

**CAROLINA NATEL DE MOURA**

**IMPACTOS HIDROLÓGICOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO ALTO CANOAS, SC**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Ciências Ambientais do Centro de Ciências Agroveterinárias, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Sílvio Luís Rafaeli Neto.  
Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cláudia Guimarães Camargo Campos.

**LAGES, SC**

**2017**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada pelo(a) autor(a), com auxílio  
do programa de geração automática da  
Biblioteca Setorial do CAV/UEDESC

Natel de Moura, Carolina Impactos  
hidrológicos de mudanças climáticas na bacia  
hidrográfica do Alto Canoas, SC / Carolina Natel  
de Moura. - Lages , 2017.

124 p.

Orientador: Silvio Luís Rafaeli Neto

Co-orientadora: Cláudia Guimarães Camargo  
Campos Dissertação (Mestrado) - Universidade do  
Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências  
Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação ,  
Lages, 2017.

1. Vazão. 2. Regime hidrológico. 3.  
Modelagem hidrológica. 4. Plano de bacia. I. Luís  
Rafaeli Neto, Silvio. II. Guimarães Camargo Campos,  
Cláudia

. , .III. Universidade do Estado de Santa  
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias,  
Programa de Pós-Graduação . IV. Título.

**CAROLINA NATEL DE MOURA**

**IMPACTOS HIDROLÓGICOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO ALTO CANOAS, SC**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Ciências Ambientais do Centro de Ciências Agroveterinárias, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais.

**Banca Examinadora**

Orientador:

---

(Dr. Sílvio Luís Rafaeli Neto)  
Universidade do Estado de Santa Catarina

Co-orientadora:

---

(Dra. Cláudia Guimarães Camargo Campos)  
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membros:

---

(Dr. Ildgardis Bertol)  
Universidade do Estado de Santa Catarina

---

(Dr. Fernando Mainardi Fan)  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul



## AGRADECIMENTOS

Em especial aos meus pais, e à toda minha família por toda força, incentivo e amor.

Ao professor orientador Sílvio Luís Rafaeli Neto, pela oportunidade de desenvolvimento desta pesquisa, pela confiança, pelos ensinamentos e pelo exemplo de dedicação e profissionalismo.

À professora Cláudia Camargo Campos, pela coorientação, pelo auxílio durante o desenvolvimento desta pesquisa e por sempre demonstrar-se muito solícita e aberta aos meus questionamentos.

Ao meus amigos e colegas de pesquisa do Laboratório de Hidrologia do CAV- UDESC, pela grande ajuda, aprendizado compartilhado e boa convivência.

À UNIEDU, pelo auxílio financeiro concedido de bolsa de estudo.

À Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) e a todos os professores do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, pela contribuição que tiveram durante esses dois anos de mestrado.

Ao Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI) e Agência Nacional de Águas (ANA) pelos dados disponibilizados.

Às bolsistas voluntárias Amanda Gabriela Luz de Souza e Giulliana Senem Sari Momm, pelas horas de dedicação e auxílio no desenvolvimento de etapa fundamental do trabalho.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização de mais esta conquista –  
Meu muito obrigada!



## RESUMO

O impacto de mudanças climáticas sobre os recursos hídricos é uma preocupação global, especialmente em relação a disponibilidade hídrica para abastecimento, dessedentação de animais e insumo de processos produtivos, além da ocorrência de eventos hidrológicos extremos que provocam desastres naturais. A escassez de informações que subsidiem os prognósticos a longo prazo, e a gestão eficiente dos recursos hídricos frente às mudanças climáticas, resulta por ser um tema relativamente recente, principalmente no que tange a abordagens e estratégias para lidar com os possíveis impactos negativos. Este trabalho objetiva avaliar os impactos hidrológicos de mudanças climáticas na bacia hidrográfica do Alto Canoas, a fim de subsidiar a gestão de seus recursos hídricos. A projeção da vazão futura foi realizada pelo modelo hidrológico SWAT, sob dois cenários climáticos denominados RCP 4.5 e RCP 8.5, nos futuros centrados em 2030, 2050, 2070 e 2090, projetados pelo modelo climático regionalizado Eta-HadGEM2-ES, com resolução de 20 km. Os impactos hidrológicos na bacia decorrentes destes cenários foram avaliados sobre as vazões, tendo como referência os dados observados no Período Base (1977-1987). A projeção hidrológica a longo prazo (2020-2099) indicou um aumento da vazão média mensal de 13,49% e 13,19% para RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente, além de um aumento na variabilidade temporal das vazões. A análise tendencial apontou tendência de aumento das vazões nos meses de maio e dezembro sob RCP 4.5 e aumento positivo nos meses de maio, junho, setembro e outubro sob RCP 8.5. Os resultados indicam que, nos dois cenários hidrológicos projetados, pode haver um aumento nas vazões modais ( $Q_{50}$ ) e na ocorrência de eventos extremos de máximas e, ainda, redução nas vazões mínimas correspondentes a  $Q_{95}$  e  $Q_{98}$ . O balanço hídrico futuro indicou que, embora exista uma tendência de aumento da vazão no futuro em meses específicos, essa alteração não reflete em aumento expressivo na disponibilidade hídrica da bacia. Estes resultados apontam para a importância da elaboração de um plano de bacia e que este contemple diretrizes de outorga consistentes com a possível redução das vazões mínimas, implementação de cobrança pelo uso da água, enquadramento e estratégias de participação social na tomada de decisão, a fim de melhorar sua resiliência diante dos efeitos de possíveis cenários climáticos até o final do século XXI.

**Palavras-chave:** Vazão. Regime hidrológico. Modelagem hidrológica. Plano de bacia.



## ABSTRACT

The impact of climate change on water resources is a global concern, especially in relation to water availability for water supply, animal watering and the input of productive processes, as well as the occurrence of extreme hydrological events that cause natural disasters. The scarcity of information that supports long-term prognoses and the efficient management of water resources in the face of climate change is a relatively recent issue, particularly as regards approaches and strategies to deal with possible negative impacts. This paper aims to evaluate the hydrological impacts of climate change in the Alto Canoas basin, in order to support its water resources management. The projection of the future flow was performed by the SWAT hydrological model, under two climatic scenarios called RCP 4.5 and RCP 8.5, in the futures centered in 2030, 2050, 2070 and 2090, projected by the Eta-HadGEM2-ES regionalized climate model. The hydrological impacts in the basin resulting from these scenarios were evaluated on the average monthly flows, using as reference the data observed in the Base Period (1977-1987). The long-term hydrological projection (2020-2099) indicated a general increase in flow by 13.49% and 13.19% for RCP 4.5 and RCP 8.5, respectively, in addition to an increase in the temporal variability of flows. The trend analysis showed a tendency to increase flow in the months of May and December under RCP 4.5 and a positive increase in the months of May, June, September and October under RCP 8.5. The results indicate that, in the two projected hydrological scenarios, there may be an increase in the modal flows ( $Q_{50}$ ) and in the occurrence of extreme events of maximums, and also a reduction in the minimum flows corresponding to  $Q_{95}$  and  $Q_{98}$ . The future water balance indicated that, although there is a future trend of increase in the flow in specific months, this change does not reflect a significant increase in the water availability of the basin. These results point to the importance of the elaboration of a basin plan and that it contemplates granting guidelines consistent with the possible reduction of minimum flows, implementation of charging for water use, framing of water resources and strategies of social participation in decision making, in order to improve their resilience to the effects of possible climate scenarios by the end of the 21st century.

**Key-words:** Flow. Hydrological regime. Hydrological modeling. Basin plan.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mudança relativa das vazões (%) sob o cenário SRES A1B no século XXI (2041-60) em relação ao período 1900-70 do 20C3M.....	30
Figura 2 - Projeções regionalizadas de mudanças na precipitação (mm/dia) entre o presente e diferentes períodos futuros. Os limiares inferiores (mín) e limiares superiores (máx) das mudanças extraídas das quatro simulações do modelo ETA aninhado ao HadGEM2 – ES, nos cenários RCP 4.5 e 8.5, para Dezembro-Janeiro-Fevereiro (DJF) e Junho-Julho-Agosto (JJA). .....	35
Figura 3 – Mapa de situação da bacia hidrográfica do Alto Canoas e estações pluviométricas e fluviométrica utilizadas no trabalho. ....	43
Figura 4 - Tipo de solo da bacia do Alto Canoas. ....	44
Figura 5 – Uso da terra da bacia do Alto Canoas. ....	45
Figura 6 - Declividade da bacia do Alto Canoas. ....	45
Figura 7 - Descrição geral dos materiais utilizados e métodos empregados. ....	46
Figura 8 - Fluxograma da classificação supervisionada. ....	50
Figura 9 - Fluxograma de trabalho de execução do modelo hidrológico SWAT.....	54
Figura 10 - Etapas da elaboração de um plano de bacia e cenários prospectivos. ....	60
Figura 11 - Análise dos resultados dos cenários hidrológicos projetados. ....	60
Figura 12 - Uso da terra nos anos de 1983 (a) e 2005 (b) da bacia do Alto Canoas. ....	68
Figura 13 - Resultado do cálculo do balanço hídrico anual (mm) executado no ArcSWAT 2012 para o período entre 1977 a 2002. ....	69
Figura 14 - Comparação da temperatura do ar (a: mínima; b: máxima) no período de 1961 a 1990 simulada pelo modelo climático Eta-HadGEM2-ES e dados observados na estação Lages-SC. ....	76
Figura 15 Radiação solar (a), Umidade relativa (b) e Velocidade do vento (c) no período de 1961 a 1990 simuladas pelo modelo EtaHadGEM-ES e observadas na estação meteorológica. .....	77
Figura 16 - Precipitação no período de 1961 a 1990 simulada pelo modelo EtaHadGEM-ES e precipitação observada na estação Lages-SC. ....	78



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Vazão anual e vazão média de longo período do Período Base.....	49
Gráfico 2 - Hidrogramas observado e simulado no período de calibração mensal do modelo SWAT.....	72
Gráfico 3 - Dispersão entre vazões simuladas na calibração e observadas para a bacia do Alto Canoas. ....	73
Gráfico 4 - Hidrogramas observado e simulado no período de validação mensal do modelo SWAT.....	74
Gráfico 5 - Dispersão entre vazões simuladas na validação e observadas para a bacia do Alto Canoas. ....	75
Gráfico 6 - Erro percentual das vazões médias no período 2014-2015 sob os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 em relação às vazões observadas. ....	79
Gráfico 7 - Médias mensais observadas e simuladas nos RCP 4.5 e RCP 8.5 para o período de avaliação (2014-2015). ....	80
Gráfico 8 - Hidrograma das vazões observada na estação Rio Bonito e simuladas nos RCP 4.5 e RCP 8.5 para o período de avaliação (jan-2014 a dez/2015).....	81
Gráfico 9 - Curva de Permanência das vazão média mensal observada e simulada nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 no período de avaliação (jan-2014 – dez-2015). ....	81
Gráfico 10 - Boxplot das vazões do Período Base, RCP 4.5 e RCP 8.5. ....	82
Gráfico 11 - Comparação entre as médias mensais da vazão no Período Base, RCP 4.5 e RCP 8.5 no futuro (2020-2099). ....	83
Gráfico 12 - Comparação entre as curvas de permanência do Período Base e RCP 4.5 e RCP 8.5 no futuro (2020-2099). ....	84
Gráfico 13 - Comparação entre as curvas de permanência do Período Base e diferentes períodos do futuro para o RCP 4.5. ....	85
Gráfico 14 - Comparação entre as curvas de permanência dos diferentes períodos do futuro para o RCP 8.5.....	86
Gráfico 15 - Evolução da vazão de referência $Q_5$ (a) e $Q_{10}$ (b) nos RCP 4.5 e RCP 8.5 em comparação com a $Q_5$ e $Q_{10}$ média do Período Base.....	88
Gráfico 16 - Evolução da vazão de referência $Q_{50}$ nos RCP 4.5 e RCP 8.5 em comparação com a $Q_{50}$ média no Período Base.....	89
Gráfico 17 - Evolução da vazão de referência $Q_{90}$ (a), $Q_{95}$ (b) e $Q_{98}$ (c) nos RCP 4.5 e RCP 8.5 em comparação com $Q_{90}$ , $Q_{95}$ e $Q_{98}$ média no Período Base.....	90

Gráfico 18 - Armazenamento de água (mm) no Período Base para a bacia do Alto Canoas...	91
Gráfico 19 - Precipitação média mensal nos diferentes cenários e futuros centrados.....	92
Gráfico 20 - Evapotranspiração média mensal nos diferentes cenários e futuros centrados....	93
Gráfico 21 – Média mensal da vazão nos futuros centrados em 2030, 2050, 2070 e 2090 sob os RCP 4.5 e RCP 8.5.....	94
Gráfico 22 - Armazenamento de água (mm) nos futuros centrados em 2030 (a), 2050 (b), 2070 (c) e 2090 (d) para o RCP 4.5 e RCP 8.5.....	95

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros do gerador de dados climáticos calculados com base nos dados das estações pluviométricas Vila Canoas e Urubici (período de 1977 – 2005) e na estação meteorológica da EPAGRI/CIRAM. ....	53
Tabela 2 - Classificações gerais de desempenho de modelos hidrológicos para as estatísticas recomendadas na escala mensal. ....	58
Tabela 3 - Comparação do uso da terra da bacia do Alto Canoas entre os anos de 1986 e 2005. ....	67
Tabela 4 - Valores mínimo e máximo dos parâmetros calibrados. ....	72
Tabela 5 – Percentagem de alteração das vazões de referência nos futuros centrados (2030, 2050, 2070 e 2090) sob o cenário RCP 4.5 em relação à vazões de referência média no Período Base. ....	86
Tabela 6 - Percentagem de alteração das vazões de referência nos futuros centrados (2030, 2050, 2070 e 2090) sob o cenário RCP 8.5 em relação à vazões de referência média no Período Base. ....	87



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Descrição dos cenários provenientes do Relatório Especial sobre Cenários de Emissão (SRES, 2000), famílias A1, A2, B1 e B2.....	26
Quadro 2 - Descrição dos cenários RCPs.....	27
Quadro 3 - Períodos de dados utilizados no trabalho.....	47
Quadro 4 - Parâmetros do gerador climático.....	52
Quadro 5 - Cenários hidrológicos estudados neste trabalho. ....	59
Quadro 6 - Parâmetros sensíveis selecionadas para a calibração mensal da bacia do Alto Canoas. ....	70



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AGRC	Agricultural
BH	Balanço Hídrico
ETP	Evapotranspiração de referência
FRSE	Forest Evergreen
GCM	Modelo Climático Global
GEE	Gases do Efeito Estufa
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
MDT	Modelo Digital de Terreno
NS	Coefficiente de Nash-Sutcliffe
PAST	Pasture
PBIAS	Percentual de Tendência
PM	Método Penman – Montheith
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PREC	Precipitação
Q	Vazão
Qmed	Vazão média
QMLP	Vazão média de longo período
Qobs	Vazão observada
Qsim	Vazão simulada
R <sup>2</sup>	Coefficiente de determinação
RCM	Modelo Climático Regional
RCP	Representative Concentration Pathway
RMSE	Raiz do Erro Médio Quadrático
RPPN	Reserva Particular do Patrimônio Natural
RSR	Proporção da Raiz do Erro Médio Quadrático para o desvio padrão dos dados medidos
SDS	Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission

SUFI-2	Sequential Uncertainty Fitting 2
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
SWAT – CUP	Soil and Water Assessment Tool – Calibration and Uncertainty Prediction
TM	Thematic Mapper
TW	Método Thorntwhaite
UDESC	Universidade do Estado de Santa Catarina
URBN	Residential
URH	Unidade de Resposta Hidrológica
USGS	Serviço Geológico dos Estados Unidos
WGEN	Weather Generation

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS, MODELOS E CENÁRIOS DE PROJEÇÃO CLIMÁTICA.....	25
2.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	28
2.3 IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO RECURSOS HÍDRICOS NO MUNDO.....	30
2.3.1 Tendência de aumento das vazões.....	31
2.3.2 Tendência de redução das vazões.....	32
2.3.3 Tendência divergente nas vazões.....	33
2.3.4 Impacto das mudanças climáticas nas vazões de bacias brasileiras.....	34
3 HIPÓTESES.....	39
4 OBJETIVOS.....	41
4.1 OBJETIVO GERAL.....	41
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	41
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
5.1 SÉRIES HISTÓRICAS E DADOS CARTOGRÁFICOS.....	46
5.2 USO DA TERRA DA BACIA DO ALTO CANOAS.....	50
5.3 MODELO HIDROLÓGICO SWAT.....	51
5.3.1 Calibração e validação do modelo hidrológico.....	54
5.4 VALIDAÇÃO DO MODELO CLIMÁTICO ETA-HADGEM2-ES.....	58
5.5 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS HIDROLÓGICOS DE CENÁRIOS DE PROJEÇÃO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS VAZÕES DA BACIA DO ALTO CANOAS.....	59
5.5.1 Análise exploratória dos dados.....	61
5.5.2 Análise das vazões de referência.....	61
5.5.3 Análise de tendência.....	62

5.5.4 Balanço Hídrico.....	64
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	67
6.1 USO DA TERRA DA BACIA DO ALTO CANOAS .....	67
6.2 DESEMPENHO DO MODELO HIDROLÓGICO MENSAL .....	69
6.3 VALIDAÇÃO DO MODELO CLIMÁTICO ETA-HADGEM2-ES.....	75
6.3.1 Validação dos dados climáticos simulados no Período Base .....	75
6.3.2 Validação das vazões mensais simuladas no período de avaliação (2014-2015)....	79
6.4 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS HIDROLÓGICOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA DO ALTO CANOAS .....	82
6.4.1 Parte I - Análise das projeções hidrológicas a longo prazo .....	82
6.4.2 Parte II – Análise das projeções hidrológicas em diferentes futuros centrados .....	84
7 RECOMENDAÇÕES PARA A GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA DO ALTO CANOAS .....	97
7.1 Enquadramento dos recursos hídricos .....	97
7.2 Outorga de direito de uso dos recursos hídricos.....	97
7.3 Cobrança pelo uso de recursos hídricos .....	99
7.4 Sistema de informações sobre recursos hídricos da bacia do Alto Canoas.....	100
7.5 Agência de Águas.....	100
7.6 Estratégias de adaptação às mudanças climáticas .....	101
8 CONCLUSÕES .....	103
REFERÊNCIAS .....	105
APÊNDICES .....	115

## 1 INTRODUÇÃO

A segurança hídrica das populações é fundamental para sua sobrevivência e o desenvolvimento de suas atividades socioeconômicas. Para a garantia da segurança hídrica, é necessária a disponibilidade de água (volume e distribuição), que assegura o acesso à água em quantidade e qualidade, mas exige uma constante busca pela efetiva sustentabilidade, no sentido de evitar a escassez e degradação deste recurso.

Estudos indicam que a ocorrência de mudanças climáticas poderá afetar os recursos hídricos, agravando a ocorrência de eventos hidrológicos extremos e comprometendo a qualidade das águas (IPCC, 2007). Estes impactos podem ocorrer sobre os diversos processos que envolvem o ciclo hidrológico, como umidade do solo, reserva subterrânea, evaporação, evapotranspiração e escoamento superficial.

Essas modificações poderão exercer grande pressão nos sistemas hídricos brasileiros e aumentar as vulnerabilidades em relação à disponibilidade de água decorrentes da alteração do regime hidrológico de uma bacia (BRASIL, 2015), agravadas pelo aumento da demanda projetada por água para as próximas décadas. Dessa forma, o conhecimento dos efeitos de possíveis mudanças nos padrões do clima global sobre a disponibilidade hídrica é relevante nos processos decisórios dos gestores da água. Tais informações serão úteis na elaboração de medidas que visem melhorar a resiliência hídrica da bacia e da sociedade que dela depende.

Os Planos de Bacias Hidrográficas são os instrumentos legais no Brasil que orientam os processos decisórios de gerenciamento dos seus recursos hídricos. O objetivo desses planos é promover a compatibilização entre oferta e demanda hídricas, em quantidade e qualidade, abrangendo a territorialidade da bacia. O principal produto de um Plano de Bacia são as diretrizes que norteiam as ações de gestão hídrica que serão executadas pela estrutura organizacional de gestão, o Comitê de Bacia e o respectivo órgão executivo (Agência de Água ou Secretaria de Estado).

Um dos problemas enfrentados no estabelecimento dessas diretrizes está na escassez de informações consistentes sobre o comportamento hidrológico futuro da bacia, especialmente nos horizontes de médio e longo prazos (BRASIL, 2016). O procedimento padrão empregado atualmente, nos planos de bacia elaborados para o Estado de Santa Catarina, é utilizar-se de informações hidrológicas (chuva, vazão, evapotranspiração) de séries históricas para a projeção da disponibilidade hídrica futura (SANTA CATARINA, 2015; 2009a; 2009b; 2009c; 2002; GONÇALVES et al., 2007). No entanto, considerar que as vazões no futuro ocorrerão dentro de uma distribuição de probabilidades observada no

passado é limitada, visto que não considera os impactos que as possíveis alterações no padrão climático global podem ocasionar no regime hidrológico futuro de uma bacia (OLIVEIRA, 2014).

O conhecimento das possíveis alterações no regime hidrológico de uma bacia pode ser obtido a partir do acoplamento de modelos de projeção de cenários climáticos (modelos climáticos) e de projeção de cenários hidrológicos na bacia (modelos hidrológicos). O conhecimento dos impactos de mudanças climáticas no ciclo hidrológico de uma bacia fornece bases para o planejamento dos seus recursos hídricos, pelo qual se contemple medidas adaptativas, gerenciamento de riscos, prevenção e mitigação de eventos extremos e diretrizes e/ou políticas para a gestão de recursos hídricos (MASOOD; TAKEUSHI, 2016).

Este trabalho se justifica pela necessidade de informações que deem suporte ao estabelecimento de diretrizes frente a possibilidade de ocorrência de mudanças climáticas na gestão dos recursos hídricos de bacias hidrográficas brasileiras, incluindo a bacia hidrográfica do Alto Canoas.

A bacia hidrográfica do Alto Canoas é uma sub-bacia da bacia do rio Canoas, maior bacia hidrográfica do Estado de Santa Catarina, localizada na região denominada de Serra Catarinense, no sul do Brasil. A escolha desta bacia para a aplicação do estudo deve-se à sua importância hidrológica para a bacia do Rio Canoas, por conter em seu interior a nascente do principal rio formador do Rio Uruguai (rio de maior extensão), o Rio Canoas, junto à Serra do Corvo Branco, no município de Urubici, ser uma zona importante de recarga do Aquífero Guarani, apresentar usinas hidrelétricas de pequeno e grande porte a jusante (Usina Hidrelétrica Garibaldi, Usina Hidrelétrica de São Roque e Usina Hidrelétrica de Campos Novos) e pelas suas condições ambientais preservadas, com predominância de mata nativa.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica busca apresentar os conceitos fundamentais para o entendimento deste trabalho, abrangendo a questão das mudanças climáticas e os modelos utilizados na projeção de cenários e a utilização da modelagem hidrológica em estudos de impactos das mudanças climáticas, assim como um estado da arte sobre os trabalhos publicados em impacto das mudanças climáticas, divididos em impactos nos recursos hídricos no mundo e no Brasil.

### 2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS, MODELOS E CENÁRIOS DE PROJEÇÃO CLIMÁTICA

Nos últimos anos, séries históricas de variáveis climáticas, tais como temperatura do ar e precipitação, são estudadas em diversas regiões do mundo, para testar hipóteses de que existem alterações no comportamento do clima. Previsões do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) sugerem que pode haver um aumento acima de 2°C na temperatura média global e uma alteração na distribuição da precipitação no mundo, decorrente das concentrações elevadas dos Gases de Efeito Estufa (GEE), caso estes continuem a serem produzidos às taxas crescentes (IPCC, 2007).

Projeções de cenários de mudanças climáticas a longo prazo são realizadas por Modelos de Circulação Geral (GCMs, em inglês). Um GCM é um tipo de modelo climático que emprega um modelo matemático da circulação geral da atmosfera ou oceano. Utiliza-se das equações de Navier-Stokes em uma esfera rotativa com termos termodinâmicos para várias fontes de energia (radiação, calor latente), que são usados para previsão do tempo, compreensão do clima e previsão de mudanças climáticas.

Para a realização de projeções de mudança do clima, os modelos do sistema terrestre são forçados por um conjunto de condições de contorno determinadas por cenários de emissões antropogênicas de dióxido de carbono e outros gases radiativamente ativos (SAMPAIO; DIAS, 2014). As emissões antropogênicas de gases do efeito estufa são principalmente motivadas pelo tamanho da população, atividade econômica, estilo de vida, uso de energia, padrões de uso da terra, tecnologias e políticas climáticas.

Os cenários climáticos futuros, derivados de MCGs, apresentam escalas espaciais (240 a 600 km) geralmente incompatíveis com as escalas requeridas para estudos de impactos, o que exige o refinamento de escala, conhecido como *downscaling*, a partir da incorporação de

informações locais que dão origem ao Modelo Climático Regional (RCM, em inglês) (CHOU et al., 2014).

As alterações climáticas projetadas pelos modelos climáticos, caracterizadas em função da emissão de gases e o aumento do efeito estufa, se refletem na modificação de variáveis representativas do clima, tais como precipitação, temperatura do ar, umidade do ar, vento, radiação, entre outras. Essas projeções servem como base para os estudos dos impactos de mudanças climáticas nos mais diversos setores da economia.

Os cenários utilizados para projeções climáticas até o 4º Relatório de Avaliação (AR4) das Mudanças Climáticas, são nomeados pelas famílias A1, A2, B1 e B2, provenientes do Relatório Especial sobre Cenários de Emissão (SRES), divulgado nos anos 2000 pelo IPCC (Quadro 1).

Quadro 1 – Descrição dos cenários provenientes do Relatório Especial sobre Cenários de Emissão (SRES, 2000), famílias A1, A2, B1 e B2.

Cenário	Descrição
A1	Mundo futuro de crescimento econômico muito rápido, população global atinge um pico em meados do século e declina em seguida, rápida introdução de tecnologias novas e mais eficientes. A família de cenários A1 se desdobra em três grupos que descrevem direções alternativas da mudança tecnológica no sistema energético. Os três grupos A1 distinguem-se por sua ênfase tecnológica: A1FI: intensivo uso de combustíveis fósseis; A1T: fontes energéticas não-fósseis; A1B: equilíbrio entre todas as fontes.
A2	Mundo muito heterogêneo. O tema subjacente é a autossuficiência e a preservação das identidades locais. Os padrões de fertilidade entre as regiões convergem muito lentamente, o que acarreta um aumento crescente da população. O desenvolvimento econômico é orientado primeiramente para a região, sendo que o crescimento econômico per capita e a mudança tecnológica são mais fragmentados e mais lentos do que nos outros contextos.
B1	Mundo convergente com a mesma população global, que atinge o pico em meados do século e declina em seguida, como no contexto A1, mas com uma mudança rápida nas estruturas econômicas em direção a uma economia de serviços e informações, com reduções da intensidade material e a introdução de tecnologias limpas e eficientes em relação ao uso dos recursos. A ênfase está nas soluções globais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental, inclusive a melhoria da equidade, mas sem iniciativas adicionais relacionadas com o clima.
B2	Mundo em que a ênfase está nas soluções locais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental. É um mundo em que a população global aumenta continuamente, a uma taxa inferior à do A2, com níveis intermediários de desenvolvimento econômico e mudança tecnológica menos rápida e mais diversa do que nos contextos B1 e A1. O cenário também está orientado para a proteção ambiental e a equidade social, mas seu foco são os níveis local e regional.

Fonte: IPCC, 2000.

A partir do 5º Relatório das Mudanças Climáticas (IPCC, 2013) foram criados quatro diferentes cenários de projeções para representar as consequências climáticas até o final do século XXI, denominados de Caminhos Representativos de Concentração (RCPs, em inglês), relacionados às concentrações equivalentes de CO<sub>2</sub> na atmosfera. O termo "caminho" enfatiza que não só os níveis de concentração de CO<sub>2</sub> de longo prazo são de interesse, mas também a

trajetória tomada ao longo do tempo para alcançar esse resultado e a palavra "representativo" significa que cada RCP fornece apenas um dos muitos cenários possíveis que levariam às características de forçamento radiativo específico (MOSS et al., 2010). A descrição dos cenários RCPs é apresentada no Quadro 2.

Quadro 2 - Descrição dos cenários RCPs.

Cenário	Forçante radiativa	Concentração (ppm)	Caminho	Modelo
RCP 8.5	> 8.5Wm <sup>-2</sup> em 2100	> 1,370 CO <sub>2</sub> -equiv. em 2100	Aumento	MESSAGE
RCP 6.0	~ 6Wm <sup>-2</sup> com estabilização após 2100	~ 850 CO <sub>2</sub> -equiv. (com estabilização após 2100)	Estabilização sem superação	AIM
RCP 4.5	~ 4.5Wm <sup>-2</sup> com estabilização após 2100	~ 650 CO <sub>2</sub> -equiv. (com estabilização após 2100)	Estabilização sem superação	GCAM
RCP 2.6	Pico de ~3Wm <sup>-2</sup> antes de 2100 e depois declínio	Pico de ~ 490 CO <sub>2</sub> -equiv. antes de 2100 e depois declínio	Pico e declínio	IMAGE

Fonte: MOSS et al., 2010.

Os RCPs incluem um cenário de mitigação rigoroso (RCP 2.6), dois cenários intermediários (RCP 4.5 e RCP 6.0) e um cenário com emissões de GEE muito altas (RCP 8.5). Comparando as concentrações de dióxido de carbono e a variação da temperatura global entre os cenários SRES e RCP, SRES A1FI é semelhante ao RCP 8.5, SRES A1B ao RCP 6.0 e SRES B1 ao RCP 4.5. O cenário do RCP 2.6 é representativo de um cenário que visa manter o aquecimento global abaixo de 2° C acima das temperaturas pré-industriais (IPCC, 2014) porque inclui a opção de usar políticas para alcançar emissões líquidas negativas de dióxido de carbono antes do final do século, o que não acontece nos cenários SRES.

Apesar do grande avanço científico e computacional que proporcionou maior entendimento do sistema climático e permite a projeção de cenários de mudanças climáticas, ainda há grande incerteza inerente a esses dados (IPCC, 2000), principalmente na escala regional, sendo algumas variáveis mais confiáveis (temperatura) que outras (precipitação) (SANTOS et al., 2015).

Os modelos climáticos podem não representar perfeitamente o clima atual devido principalmente à influência da discretização espacial dos modelos e erros sistemáticos causados pela conceituação imperfeita dos fenômenos e processos que governam o clima (OLIVEIRA; PEDROLLO; CASTRO, 2015, TEUTSCHBEIN; SEIBERT, 2012). Para a utilização dos dados de projeção climática em estudos de impacto nos recursos hídricos, se faz necessária uma avaliação criteriosa das projeções retrospectivas (período base) da variável de

interesse, a partir da comparação com dados observados, para determinar a existência de erros sistemáticos e desvios, sendo que os erros sistemáticos da saída dos modelos devem ser corrigidos a fim de evitar que os erros se propaguem para as análises futuras (PIANI et al., 2010).

Para a correção dos erros sistemáticos dos GCMs e RCMs, são aplicadas técnicas de remoção de viés, como por exemplo, o Mapeamento Quantil-Quantil (BÁRDOSSY; PEGRAM, 2011), *Delta Change Approach* e *Direct Approach* (LENDERINK et al., 2007) entre outras. Comparações entre diferentes métodos de remoção de viés podem ser encontradas em Themeßl et al. (2011) e Teutschbein e Seibert (2012).

De acordo com Lenderink et al. (2007), a técnica *Direct Approach* permite a utilização direta das saídas dos modelos climáticos regionais a partir de algumas correções que envolvem a detecção de diferenças entre as condições climáticas atuais (observadas em estações meteorológicas e simuladas pelo modelo) e aplicação dessas diferenças na série prevista para o futuro.

Além de erros sistemáticos, existem fontes de incertezas na modelagem de clima para fazer projeções como a incerteza nas emissões futuras de gases de efeito estufa e aerossóis e das atividades vulcânicas e solares que afetam o forçamento radiativo do sistema climático; incerteza na inclusão de efeitos diretos do aumento na concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico nas plantas e do efeito do comportamento das plantas no clima futuro; e incertezas na sensibilidade do clima global e nos padrões regionais das projeções do clima futuro simulado pelos modelos, devido às diferentes formas em que cada modelo de circulação geral da atmosfera representa os processos físicos e os mecanismos do sistema climático (MARENGO, 2006).

Diante das incertezas apresentadas, alguns estudos buscam quantificá-las a partir da utilização de simulações por conjunto (*ensemble*), nas quais os resultados das previsões são sintetizados em uma média simples, onde para cada membro é atribuído igual probabilidade de ocorrência ou a partir da utilização de aproximações probabilísticas, na qual os resultados de diferentes modelos ou integrações de um mesmo modelo são utilizados para a produção de uma Função de Densidade Probabilística (FDP, em inglês), no qual a largura da FDP representa uma medida da incerteza na projeção, e a integral entre dois limiares estabelecidos indicam a probabilidade de sua ocorrência (SANTOS et al., 2015).

## 2.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA

A modelagem hidrológica apresenta-se como uma ferramenta essencial de análise e objetiva representar um sistema (bacia hidrográfica) no todo ou em partes, o comportamento de um processo hidrológico ou conjunto de processos, em um dado instante ou intervalo de tempo (MOREIRA, 2005).

Atualmente, modelos hidrológicos têm sido utilizados para realizar projeções dos impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos a nível de bacias hidrográficas a partir de cenários climáticos fornecidos por GCMs e/ou RCMs (AMIN et al., 2017, CHILKOTI; BOLISSETTI; BALACHANDAR, 2017, ZHANG et al., 2015). A transferência dos dados de projeção climática para um modelo hidrológico tem a função de projetar o estado dos componentes da fase atmosférica para a fase terrestre do ciclo hidrológico da bacia.

Um dos produtos da modelagem hidrológica com base em cenários de mudanças climáticas é a estimativa da frequência no futuro de eventos importantes para a gestão de recursos hídricos, como por exemplo, vazões baixas que podem prejudicar a produção de energia ou sistemas de irrigação, assim como enchentes que podem danificar infraestrutura e impactar a sociedade.

Uma vez apresentadas as incertezas inerentes às projeções climáticas na seção 2.1 deste trabalho, é necessário destacar que estas incertezas na modelagem de clima futuro se propagam para a modelagem hidrológica das vazões a longo prazo. Por exemplo, se os cenários climáticos utilizados tendessem a superestimar as temperaturas no futuro, um impacto hidrológico poderia ser um aumento na evapotranspiração da bacia hidrográfica, indicando um cenário mais drástico que a realidade quanto a disponibilidade hídrica.

