

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
ENERGIA

Operação de Usinas Hidrelétricas de Regularização sob
Condições de Mudanças Climáticas: estudo de caso da
UHE Três Marias

Rebeca Meloni Virgílio

Fevereiro de 2018

Itajubá

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
ENERGIA

Rebeca Meloni Virgílio

Operação de Usinas Hidrelétricas de Regularização sob
Condições de Mudanças Climáticas: estudo de caso da UHE
Três Marias

Dissertação submetida ao Programa de Pós
Graduação em Engenharia de Energia como
parte dos requisitos para obtenção do Título
de Mestre em Ciências em Engenharia de
Energia.

Área de concentração: Energia, Sociedade e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Luiz Augusto Horta Nogueira

Coorientador: Prof. Benedito Cláudio da Silva

Fevereiro de 2018

Itajubá

AGRADECIMENTOS

Gostaria primeiramente de agradecer ao meu orientador Luiz Augusto Horta Nogueira e ao meu coorientador Benedito Cláudio da Silva pela oportunidade de desenvolver um tema tão interessante e enriquecedor e pela dedicação, ensinamentos, orientação e paciência.

Novamente ao professor Benedito Cláudio da Silva pelas diversas oportunidades em projetos e estudos que vem me proporcionando antes mesmo do início do mestrado e por acreditar em meu potencial.

Ao pessoal do Centro de Excelência em Eficiência Energética – EXCEN pelo local acolhedor, pelas amizades e pela assistência quando necessário.

À equipe do projeto CNPq/ANA - Edital 23/2015, intitulado “Projeções das mudanças climáticas para estudos de impactos sobre a disponibilidade hídrica no país com implicações na segurança alimentar e energética” e especialmente a coordenadora do mesmo, Chou Sin Chan pela oportunidade de colaborar com o estudo e de aprendizado proporcionado pelo mesmo, e pela disponibilização dos dados climáticos do modelo Eta utilizados nesta dissertação.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudo.

Aos meus pais Clóvis e Flávia pelo amor imensurável e principalmente pelo apoio em todas as minhas decisões. Aos meus irmãos, Aluísio e Túlio, pela amizade, pela paciência e principalmente pela companhia.

Aos meus amigos, companheiros de mestrado, pelo companheirismo, pelo apoio e pela amizade, que foram decisivos para que eu chegasse até o fim.

Ao meu noivo Caio, pelo apoio, pelo incentivo e principalmente pela paciência nos meus momentos de crise, onde eu achava que nada ia dar certo, fazendo com que eu fosse forte para continuar.

Fica aqui minha gratidão.

