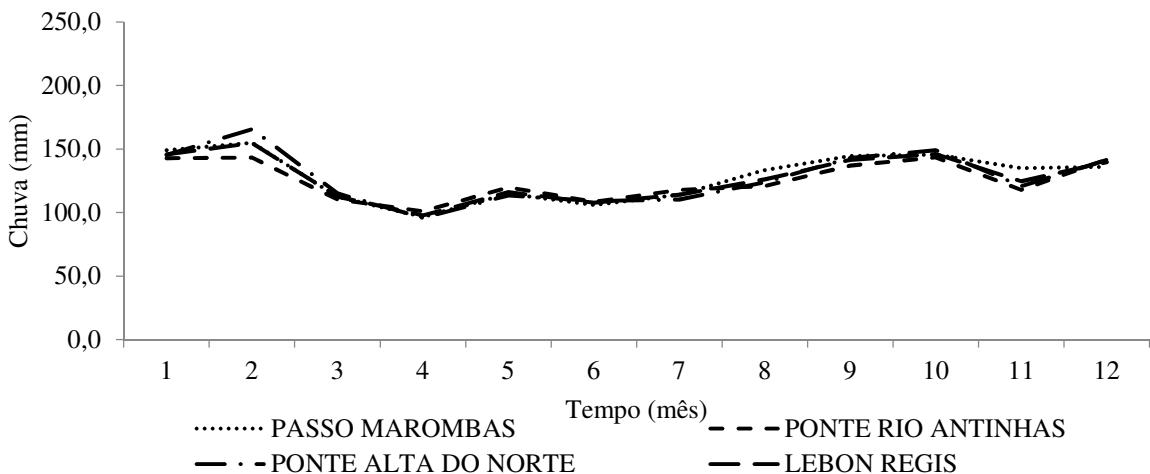
4.3 ANÁLISE DAS SÉRIES DE DADOS PROJETADOS PELO MODELO CLIMÁTICO

4.3.1 Diferença entre as séries de dados projetados pelo modelo ETA-HadGEM2-ES e observadas nas estações pluviométricas utilizadas no estudo

A correção do viés das séries de dados projetados pelo modelo climático objetiva reduzir as incertezas dos dados utilizados na modelagem hidrológica. A necessidade da aplicação da técnica de correção de viés ficou evidente na análise exploratória dos dados do modelo climático e dados observados nas estações pluviométricas utilizadas.

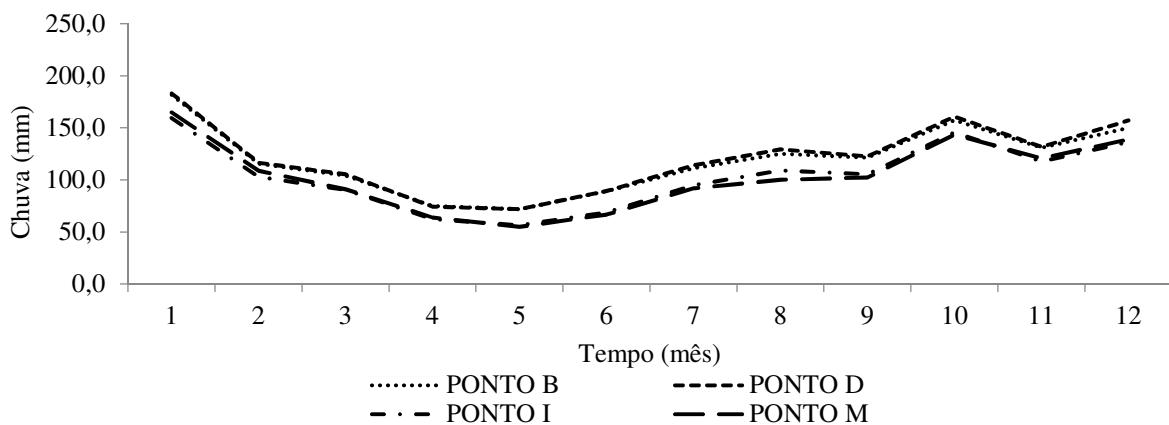
A comparação gráfica (Gráficos 3 e 4) entre a média da chuva mensal total do período da normal climatológica (1961 a 1990) para as estações de monitoramento pluviométrico Passo Marombas, Ponte Rio Antinhos, Ponte Alta do Norte e Lebon Régis, e seus respectivos pontos equivalentes da malha de pontos do modelo climático, Pontos B, D, I e M, confirmou a necessidade da correção do viés nas projeções do modelo climático para aproximar o comportamento dos dados projetados pelo modelo climático ao dos dados observados nas estações instaladas na BHPM.

Gráfico 3 - Média da Chuva total mensal no período da normal climatológica, de 1961 a 1990, para as estações pluviométricas utilizadas no estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Gráfico 4 - Média da Chuva total mensal no período da normal climatológica, de 1961 a 1990, para os pontos da malha de pontos com dados de projeção do modelo climático ETA-HadGEM2-ES equivalentes as estações pluviométricas utilizadas no estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

4.3.2 Fatores de correção utilizados para correção do viés das séries de dados projetados pelo modelo ETA-HadGEM2-ES

Os fatores de correção utilizados para correção do viés das séries de dados projetados pelo modelo climático são resultado da razão entre as médias da chuva total mensal no período da normal climatológica, 1961 a 1990, de cada estação pluviométrica e seu ponto equivalente da malha de pontos do modelo climático. (Tabela 6).

Tabela 6 - Média da Chuva total mensal no período da normal climatológica, de 1961 a 1990, para as estações pluviométricas utilizadas no estudo e seus os pontos equivalentes da malha de pontos com dados de projeção do modelo climático ETA-HadGEM2-ES.

Ponto modelo climático/estação Pluviométrica	Média da chuva total mensal de 1961 a 1990 (mm)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Passo Marombas	149,3	155,0	112,4	96,6	114,8	106,1	114,1	133,5	144,6	145,7	135,1	136,1
Ponte Rio Antinhas	142,8	143,3	110,2	101,1	120,0	108,7	118,0	121,0	137,2	143,5	117,9	141,8
Ponte Alta do Norte	145,3	165,8	115,2	95,9	113,5	109,0	110,3	123,8	143,0	149,0	120,8	141,6
Lebon Regis	145,8	154,7	112,6	97,9	116,1	107,9	114,1	126,1	141,6	146,1	124,6	139,8
B	181,9	115,5	104,1	75,2	72,0	89,3	111,5	125,3	121,5	157,5	131,1	150,2
D	183,2	116,6	105,6	74,3	72,0	89,5	114,3	129,4	122,7	160,9	132,0	157,2
I	159,5	103,1	90,4	62,3	56,6	69,0	95,2	109,1	105,7	145,8	117,7	136,7
M	164,9	108,9	91,2	63,9	55,1	66,8	91,9	100,4	102,3	143,5	120,9	138,9

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Os fatores de correção utilizados para remover o viés dos dados das séries de dados projetados pelo modelo ETA-HadGEM2-ES podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7 - Fatores de correção utilizados para remoção do viés das séries de dados projetados pelo modelo ETA-HadGEM2-ES.

Estação Pluviométrica/ Ponto modelo climático	Fator de correção											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Passo Marombas/B	0,8	1,3	1,1	1,3	1,6	1,2	1,0	1,1	1,2	0,9	1,0	0,9
Ponte Rio Antinhas/D	0,8	1,2	1,0	1,4	1,7	1,2	1,0	0,9	1,1	0,9	0,9	0,9
Ponte Alta do Norte/I	0,9	1,6	1,3	1,5	2,0	1,6	1,2	1,1	1,4	1,0	1,0	1,0
Lebon Regis/M	0,9	1,4	1,2	1,5	2,1	1,6	1,2	1,3	1,4	1,0	1,0	1,0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Os fatores de correção com valores abaixo de 1,0 significam que as séries de dados projetados pelo modelo climático ETA-HadGEM2-ES estão superestimando a série de dados observado, neste caso a correção do viés diminui a magnitude das chuvas projetadas pelo modelo climático.

Os fatores de correção com valores iguais a 1,0 significam que os dados das projeções climáticas não precisam ser corrigidos. Os fatores de correção com valores superiores a 1,0 significam que as séries de dados projetados pelo modelo climático estão subestimando os dados observados e, portanto, precisam ser incrementados.

O mês de janeiro foi o que apresentou necessidade geral de redução na magnitude chuvas projetadas pelo modelo, na ordem de 20% e 10%. A redução pode ser explicada pelo mês de janeiro apresentar chuvas convectivas com grandes volumes, que em função das mudanças climáticas pode ter sido intensificada nas projeções do modelo climático.

A maioria dos meses apresentou necessidade de incremento nas chuvas do modelo climático, com incrementos na ordem de 110% para o mês de maio no ponto de projeção B do modelo climático, equivalente a estação de monitoramento Lebon Regis.

4.3.3 Séries de dados projetados pelo modelo ETA-HadGEM2-ES

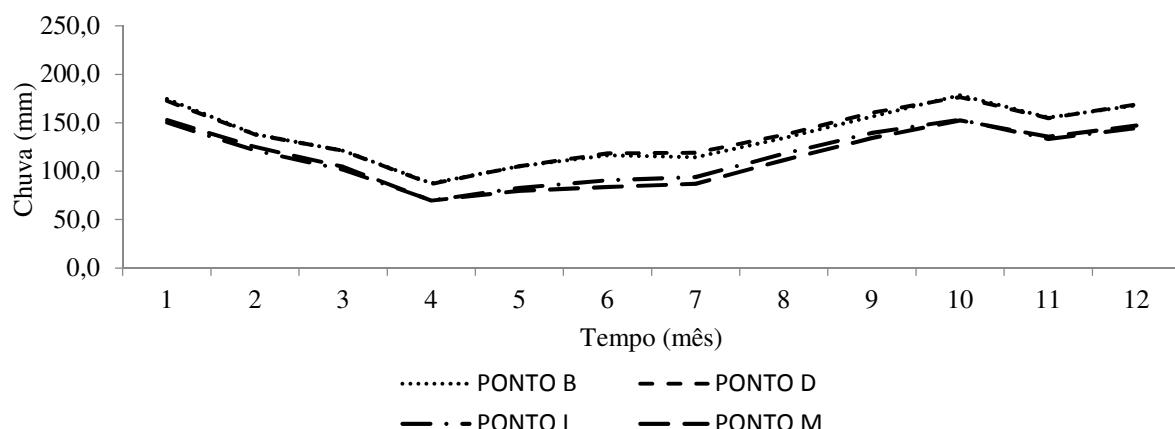
A aplicação dos fatores de correção termo a termo das séries de dados projetados pelo modelo para remoção do viés, fez os gráficos das médias da chuva total mensal para o período projetado pelo modelo de 2007 a 2099 para os cenários de projeções climáticas

RCP 4.5 e RCP 8.5, mudarem de comportamento.

Ao comparar o gráfico da série de dados projetados pelo modelo sem a correção do viés (Gráficos 5 e 6) com o gráfico da série de dados observados no período da normal climatológica (Gráfico 3), é possível identificar que a série de dados projetados não apresenta movimento sazonal de subidas e decidas verificado na série de dados observados.

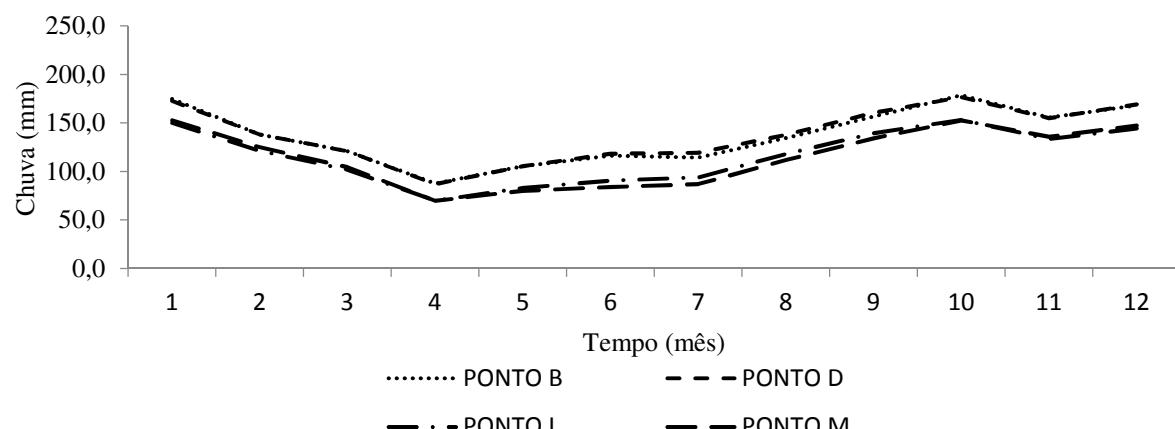
O comportamento gráfico da série de dados projetados pelo modelo para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, sem a correção do viés, se parece com uma parábola, indicando que as chuvas médias mensais atingem menor valor em meados abril, aumentando até o fim do ano. (Gráficos 5 e 6).

Gráfico 5 - Média da Chuva total mensal da série de dados projetados pelo modelo ETA-HadGEM2-ES no período de 2007 a 2099 para o cenário de mudanças climáticas RCP 4.5 sem viés corrigido.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Gráfico 6 - Média da Chuva total mensal da série de dados projetados pelo modelo ETA-HadGEM2-ES no período de 2007 a 2099 para o cenário de mudanças climáticas RCP 8.5 sem viés corrigido.

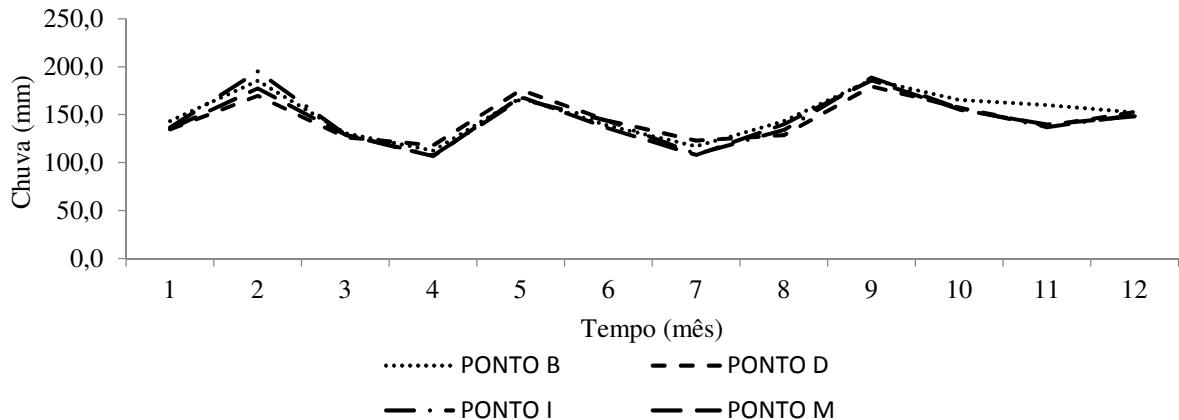


Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

O comportamento parabólico da série de dados projetados pelo modelo é corrigido para um movimento sazonal bem definido, a partir da correção do viés. (Gráfico 7 e 8). O comportamento gráfico da média da chuva total mensal com viés corrigido se assemelha ao gráfico da mesma variável medida nas estações pluviométricas para o período da normal climatológica (Gráfico 3), sendo a diferença a intensidade do comportamento sazonal, com picos de subida e descida bem definidos ao longo tempo.