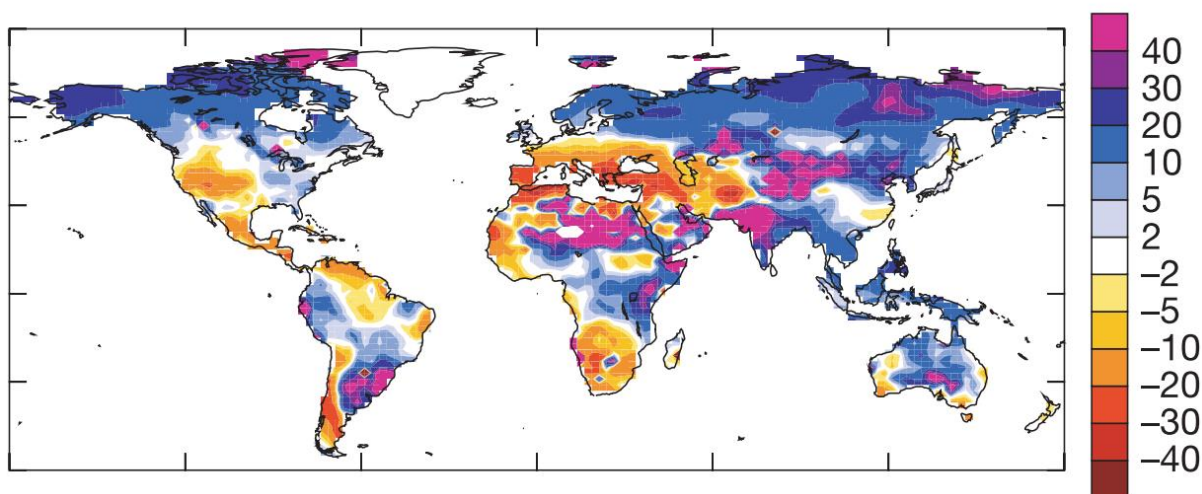
Não se pode afirmar com 100% de certeza, qual o comportamento das vazões daqui a alguns anos, mas a partir das projeções, pode-se trabalhar com o conceito de não “arrependimento”, visto que o que é possível fazer para mitigação é realizado e a gestão de riscos ligados a variabilidade climática é adequadamente aplicada (BRASIL, 2016). Ludwig, Slobbe e Cofino (2014) destacam que pesquisas futuras devem continuar a desenvolver e testar uma abordagem que começa com o desenvolvimento de estratégias de adaptação com base em riscos atuais e futuros, a partir de projeções de cenários.

## 2.3 IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO RECURSOS HÍDRICOS NO MUNDO

A resposta hidrológica de bacias hidrográficas frente às mudanças climáticas pode variar em termos de intensidade e sentido (aumento e/ou redução nas vazões), dependendo da localização geográfica da área de estudo, como indicam estudos de avaliação dos impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos. Nesta seção, primeiramente será apresentada uma síntese desses estudos conduzidos no mundo, e por fim em uma subseção separada, os estudos conduzidos em bacias brasileiras.

Milly, Dunne e Vecchia (2005), realizaram uma análise de tendência das vazões a nível global que ilustra a variabilidade dos impactos das mudanças climáticas com a localização geográfica (Figura 1), a partir da simulação de 12 modelos climáticos globais.

Figura 1 - Mudança relativa das vazões (%) sob o cenário SRES A1B no século XXI (2041-60) em relação ao período 1900-70 do 20C3M.



20C3M: 20th Century experiment - Cenário do IPCC (2000) para representar o clima presente.  
Fonte: MILLY; DUNNE; VECCHIA, 2005.

Numa análise global, estes modelos projetam um aumento de 10-40% nas vazões da África equatorial oriental, na bacia do rio da Prata e nas altas latitudes da América do Norte e Eurásia, e diminuição de 10-30% nas vazões do sul da África, sul da Europa, Oriente Médio e para as médias latitudes da parte oeste da América do Norte (MILLY; DUNNE; VECCHIA, 2005).

Na América do Sul, o incremento mais significativo nas vazões são da ordem de 20-40% nas vazões na bacia do Prata, consistente com as tendências positivas de chuva

encontradas na bacia do Paraná-Prata (MARENGO, 2008). Quanto a redução nas vazões, o mapa indica reduções de - 2% a - 30% nas partes norte e sul-sudoeste do continente.

A grande variabilidade espacial dos impactos das mudanças climáticas também é confirmado quando se faz uma análise de estudos regionais conduzidos ao redor do mundo. Alguns estudos mostram uma tendência de aumento das vazões médias, vazões de pico e eventos extremos (JHA et al., 2006, MASOOD; TAKEUCHI, 2016), outros apontam uma redução da vazão no futuro que pode afetar a disponibilidade hídrica (KOUA et al., 2014). Ainda, existem estudos que não conseguem concluir em aspectos de aumento ou diminuição, sendo que pode ocorrer tanto aumento quanto redução em uma mesma bacia hidrográfica (LI; ZHANG; XU, 2016). Os horizontes temporais de análise também influenciam, visto que algumas bacias respondem às mudanças climáticas somente no final do século XXI e outras já mostram que pode haver um impacto a curto prazo. Uma reunião e síntese de alguns destes trabalhos publicados é apresentado a seguir.

### 2.3.1 Tendência de aumento das vazões

Na América do Norte, os resultados encontrados por Koirala e Gentry (2012) indicam um aumento na intensidade de eventos extremos máximos de vazões, assim como na sua frequência de ocorrência até o ano de 2099, em uma bacia do leste dos Estados Unidos. Outro estudo também mostra que uma duplicação do CO<sub>2</sub> atmosférico a 660 ppm (mantendo outras variáveis do clima constante) resultou em um aumento de 36% na vazão média anual na bacia do rio Mississippi, leste dos EUA (JHA et al, 2006).

Para as médias latitudes do continente africano, há uma tendência de aumento das vazões (MILLY; DUNNE; VECCHIA, 2005). Corroborando, Lubini e Adamowski (2013) que avaliaram os impactos de quatro cenários de mudanças climáticas sob o efeito de aumento da emissão de gases do efeito estufa sobre as vazões da bacia do Rio Simiyu, na Tanzânia, constataram que a vazão acumulada mensal projetada foi de 24-45% maior do que aqueles sob um período no passado, sendo que os maiores aumentos ocorreram na estação chuvosa.

Na Índia, a média anual da vazão pode aumentar em torno de 16,40% na metade do século e pode haver um aumento significativo de 93,5% no final do século. Os resultados também indicam um aumento drástico na estação das monções, apesar de uma redução na estação sem monções (NARSIMLU; GOSAIN; CHAHAR, 2013).

No sul da Ásia, mais precisamente em uma bacia de Bangladesh, no rio Meghna, espera-se que haja um aumento nas vazões de pico no futuro próximo (2015-2039) de 3-44%,

resultado coerente com a análise global de Milly, Dunne e Vecchia (2005), e de 25-104% no futuro distante (2075-2099) sob o cenário A1B (MASOOD; TAKEUCHI, 2016). O regime hidrológico de Bangladesh depende de três grandes sistemas hídricos, Ganges, Brahmaputra e Meghna (GBM), nos quais no futuro haverá incremento de suas vazões em 16,2%, 33,1% e 39,7% respectivamente, sendo que a bacia do rio Meghna apresenta a possibilidade de maior aumento na vazão e inundações sob os cenários RCP 8.5 e A1B (MASOOD et al., 2015).

### 2.3.2 Tendência de redução das vazões

Em uma bacia situada nas médias latitudes do leste dos Estados Unidos, a vazão é projetada para aumentar no inverno e reduzir no verão, em comparação com registros do passado. De acordo com 26 projeções de GCMs, as vazões anuais do período 2051 – 2060 e 2086–2095 podem reduzir de 41,1-61,3% em quatro diferentes sub-bacias (CHIEN; YEH; KNOUFT, 2013), divergindo de outros estudos do leste americano que encontraram possibilidade de aumento nas vazões (KOIRALA; GENTRY, 2012, JHA et al., 2006, MILLY; DUNNE; VECCHIA, 2005). Já em uma bacia do rio Colorado, no meio-oeste americano (EUA), a vazão da maioria das projeções de GCMs reduz para os cenários A1B, A2, e B1 em 6%, 2% e 1%, respectivamente (DAWADI; AHMAD, 2012).

No extremo oriente asiático, em um estudo no sudeste do Tibet, na China, concluiu-se que a vazão projetada diminui em todos os meses exceto em agosto na análise sazonal, 7,96%, 0,30%, 2,63% e 4,17% na primavera, verão, outono e inverno, respectivamente (SUN et al, 2013), o que difere da análise global de Milly, Dunne e Vecchia, e indica que análises regionais devem ser aplicadas para a identificação de valores divergentes da escala global.

Na África Ocidental, na bacia do Lago Buyo, Costa do Marfim, é projetada uma redução no escoamento de 27,7% para o horizonte temporal em 2050 e de 40% em 2080. A recarga subterrânea também pode reduzir em torno de 34,2% em 2050 e 45,8% em 2080, o que pode levar a redução no armazenamento de água dos aquíferos, sob o cenário A1B (KOUA et al., 2014). Estes resultados estão de acordo com o encontrado por Sood, Muthuwatta e McCartney (2013) abrangendo esta mesma região da África, nos países de Gana, Burkina Faso, Mali e Benin, de um aumento da variabilidade e uma redução de até 40% no fluxo de um rio como consequência da diminuição das chuvas e aumento da temperatura, em análise do mesmo cenário de projeção.

Para a região nordeste da África (Etiópia), a vazão projetada em relação ao período inicial do século 20, declina em ambas as décadas de 2050 e 2090. Estas reduções variam

entre 10% e 61%, dependendo do tipo de redução de escala do modelo e os cenários de emissão empregados (A1B e A2), e são principalmente devido às temperaturas mais altas e menor precipitação (KOCH; CHERIE, 2013).

Na Austrália, Islam, Bari e Anwar (2014) compararam a média da precipitação anual com a metade e final deste século e concluíram que haverá uma redução de 13,6% e 23,6% sob o cenário A2, respectivamente. Além disso, as vazões sofrerão redução de 36% e 74%, no cenário A2. Para o cenário B1, um cenário mais otimista, as reduções na precipitação são de 11,9% e 11,6% para a metade e final deste século, respectivamente, enquanto que as reduções na vazão serão de 31% e 38%.

### 2.3.3 Tendência divergente nas vazões

Alguns estudos conduzidos ao redor do mundo não obtiveram uma única tendência nas vazões, que apresentaram tanto aumento quanto redução em uma mesma área de estudo, também se encontram na literatura estudos em que os resultados divergem quando adotam-se diferentes modelos climáticos, o que neste trabalho optou-se por chamar de tendência divergente nas vazões.

Na bacia do rio Boise, localizada a noroeste dos EUA, uma mudança nas vazões de pico (de março a junho) são projetadas para variar entre 58 e 106 m<sup>3</sup>/s e para a bacia do rio Spokane, uma variação esperada entre -198 m<sup>3</sup>/s e 88 m<sup>3</sup>/s. Ambas as bacias exibem uma variabilidade significativa nas estimativas de precipitação, evapotranspiração e recarga subterrânea (JIN; SRIDHAR, 2012).

Um estudo na bacia do Rio Songhua, no nordeste da China, uma bacia sensível às mudanças climáticas devido sua alta altitude, concluiu que no geral, haverá redução das vazões entre 20,3% e 37,8%, no entanto, na porção superior da bacia, a variação é de aumento de 9,68-17,7% no escoamento, o que sustenta a hipótese de que o efeito das mudanças climáticas pode variar espacialmente dentro de uma mesma região, no futuro próximo (2020-2049) (LI; ZHANG; XU, 2016).

Na bacia do rio Amarelo, nordeste da China, haverá um aumento em termos de escoamento total na bacia como um todo, e um aumento na tendência futura das vazões na estação fluviométrica Tangnaihái sob os cenários A1B e B1, enquanto que no cenário A2, há tendência de declínio no escoamento superficial da região, e a maioria das bacias terão um decréscimo significativo de mais de 20%, em um futuro próximo (2013-2042) (ZHANG et al., 2015).

Na porção central de Bangladesh, um estudo aponta tendência de aumento nas vazões de períodos de monção durante os horizontes de 2020, 2050 e 2080 com um deslocamento na distribuição das vazões sazonais. Também foi encontrado que os picos de vazão podem aumentar de 4,5-39,1% nas monções e nos períodos secos, e as baixas vazões podem decair de 4,10-26,90%, o que indica alta sazonalidade como um resultado das mudanças climáticas (KAMAL; MATIN; NASREEN, 2013).

Um estudo conduzido na Etiópia, sobre a alteração das vazões futuras em duas bacias indica um aumento nos eventos extremos diários que resultam num aumento no balanço hídrico anual de água das bacias. O escoamento simulado varia de -4% a 18% na bacia do rio Hare e de -4% a 14% na bacia do rio Bilate (WAGESHO; JAIN; GOEL, 2013).

Para o período 2040-2069, os resultados esperados para uma bacia do Irã mostraram que haverá aumento da temperatura na maior parte dos meses, e a taxa de precipitação exibe uma alteração na gama de  $\pm 30\%$ . Além disso, o escoamento produzido nesse período muda de -90% a 120% em relação ao período histórico, durante diferentes meses (ZAHABIYOUN et al, 2013).

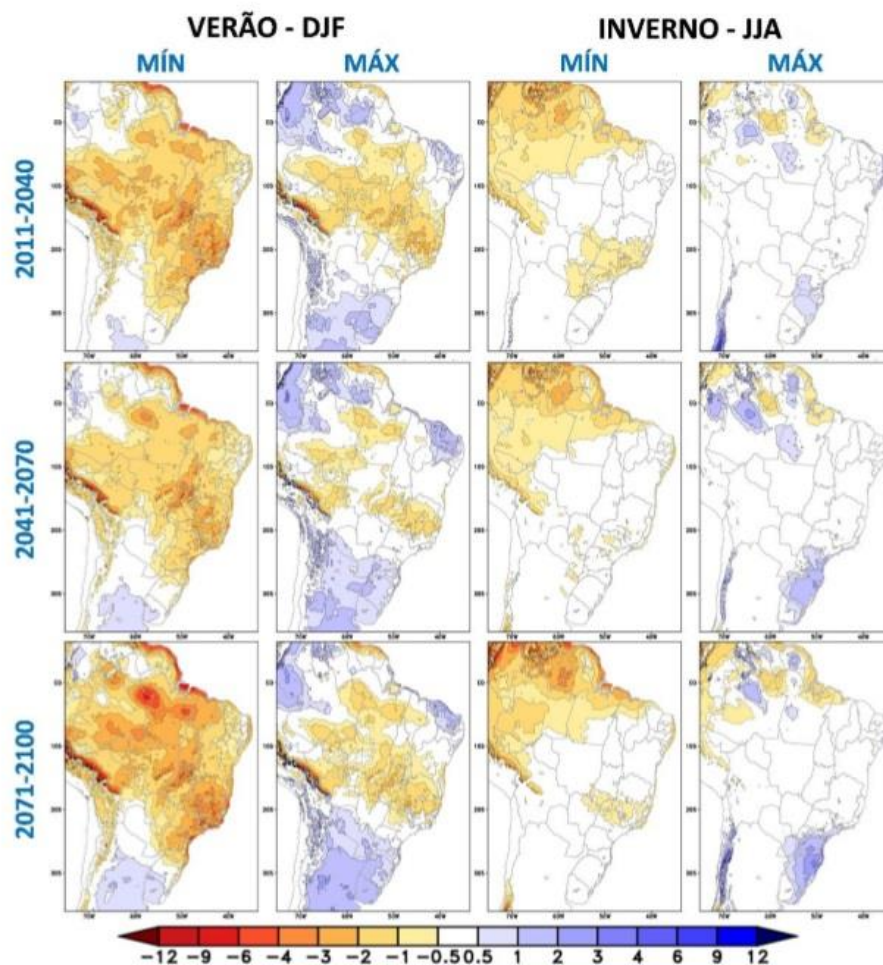
Um estudo na Índia Oriental também apresentou resultados divergentes quanto aumento ou redução da vazão em diferentes cenários, sendo que a análise dos resultados do modelo para 12 cenários climáticos indicaram uma redução no escoamento superficial que varia de 2,5% a 11%, na alteração da temperatura de 1°C para 5°C. Quando o cenário envolve o aumento da precipitação de 2,5% a 15%, existe um aumento no escoamento superficial de 6,67% para 43,42% em relação ao período base. Já no caso de 28 cenários combinados em comparação com o período base, as mudanças no escoamento superficial variariam de -4,55% a 37,53%, a recarga de água subterrânea passaria de -8,7% para 23,15% e a evapotranspiração passaria de 4,05% para 11,88%, na Índia sob os cenários A1B, A2 e B2 (UNIYAL; JHA; VERMA, 2015).

Um estudo conduzido no Nepal, a partir do modelo hidrológico SWAT e dois modelos de projeção climática sob o cenário A1B não apresentou resultados em termos de incremento ou redução de vazão, e ainda concluiu que as alterações climáticas não são uma grande ameaça à disponibilidade média de água, ainda que sejam esperadas variações de fluxo temporal de aumento no futuro. A magnitude do fluxo projetado para dado período de retorno, entretanto, depende fortemente do modelo climático considerado (DEVKOTA; GYAWALI, 2015).

#### 2.3.4 Impacto das mudanças climáticas nas vazões de bacias brasileiras

Simulações de modelos climáticos com forçantes radiativas de origem antrópica projetam alterações na quantidade de chuvas projetadas no Brasil (Figura 2), que variam com a localização geográfica. Os centros de máxima redução das chuvas durante o verão se posicionam sobre o Centro-Oeste e Sudeste, nas áreas sob influência do fenômeno Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), expandindo-se também para as regiões da Amazônia. Há possibilidade de redução a aumento das chuvas durante o verão na parte nordeste da região Nordeste do país e aumento das chuvas na região Sul do país nos vários cenários, que podem alcançar a parte sul do Sudeste do país, mais destacadamente no verão (DJF) e na primavera (SON) (BRASIL, 2016).

Figura 2 - Projeções regionalizadas de mudanças na precipitação (mm/dia) entre o presente e diferentes períodos futuros. Os limiares inferiores (mín) e limiares superiores (máx) das mudanças extraídas das quatro simulações do modelo ETA aninhado ao HadGEM2 – ES, nos cenários RCP 4.5 e 8.5, para Dezembro-Janeiro-Fevereiro (DJF) e Junho-Julho-Agosto (JJA).



Fonte: BRASIL, 2016.

A possibilidade de aumento e/ou redução na quantidade de chuvas indica que poderão haver alterações também na disponibilidade hídrica das bacias hidrográficas brasileiras, (MARENGO, 2008), o que demonstra a necessidade de investigação desses impactos, uma vez que medidas e estratégias devem ser planejadas e implantadas no âmbito da gestão de recursos hídricos.

No semiárido brasileiro, os cenários A2 e B2 indicam uma tendência de diminuição das chuvas e das vazões a curto (2030) e a longo prazo (2070). Para o rio Paraguaçu (estação Argoim), verificou-se que houve uma redução significativa da  $Q_{90}$  para o futuro a longo prazo do cenário B2 de cerca de 88%. Para o rio Jacuípe, representado pela estação Ponte Rio Branco, o caso mais crítico também ocorre a longo prazo no cenário B2, onde a  $Q_{90}$  sofre uma redução de aproximadamente 68% (VALÉRIO; FRAGOSO JR, 2015). Também no nordeste brasileiro, um estudo na bacia do rio Tapacurá, indica possibilidade de redução na disponibilidade de água superficial, com redução de 13,90%, 22,63% e 32,91% na recarga subterrânea e redução de 4,98%, 14,28% e 20,58% no escoamento superficial nos períodos 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099, respectivamente (MONTENEGRO; RAGAB, 2012).

Na bacia do rio Goiana, em Pernambuco, os resultados apontam reduções no escoamento superficial, principalmente nos meses do segundo semestre, para ambos os cenários de mudanças climáticas A2 e B2, o que requer medidas de enfrentamento dos impactos negativos das mudanças climáticas no âmbito regional no intuito de minimizar prejuízos no futuro (SANTOS; GALVINCIO; MOURA, 2013).

Um estudo no Estado de Minas Gerais, indica que o cenário de mudanças climáticas A2 pode ocasionar um aumento significativo da disponibilidade hídrica ( $Q_{7,10}$ ) em 81% das estações fluviométricas da bacia do Rio Paracatu (um dos principais afluentes do Rio São Francisco). O aumento da disponibilidade hídrica ( $Q_{7,10}$ ), nas diferentes estações fluviométricas, variou de 31-131% até o final deste século. Já no Cenário B2, as tendências de aumento da disponibilidade hídrica ( $Q_{7,10}$ ) até o final deste século não foram significativas para nenhuma das estações fluviométricas utilizadas no trabalho (MELLO et al., 2008). Na bacia do Rio Grande, que banha os Estados de Minas Gerais e São Paulo e apresenta um dos principais afluentes da bacia do rio Paraná, as simulações sob os cenários A1B, A2, B1, B2 apontam um aumento na vazão do rio em relação ao período base de 5-10%, e sob um aumento na temperatura média do ar entre 1 e 6 °C, de 8% a 51% (NÓBREGA et al., 2011).

Em contrapartida, Adam et al. (2015) concluiu que os impactos do cenário A1B sobre as vazões da bacia do Paraná são altamente dependentes do membro do modelo utilizado para obter as projeções climáticas e na maioria dos casos as vazões máximas projetadas estão

dentro dos limites de incerteza em relação às series atuais. Além disso, em geral os resultados apontaram que a variabilidade natural do clima pode ser tão importante quanto a influência de mudanças climáticas e a incerteza aumenta com a ampliação do horizonte de tempo analisado.

Um estudo conduzido em São Paulo, na cidade de Taubaté mostra que as mudanças climáticas provocarão um aumento do déficit de água (de até 77 mm para o período de 2070-2099 no cenário A2 e um pouco menor (54 mm) para o cenário B2), associado a uma diminuição do excedente hídrico (ao redor de 200 mm para ambos cenários) (HORIKOSHI; FISCH, 2007).

Também no interior de São Paulo, na bacia do Ribeirão do Feijão, as vazões projetadas sob os cenários B1, A1B e A2 do IPCC para a década de 2050 indicam que haverá aumento na vazão em todos os cenários, com exceção do cenário A2 no período seco, onde observou-se uma redução de -1,5% a -3%. Para a década de 2090, o cenário A1B apresentou redução de vazão de março a outubro, enquanto no cenário A2 tal redução foi observada entre fevereiro e outubro, com um decréscimo de até -10% quando comparado às vazões atuais. No geral, os resultados indicaram que a bacia do Ribeirão do Feijão é bastante vulnerável às potenciais alterações climáticas, sujeita a possíveis problemas de disponibilidade hídrica no futuro (ARROIO JR; MAUAD, 2015).

Na região Sul do Brasil, o aumento das chuvas projetadas desde 2011 até 2040, com intensificação até o final do século (BRASIL, 2016) tende a impactar no aumento das vazões. Na bacia do Rio Camboriú, Santa Catarina, espera-se que as mudanças climáticas irão ocasionar um aumento na taxa de escoamento superficial, na evapotranspiração, na perda de solo e na descarga líquida, principalmente para as vazões que se aproximam da Q10% (BLAINSKI et al., 2015).

Um estudo conduzido no Sul do país, na bacia hidrográfica do Rio Concórdia, oeste do Estado de Santa Catarina, mostrou que os resultados dos impactos resultantes de cenários positivo (A2) e negativo (B2) do IPCC (2007) variam conforme uma função da escala de tempo. Em intervalos de tempo mensais e anuais, as vazões médias, máximas e mínimas são maiores para as condições atuais do que para os dois cenários A2 e B2. Verificou-se que haveria uma redução do fluxo total média de 39,2% e 41,2%, em relação ao período base, sob A2 e B2. No entanto, quando os valores diários são analisados em termos de eventos extremos, mostrou-se que os fluxos de pico atingirão valores extremos no âmbito dos cenários futuros, especialmente para A2. Isto sugere que, no futuro haverá maiores problemas decorrentes da ocorrência de eventos extremos de inundação e seca naquela região (PERAZZOLI; PINHEIRO; KAUFMANN, 2013).

No Rio Grande do Sul (RS), na lagoa da Mangueira, um estudo identificou alterações no futuro na vazão média anual, com aumento de 2,86% e 2,48%, nos cenários A2 e B2, respectivamente no horizonte próximo e incremento maior a longo prazo, com valor médio das anomalias no cenário A2, de 16,94%, e 11,83% no cenário B2 (TEJADAS et al., 2016).

No bacia do rio Ibicuí, RS, principal afluente da margem esquerda do Rio Uruguai, o estudo do impacto das mudanças climáticas apontou que existem grandes incertezas relacionadas às projeções de anomalias de precipitação e temperatura, o que não permitiu a conclusão de aumento ou redução nas vazões do Rio Ibicuí, resultado da discordância entre os resultados previstos pelo conjunto dos 20 GCM's analisados (ADAM; COLLISCHONN, 2013).

Devido à escassez de estudos que abordem os impactos hidrológicos das mudanças climáticas na região serrana do Estado de Santa Catarina, este trabalho se apresenta como um pioneiro na análise das possíveis alterações na vazão e disponibilidade hídrica da bacia do Alto Canoas, o que pode servir de subsídio para a elaboração dos planos de bacia desta região. O trabalho também é importante por ser o primeiro a utilizar os resultados do modelo climático regionalizado de alta resolução Eta-HadGEM2-ES (20 km) para a avaliação dos impactos nos recursos hídricos do Sul do Brasil, considerando dois cenários de projeção de mudanças climáticas.

### **3 HIPÓTESES**

- I. Não há influência dos cenários de projeção de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5 na disponibilidade hídrica futura da bacia do Alto Canoas;
- II. Não há tendência de aumento das vazões da bacia do Alto Canoas sob o efeito dos cenários de projeção de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5;
- III. Não há tendência de redução das vazões da bacia do Alto Canoas sob o efeito dos cenários de projeção de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5.



## **4 OBJETIVOS**

### **4.1 OBJETIVO GERAL**

Avaliar os impactos hidrológicos de mudanças climáticas na bacia hidrográfica do Alto Canoas, em termos de vazão e disponibilidade hídrica futura, a fim de subsidiar a elaboração de diretrizes e estratégias de gestão dos recursos hídricos da bacia.

### **4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

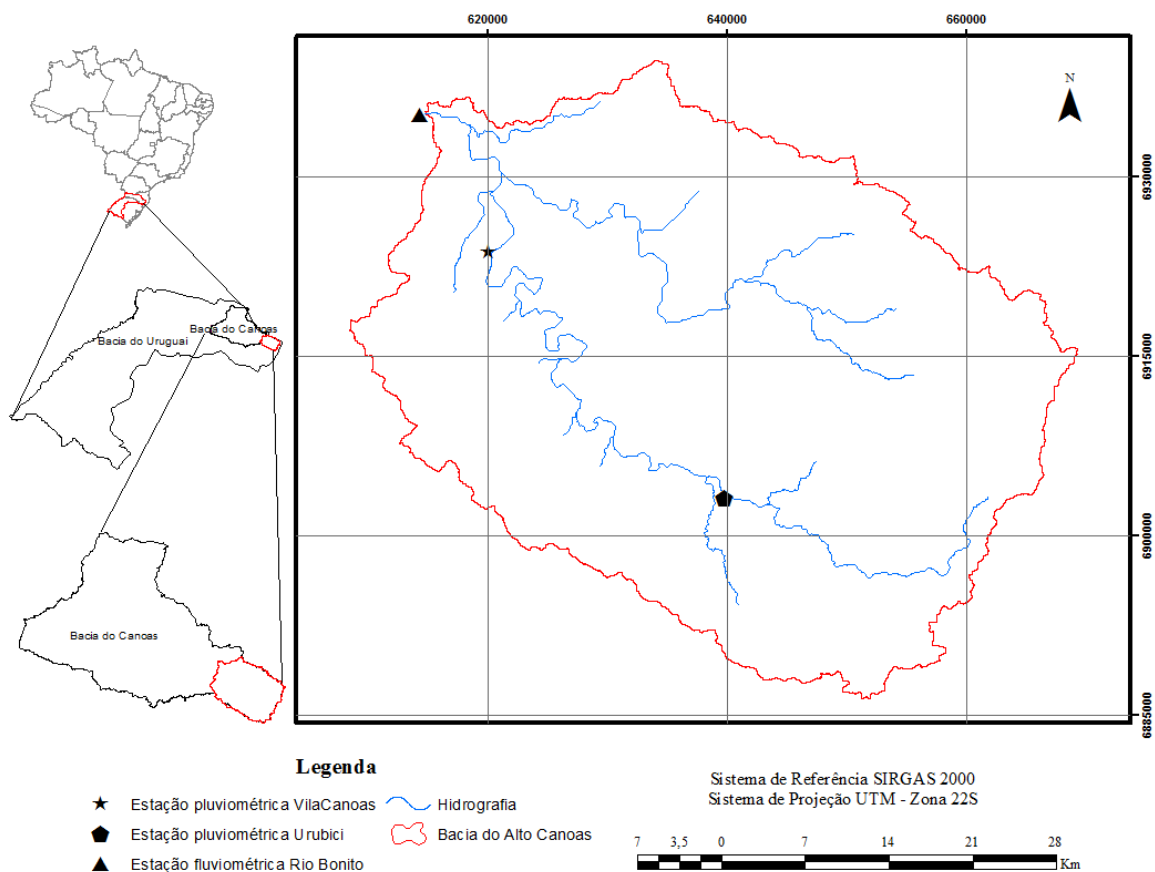
1. Avaliar a aplicação do modelo hidrológico SWAT para análise de cenários de mudanças climáticas na bacia do Alto Canoas;
2. Avaliar os cenários hidrológicos da bacia do Alto Canoas, por meio as vazões modais, mínimas e máximas e vazões de referência;
3. Avaliar os cenários de disponibilidade hídrica na bacia do Alto Canoas, por meio do balanço hídrico futuro;
4. Propor diretrizes e estratégias para a gestão de recursos hídricos baseadas nos resultados.



## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo compreendeu uma sub-bacia da bacia hidrográfica do Rio Canoas, afluente do Rio Uruguai, localizada no Planalto Serrano de Santa Catarina, próximo à Serra Geral, Brasil, entre as coordenadas geográficas de 27°30'00'' e 29°00'00'' de latitude sul e 49°60'00'' e 49°10'00'' de longitude oeste, denominada de bacia do Alto Canoas (Figura 3), com área de 1970 km<sup>2</sup>, a qual abrange parte dos municípios de Bom Retiro, Urubici, Rio Rufino e Bocaina do Sul.

Figura 3 – Mapa de situação da bacia hidrográfica do Alto Canoas e estações pluviométricas e fluviométrica utilizadas no trabalho.

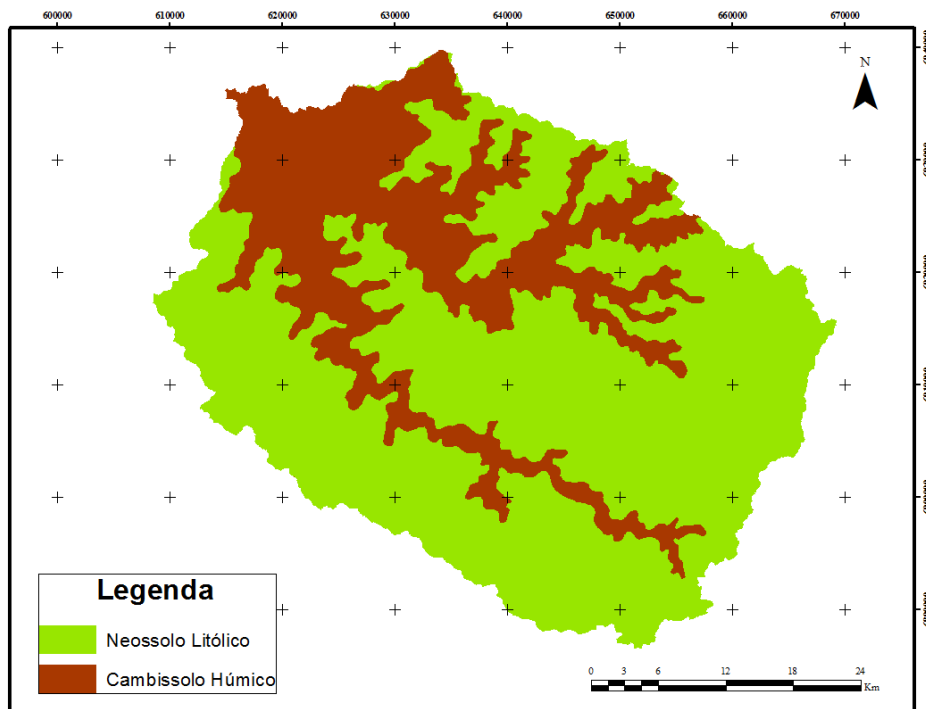


Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

O clima da região (segundo a classificação de Köppen) é temperado constantemente úmido, sem estação seca, com verões frescos (Cfb). A temperatura média anual varia entre 13,40°C e 16,46°C, com precipitação anual média de 1650 mm, com máxima e mínima de 2500 e 1082 mm, respectivamente e umidade relativa média anual entre 70,60% e 83,12%.

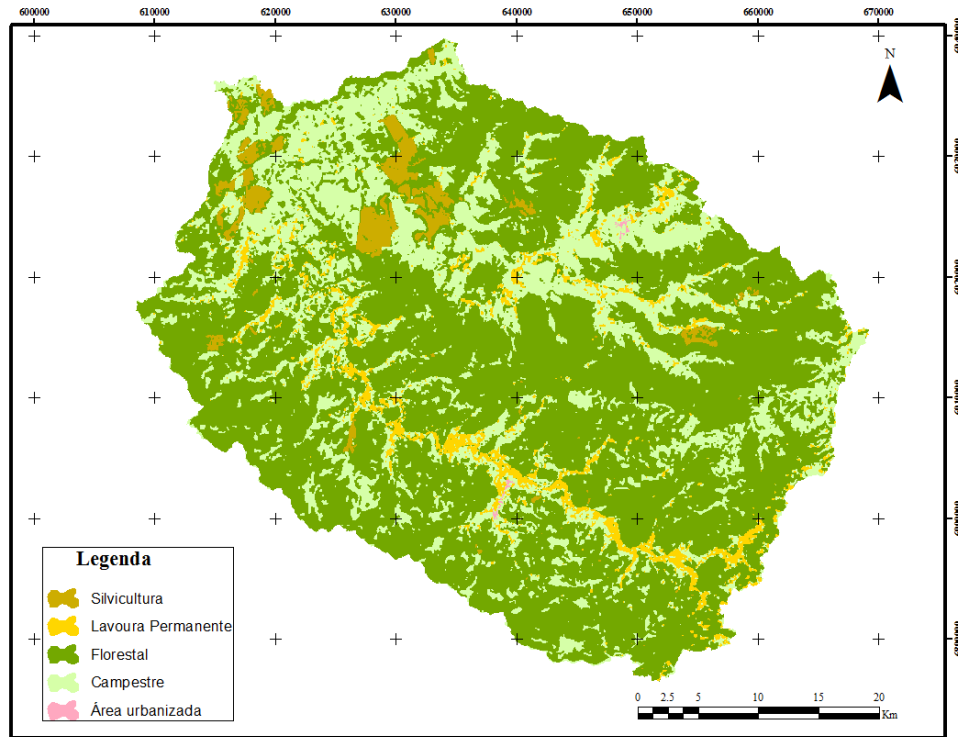
O solo da bacia do Alto Canoas é composto pelo Neossolo Litólico, seguido do Cambissolo Húmico nas áreas de planície (Figura 4). O uso da terra da bacia hidrográfica (Figura 5) é predominantemente florestal (67,10%) e campos (25,89%). Também se observam agricultura (4,23%), silvicultura (2,73%) e área urbanizada (0,06%). As áreas com elevada declividade (Figura 6), as quais predominam na região de estudo, são majoritariamente cobertas por floresta nativa. O relevo é classificado como forte-ondulado e ondulado segundo a classificação da EMBRAPA (2004).

