

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS**

**MATEUS GONÇALVES MICHELAN**

**METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DE VAZÕES IMPACTADAS PELAS  
MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA DE USOS  
MÚLTIPLOS**

**POÇOS DE CALDAS/MG**

**2019**

MATEUS GONÇALVES MICHELAN

METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DE VAZÕES IMPACTADAS PELAS  
MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA DE USOS  
MÚLTIPLOS

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Recursos Hídricos e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Rafael de Oliveira Tiezzi.

POÇOS DE CALDAS/MG

2019

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas  
Biblioteca campus Poços de Caldas

M582m Michelin, Mateus Gonçalves.

Metodologia para estimativa de vazões impactadas pelas  
mudanças climáticas em uma bacia hidrográfica de usos múltiplos . /  
Mateus Gonçalves Michelin -- Poços de Caldas/MG, 2019.  
64 f. –

Orientador(a): Rafael de Oliveira Tiezzi .

Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade  
Federal de Alfenas, campus Poços de Caldas, 2019.  
Bibliografia.

1. Variação climática. 2. Modelagem hidrológica. 3. Modelos  
Climáticos. I. Tiezzi, Rafael de Oliveira . II. Título.

CDD – 551.6

MATEUS GONÇALVES MICHELAN

**METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DE VAZÕES IMPACTADAS PELAS  
MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA DE USOS  
MÚLTIPLOS**

A banca examinadora abaixo assinada, aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental, pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Alfenas. Área de Concentração: Recursos Hídricos e Meio Ambiente.

Aprovada em: 7 de outubro de 2019

Prof. Dr. Rafael de Oliveira Tiezzi  
Universidade Federal de Alfenas-MG

Assinatura: 

Prof. Dr. Flávio Aparecido Gonçalves  
Universidade Federal de Alfenas-MG

Assinatura: 

Prof. Dr. Paulo Henrique Bretanha Junker Menezes  
Universidade Federal de Alfenas-MG

Assinatura: 

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter guiado meu caminho até este programa de mestrado e durante ele.

Aos meus pais Lélia e Edson e ao meu irmão Marcel, por sempre incentivarem meus estudos e muitas vezes terem se sacrificado por ele.

À minha esposa Juliana, que quando ingressei no mestrado era namorada, pelo amor e compreensão durante essa fase.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rafael de Oliveira Tiezzi, pela oportunidade de ter desenvolvido este trabalho, por toda paciência, apoio e ensinamentos ao longo dele e pela destreza em contornar os desafios encontrados.

Aos professores do programa, pelos ensinamentos transmitidos e pela convivência durante as aulas. Em especial ao Prof. Dr. Alexandre Silveira, pelo apoio na figura de Coordenador e aos professores Dr. Flávio Aparecido Gonçalves e Dr. Paulo Henrique Bretanha Junker Menezes por terem feito parte da banca e pelos valiosos ensinamentos que permitiram elevar a qualidade do trabalho desenvolvido.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo incentivo e apoio à Universidade e ao programa de mestrado.

Às secretárias do programa, Kênia e Fernanda, pela paciência e orientação durante as inúmeras dúvidas.

A todos os amigos de sala de aula, em especial o trio: Adriano, César e Cláudio, que em certos momentos me “carregaram” durante o curso e sem os quais não teria chegado até o final.

Ao xará Mateus, pelo enorme suporte e paciência durante o uso da ferramenta de SIG no desenvolvimento da dissertação.

Aos amigos do DMAE: Flávia, por ter me apresentado o mestrado e pelas caronas; Sérgio, por possibilitar a realização do mestrado e todos os demais pelo suporte e ajuda com dados para o trabalho.

Aos novos amigos da SABESP, pelo incentivo e apoio durante a etapa final da dissertação.

Aos servidores Wallace e Thaís e a todos os demais servidores da UNIFAL que direta ou indiretamente deram o suporte necessário para a realização do mestrado.

Fica aqui o meu agradecimento.

## RESUMO

A mudança do clima é um reflexo da alteração de uma ou mais de suas variáveis representativas. A precipitação e a evaporação são algumas destas variáveis e também são os dados de entrada dos modelos de previsão de vazão, informação primordial na gestão de uma bacia hidrográfica. Nesse contexto, o presente trabalho visa desenvolver uma metodologia para previsão da vazão média mensal em uma bacia hidrográfica com usos múltiplos, influenciada por mudanças climáticas. O local específico do estudo foi a Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Cipó, Poços de Caldas-MG. Foram utilizados dados de precipitação e evapotranspiração projetados pelo Modelo Climático Regional (MCR) Eta-CPTEC aninhado aos Modelos Climáticos Globais (MCG's): CanESM2, HadGEM2-ES e MIROC5. Foram realizadas projeções nos cenários RCP 4.5 e 8.5, ambos para os períodos de 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099. Esses dados alimentaram o modelo hidrológico chuva-vazão denominado SMAP, que após calibrado, gerou as projeções de vazão. A metodologia apresentou resultados semelhantes aos métodos utilizados como referência. Como principais aspectos pode ser citada a alta resolução das previsões das variáveis climáticas (grades de 5 km e de 20 km de largura) e a boa resposta da metodologia para uma bacia de pequeno porte. Assim como toda modelagem climática traz incertezas, a necessidade de calibração do modelo SMAP com dados de outra bacia hidrográfica devido à inexistência de dados se mostrou a principal limitação do método. Entretanto, justamente para locais com baixa disponibilidade de dados, situação recorrente da realidade brasileira quando se trata de bacias de menor porte, a metodologia se apresenta como uma boa alternativa na obtenção de estimativas iniciais de vazão, auxiliando na gestão dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Variação climática. Disponibilidade hídrica. Vazão média mensal. Modelagem hidrológica. Modelos Climáticos. Pequenas bacias hidrográficas.

## ABSTRACT

Climate change is a reflection of changing one or more of its representative variables. Precipitation and evaporation are some of these variables and are also the input data from the flow prediction models, which is the primary information for managing a watershed. In this context, the present work aims to develop a methodology for forecasting the monthly average flow in a multi-purpose watershed, influenced by climate change. The specific study site was the Ribeirão do Cipó River Basin, Poços de Caldas-MG. Precipitation and evapotranspiration data designed by the Eta-CPTEC Regional Climate Model (RCM) nested with the Global Climate Models (GCM's): CanESM2, HadGEM2-ES and MIROC5 were used. Projections were made in scenarios RCP 4.5 and 8.5, both for the periods 2010-2039, 2040-2069 and 2070-2099. These data fed the rain-flow hydrological model called SMAP, which after calibrated, generated the flow projections. The methodology presented results similar to the methods used as reference. The main aspects are the high resolution of climate variable forecasts (5 km and 20 km wide grids) and the good response of the methodology for a small basin. As all climate modeling brings uncertainties, the need to calibrate the SMAP model with data from another watershed due to the lack of data proved to be the main limitation of the method. However, precisely for locations with low data availability, a recurring situation in the Brazilian reality when it comes to smaller basins, the methodology presents itself as a good alternative in obtaining initial flow estimates, helping in the management of water resources.

Keywords: Climatic variation. Water availability. Average monthly flow. Hydrological modeling. Climate models. Small river basins.

## LISTA DE FIGURAS - DISSERTAÇÃO

Figura 1 -	Ilustração do ciclo hidrológico e seus principais processos.....	15
Figura 2 -	Projeções de emissão anual de CO <sub>2</sub> por ações antrópicas até 2100 para cada cenário RCP.....	18
Figura 3 -	Localização e delimitação da bacia hidrográfica do Rio Grande.....	21
Figura 4 -	Mapa das bacias hidrográficas afluentes da bacia do Rio Grande.....	22
Figura 5 -	Esquema conceitual do modelo hidrológico SMAP.....	28
Figura 6 -	Ilustração do ganho na representação de uma região utilizando o downscaling.....	30

## LISTA DE FIGURAS - ARTIGO

Figura 1 -	Localização e delimitação da área de estudo – Bacia Hidrográfica do Ribeirão Cipó.....	38
Figura 2 -	Mapa dos processos executados no desenvolvimento na metodologia, subdivididos em três macroetapas: modelos climáticos, ambiente SIG e modelagem hidrológica.....	39
Figura 3 -	Interfaces visualizadas no software ArcGIS correspondentes a cada etapa do procedimento de cálculo das precipitações e evapotranspirações médias da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Cipó.....	42
Figura 4 -	Esquema conceitual do modelo hidrológico SMAP.....	43
Figura 5 -	Curvas de calibração do modelo SMAP com os dados da Bacia Hidrográfica do Rio Machado.....	45
Figura 6 -	Variações das vazões mensais médias entre os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 por modelo e por período.....	48
Figura 7 -	Variações das vazões mensais máximas entre os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 por modelo e por período.....	48
Figura 8 -	Variações das vazões mensais mínimas entre os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 por modelo e por período.....	49
Figura 9 -	Médias mensais de precipitação por modelo, para os períodos de 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099 no cenário RCP 4.5.....	51
Figura 10 -	Médias mensais de vazão por modelo, para os períodos de 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099 no cenário RCP 4.5.....	52
Figura 11 -	Médias mensais de precipitação por modelo, para os períodos de 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099 no cenário RCP 8.5.....	53
Figura 12 -	Médias mensais de vazão por modelo, para os períodos de 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099 no cenário RCP 8.5.....	54

## LISTA DE TABELAS - DISSERTAÇÃO

Tabela 1 -	Categorias de uso e respectivas formas de utilização da água.....	19
Tabela 2 -	Principais reservatórios da unidade de gestão GD6.....	24

## LISTA DE TABELAS - ARTIGO

Tabela 1 -	Convenções adotadas para se referir aos diferentes modelos e suas combinações ao longo do artigo.....	37
Tabela 2 -	Países com seus respectivos Modelos Climáticos Globais, nome da instituição onde foram desenvolvidos, cenários RCP e resolução utilizados.....	40
Tabela 3 -	Classificação do ajuste do modelo hidrológico SMAP pelos índices estatísticos Nash-Sutcliff (NSE) e Tendência Percentual (Pbias).....	44
Tabela 4 -	Vazões (m <sup>3</sup> /s) média, máxima e mínima mensal dos períodos 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099 e vazões ecológica (Q <sub>95</sub> ) e média de longo termo (Q <sub>MLT</sub> ) do período 2010-2099 projetadas para o cenário RCP 4.5.....	46
Tabela 5 -	Vazões (m <sup>3</sup> /s) média, máxima e mínima mensal dos períodos 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099 e vazões ecológica (Q <sub>95</sub> ) e média de longo termo (Q <sub>MLT</sub> ) do período 2010-2099 projetadas para o cenário RCP 8.5.....	46

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AR	Assessment Report
CBH	Comitê de Bacia Hidrográfica
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DMAE	Departamento Municipal de Água e Esgoto de Poços de Caldas
DME	Departamento Municipal de Eletricidade de Poços de Caldas
GPS	Global System Position
GT	Grupo de Trabalho
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
INPE	Instituto Nacional de Pesquisa Espacial
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MCG	Modelo Climático Global
MCR	Modelo Climático Regional
ONU	Organização das Nações Unidas
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PDRH	Plano Diretor de Recursos Hídricos
PROJETA	Projeções de Mudança do Clima para a América do Sul Regionalizadas pelo Modelo Eta
RCP	Representative Concentration Pathways
RHN	Rede Hidrometeorológica Nacional
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SMAP	Soil Moisture Accounting Procedure
SR	Sensoriamento Remoto
UHE	Usina Hidrelétrica
UTM	Universal Transversa de Mercator
WMO	World Meteorological Organization
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>14</b>
2.1	CICLO HIDROLÓGICO.....	14
2.2	MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	16
2.3	GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS.....	19
2.4	GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS EM POÇOS DE CALDAS..	21
2.5	MODELAGEM HIDROLÓGICA E CLIMÁTICA.....	24
2.6	RESULTADOS DE TRABALHOS SEMELHANTES.....	31
	<b>ARTIGO – METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DE VAZÕES IMPACTADAS PELAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA DE USOS MÚLTIPLOS.....</b>	<b>33</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>34</b>
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>37</b>
2.1	ÁREA DE ESTUDO.....	38
2.2	MODELOS CLIMÁTICOS.....	40
2.3	AMBIENTE SIG.....	41
2.4	MODELO HIDROLÓGICO.....	42
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>45</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>55</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>56</b>
<b>3</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>59</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>61</b>

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

A gestão de bacias hidrográficas é um instrumento essencial para garantir o melhor uso dos recursos hídricos. O recente cenário de crise hídrica exigiu ainda mais um bom gerenciamento, de modo que nenhum usuário tivesse seu uso prejudicado. A adoção da bacia hidrográfica como unidade de gestão foi uma inovação no modo de se pensar os recursos hídricos. Entretanto, para realizar a gestão, o comitê de uma bacia hidrográfica necessita de informações. Nesse contexto que entra o presente trabalho dentre muitos outros, que buscam por uma forma de estimar dados sobre a bacia hidrográfica de interesse, sendo um dos principais dados, a vazão.

Como a vazão em uma bacia hidrográfica sofre bastante influência de variáveis climáticas como a precipitação e a evapotranspiração, para períodos longos de previsão, é importante que sejam considerados os possíveis cenários climáticos.

Os relatórios do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) apresentam quatro cenários climáticos baseados na concentração de gases de efeito estufa na atmosfera até o final do século. Também chamados de *Representative Concentration Pathways* (RCP), eles foram classificados em RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 e RCP 8.5. Uma explicação mais detalhada sobre o significado destes cenários foi feita na revisão de literatura, porém os principais estudos de vazões influenciadas pelo clima utilizam os cenários RCP 4.5, de menor alteração climática e o cenário RCP 8.5, de maior.

As projeções em cada um desses cenários resultam em diferentes índices de precipitação e evapotranspiração. Essas projeções geralmente são realizadas por meio de modelos climáticos. Os modelos climáticos podem ser classificados como globais (MCG's) ou regionais (MCR's). Como o próprio nome diz, os MCG's fazem projeções de variáveis climáticas a nível global. Portanto, quando se pretende estudar uma região específica, é utilizada a técnica conhecida como *downscaling*, que consiste em fazer as projeções para a região de interesse com o modelo regional, utilizando como condição de contorno as projeções do modelo global. Tal procedimento é necessário, pois as células de previsões climáticas dos MCR's são menores, permitindo a captação de maiores detalhes da região estudada. Por outro lado, não é possível utilizar o MCR para o globo todo, pois esse processamento requer um alto desempenho computacional.

Para reunir os dados de cada uma das células pertencentes à área da bacia hidrográfica, são utilizados os softwares de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Esses softwares

permitem a manipulação e sobreposição de informações espaciais, de modo que seja calculado um valor médio das projeções para a bacia inteira.

Como a informação necessária é a vazão, essas projeções de precipitação e evapotranspiração servem de dados de entrada para os modelos hidrológicos denominados chuva-vazão. Esses modelos transformam os dados recebidos em vazão. Para uma transformação mais próxima da realidade, é necessário realizar a calibração prévia do modelo com dados da bacia hidrográfica. Este é um ponto chave da metodologia, pois dados de pequenas bacias hidrográficas são praticamente inexistentes no Brasil. Como uma alternativa satisfatória para este problema, podem ser utilizados dados de bacias vizinhas na calibração.

Diante do contexto apresentado e da inexistência de estudos similares publicados para a bacia hidrográfica de interesse, o objetivo deste trabalho foi aplicar os procedimentos descritos para estimar as vazões afetadas por mudanças climáticas da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Cipó, um importante manancial com usos múltiplos como a geração de energia elétrica e a captação para abastecimento de água do município de Poços de Caldas, MG.

Assim como os demais trabalhos pesquisados, os cenários climáticos utilizados foram o RCP 4.5 e RCP 8.5. O Modelo Climático Regional utilizado foi o Eta-CPTEC, nas resoluções de 5 por 5km e 20 por 20 km, aninhado aos Modelos Climáticos Globais: HadGEM2-ES, CanESM2 e MIROC5. Já o modelo hidrológico utilizado foi o *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP), calibrado com dados da bacia hidrográfica vizinha do Rio Machado, devido a inexistência de dados para a bacia estudada. As combinações entre diferentes modelos e cenários climáticos resultaram em oito projeções distintas de vazão média. Como a finalidade das projeções era para subsidiar a gestão do recurso hídrico, a frequência escolhida foi a mensal.

Diferentemente dos modelos tradicionais de redação de uma dissertação, este trabalho foi desenvolvido segundo a nova metodologia que vem sendo adotada. Desse modo, o presente trabalho contém esta introdução geral e uma revisão de literatura, seguidos por um artigo na íntegra, que foi submetido a um periódico pertencente à área das Engenharias I, classificado segundo a CAPES como B1. O artigo também contém uma introdução e nele são apresentados toda a metodologia aplicada, bem como os resultados alcançados e as conclusões obtidas. Após as referências bibliográficas do artigo, são apresentadas as considerações finais da dissertação, seguidas das referências utilizadas no texto da dissertação, que são basicamente as constantes na revisão bibliográfica. Em decorrência deste formato, os índices de figuras e de tabelas também foram separados entre “dissertação” e “artigo”.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 CICLO HIDROLÓGICO

O planeta Terra possui 71% de sua superfície coberta por água. Do volume total da água existente, 2,5% correspondem a água doce, sendo o restante a água dos oceanos. Desses 2,5% de água doce, 0,3% corresponde às águas dos rios e lagos, sendo o restante distribuído entre a água presente nas geleiras e as águas subterrâneas, as quais boa parte são de difícil captação pela elevada profundidade. Apesar da reduzida porcentagem de água doce disponível em relação ao volume total de água do planeta, sua oferta é superior à demanda em termos globais. Entretanto, sua escassez em determinadas regiões é resultante de sua distribuição desigual no globo terrestre (MOTA, 2016).