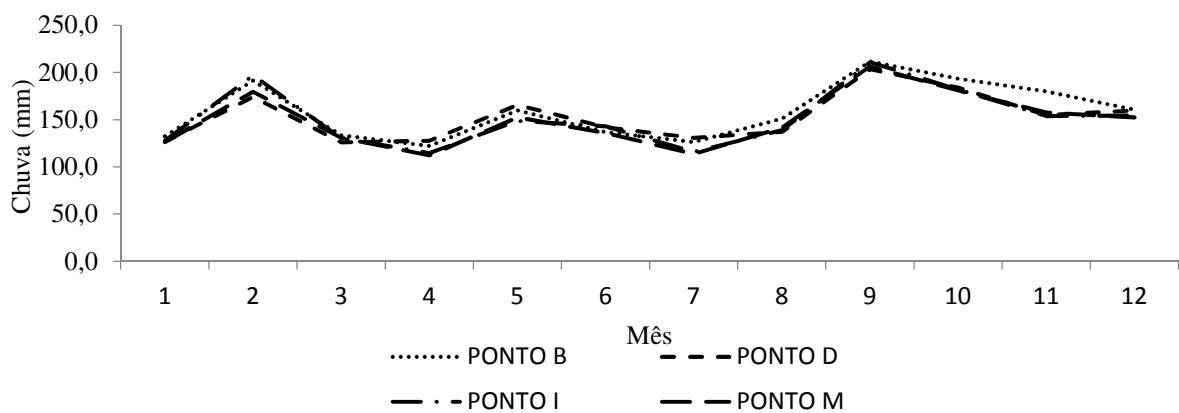
Este comportamento pode ser uma evidência de que as chuvas são afetadas pelas mudanças climáticas no sentido de haver mais eventos extremos de chuva com grandes volumes precipitados, bem como eventos prolongados de estiagem.

Gráfico 7 - Média da Chuva total mensal da série de dados projetados pelo modelo ETA-HadGEM2-ES no período de 2007 a 2099 para o cenário de mudanças climáticas RCP 4.5 com viés corrigido.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Gráfico 8 - Média da Chuva total mensal da série de dados projetados pelo modelo ETA-HadGEM2-ES no período de 2007 a 2099 para o cenário de mudanças climáticas RCP 8.5 com viés corrigido.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

4.4 ANÁLISE DO PRINCIPAL MÉTODO DE CALCULO DOS PROCESSOS HIDROLÓGICOS

Para cada subsistema foram definidos os valores iniciais de cada parâmetro dos métodos de cálculo definidos no modelo para representar os processos hidrológicos. Estes valores iniciais foram obtidos a partir da aplicação de métodos analíticos, técnicas de geoprocessamento aplicadas a arquivos vetoriais e matriciais e análises gráficas das séries de dados históricos de chuva e vazão registrados nas estações pluviométricas e fluviométricas utilizadas no estudo.

Estes parâmetros representam valores iniciais do processo de calibração do modelo, sendo otimizados durante a calibração para que obtenham a melhor resposta possível em relação ao processo hidrológico que o mesmo representa. Durante a otimização dos valores dos parâmetros dos métodos de cálculos, os valores foram acompanhados e regulados por meio de instrumentos do modelo hidrológico, com a definição de limites superiores e inferiores para os parâmetros a serem otimizados, tendo como objetivo garantir o significado físico destes parâmetros e sua representatividade da realidade.

A experiência e conhecimento do modelador é um recurso importante na análise dos parâmetros otimizados pelo modelo no processo de calibração. Sendo o modelador um hidrólogo, seu conhecimento técnico e capacidade cognitiva tem peso relevante no processo de análise crítica dos valores otimizados pelo modelo, bem como na definição dos limites máximos e mínimo estabelecidos pelo modelador para que o parâmetro seja ajustado. Nos casos onde foi percebida a superestimação ou subestimação do valor de um determinado parâmetro, o ajuste manual foi realizado no processo de calibração para garantir que aquele parâmetro ou conjunto de parâmetros tenha significado físico.

4.4.1 Método soil moisture accounting (SMA)

Entre os métodos de cálculo dos processos hidrológicos, o método *Soil Moisture Accounting* (SMA), é o método com maior importância e influência sobre o produto da modelagem, devido a quantidade significativa de parâmetros a serem fornecido ao modelo, somando ao todo 14 parâmetros. Durante a calibração do modelo hidrológico o método SMA teve ampla participação por seus parâmetros influenciarem diferentes processos do ciclo hidrológico como p. e. o escoamento superficial e subterrâneo, retenção e detenção superficial, infiltração e percolação e armazenamento subterrâneo.

Do conjunto de parâmetros do SMA alguns se destacaram pelo fato de o modelo hidrológico apresentar alta sensibilidade, influenciando diretamente na simulação do modelo hidrológico. Os parâmetros do método SMA e seus valores otimizados podem ser observado nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 - Parâmetros do método de SMA e seus respectivos valores otimizados pelo modelo HEC-HMS durante o processo de calibração para os subsistemas W01 a W10.

Parâmetro	Valores otimizados dos parâmetros do método SMA									
	W01	W02	W03	W04	W05	W06	W07	W08	W09	W10
Soil (%)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Groundwater 1 (%)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Groundwater 2 (%)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Max Infiltration (mm/hr)	6,3	4,5	6,6	4,1	7,5	4,8	7,4	7,3	7,2	6,3
Impervious (%)	0,2	0,0	0,0	0,3	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Soil Storage (mm)	40,2	50,8	45,0	46,0	51,8	59,9	50,7	45,0	45,0	40,0
Tension Storage (mm)	6,0	9,0	8,1	6,9	8,0	6,9	9,1	11,1	10,0	13,8
Soil Percolation (mm/hr)	4,0	4,0	5,0	4,0	5,8	4,1	7,4	9,0	9,0	7,5
GW 1 Storage (mm)	13,3	13,0	16,3	19,7	25,0	19,6	29,6	35,0	35,3	31,5
GW 1 Percolation (mm/hr)	1,5	1,5	1,2	1,0	2,7	1,0	1,8	2,0	3,0	1,5
GW 1 Coeficiente (hr)	63,3	63,3	67,8	65,0	51,1	86,0	45,3	30,0	43,2	63,3
GW 2 Storage (mm)	30,0	44,1	57,5	67,5	50,1	77,6	49,0	86,3	75,8	72,8
GW 2 Percolation (mm/hr)	0,2	0,2	0,7	0,7	0,7	0,7	1,1	1,0	1,5	1,1
GW 2 Coeficiente (hr)	90,3	135,0	100,0	88,2	96,3	69,0	79,2	59,3	50,0	49,0

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2018.

Tabela 9 - Parâmetros do método de SMA e seus respectivos valores otimizados pelo modelo HEC-HMS durante o processo de calibração para os subsistemas W11 a W20.

Parâmetro	Valores otimizados dos parâmetros do método SMA									
	W11	W12	W13	W14	W15	W16	W17	W18	W19	W20
Soil (%)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Groundwater 1 (%)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Groundwater 2 (%)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Max Infiltration (mm/hr)	5,7	5,0	2,7	4,5	3,2	11,2	3,7	11,3	5,5	7,5
Impervious (%)	0,0	0,1	0,0	1,0	3,3	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0
Soil Storage (mm)	57,5	43,2	44,1	32,6	53,5	65,6	42,5	74,4	54,6	42,4
Tension Storage (mm)	11,4	11,9	11,5	13,8	17,8	18,0	16,1	14,1	9,9	14,0
Soil Percolation (mm/hr)	8,1	6,8	5,8	9,0	7,0	8,1	7,8	15,1	12,0	15,0
GW 1 Storage (mm)	40,6	29,4	19,6	24,3	36,3	43,9	51,8	45,2	38,2	57,7

Parâmetro	Valores otimizados dos parâmetros do método SMA									
	W11	W12	W13	W14	W15	W16	W17	W18	W19	W20
GW 1 Percolation (mm/hr)	1,7	1,1	1,3	3,1	3,0	2,9	3,1	4,6	3,5	3,5
GW 1 Coeficiente (hr)	51,8	63,3	74,8	63,3	49,5	43,5	43,2	30,0	44,1	29,4
GW 2 Storage (mm)	120,0	74,8	57,5	59,4	65,0	120,0	112,5	85,8	78,5	85,8
GW 2 Percolation (mm/hr)	1,5	0,9	0,5	0,2	0,7	1,3	1,7	1,6	1,2	1,1
GW 2 Coeficiente (hr)	50,0	90,0	100,0	120,0	59,7	60,0	58,8	39,8	40,0	36,0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Awa; ou; Raude, (2018) avaliaram a sensibilidade do modelo HEC-HMS em relação aos parâmetros do método SMA. De acordo com os autores os parâmetros GW 1 Percolation (mm/hr), GW 1 Coeficiente (hr), GW 1 Storage (mm) e Tension Storage (mm) são os quatro parâmetros em ordem de sensibilidade em relação ao volume de escoamento. Sobre os picos de vazão, o autor destaca que os parâmetros Impervious (%), GW 1 Storage (mm), GW 1 Percolation (mm/hr) e GW 1 Coeficiente (hr) são os mais sensíveis.

Singh; Jain, (2015), também aplicaram o método SMA para modelagem hidrológica de séries contínuas e em sua avaliação da sensibilidade dos parâmetros do método. Os autores concluíram que o parâmetro Soil Storage (mm) foi o mais sensível no processo de calibração do modelo, enquanto o parâmetro GW 2 Percolation (mm/hr) foi o menos sensível.

Singh; Jain, (2015), relacionaram os parâmetros do método SMA por ordem de sensibilidade. De acordo com os autores os quatro primeiros parâmetros mais sensíveis são: Soil Storage (mm), Soil Percolation (mm/hr), Max Infiltration (mm/hr) e Impervious (%). Os últimos dois parâmetros considerados menos sensíveis relacionados pelos autores são os parâmetros referente as camadas mais profundas do solo, são eles: GW 2 Coeficiente (hr) e o GW 2 Percolation (mm/hr).

As conclusões sobre a sensibilidade do modelo em relação a variação dos parâmetros do método SMA obtida pelos autores supracitados se confirmaram neste estudo. Ficou evidente que o método possui alto potencial para simulação dos processos hidrológicos em bacias hidrográficas, principalmente para séries contínuas e longas. Pode-se atribuir estas qualidades ao método em função da sua conceituação e funcionalidade, ao considerar as diferentes etapas e processos de interação da água com o solo. No caso da BHPM, o método SMA foi o principal método responsável pelos resultados de desempenho considerados Muito Bom obtidos para modelo hidrológico.

O algoritmo SMA também é indicado para bacias com alta contribuição do

escoamento básico no escoamento total, caso este da BHPM devido aos tipos de solo que ocorrem na bacia como visto no item 4.1.5.

4.5 DESEMPENHO DO MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS

O modelo hidrológico HEC-HMS foi utilizado para simular os processos do ciclo hidrológico da bacia hidrográfica Passo Marombas para um período contínuo e longo. A calibração do modelo foi realizada para o período base, de 1977 a 1990, totalizando 14 anos. A validação do modelo foi realizada para o período de 1992 a 1997 somando 6 anos. O modelo conceitual para modelagem hidrológica da BHPM é formado por 20 subsistemas interconectados pela rede de drenagem.

A calibração do modelo foi verificada pela análise gráfica a partir da comparação entre a série de vazão simulada pelo HEC-HMS e a série de vazão observada na estação fluviométrica Passo Marombas para a etapa de calibração e validação, e pelos indicadores de desempenho do modelo como o Nash-Sutcliffe (NS), Proporção da Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) para o desvio padrão dos dados medidos (RSR), Coeficiente de Determinação (R^2) e Percentual de Tendência (PBIAS).

Os indicadores de qualidade foram calculados para as séries de dados projetas e observadas na escala diária. Os resultados de cada um dos indicadores de desempenho utilizados para avaliar o modelo podem ser observados na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores obtidos para os indicadores de desempenho do modelo nas etapas de modelagem.

Etapa da modelagem	Indicador de desempenho			
	NSE	RSR	PBIAS	R²
Calibração	0,87	0,40	1,81	0,79
Validação	0,77	0,50	2,75	0,79

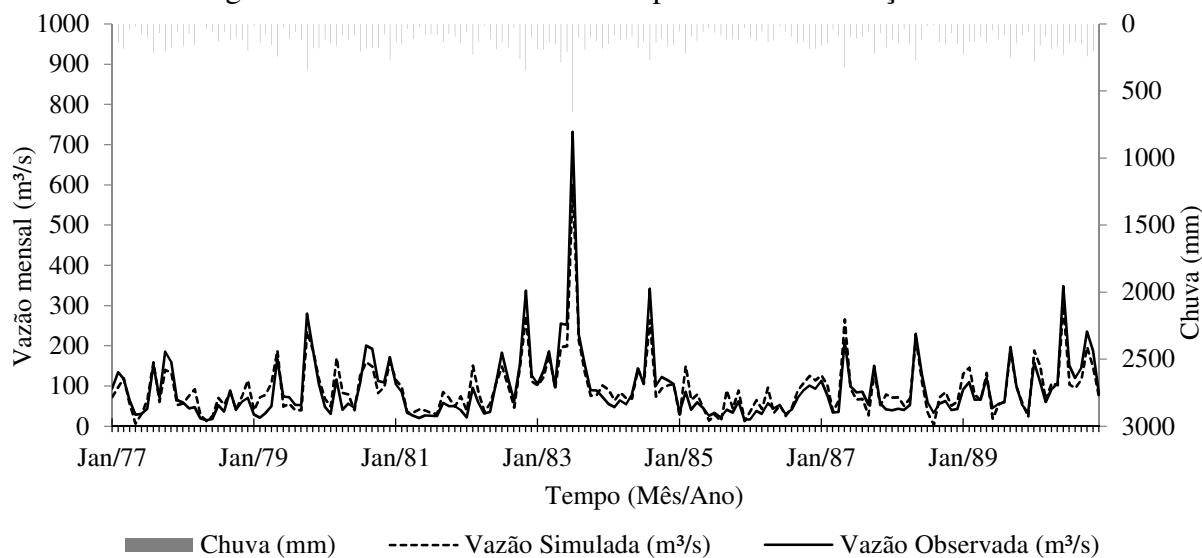
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Os resultados obtidos para os indicadores de qualidade do modelo demonstram que o modelo hidrológico possui desempenho considerados como Muito Bom, tanto para calibração quanto para a validação, conforme classificação realizada por Moriasi et., al (2007). A comparação gráfica entre as séries simuladas e observadas nos períodos de calibração e validação também permitem observar que o modelo possui bom desempenho, ou seja, está representando o mundo real.

As séries são apresentadas na escala mensal para fins de melhorar a visualização gráfica, pois na série diária as variações gráficas entre as curvas simulada e observada não são claramente observadas, mesmo atribuindo a elas simbologias diferentes e contrastantes.