Figura 4 - Tipo de solo da bacia do Alto Canoas.



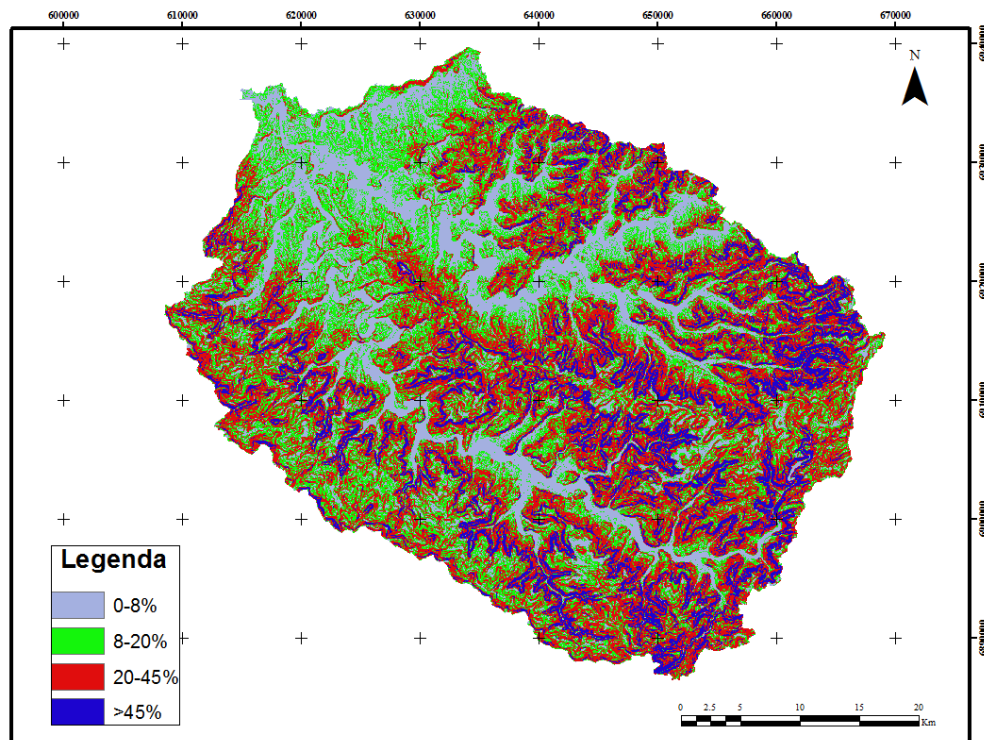
Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Figura 5 – Uso da terra da bacia do Alto Canoas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

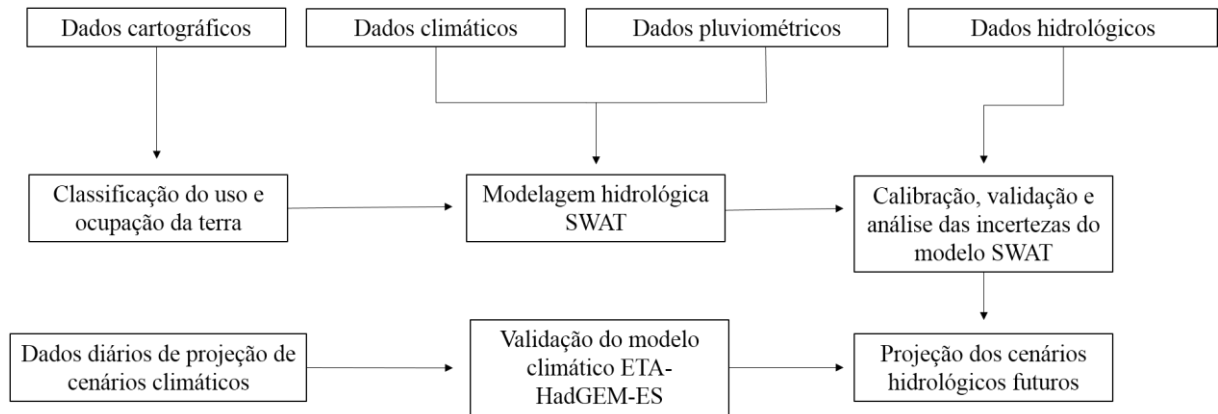
Figura 6 - Declividade da bacia do Alto Canoas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

A Figura 7 ilustra os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do trabalho para a avaliação dos impactos hidrológicos das mudanças climáticas nos recursos hídricos da bacia do Alto Canoas.

Figura 7 - Descrição geral dos materiais utilizados e métodos empregados.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

## 5.1 SÉRIES HISTÓRICAS E DADOS CARTOGRÁFICOS

Os dados diários climáticos das variáveis temperatura do ar (mínima, média e máxima), umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar, no período entre 1961 e 2015, foram obtidos de séries históricas diárias da estação meteorológica da EPAGRI/CIRAM/INMET de Lages, com as coordenadas geográficas de 27°08' de latitude sul e 50°34' de longitude oeste.

Os dados diários de precipitação do período entre 1977 e 2002 foram obtidos de séries históricas diárias disponibilizadas no portal eletrônico da Agência Nacional de Águas (ANA), o Hidroweb (<http://hidroweb.ana.gov.br>), das estações pluviométricas Vila Canoas (código 02749031) e Urubici (código 02849021).

Os dados hidrológicos de vazão mensal do período entre 1942 e 2005, foram obtidos da série histórica de vazão mensal da estação fluviométrica Rio Bonito (código 71300000), disponibilizada no portal da Agência Nacional de Águas (ANA), o Hidroweb (<http://hidroweb.ana.gov.br>).

Os dados de projeção de cenários de mudanças climáticas foram obtidos de séries históricas diárias das projeções do modelo climático regionalizado Eta-HadGEM2-ES, com resolução de 20 km, utilizado para detalhar as simulações do modelo inglês HadGEM2-ES,

sob dois cenários de emissão: RCP 4.5 e RCP 8.5 (BRASIL, 2016), das variáveis temperatura do ar (mínima, média e máxima), umidade relativa, velocidade do vento, radiação solar e precipitação.

As séries históricas dos dados de projeção de cenários de mudanças climáticas contemplaram os seguintes períodos: Período base simulado (1961 – 1990), para um ponto de grade nas seguintes coordenadas geográficas: 27°08' de latitude sul e 50°34' de longitude oeste (mesma localização da estação Lages); Período “futuro” simulado (2011 – 2099) para pontos de grade no interior da bacia do Alto Canoas, correspondentes à localização das estações pluviométricas Urubici e Vila Canoas. As séries históricas de dados de projeção climática foram disponibilizadas pelo Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), por meio de parceria firmada com a Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC).

Os dados cartográficos referentes ao Modelo Digital de Terreno (MDT), proveniente do projeto SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) Topodata, com resolução espacial horizontal de 30 m (escala 1:120.000) e vertical de 16 m, e a imagem digital do satélite Landsat 5, sensor *Thematic Mapper (TM)*, com resolução espacial de 30 m, do ano de 1986, foram obtidos na página eletrônica *Earth Explorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov>), disponibilizado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). Os dados de classificação do uso da terra da bacia do Alto Canoas do ano de 2005 foram obtidos da dissertação de mestrado de Antunes (2015) e dados de tipo de solo foram obtidos do mapeamento de solos do Estado de Santa Catarina, com resolução de 1:250.000, da EMBRAPA (2004).

As séries históricas e dados cartográficos foram utilizados em diversas etapas da metodologia deste trabalho (Quadro 3) que foram necessárias para alcançar-se o objetivo final de avaliar os impactos hidrológicos de cenários de mudança climática na bacia do Alto Canoas.

Quadro 3 - Períodos de dados utilizados no trabalho.

<b>Etapa de trabalho</b>	<b>Dados</b>	<b>Período/Data</b>
Classificação do uso da terra no ano de 1986 e comparação com classificação do ano de 2005	Imagem Landsat 5 – TM	22 de julho de 1986
	Classificação do uso da terra	Ano de 2005
Validação do modelo climático ETA-HadGEM2-ES	Projeções climáticas do modelo Eta-HadGEM2-ES Climáticos da estação Lages	01/01/1961 – 31/12/1990

Etapa de trabalho	Dados	Período/Data
Execução do modelo SWAT	Climáticos	Aquecimento 01/01/1977 – 31/12/1979 Calibração 01/01/1980 – 31/12/1987 Validação 01/01/1997 – 31/12/2002
	Hidrológicos	
Validação da vazão simulada pelo modelo nos cenários hidrológicos	Vazão projetada	Aquecimento 01/01/2011 – 31/12/2013
		Avaliação 01/01/2014 – 31/12/2015
Simulação do modelo nos futuros centrados	Vazão projetada nos cenários hidrológicos	2030 01/01/2020 – 31/12/2039
		2050 01/01/2040 – 31/12/2059
		2070 01/01/2060 – 31/12/2079
		2090 01/01/2080 – 31/12/2099

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

A escolha da imagem Landsat 5-TM para a classificação do uso da terra buscou abranger uma data inserida no período de execução do modelo SWAT, para a representação adequada das características do solo, que interferem diretamente no balanço hídrico da bacia hidrográfica. Como o período em questão abrange o ano de 1977 a 2002, a escolha dessa imagem do ano de 1986 foi validada a partir da comparação da imagem classificada em 1986 e classificação do trabalho de Antunes (2015) datada do ano de 2005, a fim de confirmar a pouca variação temporal do uso da terra desta bacia.

A validação das projeções de cenários climáticos do modelo Eta-HadGEM2-ES ocorreu no período de 1961 a 1990 (normal climatológica) para um ponto de grade localizado nas coordenadas geográficas da estação meteorológica Lages. Convém ressaltar que os dados de projeção climática utilizados no trabalho para a projeção dos cenários hidrológicos futuros foram de pontos de grade simulados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES para o interior da bacia do Alto Canoas, não correspondentes à localização da estação Lages. No entanto, a validação das projeções na estação Lages foi aplicada por ser a única opção de validação dos dados climáticos, visto que não existiam dados climáticos observados no interior da bacia, e por ser a estação climática utilizada na calibração e validação do modelo hidrológico. Uma vez validado o modelo para a estação Lages, assumiu-se o pressuposto que o modelo climático era válido também para os pontos simulados na bacia do Alto Canoas, e as correções dos erros sistemáticos necessárias identificadas no ponto da estação Lages, eram supostamente as mesmas que deveriam ser impostas para os dados no interior da bacia.

Antunes (2015) e Sá (2014) também utilizaram a estação Lages para a modelagem hidrológica em seus trabalhos conduzidos na bacia do Alto Canoas, obtendo bons desempenhos de calibração e validação dos modelos hidrológicos SWAT e TOPMODEL, respectivamente, o que valida a utilização desta estação climática no estudo desta bacia.

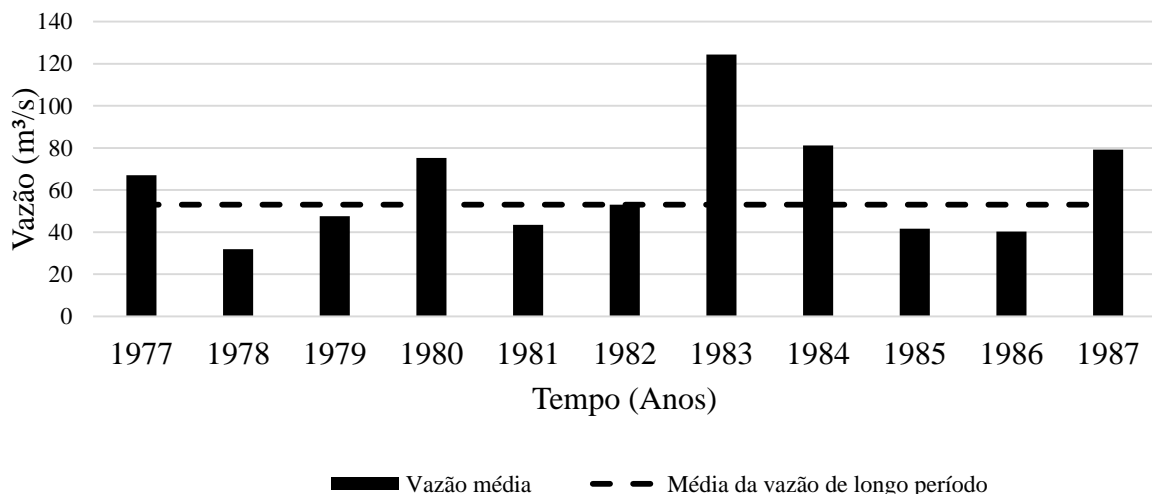
O período dos dados climáticos e hidrológicos utilizados na execução (aquecimento, calibração e validação) do modelo hidrológico SWAT foi determinado a partir da disponibilidade da maior série temporal em um período que houvessem dados consistidos em comum entre as diferentes estações de medição (meteorológica, pluviométricas e fluviométrica).

Uma segunda validação do modelo Eta-HadGEM2-ES ocorreu sobre as vazões simuladas no interior da bacia a partir da entrada dos dados de projeção climática corrigidos, em decorrência da primeira validação ter ocorrido para um ponto exterior a área da bacia.

Após a validação do modelo hidrológico nos cenários climáticos simulados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES, realizou-se as projeções de cenários hidrológicas para o futuro, optando-se por dividir o período de análise em futuros centrados (2030, 2050, 2070 e 2090) para facilitar a comparação dos resultados com o Período Base e teste da hipótese de mudanças nas vazões no futuro, valendo-se do pressuposto de que o comprimento do período base e futuro não precisam ser idênticos, desde que o período de referência seja bem representativo das características do período que busca se comparar.

A representatividade do Período Base foi avaliada pela presença de períodos secos (5 anos) e úmidos (6 anos) na série histórica em comparação com a vazão média de longo período entre os anos de 1942 a 2005 (Gráfico 1).

Gráfico 1 - Vazão anual e vazão média de longo período do Período Base.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

A existência de períodos secos e úmidos na série histórica utilizada na calibração e validação do modelo hidrológico garante a representatividade e robustez do modelo quando o

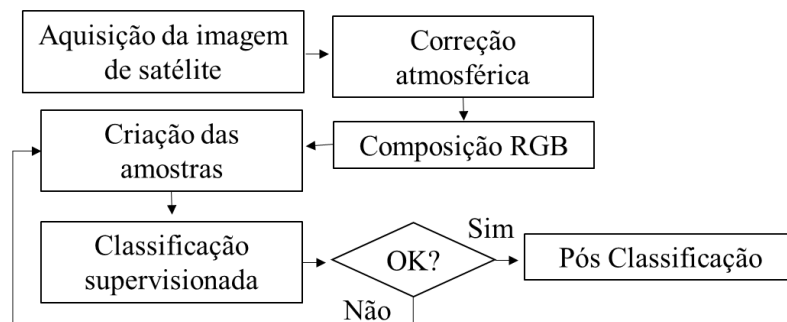
objetivo da modelagem é a aplicação do modelo em análise de cenários de mudanças climáticas, visto que as alterações no futuro podem ser tanto para déficit hídrico quanto excesso hídrico.

Os aplicativos utilizados no desenvolvimento deste trabalho foram o Pacote Microsoft Office 2007 para a escrita do trabalho e manipulação dos dados, Hidro 1.2 para a manipulação das séries históricas de precipitação e vazão, ENVI 5.2 para a classificação do uso da terra, ArcGIS 10.1 para o processamento de dados geográficos e elaboração de mapas temáticos, ArcSWAT 2012 para execução do modelo hidrológico, SWAT-CUP 5.1.6 para calibração, validação, análise de incertezas do modelo hidrológico e R Project 1.0.143 para a análise estatística dos resultados.

## 5.2 USO DA TERRA DA BACIA DO ALTO CANOAS

A classificação do uso da terra da bacia do Alto Canoas foi realizada a partir da classificação supervisionada de uma imagem Landsat 5 - TM do ano de 1986. A classificação supervisionada tem como objetivo categorizar todos os pixels de uma imagem, atribuindo a cada pixel um valor relacionado a um objeto do mundo real. Os passos realizados para a classificação supervisionada são apresentados no fluxograma da Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma da classificação supervisionada.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

As categorias definidas neste trabalho foram sete classes para o uso da terra, escolhidas por representar as condições da bacia em questão:

- a) Florestal: área ocupada por mata nativa, em qualquer estágio de desenvolvimento;
- b) Silvicultura: área ocupada por cultivo de espécies de eucalipto e/ou pinus;
- c) Lavoura permanente: área ocupada por qualquer tipo de cultivo permanente;

- d) Campestre: área formada por herbáceas, gramíneas e pequenos arbustos esparsos; e
- e) Área urbanizada: área ocupada pelos centros dos municípios.

A composição de bandas utilizada para a classificação variou conforme a classe de uso que se pretendia classificar (RGB 453: Florestal e silvicultura e RGB 741: Lavoura permanente e campestre), a fim de melhor destacar as diferenças. Utilizou-se o aplicativo ArcGIS para separar as áreas não classificadas na primeira classificação e submeteu-se novamente a imagem ao aplicativo ENVI para uma nova classificação com a nova composição de bandas, até a classificação completa da imagem de forma satisfatória.

A classe área urbanizada foi criada manualmente no aplicativo ArcGis, por ser uma área pequena que não obteve classificação satisfatória automaticamente. As principais ferramentas de pós-classificação utilizadas foram *Majority/Minority Analysis e Sieve Classes* do ENVI, que atuam na remoção de pixels únicos de determinada classe dispersos no meio de uma grande região de outra classe. Por fim, este mapa foi validado, a partir da análise visual da imagem classificada e da imagem de satélite, e conhecimento da área de estudo.

O uso da terra classificado com a imagem datada de 1986 foi comparado com uma classificação existente do ano de 2005, do trabalho de Antunes (2015), a fim de validar o uso da terra classificado em 1986 para ser utilizado na execução do modelo (1997 a 2002).

### 5.3 MODELO HIDROLÓGICO SWAT

A modelagem hidrológica da bacia do Alto Canoas foi realizada por meio da aplicação do modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) na escala mensal. O SWAT é um modelo espacialmente distribuído, de tempo contínuo, desenvolvido para avaliar os efeitos de práticas de manejo do solo e uso da terra sobre fontes de poluição difusas nos recursos hídricos de grandes bacias (ARNOLD et al., 2012).

O modelo é capaz de simular bacias complexas, com diferentes usos do solo, topografia e condições climáticas, a partir da discretização da bacia em sub-bacias e Unidades de Resposta Hidrológica (URH), que são áreas no interior das sub-bacias que são formadas pela mesma cobertura da terra, solo e manejo. O modelo define as URHs para que cada unidade de resposta hidrológica tenha uma Curva Número (CN) única associada.

O SWAT estima processos hidrológicos importantes como evapotranspiração, escoamento superficial, taxa de pico de escoamento, fluxo de águas subterrâneas e produção de sedimentos para cada URH. O ciclo hidrológico é simulado no SWAT com base no balanço hídrico (Eq. 1).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} - E_a - w_{\text{seep}} - Q_{\text{gw}}) \quad (1)$$

Em que:

$SW_t$ : quantidade final de água no solo (mm H<sub>2</sub>O)

$SW_0$ : umidade do solo inicial no dia i (mm H<sub>2</sub>O)

t: tempo (dias)

$R_{\text{day}}$ : quantidade de precipitação no dia i (mm H<sub>2</sub>O)

$Q_{\text{surf}}$ : escoamento superficial total no dia i (mm H<sub>2</sub>O)

$E_a$ : quantidade de evapotranspiração no dia i (mm H<sub>2</sub>O)

$W_{\text{seep}}$ : quantidade de água que entra na zona de aeração do perfil do solo no dia i (mm H<sub>2</sub>O)

$Q_{\text{gw}}$ : quantidade de retorno do fluxo no dia i (mm H<sub>2</sub>O)

A documentação teórica que descreve as equações, dados de entrada e saídas e o uso da interface ArcSWAT pode ser acessada na página eletrônica do SWAT (<http://swatmodel.tamu.edu>). Também pode ser encontrados artigos e trabalhos publicados com o SWAT, conferências e informações adicionais sobre o uso do software no mundo.

O SWAT permite a entrada de dados climáticos com falhas em sua execução, pois contém uma ferramenta de geração de dados de clima (*Weather Generation – WGEN*). Esta ferramenta foi utilizada para preencher as lacunas devido às falhas de medição das estações meteorológica e pluviométrica. Para que o WGEN possa ser utilizado é necessário informar o modelo com uma estatística da média mensal climática da região (Quadro 4), gerada a partir de no mínimo 20 anos de observação de precipitação e a maior série disponível de dados climáticos (ARNOLD et al., 2013). Neste trabalho, utilizaram-se 29 anos de dados de precipitação e 55 anos de dados climáticos.

Quadro 4 - Parâmetros do gerador climático

Parâmetro	Descrição
TMPMX	Temperatura máxima média mensal (°C)
TMPMN	Temperatura mínima média mensal (°C)
TMPSTDMX	Desvio padrão da temperatura máxima no mês (°C)
TMPSTDMN	Desvio padrão da temperatura mínima no mês (°C)
PCPMM	Total médio de chuva no mês (mm)
PCPSTD	Desvio padrão para o total médio de chuva (mm)
PCPSKW	Coefficiente de assimetria para a precipitação

<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>
PR_W2	Probabilidade de um dia chuvoso seguido de um dia chuvoso no mês
PCPD	Média mensal de dias com chuva
RAINHHMX	Chuva máxima mensal em 0,5 h (mm)
SOLARAV	Radiação solar média diária no mês (MJ m <sup>-2</sup> )
DEWPT	Umidade relativa média no mês (decimal)
WNDVAV	Velocidade média diária do vento no mês (m s <sup>-1</sup> )

Fonte: (ARNOLD et al., 2013).

Os parâmetros do gerador de dados climáticos relacionados a precipitação, foram calculados com base em uma média ponderada em função da área de influência de cada estação pluviométrica na bacia hidrográfica, calculada pelo método dos polígonos de Thiessen. O programa pcpSTAT, estruturado pelos mesmos desenvolvedores do modelo SWAT apenas para este propósito, auxiliou na obtenção destes parâmetros a partir das médias diárias ponderadas. As demais séries históricas, provenientes da estação meteorológica de Lages, tiveram seus dados submetidos ao cálculo das estimativas em planilha eletrônica conforme sua descrição no Quadro 4.

O parâmetro RAINHHMX foi calculado por um fator de desagregação de chuvas sugerido pela CETESB (1986), para a transformação da chuva de um dia medida no pluviômetro para chuva de 30 minutos.

Estas estimativas foram calculadas a partir da média dos meses (completos) do ano de 1961 a 2015 para os dados climáticos e de 1977 a 2005 para os dados de precipitação e vazão, conforme disponibilidade dos dados das estações. A Tabela 1 mostra as estatísticas climáticas para a região de estudo.

Tabela 1 - Parâmetros do gerador de dados climáticos calculados com base nos dados das estações pluviométricas Vila Canoas e Urubici (período de 1977 – 2005) e na estação meteorológica da EPAGRI/CIRAM.

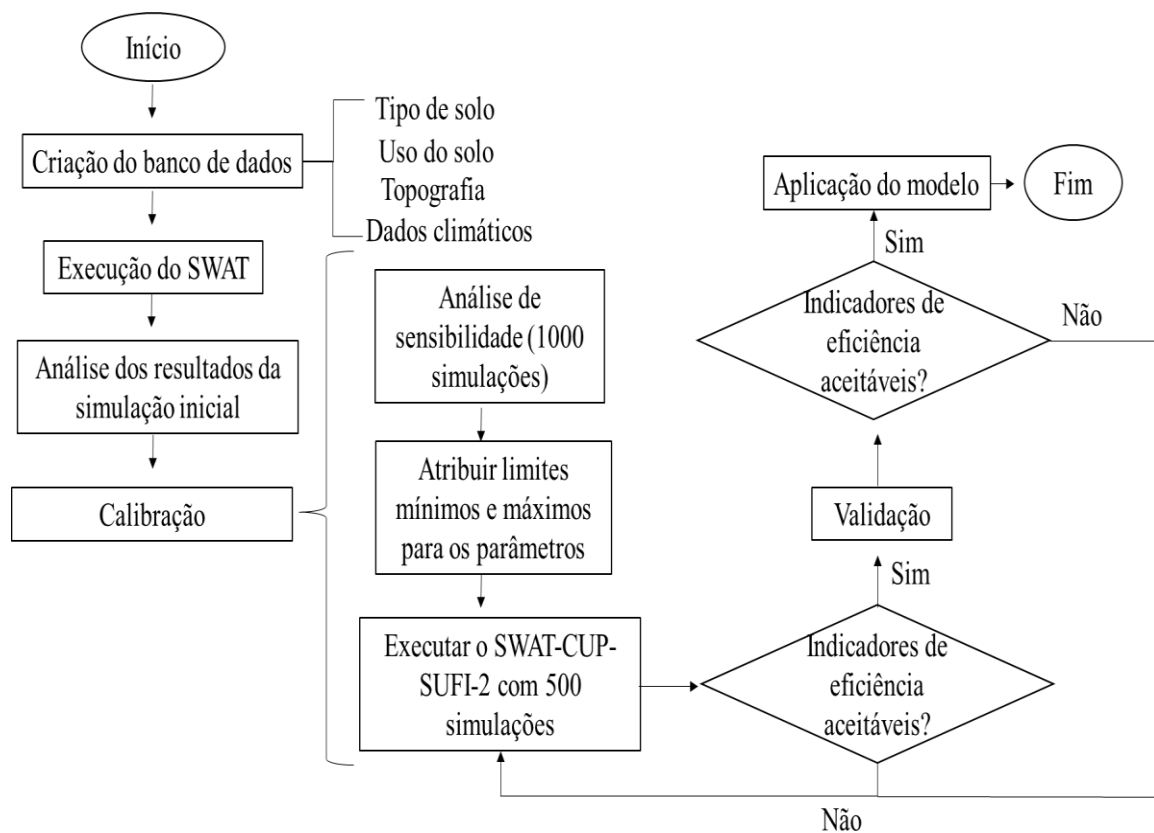
<b>Parâmetros</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>
TMPMX	26,5	26,3	25,0	22,0	18,9	17,2	17,0	18,7	19,3	21,5	23,6	25,6
TMPMN	16,1	16,3	15,2	12,4	9,0	7,3	6,9	8,1	9,7	11,8	13,3	14,9
TMPSTDMX	2,9	2,8	3,1	3,4	3,5	3,9	4,3	4,7	4,5	3,9	3,5	3,2
TMPSTDMN	2,4	2,3	2,6	3,6	4,1	4,5	4,3	4,0	3,7	3,2	3,0	2,6
PCPMM	153,8	149,7	99,7	100,0	105,4	99,7	130,5	109,4	145,8	154,2	121,0	133,2
PCPSTD	8,5	8,0	6,5	8,2	9,5	8,2	9,4	9,5	10,5	10,7	7,9	8,4
PCPSKW	3,2	2,1	3,5	4,5	4,8	3,8	3,3	5,9	3,5	5,3	3,0	3,2
PR_W1	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4
PR_W2	0,7	0,7	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
PCPD	18,7	17,4	14,7	11,3	10,9	10,8	12,2	11,8	13,6	15,3	14,0	15,8
RAINHHMX	31,7	17,4	21,7	34,9	32,9	24,6	24,4	45,7	28,5	54,7	23,4	23,7
SOLARAV	19,9	18,6	17,2	13,4	11,0	9,7	10,4	12,5	13,9	17,6	19,0	21,2

Parâmetros	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
DEWPT	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
WDAV	1,8	1,7	1,5	1,5	1,4	1,5	1,6	1,7	1,9	2,0	1,9	1,9

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

As etapas desenvolvidas para a aplicação do modelo SWAT neste trabalho são apresentadas no fluxograma da Figura 9 e o passo a passo da execução do modelo na interface ArcSWAT é apresentado no Apêndice B.

Figura 9 - Fluxograma de trabalho de execução do modelo hidrológico SWAT.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

### 5.3.1 Calibração e validação do modelo hidrológico

A calibração e validação do modelo hidrológico foi realizada na escala mensal, uma vez que a incerteza associada aos dados mensais de projeção climática é menor que na escala diária e a análise das vazões mensais é suficiente para subsidiar a gestão dos recursos hídricos. A calibração do modelo consistiu em sua parametrização para a bacia do Alto Canoas, o que reduziu a incerteza de previsão. O processo de calibração ocorre a partir da seleção cuidadosa dos valores dos parâmetros de entrada do modelo (com sua incerteza),

compara-se as saídas do modelo (previsão) com dados observados para as mesmas condições (ABBASPOUR et al., 2015).

O SWAT- CUP é o programa de calibração e análise de incerteza desenvolvido para analisar a incerteza dos resultados de previsão do modelo SWAT, o qual integra diversos procedimentos de análise de incerteza e calibração, como o SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fitting*) utilizado neste trabalho.

Em SUFI-2, o parâmetro de incerteza é responsável por todas as fontes de incertezas, tais como a incerteza nas variáveis de condução, modelo conceitual, parâmetros e dados medidos. O grau em que todas as incertezas são contabilizados é quantificada por uma medida referida como o P-factor, que é a percentagem dos dados de medição suportado por 95% da incerteza na previsão (95PPU). Outra medida para quantificar a qualidade de uma análise de calibração/incerteza é o R-factor, que é a espessura média da banda do 95PPU dividida pelo desvio padrão dos dados medidos (KHALID et al, 2016). Para a avaliação das saídas do modelo, considera-se que a medida P-factor varia de 0 a 100% e o R-factor varia de 0 a infinito, sendo que um P-factor de 1 e R-factor de 0 em uma simulação corresponde exatamente aos dados medidos.

A partir de uma faixa dos parâmetros iniciais, o SUFI-2 gera diferentes combinações de parâmetros, comparando dados simulados com observados, identifica a faixa ótima dos parâmetros, mapeia as incertezas para cada parâmetro e quantifica a incerteza das saídas do modelo (CHIEN; YEH; KNOUFT, 2013).

A análise de sensibilidade é o primeiro passo para a calibração do modelo, pois visa determinar quais parâmetros são importantes para o processo que se visa representar, o que reduz o número de parâmetros que serão utilizados no processo de calibração.

O conjunto de parâmetros sensíveis necessários para a calibração são determinados pela taxa de mudança na saída do modelo no que diz respeito às mudanças dos seus parâmetros de entrada (MORIASI et al., 2007), ou seja, os parâmetros sensíveis são àqueles que conseguem interferir nas saídas do modelo quando são submetidos à mudanças em suas faixas de valores.

Nesse trabalho, optou-se pela análise de sensibilidade global disponível do SWAT-CUP. A análise de sensibilidade global avalia os resultados na saída do modelos se todos os valores de parâmetros variarem simultaneamente (ABBASPOUR, 2015).

Os parâmetros utilizados na análise de sensibilidade global foram selecionados a partir de revisão da literatura e conhecimento da área de estudo, como sendo aqueles utilizados com

maior frequência no processo de calibração do escoamento superficial e escoamento de base, devido à grande contribuição do escoamento de base no balanço hídrico desta bacia.

Realizou-se uma primeira execução do SWAT-CUP a partir do método SUFI-2, com 1000 simulações para a análise de sensibilidade global, com os parâmetros escolhidos e seus limites mínimos e máximos fixados a partir do conhecimento dos seus valores para a região, e respeitando o limite estabelecido pelo SWAT\_CUP em “Valores absolutos”.

A calibração ocorreu sobre os parâmetros mais sensíveis determinados na análise de sensibilidade global, a partir da execução do método SUFI-2 com 500 simulações para cada iteração, como recomendado no manual de utilização do SWAT-CUP (ABBASPOUR, 2015).

O processo de calibração foi iterado até que atingiram-se valores aceitáveis de calibração, quantificado por índices de desempenho do modelos e pelos índices de incerteza.

A validação ocorreu a partir da execução do modelo no SWAT-CUP utilizando as faixas de valores dos parâmetros calibrados, com o mesmo número de simulações usados na calibração, em uma série histórica de vazões observadas na estação Rio Bonito diferente do período utilizado na calibração.

A habilidade do modelo de simular a realidade ou a determinação de quão bem um modelo se ajusta aos dados observados em geral é estimado com base em comparações do modelo simulado com dados observados aos pares nos períodos de calibração e validação (LEGATES; MCCABE JR., 1999) a partir de funções objetivo.

Para a avaliação do desempenho do modelo foram utilizadas as seguintes medidas estatísticas: Proporção da Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) para o desvio padrão dos dados medidos (RSR), Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), Percentual de Tendência (PBIAS) e Coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Suas expressões são apresentadas nas Equações 2 a 5, respectivamente, no qual  $Q_{obs}$  é o valor de vazão observada,  $Q_{sim}$  é o valor simulado pelo modelo,  $Q_{méd_{obs}}$  é a média dos valores observados,  $Q_{méd_{sim}}$  é a média dos valores simulados e  $n$  é o número de registros.

$$RSR = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{sim_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{méd_{obs}})^2}} \quad (2)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{sim_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{méd_{obs}})^2} \quad (3)$$

$$P_{BIAS} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n Q_{sim_i} - \sum_{i=1}^n Q_{obs_i}}{\sum_{i=1}^n Q_{obs_i}} \right) \times 100 \quad (4)$$

$$R^2 = \frac{|\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{méd_{obs_i}})(Q_{sim_i} - Q_{méd_{sim_i}})|^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{méd_{obs_i}})^2 * \sum_{i=1}^n (Q_{sim_i} - Q_{méd_{sim_i}})^2} \quad (5)$$

O RSR padroniza a raiz do erro médio quadrático usando o desvio padrão das observações. RSR incorpora os benefícios das estatísticas de índice de erro e inclui um fator de escala/normalização, e pode variar do valor ótimo de zero, o que indica zero RMSE ou variação residual e, portanto, um modelo de simulação perfeito até um grande valor positivo. Quanto menor o RSR, menor a raiz do erro médio quadrático e melhor é o desempenho do modelo (MORIASI et al., 2007).

A função objetivo coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) têm sido a mais comumente empregada para a análise da eficiência da modelagem hidrológica (BRIGHENTI; BONUMÁ; CHAFFE, 2016), consiste em uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variância residual (ruído) em comparação com a variância dos dados medidos (informação). O NS pode variar entre menos infinito e 1, sendo um NS igual a 1 o valor ótimo. Valores entre 0 e 1 geralmente são vistos como níveis de desempenho aceitáveis e valores menores ou iguais a 0 indicam que a média dos dados observados pode fornecer uma melhor previsão do que os valores simulados pelo modelo.

A função Percentual de Tendência (PBIAS) tem seu valor ótimo como sendo 0 (zero), baixas magnitudes indicam boa precisão na simulação 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).

O coeficiente de determinação  $R^2$  pode variar de 0 a 1, onde 0 indica nenhuma correlação e 1 representa uma correlação perfeita, e isto dá um indicativo de quão bem a variância dos valores observados são replicados pelas previsões do modelo.