RESUMO

Mesmo com a intensa diversificação da matriz elétrica brasileira, a hidroeletricidade continua sendo a mais expressiva e a base do setor elétrico do país, representando, em 2017, 64% da matriz. Dependente diretamente da disponibilidade de recursos hídricos, a energia proveniente de usinas hidrelétricas sofre impactos diretos relacionados a variações do tempo e clima. Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo principal a verificação dos efeitos das mudanças climáticas nas vazões afluentes a usina hidrelétrica de Três Marias e, conseqüentemente, na sua geração de energia. As análises baseiam-se nas projeções climáticas de um modelo atmosférico regional e na transformação chuva-vazão através da modelagem hidrológica. Utilizou-se projeções de *downscaling* dinâmico com o modelo atmosférico regional Eta, alimentado pelos modelos globais HadGEM2-ES e MIROC5 (modelos do Quinto Relatório de Avaliação do *Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC AR5), com resolução horizontal de 20 km e 38 níveis verticais. As variáveis climáticas projetadas pelo modelo Eta para os três períodos futuros, 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100, nos cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5, alimentaram o modelo hidrológico de grandes bacias MGB-IPH, responsável pela transformação das precipitações em vazões afluentes à bacia de interesse. A partir das vazões afluentes e do balanço hídrico do reservatório foi possível à projeção das tendências de geração de energia para o futuro. Os resultados encontrados apontam para a redução das vazões afluentes a UHE Três Marias, principalmente das vazões de referência $Q_{95\%}$ e $Q_{50\%}$, que são de extrema importância não apenas para a geração de energia, mas também para a maioria dos usos múltiplos a que a bacia está sujeita. As $Q_{95\%}$ são as mais impactadas para ambos modelos climáticos, sendo a menor redução de aproximadamente 30% e a maior de 87,3%. Já no caso das $Q_{50\%}$, a redução é bem mais acentuada nas simulações realizadas com o modelo Eta-HadGEM2-ES, sendo sua redução mínima (cerca de 50%) próxima da máxima do modelo Eta-MIROC5. Conseqüentemente, as simulações da potência gerada pela UHE também apresentaram tendências de redução, no entanto, menos expressivas do que as das vazões, já que Três Maria é uma usina de regularização e sua geração não depende apenas das vazões afluentes. As reduções mais amenas de potência gerada média estão entre 7% e 20%, todas elas provenientes do modelo Eta-MIROC5. Já para o Eta-HadGEM2-ES a redução mínima é de cerca de 35%, chegando a quase 65% no pior cenário. Esses resultados vêm reforçar a importância da modelagem hidroclimática no planejamento da operação e expansão de longo prazo do setor elétrico brasileiro, a fim de considerar a não-estacionariedade das séries hidrológicas, devido aos efeitos das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Modelagem Hidroclimática, Mudanças Climáticas, Projeção, Hidroeletricidade, Três Marias.

ABSTRACT

Even with the intense diversification of the Brazilian electricity matrix, hydroelectricity continues to be the most significant source, and the basis, of the country's electricity sector, accounting for 64% of the matrix in 2017. Because hydroelectric plants depend directly on the availability of water resources, energy from hydroelectric plants is affected by variations in weather and climate. In this context, the main objective of the present study is to verify the effects of climate change on the tributaries of the Três Marias hydroelectric power plant and, consequently, its energy generation. The analyses are based on the climatic projections of regional atmospheric models and rainfall-flow transformation through hydrological modeling. Dynamic downscaling projections were used with the regional atmospheric model Eta and fed by the global models HadGEM2-ES and MIROC5 (models of the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC AR5), with a horizontal resolution of 20 km and 38 levels vertical. The climatic variables projected by the Eta model for three future periods, 2011-2040, 2041-2070, and 2071-2100, and for the emission scenarios RCP4.5 and RCP8.5, fed the hydrological model of large basins (MGB-IPH), which was responsible for the transformation of precipitations into tributary flows to the basin of interest. From the tributaries and water balance of the reservoir, it was possible to forecast future energy generation trends. The results revealed the reduction of tributaries to the Três Marias Hydroelectric Power Plant, mainly from $Q_{95\%}$ and $Q_{50\%}$, which are of extreme importance not only for power generation, but also for most of the basin's multiple uses. The $Q_{95\%}$ are the most impacted for both climate models, with the smallest reduction being approximately 30% and the highest 87.3%. In the case of the $Q_{50\%}$, the reduction is much more pronounced in the simulations performed with the Eta-HadGEM2-ES model, and its minimum reduction (about 50%) is close to the maximum of the Eta-MIROC5 model. Consequently, the simulations of the power generated by the HPP also showed reductions; however, this reduction was less expressive than it was in the flows, since Três Maria is a regularization plant and its generation does not depend only on the tributaries. The milder reductions of the average generated power are between 7% and 20%, all of them coming from the Eta-MIROC5 model. As for the Eta-HadGEM2-ES, the minimum reduction is around 35%, reaching almost 65% in the worst-case scenario. These results reinforce the importance of hydroclimatic modeling in planning the operation and long-term expansion of the Brazilian electricity sector in order to consider the non-stationarity of the hydrological series due to the effects of climate change.