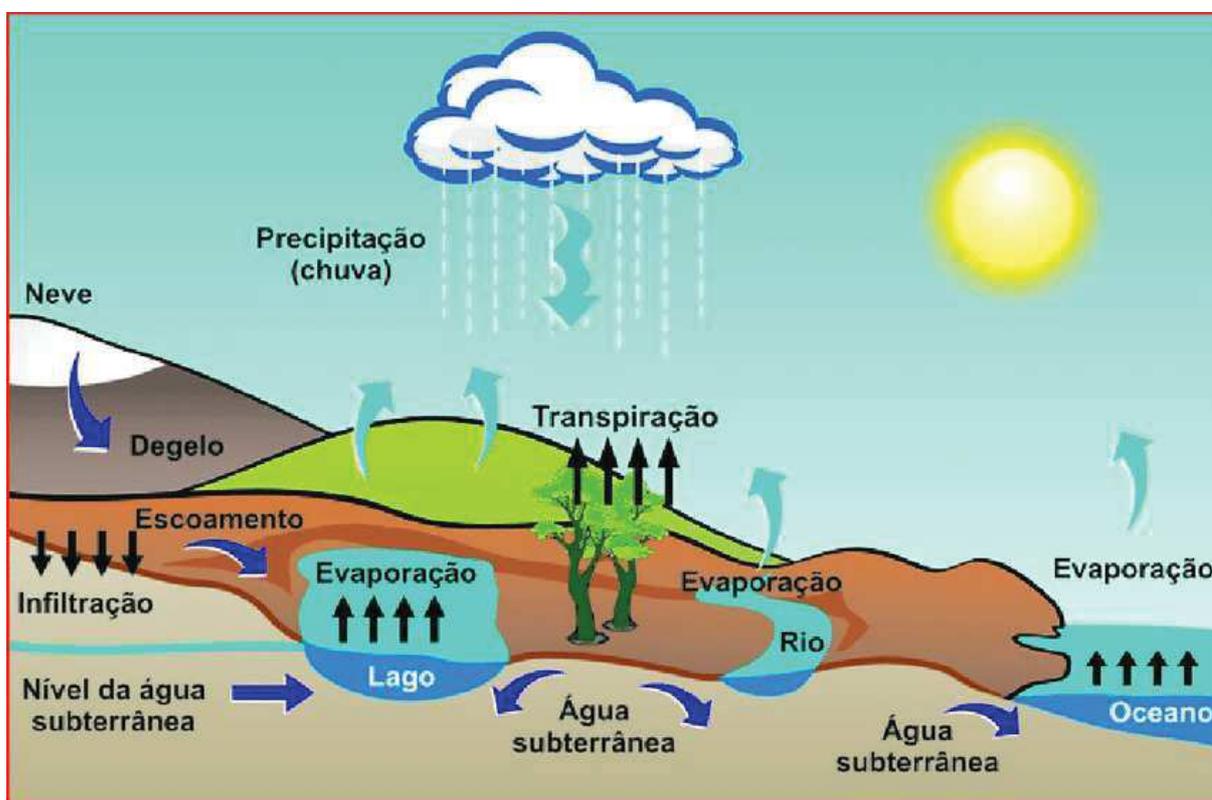
A água ocorre no planeta em diversos estados físicos e locais de armazenamento. Sua circulação entre esses compartimentos é movida basicamente pela energia dos raios solares e pela atração da gravidade, em um ciclo fechado (VILLELA; MATTOS, 1975). Ou seja, a quantidade de água existente no planeta é sempre a mesma. Portanto, crise hídrica significa indisponibilidade de água apropriada para consumo e não falta de água em geral.

A precipitação constitui a principal fonte de água doce do planeta. Após atingir a superfície terrestre ela pode escoar pela mesma, infiltrar no solo, percolar ao longo do solo ou ser interceptada pela vegetação. Destes reservatórios ela pode recarregar lençóis freáticos, ou escoar para rios e oceanos, onde sofrerá evaporação, voltando para a atmosfera e fechando o ciclo. A água interceptada pela vegetação também retorna à atmosfera por meio da evapotranspiração (VIESSMAN; LEWIS, 2003).

Do ponto de vista estacionário, esse ciclo ocorreria sempre da mesma forma e na mesma intensidade ao longo dos meses e anos. Entretanto, a precipitação e a evaporação são variáveis que compõe o clima e que se alteram ao longo do tempo. Nesse contexto, torna-se importante para o gerenciamento dos recursos hídricos o entendimento de cada fase desse ciclo e de como as alterações climáticas podem afetá-lo (RIGHETTO, 1998). A figura 1 ilustra as principais fases do ciclo hidrológico.

O tempo, diferentemente do clima, é uma situação temporária. Ele representa a condição meteorológica instantânea de uma determinada região. Já o clima, é uma situação duradoura. Ele representa as condições médias do tempo de uma determinada região, medida ao longo de vários anos (RIGHETTO, 1998).

Figura 1 – Ilustração do ciclo hidrológico e seus principais processos



Fonte: Oliveira et al. (2009, p. 47).

Nos estudos sobre clima é normal utilizar o conceito conhecido como normal climatológica. Ela corresponde a um conjunto de dados sequenciais longos o suficiente para representar o local estudado. Pela definição da *World Meteorological Organization* (WMO) (2019), uma normal climatológica é formada por “valores médios calculados para um período relativamente longo e uniforme, compreendendo no mínimo três décadas consecutivas”.

É embasado nesse conceito que alguns pesquisadores negam a ocorrência do aquecimento global. Como para ser possível verificar uma alteração na tendência do clima, são necessárias ao menos três normais climatológicas, ou seja, 90 anos de dados, esses pesquisadores alegam que ainda não há dados suficientes para fazer conclusões sobre o efeito global ou a mudança do clima. (SPENCER, 2007; FELICIO; ONÇA, 2010; OLIVEIRA et al., 2017).

Apesar dessas alegações, diversos trabalhos recentes têm mostrado evidências de que as alterações possam já estar ocorrendo. Algumas atividades inerentes ao desenvolvimento humano como remoção da vegetação natural para execução de atividades agropecuárias, ou construção de edificações e indústrias, aumentando a impermeabilização e promovendo a

formação de bolhas de calor, estão provocando alterações no balanço de energia atmosférico com a superfície (COX et al., 2000; MUSIL, 2007; DOUGLAS; SUTTON, 2015).

Além da mudança no uso e ocupação do solo, as atividades industriais consomem recursos e produzem resíduos, que quando não dispostos devidamente, agravam as alterações no meio. Foi justamente no contexto da revolução industrial, em que as taxas de emissão de gases de efeito estufa, em especial o gás carbônico, aumentaram expressivamente e começaram a dar indícios de alterações na atmosfera (PINTO et al., 1976).

No contexto do ciclo hidrológico, os efeitos da urbanização podem ser divididos em duas frentes. A primeira corresponde ao crescimento populacional. A concentração de pessoas nos núcleos urbanos trouxe o acréscimo na demanda por recursos hídricos e proporcionalmente da geração de efluentes. Então à medida que foi sendo necessário volumes cada vez maiores de água para atendimento da população, as fontes de abastecimento foram sendo mais poluídas e perdendo sua qualidade (SILVA, 2015).

A segunda frente corresponde ao crescimento das edificações. As construções aumentaram a impermeabilização do solo, impedindo a infiltração da água. A água não conseguindo infiltrar, escoou pela superfície. Esse efeito traz maiores volumes escoando, promovendo o aumento da velocidade da água. Como consequência, o tempo de duração do evento, em relação ao escoamento natural, diminuiu, aumentando a vazão de pico e ampliando os efeitos das enchentes (SILVA, 2015).

## 2.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Conforme citado anteriormente, o clima representa as condições médias da atmosfera de uma determinada região. Desse modo, em consonância com a definição do IPCC, mudança climática corresponde a uma alteração estatística significativa de uma das variáveis componentes do clima, por um período suficientemente longo.

Devido a ser um fenômeno dinâmico, o clima naturalmente sofre variações ao longo do tempo, alternando entre períodos mais frios e períodos mais quentes. Embora a temperatura global esteja fortemente relacionada à mudança climática, existem outras variáveis que compõem o clima.

Essa variação natural ocorre principalmente devido à incidência dos raios solares, que em razão da posição do sol em relação a Terra, podem ser mais intensos ou mais brandos. Esses

raios influenciam nas correntes atmosféricas e marítimas e estas provocam as principais alterações nas variáveis componentes do clima (SILVA, 2015).

Apesar de existir essa variação natural, há indícios de que ações antropogênicas possam estar acelerando ou até mesmo ampliando os efeitos das mudanças climáticas. Uma das principais ações do homem que está sendo estudada quanto ao seu potencial de variação climática é a emissão de gases de Efeito Estufa, em especial o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Esses gases absorvem radiação térmica e armazenam o calor, aumentando a temperatura média da atmosfera (COX et al., 2000).

O nome efeito estufa provavelmente surgiu em 1827, quando o cientista francês Jean-Baptiste Fourier observou uma similaridade entre o comportamento da atmosfera e uma estufa de vidro (CORTESE; NATALINI, 2014).

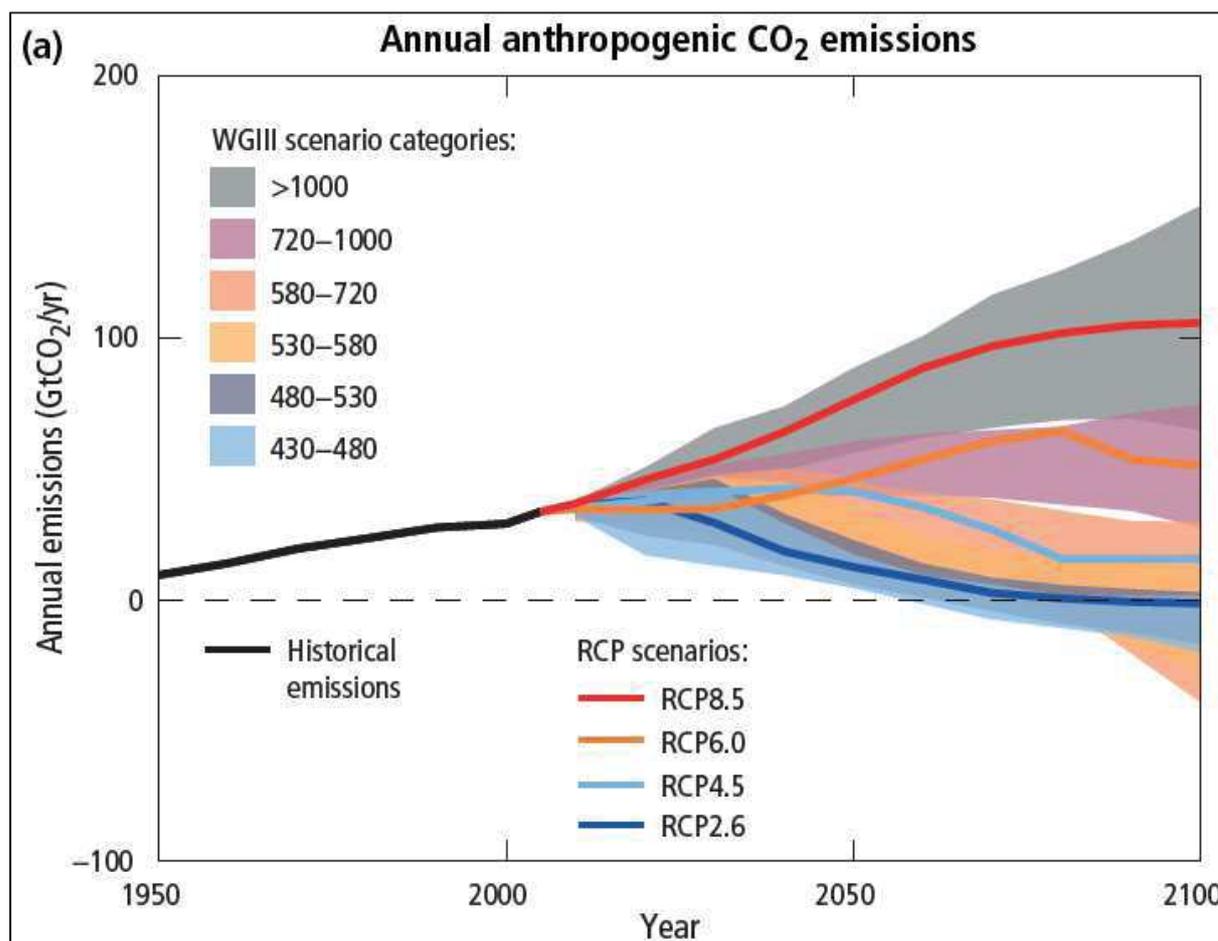
Em 1896, o cientista sueco Svante August Arrhenius realizou um experimento no qual concluiu que o aumento da concentração de gás carbônico na atmosfera provocaria o aumento da temperatura na mesma. Apesar de possuir poucos recursos tecnológicos na época, seus valores encontrados estão em consonância com os valores do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (CORTESE; NATALINI, 2014).

Em 1957, na Califórnia, os cientistas Roger Revelle e Hans Suess publicaram um artigo no qual alertam para o aumento da concentração de gás carbônico na atmosfera em decorrência de atividades humanas, sendo um dos primeiros documentos relacionando a preocupação com o clima aos gases de efeito estufa (CORTESE; NATALINI, 2014).

Criado em 1988, o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), é uma organização pertencente à Organização das Nações Unidas (ONU), com o objetivo de aglutinar e disseminar o conhecimento sobre as variações climáticas no planeta, em especial o aquecimento global. Ele é composto por cientistas de diversos países que elaboram relatórios sobre as condições do clima. Para a geração dos relatórios, foram criados três Grupos de Trabalho e uma Força-Tarefa. O Grupo de Trabalho 1 (GT1) é o responsável pela base científica da mudança climática; O GT2, avalia os impactos, a adaptação e a vulnerabilidade às alterações climáticas; o GT3 estuda a mitigação da mudança climática; e a Força-Tarefa é responsável por desenvolver a metodologia para cálculo das emissões de gases do efeito estufa. Além de produzir relatórios especiais sobre tópicos específicos, o IPCC produz grandes relatórios de avaliação sobre os conhecimentos científicos, técnicos e socioeconômicos das mudanças climáticas. São os chamados *Assessment Report* (AR). O último relatório publicado foi o AR5, em 2014. Porém, o sexto relatório (AR6), já está em desenvolvimento com previsão para

término em 2022. Um novo conceito apresentado no AR5 foi o dos cenários climáticos RCP, mostrados na figura 2, que apresenta as projeções de CO<sub>2</sub> emitido por ações antrópicas de cada cenário até 2100. O IPCC também relaciona o CO<sub>2</sub> emitido acumulado ao aumento da temperatura global.

Figura 2 – Projeções de emissão anual de CO<sub>2</sub> por ações antrópicas até 2100 para cada cenário RCP



Fonte: IPCC (2014).

Os *Representative Concentration Pathways* (RCP) ou Caminhos de Concentração Representativa trouxeram uma nova abordagem em relação aos Cenários Climáticos Baseados em Emissões (SRES) do AR4. Enquanto estes eram baseados em emissões associadas ao desenvolvimento socioeconômico da população, os RCP são baseados em cenários de forçantes radiativas devido aos gases de efeito estufa. A forçante radiativa pode ser simplificada como o balanço entre a energia fornecida pelo sol e a refletida pelo planeta. Ela é medida em Watts/m<sup>2</sup> e quando tem valores positivos pode ser interpretada como um

aquecimento da atmosfera e da superfície terrestre. O número após a sigla corresponde ao valor de forçante radiativa do cenário, ou seja, para o RCP 2.6, seu valor é 2,6 W/m<sup>2</sup>. Este é um cenário otimista, no qual as emissões atingirão um pico no meio do século e reduzirão até 2100, restringindo o aumento da temperatura global a não mais do que 2 °C. Os RCP 4.5 e 6.0 são cenários intermediários de estabilização das emissões em 2100, enquanto que o RCP 8.5 é um cenário pessimista, no qual nenhum esforço será feito para combater as emissões, que aumentarão após 2100 (IPCC, 2014).

### 2.3 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

Os recursos hídricos são bens de consumo utilizados em praticamente todas as atividades humanas, podendo ser distribuídos em três principais categorias de uso conforme apresenta a tabela 1:

Tabela 1 - Categorias de uso e respectivas formas de utilização da água

<b>Infra-Estrutura Social</b>	<b>Agricultura e Aquicultura</b>	<b>Indústria</b>
Usos domésticos (C)	Agricultura (C)	Processamento industrial (C)
Usos públicos (C)	Pecuária (C)	Termoeletricidade (C)
Dessedentação (C)	Irrigação (C)	Arrefecimento (C)
Navegação (NC)	Piscicultura (NC)	Hidreletricidade (NC)
Recreação (NC)		Mineração (NC)

Fonte: Adaptado de Tucci (2015).

Quanto à forma de utilização eles podem ser classificados como:

- **Consuntivos (C):** São os usos em que há o consumo propriamente dito da água, ou seja, são retirados de sua fonte de suprimento, diminuindo sua disponibilidade;
- **Não-consuntivos (NC):** São aqueles que após o uso, o recurso retorna à sua fonte, mantendo sua disponibilidade.

Em oposição ao começo da civilização, em que os principais usos da água eram domésticos, na criação de animais e agrícolas (a partir da precipitação e não da irrigação), atualmente a água apresenta uma ampla variedade de usos e em um cenário de menor disponibilidade, resultando nos conflitos entre os usuários, que podem ser conflitos de destinação de uso, de disponibilidade qualitativa ou quantitativa (SETTI et al., 2001).

A geração de energia hidrelétrica, por exemplo, apresenta conflitos quantitativos com a navegação na Bacia Hidrográfica do Rio Jacuí, RS, com a irrigação no Rio São Francisco e até mesmo com o abastecimento público no Ribeirão das Antas em Poços de Caldas.

Não necessariamente, essas demandas múltiplas de água surgem ao mesmo tempo. Em geral, uma demanda singular de um recurso hídrico surge em um determinado local para atender um fim específico. Entretanto, o próprio surgimento dessa demanda na região, pode atrair uma segunda atividade e esse fenômeno se repetir ao longo do tempo. Por exemplo, a utilização da água para geração de energia elétrica em uma região desocupada atrairá pessoas para trabalhar na usina. Logo, essas pessoas necessitarão de água para abastecimento doméstico e ao longo do tempo o desenvolvimento dessa sociedade necessitará de água para outros usos como irrigação. Diante desse cenário, o uso múltiplo nem sempre foi a condição inicial de utilização dos recursos hídricos, entretanto, pelo próprio desenvolvimento da região, fatalmente acaba se tornando sua realidade (SETTI et al., 2001).

Como forma de intermediar essas diferenças de interesses, foi atribuída à União e aos Estados a propriedade dos recursos hídricos, para que pudesse ser feita uma gestão eficiente e integrada da água, levando em conta os aspectos econômicos, ambientais e sociais.

Em um cenário de crescente urbanização e industrialização, em 1934, foi editado o Decreto Nº 24.643, que estabeleceu o Código das Águas. O Decreto teve a finalidade de atender uma carência de leis adequadas para o uso da água e foi considerado moderno para a época (SILVESTRE, 2008).

Em 1997 foi editada a Lei Nº 9.433, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. A lei não revogou o Decreto Nº 24.643, porém ela introduziu novos fundamentos importantes para o gerenciamento dos recursos hídricos. Por exemplo, o uso múltiplo das águas deve sempre ser considerado na gestão dos recursos hídricos. Outra definição que determinou como os recursos hídricos são gerenciados hoje foi a determinação da bacia hidrográfica como unidade básica de gestão.