Para considerar um modelo calibrado e capaz de ser empregado em estudos posteriores é necessário que o valor calculado da função objetivo alcance valores mínimos de qualidade, como por exemplo os sugeridos por Moriasi (2007), apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificações gerais de desempenho de modelos hidrológicos para as estatísticas recomendadas na escala mensal.

Qualidade do modelo	RSR	NS	PBIAS (%)
Muito bom	$0,00 < \text{RSR} < 0,50$	$0,75 < \text{NS} \leq 1,0$	$\text{PBIAS} < \pm 10$
Bom	$0,50 < \text{RSR} < 0,60$	$0,65 < \text{NS} \leq 0,7$	$\pm 10 < \text{PBIAS} < \pm 15$
Satisfatório	$0,60 < \text{RSR} < 0,70$	$0,5 < \text{NS} \leq 0,65$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} \leq \pm 2$
Insatisfatório	$\text{RSR} > 0,70$	$\text{NS} \leq 0$	$\text{PBIAS} \geq \pm 25$

Fonte: Moriasi et al. (2007).

#### 5.4 VALIDAÇÃO DO MODELO CLIMÁTICO ETA-HADGEM2-ES

A validação do modelo climático regionalizado Eta-HadGEM2-ES ocorreu em duas etapas, a primeira consistiu na avaliação dos dados climáticos simulados pelo modelo em um período denominado período controle (1961 – 1990) de um ponto extraído do modelo nas coordenadas da estação Lages/SC, em comparação com dados observados no mesmo período para esta estação meteorológica.

Quando observadas diferenças significativas entre as médias mensais simuladas pelo modelo climático e observadas na estação meteorológica, submetem-se as simulações climáticas à correção dos erros sistemáticos a partir do método de correção *Direct Approach*.

Os dados climáticos das variáveis temperatura do ar (mínima e máxima), umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar foram corrigidos a partir da aplicação da Equação 6 e os dados de precipitação foram corrigidos a partir da Equação 7 (OLIVEIRA; PEDROLLO; CASTRO, 2015)

$$Cz_{corr_{i,j,k}} = Cz_{sim_{i,j,k}} \cdot \left[ \overline{Cz_{obs_k}(61-90)} - \overline{Cz_{sim_k}(61-90)} \right] \quad (6)$$

Em que:  $Cz_{corr_{i,j,k}}$  é o valor da variável climática z corrigida para o período de avaliação, no dia i, no mês k, no ano j;  $Cz_{sim_{i,j,k}}$  é o valor da mesma variável climática simulada no mesmo período, dia, mês, ano;  $\overline{Cz_{obs_k}(61-90)}$  é a média observada da variável climática z, no período de controle, no mês k;  $\overline{Cz_{sim_k}(61-90)}$  é a média simulada da variável climática z, no período de controle, no mês k.

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

Em que:  $P_{corr_{i,j,k}}$  é o valor da precipitação corrigida para o período de avaliação, no dia  $i$ , no mês  $k$ , no ano  $j$ ;  $P_{sim_{i,j,k}}$  é o valor da mesma variável climática simulada no mesmo período, dia, mês, ano;  $\overline{P_{obs_k(61-90)}}$  é a média observada da precipitação, no período de controle, no mês  $k$ ;  $\overline{P_{sim_k(61-90)}}$  é a média simulada da precipitação, no período de controle, no mês  $k$ .

A segunda etapa de validação ocorreu a partir da validação deste modelo após a correção das variáveis simuladas que apresentaram diferenças significativas na primeira avaliação. O processo de validação ocorreu a partir da comparação entre as séries sintéticas de vazão geradas a partir da utilização dos dados climáticos simulados corrigidos no período de avaliação (2014-2015) e dados observados na estação fluviométrica Rio Bonito, exutório da bacia do Alto Canoas no mesmo período. O período compreendido entre 2014 e 2015 foi selecionado por ser o único período disponível de dados de projeção do modelo climático Eta e observados na estação fluviométrica Rio Bonito para a análise.

A normalidade e semelhança das variâncias dos dados simulados e observados foi testada a partir do teste de Shapiro – Wilk (ROYSTON, 1982) e Teste de Levene (FOX, 2008) respectivamente. O teste  $t$  de amostras independentes foi utilizado para a comparação de médias mensais das variáveis temperatura do ar (mínima e máxima), precipitação, radiação solar, umidade relativa, velocidade do vento, no nível de significância de 0,05 nos dois períodos de validação (1961 a 1990 e 2014-2015).

## 5.5 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS HIDROLÓGICOS DE CENÁRIOS DE PROJEÇÃO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS VAZÕES DA BACIA DO ALTO CANOAS

A partir da modelagem hidrológica, os cenários climáticos validados no item 5.4 forneceram cenários hidrológicos, os quais foram comparados com um Período Base (Quadro 5) para testar a hipótese de mudança nas vazões da bacia do Alto Canoas no futuro.

Quadro 5 - Cenários hidrológicos estudados neste trabalho.

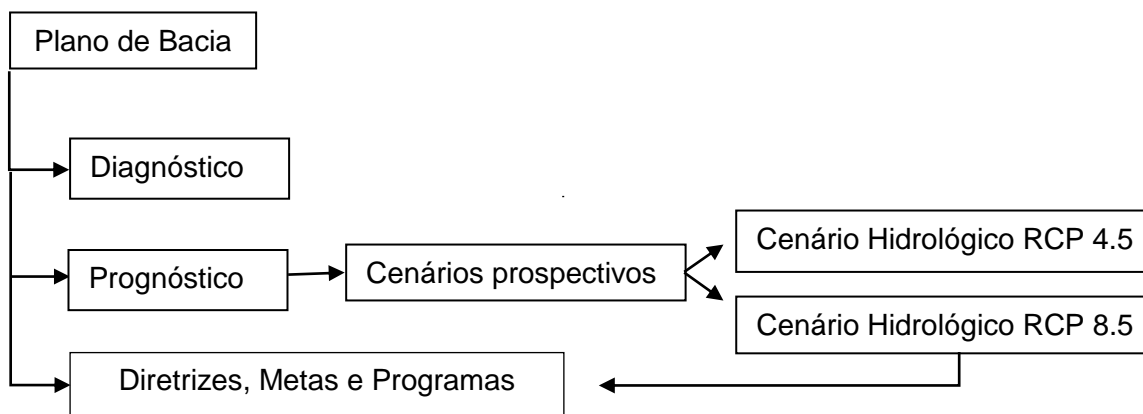
Cenário	Descrição
Período Base	Série hidrológica de vazões mensais observadas na estação fluviométrica Rio Bonito (código 71300000). O período inicia em

Cenário	Descrição
	01/01/1977 e termina em 31/12/1987, totalizando 11 anos de dados consistidos contínuos.
Cenário Hidrológico RCP 4.5	Série hidrológica projetada referente ao cenário de projeção climática RCP 4.5, em quatro futuros centrados: 2030, 2050, 2070 e 2090.
Cenário Hidrológico RCP 8.5	Série hidrológica projetada referente ao cenário de projeção climática RCP 8.5, em quatro futuros centrados: 2030, 2050, 2070 e 2090.

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

A partir da série de vazões projetadas, os impactos dos cenários de projeção de mudanças climáticas puderam ser avaliados a fim de fornecer um prognóstico dos recursos hídricos da bacia do Alto Canoas, e subsidiar a proposição de diretrizes estratégicas de gestão frente às mudanças climáticas (Figura 10).

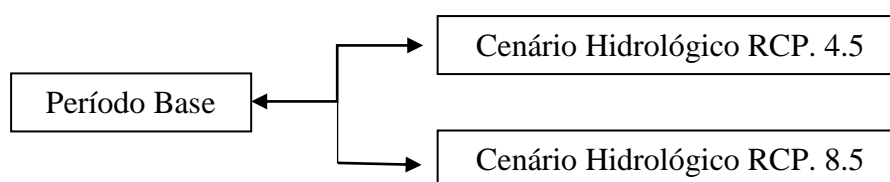
Figura 10 - Etapas da elaboração de um plano de bacia e cenários prospectivos.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

A análise dos resultados da projeção das vazões futuras foi realizada a partir de análises estatísticas de comparação entre a série hidrológica do Período Base e os cenários hidrológicos futuros, além de comparar os dois cenários entre eles mesmos (Figura 11).

Figura 11 - Análise dos resultados dos cenários hidrológicos projetados.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

A variável em análise nos cenários estudados é a vazão na escala mensal para diferentes horizontes temporais que abrangem o período entre 2020 e 2099, sendo eles o futuro centrado em 2030, 2050, 2070 e 2090.

A metodologia empregada para avaliação dos impactos incluiu a análise estatística das seguintes vazões: Vazão média de longo período, vazão média mensal e vazões de referência ( $Q_5$ ,  $Q_{10}$ ,  $Q_{50}$ ,  $Q_{90}$ ,  $Q_{95}$  e  $Q_{98}$ ).

- a) Vazão média de longo período (QMLP): definida pela média aritmética das vazões mensais de toda a série disponível do período avaliado.
- b) Vazão média mensal: definida pela média aritmética das vazões mensais de determinado mês de toda a série disponível do período avaliado.
- c) Vazões de referência: vazão que é igualada ou excedida em determinada porcentagem do tempo, obtida com base na série disponível de vazões mensais. Por exemplo,  $Q_5$  é a vazão que é igualada ou excedida em 5% do tempo.

Também será avaliado o balanço hídrico anual e por período da bacia no Período Base e cenários hidrológicos.

### 5.5.1 Análise exploratória dos dados

A Análise exploratória dos dados foi utilizada para realizar uma avaliação prévia dos resultados obtidos, anterior à aplicação de outros métodos estatísticos (PLOSZAI, 2014). Utilizaram-se principalmente a análise visual por meio de gráficos temporais e de correlação e estatísticas descritivas a fim de encontrar evidências que auxiliassem na interpretação dos resultados.

A normalidade e semelhança das variâncias dos dados simulados e observados foi testada a partir do teste de Shapiro – Wilk (ROYSTON, 1982) e Teste de Levene (FOX, 2008) respectivamente.

Para a avaliação inicial da existência de alterações nas vazões da bacia do Alto Canoas em função das mudanças climáticas, aplicou-se o teste t de amostras independentes para a comparação das médias das vazões mensais de longo período no Período Base e projetadas em RCP 4.5 e RCP 8.5.

### 5.5.2 Análise das vazões de referência

Como o objetivo da pesquisa está vinculado ao planejamento e gestão de recursos hídricos, as análises buscaram avaliar os impactos dos cenários climáticos sobre vazões de referência, usualmente empregadas para a outorga em diferentes estados e nos planos de bacias do Estado de Santa Catarina, vazões medianas, vazões máximas e disponibilidade hídrica a partir do balanço hídrico.

A Curva de Permanência de vazão é um gráfico que informa com que frequência a vazão de dada magnitude foi igualada ou excedida durante o período de registro de histórico de vazões. Esta frequência, baseada nas observações de campo, comumente é empregada como a probabilidade de ocorrência do evento ali representado, diferentemente da probabilidade estimada por modelos distributivos de probabilidade. Geralmente, utilizam-se vazões representativas da curva de permanência de vazões, tais como:  $Q_{90}$ ,  $Q_{95}$  e  $Q_{98}$  (representando as vazões mínimas),  $Q_{10}$  e  $Q_5$  (representando as vazões máximas) e  $Q_{50}$  (vazões medianas, vazões médias ou vazão modal).

A estimativa de vazões mínimas futuras produz informações fundamentais para a instrução de processos de gestão de recursos hídricos relativos ao enquadramento, à outorga e à cobrança pelo uso da água, segundo preveem as legislações em nível federal e estaduais (CRUZ; TUCCI, 2008).

### 5.5.3 Análise de tendência

A análise tendencial das vazões foi utilizada para testar a hipótese de que há tendência na série de vazões projetadas. O teste de Mann-Kendall consiste no método mais apropriado para analisar tendências em séries hidrometeorológicas (FERREIRA; PENNEREIRO; FONTOLAN, 2015). É um teste estatístico não-paramétrico, que se baseia na rejeição da hipótese nula ( $H_0$ ), de que não existe tendência em uma série temporal em um nível de significância  $\alpha$ .

A ausência de autocorrelação serial é necessária para a aplicação do teste (BACK, 2001). Debastiani, Silva e Neto (2016) mostraram que as vazões observadas na Estação Rio Bonito são autocorrelacionadas, especialmente entre vazões médias diárias de dias consecutivos, ou seja, a vazão no intervalo de tempo  $t$  ( $Q_t$ ) é dependente da vazão média no intervalo de tempo anterior ( $Q_{t-1}$ ). Esta propriedade foi explorada pelos autores para melhorar o desempenho de uma Rede Neural Artificial (RNA) em *open* e *closed-loop* visando a projeção de longo termo.

Diante da autocorrelação, optou-se por utilizar o teste de Mann-Kendall Sazonal, no qual se elimina a sazonalidade contida na série, a partir da análise mensal de tendências (HIRSH, 1982).

O teste de Mann-Kendall Sazonal é calculado para cada mês da série temporal separadamente. A variável estatística S, para uma série temporal de Mann-Kendall, é calculada pela soma da diferença dos sinais (sgn), aos pares, de todos os valores da série ( $x_i$ ) em relação aos valores  $x_j$  imediatamente superiores, dado pelas Equações 8 e 9. (SALVIANO et al., 2016).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (8)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1; & \text{se } x_j > x_i \\ 0; & \text{se } x_j = x_i \\ -1; & \text{se } x_j < x_i \end{cases} \quad (9)$$

Quando  $n \geq 10$ , a variável S pode ser comparada com uma distribuição normal, na qual, a variância S ( $\text{Var}(S)$ ), pode ser obtida pela Equação 10, em que  $t_i$  representa o número da extensão das repetições  $i$  (por exemplo, uma série temporal com três valores iguais entre eles teriam uma extensão de repetição igual a 3, ou  $t_i = 1$  e  $i = 3$ ).

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(i-1)(2i+5)}{18} \quad (10)$$

O índice  $Z_{mk}$  segue uma distribuição normal, na qual sua media é zero, valores positivos indicam tendência de aumento e valores negativos indicam tendência de redução. De acordo com o sinal S, o índice  $Z_{mk}$  da distribuição normal é calculado pelo sistema de equações 11, 12 e 13.

$$Z_{MK} = \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, \text{ para } S > 0 \quad (11)$$

$$Z_{MK} = 0; \text{ para } S = 0 \quad (12)$$

$$Z_{MK} = \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, \text{ para } S < 0 \quad (13)$$

Já que é um teste bilateral, para rejeitar  $H_0$ , o valor absoluto de  $Z_{mk}$  deve ser maior que  $Z_{\alpha/2}$ . Por exemplo, para  $\alpha = 5\%$ ,  $Z_{0.05/2} = 1,96$ , é considerado que a série apresenta tendência significativa ao nível de significância de 5%, se  $Z_{mk} > 1,96$ .

#### 5.5.4 Balanço Hídrico

O estudo do Balanço Hídrico (BH) da bacia do Alto Canoas foi realizado com base no princípio da conservação de massas (Equação da Continuidade), o qual estabelece que, para qualquer volume arbitrário e durante qualquer do período de tempo, as diferenças entre as entradas e saídas será condicionada a variação de volume de água armazenada, em milímetros (Equação 14) (CURTARELLI; SILVA; FERREIRA, 2010).

$$BH = P - Q - EVT \quad (14)$$

Em que, BH corresponde ao saldo de Balanço Hídrico (mm), P = Precipitação (mm), Q = vazão (mm) e EVT = Evapotranspiração (mm).

As vazões mensais observadas na estação fluviométrica e projetadas nos cenários hidrológicos em  $m^3/s$  foram transformadas em milímetros/mês por meio da Equação 15.

$$Q(mm) = Q\left(\frac{m^3}{s}\right) \cdot \frac{2592000}{A} \cdot 1000 \quad (15)$$

Em que, Q é a vazão em  $m^3/s$ , A = área da bacia ( $m^2$ ), 2592000 = fator de conversão de segundos para mês e 1000 = fator de conversão de m para mm.

A precipitação foi calculada a partir da média aritmética do total precipitado (mm) no período considerado no cálculo do BH. Utilizou-se a precipitação ponderada pelo Método dos Polígonos de Thiessen das estações Urubici (peso igual a 0,63) e Vila Canoas (0,37) para o Período Base e a precipitação ponderada das projeções dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 na mesma localização.

O método de estimativa para a evapotranspiração utilizado foi a aplicação da Equação 16, proposta por Massagnam et al. (2011), para o Estado de Santa Catarina, específica para o município de Lages (local da estação meteorológica utilizada neste trabalho), no qual as altas

e significativas correlações entre a ETo estimadas pelos métodos de Penman-Monteith (PM) e Thorntwaite (TH), na escala decedial e mensal, possibilitam a estimativa da ETP PM apenas com dados de temperatura média do ar, do Período Base e projetadas nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.

$$y = 10,948 + 1,114 x \quad (16)$$

Em que, y é a ETP estimada pelo método de Penman-Monteith e x é a ETP estimada pelo método de Thorntwaite.



## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 USO DA TERRA DA BACIA DO ALTO CANOAS

A classificação do uso da terra da bacia do Alto Canoas mostrou a presença majoritária de áreas de mata nativa (67,10%), seguida de campos (25,89%), o que evidencia a conservação ambiental desta bacia.

A imagem classificada no ano de 1986 foi comparada com uma classificação do uso da terra do ano de 2005. A partir da comparação das áreas das classes entre os dois períodos (Tabela 3 e Figura 12), conclui-se que não houve alterações significativas no uso da terra da bacia do Alto Canoas.

Tabela 3 - Comparação do uso da terra da bacia do Alto Canoas entre os anos de 1986 e 2005.

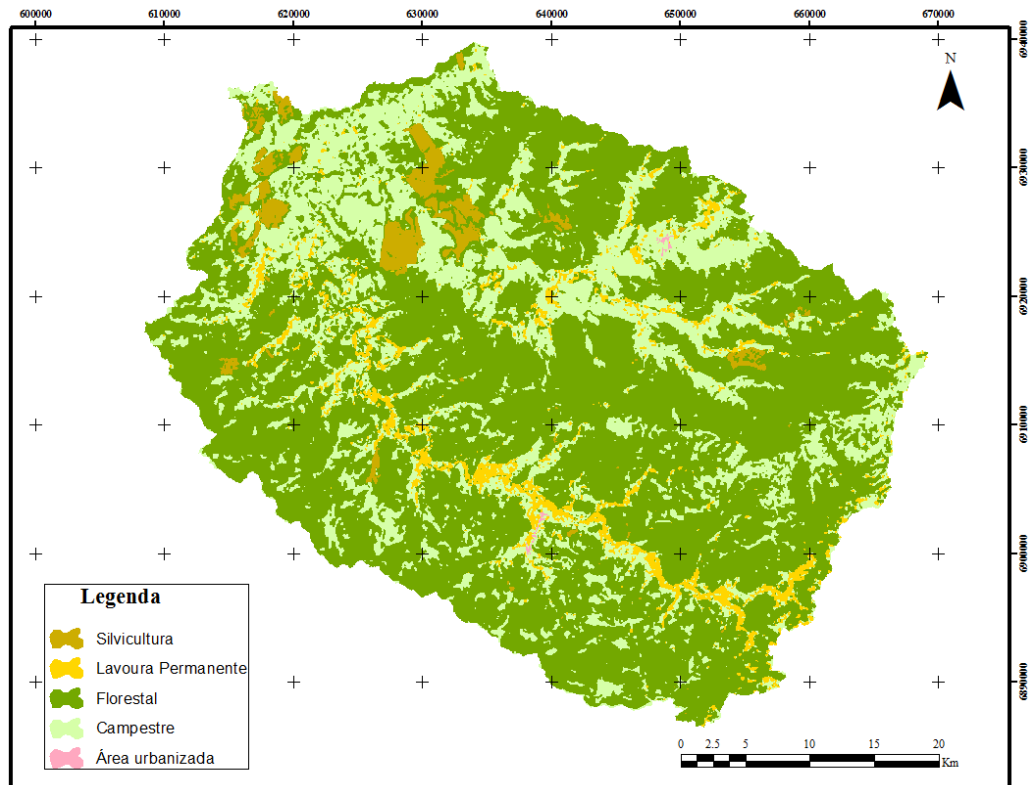
Classe	Área (%) 1986	Área (%) 2005	Diferença entre 1986 e 2005 (%)
Área urbanizada	0,06	0,34	0,28
Silvicultura	2,72	2,85	0,13
Lavoura Permanente	4,23	4,54	0,31
Campestre	25,89	27,39	1,50
Florestal	67,10	64,88	- 2,22

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

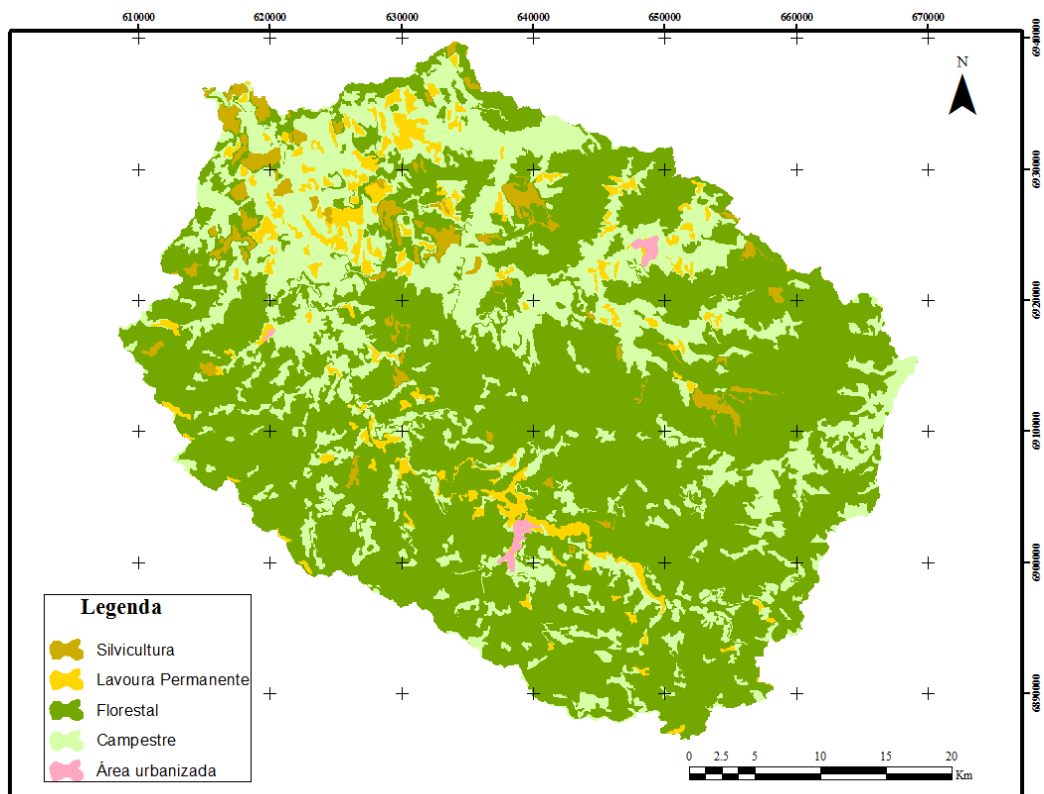
Entre todas as modificações de uso da terra que ocorreram entre os anos 1986 e 2005, a área correspondente aos campos foi a que apresentou maiores alterações de uso, com aumento de aproximadamente 1,50% de sua área, o que nesse caso pode indicar o aumento de áreas destinadas a pastagem, mas também pode ser decorrente de uma confusão do algoritmo na classificação, que pode ter classificado como campo, áreas correspondentes a lavouras temporárias.

Quanto à área florestal, houve um decréscimo de 2,22% nas áreas vegetadas no decorrer de 19 anos, o que não pode ser considerado como um valor alto de conversão de áreas, visto a média geral de aumento desta classe ser muito maior em outras regiões (BATISTA; SANTOS, 2011, COELHO et al., 2014). A baixa taxa de conversão de mata nativa para outros usos pode estar relacionada às características físicas da bacia, como altitude e relevo que não propiciam a exploração de atividades econômicas. Além disso, do total de área de mata nativa, 7% correspondem à unidades de conservação, como por exemplo RPPNs (Reserva Particular do Patrimônio Natural) e o Parque Nacional de São Joaquim (o qual abrange uma parte do município de Urubici), sendo estas áreas protegidas pela legislação.

Figura 12 - Uso da terra nos anos de 1983 (a) e 2005 (b) da bacia do Alto Canoas.



(a)



(b)

Fonte: (a) Elaborado pela autora, 2017 e (b) adaptado de Antunes, 2015.

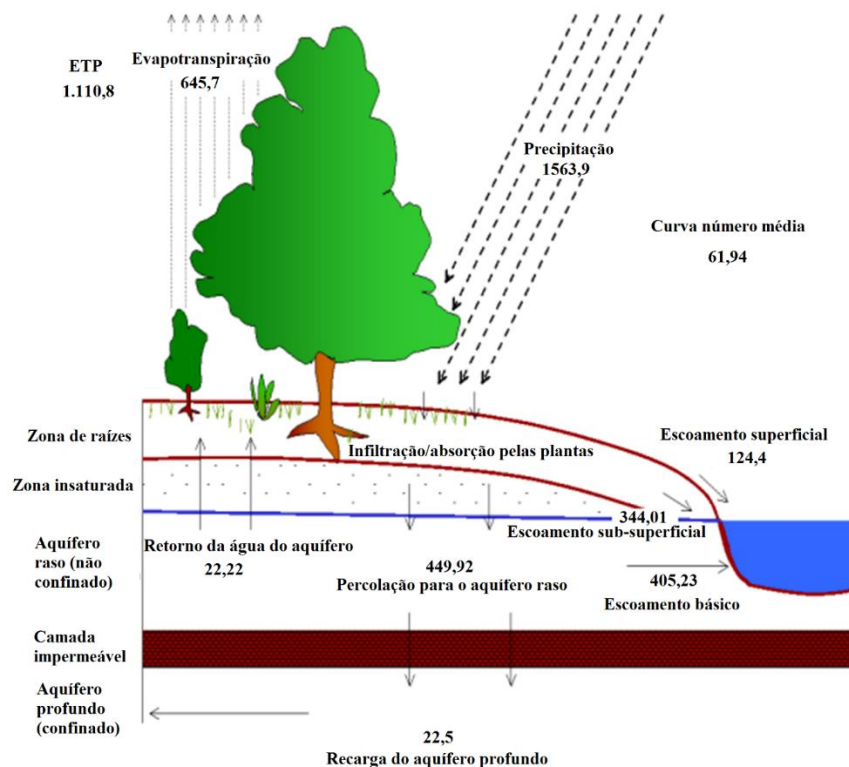
A bacia do Alto Canoas não teve mudanças expressivas no uso da terra ao longo de 19 anos, provavelmente decorrente de características de altitude e relevo da região que não propiciam a exploração de outras atividades, o que faz com que estudos e modelagem hidrológica nesta bacia possam ser conduzidos com dados de uso da terra constantes, sem prejuízos nos resultados obtidos, o que valida a metodologia empregada neste trabalho.

## 6.2 DESEMPENHO DO MODELO HIDROLÓGICO MENSAL

A modelagem hidrológica no SWAT ocorreu no período entre 1977 e 2002, incluindo os períodos de aquecimento, calibração e validação, totalizando 26 anos de simulação. A bacia hidrográfica do Alto Canoas foi subdividida em 27 sub-bacias e 308 URHs.

Os resultados dos componentes do balanço hídrico da bacia hidrográfica calculados pelo modelo SWAT a partir de equações empíricas são apresentados a seguir para o período compreendido entre 1977 a 2002, sendo os três primeiros anos de aquecimento do modelo (Figura 13).

Figura 13 - Resultado do cálculo do balanço hídrico anual (mm) executado no ArcSWAT 2012 para o período entre 1977 a 2002.



Todas as variáveis em milímetros.

Fonte: Modelo executado no ArcSWAT 2012, pela autora, 2017.

A importância dessa análise está em verificar a representação dos processos hidrológicos que ocorrem na bacia do Alto Canoas pelo modelo SWAT. A precipitação anual média de 1563 mm, calculada pelo modelo, indica boa representação das estações pluviométricas utilizadas na simulação, visto o valor próximo da média anual da precipitação para essa região.

A evapotranspiração anual é justificada pelas características de alta densidade florestal na região (65% de mata nativa). Do total precipitado na bacia do Alto Canoas, 55,86% (873,64 mm) é convertido em escoamento (superficial, subsuperficial e escoamento básico), sendo que destes, apenas 14,23% correspondem ao escoamento superficial. O escoamento superficial baixo está relacionado com o valor da Curva Número (CN) médio de 61,94, um valor característico de florestas e plantações, o que facilita a infiltração de água pelo solo e reduz o escoamento superficial.

Os parâmetros mais sensíveis encontrados após análise de sensibilidade para a calibração mensal do modelo são os listados no Quadro 6, sendo os três mais sensíveis GW\_QMN, CN2 e ALPHA\_BNK.

Quadro 6 - Parâmetros sensíveis selecionadas para a calibração mensal da bacia do Alto Canoas.

<b>Parâmetros selecionados para a calibração</b>	<b>Descrição do parâmetro</b>
GW_QMN	Nível d`água no aquífero livre para o fluxo de retorno (mm)
CN2	Curva número (adimensional)
ALPHA_BNK	Fator de fluxo de armazenamento (dias)
RCHRG_DP	Coefficiente de percolação para o aquífero profundo (mm)
SLSOIL	Comprimento da declividade para o escoamento subsuperficial (m)
GW_DELAY	Tempo para recarga do aquífero (dias)
CANMX	Quantidade de água interceptada (mm)
GW_REVAP	Parâmetro controlador da quantidade de água que se move do aquífero para a zona de raízes (adimensional)
SOL_AWC	Armazenamento de água no solo ( $\text{mmH}_2\text{O mmsolo}^{-1}$ )
ESCO	Coefficiente de compensação de evaporação no solo (adimensional)
SURLAG	Coefficiente de atraso do escoamento superficial (adimensional)

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Os onze parâmetros que apresentaram maior sensibilidade tiveram o seu p-value mais próximo a zero, pois este coeficiente determina a significância da sensibilidade (ABBASPOUR, 2015), sendo aqueles que tem efeito significativo nos processos hidrológicos calibrados.

O GW\_QMN é o parâmetro mais sensível e refere-se ao nível limite de água no aquífero livre para ocorrer o fluxo de retorno (mm), sendo um parâmetro importante visto a alta contribuição do fluxo de retorno no balanço hídrico da bacia do Alto Canoas. O CN2 ou curva número inicial para a condição de umidade do solo média é um parâmetro que influi diretamente no escoamento superficial (ARNOLD et al., 2012), incluso na maioria dos estudos de calibração de bacias e importante na calibração de modelos hidrológicos, pois faz ajustes nos parâmetros relacionados ao tipo de solo e uso da terra.

Os parâmetros que têm relação com a água subterrânea, como GW\_REVAP e RCHRG\_DP também foram sensíveis na escala mensal, devido à relevância destes processos sobre o balanço hídrico total da bacia.

Ainda, o parâmetro ALPHA\_BNK correspondente ao fator de fluxo de armazenamento é importante para estabelecer as relações entre armazenamento de água no solo e resposta hidrológica superficial, sendo bastante afetado pelo uso da terra na bacia do Alto Canoas (ANTUNES, 2015). Os parâmetros CANMX e ESCO referem-se aqueles ligados à interceptação das plantas e evaporação do solo, também influentes na bacia do Alto Canoas devido ao uso da terra.

Para uma mesma bacia hidrográfica, pode ocorrer que a análise de sensibilidade apresente parâmetros diversos a cada simulação dependendo dos dados de entrada, o que pode se explicar pelo aspecto de compensação que ocorre no processo de calibração, o qual o ajuste dos parâmetros compensa erros de medição no modelo conceitual (ARNOLD et al., 2012).

Os onze parâmetros físicos sensíveis dentre os inúmeros testados sofreram alteração em suas faixas de valores mínimo e máximo buscando a calibração. A Tabela 4 mostra os intervalos mínimo e máximo dos parâmetros ajustados para a calibração mensal na incerteza SUFI-2, após cinco (5) iterações, com quinhentas (500) simulações cada.

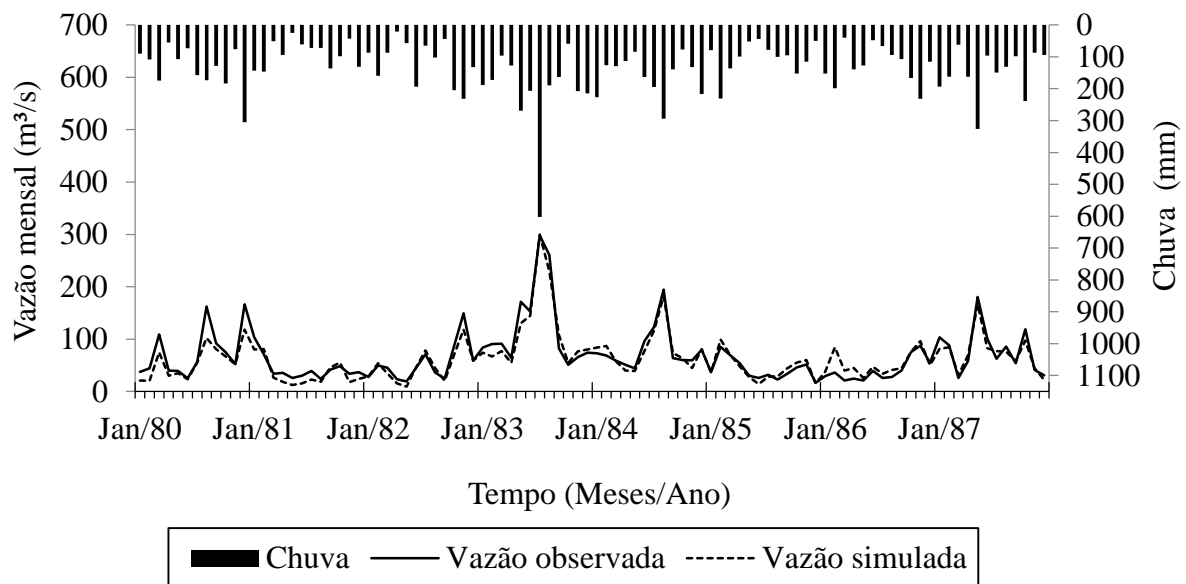
Tabela 4 - Valores mínimo e máximo dos parâmetros calibrados.

Parâmetro	Valor mínimo	Valor máximo	Valor calibrado na melhor simulação
GW_QMN	0,00	86,22	23,02
CN2	-0,36	-0,13	-0,33
ALPHA_BNK	0,34	0,50	0,34
RCHRG_DP	0,00	0,18	0,01
SLSOIL	0,00	30,43	10,86
GW_DELAY	0,00	25,40	3,78
CANMX	0,00	18,97	2,64
GW_REVAP	0,00	0,02	0,00
SOL_AWC	-0,18	-0,05	-0,08
ESCO	0,65	0,90	0,88
SURLAG	23,37	35,60	27,02

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

A função NS utilizada na calibração mostrou-se adequada na representação das vazões da bacia do Alto Canoas na escala mensal, quando comparados os resultados da calibração com os dados de vazão observada, atingindo um NS de 0,90, RSR de 0,32 e PBIAS de 6,1, resultados que demonstram um desempenho muito bom do modelo de acordo com as recomendações de Moriasi et al. (2007) (Gráfico 2).