Keywords: Hydroclimatic Modeling, Climate Change, Projection, Hydroelectricity, Três Marias.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Emissões de CO ₂ por setor no Brasil no ano de 2016.....	19
Figura 2-2: Discretização espacial dos Modelos Climáticos Globais.	26
Figura 2-3: Aplicação da técnica <i>downscaling</i> de modelos climáticos globais.	28
Figura 2-4: Probabilidade de aquecimento nos <i>timeslices</i> (fatias no tempo) em 2030s, 2060s e 2090s. As probabilidades de aquecimento foram obtidas a partir dos valores das anomalias do conjunto de projeções dos modelos usados pelo IPCC (CMIP5) em relação ao período pré-industrial.	31
Figura 3-1: Integração dos modelos climáticos e hidrológicos.....	32
Figura 3-2: Principais componentes do ciclo hidrológico.	34
Figura 4-1: Matriz Elétrica Brasileira (Maio de 2017).....	40
Figura 5-1: Fluxograma da metodologia.....	47
Figura 5-2: Localização da Bacia em estudo.....	48
Figura 5-3: Localização das usinas hidrelétricas da bacia de estudo por tipo de usina.	50
Figura 5-4: Domínio do modelo climático regional ETA. Destaque para a região do Brasil.....	53
Figura 5-5: Balanço hídrico na camada de solo.	59
Figura 5-6: Esquema de escoamento no interior de uma célula com dois blocos.....	60
Figura 5-7: Cartas SRTM utilizadas na elaboração do mosaico da bacia.....	62
Figura 5-8: Estações pluviométricas, fluviométricas e meteorológicas.	67
Figura 5-9: Remoção de viés do período atual.....	75
Figura 5-10: Remoção de viés do período futuro.	75
Figura 6-1: Discretização em sub-bacias e rede de drenagem da bacia rio São Francisco a montante do posto fluviométrico UHE Três Marias Jusante.	81
Figura 6-2: Reclassificação do mapa de solos da bacia em estudo.	82
Figura 6-3: Mapa de uso e ocupação do solo da bacia em estudo.....	84
Figura 6-4: Unidades de Resposta Hidrológica da bacia em estudo.	85
Figura 6-5: Comparação entre os hidrogramas de vazões diárias calculado e observado para a sub-bacia Porto das Andorinhas (Calibração).	87
Figura 6-6: Comparação entre os hidrogramas de vazões diárias calculado e observado para a sub-bacia Velho da Taipa (Calibração).	88
Figura 6-7: Comparação entre os hidrogramas de vazões diárias calculado e observado para a sub-bacia Ponte da Taquara (Calibração).....	88