Essa determinação levou à criação dos Comitês de Bacia Hidrográfica. Cada comitê atua de forma descentralizada e tem como área de atuação, conforme definição da lei, “a totalidade de uma bacia hidrográfica”. Os comitês devem debater sobre as questões dos recursos hídricos de sua bacia hidrográfica e atuam principalmente na elaboração do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica, na arbitragem dos conflitos por uso da água e na determinação de mecanismos e valores para cobrança pelo uso da água. Os comitês são formados basicamente por representantes do governo Federal, Estadual e Municipal, dos usuários das águas e das organizações civis.

#### 2.4 GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS EM POÇOS DE CALDAS

Os recursos hídricos do município de Poços de Caldas são abrangidos pela Bacia Hidrográfica do Rio Grande. A bacia pertence à Região Hidrográfica do Paraná, no sudeste do país, ocupando uma área de aproximadamente 143 mil km<sup>2</sup> dividida entre os estados de São Paulo e Minas Gerais. Na bacia existe uma potência instalada de 7800 MW para geração de energia, que corresponde a cerca de 5% da matriz elétrica do país (CBH Grande, 2019). A figura 3 ilustra a delimitação da bacia hidrográfica.

Figura 3 – Localização e delimitação da Bacia Hidrográfica do Rio Grande



Fonte: CBH Grande (2019).

Em 2006, foram identificados 35 conflitos pelo uso dos recursos hídricos da bacia hidrográfica, não limitados aos usos relacionados à geração de energia. Para gerenciar esses conflitos e os demais aspectos dessa importante bacia, existe o Comitê da Bacia Hidrográfica, denominado CBH Grande. Por abranger mais de um estado, se trata de um comitê interestadual (CBH Grande, 2019).

Conforme a figura 4, a Bacia Hidrográfica do Rio Grande é composta por 12 bacias afluentes, sendo seis paulistas e oito mineiras. Todas também já possuem seus comitês estaduais e a bacia que abrange o município de Poços de Caldas é a Bacia Hidrográfica dos Afluentes Mineiros dos Rios Mogi-Guaçu e Pardo, gerenciada pelo Comitê GD6 (CBH Grande, 2019).

Em seus instrumentos de gestão, o comitê já elaborou o Plano de Recursos Hídricos, regulamentou a Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos e está implementando o Sistema de Informações em Recursos Hídricos. Futuramente deverá implantar o Enquadramento de Corpos de Água em Classes, segundo os usos preponderantes e a Cobrança pelo Uso de Recursos Hídricos (IGAM, 2019).

O Plano de Recursos Hídricos estabeleceu cinco componentes para definição de metas e objetivos em diferentes horizontes de planejamento para atingir uma realidade projetada para a bacia hidrográfica. Entre esses componentes, destaca-se a Disponibilidade Hídrica e os Eventos Hidrológicos Extremos (IGAM, 2010).

Figura 4 – Mapa das bacias hidrográficas afluentes da bacia do Rio Grande



Fonte: CBH Grande (2019).

Quanto aos eventos extremos, o plano prevê a ampliação da rede de monitoramento hidrometeorológico e a implantação de sistemas de alerta. Esses programas visam

principalmente antever e reduzir os efeitos de enchentes. Porém, também podem ocorrer eventos extremos de seca, que influenciarão na disponibilidade hídrica (IGAM, 2010).

A tabela 2 apresenta os principais reservatórios pertencentes à unidade de gestão GD6. Pode-se observar que a maioria dos reservatórios estão situados em Poços de Caldas e com exceção da Represa Saturnino de Brito, todos estão à jusante da Barragem do Ribeirão Cipó. O ribeirão dá seu nome à Bacia Hidrográfica do Ribeirão Cipó, uma sub-bacia do Rio Pardo. A presença dos principais reservatórios da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo sob a área de influência da Barragem mostra a importância estratégica da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Cipó para o gerenciamento dos recursos hídricos na região.

Segundo o Plano de Recursos Hídricos, a Bacia Hidrográfica do Ribeirão das Antas, que engloba a Bacia Hidrográfica do Ribeirão Cipó e a Represa Saturnino de Brito, foi declarada em estado de conflito em 2009 pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). O motivo foi um pedido de outorga no ano anterior, quando foi verificado que a vazão limite para outorgas já havia sido ultrapassada. A outorga é o instrumento pelo qual o governo do estado autoriza um usuário a utilizar ou interferir em um recurso hídrico e quando é verificada a capacidade de uso da água sem prejudicar suas demais funções (DAEE, 2019). Embora à época tenham sido suspensos novos pedidos de outorga, atualmente a bacia não se encontra mais em estado de conflito de acordo com o método oficial adotado pelo estado de Minas Gerais para o cálculo da vazão  $Q_{7,10}$ , vazão específica mínima de sete dias de duração e período de retorno de 10 anos. O Plano ainda ressalta que mesmo estando dentro do limite de vazão outorgável, a Bacia do Ribeirão das Antas está muito próxima deste em comparação com as bacias vizinhas (IGAM, 2010).

Como pode ser observado na tabela 2, a maioria dos reservatórios tem a finalidade de geração de energia. A cidade de Poços de Caldas tem seus serviços de energia elétrica prestados pela autarquia municipal denominada Departamento Municipal de Eletricidade (DME), que junto ao município de Ijuí (SC), são os únicos concessionários municipais de serviços de energia no Brasil.

O DME opera atualmente duas usinas hidrelétricas (UHE), duas pequenas centrais hidrelétricas (PCH) e uma minicentral hidrelétrica, que juntas apresentam um potencial gerador de energia aproximado de 35 MW (DME, 2018). Também está previsto para conclusão até 2023, a construção de duas novas PCH's, com potência total de 24,5 MW (PMPC, 2017).

Tabela 2 - Principais reservatórios da unidade de gestão GD6

NOME	MUNICÍPIO	VOLUME (m <sup>3</sup> )	FINALIDADE
Represa Saturnino de Brito	Poços de Caldas	246 mil	Controle de enchentes e abastecimento
Represa Bortolan	Poços de Caldas	7 milhões	Ponto turístico, regularização de vazão e geração de energia
Represa do Cipó	Poços de Caldas	32 milhões	Regularização de vazão e abastecimento
UHE de Caconde	Caconde	540 milhões	Ponto turístico e geração de energia
UHE Antas I	Poços de Caldas	Fio d'água	Geração de energia
UHE Antas II	Poços de Caldas	Fio d'água	Geração de energia
PCH Véu das Noivas	Poços de Caldas	Fio d'água	Geração de energia
PCH do Rolador	Poços de Caldas	Fio d'água	Geração de energia
UHE de Jacutinga	Jacutinga	Fio d'água	Geração de energia

Fonte: Adaptado de IGAM (2010).

Apesar desse grande uso dos recursos hídricos voltado à geração de energia, existem outras demandas para as águas dos reservatórios, em especial para captação de água para abastecimento público, que no município é realizada pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE).

Esse uso simultâneo dos recursos torna-se preocupante no atual cenário de crise hídrica, pois no passado, a concessionária de energia disponibilizou quantidades de água superiores à sua demanda para permitir o abastecimento público, fazendo-se necessário comprar energia do mercado para honrar seus contratos, sofrendo um prejuízo de milhões de reais.

## 2.5 MODELAGEM HIDROLÓGICA E CLIMÁTICA

Uma ferramenta de grande auxílio na gestão dos recursos hídricos é a modelagem. Um modelo é uma forma simplificada de representar algo de maior complexidade na realidade. Por apresentarem múltiplos fatores que interferem em seu comportamento, os processos ou sistemas ambientais são estudados por meio de modelos (INPE, 2008).

Os modelos hidrológicos, que estudam basicamente bacias hidrográficas, são amplamente utilizados para validar licenciamentos ambientais de grandes empreendimentos, bem como auxiliar em seu gerenciamento e operação (INPE, 2008).

Diferentemente de um edifício ou de uma máquina, que foram projetados e dimensionados pelo homem, uma bacia hidrográfica é um sistema originado por processos naturais. Desse modo, para aproveitar o máximo de seus recursos, deve-se entender o seu comportamento e suas particularidades. Para isso, é necessário observar e registrar as variáveis envolvidas no fenômeno que se procura compreender e até mesmo fazer previsões futuras (TUCCI, 2005).

O modelo é a ferramenta que auxiliará nessas previsões das variáveis hidrológicas. Entretanto, isso não significa que seja prescindível seu registro uma vez que o modelo irá fazer as estimativas, pois quanto mais informações existirem, menores serão as incertezas resultantes do uso do modelo. Incerteza, em simulações hidrológicas, traduz-se como a diferença de resultados apresentados pela amostra em relação à população, podendo ser devido à falta de representatividade da amostra ou devido a erros de coleta e processamento de dados (GRACIOSA, 2010).

Outra terminologia utilizada nos estudos hidrológicos é o risco, que se refere à chance de uma determinada variável superar a expectativa do projetista. Por exemplo, uma barragem para geração de energia com período de retorno de 100 anos, significa que o projetista aceita um risco de 1% de que a vazão seja superior à de projeto em algum ano. Para obter os valores das variáveis correspondentes aos riscos assumidos, é necessário realizar as simulações, que consistem na utilização do modelo (GRACIOSA, 2010).

O processo de simulação em geral possui três fases. A primeira corresponde ao ajuste, que é a fase na qual os parâmetros do modelo são estimados. Após isso, procede-se a verificação, que consiste na validação do modelo fazendo simulações com os parâmetros estimados. Por fim, ocorre a previsão, que é a fase de modelagem propriamente dita, utilizando os parâmetros já ajustados para a simulação do sistema. Apesar das fases de ajuste e verificação serem etapas de calibração do modelo e não de geração de resultados, são igualmente importantes à fase de previsão, pois garantirão previsões mais fiéis à realidade se forem bem executadas (ANDRADE et al., 2016).

A estimativa dos parâmetros do modelo vai depender da disponibilidade de séries históricas. Conforme citado anteriormente, quanto mais dados existirem, menores serão as incertezas do modelo. Entretanto, quando não existirem esses dados, eles podem ser estimados por três métodos. O método do ajuste por tentativas é o mais simples. De posse dos dados de entrada e saída do modelo, são feitas tentativas de estimativa dos valores dos parâmetros para tentar obter os que melhor representem os valores observados. O método do ajuste por

otimização é semelhante ao anterior, com o diferencial de que é feita apenas uma estimativa inicial dos valores dos parâmetros e após isso são feitos cálculos matemáticos para chegar numa diferença mínima entre os valores observados e os simulados, por meio de uma função objetiva. O método por amostragem consiste em medições específicas no sistema, como a determinação da área de uma bacia (GERMANO et al., 1998).

Alguns cuidados devem ser tomados para que os modelos não produzam resultados tendenciosos, como garantir que os dados utilizados sejam os mais representativos possível do sistema a ser estudado. Também se deve atentar para não fazer previsões de valores fora das faixas utilizadas para calibração do modelo. Outra observação importante é que a escolha das condições de contorno deve ser cuidadosa, lembrando que preferencialmente devem ser independentes entre si. Por fim, deve-se lembrar de que alguns parâmetros dos modelos podem sofrer modificações ao longo do tempo, por exemplo, o grau de impermeabilização de uma bacia urbana. Portanto, sempre que essas mudanças ocorrerem, deverá ser feita uma revisão dos parâmetros do modelo (GERMANO et al., 1998).

Assim como os sistemas, os modelos também podem ser classificados segundo diversos critérios. No entanto, em alguns casos é aceitável utilizar modelos de menor complexidade quando o erro envolvido não for representativo, fazendo com que sejam utilizados modelos com um tipo de comportamento para simular fenômenos com outro. Por exemplo, o modelo do hidrograma unitário que é linear, é utilizado para representar o escoamento superficial, que é um fenômeno não-linear (TUCCI, 2005).

Os modelos podem ser classificados segundo diversos critérios. Em rigor, o que são classificados são os sistemas representados pelos modelos, mas é usual se referir diretamente aos modelos. Conforme citado anteriormente, um modelo pode ser linear ou não-linear. O que garante a linearidade de um sistema é a satisfação das propriedades da superposição e da homogeneidade. O princípio da superposição é caracterizado quando uma entrada  $a_1+a_2$  fornece uma saída  $b_1+b_2$ , sendo que a entrada  $a_1$  promove a saída  $b_1$  e a entrada  $a_2$  promove a saída  $b_2$ . O princípio da homogeneidade é caracterizado quando uma entrada  $x.a_1$  fornece uma saída  $x.b_1$ , sendo que a entrada  $a_1$  promove a saída  $b_1$  (TUCCI, 2005).

Outra classificação dos modelos é em relação a sua continuidade no tempo. De acordo com essa classificação eles podem ser contínuos ou discretos. No primeiro caso, as mudanças ao longo do sistema ocorrem de forma contínua. No segundo, as mudanças são discretizadas, ou seja, ocorrem em intervalos de tempo. Na realidade, a maioria dos fenômenos representados por modelos ocorrem de forma contínua. Entretanto, por motivo de economia de recursos,

muitos deles são representados de forma discreta. Por exemplo, uma precipitação pode ser registrada de forma contínua por um pluviógrafo ou de forma discreta por um pluviômetro. Como o primeiro aparelho requer mais investimentos, na maioria dos casos o pluviômetro é o mais utilizado (TUCCI, 2005).

Os modelos também podem ser classificados como concentrados ou distribuídos. Um modelo é dito concentrado, quando um único ponto representa o espaço ao seu redor. Por exemplo, uma única estação indicando a precipitação média da bacia em que ela está inserida. Geralmente os modelos concentrados variam apenas em função do tempo, desconsiderando o espaço. Já os modelos distribuídos, levam em conta também o espaço, ou seja, várias estações dentro de uma bacia irão compor sua precipitação média. Assim como o caso dos modelos contínuos, nenhum modelo será completamente distribuído. Ele apenas terá uma maior qualidade em sua distribuição, mas em suas subdivisões se comportará como concentrado (TUCCI, 2005).

Uma classificação bastante utilizada é a de modelo conceitual ou empírico. Um modelo é dito conceitual quando sua metodologia é baseada apenas em processos físicos. Apesar de ser baseado em processos físicos, os modelos conceituais sofreram uma subdivisão em semi-conceituais e físicos. Os semi-conceituais, embora ainda se baseiem nesses processos, utilizam funções empíricas que representam os fenômenos. Já os físicos, utilizam parâmetros puramente físicos, sem se valer de parâmetros empíricos. Já o modelo classificado como empírico, é desenvolvido por meio da observação de dados. Por meio de funções matemáticas, os valores calculados são ajustados aos dados, não apresentando nenhuma relação com os fenômenos físicos. Por esse motivo, esses modelos são também chamados de “caixa-preta”, pois o modelo recebe uma entrada e devolve uma saída, sem explicar o mecanismo de desenvolvimento das respostas (TUCCI, 2005).

Apesar de as classificações de modelos não se limitarem as apresentadas, uma das principais utilizadas para simulações hidrológicas é a de modelo estocástico ou determinístico. O modelo estocástico é aquele em que pelo menos uma de suas variáveis apresenta um comportamento aleatório, ou seja, entra a definição de probabilidade. Já o determinístico, é aquele em que cada valor de entrada produz um único valor de saída (BARTH, 1987).

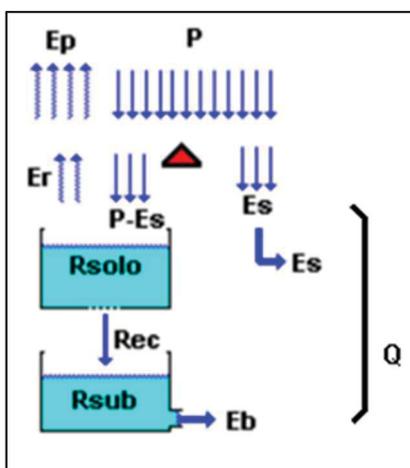
No gerenciamento de recursos hídricos, um dos principais modelos utilizados é o denominado chuva-vazão. Ele é basicamente utilizado para fazer previsões de vazões a partir de dados de precipitação. O modelo chuva-vazão é determinístico, ou seja, cada valor de precipitação fornecerá sempre o mesmo valor de vazão. Ele também pode ser classificado como

empírico, ou seja, é desenvolvido por meio de equações matemáticas que ajustam dados de precipitação e vazão medidos, ou classificado como conceitual, em que são utilizadas funções baseadas em processos físicos para calcular a vazão a partir da precipitação (BARTH, 1987).

O modelo SMAP é um dos principais modelos chuva-vazão utilizados para simulações hidrológicas, pois apresenta resultados bastante satisfatórios e com uma estrutura simples.

O princípio do modelo SMAP é baseado no balanço de massa utilizando dois reservatórios matemáticos, um representando o solo e o outro o aquífero, conforme ilustra a figura 5.

Figura 5 – Esquema conceitual do modelo hidrológico SMAP



Fonte: LOPES (1999).

As equações 1 e 2 apresentam o cálculo do balanço de massa nos reservatórios.

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

$$R_{sub}(i) = R_{sub}(i - 1) + Rec(i) - Eb(i) \quad (2)$$

Onde:  $R_{solo}(i)$  é o reservatório do solo (mm);  $R_{sub}(i)$  é o reservatório subterrâneo (mm);  $P(i)$  é a precipitação (mm);  $Es(i)$  é o escoamento superficial (mm);  $Er(i)$  é a evapotranspiração real (mm);  $Rec(i)$  é a recarga subterrânea (mm);  $Eb(i)$  é o escoamento básico (mm) e  $i$  é o intervalo de tempo (mês) (LOPES et al., 1981).

O modelo tem sua inicialização por meio das equações 3 e 4, que utilizam as variáveis de estado:  $E_{bin}$ , que é a vazão básica inicial (m<sup>3</sup>/s) e  $T_{uin}$ , que é o teor de umidade inicial (%).

$$R_{solo}(0) = \frac{Tuin}{100 * Str} \quad (3)$$

$$R_{sub}(0) = \frac{Ebin}{\left[1 - 0,5\left(\frac{1}{Kkt}\right)\right] * Ad * 2630} \quad (4)$$

Onde:  $Str$  é a capacidade de saturação do solo (mm);  $Kkt$  é a constante de recessão do escoamento básico (meses) e  $Ad$  é a área de drenagem (km<sup>2</sup>) (LOPES et al., 1981).