Gráfico 2 - Hidrogramas observado e simulado no período de calibração mensal do modelo SWAT.



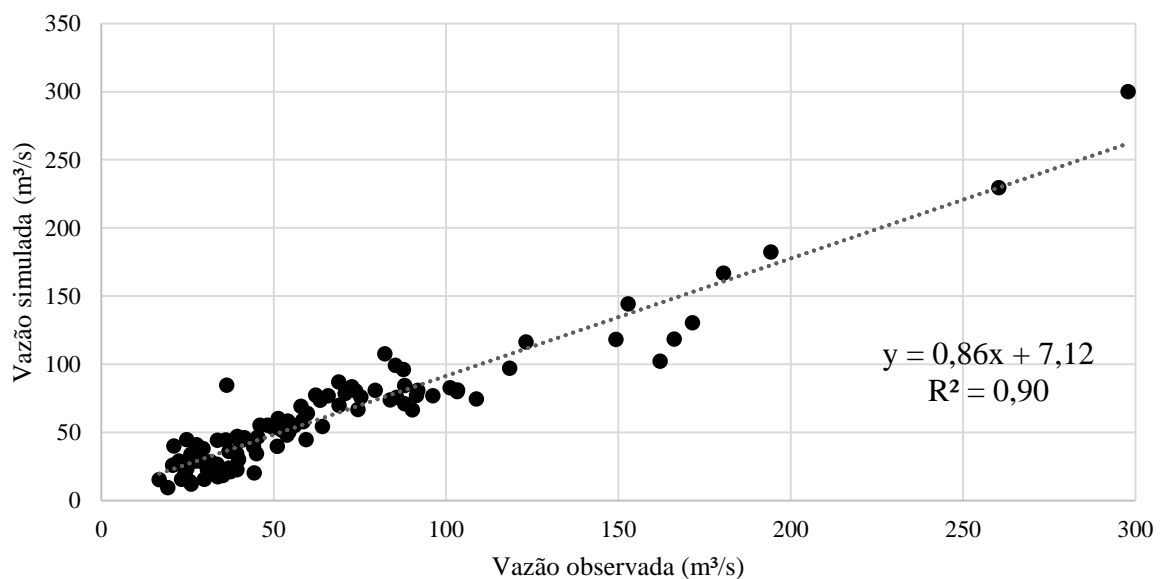
Chuva: chuva ponderada na bacia do Alto Canoas pelo método dos polígonos de Thiessen (estações pluviométricas Urubici e Vila Canoas).

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Quanto a análise de incerteza, o valor de P-factor indica que 74% dos dados observados estão contidos na simulação final com os valores calibrados para o modelo, com um envelope de 0,52 de R-factor, considerado bom para as simulações, visto que objetiva-se encontrar o maior valor de P-factor e o menor valor de R-factor.

Um valor de coeficiente de determinação de 0,90 foi obtido entre a vazão simulada e observada para a calibração (Gráfico 3), o que também confirma a validade da modelagem para o uso em estudos posteriores.

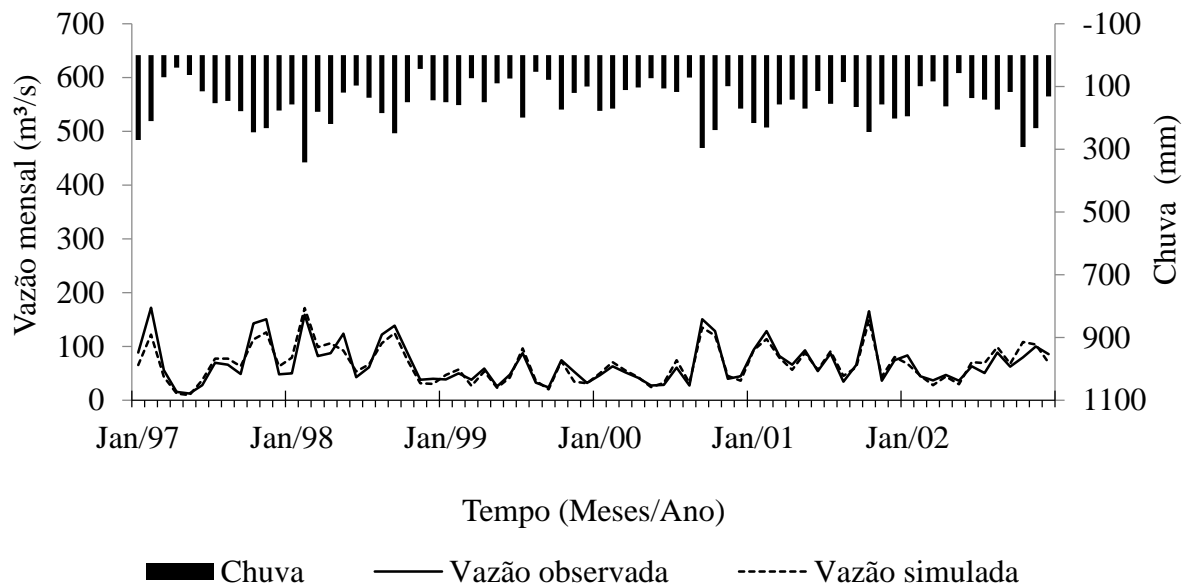
Gráfico 3 - Dispersão entre vazões simuladas na calibração e observadas para a bacia do Alto Canoas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Os resultados de validação do modelo hidrológico mensal atingiram NS de 0,89, RSR de 0,33 e PBIAS de 0,2, resultados que demonstram um desempenho muito bom do modelo de acordo com as recomendações de Moriasi et al. (2007) (Gráfico 4).

Gráfico 4 - Hidrogramas observado e simulado no período de validação mensal do modelo SWAT.



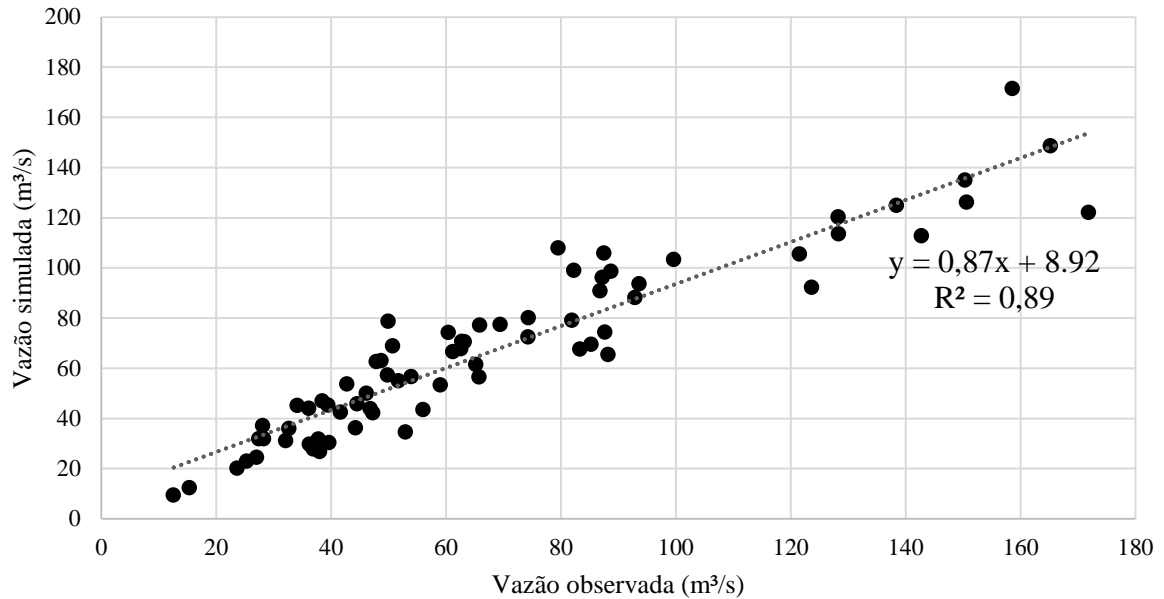
Chuva: chuva ponderada na bacia do Alto Canoas pelo método dos polígonos de Thiessen (estações pluviométricas Urubici e Vila Canoas).

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Quanto a análise de incerteza na validação, o valor de P-factor indica que 81% dos dados observados estão contidos na simulação final com os valores calibrados para o modelo, com um envelope de 0,65 de R-factor considerado bom para desempenho de modelos hidrológicos.

Para a validação, obteve-se um valor de coeficiente de determinação entre dados observados e simulados de 0,89 (Gráfico 5), o que também confirma a validade da modelagem para o uso em estudos posteriores.

Gráfico 5 - Dispersão entre vazões simuladas na validação e observadas para a bacia do Alto Canoas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

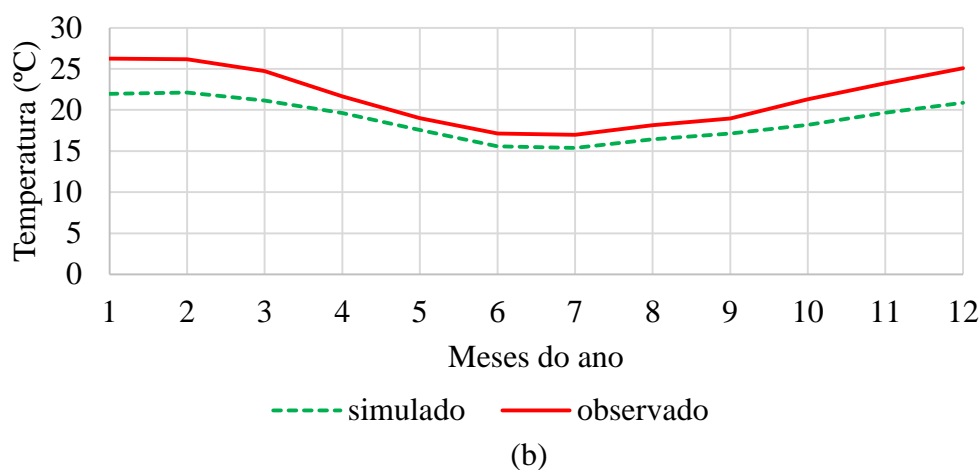
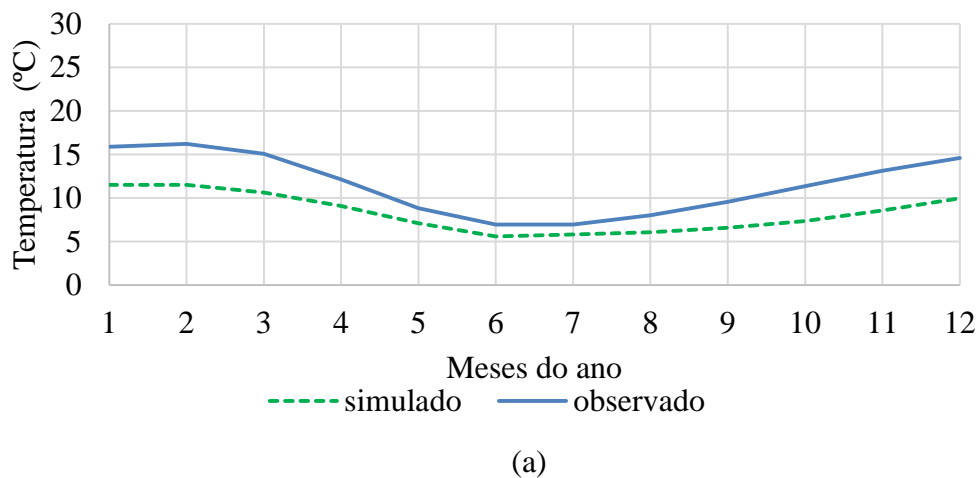
### 6.3 VALIDAÇÃO DO MODELO CLIMÁTICO ETA-HADGEM2-ES

#### 6.3.1 Validação dos dados climáticos simulados no Período Base

A comparação entre dados observados na estação meteorológica e simulados pelo modelo climático Eta-HadGEM-ES para a variável temperatura do ar demonstra boa aderência dos dados quanto a representação das variações durante o ano. Ainda que haja diferença significativa ( $\alpha = 0,05$ ) entre o valor numérico da temperatura do ar observada e simulada, os meses quentes e frios são bem representados, com um coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,95 e 0,98 para a temperatura mínima e máxima, respectivamente.

O ciclo anual da temperatura do ar é subestimado nas simulações no Brasil pelo modelo regional na maior parte do ano (CHOU et al., 2014). Conforme observa-se na Figura 14, a temperatura mínima simulada pode alcançar um desvio de aproximadamente  $-4,7^\circ\text{C}$  no mês de fevereiro.

Figura 14 - Comparação da temperatura do ar (a: mínima; b: máxima) no período de 1961 a 1990 simulada pelo modelo climático Eta-HadGEM2-ES e dados observados na estação Lages-SC.

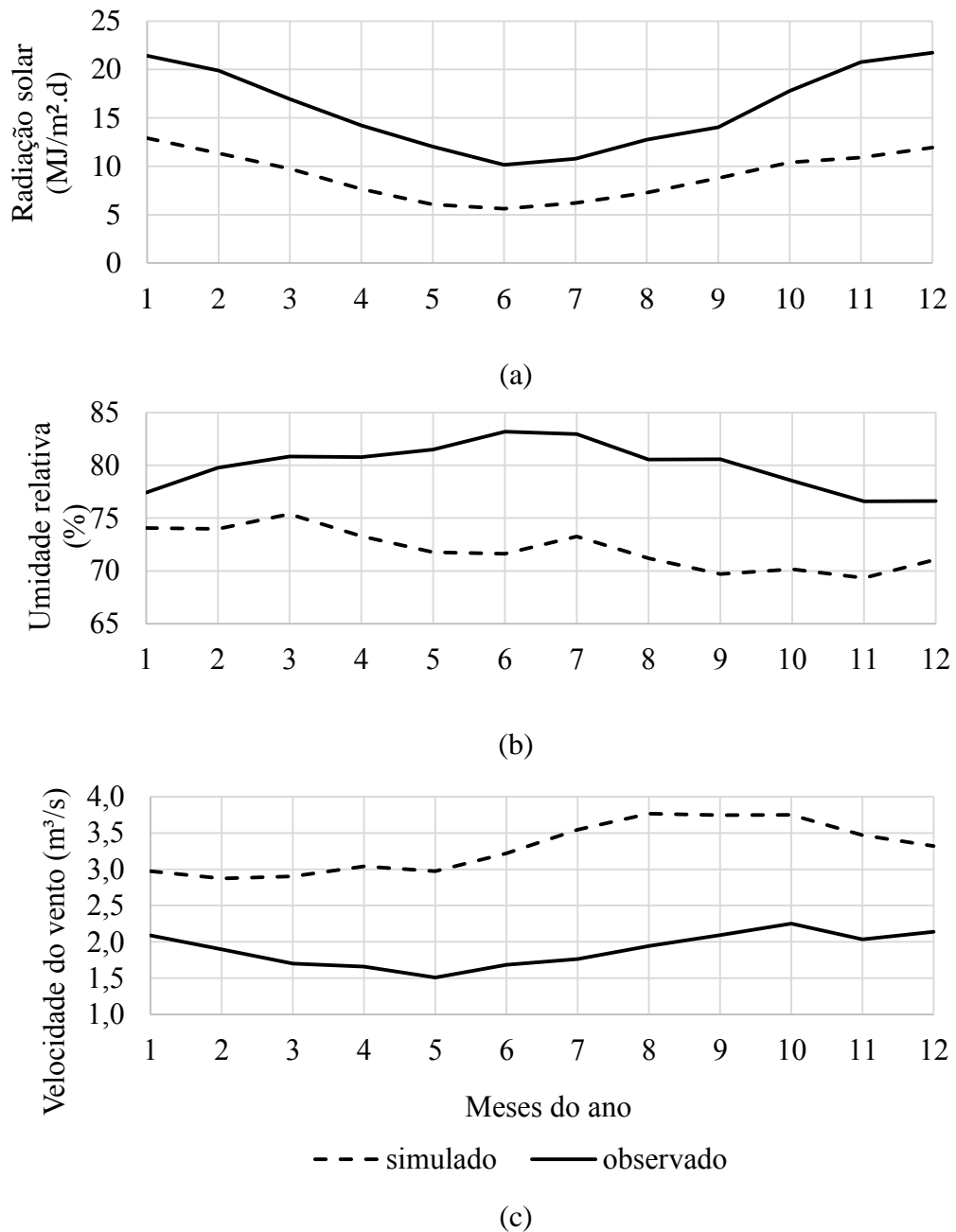


Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

A temperatura máxima simulada é representativa do ciclo anual real desta região, no entanto também é subestimada com um valor de desvio de  $-4,3^{\circ}\text{C}$  no mês de janeiro, apresentando diferenças significativas das temperaturas observadas. Esta tendência de subestimação também foi encontrada por Chou et al. (2014), para as temperaturas máximas na América do Sul, América Central e Caribe. No entanto, nestas localidades as temperaturas simuladas são menores nos meses de inverno, enquanto que para Lages/SC as maiores diferenças entre o simulado e observado ocorreram no verão. Esta diferença, para as variáveis de temperatura do ar mínima e máxima, pode estar relacionada à grande amplitude térmica característica da serra catarinense, com diferenças notáveis entre os mínimos e máximos valores de temperatura do ar, em especial no verão, e à resolução espacial do modelo.

Os dados de projeção do modelo Eta-HadGEM2-ES referentes a radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento diferem significativamente ( $\alpha = 0,05$ ) dos dados observados na estação meteorológica de Lages no período de 1961 a 1990 (Figura 15).

Figura 15 Radiação solar (a), Umidade relativa (b) e Velocidade do vento (c) no período de 1961 a 1990 simuladas pelo modelo EtaHadGEM-ES e observadas na estação meteorológica.



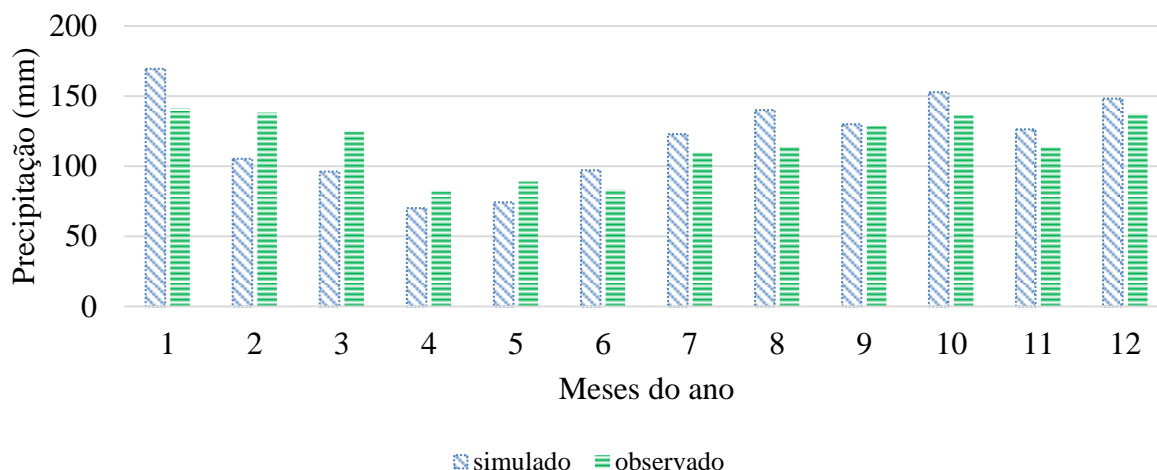
Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Os dados de radiação solar e umidade relativa são subestimados pelo modelo, enquanto a velocidade do vento é superestimada. Observa-se ainda (Figura 15 – b) discordância entre o ciclo mensal da umidade relativa simulado e observado, uma vez que as variações sazonais de aumento e redução da umidade relativa não são bem representadas.

As médias dos totais mensais precipitados simulados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES e observados não diferem significativamente ( $\alpha = 0,05$ ), no período 1961 a 1990. Observa-se

que a precipitação total anual média do período é de 1398 mm enquanto para os dados simulados é de 1433 mm (Figura 16).

Figura 16 - Precipitação no período de 1961 a 1990 simulada pelo modelo EtaHadGEM-ES e precipitação observada na estação Lages-SC.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Os meses com maior desvio foram janeiro, fevereiro e março, nos quais os primeiros três meses são os que apresentam predominância de chuvas convectivas, logo, mais sujeitas à erros de estimação pelo modelo, e ainda, não se pode rejeitar a hipótese de semelhança entre as médias mensais, sendo que subestimação ou superestimação podem ser devidas ao acaso ( $\alpha = 0.05$ ). Chou et al. (2014) concluiu que de junho a janeiro as simulações de precipitação são subestimadas pelo modelo para o sul do Brasil e de fevereiro a maio são superestimadas. O mesmo modelo apresentou desvios negativos durante o verão e positivos durante o inverno para a região da Amazônia (ROCHA et al., 2015).

Os dados simulados de precipitação estão aptos a serem utilizados em estudos, considerando-se a boa aderência aos dados observados no período de 1961 a 1990, o que faz com que as projeções futuras sejam válidas no estudo e avaliação dos impactos de mudanças climáticas futuras. Contudo, as diferenças nas temperaturas do ar mínimas e máximas, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento podem resultar em diferenças no balanço hídrico da bacia do Alto Canoas. Se o modelo subestima essas variáveis, significa que a evapotranspiração pode ser subestimada também, o que implica que as vazões básicas podem ser maiores que a realidade. Logo, a bacia tenderia em armazenar mais água, indicando um falso aumento na disponibilidade hídrica. Por isso, as variáveis que apresentaram diferenças significativas foram submetidas à correção pelo método *Direct*

*Approach*, a fim de eliminar erros sistemáticos que pudessem interferir nos resultados da pesquisa, com a propagação das incertezas em análises posteriores.

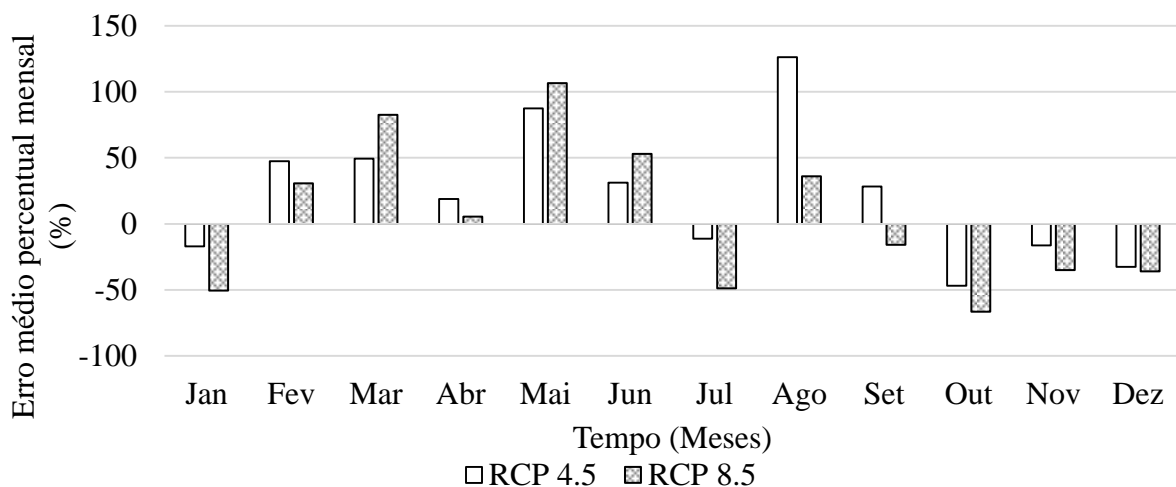
### 6.3.2 Validação das vazões mensais simuladas no período de avaliação (2014-2015)

Neste subitem, foram realizadas comparações entre as vazões observadas e os cenários hidrológicos projetados a partir das variáveis climáticas do modelo climático Eta-HadGEM2-ES corrigidas no item anterior, para um período passado, entre os anos de 2014 e 2015, denominado de período de avaliação.

A vazão média observada no período de avaliação, entre janeiro de 2014 e dezembro de 2015 foi de 78,58 m<sup>3</sup>/s, enquanto que a vazão simulada foi de 83,65 e 69,33 m<sup>3</sup>/s para RCP 4.5 e RCP 8.5 respectivamente. As vazões médias simuladas pelos cenários e observada no período de avaliação não diferem significativamente ( $\alpha = 0,05$ ). Contudo, RCP 4.5 superestima a vazão observada com um erro médio percentual de 6,4% enquanto o RCP 8.5 subestima com erro médio percentual de 11,8%, desvios que podem ser atribuídos ao acaso de acordo com o resultado do teste de comparação de médias.

Mensalmente, RCP 4.5 apresenta maior erro de estimativa nos meses de maio e agosto (superestimação), enquanto RCP 8.5, nos meses de março e maio (superestimação) e outubro (subestimação) (Gráfico 6).

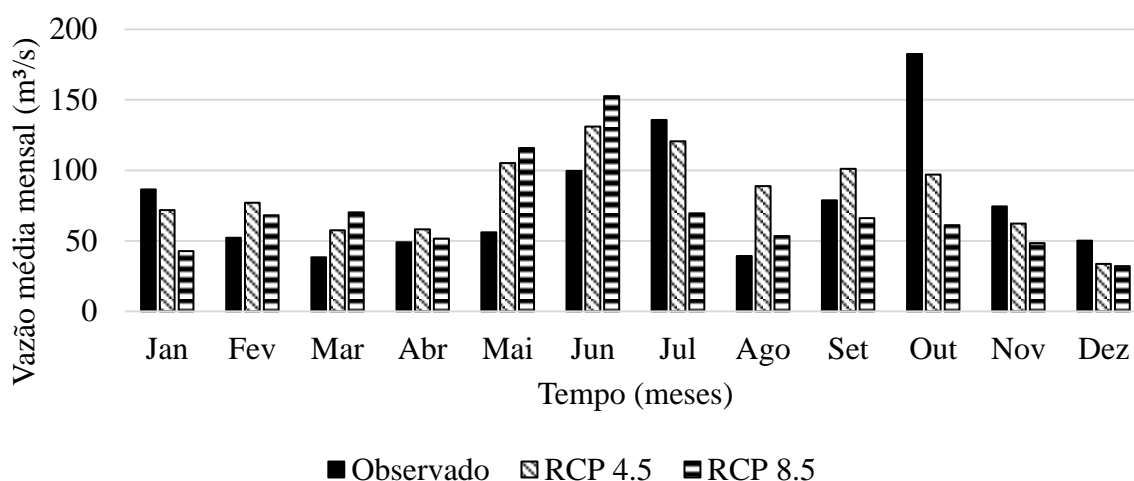
Gráfico 6 - Erro percentual das vazões médias no período 2014-2015 sob os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 em relação às vazões observadas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Não houve uma regra geral para as tendências de subestimação ou superestimação da vazão dos cenários de projeção climática futura em relação à vazão observada no período de avaliação. O Gráfico 7 mostra uma variação heterogênea ao longo dos meses da estimativa nos diferentes cenários, sendo que por vezes a vazão foi subestimada e em outras superestimada nos dois cenários em diferentes graus, contudo estas diferenças nas médias mensais do período podem ser explicadas pelo curto período de avaliação disponível (dois anos), em que as vazões observadas encontraram-se acima da vazão média histórica (847 mm).

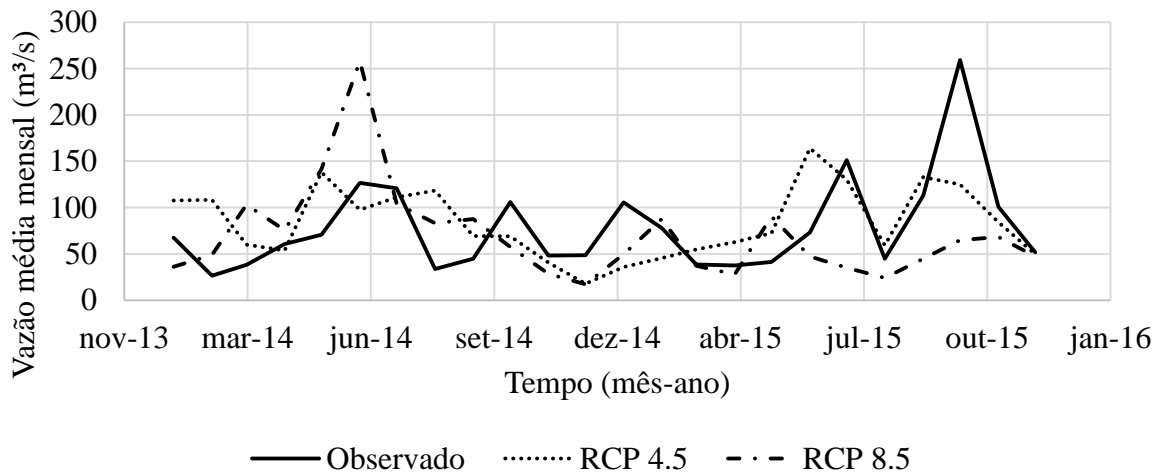
Gráfico 7 - Médias mensais observadas e simuladas nos RCP 4.5 e RCP 8.5 para o período de avaliação (2014-2015).



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

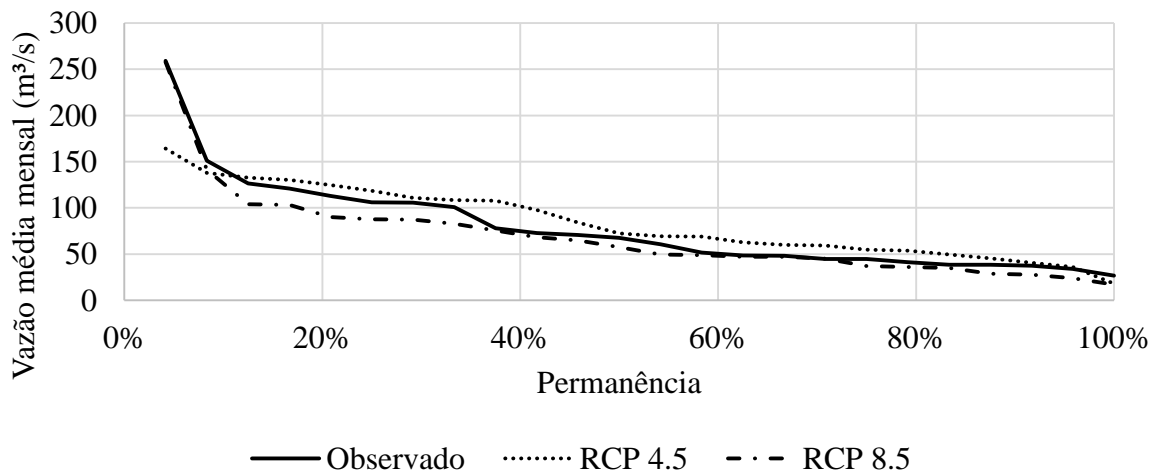
O hidrograma das vazões (Gráfico 8) e a curva de permanência das vazões (Gráfico 9) mostram que no geral, houve boa aderência dos valores de vazões mínimas simuladas com as vazões observadas, assim como das permanências dessas vazões. Entretanto, picos de vazão podem ser estimados pelo cenário RCP 8.5 e não serem observadas nos dados medidos na estação fluviométrica Rio Bonito, ainda que sua permanência corresponda aos dados medidos. No RCP 4.5, as vazões de baixa permanência ( $Q \leq 10\%$ ) tendem a ser subestimadas, ainda que RCP 4.5 acompanhe melhor o ciclo das vazões ao longo do ano em comparação com o RCP 8.5.

Gráfico 8 - Hidrograma das vazões observada na estação Rio Bonito e simuladas nos RCP 4.5 e RCP 8.5 para o período de avaliação (jan-2014 a dez/2015).



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Gráfico 9 - Curva de Permanência das vazão média mensal observada e simulada nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 no período de avaliação (jan-2014 – dez-2015).



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Como as médias das vazões mensais dos RCP 4.5 e RCP 8.5 não diferem significativamente das médias das vazões mensais observadas no período de avaliação, ao nível de significância de 5%, pode-se concluir que não houve erros sistemáticos nas vazões projetadas que pudessem interferir nos resultados das projeções futuras.

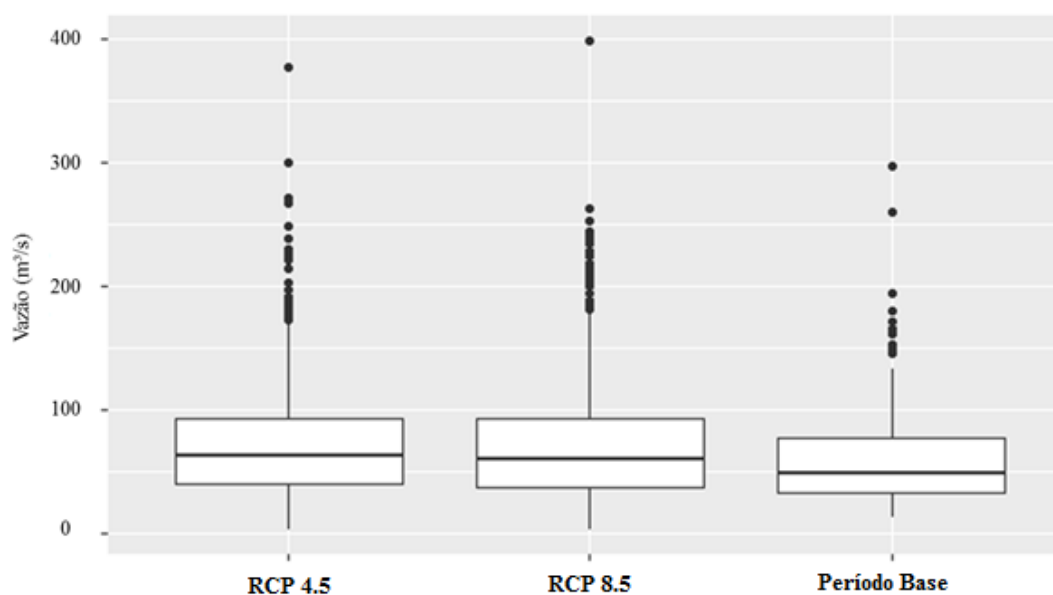
## 6.4 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS HIDROLÓGICOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA DO ALTO CANOAS

Neste item serão apresentados os resultados das projeções hidrológicas futuras para a bacia do Alto Canoas, para diferentes horizontes temporais que abrangem os anos de 2020 a 2099. Este item foi subdividido em Parte I e Parte II, na primeira parte será apresentada uma análise global das projeções para o futuro, a longo prazo, avaliando a existência de tendências e alterações nas vazões projetadas de 2020 a 2099 e na segunda parte serão realizadas análises das projeções hidrológicas em 4 diferentes futuros centrados (2030, 2050, 2070 e 2090) para cada um dos cenários de projeção.

### 6.4.1 Parte I - Análise das projeções hidrológicas a longo prazo

A projeção hidrológica para o futuro indica um aumento geral da vazão em 13,49% e 13,19% em comparação com a QMLP do Período Base (62,21 m<sup>3</sup>/s) para RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente no período entre 2020 e 2099. O Gráfico 10 mostra que o desvio padrão dos dados aumentará no futuro para os dois cenários hidrológicos, indicando maior variabilidade temporal das vazões.

Gráfico 10 - Boxplot das vazões do Período Base, RCP 4.5 e RCP 8.5.