Figura 6-8: Comparação entre os hidrogramas de vazões diárias calculado e observado para a sub-bacia Três Marias (Calibração).	89
Figura 6-9: Hidrogramas de vazões diárias para as sub-bacias Porto das Andorinhas (a), Velho da Taipa (b), Ponte da Taquara (c) e UHE Três Marias (d) (1970-1972) (Calibração).	89
Figura 6-10: Curvas de Permanência das vazões diárias das sub-bacias Porto das Andorinhas (a), Velho da Taipa (b), Ponte da Taquara (c) e UHE Três Marias (d) (Calibração).	91
Figura 6-11: Dispersão entre as vazões diárias calculadas e observadas para o período de calibração para as sub-bacias Porto das Andorinhas (a), Velho da Taipa (b), Ponte da Taquara (c) e UHE Três Marias (d) (Calibração).	92
Figura 6-12: Vazões Médias Mensais das sub-bacias Porto das Andorinhas (a), Velho da Taipa (b), Ponte da Taquara (c) e UHE Três Marias (d) (Calibração).	93
Figura 6-13: Comparação entre os hidrogramas de vazões diárias calculado e observado para a sub-bacia Porto das Andorinhas (Verificação).	95
Figura 6-14: Comparação entre os hidrogramas de vazões diárias calculado e observado para a sub-bacia Velho da Taipa (Verificação).	95
Figura 6-15: Comparação entre os hidrogramas de vazões diárias calculado e observado para a sub-bacia Ponte da Taquara (Verificação).	96
Figura 6-16: Comparação entre os hidrogramas de vazões diárias calculado e observado para a sub-bacia Três Marias (Verificação).	96
Figura 6-17: Hidrogramas de vazões diárias para as sub-bacias Porto das Andorinhas (a), Velho da Taipa (b), Ponte da Taquara (c) e UHE Três Marias (d) (1970-1972) (Verificação).	97
Figura 6-18: Curvas de Permanência das vazões diárias das sub-bacias Porto das Andorinhas (a), Velho da Taipa (b), Ponte da Taquara (c) e UHE Três Marias (d) (Verificação).	98
Figura 6-19: Dispersão entre as vazões diárias calculadas e observadas para o período de calibração para as sub-bacias Porto das Andorinhas (a), Velho da Taipa (b), Ponte da Taquara (c) e UHE Três Marias (d) (Verificação).	99
Figura 6-20: Vazões Médias Mensais das sub-bacias Porto das Andorinhas (a), Velho da Taipa (b), Ponte da Taquara (c) e UHE Três Marias (d) (Verificação).	100
Figura 6-21: Vazões médias mensais observadas e calculadas (Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5) para o período “Presente”.	102
Figura 6-22: Curva de Permanência das vazões diárias observadas e calculadas (Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5) para o período “Presente”.	103