Ainda são utilizadas quatro funções de transferência, dadas pelas equações 5 a 8.

$$Es(i) = P(i) * Tu(i)^{Pes} \quad (5)$$

$$Er(i) = Ep(i) * Tu(i) \quad (6)$$

$$Rec(i) = \frac{Rsolo(i - 1) * Crec}{100 * Tu(i)^4} \quad (7)$$

$$Eb(i) = Rsub(i - 1) * \left[1 - 0,5\left(\frac{1}{Kkt}\right)\right] \quad (8)$$

Onde:  $Ep(i)$  é a evaporação potencial de tanque classe “A” (mm) e  $Tu(i)$  é dado pela equação 9. (LOPES et al., 1981).

$$Tu(i) = \frac{Rsolo(i - 1)}{Str} \quad (9)$$

O procedimento de calibração foi descrito no item “2 MATERIAIS E MÉTODOS” do artigo presente nesta dissertação e seus parâmetros de calibração são quatro, onde:  $Kkt$  é a constante de recessão do escoamento básico (meses);  $Str$  é a capacidade de saturação do solo (mm);  $Pes$  é o parâmetro de escoamento superficial (ad) e  $Crec$  é a capacidade recarga subterrânea (%) (LOPES et al., 1981).

Por fim, a vazão pode ser calculada pela equação 10:

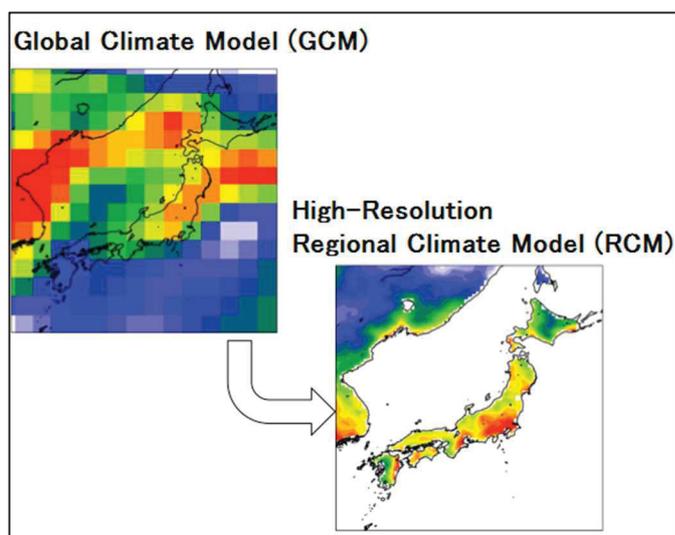
$$Q(i) = \frac{[Es(i) + Eb(i)] * Ad}{2630} \quad (10)$$

Um outro tipo de modelo que é utilizado em conjunto com os modelos hidrológicos são os modelos climáticos. Os modelos climáticos podem ser globais ou regionais e realizam projeções para parâmetros do clima como precipitação, temperatura, pressão, evaporação, umidade, entre outros (CHOU et al., 2014b).

Como o próprio nome diz, os modelos globais realizam projeções para grandes escalas, mais comumente para resoluções espaciais entre 100 a 300km. Os estudos mais recentes com modelagem climática têm utilizado principalmente os seguintes modelos: o HadGEM2-ES, um modelo inglês, o MIROC5, japonês, o CanESM2, canadense e o BESM, um modelo brasileiro desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) (CHOU et al., 2014b).

Com o intuito de aplicar os modelos em regiões específicas, para aumentar a precisão das informações, é utilizada a técnica de *downscaling*. Essa técnica consiste em um refinamento de escala, acoplando o modelo regional à um modelo global. Dessa forma, na área de interesse utiliza-se o modelo regional com células de previsões climáticas menores, a um maior custo computacional, que conseguem captar mais detalhes, por exemplo o relevo e como condição de contorno são utilizados os modelos globais (CHOU et al., 2014b). A figura 6 mostra um exemplo do ganho na representação de uma região com o uso do *downscaling*.

Figura 6 – Ilustração do ganho na representação de uma região utilizando o *downscaling*



Fonte: CENTER FOR COMPUTATIONAL SCIENCES UNIVERSITY OF TSUKUBA (2019).

O modelo climático regional mais utilizado na América Latina é o modelo Eta, adotado pelo INPE desde 1997 em seus estudos climáticos. Ele conta com resoluções espaciais de 20 até 5 km, permitindo um maior detalhamento e precisão nos resultados das modelagens (CHOU et al., 2014b).

## 2.6 RESULTADOS DE TRABALHOS SEMELHANTES

Chou et al. (2014a) aplicaram o modelo Eta para regionalizar três MCG's: HadGEM2-ES, BESM e MIROC5. Foram projetados dados de temperatura e precipitação para a América do Sul, América Central e Caribe, para o período de 1961-1990. A regionalização dos modelos BESM e MIROC5 produziu tendências de seca para o período, enquanto a do modelo HadGEM2-ES, de umidade. No Brasil, as simulações de precipitação apresentaram grandes tendências negativas para a região norte durante o verão e positivas para o sul fora do inverno. Os autores sugeriram que a elucidação desses erros requer mais investigações, porém, uma possível explicação é a diferente classificação do clima para essas duas regiões. Embora as simulações tenham apresentado maior quantidade de valores mensais extremos de precipitação e temperatura do que o observado e tenham subestimado a temperatura, em geral, as simulações representaram bem o clima.

Silveira et al. (2014) realizaram projeções de vazões para as bacias hidrográficas brasileiras que possuem usinas hidrelétricas. Foram realizadas projeções para os períodos de 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2099, pelo modelo hidrológico SMAP, para diferentes cenários futuros de desenvolvimento econômico e usos de tecnologias (A1B, B1 e A2). Os dados de precipitação e evaporação que alimentaram o SMAP foram obtidos a partir de projeções dos modelos climáticos globais utilizados no quarto relatório do IPCC. As projeções para as regiões norte e nordeste foram bastante divergentes entre os modelos. Entretanto, para as regiões sul, sudeste e centro-oeste, os modelos convergiram para uma redução nas vazões das bacias destas regiões, indo em oposição aos resultados obtidos por outros trabalhos semelhantes como o de Tiezzi et al. (2019), que prevê um aumento na vazão das bacias hidrográficas da região sul. Essas divergências encontradas mostram como as projeções climáticas são carregadas de incertezas. Porém, a utilização de modelos diferentes contribui para essas incertezas e o rol de diferentes projeções define possíveis cenários a ser levados em conta na gestão das bacias hidrográficas.

Fernandes et al. (2017) estimaram os impactos nas vazões regularizadas de dois reservatórios localizados na bacia hidrográfica do Rio Jaguaribe, Ceará, comparando os cenários RCP 4.5 e 8.5. Para os dois cenários, foram obtidos dados de precipitação provenientes de 20 MCG's do quinto relatório (AR5) do IPCC. Esses dados alimentaram o modelo SMAP, que gerou projeções de vazões afluentes aos reservatórios. Por meio do modelo AcquaNet, foram simuladas as vazões regularizadas pelos reservatórios que ocorreriam com 90% de frequência para os períodos de 2040-2069 e 2070-2099. Em geral, os modelos indicaram redução nas vazões regularizadas. Entretanto, houve um contraste quanto ao aumento ou diminuição, bem como a amplitude dos valores de vazões projetados.

Sabóia et al. (2017) estimaram os impactos nos sistemas de drenagem urbana de uma sub-bacia hidrográfica da cidade de Fortaleza-CE, que poderiam ser causados por cenários de alteração climática. Foram utilizados dados de 6 MCG's nos cenários RCP 4.5 e 8.5 para estimar novas curvas de intensidade, duração e frequência (IDF) de precipitação para a região. O programa HEC-HMS utilizou os valores de precipitação gerados pelas novas curvas IDF para projetar as vazões nos sistemas de drenagem. A maioria das projeções indicou aumento nas vazões de pico. As projeções do cenário RCP 8.5 apresentaram maior magnitude desse aumento.

Tiezzi et al. (2019) realizaram um estudo do impacto nas vazões de 26 bacias do Brasil que possuem Usinas Hidrelétricas, provocado por alterações na precipitação. Foi estimada a tendência de vazão média das bacias para o período de 2011-2100. Foram utilizados dados de chuva estimados por Collins et al. (2012) por meio do MCG HadCM3. Esses dados alimentaram os modelos chuva-vazão SMAP e Stochastic Linear Model (SLM), que geraram as projeções de vazões. Os resultados encontrados indicaram uma tendência de redução na vazão das bacias hidrográficas da região norte e um aumento nas bacias da região sul.

## **ARTIGO – METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DE VAZÕES IMPACTADAS PELAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA DE USOS MÚLTIPLOS**

### **RESUMO**

A mudança do clima é um reflexo da alteração de uma ou mais de suas variáveis representativas. A precipitação e a evaporação são algumas destas variáveis e também são os dados de entrada dos modelos de previsão de vazão, informação primordial na gestão de uma bacia hidrográfica. Nesse contexto, o presente trabalho visa desenvolver uma metodologia para previsão da vazão média mensal em uma bacia hidrográfica com usos múltiplos, influenciada por mudanças climáticas. O local específico do estudo foi a Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Cipó, Poços de Caldas-MG. Foram utilizados dados de precipitação e evapotranspiração projetados pelo Modelo Climático Regional (MCR) Eta-CPTEC aninhado aos Modelos Climáticos Globais (MCG's): CanESM2, HadGEM2-ES e MIROC5. Foram realizadas projeções nos cenários RCP 4.5 e 8.5, ambos para os períodos de 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099. Esses dados alimentaram o modelo hidrológico chuva-vazão denominado SMAP, que após calibrado, gerou as projeções de vazão. A metodologia apresentou resultados semelhantes aos métodos utilizados como referência. Como principais aspectos pode ser citada a alta resolução das previsões das variáveis climáticas (grades de 5 km e de 20 km de largura) e a boa resposta da metodologia para uma bacia de pequeno porte. Assim como toda modelagem climática traz incertezas, a necessidade de calibração do modelo SMAP com dados de outra bacia hidrográfica devido à inexistência de dados se mostrou a principal limitação do método. Entretanto, justamente para locais com baixa disponibilidade de dados, situação recorrente da realidade brasileira quando se trata de bacias de menor porte, a metodologia se apresenta como uma boa alternativa na obtenção de estimativas iniciais de vazão, auxiliando na gestão dos recursos hídricos.

**Palavras-chave:** Variação climática. Disponibilidade hídrica. Vazão média mensal. Modelagem hidrológica. Modelos Climáticos. Pequenas bacias hidrográficas.

## ABSTRACT

Climate change is a reflection of changing one or more of its representative variables. Precipitation and evaporation are some of these variables and are also the input data from the flow prediction models, which is the primary information for managing a watershed. In this context, the present work aims to develop a methodology for forecasting the monthly average flow in a multi-purpose watershed, influenced by climate change. The specific study site was the Ribeirão do Cipó River Basin, Poços de Caldas-MG. Precipitation and evapotranspiration data designed by the Eta-CPTEC Regional Climate Model (RCM) nested with the Global Climate Models (GCM's): CanESM2, HadGEM2-ES and MIROC5 were used. Projections were made in scenarios RCP 4.5 and 8.5, both for the periods 2010-2039, 2040-2069 and 2070-2099. These data fed the rain-flow hydrological model called SMAP, which after calibrated, generated the flow projections. The methodology presented results similar to the methods used as reference. The main aspects are the high resolution of climate variable forecasts (5 km and 20 km wide grids) and the good response of the methodology for a small basin. As all climate modeling brings uncertainties, the need to calibrate the SMAP model with data from another watershed due to the lack of data proved to be the main limitation of the method. However, precisely for locations with low data availability, a recurring situation in the Brazilian reality when it comes to smaller basins, the methodology presents itself as a good alternative in obtaining initial flow estimates, helping in the management of water resources.

**Keywords:** Climatic variation. Water availability. Average monthly flow. Hydrological modeling. Climate models. Small river basins.

## 1 INTRODUÇÃO

O efeito estufa é um processo natural que ocorre no globo por conta da absorção de radiação solar pelos gases presentes na atmosfera, como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Entretanto, o planeta está sofrendo um aquecimento adicional em decorrência da emissão de gases de efeito estufa por atividades humanas. A proporcionalidade entre a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera e a temperatura média global é um indício do aquecimento (ARRHENIUS, 1896; CALLENDAR, 1938; REVELLE; HANS, 1957; TUCCI, 2005; SILVA, 2015).

As emissões atingiram seus maiores índices na atualidade. Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (2014), está claro que as ações antropogênicas estão alterando o clima e essas mudanças estão afetando diversos sistemas naturais.

O ciclo hidrológico é um dos sistemas afetados. Além do aumento da temperatura global, as alterações climáticas provocam alterações nos regimes de precipitação e evapotranspiração, que por sua vez, influenciam na disponibilidade hídrica das bacias hidrográficas. (TUCCI, 2005).

A bacia hidrográfica do Ribeirão do Cipó, objeto do presente estudo, possui um barramento de regularização que atende cinco Hidrelétricas que funcionam em cascata à jusante, totalizando uma potência instalada de aproximadamente 34,7 MW (ERHA, 2012). A mesma barragem ainda permite a captação de 0,42 m<sup>3</sup>/s para abastecimento público de água, além de ser um local de turismo e lazer. Diante desses usos múltiplos do recurso hídrico, é importante que haja informações para subsidiarem a tomada de decisões quanto ao gerenciamento desse recurso (SUPRAM, 2012).

Lopes et al. (2008) apresentaram um modelo para estimativa de vazões para o Sistema Interligado Nacional (SIN) de produção de energia elétrica utilizando previsões climáticas. Foram utilizadas estimativas de precipitação para a América do Sul realizadas pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), distribuídas espacialmente em grades de 200 por 200 km, em intervalos mensais para um horizonte semestral. Esses dados alimentaram os modelos hidrológicos Soil Moisture Accounting Procedure (SMAP) e Modelo Estocástico Linear (MEL), que produziram previsões de vazões para 16 bacias e sub-bacias hidrográficas, nas quais estão a maior parte da energia e do armazenamento do SIN. Os resultados obtidos pelos dois modelos e também pela combinação deles alimentaram o Sistema de Suporte a Decisão (SSD) denominado GERAVAZ, que auxilia na tomada de decisão em relação ao planejamento energético fornecendo informações de qualidade em uma interface gráfica amigável. Baseados nos resultados, os autores concluíram que a metodologia foi bem-sucedida na previsão de vazões das áreas estudadas. Entretanto, como a transformação de chuva para vazão apresentou bons resultados, foi ressaltado que a precisão das estimativas de vazões está intimamente ligada à precisão das estimativas de precipitação. Como potencial de melhoria nas estimativas, foi identificada a redução no tamanho das grades de previsão de precipitação, tornando o modelo mais discretizado.

Chou et al. (2014b) utilizaram o MCR Eta na resolução 20 por 20 km, aninhado a dois MCG's: HadGEM2-ES e MIROC5, para avaliar variações climáticas em dois cenários de concentração de gases de efeito estufa na atmosfera (RCP 4.5 e RCP 8.5) na América do Sul. As previsões foram divididas em três normais climatológicas: 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100. As respostas às mudanças climáticas foram maiores no modelo Eta-HadGEM2-ES do que no Eta-MIROC5. As projeções de precipitação indicaram redução na região sudeste do Brasil, a se intensificar ao final do século 21. Para esta época também foi estimada uma maior frequência nos eventos extremos de temperatura e precipitação. Apesar do aumento no número de eventos extremos de precipitação, em termos de totais anuais, foi prevista uma redução. Os autores concluíram que os diferentes comportamentos apresentados pelos modelos aninhados e em dois cenários RCP indicam a existência de incertezas na avaliação das mudanças climáticas. Portanto, mais modelos devem ser utilizados para o entendimento da modelagem de mudanças climáticas.

Lyra et al. (2017) aplicaram a combinação Eta-HadGEM2-ES para avaliar as mudanças climáticas nas regiões metropolitanas das cidades de São Paulo, Rio de Janeiro e Santos. O MCR Eta foi aplicado com uma resolução espacial de 5 por 5 km, considerada bastante alta, para avaliar a temperatura e precipitação nos cenários RCP 4.5 e 8.5 projetados para o período de 1961-2100. Na comparação entre as simulações e os valores observados para o período histórico (1961-1990), foi concluído que houve um bom ajuste dos dados. Também foi notado que a resolução de 5 km representou melhor os dados observados do que a de 20 km. Os valores extremos de precipitação e temperatura foram consistentes com o observado, entretanto, nas duas resoluções as precipitações relacionadas às Zonas de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) foram subestimadas. Os valores de pico de precipitação (chuvas diárias acima de 150 mm) também não foram bem representados, porém são eventos pouco frequentes. As previsões futuras indicaram um grande aumento da temperatura, principalmente durante o verão e uma queda na precipitação, em especial no cenário RCP 8.5. As chuvas anuais sofreram uma redução de 40 a 50%, indicando uma tendência de seca.

Tiezzi et al. (2019) realizaram um estudo do impacto nas vazões de 26 bacias hidrográficas do Brasil que possuem Usinas Hidrelétricas, provocado por alterações na precipitação. Foi estimada a tendência de vazão média das bacias hidrográficas para o período de 2011-2100. Foram utilizados dados de chuva estimados por Collins et al. (2012) por meio do MCG HadCM3, que alimentaram o MCR Eta, discretizado em células de 40 por 40 km. Esses dados alimentaram os modelos chuva-vazão SMAP e Stochastic Linear Model (SLM),

que geraram as projeções de vazões. Os resultados encontrados indicaram uma tendência de redução na vazão das bacias hidrográficas do Norte e um aumento nas bacias hidrográficas do Sul. Especificamente na região sudeste, o aumento da vazão foi pequeno, ainda que as projeções tenham indicado redução nos índices de precipitação. Diante deste fenômeno, os autores concluíram que reduções nos índices de precipitação não provocam reduções de mesma grandeza nas vazões.

O presente estudo buscou adaptar as melhores práticas de estimativa de vazão afetada pelas mudanças climáticas, aplicando-as em uma bacia hidrográfica de pequeno porte e com usos múltiplos. A metodologia consistiu em combinações do MCR Eta-CPTEC aninhado aos MCG's: CanESM2, HadGEM2-ES e MIROC5, com o Modelo Hidrológico SMAP nos cenários RCP 4.5 e 8.5. Essas combinações produziram oito projeções diferentes para a vazão média mensal da bacia hidrográfica do Ribeirão Cipó, uma bacia de 75 km<sup>2</sup> utilizada para geração de energia, abastecimento público e lazer do município de Poços de Caldas-MG.