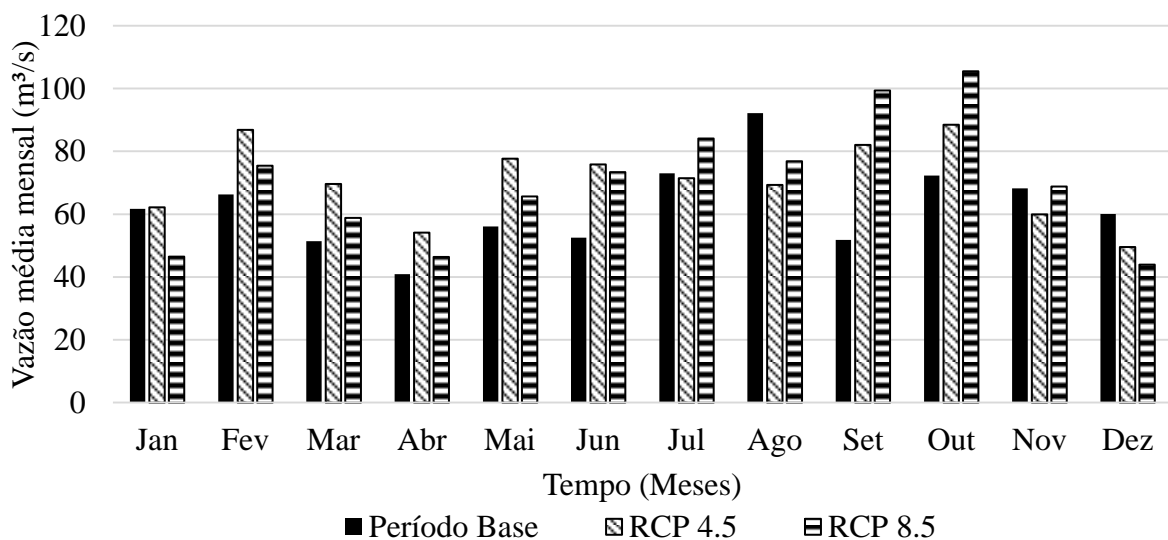


Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

A análise tendencial das vazões pelo teste de Mann-Kendall aponta tendência positiva de aumento das vazões no meses de maio e dezembro em RCP 4.5 e aumento positivo nos meses de maio, junho, setembro e outubro em RCP 8.5 ( $\alpha = 0,05$ ), enquanto o Período Base não apresentou tendências na série de vazões mensais.

Não houve diferenças significativas entre as vazões médias mensais do Período Base e dos cenários de projeção hidrológica ( $\alpha = 0,05$ ) (Gráfico 11), porém é possível notar um deslocamento das maiores vazões para os meses de setembro e outubro para o futuro.

Gráfico 11 - Comparação entre as médias mensais da vazão no Período Base, RCP 4.5 e RCP 8.5 no futuro (2020-2099).



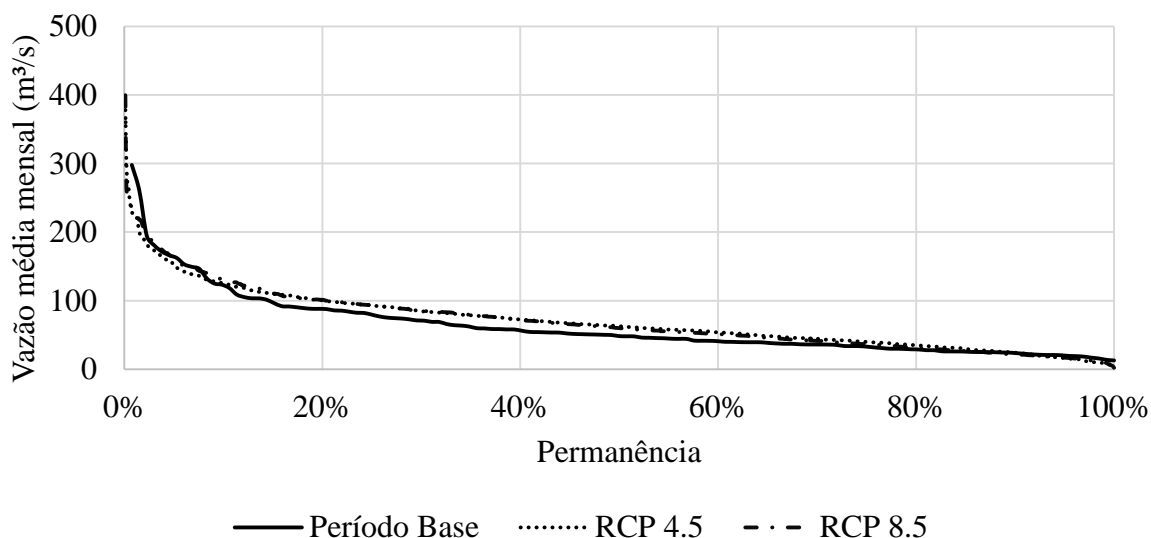
Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Os impactos hidrológicos nas vazões podem ser melhor observados em vazões de referência. A vazão de referência  $Q_{50}$  poderá aumentar em 30,00% e 24,07% nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 respectivamente, o que pode acarretar em aumento na vazão média dos rios durante o ano, garantindo a disponibilidade hídrica na bacia do Alto Canoas. A vazão de referência  $Q_{90}$  tende a aumentar no RCP 4.5 em 3,00% e reduzir no RCP 8.5 em 7,80% e as vazões de referência  $Q_{95}$  e  $Q_{98}$  tendem a reduzir de 14,35% a 37% nos RCP 4.5 e RCP 8.5 no período entre 2020 e 2099. As vazões  $Q_{95}$  e  $Q_{98}$  representam as vazões mínimas que ocorrem na bacia, indicando portanto uma redução da disponibilidade hídrica em períodos secos do ano. Por outro lado, as vazões máximas representadas pela  $Q_{10}$  podem aumentar em 1,50% e 6,80% nos RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente.

Os picos de vazão observadas nas séries futuras terão menor permanência e maior magnitude que o Período Base como mostra o Gráfico 12. Isto pode contribuir negativamente

na ocorrência de eventos extremos isolados nesta bacia, com picos de vazão muito elevados para os dois cenários de projeção hidrológica. Já as vazões com tempo de permanência maiores ou iguais a 95% (vazões mínimas) sofrerão impactos de redução do valor da vazão decorrentes dos cenários de mudanças climáticas.

Gráfico 12 - Comparação entre as curvas de permanência do Período Base e RCP 4.5 e RCP 8.5 no futuro (2020-2099).



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

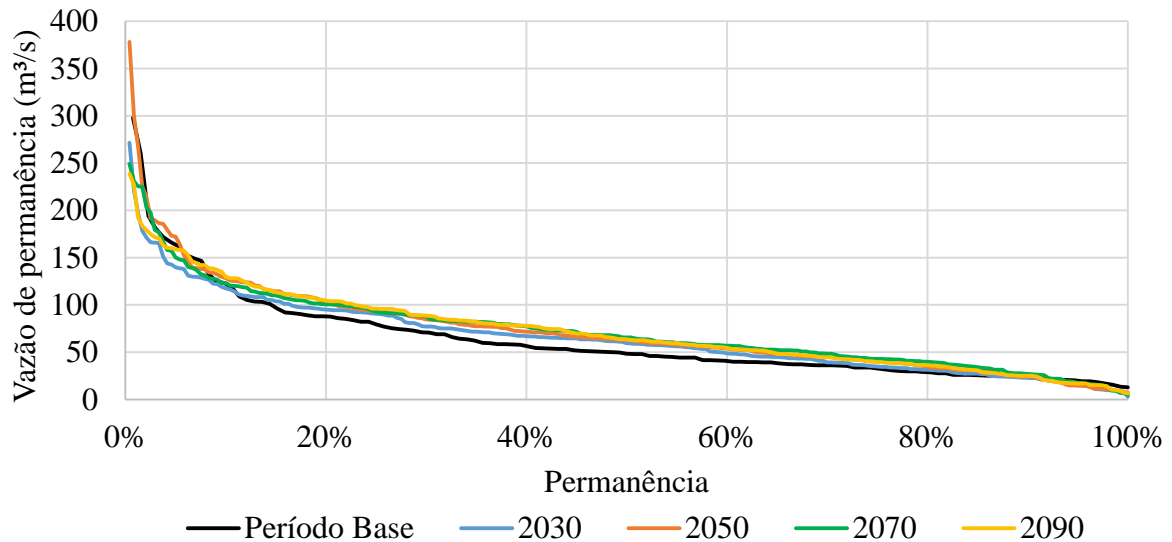
#### 6.4.2 Parte II – Análise das projeções hidrológicas em diferentes futuros centrados

##### 6.4.2.1 Análise das vazões projetadas do Cenário Hidrológico RCP 4.5

As tendências também foram avaliadas em cada futuro centrado e para cada cenário hidrológico projetado. No cenário RCP 4.5, constata-se que não há tendência de aumento ou redução das vazões mensais na série projetada do futuro centrado em 2030 e 2050. No futuro centrado em 2070 há tendência de aumento nas vazões no mês de setembro, enquanto em 2090 há tendência de aumento em outubro ( $\alpha=0,05$ ). Mais uma vez, o teste de comparação de médias não indicou diferenças significativas entre as médias das vazões mensais de longo período do Período Base e futuros centrados.

A variação nas vazões de referência nos diferentes futuros centrados para o RCP 4.5 é baixa, porém é notável um aumento na magnitude das vazões de baixa permanência (vazões máximas) em 2050 (Gráfico 13).

Gráfico 13 - Comparação entre as curvas de permanência do Período Base e diferentes períodos do futuro para o RCP 4.5.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Em comparação com o Período Base, as vazões projetadas nos diferentes períodos para o RCP 4.5 indicam que haverá uma mudança nas vazões médias mensais ( $Q_{50}$ ) no sentido de aumento das vazões, com um pico no futuro centrado em 2070, seguido de decréscimo e estabilização da vazão. Também observa-se na curva de permanência uma redução da permanência de vazões de pico muito alto em todos os períodos, aumento do pico das vazões máximas em 2050 e redução das vazões máximas nos outros períodos avaliados.

Na análise das vazões de referência, os maiores percentuais de alterações no sentido de redução das vazões serão nas vazões mínimas correspondentes a  $Q_{98}$ , com redução de até 38,50% em 2030. O maior percentual de aumento será nas vazões médias ( $Q_{50}$ ), com aumento de até 36,05% em 2070. A discretização da análise nos períodos permite verificar que os impactos dos cenários de projeção climática irão variar de sentido (aumento e redução) durante o período total avaliado. Por exemplo, a  $Q_{10}$  passará por um período de pequena redução até 2030 com posterior aumento em seu valor em 2050, redução em 2070 e por fim, aumento de 6,27% em 2090 (Tabela 5).

Tabela 5 – Percentagem de alteração das vazões de referência nos futuros centrados (2030, 2050, 2070 e 2090) sob o cenário RCP 4.5 em relação à vazões de referência média no Período Base.

Vazão de referência	Período Base (m <sup>3</sup> /s)	Percentagem de alteração (%)			
		2030	2050	2070	2090
Q <sub>5</sub>	164,21	-14,48	3,42	-7,56	-3,25
Q <sub>10</sub>	123,30	-4,57	3,70	-0,76	6,27
Q <sub>50</sub>	48,27	23,98	29,91	36,05	31,32
Q <sub>90</sub>	23,34	-2,02	3,36	15,68	6,96
Q <sub>95</sub>	19,81	-20,98	-26,27	-9,96	-14,64
Q <sub>98</sub>	16,19	-38,50	-34,52	-22,51	-20,03

Percentagem de alteração (%): percentagem de alteração da vazão de referência no futuro centrado em comparação com o Período Base.

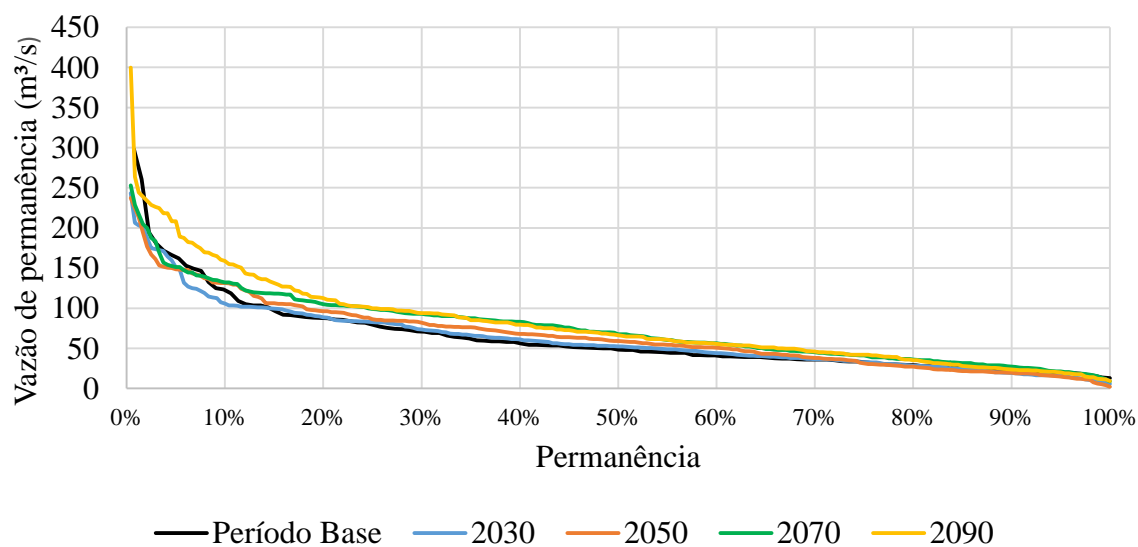
Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

#### 6.4.2.2 Análise das vazões projetadas para o Cenário Hidrológico RCP 8.5

Na análise das vazões projetadas no RCP 8.5, não há tendência nas vazões por futuro centrado. Ainda que tenha sido observada tendência para os meses de maio, junho, setembro e outubro no período de 2020-2099, essas mudanças não podem ser verificadas na análise por futuro centrado.

As vazões projetadas nos diferentes períodos do RCP 8.5 indicam que as vazões com permanência entre 0 e 20% do tempo, terão maior magnitude no futuro centrado em 2090. Também observa-se que as vazões tendem a ser maiores na permanência de 20 a 55% ao longo dos anos, com uma diferença indicada na curva para aumento até 2090 (Gráfico 14).

Gráfico 14 - Comparação entre as curvas de permanência dos diferentes períodos do futuro para o RCP 8.5.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Em comparação com o Período Base, as vazões projetadas no RCP 8.5 indicam que haverá um aumento no pico das vazões de referência  $Q_{10}$  e  $Q_5$  no futuro centrado em 2090 de 28,11% e de 22,95%, respectivamente. Em contrapartida, no início do século, as vazões máximas  $Q_5$  e  $Q_{10}$  se manterão abaixo do Período Base (Tabela 6). As vazões médias ( $Q_{50}$ ) também sofrerão um aumento gradual ao longo dos períodos, atingindo um incremento de 41,14% em 2070, similar ao aumento observado no RCP 4.5.

Tabela 6 - Percentagem de alteração das vazões de referência nos futuros centrados (2030, 2050, 2070 e 2090) sob o cenário RCP 8.5 em relação à vazões de referência média no Período Base.

Vazão de referência	Período Base (m <sup>3</sup> /s)	Percentagem de alteração (%)			
		2030	2050	2070	2090
Q5	164,21	-6,93	-9,28	-7,64	22,95
Q10	123,30	-14,38	6,41	7,43	28,11
Q50	48,27	8,86	22,17	41,14	37,46
Q90	23,34	-17,17	-16,56	16,58	1,25
Q95	19,81	-22,70	-25,64	6,52	-0,48
Q98	16,19	-33,96	-37,19	7,29	-11,89

Percentagem de alteração (%): percentagem de alteração da vazão de referência no futuro centrado em comparação com o Período Base.

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

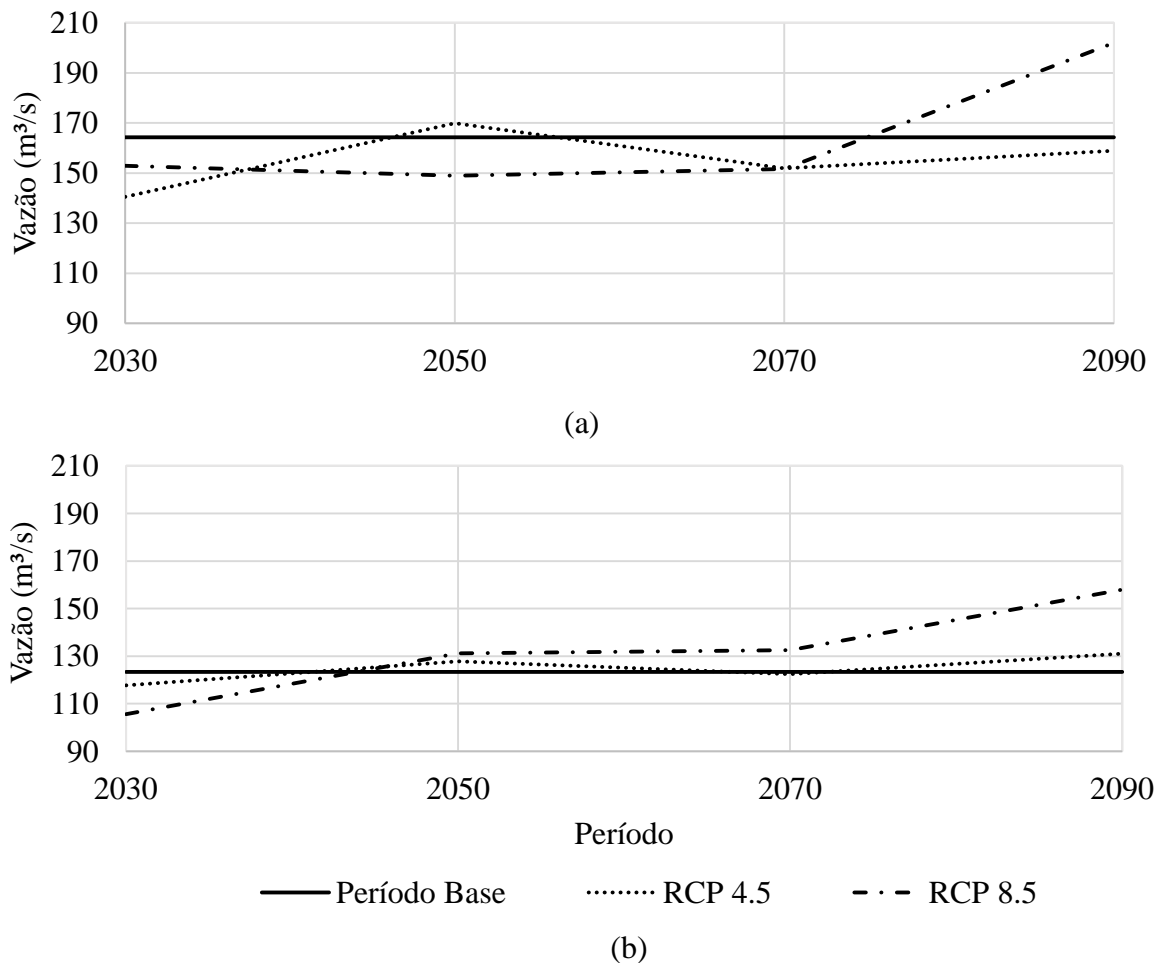
As vazões com permanência em 90% do tempo ( $Q_{90}$ ) sofrerão redução de até 16,56% em 2050 e posterior aumento de 16,58% em 2070, em comparação ao Período Base. As vazões mínimas  $Q_{98}$  sofrerão um impacto de redução de até 37,19% em 2050, aumento em 2070 e posterior redução novamente, porém em menor grau (-11,89%) em comparação com o Período Base.

A comparação das vazões de referência observadas no Período Base e futuros centrados nos dois cenários hidrológicos indicam um aumento na vazão média da bacia do Alto Canoas ( $Q_{50}$ ), aumento nas vazões máximas e redução no valor das vazões mínimas. Estes resultados demonstram que medidas estratégicas devem ser planejadas por tomadores de decisão para minimizar os efeitos de possíveis eventos extremos de escassez hídrica e/ou inundações até o final do século XXI.

#### 4.4.2.3 Análise das diferenças entre o Período Base e os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5

As diferenças nas vazões podem ser melhor visualizadas na análise das vazões de referência, a vazão de referência  $Q_5$  ilustrada no Gráfico 15-a, mostra a evolução da vazão ao longo dos futuros centrados em relação a  $Q_5$  média do Período Base. Sob o RCP 8.5, observam-se valores de  $Q_5$  abaixo da média histórica até o futuro 2070, de onde sofre um incremento superando a média do Período Base em 2090. No RCP 4.5, a  $Q_5$  parte de um valor abaixo da média em 2030, atinge seu pico de magnitude em 2050, reduz em 2070 e normaliza até o futuro centrado em 2090. Para a vazão mínima  $Q_{10}$  (Gráfico 15-b), nota-se menor variação da vazão ao longo dos períodos sob o RCP 4.5 e um pico antecipado de  $Q_{10}$  em 2050, que tende a se manter até 2070 e novo pico em 2090, porém de magnitude menor que a projetada para a  $Q_5$  neste mesmo cenário.

Gráfico 15 - Evolução da vazão de referência  $Q_5$  (a) e  $Q_{10}$  (b) nos RCP 4.5 e RCP 8.5 em comparação com a  $Q_5$  e  $Q_{10}$  média do Período Base.

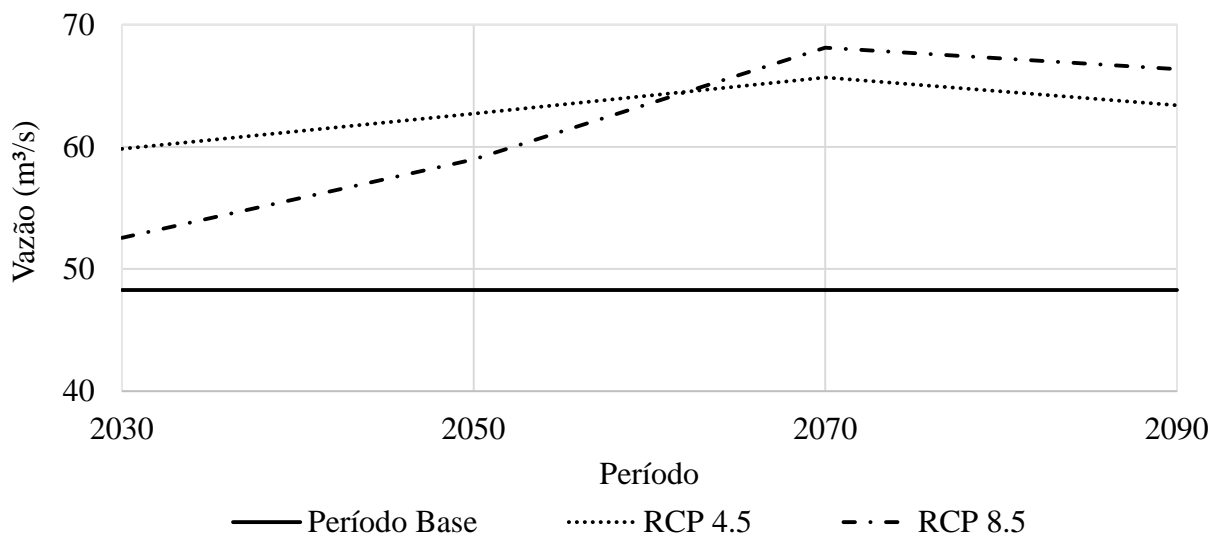


Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Por fim, conclui-se que as vazões de referência  $Q_5$  e  $Q_{10}$ , que representam as vazões máximas, se manterão na média observada no Período Base para o RCP 4.5 e sofrerão aumentos no RCP 8.5, principalmente no futuro centrado em 2090.

A evolução da  $Q_{50}$  ao longo dos futuros centrados indica um aumento das vazões até 2070 e posterior redução em 2090 sob os dois cenários hidrológicos em análise, se mantendo sempre acima da média observada no Período Base (Gráfico 16).

Gráfico 16 - Evolução da vazão de referência  $Q_{50}$  nos RCP 4.5 e RCP 8.5 em comparação com a  $Q_{50}$  média no Período Base.

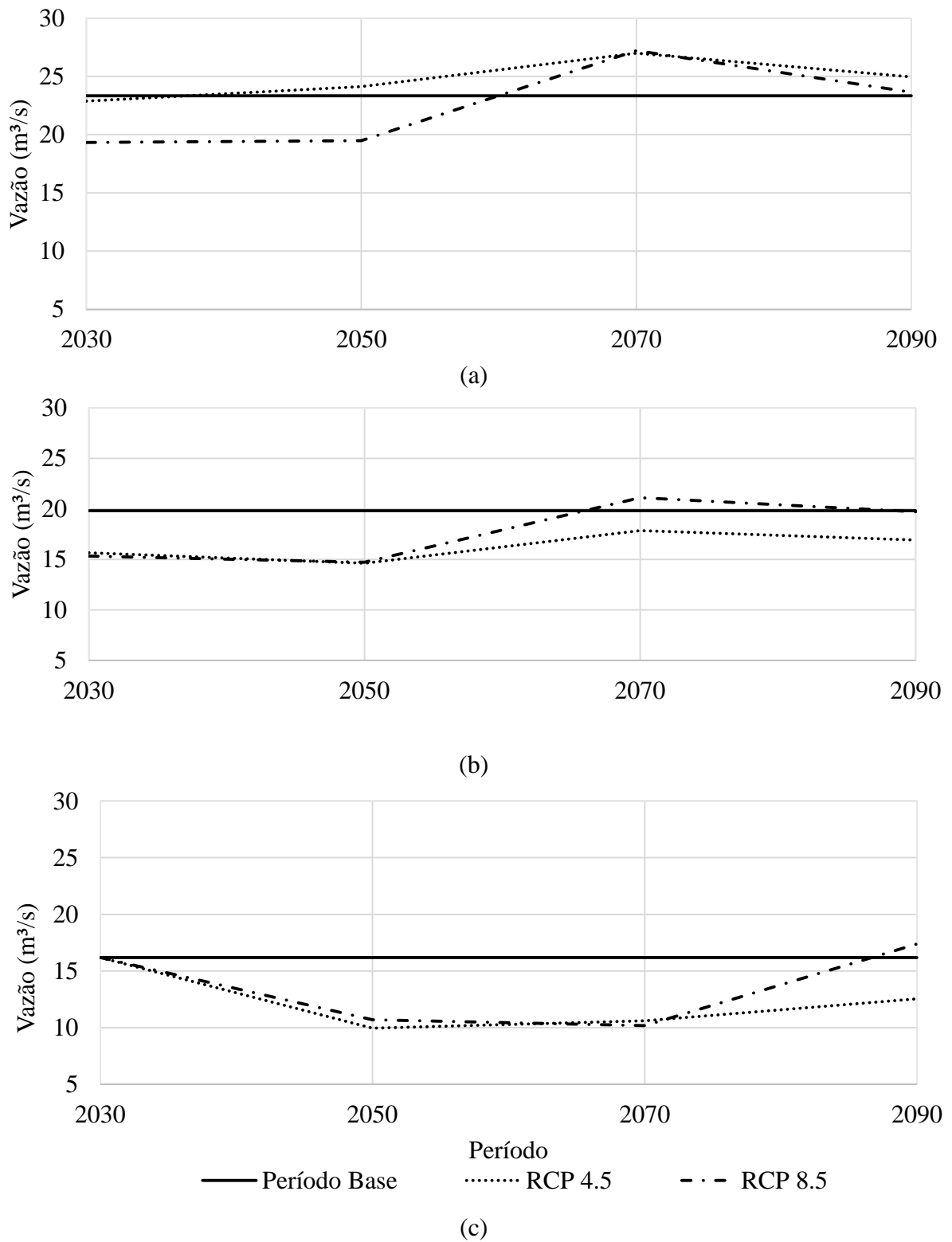


Fonte: Elaborado pela autora, 2017

Essa anomalia positiva nas vazões médias ( $Q_{50}$ ), aponta para aumento nas vazões com permanência em 50% do tempo para a bacia do Alto Canoas, o que pode contribuir para aumento na disponibilidade de água.

Quanto às vazões mínimas ( $Q_{90}$ ,  $Q_{95}$  e  $Q_{98}$ ), o Gráfico 17 mostra que as vazões  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  se manterão abaixo do Período Base até 2050 no RCP 8.5 e pode haver redução nas vazões  $Q_{98}$  até 2070, com posterior incremento até aproximar-se da média do Período Base no final do século XXI. No RCP 4.5, apenas a vazão de referência  $Q_{90}$  não será reduzida nos diferentes períodos, com um pico de aumento em 2070 e posterior aproximação da vazão média do Período Base. Quanto às  $Q_{95}$  e  $Q_{98}$ , as vazões se manterão abaixo do Período Base ao longo dos períodos avaliados, indicando que poderão haver impactos na disponibilidade hídrica da bacia do Alto Canoas, em períodos de estiagem dependendo da demanda por água no futuro.

Gráfico 17 - Evolução da vazão de referência  $Q_{90}$  (a),  $Q_{95}$  (b) e  $Q_{98}$  (c) nos RCP 4.5 e RCP 8.5 em comparação com  $Q_{90}$ ,  $Q_{95}$  e  $Q_{98}$  média no Período Base.



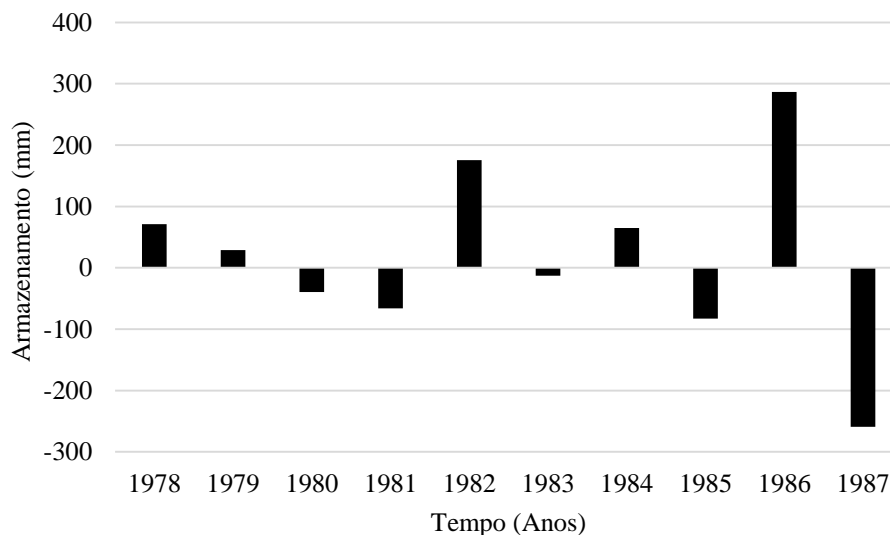
Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

#### 6.4.2.4 Balanço Hídrico

O Balanço Hídrico da bacia do Alto Canoas no Período Base mostra que os meses mais chuvosos se concentram no início do inverno, com o maior pico em junho e no verão, com o mês de janeiro sendo o mais chuvoso. Enquanto a maior evapotranspiração ocorre no verão, o que faz com que os meses de inverno apresentem também as maiores vazões e permitam o armazenamento de água pela bacia hidrográfica.

O balanço hídrico anual da bacia no Período Base (Apêndice C) indica déficit hídrico em todos os anos, e o saldo de armazenamento anual (Gráfico 18) mostra que há uma alternância entre anos com e sem armazenamento de água na bacia, o que está de acordo com os períodos secos e úmidos abrangidos no Período Base.

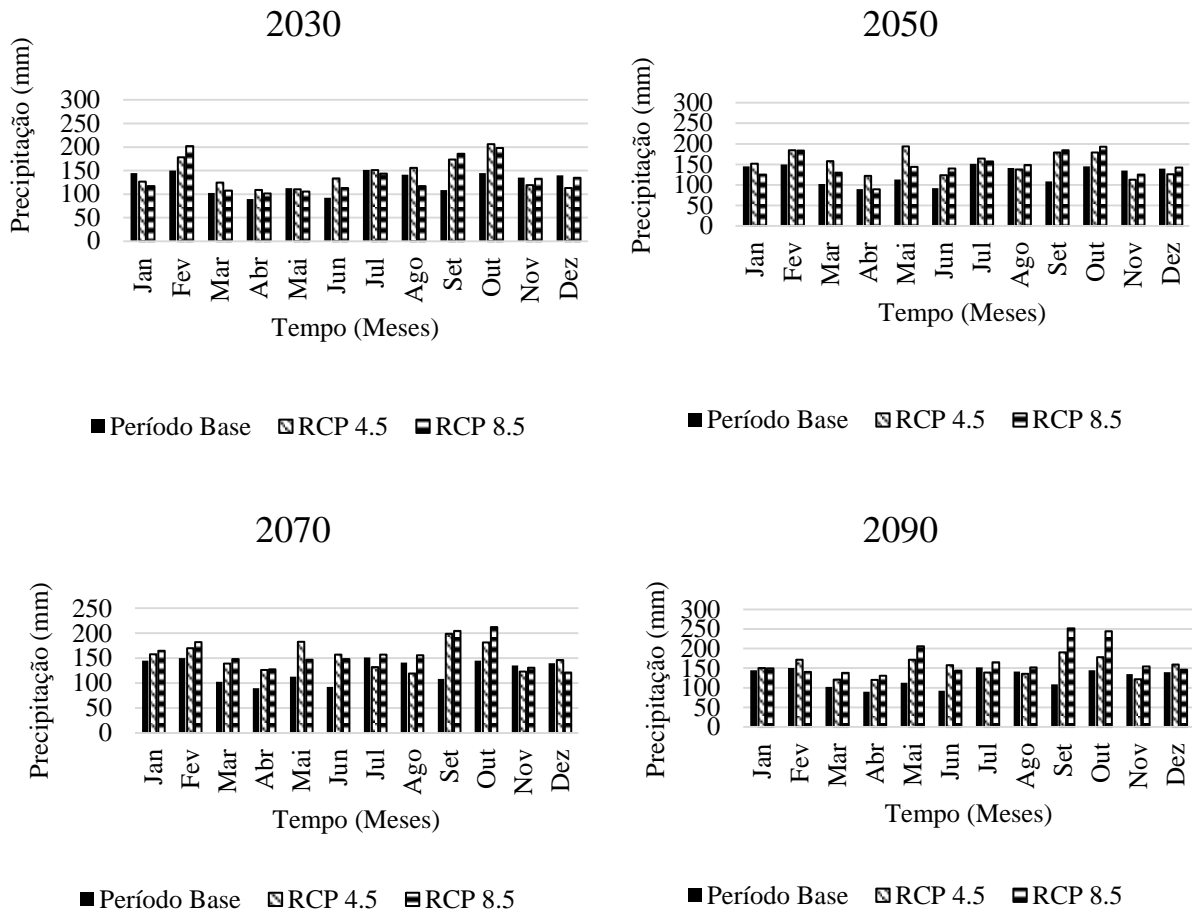
Gráfico 18 - Armazenamento de água (mm) no Período Base para a bacia do Alto Canoas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Nos períodos futuros, a precipitação nos RCP 4.5 e RCP 8.5 mostram aumento em comparação com o Período Base nas precipitações médias mensais de fevereiro, setembro e outubro em 2030. No futuro centrado em 2050, observam-se valores superiores à média observada em fevereiro, março, setembro e outubro. No futuro centrado em 2070, observa-se aumento em setembro e outubro e em 2090, os aumentos serão em maio, setembro e outubro (Gráfico 19).