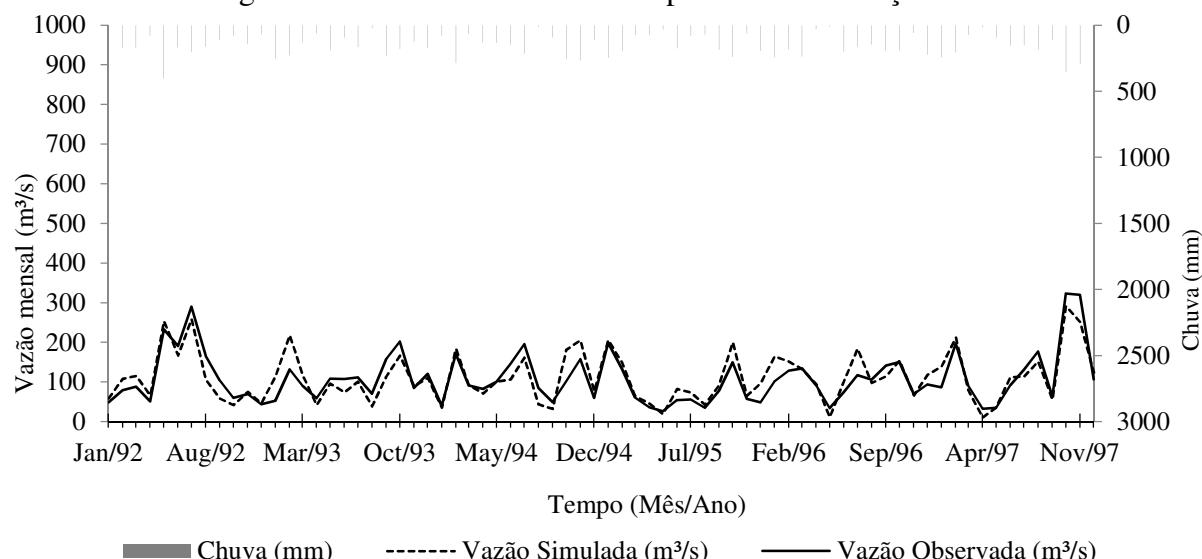
A robustez do modelo pode ser verificada pela sua capacidade de simular um período com intensa variação da vazão, com destaque para os eventos extremos de vazão como observado para o ano de 1983, ano em que a estação fluviométrica Passo Marombas registrou uma vazão de 2350 m³/s no dia 08/07/1983, sendo que o mês de julho alcançou uma vazão média mensal de 731,55 m³/s, conforme Gráfico 9.

Gráfico 9 - Hidrogramas simulado e observado no período de calibração 1977-1990.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

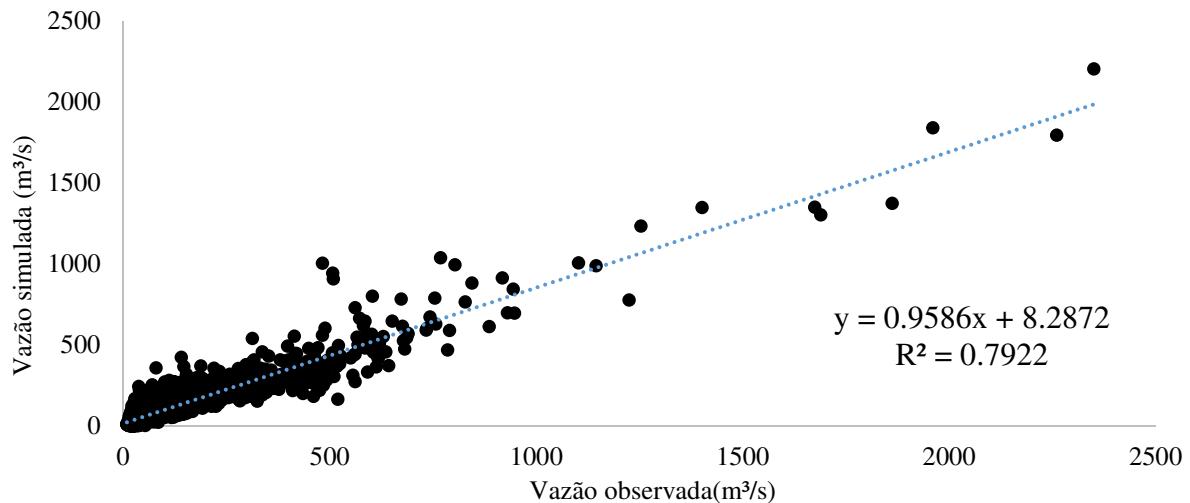
Gráfico 10 - Hidrogramas simulado e observado no período de validação 1992-1997.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

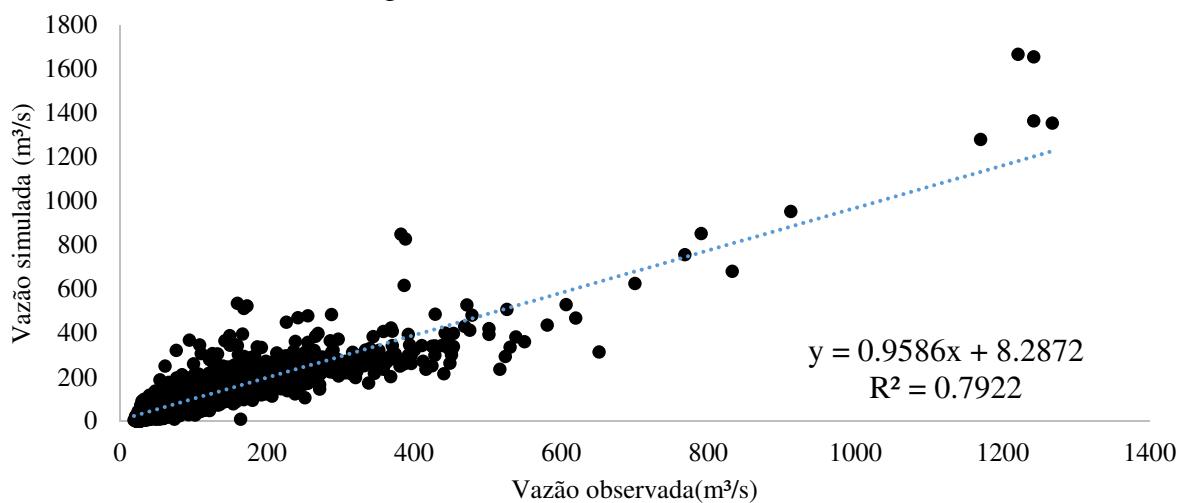
As avaliações das séries de vazão projetadas e simuladas por meio do coeficiente de determinação (R^2), também corrobora para a avaliação positiva quanto ao desempenho do modelo hidrológico. Os valores de R^2 igual a 0,7922 foram obtidos para as etapas de calibração e validação. Os gráficos de dispersão foram gerados para as vazões simuladas pelo modelo hidrológico HEC-HMS e observadas na estação Passo Marombas, o que permitiu verificar a correlação entre as duas variáveis. (Gráficos 11 e 12).

Gráfico 11 - Dispersão entre as vazões simuladas e observadas para o período de calibração do modelo hidrológico HEC-HMS.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Gráfico 12 - Dispersão entre as vazões simuladas e observadas para o período de validação do modelo hidrológico HEC-HMS.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Destaca-se que mesmo os resultados obtidos para o R^2 indicarem alta correção entre as vazões simuladas pelo modelo e observadas na estação de monitoramento, esta

estatística não deve ser usada de forma isolada para aferir o desempenho do modelo hidrológico, pois ela indica uma tendência de correlação, e não considera o valor do desvio absoluto entre os dados observados e simulados.

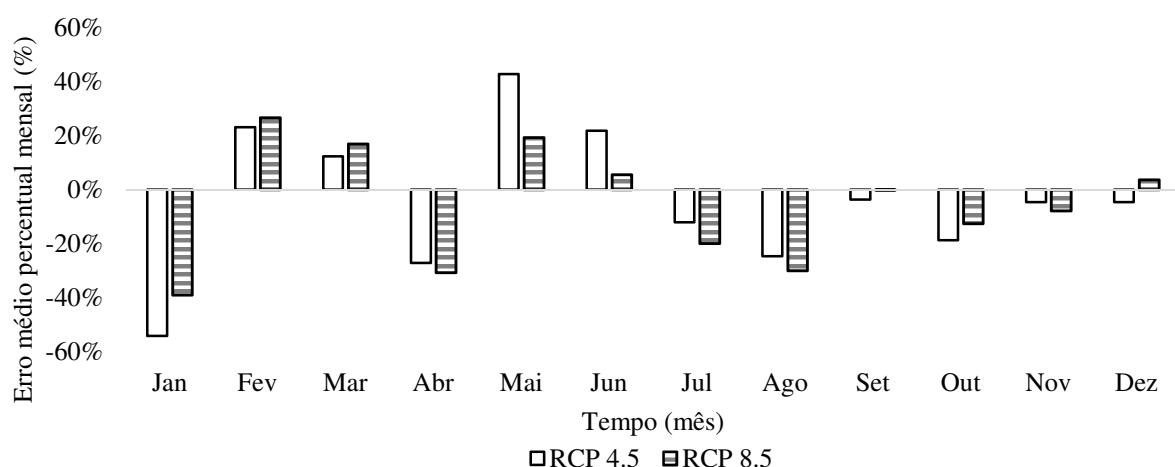
4.6 ANÁLISE DA VALIDAÇÃO DO MODELO CLIMÁTICO ETA-HADGEM2-ES NO PERÍODO DE 2007 A 2016

A validação do modelo climático ETA-HadGEM2-ES foi realizada a partir da comparação das vazões simuladas pelo HEC-HMS para a série de dados projetados pelo modelo climático a partir dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, para o período de 2007 a 2016.

A estatística do erro percentual médio mensal para os cenários climáticos (Gráfico 13) aponta que os meses de janeiro e maio são os meses onde o cenário RCP 4.5 apresenta maior erro em relação a vazão média mensal observada, ao subestima-la em 54% para o mês de janeiro e superestima-la em 43% para o mês de maio. Para o RCP 8.5 os meses de janeiro e abril são os que apresentam maior erro percentual ao subestimar o dado observado em 39% e 31% respectivamente.

A magnitude dos desvios encontrados nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 em relação aos dados observados, podem ser atribuídas ao fato de se usar as médias mensais como variável de comparação para cálculo dos erros percentuais.

Gráfico 13 - Erro percentual médio mensal nos cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 (intermediário) e RCP 8.5 (pessimista) em comparação com os dados observados no mesmo período.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

A análise comparativa da vazão média de longo termo (Q_{MLT}) mostrou que a Q_{MLT} da série de vazão observada no período de 2007 a 2016 igual a $115,85 \text{ m}^3/\text{s}$, e as Q_{MLT} s para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 iguais a $109,84 \text{ m}^3/\text{s}$ e $108,18 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente, não diferem significativamente no nível de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$).

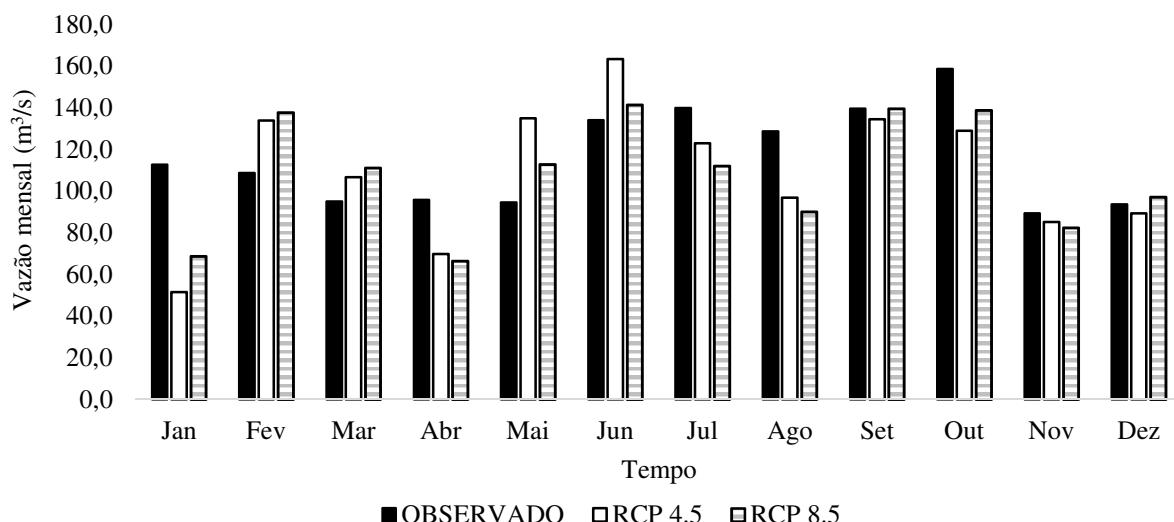
A análise das médias mensais das vazões observadas e simuladas pelo modelo para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 para o período entre 2007 e 2016, mostra que há uma variação heterogênea ao longo dos meses. O mês com maior discrepância entre os dados observados e simulados é o de janeiro, onde as vazões observadas são subestimadas em ambos os cenários RCP's.

A variação considerável para o mês de janeiro pode ser explicada pela tendência em ocorrer eventos de chuva convectiva, com alta intensidade e baixa duração, o que altera a média da chuva mensal.

Para os demais meses, as diferenças não são exageradas, sendo que os meses de março, junho, setembro, outubro, novembro e dezembro apresentam dados satisfatórios. Ainda se destaca que na análise estatística as médias mensais das vazões não diferem significativamente para o nível de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$).

O gráfico de barras com as médias mensais das vazões observadas e simuladas pelo modelo hidrológico HEC-HMS para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 permite visualizar as diferenças entre as vazões, conforme discutido acima. (Gráfico 14).

Gráfico 14 - Médias mensais das vazões observadas e simuladas para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 para o período entre 2007 a 2016.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

4.7 ANÁLISE DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA HIDROLOGIA DA BACIA HIDROGRÁFICA PASSO MAROMBAS

A análise dos impactos das mudanças climáticas na hidrologia da bacia hidrográfica Passo Marombas foi realizada para o período futuro de 2020 a 2099, longo prazo, e para os futuros centrados e seus respectivos períodos 2030 (2020 a 2039), 2050 (2040 a 2059), 2070 (2060 a 2079) e 2090 (2080 a 2099). Os resultados foram avaliados no contexto dos cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RPC 8.5.

A magnitude com que as vazões da bacia hidrográfica Passo Marombas variam no futuro para o período considerado de longo prazo e para os períodos dos futuros centrados, foram quantificadas em termos de variação no valor absoluto das vazões e na porcentagem da variação das vazões futuras em relação ao período base.

O período base (1977 a 1990) foi tomado como período de referência para fins de comparação com os resultados obtidos com as projeções hidrológicas futuras. Para melhorar a exposição e discussão dos resultados obtidos, este item foi dividido em três partes:

Parte 1: Análise das vazões projetadas para o período futuro 2020 a 2099.

Parte 2: Análise das vazões projetadas para os futuros centrados.

Parte 3: Análise do saldo hídrico.