Para maior fluidez na leitura do artigo, foi elaborada a tabela 1, que apresenta as convenções de nomenclatura adotadas para os modelos utilizados:

Tabela 1 - Convenções adotadas para se referir aos diferentes modelos e suas combinações ao longo do artigo

<b>Convenção adotada</b>	<b>Modelo representado</b>
Eta	Modelo Eta versão CPTEC
CanESM2	Modelo Climático Global CanESM2
HadGEM2-ES	Modelo Climático Global HadGEM2-ES
MIROC5	Modelo Climático Global MIROC5
Eta-CanESM2	Modelo Climático Regional Eta na resolução 20x20 km acoplado ao Modelo Climático Global CanESM2
Eta-MIROC5	Modelo Climático Regional Eta na resolução 20x20 km acoplado ao Modelo Climático Global MIROC5
Eta-HadGEM2-ES-20km	Modelo Climático Regional Eta na resolução 20x20 km acoplado ao Modelo Climático Global HadGEM2-ES
Eta-HadGEM2-ES-5km	Modelo Climático Regional Eta na resolução 5x5 km acoplado ao Modelo Climático Global HadGEM2-ES

Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

## 2.1 ÁREA DE ESTUDO

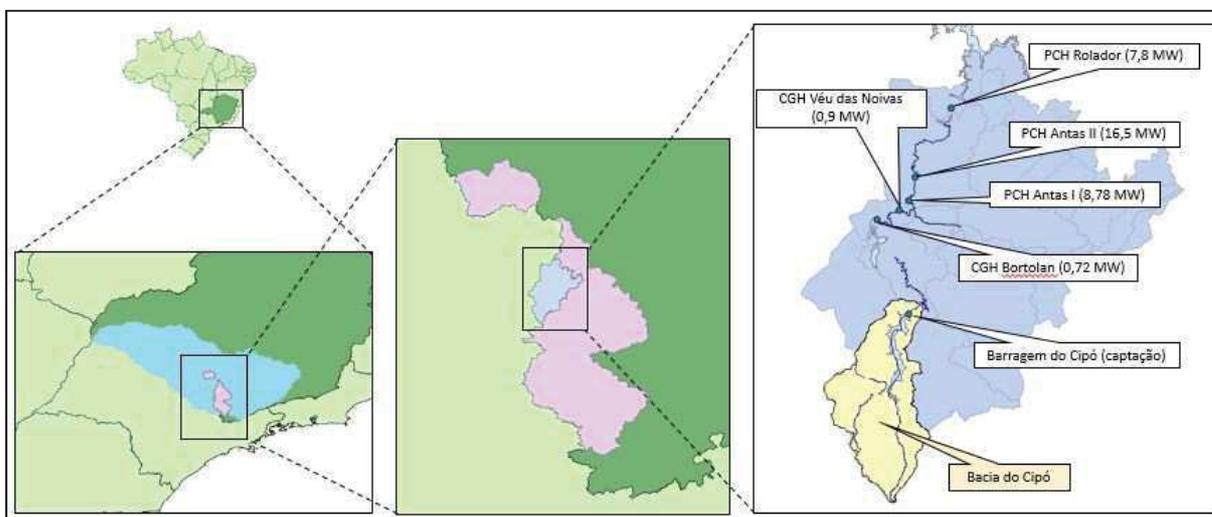
A bacia hidrográfica do Ribeirão Cipó compreende o manancial objeto desse estudo, que dentre outros usos, é utilizado para geração de energia e abastecimento público de água do município de Poços de Caldas no estado de Minas Gerais.

O Ribeirão Cipó é afluente do Rio das Antas, que verte para o Rio Pardo, integrante da Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) GD6: Afluentes Mineiros dos Rios Mogi-Guaçu e Pardo, contida na Bacia Hidrográfica do Rio Grande (GD1 a GD8) (EDSON, 2014).

Em 1999 foi instalada a “Represa Lindolpho Pio da Silva Dias – Barragem Ribeirão do Cipó”, que formou no curso um reservatório com área alagada de 4,6 km<sup>2</sup>. O barramento tem a finalidade de regularização de vazão para geração de energia e abastecimento público de água. No reservatório também são permitidas atividades de turismo, lazer e navegação (SUPRAM, 2012).

É permitida a captação de no máximo de 0,42 m<sup>3</sup>/s, vazão suficiente para atender por volta de 47% da demanda por abastecimento público urbano. A captação e demais processos até a distribuição é realizada pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto de Poços de Caldas (DMAE), enquanto que a operação do reservatório e das Hidrelétricas fica sob a responsabilidade do Departamento Municipal de Eletricidade de Poços de Caldas (DME) (EDSON, 2014).

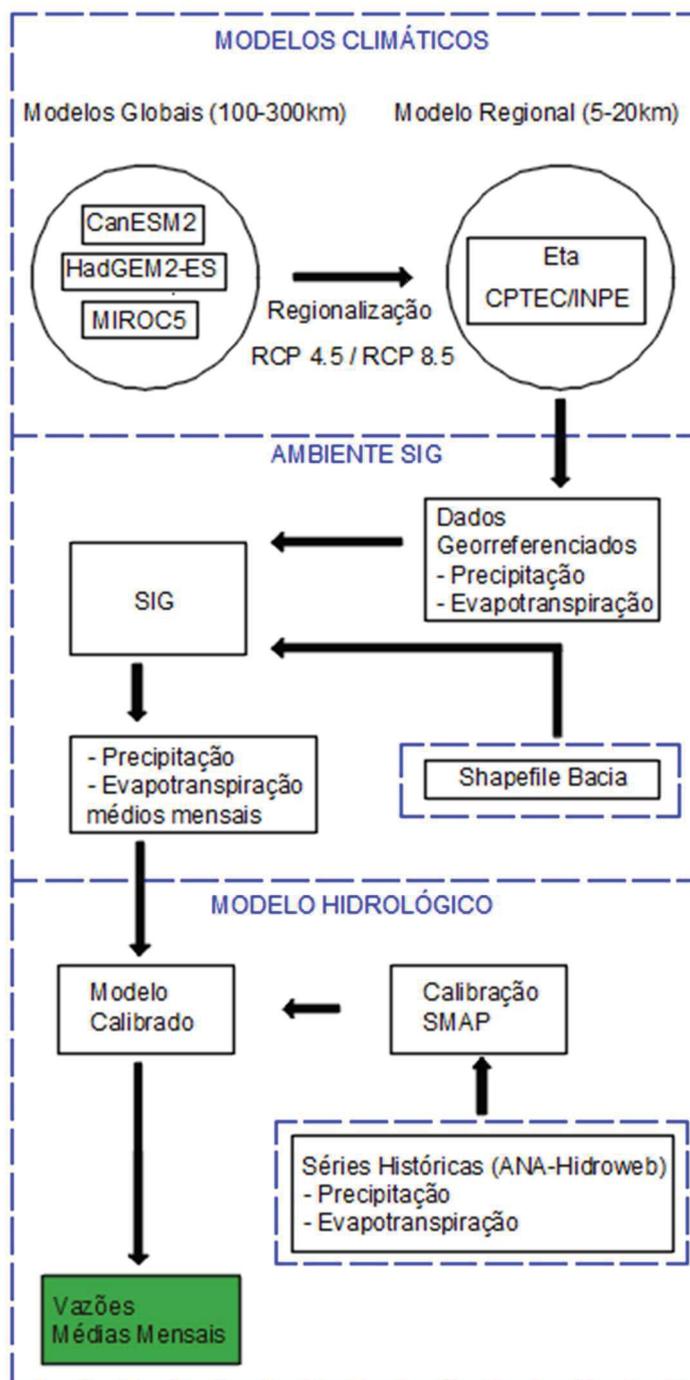
Figura 1 – Localização e delimitação da área de estudo – Bacia Hidrográfica do Ribeirão Cipó



Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

A figura 1 indica a localização e delimitação da área de estudo e a figura 2 mostra as três macroetapas em que o estudo foi desenvolvido.

Figura 2 – Mapa dos processos executados no desenvolvimento na metodologia, subdivididos em três macroetapas: modelos climáticos, ambiente SIG e modelagem hidrológica



Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

## 2.2 MODELOS CLIMÁTICOS

As projeções de precipitação e evapotranspiração resultantes do aninhamento do modelo climático regional aos modelos climáticos globais em dois cenários RCP, foram obtidas junto ao projeto denominado “Projeções de Mudança do Clima para a América do Sul Regionalizadas pelo Modelo Eta (PROJETA)”.

O projeto trata-se de uma iniciativa do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), que pertence ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e tem como objetivo promover o acesso e disponibilização dos dados de simulações regionalizadas de forma automatizada.

A regionalização disponibilizada consiste na simulação do clima da América do Sul, Central e do Caribe pelo MCR Eta, utilizando como condições de contorno os MCG's: CanESM2, HadGEM2-ES e MIROC5. Devido à alta demanda computacional que as projeções requerem, somente as variáveis do clima do sudeste brasileiro regionalizado pelo modelo HadGEM2-ES estavam disponíveis em células de 5 por 5 km no período em que o artigo foi desenvolvido. Na regionalização dos demais modelos, incluindo o HadGEM2-ES, as projeções climáticas foram dadas em células de 20 por 20 km.

No ambiente do PROJETA, foi possível definir os cenários climáticos conforme a tabela 2, a frequência dos dados (anual, mensal, diária e 3 horas), delimitar a área de interesse e escolher o período dos dados no intervalo de 2006-2099 para as variáveis climáticas de interesse. Devido aos cenários RCP se referirem aos patamares de forçante radioativa no ano de 2100 e com o intuito de obter dados correspondentes a três normais climatológicas, foram geradas projeções para os períodos de 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099. Como o objetivo do trabalho foi estimar vazões para fins de planejamento da bacia hidrográfica, a frequência escolhida foi a mensal.

Tabela 2 – Países com seus respectivos Modelos Climáticos Globais, nome da instituição onde foram desenvolvidos, cenários RCP e resolução utilizados

(continua)				
País	Modelo	Instituição	Cenários RCP	Resolução
Canadá	CanESM2	<i>Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis</i>	4.5 / 8.5	20x20 km
Inglaterra	HadGEM2-ES	<i>Met Office Hadley Centre</i>	4.5 / 8.5	5x5 km

(conclusão)

País	Modelo	Instituição	Cenários RCP	Resolução
Inglaterra	HadGEM2-ES	<i>Met Office Hadley Centre</i>	4.5 / 8.5	20x20 km
Japão	MIROC5	<i>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology</i>	4.5 / 8.5	20x20 km

Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

Os dados, obtidos em arquivos formato .CSV, serviram como input da plataforma de Sistema de Informações Geográficas (SIG).

### 2.3 AMBIENTE SIG

No ambiente SIG, os dados georreferenciados de precipitação e evapotranspiração foram tratados, de modo a se obter os valores médios mensais delimitados para a Bacia Hidrográfica do Ribeirão Cipó. O software utilizado foi o ARCGIS®.

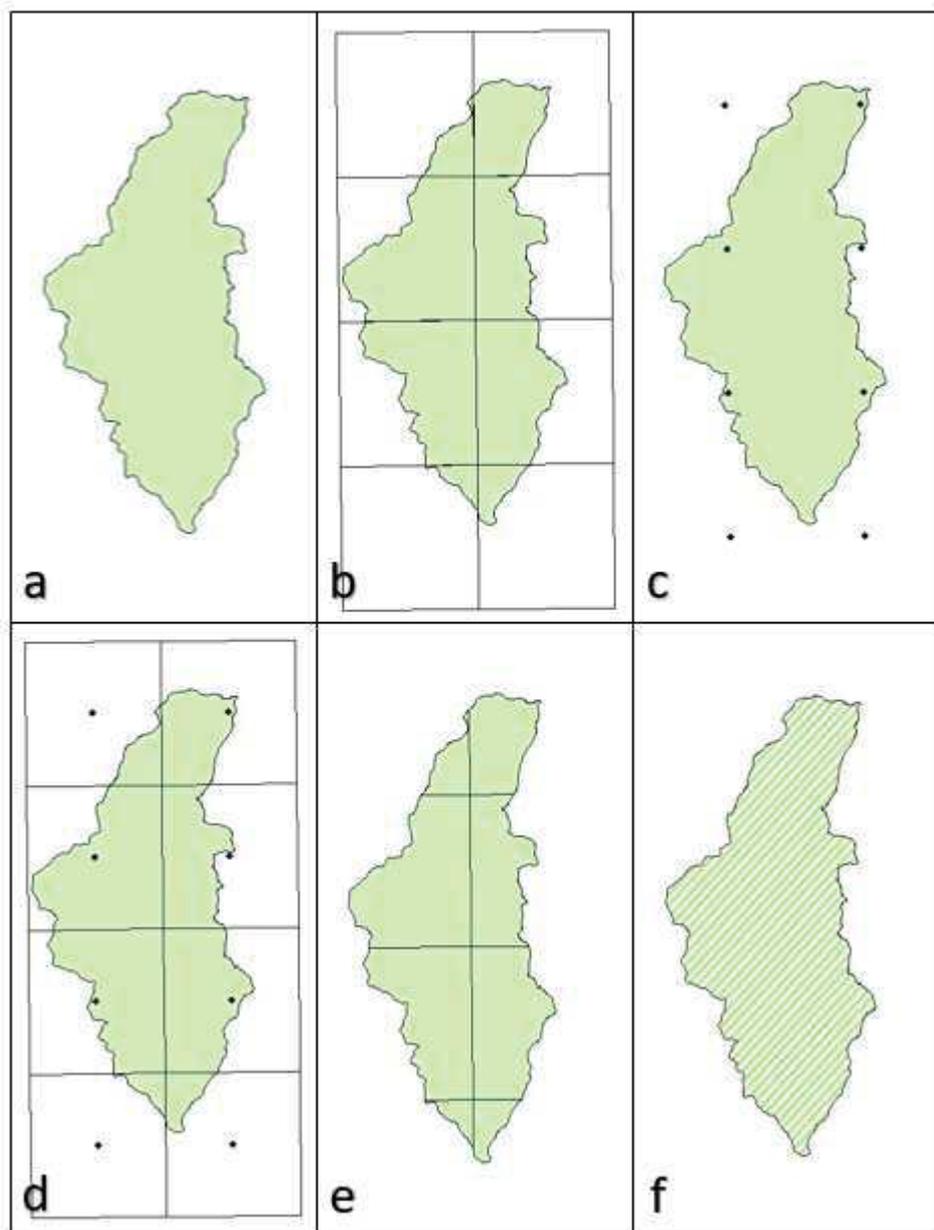
Os procedimentos realizados foram basicamente os seguintes:

- Projeção da área de drenagem da bacia hidrográfica (a);
- Inserção das grades de 20km ou 5 km (b);
- Inserção dos dados (precipitação e evapotranspiração) (c);
- União dos dados às grades (d);
- Intersecção das grades contendo os dados à área da bacia (e);
- Dissolução dos polígonos formados à área da bacia hidrográfica, obtendo os valores médios mensais por meio da ferramenta “calculadora de campo” (f).

A figura 3 mostra a visualização gráfica, obtida no uso do software, correspondente a cada passo do procedimento, na resolução de grades de 5 por 5 km. Para as grades de 20 por 20 km as imagens são semelhantes, mudando somente a quantidade e o tamanho das células.

Os resultados obtidos foram convertidos em planilha do excel, para alimentarem o modelo hidrológico SMAP.

Figura 3 – Interfaces visualizadas no software ArcGIS correspondentes a cada etapa do procedimento de cálculo das precipitações e evapotranspirações médias da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Cipó



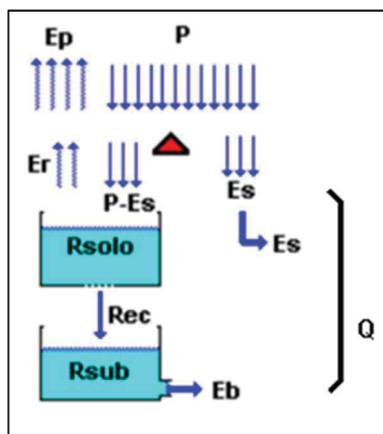
Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

## 2.4 MODELO HIDROLÓGICO

Para as projeções das vazões, foi aplicado o modelo chuva-vazão *Soil Moisture Accounting Procedure* – SMAP (LOPES, et al., 1981). Ele é um modelo determinístico e seu

princípio é baseado no balanço de massa utilizando dois reservatórios matemáticos, um representando o solo e o outro o aquífero. A figura 4 ilustra o esquema conceitual do modelo.

Figura 4 - Esquema conceitual do modelo hidrológico SMAP



Fonte: LOPES (1999).

Mais informações sobre a metodologia do modelo podem ser obtidas em LOPES, J. E. G.; *Manual do modelo SMAP*. 1999.

Para a aplicação das projeções de precipitação e evapotranspiração ao modelo hidrológico, foi necessário realizar sua calibração previamente.

Para uma boa calibração, são recomendados cinco anos de dados consecutivos de precipitação, evapotranspiração e vazão. Devido à indisponibilidade de dados referentes à evapotranspiração e vazão para a bacia hidrográfica estudada, foi empreendido como alternativa a calibração utilizando dados observados de uma bacia hidrográfica próxima. Tal recomendação foi encontrada em Lopes (1999) para a calibração do SMAP e em Klemes (1986), citado por Tucci; Silveira (1998) e por Pereira et al. (2016) para validação de modelos de simulação hidrológica.

Foram utilizados os dados do período de 1969-1974 da bacia hidrográfica do Rio Machado, situada no Município homônimo, distante aproximadamente 80 km da bacia hidrográfica estudada. Os dados foram obtidos junto ao Portal HidroWeb, uma ferramenta da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), que abriga e disponibiliza o acesso aos dados de monitoramento dos parâmetros relacionados aos rios e as chuvas.

Conforme as recomendações para calibração, foram utilizados dados após um período de seca. Ainda de acordo com as boas práticas, foi realizada a calibração semiautomática, iniciando pela verificação da aderência do hidrograma no instante inicial pela introdução

manual dos dados de vazão básica e teor de umidade iniciais, Ebin e Tuin, respectivamente. Em seguida, ainda por meio de tentativa e erro, foi verificado o ajuste dos hidrogramas calculado e observado, alterando o valor da constante de recessão do escoamento básico (Kkt).

Quando foi atingido o melhor ajuste possível, devido à dificuldade em avaliar os demais parâmetros: capacidade de saturação do solo (Str), parâmetro de escoamento superficial (Pes) e parâmetro de recarga subterrânea (Crec), foi utilizada a calibração automática, por meio da ferramenta Solver do Excel.

Além da avaliação visual por meio da interpretação gráfica dos hidrogramas calculado e observado, também foi feita a avaliação por meio de dois índices estatísticos quantitativos: Nash-Sutcliff (NSE) e Tendência Percentual (Pbias).