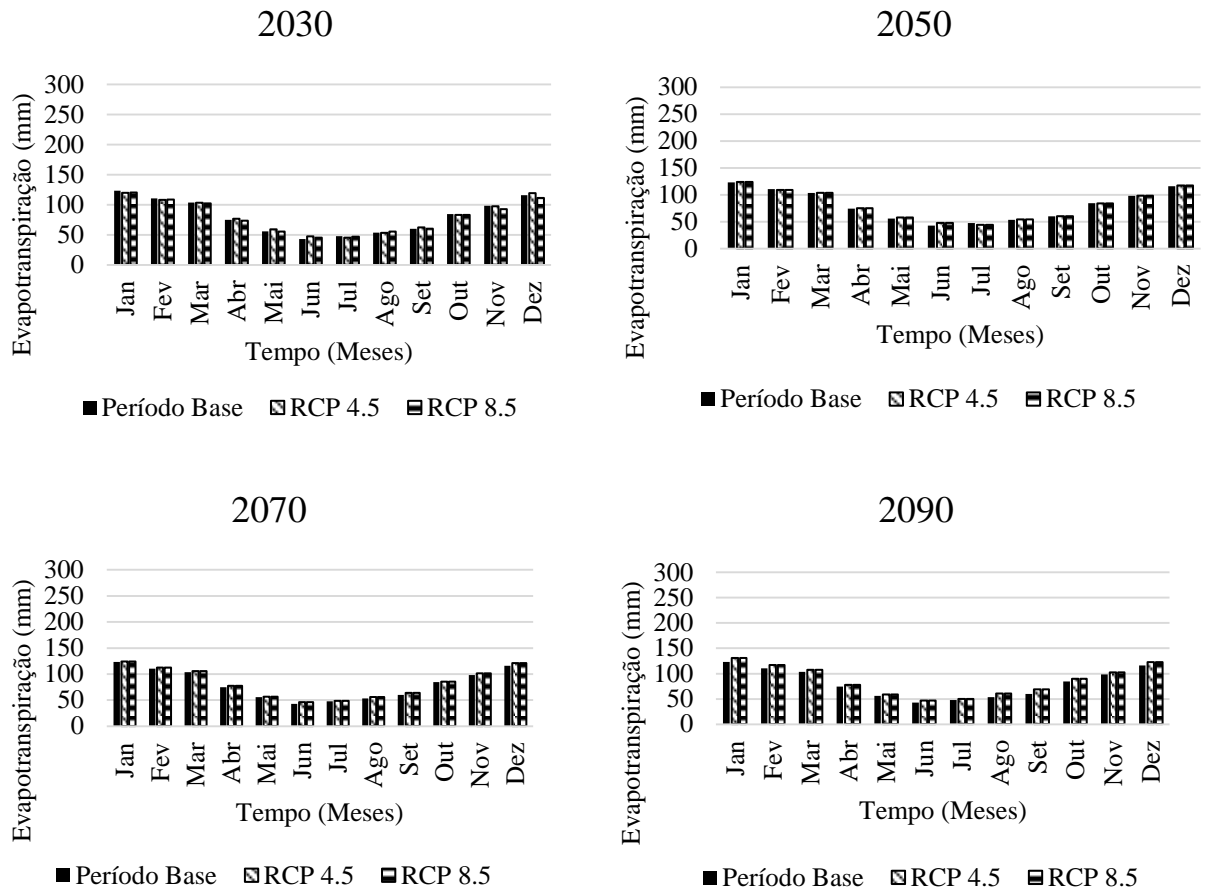
Gráfico 19 - Precipitação média mensal nos diferentes cenários e futuros centrados.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Os valores de evapotranspiração observada no Período Base e nos cenários hidrológicos projetados não apresentam diferenças (Gráfico 20), o que implica que os impactos observados na vazão da bacia do Alto Canoas podem ser melhor associados ao aumento na variável precipitação decorrente das mudanças climáticas que na temperatura que influencia na evapotranspiração. No entanto, é importante lembrar que as mudanças nos padrões de precipitação também podem ser decorrentes do aumento da temperatura, com o aumento das chuvas convectivas.

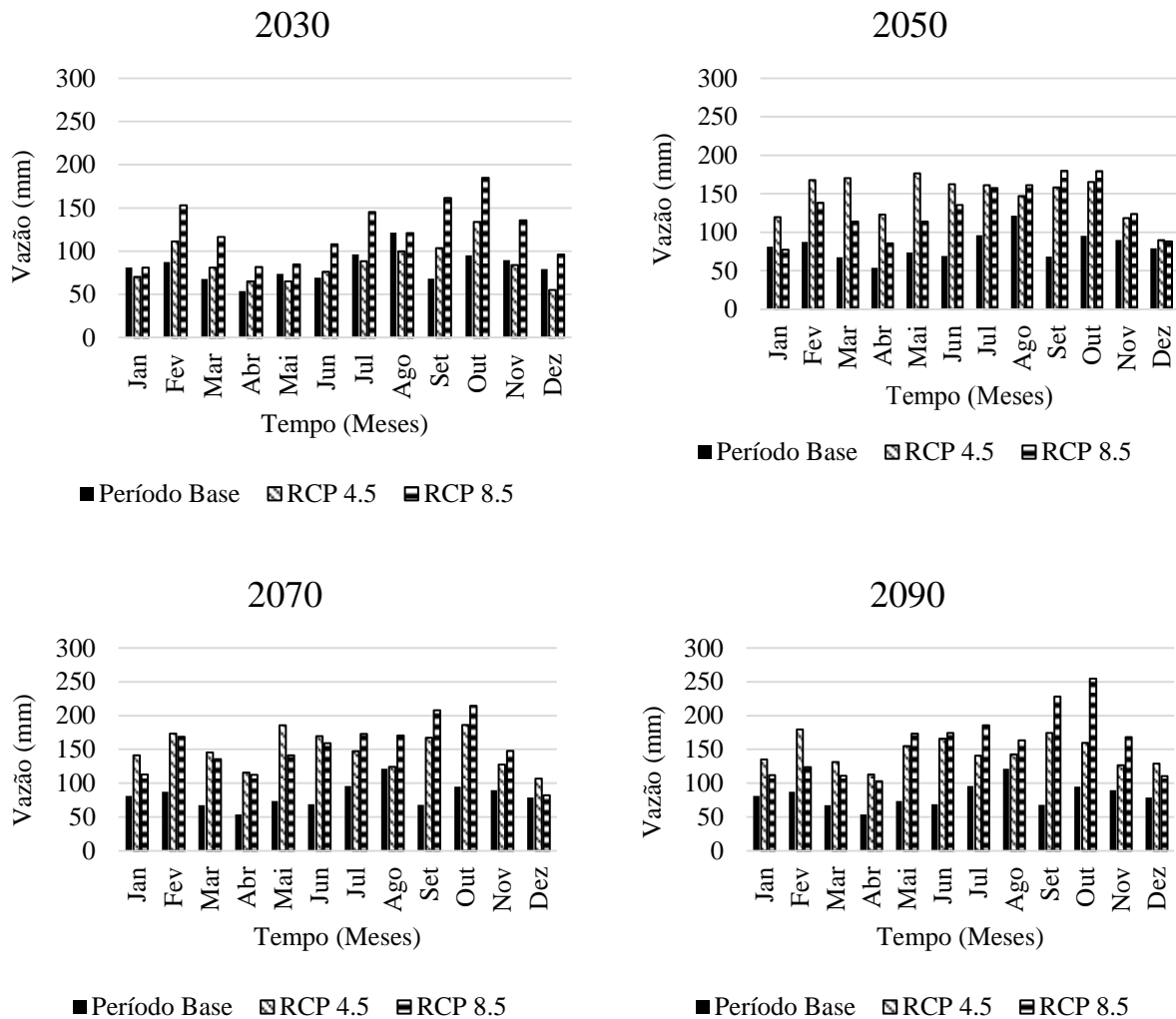
Gráfico 20 - Evapotranspiração média mensal nos diferentes cenários e futuros centrados.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Observa-se um impacto dos cenários de projeção de mudanças climáticas na variável vazão (Gráfico 21), que tende a aumentar em determinados meses e futuros centrados, com um aumento considerável principalmente no RCP 8.5. Este aumento na vazão pode ser relacionado com o aumento da precipitação nos dois cenários climáticos.

Gráfico 21 – Média mensal da vazão nos futuros centrados em 2030, 2050, 2070 e 2090 sob os RCP 4.5 e RCP 8.5.



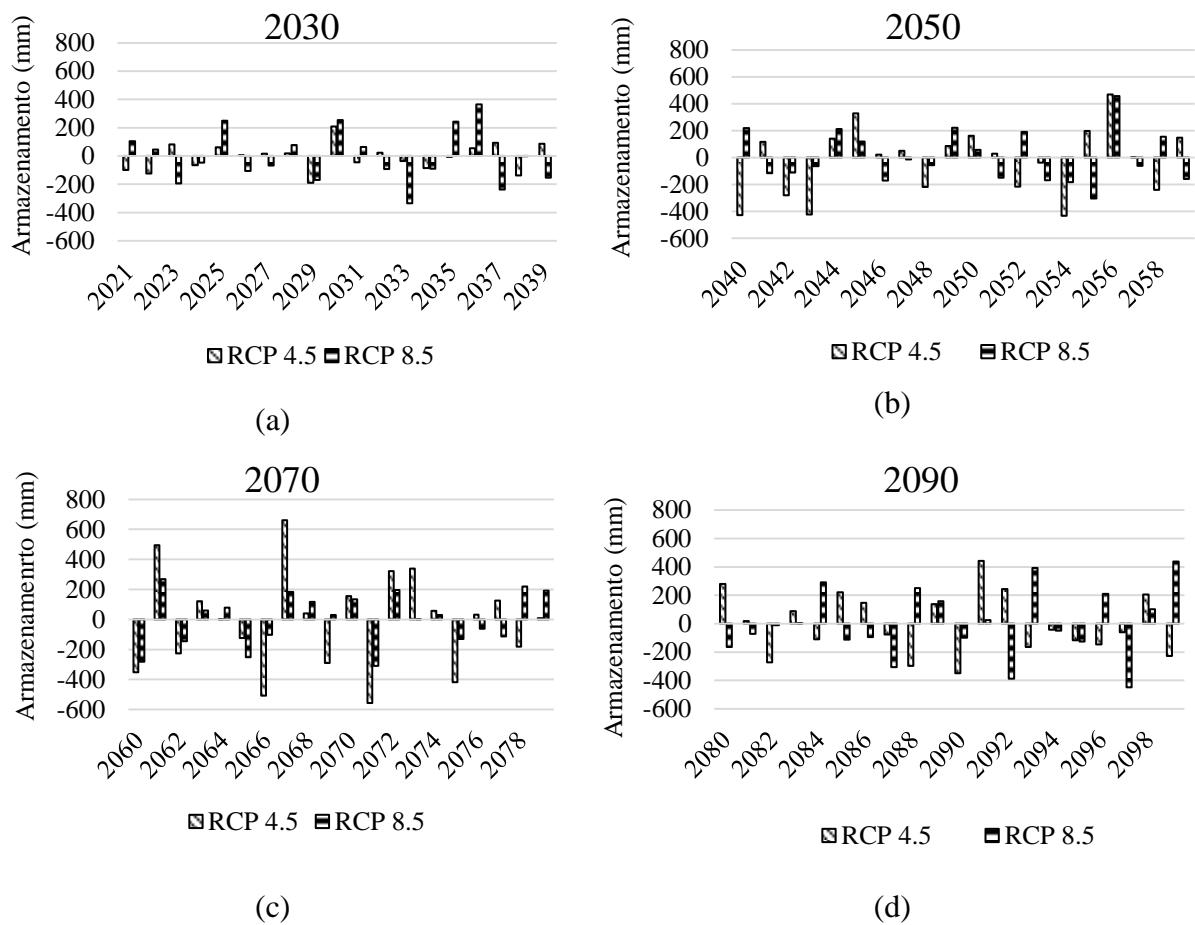
Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

O aumento da vazão verificado para o futuro nos dois cenários hidrológicos pode vir a ser um problema quando associado às mudanças no padrão de uso e ocupação da terra, como por exemplo com o aumento de áreas urbanizadas, que poderão elevar o valor de CN, e consequentemente, aumentar ainda mais a intensidade desse processo hidrológico. É interessante ressaltar que se as vazões projetadas estivessem na escala diária seria possível realizar a separação da vazão total em vazão superficial e vazão de base, por meio de filtros de separação, contribuindo para um melhor entendimento dos impactos das alterações nas taxas de recarga subterrânea e disponibilidade hídrica.

O balanço hídrico anual por período é apresentado nos apêndices C – F deste trabalho, e os armazenamentos de água anual por períodos são apresentados no Gráfico 22, indicando

que o armazenamento de água na bacia será variado ao longo dos anos, não apresentando uma tendência exclusivamente positiva ou negativa. O mesmo padrão foi verificado no armazenamento de água no Período Base, com presença de abastecimento em anos úmidos e com baixa taxa de EVT, e saída de água em períodos secos e com alta taxa de EVT.

Gráfico 22 - Armazenamento de água (mm) nos futuros centrados em 2030 (a), 2050 (b), 2070 (c) e 2090 (d) para o RCP 4.5 e RCP 8.5.



Observa-se que a partir do futuro centrado em 2050, os armazenamentos pela bacia assim como as saídas serão de maior magnitude, com um pico de armazenamento de água em 2070 que pode atingir 660 mm sob o RCP 4.5. Enquanto no futuro centrado em 2090, o armazenamento tende a se aproximar novamente dos valores encontrados para o início do século e espera-se maior frequência de saídas de água da bacia do que armazenamento, para os dois cenários hidrológicos.

Essa análise permite concluir que embora a vazão apresente uma tendência de aumento no futuro em meses específicos, essa alteração não reflete em aumento expressivo na disponibilidade hídrica da bacia e recarga do aquífero subterrâneo. Também, pode-se inferir a

partir da análise do Gráfico 22, que os anos em que há maior saldo positivo de água na bacia, são aqueles em que pode haver maior recarga, e portanto, maior armazenamento de água, no entanto não é possível estimar a taxa de recarga, uma vez que parte dessa água pode permanecer no solo e/ou contribuir para a evaporação.

## **7 RECOMENDAÇÕES PARA A GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA DO ALTO CANOAS**

Diante dos impactos das mudanças climáticas projetados para a bacia do Alto Canoas, são necessárias medidas e estratégias de gestão dos recursos hídricos adequadas para o enfrentamento de riscos no futuro. É essencial garantir que os instrumentos de gestão de recursos hídricos previstos na Lei das Águas (BRASIL, 1997) tenham sua aplicação efetiva e adaptada para a possibilidade das mudanças no clima, diante de áreas e atividades prioritárias.

### **7.1 Enquadramento dos recursos hídricos**

O enquadramento dos recursos hídricos é um instrumento de gestão importante para a gestão dos recursos hídricos frente às mudanças climáticas, uma vez que a qualidade da água também é fator limitante na disponibilidade de recursos hídricos e a gestão das águas deve ser integrada para que os impactos negativos sejam minimizados. Além disso, a mudança do clima pode ser um fator importante de alteração da qualidade da água por afetarem as vazões e alterarem a capacidade de assimilação de poluentes ou aumentarem a poluição difusa.

Embora, a avaliação da qualidade das águas da bacia do Alto Canoas não tenha sido o objetivo deste trabalho, recomenda-se o processo de enquadramento dos recursos hídricos da bacia do Alto Canoas, que deve ser realizado com base em um diagnóstico ambiental, social e econômico atual e futuro da bacia. A qualidade da água pode ser obtida a partir de monitoramento da qualidade das águas em pontos representativos da bacia a fim de determinar a qualidade da água e servir de subsídio ao gerenciamento e implantação dos outros instrumentos de gestão, como a outorga do direito de usos dos recursos hídricos e cobrança pelo uso da água.

Os resultados dos monitoramento da qualidade da água servirão como base para o enquadramento dos corpos d'água segundo a legislação. Após o enquadramento, serão determinados o uso atual e/ou pretendido do corpo d'água a fim de que medidas de recuperação sejam implementadas quando necessário.

### **7.2 Outorga de direito de uso dos recursos hídricos**

As vazões estabelecidas no ato da outorga deverão respeitar as condições hídricas da bacia do Alto Canoas em períodos de estiagem nos piores cenários hidrológicos observados

na avaliação dos impactos de mudanças climáticas nas vazões (prognóstico), a fim de que não haja prejuízo nos usos prioritários da água.

As vazões de outorga, definidas para o Estado de Santa Catarina, como 50% da vazão de referência  $Q_{98}$  (vazão igualada ou superada em 98% do tempo), deverão levar em conta que haverá uma redução dessas vazões em -38,50% no futuro centrado em 2030 (curto prazo) até -20,03 em 2090 (longo prazo). Logo, deve-se ponderar sobre a possibilidade de escolha de uma nova porcentagem destinada a outorga, alterando-se os critérios de outorga, visando garantir as condições mínimas de manutenção de ecossistemas aquáticos.

Contudo, como o prognóstico dos recursos hídricos da bacia do Alto Canoas indica aumento nas vazões médias ( $Q_{50}$ ) nos futuros centrados sob os dois cenários hidrológicos, RCP 4.5 e RCP 8.5, a bacia do Alto Canoas é uma alternativa viável para a implantação de empreendimentos hidrelétricos, na forma de Pequenas Centrais Hidrelétricas, uma vez respeitado as legislações ambientais vigentes e Áreas de Preservação Permanente. Para isso, os possíveis empreendimentos hidrelétricos a serem instalados na bacia do Alto Canoas devem atender dois critérios:

- a) A outorga preventiva e definitiva do direito de uso da água para fins de geração de energia elétrica devem ser condicionados ao atendimento de critérios ambientais, definidos por meio de estudos ambientais por sub-bacia, acompanhados e aprovados pelo Comitê de Bacia.
- b) A vazão outorgável aos empreendimentos hidrelétricos corresponde àquela que excede à soma da vazão outorgável com a vazão ecológica.

As outorgas de lançamento de efluentes para os empreendimentos deverão ser concedidas baseado em um estudo ambiental simplificado a ser apresentado ao Comitê, com termo de referência específico elaborado pelo outorgante para diferentes atividades potencialmente poluidoras, contendo, por exemplo, as características físico químicas do efluente a ser lançado, condições de qualidade do corpo hídrico, classe da água segundo uso preponderante, nível de tratamento do efluente etc.

Para efeito da formação de um banco de dados integrado, as entidades outorgantes delegatárias devem encaminhar à ANA relatórios semestrais das outorgas emitidas, contendo, no mínimo, as seguintes informações:

- I – identificação do outorgado;
- II – endereço do empreendimento;
- III – localização geográfica das intervenções outorgadas (coordenadas geográficas);
- IV – nome do corpo hídrico e da sub-bacia;
- V – finalidade do uso da água;

VI – vazões máxima e média de captação;

VII – regime de variação em termos de sazonalidade mensal, dias/mês e horas/dia, onde couber;

VIII – vazões máxima e média de lançamento, onde couber;

IX – cargas orgânicas em termos de kg de DBO/dia, nos lançamentos outorgados; e

X – informações referentes ao balanço hídrico quali-quantitativo, na forma dos percentuais comprometidos em cada trecho das bacias e respectivas sub-bacias.

Revisões e estudos devem ser realizados a cada seis meses para a outorga de uso dos recursos hídricos. As outorgas estão condicionadas às prioridades de uso estabelecidas no Plano de Recursos Hídricos da bacia, que deve ser setorizada por regiões uniformes, contemplando também as demandas hídricas, e evitando a geração de conflitos de uso.

### 7.3 Cobrança pelo uso de recursos hídricos

A implantação da cobrança pelo uso da água é um tema que pode ser considerado divergente entre a sociedade e os órgãos gestores, pela dificuldade de valoração da água, mas é fundamental para promover o uso racional da água e a conscientização de seu valor ambiental para o desenvolvimento humano e das atividades econômicas, principalmente na ocorrência de mudanças climáticas que podem afetar as vazões mínimas ( $Q_{98}$ ).

A aplicação da cobrança pelo uso também é importante para manter as ações desenvolvidas no âmbito da bacia hidrográfica na qual ocorre a cobrança, complementando outras fontes de financiamento (projetos aprovados em fundos diversos e repasses públicos).

As diretrizes para a implementação da cobrança devem contemplar os seguintes aspectos:

- a) Cobrança implantada progressivamente;
- b) O valor arrecadado da cobrança deve retornar para a bacia na forma de ações, como recuperação ambiental, educação ambiental, operação e manutenção de estações hidrológicas, pluviométricas e qualitativas da bacia, entre outros;
- c) Para ampliar o número de usuários regularizados, os alvarás municipais devem passar a exigir o protocolo de registro no cadastro de usuários.

O valor estipulado para a cobrança deverá ser condizente com os tipos de usuários inseridos na bacia e de acordo com a disponibilidade hídrica da água, sendo assim, pode ter diferentes valores nos futuros cenários estudados, começando com valores maiores em decorrência da maior redução da  $Q_{98}$  em 2030 e com tendência a reduzir em 2090, diante de

um cenário mais positivo. Também é importante incentivar a participação social por meio de reduções nos valores cobrados quando se atingirem metas específicas, como por exemplo, aumento da utilização de tecnologias sustentáveis pelos usuários da bacia.

#### 7.4 Sistema de informações sobre recursos hídricos da bacia do Alto Canoas

A implantação de um sistema de informações sobre recursos hídricos para a bacia do Alto Canoas pode servir como uma plataforma de organização de dados a respeito da bacia hidrográfica. Todas as informações coletadas em estações hidrológicas, pluviométricas e de qualidade, assim como cadastro de usuários e outorgas vigentes devem ser armazenadas por setores da bacia e interligadas com informações de uso e ocupação de solo. Estes dados fornecem suporte para a gestão ambiental, planejamento urbano e gestão de recursos hídricos. Posteriormente, estes dados coletados, tratados e armazenados podem ser enviados à ANA, que é a entidade federal responsável pela coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) e do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH).

#### 7.5 Agência de Águas

Para a implementação das ações previstas no plano de bacia, é necessária a criação de uma agência de águas que servirá como secretaria executiva do Comitê de Bacia, com a função de regulamentar a outorga de água, efetuar a cobrança pelo uso e destinar o valor arrecadado à respectivos usos dentro da bacia hidrográfica.

As principais competências da Agência de Água para o enfrentamento dos impactos das mudanças climáticas, devem incluir: manter balanço hídrico da bacia atualizado; manter o cadastro de usuários e efetuar, mediante delegação do outorgante, a cobrança pelo uso de recursos hídricos; analisar e emitir pareceres sobre os projetos e as obras a serem financiados com recursos gerados pela cobrança pelo uso dos recursos hídricos e encaminhá-los à instituição financeira responsável pela administração desses recursos; acompanhar a administração financeira dos recursos arrecadados com a cobrança pelo uso dos recursos hídricos em sua área de atuação; gerir o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos em sua área de atuação; celebrar convênios e contratar financiamentos e serviços para a execução de suas competências; promover os estudos necessários para a gestão de recursos hídricos em sua área de atuação; elaborar o Plano de Recursos Hídricos para apreciação do respectivo

Comitê de Bacia Hidrográfica; propor ao respectivo Comitê de Bacia Hidrográfica o enquadramento dos corpos de água nas classes de uso, os valores a serem cobrados pelo uso dos recursos hídricos, o plano de aplicação de recursos e o rateio de custos das obras de uso múltiplo; manter estudos contínuos de modelagem hidrológica dos impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos da bacia.

#### 7.6 Estratégias de adaptação às mudanças climáticas

Em face do prognóstico da situação futura da bacia do Alto Canoas frente à ocorrência de mudanças climáticas, é necessária também a proposição de estratégias que visem minimização e/ou adaptação às mudanças climáticas, em complementação da aplicação dos instrumentos de gestão.

O aumento das vazões máximas na bacia do Alto Canoas deve ser tratado como uma ação prioritária na gestão de recursos hídricos pelo seu potencial de afetar as comunidades no interior da bacia, a qualidade ambiental e a economia dos municípios. Para isso, pode ser implementado um programa de defesa contra eventos hidrológicos extremos.

A finalidade desta estratégia é determinar as prioridades na adoção de medidas preventivas e corretivas para se lidar com eventos hidrológicos extremos de inundações, como a implementação de ações estruturais e não estruturais na defesa contra as inundações, e manter o estudo de avaliação dos efeitos de cenários de projeção de mudanças climáticas nos recursos hídricos, acompanhando as atualizações dos cenários previstos pelo IPCC. Dentre os aspectos importantes a serem contemplados nesta estratégias estão:

- a) Desenvolver estudos de modelagem hidrológica do impacto das vazões extremas máximas e ocorrência de desastres ambientais, a partir de modelagem hidráulica, elaboração de mapas de inundação, entre outros;
- b) Implementação de ações estruturais na defesa contra as possíveis inundações que foram estudadas: Avaliar a viabilidade do uso de reservatórios para a minimização dos efeitos das enchentes, se houver; Avaliar a viabilidade do uso de soluções localizadas como diques, canalização e retificação de cursos d'água, pequenas barragens para controle de cheias e desassoreamento de cursos d'água; Realizar obras de desassoreamento, retificação e canalização de cursos d'água e estruturas para contenção de cheias definidas anteriormente; Implementar ações de Defesa Civil e ações Políticas; Fazer a recomposição da cobertura vegetal.

c) Implementação de ações não-estruturais na defesa contra as inundações: Orientar as comunidades de cabeceiras e com problemas com deslizamentos de encostas para criação de sistema de alerta próprio simplificado; Definir áreas inundáveis; Executar o zoneamento territorial; Divulgar informações para a população.

Quanto às projeções de redução nas vazões mínimas são necessárias estratégias de monitoramento da demanda e disponibilidade, com estudos completos de demandas tendenciais por setores homogêneos da bacia, a fim de prevenir possíveis conflitos no futuro, e dar diretrizes para o instrumento de outorga. Também é interessante a adoção de Sistemas de Suporte à Decisão, a partir da utilização de ferramentas analíticas capazes de quantificar relações de causa e efeito para orientar o processo decisório.

Também buscar estratégias que visem a implantação de tecnologias sustentáveis na bacia, que abranjam os setores industriais, agricultura e irrigação e cidadãos comuns, no sentido de adoção de programas de implantação de reservatórios de captação da água da chuva e sistemas de tratamento de águas residuárias.

É importante também que estratégias que envolvam educação ambiental e participação social sejam implementadas, pois consistem em medidas que a longo prazo, podem minimizar os impactos da mudanças climáticas. Essas estratégias sociais têm como prioridade realizar a educação ambiental voltada para crianças, jovens e adultos com foco na adaptação e minimização dos impactos das mudanças no clima. As ações devem estar embasadas nas diretrizes propostas pela Lei da Educação Ambiental nº 9.975/1999 (BRASIL, 1999), e devem permitir a abordagem dos temas: mudanças climáticas, impactos nos recursos hídricos, medidas e tecnologias sustentáveis, sustentabilidade e proteção e recuperação dos corpos hídricos e nascentes etc.

Também a participação social pode ocorrer por meio da implementação de programas do tipo pagamento por serviços ambientais, em que os usuários de água beneficiados recompensam financeiramente empreendimentos que melhoram a quantidade ou a qualidade da água.

## 8 CONCLUSÕES

As projeções hidrológicas a longo prazo (2020-2099) não indicam alteração das vazões médias mensais de longo período sob os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 em relação às vazões observadas no Período Base. No entanto, a análise tendencial das vazões apontou tendência positiva de aumento das vazões no meses de maio e dezembro em RCP 4.5 e aumento positivo nos meses de maio, junho, setembro e outubro em RCP 8.5.

As mudanças climáticas impactam em aumento nas vazões medianas ( $Q_{50}$ ) e na ocorrência de eventos extremos de máximas e redução nas vazões mínimas correspondentes a  $Q_{95}$  e  $Q_{98}$  nos dois cenários hidrológicos projetados.

A análise do balanço hídrico futuro indica que não há uma tendência exclusivamente positiva ou negativa no armazenamento de água da bacia, contudo observa-se que a partir do futuro centrado em 2050, o armazenamento de água pela bacia, assim como a saída será de maior magnitude, com um pico de armazenamento de água em 2070 que pode atingir 660 mm sob RCP 4.5. Enquanto no futuro centrado em 2090, o armazenamento tende a se aproximar novamente dos valores encontrados para o início do século e espera-se maior frequência de saídas de água da bacia do que armazenamento, para os dois cenários hidrológicos.

A análise do armazenamento de água na bacia permite concluir que embora a vazão apresente tendência de aumento no futuro em meses específicos, essa alteração não reflete em aumento expressivo na disponibilidade hídrica da bacia.

Estes resultados demonstram a necessidade de implementação de medidas estratégicas de minimização e /ou adaptação às mudanças climáticas, que podem impactar a ocorrência de eventos extremos de escassez hídrica e/ou inundações até o final do século XXI. Entre os instrumentos de gestão e estratégias prioritários para o enfrentamento das mudanças climáticas, identifica-se a elaboração de uma plano de bacia que contemple diretrizes de outorga consistentes com a redução das vazões mínimas, implementação de cobrança pelo uso da água e estratégias de participação social na gestão dos recursos hídricos.



## REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K. et al. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. **Journal of Hydrology**, v. 524, p. 733-752, 2015.

ADAM, K. N.; COLLISCHONN, W. Análise dos impactos de mudanças climáticas nos regimes de precipitação e vazão na bacia hidrográfica do rio Ibicuí. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 69-79, 2013.

ADAM, K. N. et al. Mudanças climáticas e vazões extremas na bacia do Rio Paraná. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 999-1007, 2015.

AMIM, M. Z. M. et al. Future climate change impact assessment of watershed scale hydrologic processes in Peninsular Malaysia by a regional climate model coupled with a physically-based hydrology model. **Science of the Total Environment**, v. 575, p. 12-22, 2017.

ANTUNES, T. A. **Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Alto Canoas**. 130 p. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Lages, 2015.

ARNOLD, J. G. et al. **Soil & Water Assessment Tool: Input/output documentation version 2012**. Texas Water Resources Institute, TR-439, 2013. 662 p.

ARNOLD, J. G. et al. SWAT: Model use, calibration and validation. **Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 55, n. 4, p. 1491-1508, 2012.

ARROIO JÚNIOR, P. P.; MAUAD, F. F. Simulação dos impactos das mudanças climáticas na vazão da bacia do Ribeirão do Feijão – SP. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 3, p. 741 – 751, 2015.

BACK, A. J. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. **Revista de Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 5, p. 717-726, 2001.

BARDÓSSY, A.; PEGRAM, G. Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology. **Water Resources Research**, v. 47, W04505, 2011.

BATISTA, J. L. O.; SANTOS, R. L. Análise da dinâmica do uso e ocupação da terra em pequenos municípios baianos do semi-árido brasileiro: o caso de Teofilândia. **Revista de Geografia Norte Grande**, v. 49, p. 139-155, 2011.

BLAINSKI et al. Simulação de cenários de mudanças climáticas e impactos na bacia hidrográfica do rio Camboriú – SC. **Anais do XXI Simpósio de Recursos Hídricos**. In: XXI Simpósio de Recursos Hídricos. Brasília-DF, 2015.

BRASIL. Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 05 out. 1988.

BRASIL. Lei Federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997. Política Nacional de Recursos Hídricos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 08 jan. 1997.

BRASIL. Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999. Dispões sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação ambiental e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 27 abr. 1999.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 17 mar. 2005.

BRASIL. Resolução nº 91 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, de 5 de novembro de 2008. Dispõe sobre procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 05 nov. 2008.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Planos de recursos hídricos e enquadramento dos corpos de água**. Brasília: ANA, 2013. 329 p.

BRASIL. Secretaria de Assuntos Estratégicos. **Brasil 2040: cenários e alternativas de adaptação à mudança do clima**. MARTINS, E. S.; SOUZA FILHO, F.A. (coord) - Fundação Cearense de Pesquisa e Cultura – FCPC. 2015.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima**. Brasília: MMA, 2016. 329 p.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Instrumentos de planejamento e manejo de bacia hidrográfica**: Unidade 2. In: Planejamento, manejo e gestão de bacias. Brasília: ANA, sem ano. 96 p.

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. 53–64, 2016.

CASTRO, F. V. F.; ALVARENGA, L. J.; MAGALHÃES JÚNIO, A. P. A Política Nacional de Recursos Hídricos e a gestão de conflitos em uma nova territorialidade. **Geografias**, v. 1, n. 1, p. 37-50, 2005.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Drenagem urbana – Manual de projeto**. 3ª ed. São Paulo: CETESB, 1986. 464p.

CHIEN, H.; YEH, P. J. F.; KNOUFT, J. H. Modeling the potential impacts of climate change on streamflow in agricultural watersheds of the Midwestern United States. **Journal of Hydrology**, v. 491, n. 1, p. 73–88, 2013.

CHILKOTI, V.; BOLISSETTI, T.; BALACHANDAR, R. Climate change impact assessment on hydropower generation using multi-model climate ensemble. **Renewable Energy**, v. 109, p. 510-517, 2017.

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.

COELHO, V. H. R. et al. Dinâmica do uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica do semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 64–72, 2014.

CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. Estimativa da disponibilidade hídrica através da curva de permanência. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13 n. 1, p. 111-124, 2008.

CURTARELLI, M. P.; SILVA, D. J.; FERREIRA, C. M. Estudo do balanço hídrico na bacia do Rio Canoas em Urubici, SC, Brasil: subsídio à proteção da zona de recarga direta do Sistema Aquífero Guarani. **Revista Ambiente & Água**, v. 5, n. 3, p. 108-121, 2010.

DA SILVA, P. G. **Simulação do fluxo hídrico e da produção de sedimento da bacia do rio Araranguá, SC, a partir da aplicação do modelo hidrológico SWAT**. 2011. 76 p. Monografia (Bacharel em Oceanografia) – Universidade do Vale do Itajaí. Itajaí, 2011.

DAWADI, S.; AHMAD, S. Changing climatic conditions in the Colorado River Basin: Implications for water resources management. **Journal of Hydrology**, v. 430-431, p. 127–141, 2012.

DEBASTIANI, A. B.; SILVA, R. D.; NETO, S. L. R. Eficácia da arquitetura MLP em modo closed-loop para simulação de um sistema hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 4, p. 821-831, 2016.

DEVKOTA, L. P.; GYAWALI, D. R. Impacts of climate change on hydrological regime and water resources management of the Koshi River Basin, Nepal. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, p. 502–515, 2015.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Mapa levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de Santa Catarina**. Escala: 1:250.000. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004.

FERREIRA, D. H. L.; PENEREIRO, J. C.; FONTOLAN, M. R. Análises estatísticas de tendências das séries hidro-climáticas e de ações antrópicas ao longo das sub-bacias do rio Tietê. **Holos**, ano 31, v. 2, 2015.

FOX, J. **Applied regression analysis and generalized linear models**. 2ª ed. Sage, 2008.