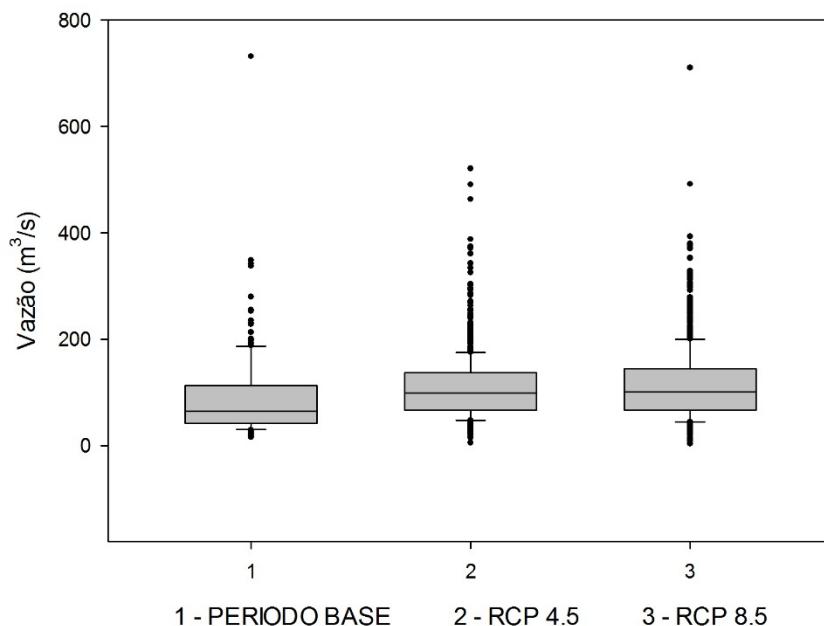
Para apresentar as variações das vazões no futuro foram utilizados gráficos, tabelas e a análise hidrológica estatística a partir da curva de permanência. A exposição gráfica relacionada os cenários de mudanças climáticas e período base.

4.7.1 Parte 1: Análise das vazões projetadas para o período futuro 2020 a 2099

As projeções hidrológicas para o futuro (2020 a 2099) revelaram um aumento na vazão média de longo termo (Q_{MLT}), de 17,5% e 22,9% para os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente, em relação a Q_{MLT} de 92,5 m³/s registrada no período base (1977 a 1990).

O gráfico tipo Boxplot das vazões médias mensais (Gráfico 15) mostra que haverá um aumento na mediana das vazões nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, assim como no desvio padrão, o que indica maior variabilidade da magnitude das vazões, com destaque para o cenário de mudanças climáticas RCP 8.5 considerado pessimista.

Gráfico 15 - Boxplot das vazões médias mensais do período base e dos cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

A comparação entre vazões médias mensais do período base e as projetadas para os dois cenários de mudanças climáticas, mostrou que haverá um aumento nas vazões médias mensais do período futuro entre 2020 e 2099, longo prazo, em relação ao período base (1977 e 1990).

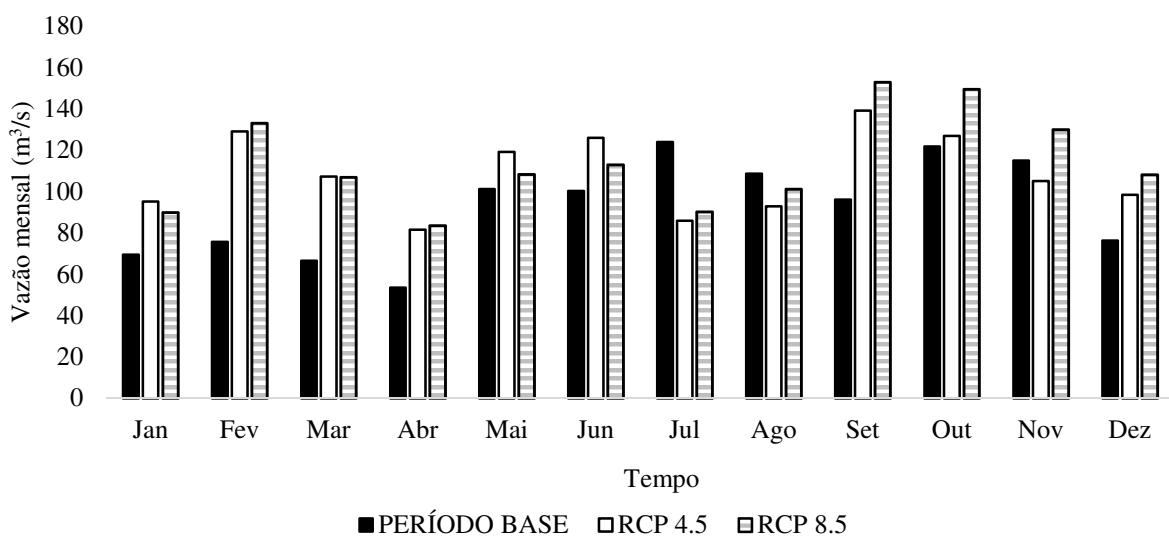
Os meses que apresentaram maior variação percentual nas médias mensais são fevereiro com aumento de 70,5% e 75,9%, seguido por março com incremento de 61,2% e 60,8% e setembro com aumento de 44,7% e 59,0% para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente. No período base as vazões médias mensais para fevereiro e março representam 75,6 m³/s e 66,5 m³/s.

Os meses que apresentaram maior redução percentual nas vazões médias mensais foram junho com -30,7% e -27,2% seguindo por agosto com -14,5% e -6,7% para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente.

No período base as vazões médias mensais para julho e agosto representam 123,9 m³/s e 108,5 m³/s.

Os incrementos e reduções nas vazões médias mensais para os cenários de mudanças climáticas em relação ao período base, podem ser observados por meio do gráfico de barras. (Gráfico 16).

Gráfico 16 - Comparação entre as vazões médias mensais no período base, e cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

A redução significativa das vazões médias mensais para o mês de julho, para ambos os cenários futuros de mudanças climáticas, representa uma forte mudança no comportamento hidrológico da bacia para este mês, pois os registros históricos obtidos no período base confirmaram o mês de julho como o mês com a maior vazão média mensal entre os meses do ano.

Enquanto no período base os meses de julho, agosto e setembro apresentaram comportamento de redução sequencial nas vazões médias mensais, o inverso foi observado nas projeções futuras, para ambos os cenários de mudanças climáticas. A análise gráfica revelou um aumento progressivo nas vazões médias mensais a partir de julho com ápice em setembro. Os dados obtidos para as vazões médias mensais sugerem que no futuro haverá um deslocamento temporal das máximas vazões médias mensais de julho para setembro. (Gráfico 16).

Ao considerar que os eventos climáticos extremos com altos índices pluviométricos geram as maiores vazões nos rios, o que por consequência eleva a vazão média mensal, este comportamento hidrológico típico no mês de julho poderá ser transferido para setembro, que, portanto, passará a registrar altos volumes de chuva e vazões de magnitude extrema.

A análise hidrológica a partir da curva de permanência permitiu quantificar as alterações futuras nas vazões de referências máximas Q_5 , Q_{10} e Q_{15} , medianas Q_{50} e Q_{MLT} e mínimas Q_{98} , Q_{95} e Q_{90} para o período de 2020 a 2099 (longo prazo) em relação ao período

base. As alterações nas vazões de referência mínimas, medianas e máximas resultante do cenário de mudanças climáticas RCP 4.5 (cenário intermediário) será positivo para os recursos hídricos da BHPM. Esta conclusão pode ser considerada positiva pelas seguintes justificativas. Primeiro, pela redução de 5,2% na vazão de referência Q₅ considerada vazão máxima vinculada a eventos extremos de enchentes e inundações, sendo que a magnitude dos eventos de inundações deverá ser reduzida; segundo pelo aumento das vazões medianas Q₅₀ e Q_{MLT} em 48,8% e 17,5% respectivamente, o que na prática se resume no aumento da vazão médias dos rios durante o ano, e terceiro pelo aumento nas vazões de referência mínimas Q₉₈, Q₉₅ e Q₉₀ em 13,4%, 33,0% e 40,3%, respectivamente, o que é positivo pois haverá um aumento significativo na disponibilidade hídrica.

Para o cenário de mudanças climáticas RCP 8.5 (cenário pessimista), sua classificação negativa é confirmada pelo aumento nas vazões de referência máxima, em especial na Q₅ com aumento de 2,6% o que poderá agravar eventos extremos de enchentes e inundações, e pela diminuição significativa da vazão de referência mínima Q₉₈ em -19,2% o que impactará negativamente a disponibilidade hídrica. A redução da Q₉₈ poderá gerar dificuldades na gestão dos recursos hídricos, pois esta vazão de referência é utilizada por muitos órgãos gestores/reguladores como critério para a outorga de direito de uso dos recursos hídricos.

O aumento das vazões medianas Q₅₀ e Q_{MLT} em 49,6% e 22,9% respectivamente, é positivo pois na prática haverá aumento da vazão médias dos rios.

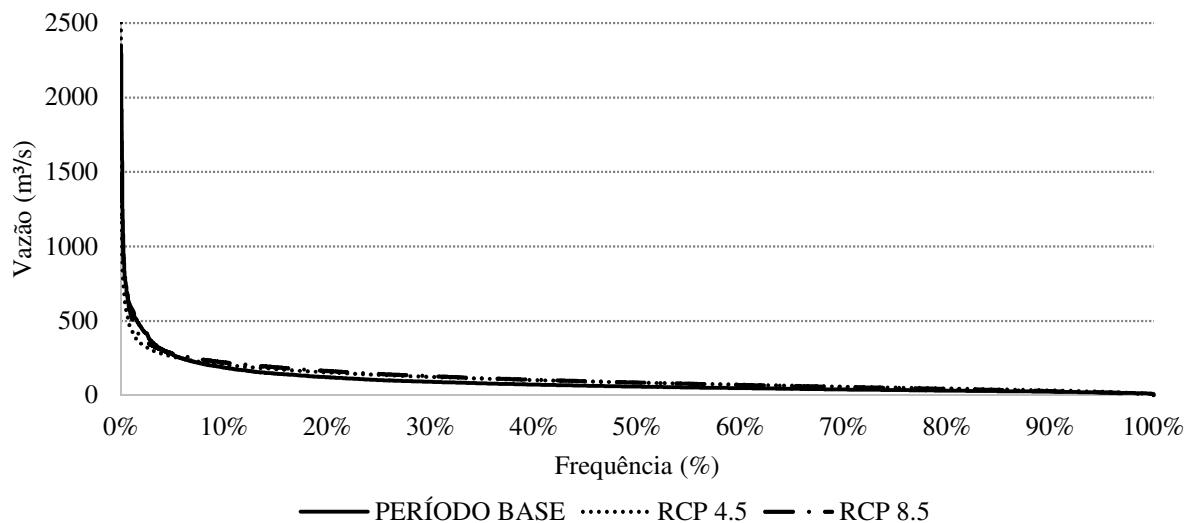
Tabela 11 - Vazão de referência no período base (1977-1990) e no período futuro (2020-2099) e suas respectivas porcentagens de alteração.

Vazão de referência	Período Base (m ³ /s)	Vazões de referência (m ³ /s)		Porcentagem de alteração (%)	
		RCP 4.5 (2020-2099)	RCP 8.5 (2020-2099)	RCP 4.5 (2020-2099)	RCP 8.5 (2020-2099)
Q ₅	273,8	259,5	280,9	-5,2	2,6
Q ₁₀	185,6	205,0	220,8	10,5	19,0
Q ₁₅	144,4	175,6	188,5	21,6	30,5
Q ₅₀	57,5	85,5	86,0	48,8	49,6
Q ₉₀	23,5	33,0	28,6	40,3	21,7
Q ₉₅	18,3	24,3	19,4	33,0	6,0
Q ₉₈	14,5	16,4	11,7	13,4	-19,2
Q _{MLT}	92,5	108,6	113,6	17,5	22,9

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

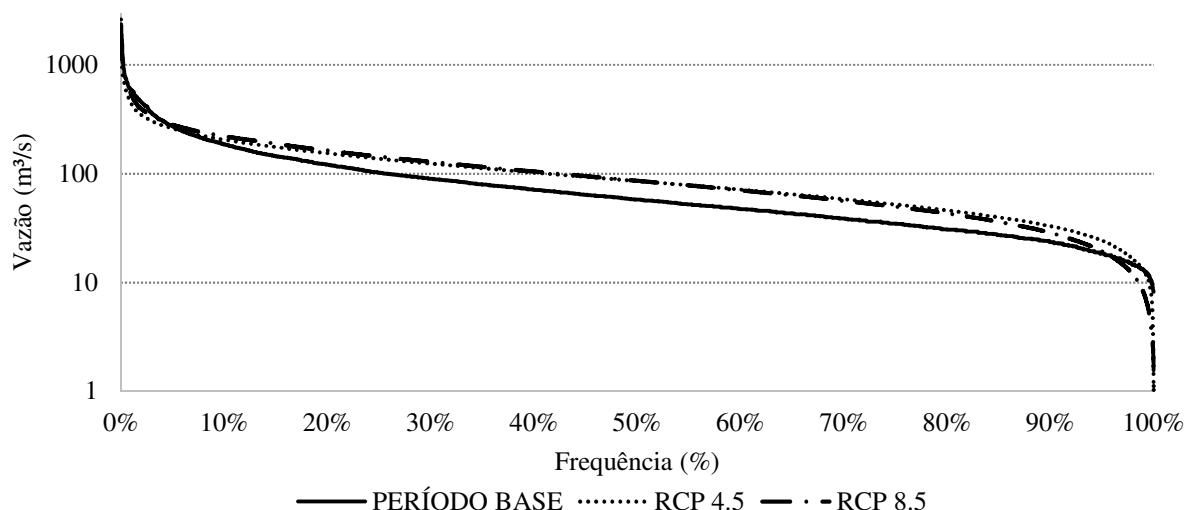
A curva de permanência com as vazões de referência no período base e período futuro (2020 a 2099) para os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5 pode ser observada com detalhes nos Gráficos 17 e 18. O gráfico 17 representa a curva de permanência gerada de forma convencional, enquanto o gráfico 18 faz sua representação a partir da escala logarítmica de base 10. As curvas de permanência são a forma gráfica das vazões de referência apresentadas na Tabela 11.

Gráfico 17 - Comparação das curvas de permanência com as vazões de referência do período base e período futuro (2020-2099) para os cenários de mudanças climático RCP 4.5 e RCP 8.5.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Gráfico 18 - Comparação das curvas de permanência em escala logarítmica com as vazões de referência do período base e período futuro (2020-2099) para os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

4.7.2 Parte 2: Análise das vazões projetadas os futuros centrados

4.7.2.1 Análise das vazões projetadas para o cenário de mudanças climáticas RCP 4.5

A análise das vazões projetadas para os futuros centrados em 2030, 2050, 2070 e 2090 para o cenário de mudanças climáticas RCP 4.5, revelou uma redução nas vazões máximas com permanência de até 5% do tempo no canal. Esta redução se mostrou mais forte no primeiro período centrado em 2030 com uma redução de 12,3% em relação a mesma vazão de referência observada no período base.

As vazões medianas Q_{50} e Q_{MLT} demonstraram aumento em todos os períodos centrados, com destaque para o incremento de 57,3% e 54,3% para a Q_{50} e 21,9% e 22,1% para Q_{MLT} para os períodos centrados em 2070 e 2090 respectivamente. Para as vazões mínimas foi verificado um aumento geral para as vazões de referência Q_{98} , Q_{95} e Q_{90} principalmente nos futuros centrados em 2050 e 2070. (Tabela 12).

Os impactos do cenário de mudanças climáticas RCP 4.5 nos futuros centrados em 2030, 2050, 2070 e 2090 sobre as vazões máximas, medianas e mínimas, está alinhado com os resultados encontrados na análise realizada para o período completo de longo prazo (2020-2099) para o mesmo cenário

A redução nas vazões máximas, especialmente a Q_5 deverá ser benéfico para a bacia hidrográfica pois poderá reduzir a magnitude dos eventos de enchentes e inundações resultante de vazões extremas.