A sugestão para classificação do ajuste do modelo segundo os índices está representada na tabela 3.

Após a calibração automática, o procedimento foi repetido outras vezes, até ser obtido o melhor ajuste encontrado entre os índices estatísticos e a análise visual dos hidrogramas. Dependendo da finalidade de uso do recurso hídrico, é preferível que um certo aspecto do hidrograma seja mais fiel à realidade do que seu ajuste como um todo. No caso do presente estudo, por se tratar de uma bacia hidrográfica com usos múltiplos, foi dada atenção especial aos trechos de recessão do hidrograma, de modo a atenuar as superestimções das vazões mínimas, o que criaria um falso cenário de disponibilidade hídrica.

Tabela 3 - Classificação do ajuste do modelo hidrológico SMAP pelos índices estatísticos Nash-Sutcliff (NSE) e Tendência Percentual (Pbias)

<b>Classificação do Ajuste</b>		
	<b>NSE</b>	<b>abs (Pbias)</b>
muito bom	> 0,6	< 10
bom	de 0,6 a 0,4	de 10 a 15
satisfatório	de 0,4 a 0,1	de 15 a 25
insatisfatório	< 0,1	> 25

Fonte: LOPES (1999).

Após a calibração, foi aplicado o modelo propriamente dito, que consistiu no cálculo da vazão por meio da equação obtida pela calibração do modelo, alimentada com as projeções de precipitação e evapotranspiração.

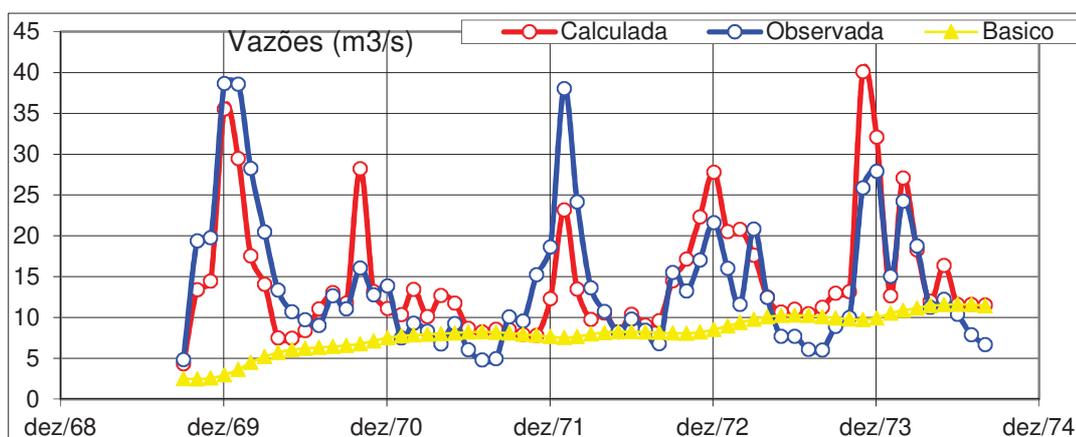
Conforme já citado, as projeções abrangeram o período de 2010-2099, de modo que fossem gerados 90 anos de dados, o correspondente a três normais climatológicas. A escolha

do período também foi baseada no fato de 2100 ser o ano de referência para os patamares de concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera terrestre em cada cenário RCP.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme pode ser observado na figura 5, a calibração por meio dos hidrogramas apresentou disparidades entre os picos observados e os calculados. Apesar da diferença entre os valores, os picos ocorreram no mesmo instante de tempo, característica importante quando se pretende prever eventos extremos. Ainda segundo a classificação dos índices estatísticos, o ajuste foi considerado “muito bom” pelo método da Tendência Percentual, sendo obtido o valor de 3, enquanto no método de Nash-Sutcliff, o índice também se aproximou da classificação “muito bom”, sendo obtido o valor de 0,58.

Figura 5 – Curvas de calibração do modelo SMAP com os dados da Bacia Hidrográfica do Rio Machado



Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

As tabelas 4 e 5 contêm os valores de vazão média, máxima e mínima mensal para os cenários RCP 4.5 e 8.5 respectivamente, agrupados em três normais climatológicas correspondentes aos períodos de 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099. Também foram calculadas as Vazões Ecológica (Q<sub>95</sub>) e Média de Longo Termo (Q<sub>MLT</sub>) a título de comparação com valores encontrados no Plano Diretor de Abastecimento de Água (HYDROS, 2013).

Tabela 4 - Vazões (m<sup>3</sup>/s) média, máxima e mínima mensal dos períodos 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099 e vazões ecológica (Q<sub>95</sub>) e média de longo termo (Q<sub>MLT</sub>) do período 2010-2099 projetadas para o cenário RCP 4.5

RCP 4.5					
VAZÃO (m <sup>3</sup> /s.mês)	PERÍODO	Eta- CanESM2	Eta-HadGEM2-ES - 5Km	Eta-HadGEM2-ES - 20Km	Eta- MIROC5
MÉDIA	2010-2039	3,29	2,31	1,78	2,98
	2040-2069	3,10	2,55	2,12	3,34
	2070-2099	3,19	2,59	2,09	2,96
MÁXIMA	2010-2039	7,41	6,45	3,72	7,89
	2040-2069	9,22	8,86	8,40	8,23
	2070-2099	7,09	9,52	7,00	7,41
MÍNIMA	2010-2039	1,93	1,22	1,03	1,73
	2040-2069	1,78	1,26	1,12	1,95
	2070-2099	1,74	1,29	1,14	1,77
Q <sub>95</sub>	2010-2099	2,08	1,44	1,23	1,95
Q <sub>MLT</sub>	2010-2099	3,19	2,48	3,09	1,73

Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

Tabela 5 - Vazões (m<sup>3</sup>/s) média, máxima e mínima mensal dos períodos 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099 e vazões ecológica (Q<sub>95</sub>) e média de longo termo (Q<sub>MLT</sub>) do período 2010-2099 projetadas para o cenário RCP 8.5

RCP 8,5					
VAZÃO (m <sup>3</sup> /s.mês)	PERÍODO	Eta- CanESM2	Eta-HadGEM2-ES - 5Km	Eta-HadGEM2-ES - 20Km	Eta- MIROC5
MÉDIA	2010-2039	3,23	2,55	2,09	2,70
	2040-2069	3,04	2,58	2,18	3,24
	2070-2099	2,52	2,23	2,03	3,55
MÁXIMA	2010-2039	8,09	10,42	7,16	5,94
	2040-2069	9,29	7,87	5,64	9,33
	2070-2099	10,14	10,92	9,91	11,46
MÍNIMA	2010-2039	1,96	1,32	0,99	1,67
	2040-2069	1,45	1,37	1,34	1,70
	2070-2099	1,38	1,30	1,16	2,05
Q <sub>95</sub>	2010-2099	1,62	1,13	1,30	1,95
Q <sub>MLT</sub>	2010-2099	2,93	2,45	2,10	3,16

Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

Os valores extremos encontrados foram destacados nas tabelas. Nos dois cenários (RCP 4.5 e RCP 8.5), a maior vazão mensal projetada ocorreu no terceiro período, ou seja, 2070-2099, época na qual a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera global atingirá seus maiores valores. De modo oposto à vazão máxima, a menor vazão mensal ocorreu no primeiro período, 2010-2039.

Embora tenha ocorrido essa divergência nos períodos, a menor vazão mensal de ambos cenários foi projetada pelo modelo Eta-HadGEM2-ES – 20km, enquanto que a maior vazão mensal do RCP 4.5 foi obtida pelo Eta-HadGEM2-ES – 5km e a maior vazão mensal do RCP 8.5 pelo Eta-MIROC5. Porém, a segunda maior vazão foi a calculada pelo modelo Eta-HadGEM2-ES – 5km, também no período de 2070-2099.

Na comparação entre os cenários, o cenário RCP 8.5 apresentou tanto o menor valor de vazão média mensal, quanto o maior em comparação com o RCP 4.5.

Foi observado também que quase a totalidade dos menores valores de vazão mensal média, máxima e mínima foram os projetados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES – 20km, enquanto que os maiores alternaram principalmente entre os projetados pelos modelos Eta-CanESM2 e Eta-MIROC5. Esse comportamento apresentou a mesma tendência nos dois cenários RCP.

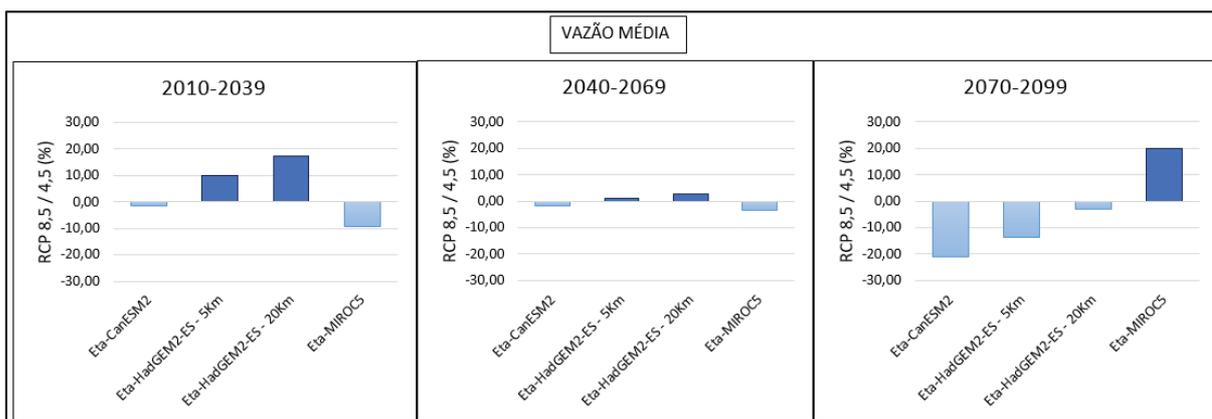
No cenário RCP 4.5, comparando os menores valores de vazão média mensal com os maiores entre os modelos, foram obtidas as variações de 84,91%, 57,84% e 52,88%, para os períodos de 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099, respectivamente. Embora tenha sido identificada uma tendência de as projeções dos modelos convergirem a um valor comum ao longo dos períodos, a diferença encontrada entre os valores extremos ainda foi considerável para o último período.

No cenário RCP 8.5, as mesmas comparações produziram as variações de 54,97%, 48,41% e 75,16%, para os períodos de 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099, respectivamente. Neste cenário, as diferenças entre as projeções de cada modelo começaram menores, entretanto no último período aumentou expressivamente a divergência.

Quanto às Vazões Ecológica (Q<sub>95</sub>) e Média de Longo Termo (Q<sub>MLT</sub>), o estudo realizado no Plano Diretor encontrou os respectivos valores para a Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Cipó: 0,27 m<sup>3</sup>/s e 1,44 m<sup>3</sup>/s. Como no estudo esses valores foram obtidos a partir da regionalização de séries históricas, ficou comprometida uma comparação mais aprofundada. Entretanto, foi observado que os valores projetados foram consideravelmente superiores aos obtidos pelo plano diretor.

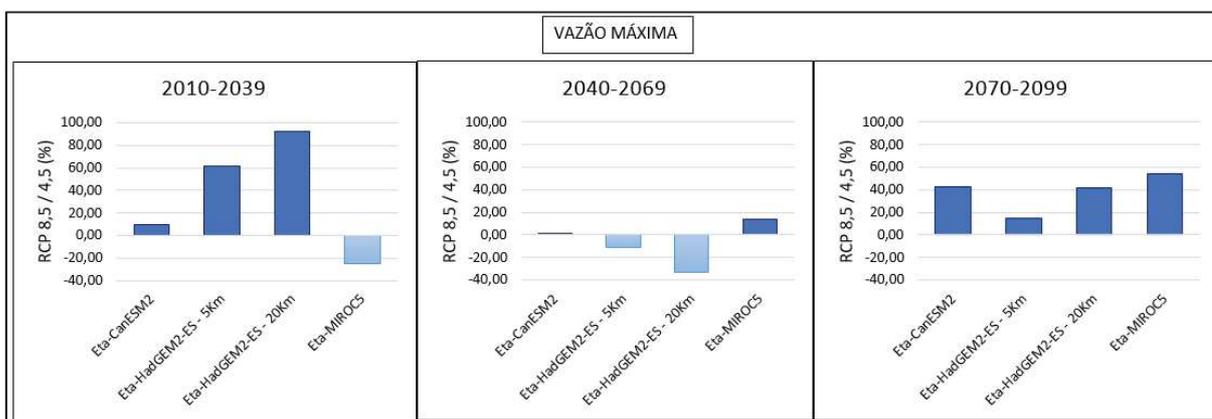
A comparação das projeções de vazão mensal média, máxima e mínima para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 por cada modelo está apresentada nas figuras 6 a 8. Por questões de visualização, foi utilizada uma escala diferente na figura da vazão máxima.

Figura 6 – Variações das vazões mensais médias entre os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 por modelo e por período



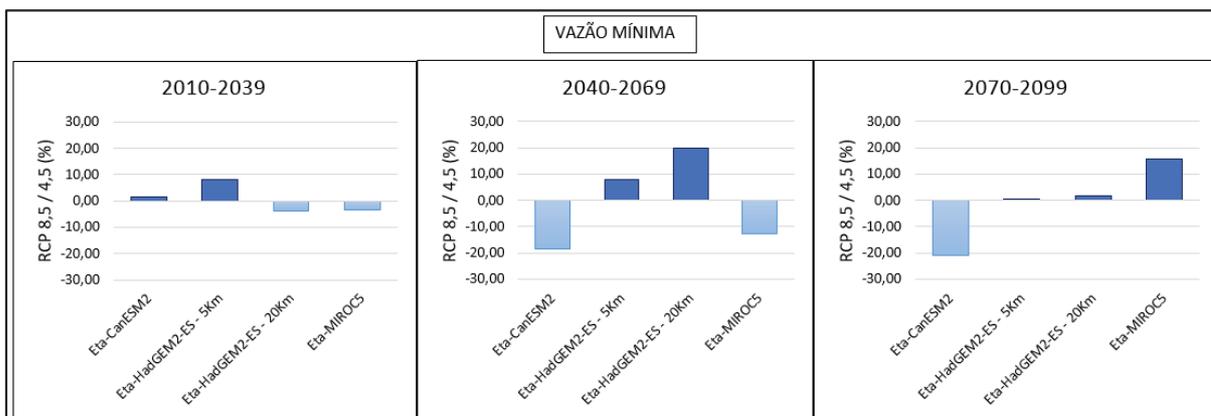
Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

Figura 7 – Variações das vazões mensais máximas entre os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 por modelo e por período



Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

Figura 8 – Variações das vazões mensais mínimas entre os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 por modelo e por período



Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

Em termos absolutos, os modelos cujas projeções apresentaram maior variação quando comparado o cenário RCP 4.5 com o RCP 8.5, foram respectivamente: Eta-HadGEM2-ES – 20km, Eta-MIROC5, Eta-HadGEM2-ES – 5km e Eta-CanESM2.

Comparando-se o modelo Eta-HadGEM2-ES em suas duas resoluções, foi observado que na maioria dos casos eles seguiram uma mesma tendência, entretanto na resolução de 5 por 5 km foram obtidas variações predominantemente menores.

O período de 2040-2069 foi o que apresentou menos variações entre os dois cenários, exceto nos valores de vazão mínima. Porém, isso pode ser justificado pelo fato de que nos valores mais baixos qualquer alteração já é significativa.

Os valores de vazão mensal mínima apresentaram variações bem equilibradas entre os diferentes modelos aplicados. O mesmo ocorreu com a vazão média, embora no período de 2070-2099 tenha apresentado uma tendência de diminuição. Já os valores de vazão máxima, apresentaram uma ligeira queda no período de 2040-2069, porém nos outros dois períodos apresentaram aumento de seus valores expressivamente.

As figuras 9 e 10 apresentam as curvas de precipitação e vazão médias por mês, respectivamente, projetadas pelos modelos para o cenário RCP 4.5, nos períodos 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099.

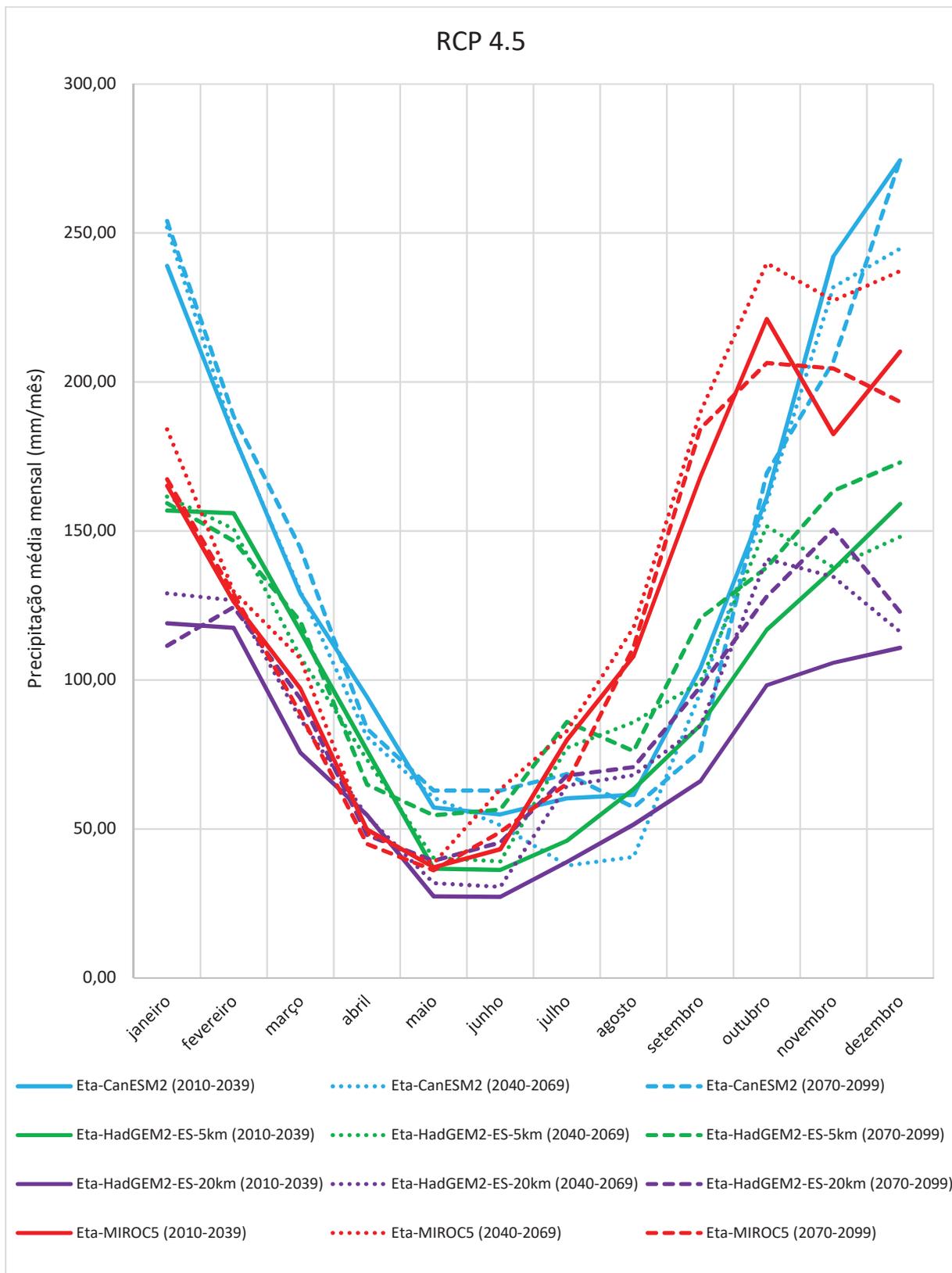
As figuras 11 e 12 apresentam as curvas de precipitação e vazão médias por mês, respectivamente, projetadas pelos modelos para o cenário RCP 8.5, nos períodos 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099.