GONÇALVES, M. L et al. **Elaboração do plano diretor dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Cubatão do Norte**. Joinville: UNIVILLE, 2007. Disponível em: <[http://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib\\_top/DHRI/Planos%20de%20Bacias/Plano%20da%20Bacia%20Hidrografica%20do%20Rio%20Cubatao%20Norte/plano-da-bacia-hidrografica-do-rio-cubatao-norte.pdf](http://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/DHRI/Planos%20de%20Bacias/Plano%20da%20Bacia%20Hidrografica%20do%20Rio%20Cubatao%20Norte/plano-da-bacia-hidrografica-do-rio-cubatao-norte.pdf)>. Acesso em 08 jun. 2016.

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

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

HIRSCH, R., SLACK, J; SMITH, R. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. **Water Resources Research**, 18, p. 107-121, 1982.

HORIKOSHI, A. S. FISCH, G. Balanço hídrico atual e simulações para cenários climáticos futuros no município de Taubaté, SP, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v. 2, n.2, p. 33-46, 2007.

IPCC. **Summary for Policymakers: Emissions Scenarios**. A special report of working group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Group, p. 20, 2000.

IPCC. **Summary for policymakers**. In: PARRY, M. L. et al. (Ed.). *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability; contribution of the Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge (UK): Cambridge University Press, 2007. p. 7-22. Disponível em: <[https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4\\_wg2\\_full\\_report.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4_wg2_full_report.pdf)>. Acesso em: 04 de jul. 2017.

IPCC. **The physical science basis**. In: *Climate change 2013: Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva. 2013.

IPCC. **Synthesis Report**. In: *Climate Change 2014: 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. 2014.

ISLAM, S. A.; BARI, M. A.; ANWAR, A. H. M. F. Hydrologic impact of climate change on Murray-Hotham catchment of western Australia: A projection of rainfall-runoff for future water resources planning. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, n. 9, p. 3591–3614, 2014.

JHA, M. et al. Climate change sensitivity assessment on upper Mississippi river basin streamflows using SWAT. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 42, n. 4, p. 997-1016, aug. 2006.

JIN, X.; SRIDHAR, V. Impacts of climate change on hydrology and water resources in the Boise and Spokane river basins. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 48, n. 2, p. 197–220, 2012.

KAMAL, R.; MATIN, M. A.; NASREEN, S. Response of River Flow Regime to Various Climate Change Scenarios in Ganges-Brahmaputra- Meghna Basin. **Journal of Water Resources and Ocean Science**, v. 2, n. 2, p. 15, 2013.

KHALID, K. Sensitivity analysis in watershed model using SUFI-2 algorithm. **Procedia Engineering**, v. 162, p. 441 – 447, 2016.

KOCH, M.; CHERIE, N. Modeling of the impact of future climate change on the hydrology and the water resources in the Upper Blue Nile River basin, Ethiopia. In: 6<sup>th</sup> International Conference on Water Resources and Environment Research. **Anais...** p. 488–523, 2013.

KOIRALA, S. R.; GENTRY, R.W. SWAT and wavelet analysis for understanding the climate change impact on hydrologic response. **Open Journal of Modern Hydrology**, v. 2, p. 41 – 48, 2012.

KOUA, T. J. et al. Potential climate change impacts on water resources in the Buyo Lake Basin ( Southwest of Ivory Coast ). **International Journal of Innovation and Applied Studies**, v. 8, n. 3, p. 1094–1111, 2014.

LEGATES, D. R.; MCCABE JR, G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, v. 35, n. 1, p. 233–241, 1999.

LI, F.; ZHANG, G.; XU, Y. Assessing climate change impacts on water resources in the Songhua River Basin. **Water**, v. 8, n. 10, p. 420, 2016.

LUBINI, A.; ADAMOWSKI, J. Assessing the potential impacts of four climate change scenarios on the discharge of the Simiyu river, Tanzania using the SWAT model. **International Journal of Water Sciences**, v. 2, n. 1, 2013.

LUDWIG, F.; SLOBBE, E. van; COFINO, W. Climate change adaptation and Integrated Water Resource Management in the water sector. **Journal of Hydrology**, n. 518, p. 235 – 242, 2014.

MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 83-96, 2008

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

MASOOD, M. et al. Model study of the impacts of future climate change on the hydrology of Ganges-Brahmaputra-Meghna basin. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 2, p. 747–770, 2015.

MASOOD, M.; TAKEUSHI, K. Climate changes impacts and implications on future water resources management in the Meghna basin. **Futures**, v. 78 – 79, p. 1 – 18, 2016.

MASSAGNAM et al. Impactos das mudanças climáticas na evatranspiração de referência em Santa Catarina. In: XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. **Anais...** Guarapari – ES, 2011.

MELLO, E. L et al. Efeito das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do rio Paracatu. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 4, p. 635-644, 2008.

MILLY, P. C. D.; DUNNE, K. A.; VECCHIA, A.V. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. **Nature**, v. 438, 347-50, 2005.

MONTENEGRO, S.; RAGAB, R. Impact of possible climate and land use changes in the semi arid regions: a case study from north eastern Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 434, p. 55-68, 2012.

MOREIRA, I. A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidrológica) – Universidade Federal do Paraná. UFPR: Curitiba, 2005.

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

MOSS, R. H. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v. 463, n. 7282, p. 747–756, 2010.

NARSIMLU, B.; GOSAIN, A. K.; CHAHAR, B. R. Assessment of future climate change impacts on water resources of Upper Sind river basin, India using SWAT model. **Water Resources Management**, v. 27, n. 10, p. 3647–3662, 2013.

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

OLIVEIRA, G. G. **Abordagem estocástica para análise da relação entre a disponibilidade hídrica e a demanda hídrica no futuro**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2014. 197 p. Porto Alegre, 2014.

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.

PERAZZOLI, M.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V. Efeitos de cenários de uso do solo sobre o regime hídrico e produção de sedimentos na bacia do ribeirão concórdia – SC. **Revista Árvore**, v. 37, n. 5, p. 859-869, 2013.

PIANI et al. Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. **Journal of Hydrology**, v. 395, p. 199-215, 2010.

PLOSZAI, R. **Análise de tendências no regime de chuvas em Curitiba usando cenários de modelos climáticos regionais**. 2014. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos e Ambiental – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

POOCH, U. W.; WALL, J. A. **Discrete event simulation: a practical approach**. Boca Raton, Florida, CRC Press. 1993.

ROCHA, V. M. et al. Avaliação do balanço de água na Amazônia simulado pelo modelo ETA-HADGEM2-ES no período de 1985 a 2005. **Revista de Geografia**, n. 3, p. 202–221, 2015.

ROYSTON, P. An extension of Shapiro and Wilk's W test for normality to large samples. **Applied Statistics**, 31, 115–124, 1982.

SAMPAIO, G.; DIAS, P. L. D. S. Evolução dos modelos climáticos e de previsão de tempo e clima. **Revista USP**, n. 103, p. 41, 2014.

SANTA CATARINA. **Plano de recursos hídricos da bacia do rio Araranguá**. Porto Alegre, jun. 2015. Disponível em: <  
[http://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib\\_top/DHRI/Planos%20de%20Bacias/Plano%20da%20Bacia%20Hidrografica%20do%20Rio%20Ararangua/Relatorio%20B%205%20-%20Compatibilizacao%20das%20demandas%20e%20disponibilidades%20hidricas.pdf](http://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/DHRI/Planos%20de%20Bacias/Plano%20da%20Bacia%20Hidrografica%20do%20Rio%20Ararangua/Relatorio%20B%205%20-%20Compatibilizacao%20das%20demandas%20e%20disponibilidades%20hidricas.pdf)>.  
Acesso em: 08 jun. 2016.

SANTA CATARINA. **Plano estratégico de gestão integrada da bacia hidrográfica do rio Jacutinga (SHPRH Jacutinga Ariranha)**. Florianópolis, set. 2009a. Disponível em: <  
[http://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib\\_top/DHRI/Planos%20de%20Bacias/Plano%20Estrategi](http://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/DHRI/Planos%20de%20Bacias/Plano%20Estrategi)

co%20da%20Bacia%20Hidrografica%20do%20Rio%20Chapeco/Produto%20Final/Etapa%20C/Relatorio-Plano-Estrategico-Bacia-Chapeco---Etapa-C.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2016.

SANTA CATARINA. **Plano estratégico de gestão integrada da bacia hidrográfica do rio Timbó: Etapa C - Relatório final.** Florianópolis, set. 2009b. Disponível em: <  
[http://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib\\_top/DHRI/Planos%20de%20Bacias/Plano%20da%20Bacia%20Hidrografica%20do%20Rio%20Timbo/Produto%20Final/Relatorio-Plano-Estrategico-Bacia-Timbo---Etapa-C.pdf](http://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/DHRI/Planos%20de%20Bacias/Plano%20da%20Bacia%20Hidrografica%20do%20Rio%20Timbo/Produto%20Final/Relatorio-Plano-Estrategico-Bacia-Timbo---Etapa-C.pdf)>. Acesso em 08 jun. 2016.

SANTA CATARINA. **Plano estratégico de gestão integrada da bacia hidrográfica do rio Chapecó: Etapa C - Relatório final.** Florianópolis, set. 2009c. Disponível em: <  
[http://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib\\_top/DHRI/Planos%20de%20Bacias/Plano%20Estrategico%20da%20Bacia%20Hidrografica%20do%20Rio%20Chapeco/Produto%20Final/Etapa%20C/Relatorio-Plano-Estrategico-Bacia-Chapeco---Etapa-C.pdf](http://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/DHRI/Planos%20de%20Bacias/Plano%20Estrategico%20da%20Bacia%20Hidrografica%20do%20Rio%20Chapeco/Produto%20Final/Etapa%20C/Relatorio-Plano-Estrategico-Bacia-Chapeco---Etapa-C.pdf)>. Acesso em 08 jun. 2016.

SANTA CATARINA. **Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Tubarão e Complexo Lagunar: Volume III – Atividade final.** Florianópolis, jun. 2002. Disponível em: <  
[http://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib\\_top/DHRI/Planos%20de%20Bacias/Plano%20de%20Bacia%20Hidrografica%20do%20Rio%20Tubarao%20e%20Complexo%20Lagunar/Volume%20III/volume3.pdf](http://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/DHRI/Planos%20de%20Bacias/Plano%20de%20Bacia%20Hidrografica%20do%20Rio%20Tubarao%20e%20Complexo%20Lagunar/Volume%20III/volume3.pdf)>. Acesso em 08 jun. 2016.

SANTA CATARINA. Portaria SDS nº 36, de 29 de julho de 2008. Critérios gerais de outorga. Estabelece os critérios de natureza técnica para outorga de direito de uso de recursos hídricos para captação de água superficial, em rios de domínio do Estado de Santa Catarina e dá outras providências (alterado pela Portaria SDS nº 051, de 02.10.2008, publicada no D.O. U., nº 18.462, de 07 de outubro de 2008).

SANTOS, T. S. et al. Incertezas das projeções de mudanças climáticas: análise preliminar. **Ciência e Natura**, v. 37, Ed. Especial SIC, p. 63-68, 2015.

SANTOS, A. M.; GALVINCIO, J. D.; MOURA, M. S. B. Mudanças climáticas e o escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio Goiana - Pernambuco – Brasil. **Investigaciones Geográficas**, n. 81, p. 51-65, 2013.

SANTOS, T. S. et al. Incertezas das projeções de mudanças climáticas: análise preliminar. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 37, Ed. Especial SIC, 2015, p. 63 – 68.

SUN, R. et al. SWAT-based streamflow estimation and its responses to climate change in the kadongjia river watershed, southern Tibet. **Journal of Hydrometeorology**, v. 14, oct, 2013.

TEJADAS et al. Projeções de vazão afluente à lagoa Mangueira com base em cenários de mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 3, p. 262-272, 2016.

TEUTSCHBEIN C.; SEIBERT J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: review and evaluation of different methods. **Journal of Hydrology**, 456–457, 12–29, 2012.

THEMEßL, M. J.; GOBIET, A.; LEUPRECHT, A. Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 10, p. 1530–1544, 2011.

UNIYAL, B.; JHA, M. K.; VERMA, A. K. Assessing climate change impact on water balance components of a river basin using SWAT model. **Water Resources Management**, v. 29, n. 13, p. 4767–4785, 2015.

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

WAGESHO, N.; JAIN, M. K.; GOEL, N. K. Effect of climate change on runoff generation: application to rift valley lakes basin of Ethiopia. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 18, p. 1048–1063, 2013.

YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Multi-objective global optimization for hydrologic models. **Journal of Hydrology**, v. 204, n. 1-4, p. 83–97, 1998.

ZAHABIYOUN, B. et al. Assessment of climate change impact on the Ghareou river basin using SWAT hydrological model. **Clean - Soil, Air, Water**, v. 41, n. 6, p. 601–609, 2013.

ZHANG, Y. et al. Impact of projected climate change on the hydrology in the headwaters of the Yellow River basin. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 20, p. 4379–4397, 2015.

## APÊNDICES

APÊNDICE A - Parâmetros referentes às classes de solo inseridas no banco de dados do modelo SWAT.

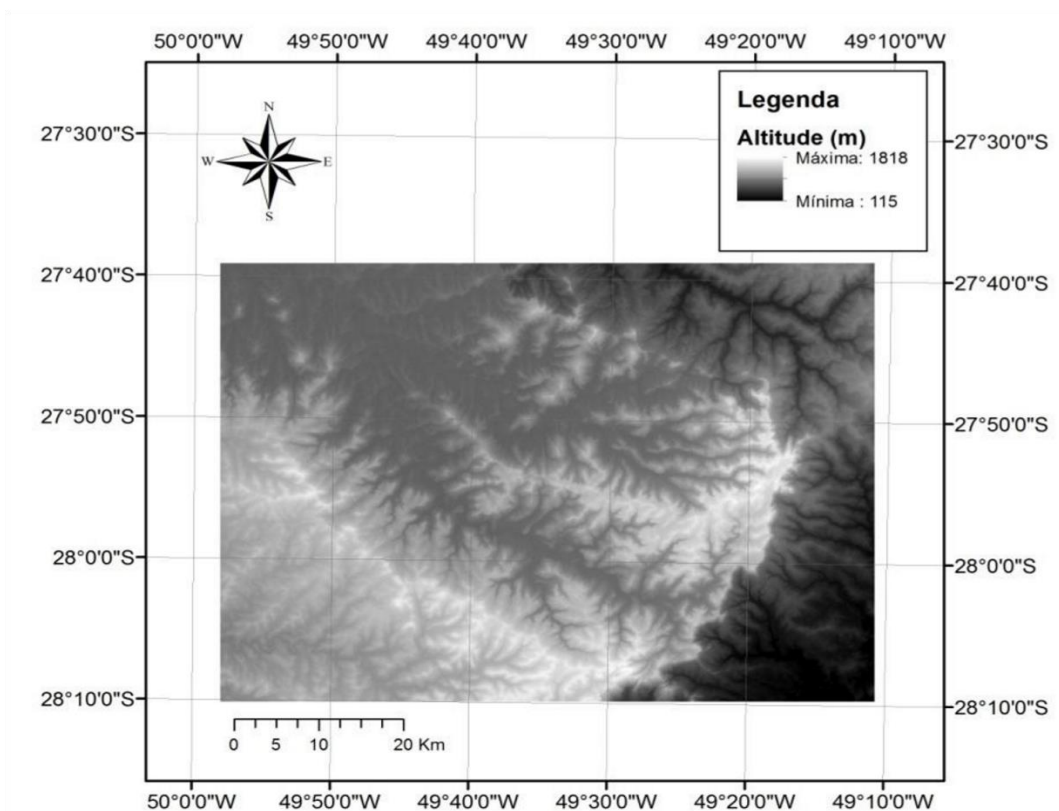
<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição do parâmetro</b>	<b>Neossolo Litólico</b>	<b>Cambissolo Húmico</b>
SNAM	Nome do solo.	NL	CH
HYDGRP	Grupo hidrológico do solo (A, B, C ou D).	B	C
SOL_ZMX	Profundidade máxima de enraizamento (mm).	1950	1500
ANION_EXC L	Fração de porosidade. Opcional	0,5	0,6
SOL_CRK	Volume de rachadura. Opcional.	0,5	0,5
TEXTURE	Textura do solo. Opcional.	-	-
SOL_Z	Profundidade do solo (mm).	220	1200
SOL_BD	Densidade aparente (úmida) (g cm <sup>3</sup> ).	1,15	1,4
SOL_AWC	Capacidade de água disponível da camada de solo (mmH <sub>2</sub> O mm <sup>-1</sup> solo).	0,175	0,05
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada (mm h <sup>-1</sup> ).	30	84,3
SOL_CBN	Carbono orgânico (% peso solo).	6,6	2,2
SOL_CLAY	A percentagem de partículas do solo que são < 0,002 mm de diâmetro.	54	36,4
SOL_SILT	Silte (% peso solo).	33	15,8
SOL_SAND	A percentagem de partículas que têm diâmetro entre 2,0 e 0,05 mm.	13	33,4
SOL_ROCK	A percentagem da amostra que tem um diâmetro de partícula > 2 milímetros.	0	14,4
SOL_ALB	Albedo.	0,15	0,2
USLE_K	Fator de erodibilidade.	0,29	0,0175
SOL_EC	Condutividade elétrica (dS m <sup>-1</sup> ). Opcional.	0	0

Fonte: Adaptado de Da Silva (2011) e Antunes (2015).

## APÊNDICE B - Etapas de execução do modelo ArcSWAT

Após a preparação dos dados espaciais e climáticos de entrada do modelo, é possível dar início a execução do modelo SWAT na interface ArcSWAT. Na ferramenta de delineamento de bacia hidrográfica, insere-se o arquivo com o Modelo Digital do Terreno (MDT) e define-se a sua referência espacial (SIRGAS 2000/UTM, zona 22S para a região de estudo). A partir do MDT são calculados pelo modelo as direções de fluxo, acumulação da água e definição dos canais e exutório. Cada exutório é criado de forma automática pelo sistema a partir da união de dois canais, independentemente da ordem desses. O parâmetro utilizado para a criação automática de um canal foi o número de células de 49457 ou área mínima de 4295,95 hectares.

Modelo Digital de Elevação da área de estudo

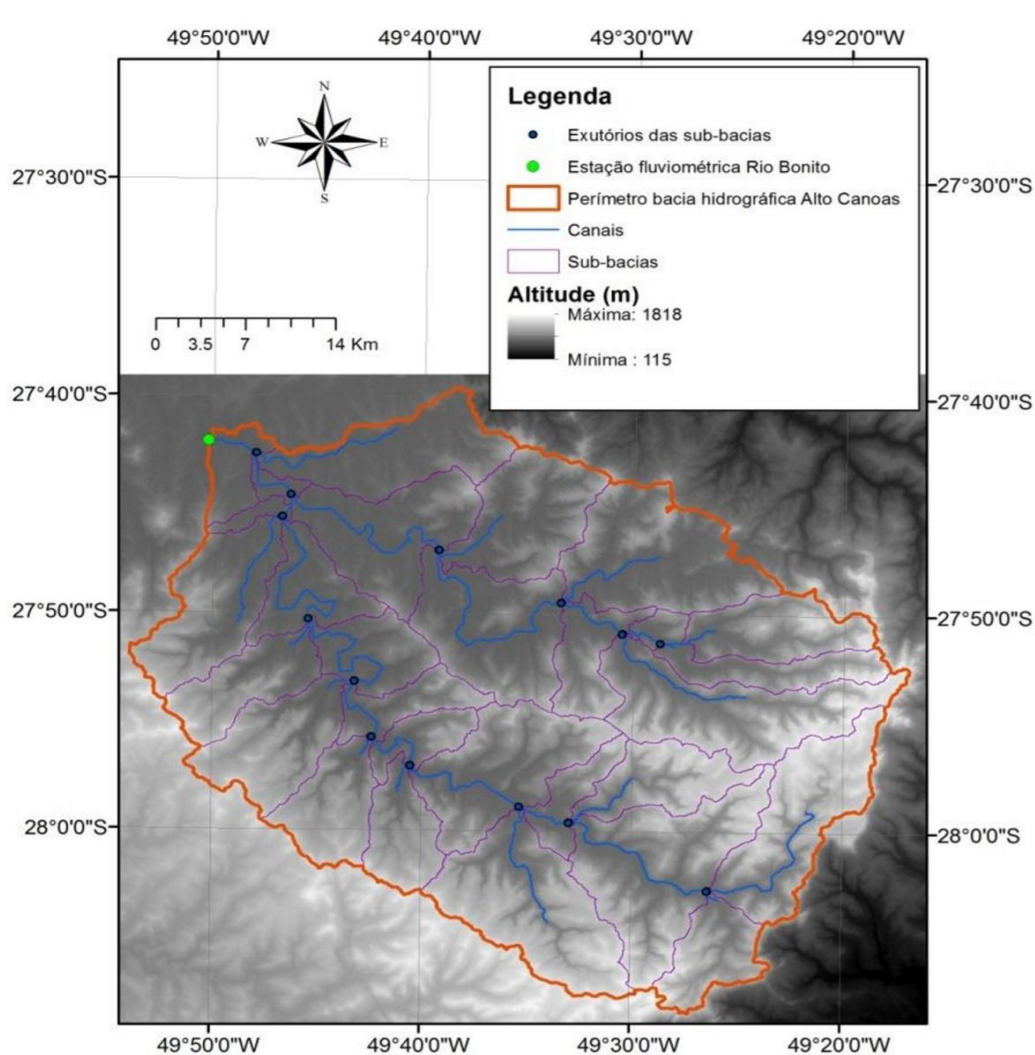


Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

A etapa seguinte consistiu na definição do exutório da bacia hidrográfica do Alto Canoas, no qual utilizou-se a localização geográfica da estação fluviométrica disponível na área (estação Rio Bonito) para a definição do perímetro da bacia.

Na sequência, procedeu-se o delineamento dos divisores de água da bacia (perímetro) e sub-bacias criadas a partir dos exutório, assim como a geração de canais pelo sistema, a partir do MDT. Com a primeira fase de execução do modelo concluída, calculou-se automaticamente os parâmetros referentes a altitude de cada ponto da bacia, a partir da resolução espacial do MDT.

Divisão da bacia hidrográfica do Alto Canoas em sub-bacias e seus exutórios, e os canais gerados pelo modelo SWAT



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

A etapa seguinte a definição da bacia hidrográfica se dá com a inserção dos dados espaciais referentes ao tipo de solo e uso da terra, também são definidas as classes de declividades da região, calculadas a partir do MDT fornecido anteriormente. As classes de uso da terra classificadas foram relacionadas com classes pré-definidas no banco de dados do SWAT conforme a tabela a seguir.

Redefinição das classes de uso da terra conforme as pré-definidas no modelo SWAT.

<b>Classe</b>	<b>Correspondência no SWAT</b>	<b>Área (%)</b>
Urbanizada	URBN - <i>Residential</i>	0,06
Silvicultura	PINE - <i>Pine</i>	2,73
Lavoura permanente	AGRC - <i>Agricultural</i>	4,23
Campestre	PAST - <i>Pasture</i>	25,89
Florestal	FRSE - <i>Forest Evergreen</i>	67,10

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Quanto aos tipos de solo encontrados na bacia do Alto Canoas, não há correspondência direta com solos americanos presentes no banco de dados do SWAT, o que faz com que seja necessário a inclusão de parâmetros físicos do solo para que o modelo entenda a quais classes os solos efetivamente pertencem. Os parâmetros de solo relativos ao Neossolo Litólico e Cambissolo Húmico foram obtidos dos trabalhos de Da Silva (2011) e Antunes (2015), respectivamente e incluídos manualmente no banco de dados do SWAT (Apêndice A).

A distribuição de classes de declividade da bacia a partir do MDT foi de 0-8, 8-15, 15-25 e maior que 25°. Após a entrada dos dados de uso da terra, tipo de solo e declividade, o modelo gerou 308 URH, considerando uma porcentagem mínima de área de 10% de uso da terra, tipo de solo e declividade para a criação de cada URH.

Os dados climáticos foram inseridos no modelo a partir de arquivos texto que continham a série histórica diária de precipitação (mm), umidade relativa (%), velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) e radiação solar ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ). O modelo foi executado primeiramente com séries históricas observadas que abrangessem o período de execução (aquecimento, calibração e validação), de 01 de janeiro de 1977 a 31 de dezembro de 2002, e posteriormente, foi executado com as séries de projeção climática dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, no período entre 01 de janeiro de 2011 a 31 de dezembro de 2099. Os dias em que haviam falhas nos dados observados foram substituídos pelo valor -99 para que o programa executasse a simulação do dado faltante por meio do WGEN.

O SWAT permite que dados de mais de uma estação sejam utilizados na modelagem. Para isso, os atributos espaciais de latitude, longitude e altitude destas estações são inseridos em arquivo texto auxiliar para que no momento da modelagem a estação mais próxima do centróide da URH seja selecionada para a simulação.

Após a entrada de todos os dados, o SWAT reescreveu as tabelas de entrada com as informações adicionadas pelo usuário e o modelo ficou disponível para ser executado na escala mensal.

Após a execução do modelo hidrológico nos períodos de calibração e validação e nos períodos futuros, foi possível comparar os balanços hídricos anuais calculados pelo SWAT a partir de equações empíricas para os diferentes cenários. Uma extensa revisão das equações utilizadas nos cálculos e estimativas realizadas pelo SWAT foi realizada por Antunes (2015).

Este balanço hídrico anual da bacia é uma ferramenta que auxilia na indicação de erros grosseiros que podem ter ocorrido na etapa de modelagem e que devem ser reavaliadas, além de indicar a necessidade da calibração do modelo.

## APÊNDICE C - Balanço Hídrico anual do Período Base.

Ano	Período Base			
	PREC	Q	EVT	BH
	(mm)			
1977	1514,69	1063,92	1026,79	-576,02
1978	957,29	504,29	957,92	-504,91
1979	1178,34	747,17	906,99	-475,82
1980	1631,88	1181,58	965,65	-515,35
1981	1073,25	689,13	965,70	-581,58
1982	1383,80	839,35	950,64	-406,19
1983	2496,73	1954,53	961,51	-419,31
1984	1895,71	1278,46	971,65	-354,40
1985	1232,68	662,29	1007,40	-437,02
1986	1484,03	635,69	998,69	-150,35
1987	1801,09	1249,43	961,12	-409,46

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

## APÊNDICE D - Balanço hídrico anual (mm) do futuro centrado em 2030.

Ano	RCP 4.5				RCP 8.5			
	PREC	Q	EVT	BH	PREC	Q	EVT	BH
	(mm)				(mm)			
2020	1943,12	1224,70	871,89	-153,46	1663,64	1502,43	949,21	-788,01
2021	2278,98	1587,09	943,85	-251,96	1346,58	1082,55	947,95	-683,91
2022	1101,40	552,73	925,82	-377,15	1539,66	1272,44	906,44	-639,22
2023	1736,24	1079,23	952,47	-295,47	2123,74	1987,79	969,19	-833,24
2024	1516,73	824,85	1053,09	-361,20	1758,92	1677,78	961,36	-880,22
2025	1597,12	930,99	965,26	-299,13	1363,63	1079,88	915,43	-631,68
2026	1511,31	857,19	949,59	-295,47	1417,85	1240,45	915,46	-738,05
2027	1769,18	1092,19	957,40	-280,41	2022,81	1894,28	935,13	-806,59
2028	1781,30	1076,35	967,50	-262,55	1730,56	1479,21	979,90	-728,55
2029	1326,69	715,90	1063,22	-452,42	1617,72	1474,78	1040,61	-897,67
2030	1456,87	744,26	955,43	-242,81	1222,19	917,06	948,37	-643,24
2031	1771,21	1096,92	963,11	-288,82	1336,47	1045,16	870,88	-579,56
2032	2301,49	1616,82	950,78	-266,11	1611,29	1356,43	927,68	-672,82
2033	2440,34	1796,69	945,97	-302,32	2307,87	2295,94	1019,69	-1007,76
2034	1420,79	802,13	1006,31	-387,64	2263,04	2356,90	1004,62	-1098,49
2035	1331,37	716,66	1009,67	-394,96	1683,01	1596,18	942,60	-855,77
2036	1775,67	1112,36	1004,45	-341,14	1372,91	924,77	940,17	-492,04
2037	1436,39	783,74	900,77	-248,12	1360,23	1144,55	946,20	-730,52
2038	1756,56	1094,67	1048,10	-386,20	1756,00	1540,81	948,75	-733,57
2039	1689,57	990,66	997,80	-298,89	1613,03	1541,40	958,84	-887,22

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

## APÊNDICE E - Balanço hídrico anual (mm) do futuro centrado em 2050.

Ano	RCP 4.5				RCP 8.5			
	PREC	Q	EVT	BH	PREC	Q	EVT	BH
	(mm)				(mm)			
2040	1321,57	1084,23	963,06	-725,72	1525,49	1229,07	963,06	-666,64
2041	1449,22	1166,28	890,62	-607,68	1881,49	1772,49	890,62	-781,61
2042	1663,57	1542,24	1008,24	-886,92	2246,19	2130,49	1008,24	-892,54
2043	2905,83	3259,06	956,73	-1309,95	2206,27	2206,01	956,73	-956,46
2044	2349,35	2557,14	962,20	-1169,99	1614,56	1396,85	962,20	-744,49
2045	1462,93	1332,55	970,95	-840,57	1284,33	938,43	970,95	-625,06
2046	1423,51	1271,19	970,19	-817,87	1976,88	1801,45	970,19	-794,76
2047	1601,27	1393,50	975,49	-767,72	1748,79	1582,72	975,49	-809,42
2048	2157,67	2172,25	970,78	-985,35	2097,51	1991,63	970,78	-864,90
2049	1772,09	1713,49	958,41	-899,80	1427,79	1113,30	958,41	-643,92
2050	1394,87	1164,97	966,89	-736,99	1097,24	715,45	966,89	-585,10
2051	1424,67	1152,92	978,27	-706,52	1625,66	1381,46	978,27	-734,08
2052	1889,67	1856,00	954,79	-921,12	1289,10	877,76	954,79	-543,46
2053	2073,23	2014,43	1017,62	-958,83	1835,19	1528,09	1017,62	-710,53
2054	2823,49	3223,77	990,23	-1390,51	1854,12	1757,48	990,23	-893,59
2055	2177,01	2369,60	998,94	-1191,53	2620,18	2819,38	998,94	-1198,14
2056	1892,51	1677,76	936,17	-721,43	1482,25	1286,59	936,17	-740,52
2057	1145,80	879,58	986,41	-720,18	1810,15	1624,79	986,41	-801,05
2058	1867,08	1869,28	957,60	-959,80	1657,30	1345,64	957,60	-645,94
2059	1769,81	1525,06	1056,48	-811,73	1867,55	1615,09	1056,48	-804,01

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

## APÊNDICE F - Balanço hídrico anual (mm) do futuro centrado em 2070.

Ano	RCP 4.5				RCP 8.5			
	PREC	Q	ETP	BH	PREC	Q	ETP	BH
	(mm)				(mm)			
2060	2158,40	2337,52	1001,12	-1163,11	2093,72	2178,02	1001,12	-1085,42
2061	1446,88	1167,97	941,14	-668,29	1924,20	1800,32	941,14	-817,25
2062	1692,63	1638,49	942,48	-894,53	1813,88	1834,04	942,48	-962,64
2063	1344,76	1142,21	981,69	-773,11	1956,24	1877,93	981,69	-903,38
2064	1717,36	1488,64	991,00	-770,60	1830,15	1663,45	991,00	-824,30
2065	1937,06	1839,34	999,23	-894,32	2367,55	2445,64	999,23	-1077,32
2066	2649,27	3050,96	987,78	-1402,35	2370,84	2564,06	987,78	-1180,99
2067	1321,92	1083,17	981,69	-740,85	2076,12	2092,31	981,69	-997,88
2068	1377,35	1084,53	996,24	-701,57	1865,72	1750,69	996,24	-881,21
2069	1994,48	2006,92	986,01	-991,95	1741,07	1605,96	986,01	-850,90
2070	2117,00	1991,76	964,02	-835,79	1522,36	1276,12	964,02	-717,79
2071	2256,56	2643,79	1004,86	-1392,39	2006,21	2029,72	1004,86	-1028,38
2072	2086,11	2175,40	977,25	-1070,04	1992,50	1848,70	977,25	-833,46
2073	1382,81	1156,17	942,65	-731,53	1681,36	1572,14	942,65	-833,43
2074	1552,00	1251,74	988,78	-674,08	1684,00	1498,82	988,78	-803,59
2075	1859,97	1935,78	1021,20	-1093,38	1857,09	1769,45	1021,20	-933,55
2076	1911,18	1851,00	1122,67	-1062,26	2220,00	2093,12	1122,67	-995,79
2077	1698,30	1570,63	1079,55	-937,51	1840,99	1870,75	1079,55	-1109,31
2078	1941,67	2016,75	1022,73	-1119,85	1814,75	1681,93	1022,73	-889,90
2079	2218,72	2353,01	993,73	-1111,16	1355,54	1060,82	993,73	-699,01

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

## APÊNDICE G - Balanço hídrico anual (mm) do futuro centrado em 2090.

Ano	RCP 4.5				RCP 8.5			
	PREC	Q	EVT	BH	PREC	Q	EVT	BH
	(mm)				(mm)			
2080	1312,78	1106,23	1039,05	-832,50	1966,05	1790,48	1039,05	-863,48
2081	1780,73	1563,93	1030,13	-813,33	2233,81	2138,54	1030,13	-934,87
2082	2034,11	2150,23	971,01	-1087,14	2208,75	2183,61	971,01	-945,87
2083	2021,28	2010,91	1009,29	-998,91	2047,74	1982,98	1009,29	-944,53
2084	2397,84	2502,80	1004,28	-1109,24	1454,79	1103,88	1004,28	-653,37
2085	1636,84	1579,04	947,00	-889,21	1664,68	1483,38	947,00	-765,71
2086	1408,44	1076,23	1075,08	-742,87	2278,17	2063,58	1075,08	-860,49
2087	1669,01	1430,11	1057,25	-818,35	2438,48	2547,61	1057,25	-1166,38
2088	2043,62	2121,81	1036,86	-1115,04	2149,73	2030,08	1036,86	-917,20
2089	2019,23	2030,29	966,78	-977,84	1551,81	1345,22	966,78	-760,19
2090	2437,88	2724,20	1041,09	-1327,41	1967,16	1785,42	1041,09	-859,35
2091	1468,92	1279,36	1076,05	-886,49	2080,17	1838,80	1076,05	-834,67
2092	1110,43	722,51	1030,41	-642,49	2512,67	2705,02	1030,41	-1222,75
2093	1324,45	1099,14	1032,84	-807,52	1980,53	1778,00	1032,84	-830,31
2094	1726,11	1543,47	1032,39	-849,75	1575,67	1423,15	1032,39	-879,87
2095	1695,46	1621,25	1041,45	-967,23	2187,92	2153,43	1041,45	-1006,95
2096	2010,05	2042,12	1081,02	-1113,09	1525,21	1242,12	1081,02	-797,93
2097	2102,63	2178,92	1098,45	-1174,75	3291,13	3440,13	1098,45	-1247,45
2098	1948,59	1881,33	1037,71	-970,44	1871,59	1980,98	1037,71	-1147,10
2099	2186,43	2375,36	1009,09	-1198,02	1431,50	1131,17	1009,09	-708,77

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.