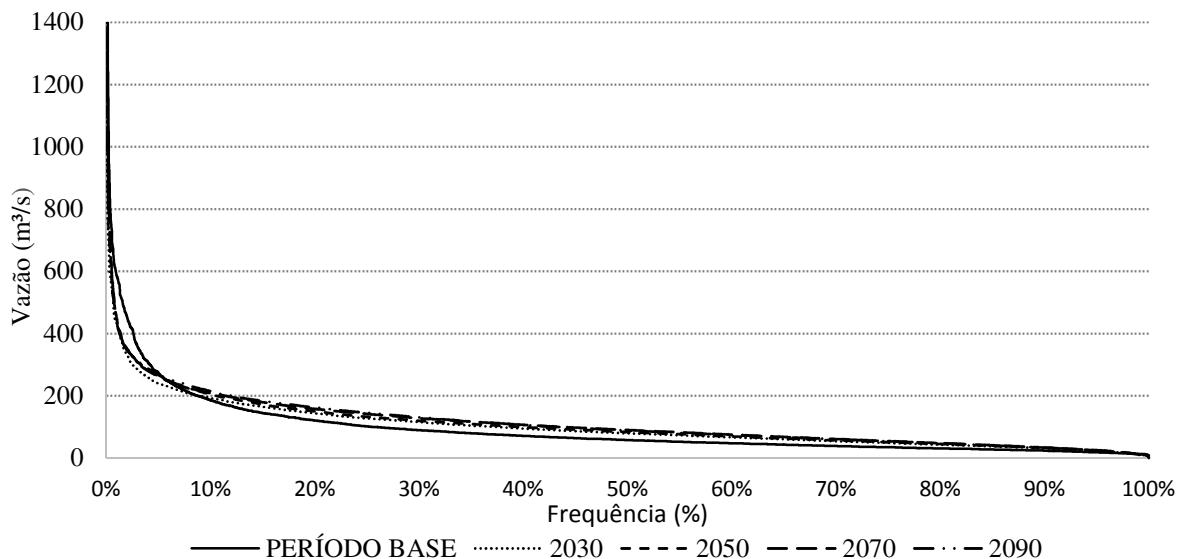
Tabela 12 - Vazões de referência e vazão média de longo termo no período base e futuros centrados em 2030, 2050, 2070, 2090 para o cenário RCP 4.5 e porcentagem de alteração das vazões nos futuros centrados em relação ao período base.

Vazão de referência	Período Base (m ³ /s)	Vazões de referência (m ³ /s)				Porcentagem de alteração (%)			
		2030	2050	2070	2090	2030	2050	2070	2090
Q_5	273,8	240,1	266,0	265,1	267,2	-12,3	-2,9	-3,2	-2,4
Q_{10}	185,6	192,6	205,0	208,7	215,1	3,8	10,5	12,5	15,9
Q_{15}	144,4	165,0	172,2	179,4	183,3	14,3	19,3	24,2	26,9
Q_{50}	57,5	79,7	83,9	90,4	88,8	38,5	45,9	57,3	54,3
Q_{90}	23,5	31,6	33,2	34,0	33,5	34,3	41,4	44,6	42,3
Q_{95}	18,3	22,7	24,7	25,4	24,7	23,8	35,0	39,0	34,9
Q_{98}	14,5	15,7	16,8	16,9	16,5	8,1	15,7	16,6	13,7
Q_{MLT}	92,5	101,5	107,4	112,7	112,9	9,8	16,1	21,9	22,1

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

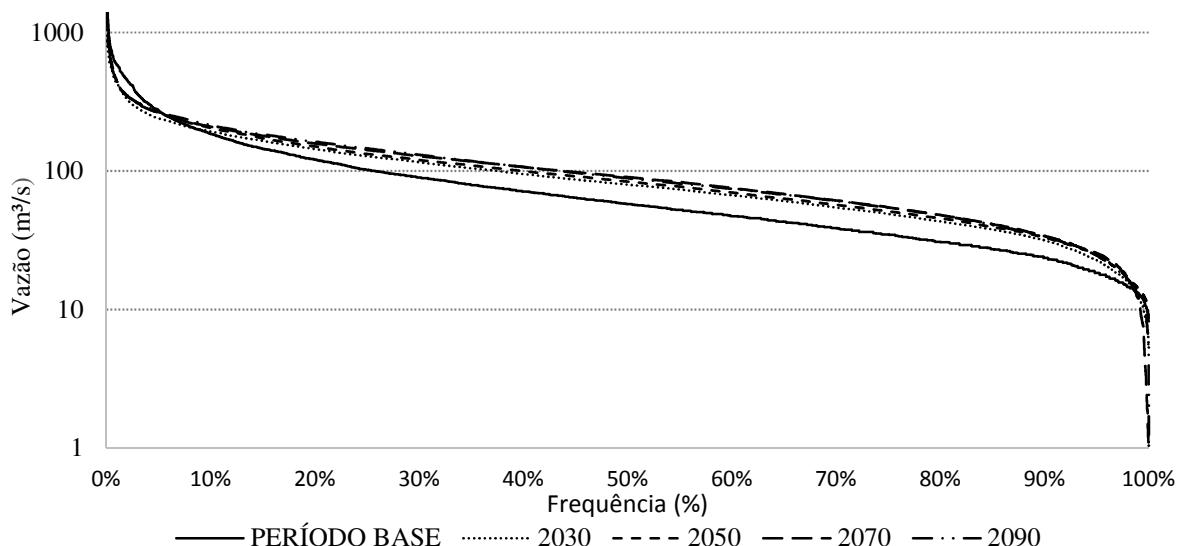
O incremento percentual positivo nas vazões medianas Q_5 e Q_{MLT} sinaliza um aumento das vazões medianas no canal, isso se reflete em rios com mais água para a mesma quantidade de tempo, o que favorece os processos ecológicos e hidrológicos na bacia. O aumento nas vazões mínimas Q_{98} , Q_{95} e Q_{90} cria condições para ampliação de processos econômicos e sociais que demandam água, portanto é positivo para a bacia, inclusive para a manutenção de seus processos hidrológicos e ecológicos.

Gráfico 19 - Comparação entre as curvas de permanência do período base e períodos dos futuros centrados 2030, 2050, 2070 e 2090 para o cenário RCP 4.5.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Gráfico 20 - Comparação entre as curvas de permanência em escala logarítmica do período base e períodos dos futuros centrados 2030, 2050, 2070 e 2090 para o cenário RCP 4.5.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

4.7.2.2 Análise das vazões projetadas para o cenário de mudanças climáticas RCP 8.5

A análise das vazões projetadas para os futuros centrados em 2030, 2050, 2070 e 2090 para o cenário de mudanças climáticas RCP 8.5, revelou redução na vazão máxima com tempo de permanência no canal de 5% para os períodos centrados em 2030 e 2050. Nos futuros centrados em 2070 e 2090 a Q_5 aumenta cerca de 2,5% e 18,7% respectivamente. O aumento expressivo no último quarto de tempo do século XXI, poderá ampliar significativamente as vazões máximas extremas, e com isso aumentar a magnitude de eventos de enchentes e inundações, em função do aumento da vazão máxima Q_5 .

As vazões medianas Q_{50} e Q_{MLT} aumentam em todos os períodos dos futuros centrados, mesmo comportamento observado no cenário RCP 4.5. A diferença é observada na magnitude com que as vazões medianas aumentam, mais agressivas no cenário RCP 8.5 com incrementos percentuais na Q_{50} de 61,3% e 70,3% nos futuros centrados em 2070 e 2090 respectivamente, e incrementos na ordem de 27,8% e 41,3% para na Q_{MLT} para os mesmos centrados em 2070 e 2090, respectivamente. Para as vazões mínimas haverá uma redução nas vazões com 95% e 98% de permanência no canal nos futuros centrados em 2030 e 2050, seguido por aumento nos futuros centrados em 2070 e 2090. A magnitude com que as vazões de referência Q_{95} e Q_{98} variam é significativa, tanto para a variação negativa, quanto para a positiva. (Tabela 13).

No caso da variação negativa da Q_{98} de 39,0% e 39,9% na primeira metade do século XXI, futuros centrados em 2030 e 2050 respectivamente, as atividades econômicas que dependem da água poderão ser submetidas a maiores restrições quanto a captação e uso dos recursos hídricos, em função da diminuição da disponibilidade hídrica.

Se nesse período haver ampliação dos processos econômicos e sociais que dependem da água como indústrias, agricultura e aumento da população, poderá surgir conflitos pelo uso da água de forma mais evidente entre os diferentes setores. Isto deverá gerar dificuldade para os órgãos que fazem a gestão dos recursos hídricos, uma vez que a Q_{98} é uma das vazões utilizadas como critério para concessão da outorga de captação e uso dos recursos hídricos. Na segunda metade do século XXI, nos futuros centrados em 2070 e 2090, o incremento percentual positivo de 31,7% e 10,3% sobre a vazão de referência Q_{98} , deverá aliviar os conflitos com potencial para se desenvolverem e se estabelecerem nos futuros centrados anteriores. Com mais água disponível nos rios a ampliação dos processos econômicos e sociais poderão ser suportados sem que haja prejuízo aos processos ecológicos da bacia hidrográfica.

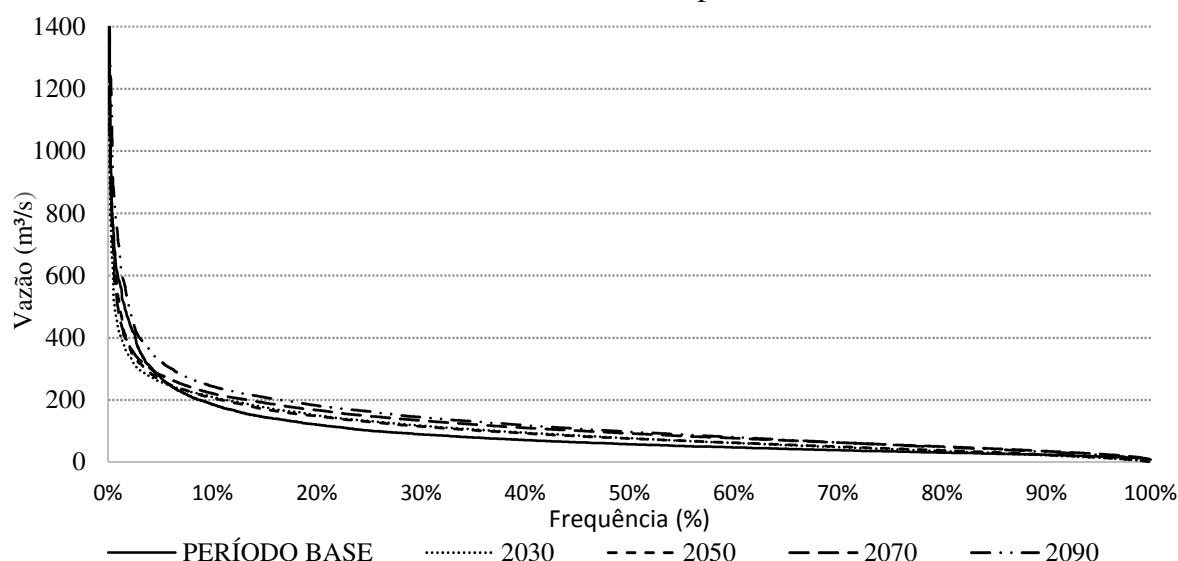
A gestão dos recursos hídricos deverá sofrer menor pressão devido ao aumento da disponibilidade hídrica para concessão da outorga para captação e uso dos recursos hídricos aos usuários de água instalados na bacia. Os impactos do cenário de mudanças climáticas RCP 8.5 nos futuros centrados em sobre as vazões máximas, medianas e mínimas, não podem ser equiparados os resultados da análise realizada para o período (2020-2099). A alternância nos incrementos percentuais nas vazões nos futuros centrados são informações relevantes, que, na análise para o período completo não são visualizadas.

Tabela 13 - Vazões de referência e vazão média de longo termo no período base e futuros centrados em 2030, 2050, 2070, 2090 para o cenário RCP 8.5 e porcentagem de alteração das vazões nos futuros centrados em relação ao período base.

Vazão de referência	Período Base (m ³ /s)	Vazões de referência (m ³ /s)				Porcentagem de alteração (%)			
		2030	2050	2070	2090	2030	2050	2070	2090
Q ₅	273,8	258,9	265,2	280,6	325,0	-5,5	-3,2	2,5	18,7
Q ₁₀	185,6	209,9	206,6	221,3	244,1	13,1	11,4	19,2	31,6
Q ₁₅	144,4	176,8	170,9	190,8	208,8	22,4	18,3	32,2	44,6
Q ₅₀	57,5	77,5	76,6	92,7	97,9	34,7	33,2	61,3	70,3
Q ₉₀	23,5	22,5	24,5	35,8	33,5	-4,1	4,1	52,3	42,6
Q ₉₅	18,3	14,5	15,8	26,8	24,1	-20,5	-13,4	46,6	31,7
Q ₉₈	14,5	8,8	8,7	19,1	16,0	-39,0	-39,9	31,7	10,3
Q _{MLT}	92,5	101,8	103,8	118,1	130,7	10,1	12,2	27,8	41,3

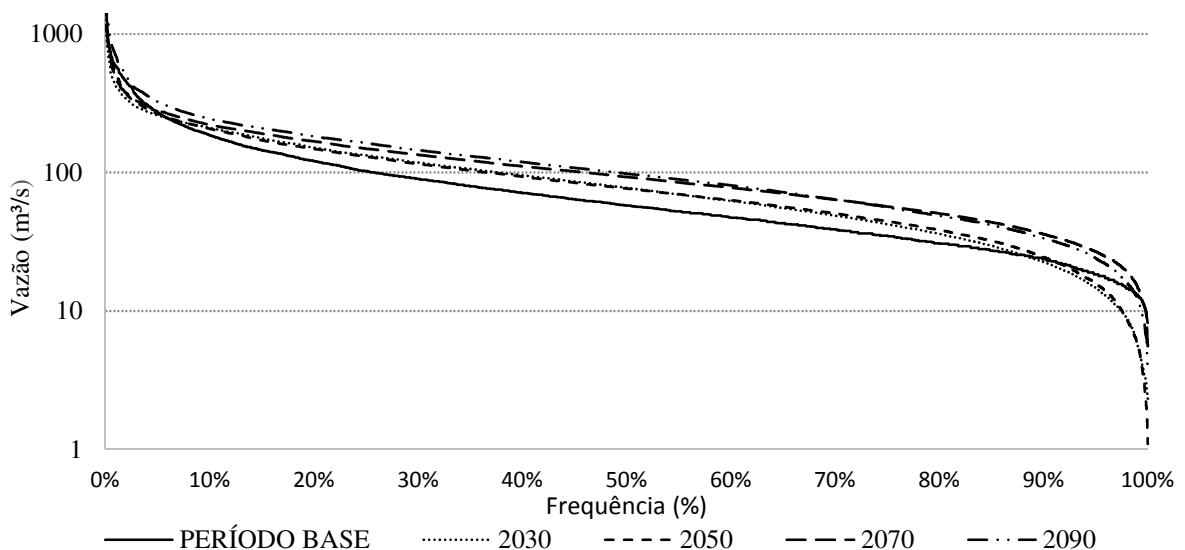
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Gráfico 21 - Comparação entre as curvas de permanência do período base e períodos dos futuros centrados 2030, 2050, 2070 e 2090 para o cenário RCP 8.5.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Gráfico 22 - Comparação entre as curvas de permanência em escala logarítmica do período base e períodos dos futuros centrados 2030, 2050, 2070 e 2090 para o cenário RCP 8.5.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

4.7.2.3 Análise das diferenças nas vazões entre o período base e os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.