De modo geral, as curvas que representam as vazões médias mensais projetadas por cada modelo/período/cenário seguiram o mesmo comportamento apresentado pelas curvas de precipitação média mensal.

No cenário RCP 4.5, foi observado que em quase todos os meses nos três períodos, os valores de vazão de cada modelo seguiram a seguinte ordem crescente: Eta-HadGEM2-ES-20km, Eta-HadGEM2-ES-5km, Eta-MIROC5 e Eta-CanESM2, com exceção de um trecho em que os valores do Eta-MIROC5 superaram os do Eta-CanESM2. O valor da diferença entre a maior vazão mensal calculada e a menor, dentro do mesmo período e modelo, também seguiu essa ordem, ou seja, no modelo Eta-HadGEM2-ES-20km houve uma diferença máxima da ordem de 0,75 m<sup>3</sup>/s entre a vazão dos meses chuvoso e a dos meses secos, enquanto que no modelo Eta-CanESM2 essa diferença foi da ordem de 2,0 m<sup>3</sup>/s. Na comparação entre modelos, a maior diferença encontrada entre as projeções ocorreram durante os meses chuvoso, enquanto nos meses secos a diferença foi significativamente menor. Tal ocorrência já era esperada, uma vez que quando não há chuva para ser transformada em vazão, prevalece o valor de escoamento básico. Foi observado também que as curvas dos três períodos de projeção do modelo Eta-CanESM2 apresentaram grande aderência, indicando pouca variação na vazão projetada ao longo do tempo. Já as projeções dos modelos Eta-HadGEM2-ES-5km e Eta-HadGEM2-ES-20km apresentaram uma tendência de aumento da vazão ao longo do tempo, enquanto o modelo Eta-MIROC5 apresentou uma tendência de aumento seguida de queda.

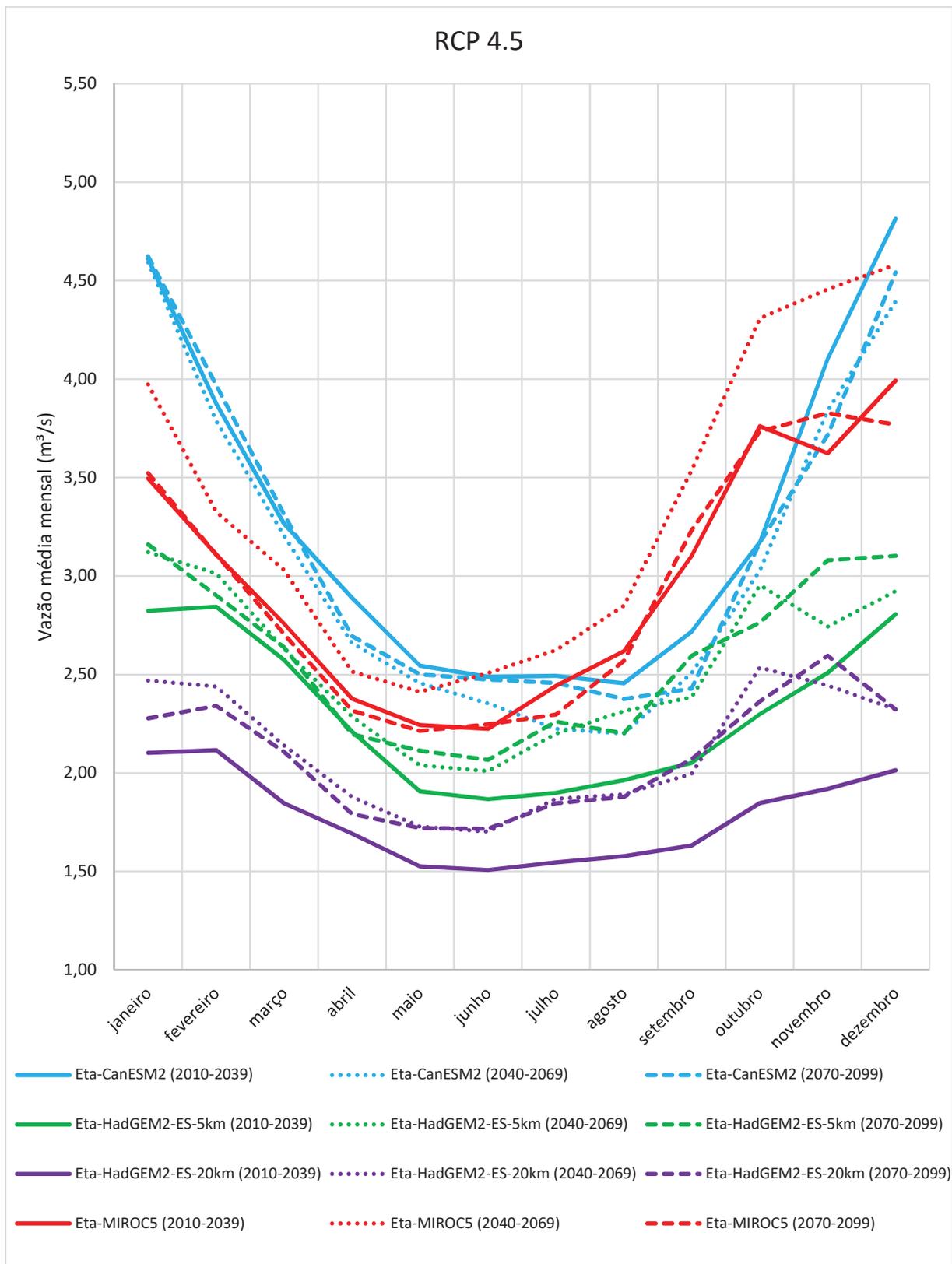
No cenário RCP 8.5, a sequência crescente dos valores de projeções de vazão por cada modelo não foi tão bem definida como no cenário RCP 4.5, visto que as curvas de vazão se interseccionaram em diversos pontos. Semelhantemente ao cenário RCP 4.5, também houve uma maior diferença entre projeções nos meses chuvosos. As curvas em geral se deslocaram para cima, aumentando as vazões projetadas, entretanto nos modelos Eta-CanESM2 e HadGEM2-ES-5km, a tendência foi de redução ao longo do tempo. Por outro lado, o modelo Eta-MIROC5 apresentou uma tendência de aumento e as projeções do modelo HadGEM2-ES-20km variaram pouco ao longo dos três períodos.

Figura 9 – Médias mensais de precipitação por modelo, para os períodos de 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099 no cenário RCP 4.5



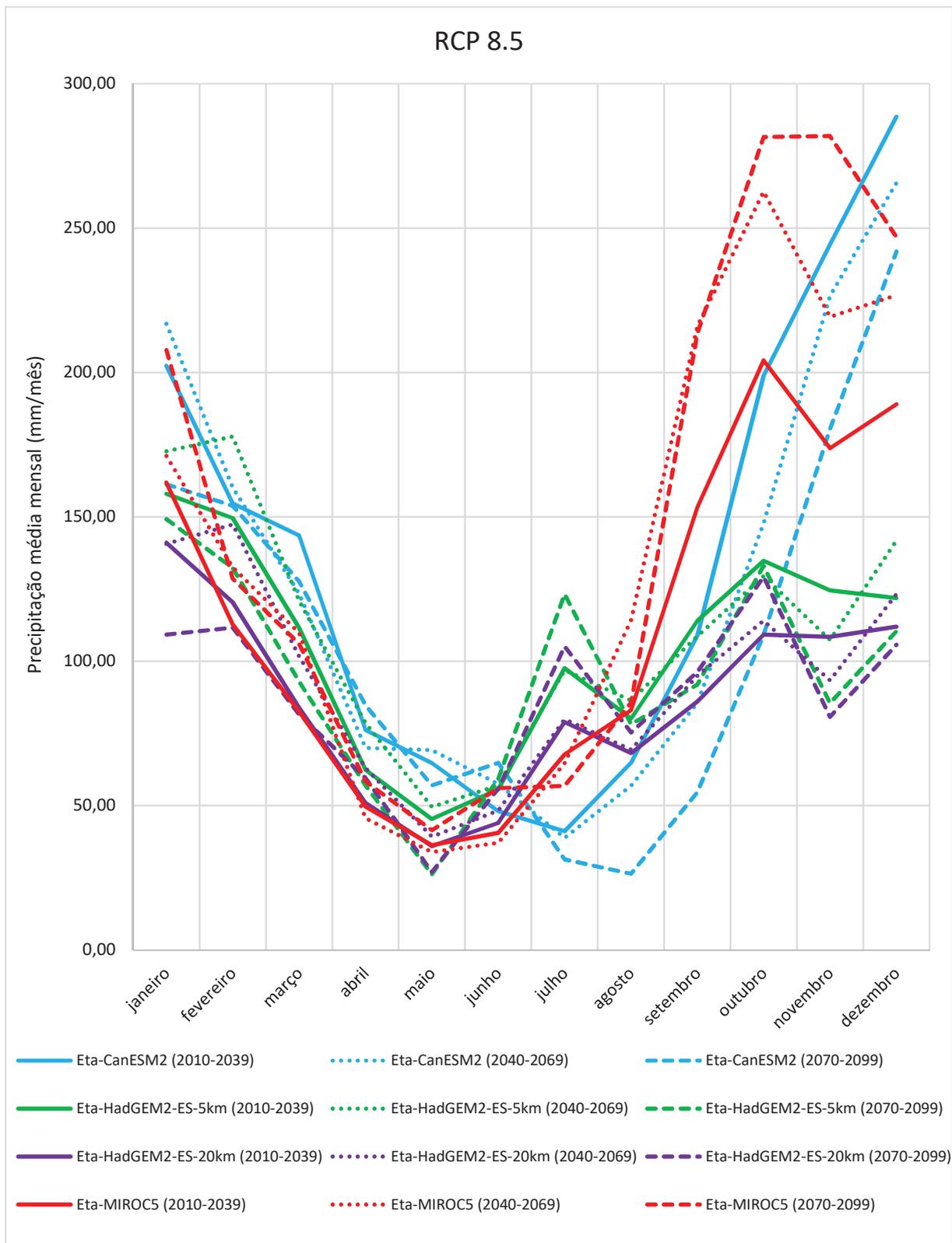
Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

Figura 10 – Médias mensais de vazão por modelo, para os períodos de 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099 no cenário RCP 4.5



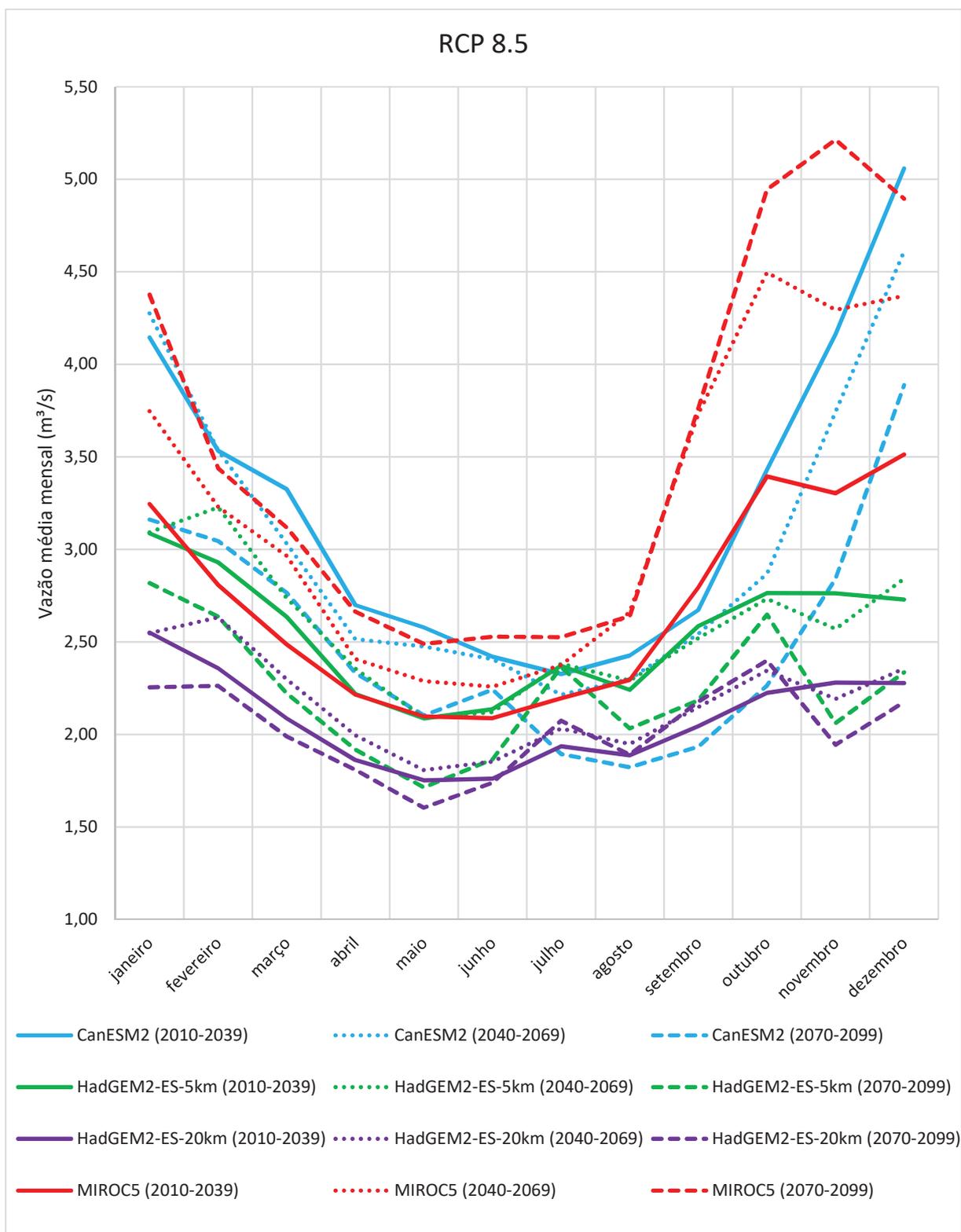
Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

Figura 115 – Médias mensais de precipitação por modelo, para os períodos de 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099 no cenário RCP 8.5



Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

Figura 12 – Médias mensais de vazão por modelo, para os períodos de 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099 no cenário RCP 8.5



Fonte: Elaborada pelo autor (2019).

## 4 CONCLUSÕES

Pela análise do gráfico de calibração do modelo SMAP, foi verificado que o modelo previu bem o momento em que os valores extremos ocorreriam, embora tenha em geral subestimado os valores de pico, sugerindo que os valores extremos projetados podem ser ainda mais acentuados na realidade. Por outro lado, assim como em Lopes et al. (2008) e em Tiezzi et al. (2019), as vazões calculadas e observadas tiveram um bom ajuste segundo os índices estatísticos.

A comparação com os resultados obtidos por Chou et al. (2014b) corroborou os resultados do presente estudo. Em ambos os trabalhos, a combinação Eta-HadGEM2-ES-20km apresentou maior resposta às mudanças climáticas do que a combinação Eta-MIROC5, ou seja, a diferença entre os resultados obtidos pelos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 foi maior no primeiro modelo. Por outro lado, o modelo Eta-HadGEM2-ES-5km, que só foi aplicado neste trabalho, foi menos sensível às mudanças climáticas do que o modelo MIROC5. As previsões realizadas por Chou et al. (2014b) estimam uma redução da precipitação na região sudeste para o fim do século 21, bem como aumento na frequência dos eventos extremos. Estes resultados também foram encontrados por alguns dos modelos utilizados neste trabalho, embora não todos. Essa diferença no comportamento dos distintos modelos gera incertezas, que devem ser reduzidas com o uso de mais modelos, entretanto, o fato de diferentes previsões levarem a resultados similares, traz mais solidez à metodologia utilizada.

Os resultados obtidos por Lyra et al (2017) indicaram que a combinação Eta-HadGEM2-ES na resolução de 5 por 5 km foram mais precisos que na resolução de 20 por 20 km. Tal resultado era esperado, visto que o aumento na resolução permite a captação de maiores detalhes. Extrapolando este resultado de Lyra et al. (2017) para o presente trabalho, como não haviam dados históricos da bacia estudada para comparação, foi concluído que, dentre os modelos utilizados, as previsões realizadas pelo modelo Eta-HadGEM2-ES-5km são as que provavelmente mais se aproximarão da realidade. Apesar do ganho na fidelidade das projeções obtido pela redução do tamanho das células, Lyra et al. (2017) observaram que as chuvas diárias superiores à 150 mm não foram bem representadas. Assim como nas localidades estudadas por Lyra et al. (2017), o município de Poços de Caldas não apresenta um grande histórico de eventos com tamanha magnitude, embora já tenham ocorrido (SARDINHA et al., 2016). Portanto, este fato deverá ser considerado quando se pretender aplicar a metodologia em regiões com índices pluviométricos deste porte.

Assim como Lopes et al. (2008), Tiezzi et al (2019) estimaram as vazões das principais bacias hidrográficas brasileiras com geração de energia hidrelétricas, afetadas pelas mudanças climáticas. Enquanto Lopes et al. (2008) fizeram projeções para períodos curtos de seis meses, Tiezzi et al. realizaram projeções para 90 anos (2011-2100), mostrando que apesar do longo período de projeção, os modelos não apresentaram anomalias de comportamento, que podem ocorrer para longos intervalos de simulação. Com mesmo intervalo de projeção, o estudo em questão também mostrou que a metodologia produz resultados dentro da normalidade, porém neste caso, para uma bacia hidrográfica de pequeno porte.