As diferenças nas vazões de referência entre o período base e os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 auxiliam na interpretação dos dados. A partir da análise gráfica a variação das vazões de referência nos futuros centrados foi avaliada em relação ao período base.

No caso da vazão de referência Q_5 a sua evolução nos períodos centrados para o cenário RCP 4.5 não supera a média do período base. No futuro centrado em 2030 a Q_5 fica ligeiramente abaixo da média do período base, seguida por um aumento no futuro centrado em 2050 que a aproxima da média do período base e a partir de então segue estabilizada até o fim do século XXI.

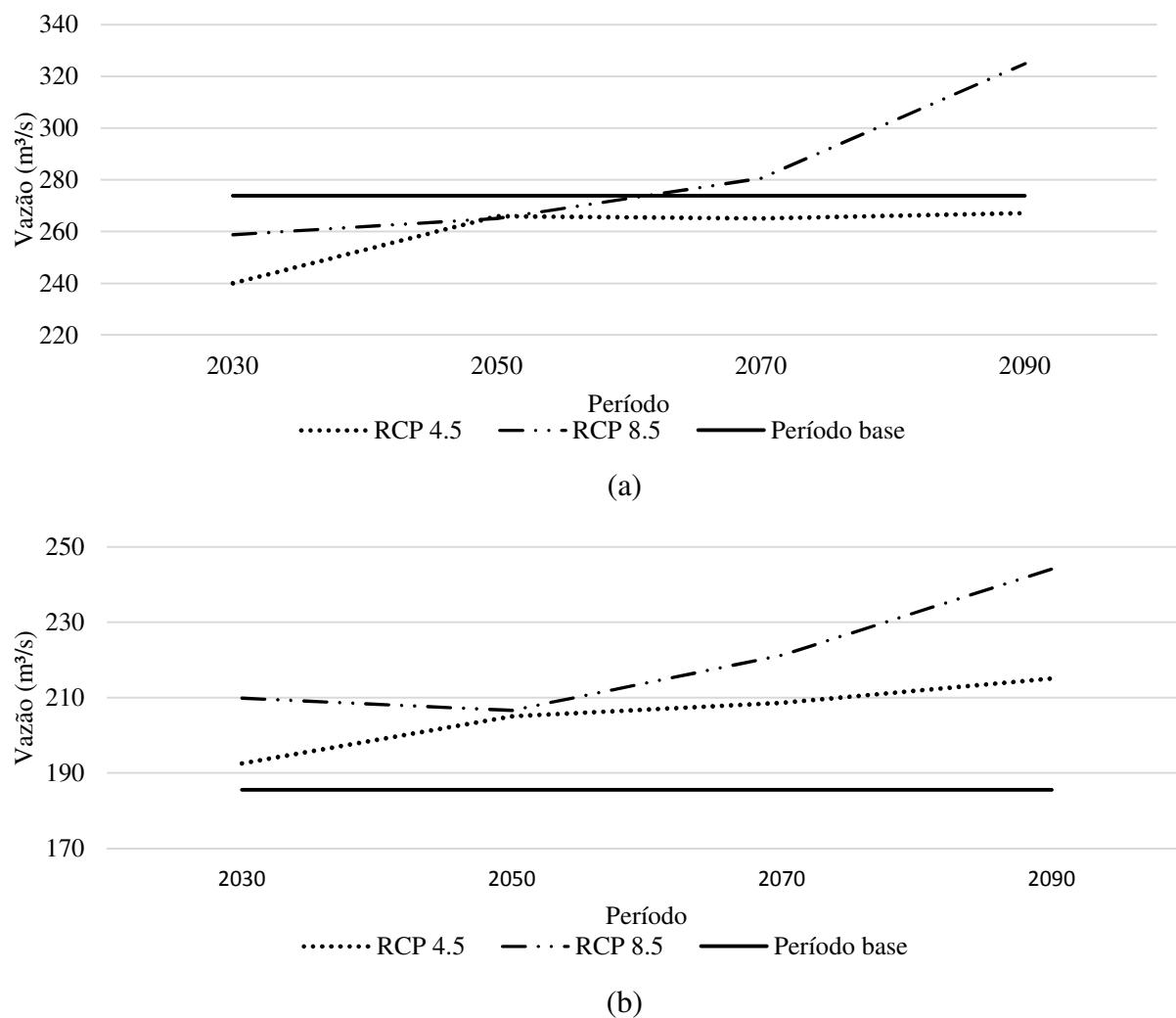
No cenário de mudanças climáticas RCP 8.5 a Q_5 se mantém abaixo da média no período base nos futuros centrados em 2030 e 2050, a partir do futuro centrado em 2070 a Q_5 projetada supera a sua média observada no período base (1977-1990). No futuro centrado em 2090 a Q_5 apresenta alta expressiva chegando ao seu maior valor.

Para a vazão de referência Q_{10} , em ambos os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 (intermediário) e RCP 8.5 (pessimista), a sua média no período base é superada em todos os futuros centrados. No cenário RCP 4.5 há uma tendência crescente, que é suavizada a partir do futuro centrado em 2050. No cenário RCP 8.5 a Q_{10} apresenta uma suave redução nos períodos centrados em 2030 e 2050, seguido por forte aumento nos

futuros centrados em 2070 e 2090 aonde atinge seu maior valor no fim do século XXI.

A variações futuras nas vazões Q_5 e Q_{10} em relação ao período base pode ser observada nos Gráfico 23 [a] e [b].

Gráfico 23 - Evolução da vazão de referencia Q_5 (a) e Q_{10} (b) nos futuros centrados em 2030, 2050, 2070 e 2090 para o período base e cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5.



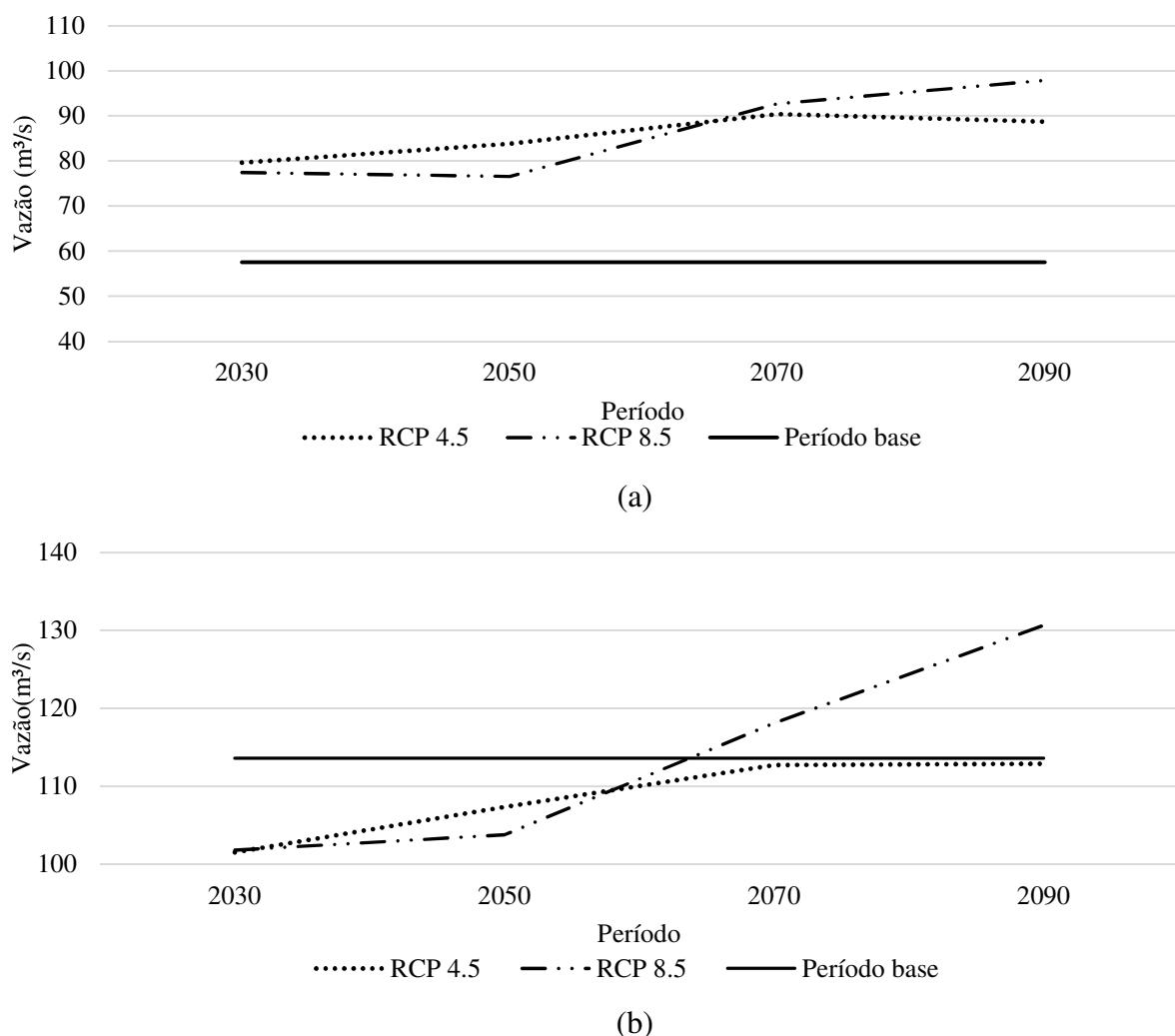
Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

No caso da vazão de referencia Q_{50} , o seu comportamento nos cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5 supera a média da Q_{50} no período base. Enquanto no cenário RCP 4.5 a Q_{50} segue em tendência de alta até o futuro centrado em 2070, seguida por leve correção no futuro centrado em 2090, a Q_{50} no cenário RCP 8.5 possui tendência de baixa nos futuros centrados em 2030 e 2050 seguida por alta até o futuro centrado em 2090. O aumento da Q_{50} é positivo pois sugere que haverá mais água disponível nos rios da bacia hidrográfica Passo Marombas.

Para vazão média de longo termo (Q_{MLT}) em ambos os cenários a Q_{MLT} do período base é superada. Há tendência de alta na Q_{MLT} a partir do futuro centrado em 2030, onde a vazão Q_{MLT} para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 possuem valores praticamente iguais. A tendência de alta da Q_{MLT} para o cenário RCP 4.5 não supera a média da Q_{MLT} no período base, enquanto a Q_{MLT} para o cenário RCP 8.5 aumenta a partir do futuro centrado em 2050, atingindo seu ápice no fim do século XXI.

A redução na Q_{MLT} nos períodos centrados em 2030 e 2050 é explicada pela redução significativa nas vazões mínimas Q_{90} , Q_{95} e Q_{98} nesse mesmo período. Isto se confirma pois quanto as vazões mínimas reduzem a uma taxa superior a taxa de redução das vazões máximas, a amplitude entre as vazões mínimas e máximas aumenta puxado pela redução das vazões mínimas. Com isso a Q_{MLT} diminui. (Gráfico 24 [a] e [b]).

Gráfico 24 - Evolução da vazão de referência Q_{50} (a) e Q_{MLT} (b) nos futuros centrados em 2030, 2050, 2070 e 2090 para o período base e cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5.

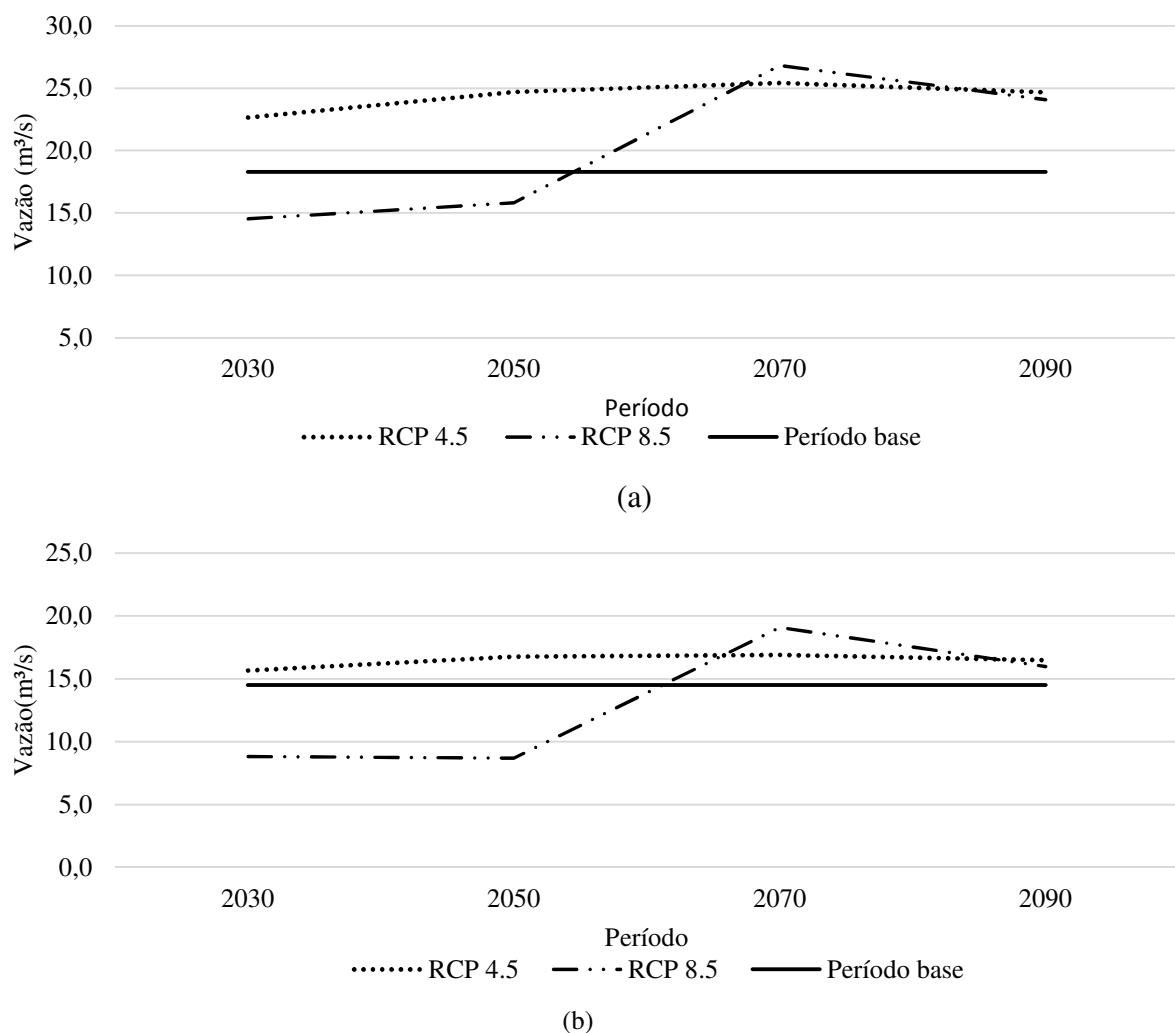


Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2018.

No caso das vazões de referências Q_{95} e Q_{98} consideradas vazões mínimas, no cenário RCP 4.5 a Q_{95} e Q_{90} se mantêm acima da média registrada no período base (1977-1990), sendo que a Q_{95} tem um aumento maior em relação a Q_{98} . No cenário RCP 8.5 tanto a Q_{95} quanto a Q_{98} ficam abaixo da média no período base nos futuros centrados em 2030 e 2050. Nos futuros centrados em 2070 e 2090 as vazões Q_{95} e Q_{98} ficam acima da média no período base, com uma correção no futuro centrado em 2090.

A redução nas vazões Q_{95} e Q_{98} nos dois primeiros futuros centrados podem resultar em baixa disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica Passo Marombas, principalmente em períodos longos sem chuva. A partir da metade do século XXI, a recuperação da Q_{95} e Q_{98} favorece a condição hidrológica com maior disponibilidade hídrica em relação ao período base. (Gráfico 25[a] e [b])

Gráfico 25 - Evolução da vazão de referencia Q_{95} (a) e Q_{98} (b) nos futuros centrados em 2030, 2050, 2070 e 2090 para o período base e cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

4.7.3 Parte 3: Análise do Saldo hídrico

O saldo hídrico está relacionado com ao balanço hídrico simplificado, que considera as entradas e saídas de água do sistema hidrográfico. A principal entrada é a precipitação por meio da chuva, e as principais saídas são a vazão no exutório do sistema hidrográfico e a evapotranspiração potencial.

Com o balanço hídrico realizado entre as entradas e saídas e de forma acumulada entre os anos, é possível verificar se o saldo hídrico foi positivo ou negativo, para cada ano do período de dados de cada futuro centrado, e também para o período geral do futuro centrado, para os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5.

O objetivo de investigar o saldo hídrico está em verificar se haverá excesso ou déficit hídrico nos futuros centrados e nos anos que o compõem. No caso de haver volume de água excedente isso significa que este volume estará disponível para o armazenamento na bacia. No caso de haver saldo negativo há então um déficit hídrico, que poderá ser compensado e superado com um excesso hídrico no período seguinte.

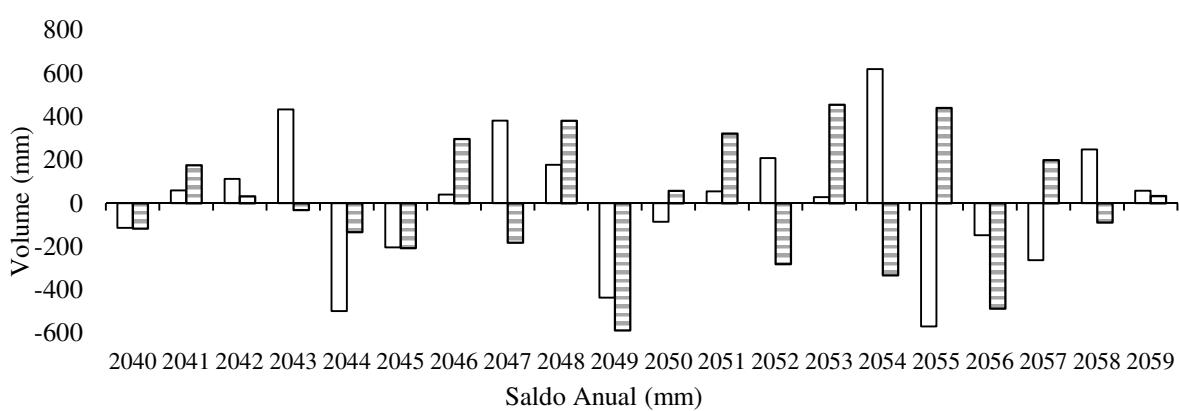
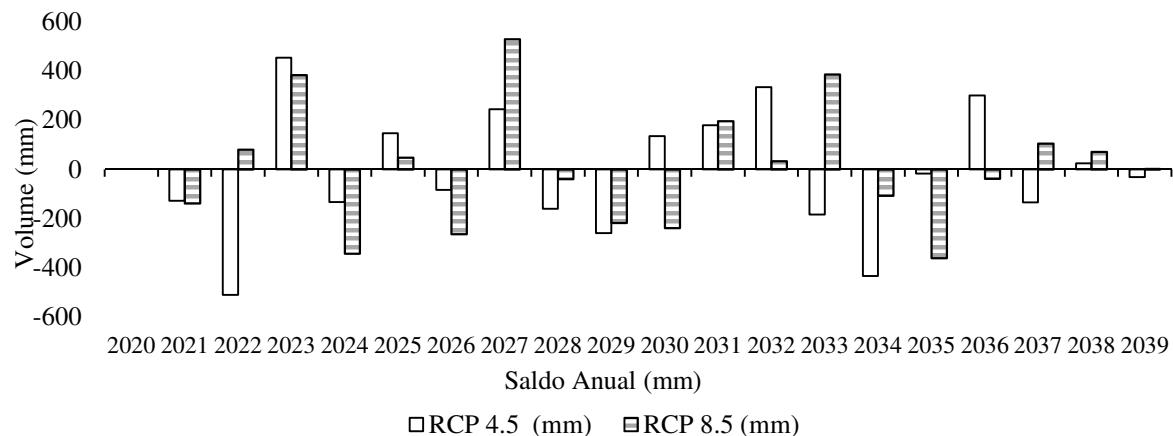
A partir da análise do saldo hídrico no futuro centrado em 2030 para o cenário RCP 4.5 (Gráfico 26[a]), o somatório do déficit total anual será de -2071,2 mm contra um somatório do excesso hídrico anual de 1825,0 mm. Para o RCP 8.5 o déficit hídrico total anual de -1741,0 mm contra 1843,5 de excesso hídrico sugere maior disponibilidade hídrica.

A análise por ano é importante pois no caso de haver um déficit anual significativo, as atividades que dependem dos recursos hídricos poderão ser afetadas. O cenário de mudanças climáticas RCP 4.5 apresentou maior déficit hídrico (-2071,2 mm) em relação ao cenário RCP 8.5 (-1741,0 mm). De acordo com as projeções o ano de 2022 p.e., registrará o maior déficit hídrico no cenário RCP 4.5 com -509,7 mm, enquanto no cenário RCP 8.5 haverá um excesso hídrico de 81,5 mm. O maior excesso hídrico será em 2027 com um total de 530,4 mm para o RCP 8.5 enquanto no RCP 4.5 o excesso hídrico será de 245,0 mm.

O saldo hídrico no futuro centrado em 2050 (Gráfico 26[b]) para o cenário RCP 4.5, terá um déficit hídrico geral no período de -2313,2 mm e um excesso hídrico de 2426,8 mm. No cenário RCP 8.5 o déficit hídrico geral será de -2442,3 mm e o excesso hídrico de 2405,8 mm o que sugere maior disponibilidade hídrica no período. O ano de 2049 registrará o maior déficit hídrico no cenário RCP 8.5 com -587,2 mm contra -435,9 mm no RCP 4.5. O maior excesso hídrico será em 2054 com 620,9 mm para o RCP 4.5 em contraste com o

RCP 8.5 com déficit hídrico de -332,5 mm no mesmo ano.

Gráfico 26 - Saldo hídrico no sistema bacia hidrográfica Passo Marombas nos futuros em 2030 (a) e 2050 (b) considerando a chuva e a vazão e evapotranspiração como a entrada e saídas do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

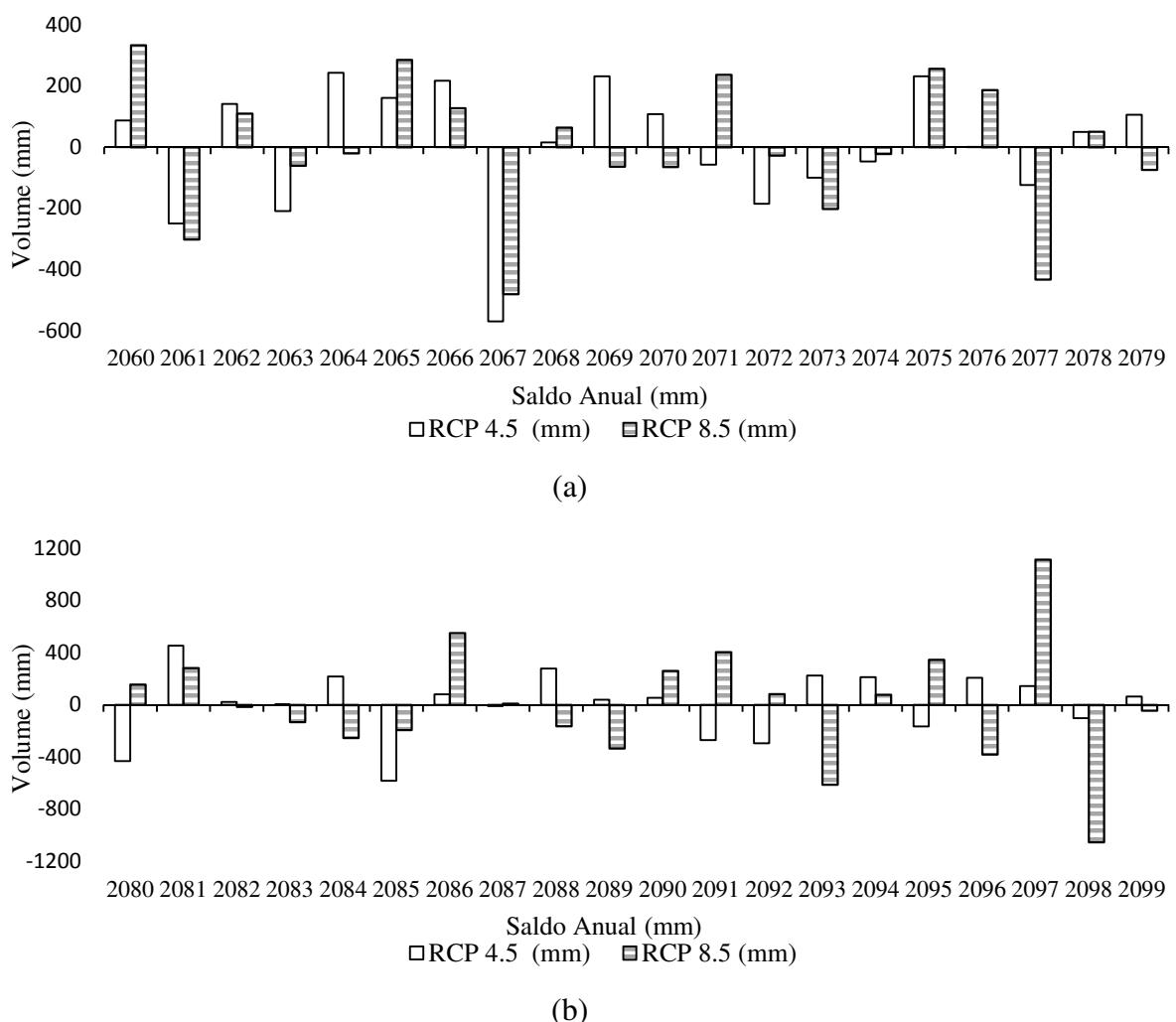
A partir da análise do saldo hídrico no futuro centrado em 2070 para o cenário RCP 4.5 (Gráfico 27[a]), o somatório do déficit total anual será de -1542,6 mm contra um somatório do excesso hídrico anual de 1590,5 mm. Para o cenário RCP 8.5 o somatório do déficit total anual será de -1749,9 mm contra 1651,3 de excesso hídrico, o que sugere maior disponibilidade hídrica no período.

O cenário RCP 4.5 apresentou menor déficit hídrico (-1542,6 mm) em relação ao RCP 8.5 (-1749,9 mm). O ano de 2067 por exemplo, registrará o maior déficit hídrico tanto no cenário RCP 4.5 como no RCP 8.5, com -569,9 mm e -480,8 mm respectivamente. O maior excesso hídrico será no ano de 2060 com um total de 333,4 mm para o cenário RCP

8,5 enquanto no cenário RCP 4,5 será de 86,6 mm.

O saldo hídrico no futuro centrado em 2090 (Gráfico 27[b]) terá a maior amplitude em relação ao déficit e excesso hídrico quando comparado aos demais futuros centrados. No o cenário RCP 4,5, haverá um déficit hídrico geral no período de -1854,3 mm e um excesso hídrico de 2000,6 mm, o que sugere maior disponibilidade hídrica no período. No RCP 8,5 o déficit hídrico geral de -3161,3 mm e o excesso hídrico de 3288,8 mm também sugere maior disponibilidade hídrica no período. De acordo com as projeções, o ano de 2097 registrará o maior excesso hídrico no cenário RCP 8,5 com 1114,8 mm contra 143,5 mm no cenário RCP 4,5. O maior déficit hídrico será em 2098 com -1053,6 mm para o RCP 8,5 enquanto no RCP 4,5 haverá um déficit de -101,2 mm.

Gráfico 27 - Saldo hídrico no sistema bacia hidrográfica Passo Marombas nos futuros em 2070 (a) e 2090 (b) considerando a chuva e a vazão e evapotranspiração como a entrada e saídas do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

5 CONCLUSÃO

O estudo desenvolvido teve como objetivo avaliar os impactos das mudanças climáticas na hidrologia da bacia hidrográfica Passo Marombas (BHPM) para os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 (cenário intermediário) e RCP 8.5 (cenário pessimista), definidos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Para isso as projeções climáticas para a região da BHPM geradas pelo ETA-HadGEM2-ES, modelo climático global britânico convertido em modelo regional pelo Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) do Brasil, foram submetidas ao modelo hidrológico americano HEC-HMS desenvolvido no *Hydrologic Engineering Center* (HEC).

A série de vazão simuladas pelo modelo hidrológico para os futuros centrados em 2030 (2020 a 2039), 2050 (2040 a 2059), 2070 (2060 a 2079) e 2090 (2080 a 2099), foram analisadas e comparadas ao padrão hidrológico da BHPM registrado na série histórica de vazão da estação fluviométrica Passo Marombas no período entre 1977 e 1990, definido neste estudo como período base.

A avaliação das projeções para o período futuro entre 2020 e 2099 (longo prazo) indicou um aumento geral na vazão média de longo termo (Q_{MLT}) de 17,5% e 22,9% para os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente, quando comparadas a Q_{MLT} de 92,5 m³/s registrada no período base.

Para a vazão máxima, em especial a vazão de referência Q_5 , haverá uma redução na ordem de -5,2% no cenário RCP 4.5 e incremento de 2,6% no cenário RCP 8.5 no período longo prazo em relação ao período base. Nos futuros centrados as variações mais significativas serão de -12,3% no futuro centrado em 2030 para o cenário RCP 4.5, e 18,7% no futuro centrado em 2090 para o cenário RCP 8.5. As variações na vazão máxima Q_5 nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 alteram a quantidade de água nos rios de forma considerável o que poderá resultar em eventos extremos de enchentes e inundações mais brandos e rigorosos respectivamente.

Com relação às vazões mínimas para o período de longo prazo, em especial para a vazão Q_{98} , o impacto das mudanças climáticas será oposto entre os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. De acordo com as projeções hidrológicas haverá um aumento na Q_{98} de 13,4% no cenário RCP 4.5 contra uma redução de -19,2% no cenário RCP 8.5.

O aumento da Q_{98} será positivo para a BHPM pois com o aumento da disponibilidade hídrica as atividades que demandam água em seus processos poderão ser ampliadas. O oposto será negativo pois com a confirmação da redução da Q_{98} e diminuição

na disponibilidade hídrica, conflitos pelo uso dos recursos hídricos poderão ser mais evidente e frequentes em períodos de estiagem. Este cenário deverá criar dificuldade para os órgãos controladores e gestores dos recursos hídricos, no sentido de equalizar a oferta e demanda de agua na bacia hidrográfica.