De um modo geral, a metodologia exposta correspondeu bem ao esperado, apresentando respostas semelhantes às obtidas pelos métodos utilizados como base. Como aspecto positivo pode ser citado a projeção em resolução de 5 por 5 km, considerada muito alta e a boa resposta dos modelos para uma bacia hidrográfica de pequeno porte. É importante ressaltar que a metodologia contém suas limitações, como a calibração do modelo hidrológico SMAP com dados de outra bacia hidrográfica devido a inexistência de séries históricas de dados para a bacia estudada. Mesmo sendo uma solução utilizada nesses casos, esse procedimento traz erros, que acabam acumulados durante o processo de modelagem. Apesar disso, para a realidade brasileira, na qual praticamente inexistem dados de pequenas bacias, a metodologia pode servir como uma estimativa inicial da ordem de grandeza da vazão, auxiliando na gestão de bacias que não possuem dados históricos. Somando-se a isso, ainda que as projeções na resolução de 5 por 5km só existam até o momento para a região sudeste do Brasil, as projeções realizadas na resolução de 20 por 20 km também apresentaram bons resultados, demonstrando as possibilidades de uso da metodologia.

## REFERÊNCIAS

ANA – Agência Nacional de Águas. [2018]. Disponível em: <http://www3.ana.gov.br/>. Acesso em: 29 out. 2018.

ARRHENIUS, S. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. **Philosophical Magazine and Journal of Science**, v.41, n. 5, p. 237-276, 1896.

CALENDAR, G. S. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 64, p. 223-240, 2007.

CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.;

CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, v.3, n. 5, p. 438-454, 2014.

CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 512-527, 2014.

COLLINS, M., TETT, S. F. B.; COOPER, C. (2001). The internal climate variability of a HadCM3, a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. **Climate Dynamics**, v. 17, n.1, p. 61–81, 2001.

ERHA – ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS. **Projeto de instalação de estações hidrométricas em atendimento à resolução conjunta 03/2010**. Belo Horizonte, 2012. 54 p.

FERNANDES, R. O.; SILVEIRA, C. S.; STUDART, T. M. C.; FILHO, F. A. S. Reservoir yield intercomparison of large dams in Jaguaribe Basin-CE in climate change scenarios. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, n. 11, 2017.

HYDROS ENGENHARIA. **Plano Diretor de Abastecimento de Água do Município de Poços de Caldas/MG**. Poços de Caldas, 2013. v. 1. 272 p.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 2014. 151p.

JUNIOR, P. P. A.; MAUAD, F. F. Impact of climate change on Feijão River Basin flows, São Paulo State, Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 3, p. 741-751, 2015.

KLEMES, V. Operational testing of hydrological simulation models. **Hydrological Sciences Journal**, v. 31, n. 1, p. 13-24, 1986.

LOPES, J. E. G. **Manual do Modelo SMAP**. 1999.

LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. Simulação hidrológica: aplicações de um modelo simplificado. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 3., 1981, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza, 1981. v. 2, p. 42-62.

LOPES, J. E. G.; BARROS, M. T. L.; ZAMBON, R. C.; FRANCATO, A. L.; BARBOSA, P. F. S.; ZANFELICE, F. R.; CORRÊA, F. I. M.; GOMES, L. V.; DALL'ORTO, C. E. Previsão climática de vazões para o sistema interligado nacional. *In*: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO SUL-SUDESTE, 2., 2008, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro, 2008. p. 1-9.

LYRA, A.; TAVARES, P.; CHOU, S. C.; SUEIRO, G.; DEREZYNSKI, C.; SONDERMANN, M.; SILVA, A.; MARENGO, J.; GIAROLLA, A. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brasil using the non-hydrostatic Eta

regional climate model at 5-km resolution. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 132, n. 1-2, p. 663-682, 2018.

PEREIRA, D. R.; MARTINEZ, M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model part I: calibration and validation tests. **Journal of Hydrology: regional studies**, v. 7, p. 14-37, 2016.

REIS, E. A. **Avaliação da viabilidade econômica do pagamento pelos serviços ambientais (PSA) na bacia do ribeirão do Cipó, manancial estratégico de Poços de Caldas-MG**. 2014. 107f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2014.

REVELLE, R.; SUESS, H. E. Carbon Dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO<sub>2</sub> during the past decades. **Tellus**, v.9, p. 18-27, 1957.

SABOIA, M. A. M.; FILHO, F. A. S.; JUNIOR, L. M. A.; SILVEIRA, C. S. Climate changes impact estimation on urban drainage system located in low latitudes districts: a study case in Fortaleza-CE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, n. 21, ISSN 2318-0331, 2017.

SARDINHA, D. S.; PENA, Y. T. L.; TIEZZI, R. O.; ALMEIDA, M. C. J. Base de dados de desastres naturais no município de Poços de Caldas/MG: ferramenta para o planejamento e a gestão territorial. **Revista brasileira de gestão urbana**, v. 8, n. 3, p. 318-331, 2016.

SILVA, L. P. **Hidrologia**: engenharia e meio ambiente. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. 352 p.

SILVEIRA, G. L.; TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. Quantificação de vazão em pequenas bacias sem dados. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 3, p. 111-131, 1998.

SUPRAM – Superintendência Regional de Regularização Ambiental. PARECER ÚNICO SUPRAM SUL. PROTOCOLO Nº 0013637/2012. Autoriza a construção do Barramento. Licenciamento Ambiental Nº 11381/2005/003/2010.2012.

TIEZZI, R. O.; BARBOSA, P. S. F.; LOPES, J. E. G.; FRANCATO, A. L.; ZAMBON, R. C.; SILVEIRA, A.; MENEZES, P. H. B. J.; ISIDORO, J. M. G. P. Trends of streamflow under climate change for 26 Brazilian basins. **Water Policy**, v. 21, n. 1, p. 206-220, 2019.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. Ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2005. 680 p.

### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme já relatado no artigo, desde que se entenda as limitações relacionadas à metodologia, ela se mostrou uma boa opção na estimativa preliminar da vazão média mensal de uma bacia hidrográfica de pequeno porte. Uma vantagem associada à metodologia, é a possibilidade de aplicar em bacias hidrográficas em que não existam dados históricos e de acordo com a literatura pesquisada, também se aplica a grandes bacias.

As principais considerações sobre a aplicação da metodologia podem ser encontradas no artigo. Nos parágrafos seguintes, foram descritos resumidamente o comportamento específico dos modelos climáticos, de modo que estudos futuros possam verificar se os mesmos padrões de comportamento se repetirão. Como não foram encontrados dados históricos para a bacia hidrográfica estudada, não foi possível concluir quanto à subestimação ou superestimação de valores, sendo somente relacionada a tendência de cada um ter produzido valores maiores ou menores.

Embora os modelos em geral não tenham apresentado uma tendência bem definida de suas projeções ao longo das normais climatológicas, os valores mais extremos foram os projetados no cenário RCP 8.5, indicando uma possibilidade de alteração climática devido às concentrações de gases estufa na atmosfera.

O modelo Eta-HadGEM2-ES – 20 km foi o que apresentou os menores valores em praticamente todas as projeções, tanto de vazões mínimas como máximas, se mostrando para os dados e a bacia hidrográfica estudada, um modelo com projeções reduzidas em relação aos outros. Já os modelos Eta-CanESM2 e Eta-MIROC5 se alternaram entre os maiores valores das projeções.

O modelo Eta-HadGEM2-ES – 5 km apresentou valores intermediários, fato que talvez se justifique pela sua resolução maior que a dos demais. Por não ter apresentado uma tendência bem definida em aumentar ou diminuir os valores estimados, possivelmente seja o melhor dos quatro modelos para fazer projeções, demonstrando que a técnica do *downscaling* apresenta ganhos na representação das variáveis climáticas.

O modelo Eta-CanESM2 foi o que apresentou menor sensibilidade à mudança do cenário RCP 4.5 para o RCP 8.5. Em seguida vieram os modelos Eta-HadGEM2-ES – 5 km e Eta-MIROC5. O modelo Eta-HadGEM2-ES – 20 km foi o que apresentou a maior sensibilidade.

Os valores calculados para as vazões ecológica e média de longo termo calculados no trabalho foram consideravelmente superiores aos calculados pelo Plano Diretor, entretanto devido a serem dados de períodos distintos e apurados por métodos diferentes, não foi possível estabelecer uma relação entre os dados.

O modelo Eta-HadGEM2-ES – 5km foi considerado o que provavelmente mais seja aderente à realidade, exclusivamente pelo fato de ter uma maior resolução das projeções que os demais. Entretanto, o fato de não haver dados registrados para comparação e devido à grande variação encontrada nas projeções, não é possível fazer afirmações.

Por outro lado, como o clima é um sistema complexo, cuja variação só ocorre em longos períodos de tempo, os trabalhos envolvendo previsões climáticas, em geral, apresentam seus resultados como tendências.

Sendo assim, a incerteza das projeções mostra a importância de realizar um monitoramento contínuo da área de interesse e que estudos mais aprofundados devem ser elaborados para melhor condução das tomadas de decisões na operação da Barragem do Cipó. Entretanto, como foram projetadas vazões para diversos usos da bacia hidrográfica (média, máxima e mínima), os dados obtidos no presente trabalho podem servir como base para trabalhos futuros visando usos específicos.

Como recomendações para estudos que aprimorem o apresentado, sugere-se a realização de monitoramento da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Cipó, de modo que se possa comparar os valores já projetados com os reais medidos, bem como realizar a calibração do modelo hidrológico com dados da própria bacia hidrográfica. Ainda, para verificar a precisão da calibração com dados de outra bacia hidrográfica, essa calibração pode ser feita em uma localidade em que existam os dados e seja verificado o ajuste da calibração com dados externos à calibração com dados próprios.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, D. S.; SOUZA, P. F. M.; DANTAS, C. S. M.; MENDES, L. A. Aplicação do modelo chuva-vazão SMAP para análise da alteração das vazões na bacia do rio Piauitinga, Sergipe. *In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE*, 13., 2016, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju, 2016, p. 1-10.
- BARTH, F. T.; POMPEU, C. T.; FILL, H. D.; TUCCI, C. E. M.; KELMAN, J.; BRAGA, B. P. F. **Modelos para gerenciamento de recursos hídricos**. 1. Ed. São Paulo: Nobel; ABRH, 1987. 526 p.
- BRASIL. Decreto nº 24.643, de 1934. Decreta o código de águas. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 10 jul. 1934. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1930-1939/decreto-24643-10-julho-1934-498122-normaatualizada-pe.html>. Acesso em: 6 jun. 2019.
- BRASIL. Lei nº 9.433, de 1997. Institui a política nacional de recursos hídricos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 8 jan. 1997. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm). Acesso em: 6 jun. 2019.
- CBH GRANDE. Comitê da bacia hidrográfica do rio Grande. **Bacia**. [2019]. Disponível em: <http://cbhgrande.org.br/bacia>. Acesso em: 6 jun. 2019.
- CENTER FOR COMPUTATIONAL SCIENCES UNIVERSITY OF TSUKUBA. **Climate Change Projection and Weather Forecasting**. [2019]. Disponível em: <http://www.geoenv.tsukuba.ac.jp/~kusakaken/index.php?id=535>. Acesso em: 10 ago. 2019.
- CHOU, S.C., et al. Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. **American journal of climate change**, v. 3, n. 5, p. 438-454, 2014a.
- CHOU, S.C., et al. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American journal of climate change**, v. 3, n. 5, p. 512-527, 2014b.
- CORTESE, T. T. P.; NATALINI, G (Org.). **Mudanças climáticas: do global ao local**. Barueri: Manole, 2014. 148 p.
- COX, P. M.; BETTS, R. A.; JONES, C. D.; SPALL, S. A.; TOTTERDELL I. J. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. **Nature**, v. 408, p. 184-187, 2000.
- DAEE. **O que é outorga?** [2019]. Disponível em: [http://www.daee.sp.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1624:novo-portal-de-outorgas&catid=72:novo-portal-de-outorgas](http://www.daee.sp.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=1624:novo-portal-de-outorgas&catid=72:novo-portal-de-outorgas). Acesso em: 28 ago. 2019.
- DME – Departamento Municipal de Energia de Poços de Caldas. [2018]. Disponível em: <http://www.dme-pc.com.br>. Acesso em: 29 out. 2018.
- DOUGLAS, K. M.; SUTTON, R. M. Climate change: why the conspiracy theories are dangerous. **Bulletin of the atomic scientists**, v. 71, n. 2, p. 98-106, 2015.

FELICIO, R. A.; ONÇA, D. S. “Aquecimento global”, “mudanças climáticas” e “caos ambiental” justificando o falso “desenvolvimento sustentável”: a teoria da tríade. *In: FÓRUM AMBIENTAL DA ALTA PAULISTA*, 6., 2010, Tupã. **Anais [...]**. Tupã, 2010, p. 585-605.

FERNANDES, R. O.; SILVEIRA, C. S.; STUDART, T. M. C.; FILHO, F. A. S. Reservoir yield intercomparison of large dams in Jaguaribe basin-CE in climate change scenarios. **Revista brasileira de recursos hídricos**, v. 22, n. 11, 2017.

GERMANO, A.; TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. Estimativa dos parâmetros do modelo IPH II para algumas bacias urbanas brasileiras. **Revista brasileira de recursos hídricos**, v. 3, n. 4, 1998.

GRACIOSA, M. C. P. **Modelo de seguro para riscos hidrológicos com base em simulação hidráulico -hidrológica como ferramenta de gestão do risco de inundações**. 2010. 163 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2010.

IGAM. Instituto mineiro de gestão das águas. **GD6 – CBH dos rios Mogi-Guaçu e Pardo**. [2019]. Disponível em: <http://comites.igam.mg.gov.br/comites-estaduais-mg/gd6-cbh-dos-rios-mogi-guacu-e-pardo>. Acesso em: 6 jun. 2019.

IGAM. Instituto mineiro de gestão das águas. **Plano diretor da bacia hidrográfica dos afluentes mineiros dos rios Mogi-Guaçu e Pardo (unidade de gestão GD6): plano de metas**. Belo Horizonte, 2010. 123 p. Disponível em: [http://200.198.57.118:8080/bitstream/123456789/624/1/Plano\\_Diretor\\_Bacia\\_Hidrografica\\_Afluentes\\_Mineiros\\_Rios\\_Mogi\\_Guacu\\_Pardo%20%282%29.pdf](http://200.198.57.118:8080/bitstream/123456789/624/1/Plano_Diretor_Bacia_Hidrografica_Afluentes_Mineiros_Rios_Mogi_Guacu_Pardo%20%282%29.pdf). Acesso em: 6 jun. 2019

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. [2018] Disponível em: <http://www.inpe.br/>. Acesso em: 29 out. 2018.

IPCC. [2018]. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/>. Acesso em: 29 out. 2018.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2014: synthesis report**. Contribution of working groups I, II and III to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 2014. 151p.

LOPES, J. E. G. **Manual do modelo SMAP**. 1999.

LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. Simulação hidrológica: aplicações de um modelo simplificado. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 3., 1981, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza, 1981. v. 2, p. 42-62.

LYRA, A.; TAVARES, P.; CHOU, S. C.; SUEIRO, G.; DEREZYNSKI, C.; SONDERMANN, M.; SILVA, A.; MARENGO, J.; GIAROLLA, A. Climate change projections over three metropolitan regions in southeast Brasil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. **Theoretical and applied climatology**, v. 132, n. 1-2, p. 663-682, 2018.

MENDES, C. A. B; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em recursos hídricos: Princípios, integração e aplicação**. 2. Ed. Porto Alegre: ABRH, 2013. 576 p.

- MOTA, S. **Introdução à engenharia ambiental**. 6. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2016. 526 p.
- MUSIL, R. Climate change: politics and practice. **Environmental practice**, v. 9, n. 3, p. 150-151, 2007.
- OLIVEIRA, G. S.; SILVA, N. F.; HENRIQUES, R. **Mudanças climáticas: ensino fundamental e médio**. Brasília: MEC, SEB, MCT, AEB, 2009. 348 p.
- OLIVEIRA, M. J.; CARNEIRO, C. D. R.; VECCHIA, F. A. S.; BAPTISTA, G. M. M. Ciclos climáticos e causas naturais da mudança do clima. **Terrae didática**, v. 13, n. 3, p. 149-184, 2017.
- PINTO, N. L. S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia básica**. 1. Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1976. 304 p.
- PMPC – Prefeitura Municipal de Poços de Caldas. [2018]. Disponível em: <http://pocosdecaldas.mg.gov.br/>. Acesso em: 29 out. 2018.
- RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e recursos hídricos**. 1. Ed. São Carlos: EESC/USP, 1998.
- SABOIA, M. A. M.; FILHO, F. A. S.; JUNIOR, L. M. A.; SILVEIRA, C. S. Climate changes impact estimation on urban drainage system located in low latitudes districts: a study case in Fortaleza-CE. **Revista brasileira de recursos hídricos**, v. 22, n. 21, ISSN 2318-0331, 2017.
- SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F. W.; CHAVES, A. G. M.; PEREIRA, I. C. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. 1. Ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica; Agência Nacional de Águas, 2001. 328 p.
- SILVA, L. P. **Hidrologia: engenharia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. 352 p.
- SILVEIRA, C. S.; FILHO, F. A. S.; LOPES, J. E. G.; BARBOSA, P. S. F.; TIEZZI, R. O. Análise das projeções de vazões nas bacias do setor elétrico brasileiro usando dados do IPCC-AR4 para o século XXI. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 4, p. 59-71, 2014.
- SILVESTRE, M. E. D. Código de 1934: água para o Brasil industrial. **Revista Geopaisagem**. v. 7, n. 13, 2008.
- SPENCER, R. W. An inconvenient truth: blurring the lines between Science and science fiction. **GeoJournal**, v. 70, n. 1, p. 11-14, 2007.
- TIEZZI, R. O.; BARBOSA, P. S. F.; LOPES, J. E. G.; FRANCATO, A. L.; ZAMBON, R. C.; SILVEIRA, A.; MENEZES, P. H. B. J.; ISIDORO, J. M. G. P. Trends of steamflow under climate change for 26 brazilian basins. **Water policy**, v. 21, n. 1, p. 206-220, 2019.
- TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. Ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2015. 943 p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. Ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. 678 p.

VISSMAN, W.; LEWIS, G. L. **Introduction to hydrology**. 5. Ed. New Jersey: Pearson Education, Inc, 2003. 612 p.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. 1. Ed. McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245 p.

WMO. [2018]. Disponível em: <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate>. Acesso em: 29 out. 2018.