Para os futuros centrados, a Q₉₈ terá um aumento geral no cenário RCP 4.5 com destaque para os incrementos de 15,7% e 16,6% nos futuros centrados em 2050 e 2070. No cenário RCP 8.5 haverá uma variação significativa na Q₉₈ entre os futuros centrados, com destaque para uma redução drástica de 39,0% e 39,9% na Q₉₈ nos futuros centrados em 2030 e 2050, seguido por aumento significativo de 31,7% no futuro centrado em 2070 em relação ao período base (1977-1990). A amplitude prevista para a Q₉₈ é uma evidência da desregulação do sistema hidrológico na BHPM resultado das mudanças climáticas.

A variação nas vazões projetadas para o futuro também será observada no saldo hídrico da BHPM. O máximo excesso e déficit hídrico do período base de 525,8 mm e -581,6 mm registrados nos anos de 1982 e 1983, respectivamente, serão superados no futuro principalmente no cenário RCP 8.5. De acordo com as projeções no ano de 2097 p.e., o excesso hídrico será de 1114,8 mm seguido pelo déficit hídrico de -1053,6 em 2098.

Os resultados demonstraram que os impactos das mudanças climáticas na hidrologia da BHPM serão observados no aumento da amplitude das vazões de referência e no saldo hídrico. Estas alterações são evidencias da desregulação hidrológica na bacia hidrográfica, que deverá ter a distribuição da chuva afetada, tendo como resultado a intensificação de eventos de estiagem e de concentração de chuva em períodos curtos.

Por fim, as projeções hidrológicas para a BHPM para os cenários de mudanças climáticas realizadas neste estudo, são uma base científica para que ações estratégicas sejam tomadas de forma antecipada, com o objetivo de minimizar os impactos das mudanças climáticas na hidrologia da bacia hidrográfica Passo Marombas.

Ainda, este estudo busca contribuir com os eixos científicos principais i e ii definidos pelo IPCC e assimilado pelo INCT para Mudanças Climáticas, pois se propõe a avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos no nível de bacia hidrográfica a partir de tecnologias com a modelagem hidrológica.

6 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ABLAIN, M. et al. A new assessment of the error budget of global Mean Sea Level rate estimated by satellite altimetry over 1993-2008. **Ocean Science**, v. 5, n. 2, p. 193–201, 2009.

ARNELL, N. (2011) Incorporating climate change into water resources planning in England and Wales. **Journal of the American Water Resources Association**, 47 (3). pp. 541-549. ISSN 1752-1688 doi: 10.1111/j.1752-1688.2011.00548.x.

ALAVIAN, V. et al. Climate change and water resources management: A federal perspective. **DC World Bank**, v. 2, n. November, p. 1–29, 2009.

AWA, W.; OU, A.; RAUDE, J. M. **Continuous Modeling of the Mkurumudzi River Catchment in Kenya Using the HEC-HMS Conceptual Model : Calibration , Validation , Model Performance Evaluation and Sensitivity Analysis**. 2018.

BACK, Á. J. **Bacia hidrográficas: classificação e caracterização física (com o programa HidroBacias para cálculos)**. Florianópolis: Epagri, 2014, 162p.

BARNES, H. H. **Roughness Characteristics of Natural Channels**. U.S. Geological Survey. 1967.

BASTOLA, S., MURPHY, C., SWEENEY, J., (2011). **The role of hydrological modeling uncertainties in climate change impact assessments of Irish river catchments**. *Adv. Water Resour.* 34 (5), 562–576. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.01.008>.

BARKER, T.; e Co-autores. IPCC, Painel Intergovernamental sobre Mudança Do Clima. Mudança do Clima 2007: **Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade - Contribuição do Grupo de Trabalho III ao Quarto Relatório de Avaliação do IPCC - Sumário para os Formuladores de Políticas**, Tradução: Anexandra de Ávila Ribeiro. 2007.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. (2013) **Atmosfera, Tempo e Clima**. 9^a edição. Porto Alegre: Bookman, 512 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Adaptação à Mudanças Climática**. Brasília: MMA, 2018. 329p.

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. B. Calibração hierárquica do modelo swat em uma bacia hidrográfica catarinense. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p.53-65, 2016.

BRIGODE P.; OUDIN L.; PERRIN C. (2013). Hydrological model parameter instability: A source of additional uncertainty in estimating the hydrological impacts of climate change. **Journal of Hydrology** 476 p. 410–425.

BENISTON, M.; DIAZ, H. F. The 2003 heat wave as an example of summers in a greenhouse climate? Observations and climate model simulations for Basel, Switzerland. **Global and Planetary Change**, v. 44, n. 1–4, p. 73–81, 2004.

BENNETT, T.; PETERS, J. Continuous Soil Moisture Accounting in the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). **ASCE Technical Publication**, v. 8806, n. 1, p. 1–10, 2000.

BEVEN, K. I believe in climate change but how precautionary do we need to be in planning for the future? **Hydrological Processes**, v. 25, n. 9, p. 1517–1520, 2011.

NATEL DE MOURA, C. **Impactos hidrológicos de mudanças climáticas na bacia hidrográfica do Alto Canoas, SC** / Carolina Natel de Moura. - Lages , 2017. 124 p.

CIAIS, P. et al. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. **Nature**, v. 437, n. 7058, p. 529–533, 2005.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia: para Engenharia e Ciências Ambientais**. Porto Alegre, RS: Abrh, 2013. 350 p.

CHOU, S. C. et al. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, v. 03, n. 05, p. 438–454, 2014.

CHURCH, J. A.; WHITE, N. J. Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. **Surveys in Geophysics**, v. 32, n. 4–5, p. 585–602, 2011.

CRUTZEN, P. J., STOERMER, E. F. 2000. The Anthropocene. **Global Change News**. 2000.

CRUTZEN, P. J. 2002. Geology of mankind: the Anthropocene. **Nature** 415, 23. (doi:10.1038/415023a).

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Solos do Estado de Santa Catarina**: Rio de Janeiro: Emprapa Solos, 2004, 721 p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. mapa, Escala 1:250.000.

EMBRAPA, 2012 – **Atlas climático da região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Marcos Silveira Wrege ... [et al.], editors técnicos. – Brasília, DF: Embrapa, 2012. ISBN 978-85-7035-013-8.

FLEMING, M. (2002). **Continuous Hudrologic Modeling with HMS: Parameter Estimation and Model Calibration and Validation**. Cookeville, TN: Texas Technological University.

FLEMING, M.; NEARY, V. **Continuous Hydrologic Modeling Study with the Hydrologic Modeling System**. n. June, p. 175–183, 2004.

Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D. W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D. C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M., & Van

Dorland, R. (2007). **Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing.** In: **Climate Change 2007:** The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Inter-governmental Panel on Climate Change [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., & Miller, H. L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

FOWLER et al (2007). **Linking climate change modeling to impacts studies: recente advances in downscaling techniques for hydrological modeling.** Int. J. Climatol., 27, 1547-1578.

FOWLER, h. j.; BLENKINSOP, A. S.; TEBALDI, C. **Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling.** Int. J. Climatol. V.27, p. 1547-1578, 2007. DOI: 10.1002/joc.1556.

FROLICHER, T. L.; Joos, F. 2010. **Reversible and Irreversible Impacts of Greenhouse Gas Emissions in multi-century Projections with the NCAR Global Coupled Carbon Cycle-climate Model.** Clim Dyn, 35: 1439-1459.

GIORGİ, F. AND B. HEWITSON. 2001. **Regional climate information - evaluation and projections.** Chapter 10. In: IPCC (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press. pp. 583–638.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Toward improve calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information. **Water Resources Research**, V. 34, n. 4, p. 751-763, 1998.

IBGE, 2018. **População estimada:** IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Estimativas da população residente com data de referência 1º de julho de 2018.

IBGE, 2016. **População ocupada:** IBGE, Cadastro Central de Empresas (CEMPRE) 2016 (data de referência: 31/12/2016), IBGE, Estimativa da população 2016 (data de referência: 1/7/2016).

IBGE, 2010. **Percentual da população com rendimento nominal mensal per capita de até 1/2 salário mínimo:** IBGE, Censo Demográfico 2010.

IBGE, 2010. **Taxa de escolarização de 6 a 14 anos de idade:** IBGE, Censo Demográfico 2010.

IBGE, 2010. **Esgotamento sanitário adequado:** Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão, IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. **Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

- IPCC. **Summary for Policymakers.** [s.l.: s.n.]
- LAMBIN, E. F., GEIST, H. J. (EDS) 2006 Land-Use and Land-Cover Change: Local processes and Global Impacts. **The IGBP Series, Springer-Verlag, Berlin**, 2006, 222 pp.
- LE QUÉRÉ, C. et al. Global Carbon Budget 2017. **Earth Syst. Sci. Data** Etsushi Kato Markus Kautz Ralph F. Keeling Kees Klein Goldewijk Nathalie Lefèvre Andrew Lenton Danica Lombardozzi Nicolas Metzl Yukihiro Nojiri Antonio Padin Janet Reimer, v. 1010333739, n. 10, p. 405–448, 2018.
- LUDWIG, R., MAY, I., TURCOTTE, R., VESCOVI, L., BRAUN, M., CYR, J.F., FORTIN, L.G., et al., (2009). **The role of hydrological model complexity and uncertainty in climate change impact assessment.** *Adv. Geosci.* 21 (2009), 63–71. <http://dx.doi.org/10.5194/adgeo-21-63-2009>.
- LYRA, A. et al. **Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution.** 2017.
- MACFARLING MEURE, C. et al. Law Dome CO₂, CH₄and N₂O ice core records extended to 2000 years BP. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 14, 2006.
- MAZURCZYK, T. et al. American archives and climate change: Risks and adaptation. **Climate Risk Management**, n. February, p. 1–15, 2018.
- MAIDMENT, D.R. **Handbook of Hydrology.** 1. ed. Michigan: McGraw-Hill, 1993.
- MCKAY, N. P.; OVERPECK, J. T.; OTTO-BLIESNER, B. L. The role of ocean thermal expansion in Last Interglacial sea level rise. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 14, p. 4–9, 2011.
- MATOTT, L.S., BABENDREIER, J.E., PURUCKER, S.T., (2009). **Evaluating uncertainty in integrated environmental models: a review of concepts and tools.** *Water Resour. Res.* 45, W06421. <http://dx.doi.org/10.1029/2008WR007301>.
- MORIASI, D.N., et al. (2007) Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50, 885-900.
- MOSS, R. H.; e Co-autores. 2010. **The next generation of scenarios for climate change research and assessment.** *Nature*. Vol. 463 (11): 747-756.
- MUJUMDAR, P.P. and KUMAR, NAGESH (2012). **Floods in a Changing Climate: Hydrologic Modeling.** 178p. Cambrigde Press.
- NETO, S. L. R; **Um modelo conceitual para integração de modelos científicos e informações geográficas.** In: III workshop Brasileiro de Geoinformação – GEOINFO. Rio de Janeiro, 2001. Anais...Rio de Janeiro. Sociedade Brasileira de Computação, p. 71-78. 2001.

ORESKES, N. E SSAY on Climate Change. **Science**, v. 306, n. January, p. 2004–2005, 2005.

OLIVEIRA, G. G.; PEDROLLO, O. C.; CASTRO, N. M. R. Stochastic approach to analyzing the uncertainties and possible changes in the availability of water in the future based on scenarios of climate change. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 8, p. 3585–3604, 2015.

PANDOLFO, C.; BRAGA, H. J.; SILVA JR, V. P. da; MASSIGNAM, A. M., PEREIRA, E. S.; THOMÉ, V. M. R.; VALCI, F.V. **Atlas climatológico do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis: Epagri, 2002.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS - PBMC, (2013). **Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Sumário Executivo GT1. PBMC, Rio de Janeiro, Brasil. 24 p.

PERAZZOLI, M.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V. Assessing the impact of climate change scenarios on water resources in southern Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 58, n. 1, p. 77–87, 2013.

PINTO, O. B. J.; ROSSETE, A. N. Caracterização Morfométrica Da Bacia Hidrográfica Do Ribeirão Cachoeira , Mt-Brasil. **Geoambiente, Goiás**, v. 4, p. 38–53, 2005.

PLATTNER, G. K.; e Co-autores, 2008. **Long-Term Climate Commitments Projected with Climate Carbon Cycle Models**. **J. Climate**, 21, 2721–2751.

PNUD, 2010. **Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM)**: Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD.

POELKING, E. L. et al. Variações da frente da geleira polar club, península potter (Ilha rei george, Antártica marítima) entre 1986 e 2011. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 3, p. 379–388, 2014.

PRUDHOMME et al (2002). **Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: where are we now?** **Hydrol. Process.** 16, 1137-1150.

RASKIN, P.; e Co-autores. **Global Scenarios in Historical Perspective**. Cap. 2. In: Ecosystems and Human Well-being: Scenarios. 2005.

SAMPAIO, G.; DIAS, P. L. DA S. Evolução dos Modelos Climáticos e de Previsão de Tempo e Clima. **Revista USP**, n. 103, p. 41, 2014.

SCHÄR, C. et al. The role of increasing temperature variability in European summer. **Nature**, v. 427, n. January, p. 332–336, 2004.

SCHRÖTER, D.; ZEBISCH, M.; GROTHMANN, T. Climate Change in Germany - Vulnerability and Adaptation of Climate-Sensitive Sectors. **Klimastatusbericht**, p. 44–56, 2005.

SINGH, W. R.; JAIN, M. K. Continuous Hydrological Modeling using Soil Moisture Accounting Algorithm in Vamsadhara River Basin, India. **Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering**, v. 4, n. 4, p. 398–408, 2015.

SOCIETY, A. M. A New Era in Climate Change Research. n. September, p. 1383–1394, 2007.

SOLOMON, S.; e Co-autores, 2009. **Irreversible climate chance due to carbon dioxide emissions**. The National Academy of Science of The USA, vol. 106, no. 6, 1704-1709.
STEYAERT, L.T.; ed. **Environmental modeling with GIS**. New York, Oxford University Press, 1993. Cap. 14, p. 147-167.

STEFFEN, W. et al. The Anthropocene: conceptual and historical perspectives. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 369, n. 1938, p. 842–867, 2011.

TENG, J., VAZE, J., CHIEW, F. H. S., WANG, B., AND PERRAUD, J.-M.(2012). **Estimating the relative uncertainties sourced from GCMs and hydrological models in modeling climate change impact on runoff**, J. Hydrometeorol., 13, 122–139, doi:10.1175/jhm-d-11-058.1.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1998.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). Hydrologic Modeling System HEC-HMS: River analysis system: **Technical Reference Manual**. 2000. USACE, Davis: 148p, 2000.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). Hydrologic Modeling System HEC-HMS: River analysis system: **User's Manual**. USACE, Davis: 584p, 2015c.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). Hydrologic Modeling System HEC-HMS: River analysis system: **User's Manual**. USACE, Davis: 600 p, 2015b.

VERTESSY, R.A.; HATTON, T.J.; O'SHAUGHNESSY, P.J.; JAYASURIYA, M.D.A. **Predicting water yield from a mountain ash forest catchment using a terrain analysis based catchment model**. J. Hydrology, 150:665-700, 1993.

WADA, Y. et al. Modeling global water use for the 21st century: The Water Futures and Solutions (WFaS) initiative and its approaches. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 1, p. 175–222, 2016.

WILBY, R. L. **Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods**. Available on line at: http://www.ipcc-data.org/guidelines/dgm_no2_v1_09_2004.pdf.