Figura 6-23: Curva de Permanência em escala logarítmica das vazões diárias observadas e calculadas (Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5) para o período “Presente”.	103
Figura 6-24: Comparação entre as Q_{95} calculadas para o período “Presente” e para os períodos “Futuro1”, “Futuro2” e “Futuro3” para os cenários RCP4.5 e RCP8.5.	105
Figura 6-25: Comparação entre as Q_{50} calculadas para o período “Presente” e para os períodos “Futuro1”, “Futuro2” e “Futuro3” para os cenários RCP4.5 e RCP8.5.	106
Figura 6-26: Comparação entre as Q_5 calculadas para o período “Presente” e para os períodos “Futuro1”, “Futuro2” e “Futuro3” para os cenários RCP4.5 e RCP8.5.	107
Figura 6-27: Vazões diárias observadas afluentes a UHE Três Marias.	109
Figura 6-28: Anomalias das vazões na bacia afluente a usina de Três Marias para o modelo Eta.	111
Figura 6-29: Anomalias nas vazões da bacia afluente a usina de Três Marias para os modelos globais.	111
Figura 6-30: Impacto sobre a vazão anual estimada pelo excedente hídrico. <i>Baseline</i> = 100.	112
Figura 6-31: Simulação da Potência Média Gerada pela UHE Três Marias para os período “PRESENTE” e futuros para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 (modelos climáticos Eta_Miroc5 e Eta-HadGEM2-ES).	114
Figura 6-32: Variação da Potência Média Gerada dos períodos futuros (FUT1, FUT2 e FUT3) em relação ao período “PRESENTE”.	114
Figura 6-33: Curva de permanência da potência gerada (MW) das simulações do modelo climático Eta-MIROC5 no cenário RCP4.5 para os períodos “Presente”, “FUT1”, “FUT2” e “FUT3”.	115
Figura 6-34: Curva de permanência da potência gerada (MW) das simulações do modelo climático Eta-MIROC5 no cenário RCP8.5 para os períodos “Presente”, “FUT1”, “FUT2” e “FUT3”.	116
Figura 6-35: Curva de permanência da potência gerada (MW) das simulações do modelo climático Eta-HadGEM2-ES no cenário RCP4.5 para os períodos “Presente”, “FUT1”, “FUT2” e “FUT3”.	117
Figura 6-36: Curva de permanência da potência gerada (MW) das simulações do modelo climático Eta-HadGEM2-ES no cenário RCP8.5 para os períodos “Presente”, “FUT1”, “FUT2” e “FUT3”.	117
Figura 6-37: Geração de energia na usina de Três Marias para o período de 1999 a 2017.	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Principais características dos RCPs.....	21
Tabela 2-2: Descrição resumida dos RCPs.....	21
Tabela 2-3: Lista dos modelos utilizados no IPCC-AR5 (continua).....	24
Tabela 3-1: Setores apoiados pela modelagem hidrológica.	35
Tabela 3-2: Classificação dos modelos hidrológicos.	36
Tabela 5-1: Evolução das demandas dos diferentes usos consuntivos no Alto São Francisco.....	49
Tabela 5-2 – Usos consuntivos atuais e futuros da bacia hidrográfica do entorno da Represa de Três Marias.	49
Tabela 5-3: Usinas hidrelétricas em operação na bacia em estudo.....	51
Tabela 5-4: Projetos de usinas hidroelétricas em fases avançadas de concretização na bacia em estudo.	52
Tabela 5-5: Informações espaciais geradas através do SIG.	57
Tabela 5-6: Dados hidrológicos e climatológicos de entrada do modelo MBG-IPH. ...	58
Tabela 5-7: IAF de coberturas vegetais.....	59
Tabela 5-8: Informações físicas geradas pelo SIG e utilizadas como dados de entrada pelo MGB-IPH.	61
Tabela 5-9: Sub-bacias geradas na discretização da bacia hidrográfica em estudo..	62
Tabela 5-10: Classificação Hidrológica do Solo para as Condições Brasileiras (continua).	64
Tabela 5-11: Parâmetros fixos do modelo MGB-IPH.....	68
Tabela 5-12: Parâmetros de calibração do modelo MGB-IPH.	69
Tabela 5-13: Funções objetivo para calibração do modelo MGB-IPH.	71
Tabela 5-14: Informações técnicas da UHE Três Marias.	77
Tabela 5-15: Parâmetros utilizados na determinação da evaporação do reservatório da UHE Três Marias.....	79
Tabela 5-16: Relação Cota-Área-Volume do reservatório de Três Marias.....	79
Tabela 6-1: Grupos de solos da bacia pertencentes a cada grupo hidrológico da reclassificação.....	82
Tabela 6-2: Definição das classes de uso e ocupação do solo referentes a bacia em estudo.	83
Tabela 6-3: Funções objetivo obtidas no processo de calibração para o período de 1970 a 1979.	87

Tabela 6-4: Funções objetivo obtidas no processo de verificação para o período de 1990 a 1999.	94
Tabela 6-5: Vazões de referência observadas e calculadas (Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5) para o período “Presente”.....	104
Tabela 6-6: Comparação entre as vazões de referência projetadas para os períodos futuros (FUT1, FUT2 e FUT3) e o período “Presente” para os cenários RCP4.5 e RCP8.5.	108
Tabela 6-7: Diferenças em termos percentuais, entra as vazões extremas e medianas observadas (MGB) e as projeções futuras para os diferentes membros do modelo Eta. Projeções referentes às vazões afluentes à usina de Três Marias.	110
Tabela 6-8: Permanência da potência média do período “Presente” em relação aos períodos futuros.	118

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1.	Objetivos	16
1.2.	Justificativa do Trabalho	16
2.	PROJEÇÃO CLIMÁTICA	18
2.1.	Mudanças Climáticas.....	18
2.2.	Cenários de Emissões.....	20
2.3.	Modelos Climáticos.....	22
2.3.1.	Modelos Climáticos Globais.....	26
2.3.2.	Modelos Climáticos Regionais.....	27
2.4.	Projeções Climáticas para o Brasil	29
3.	PROJEÇÃO DE VAZÕES	32
3.1.	Modelos Hidrológicos	33
3.2.	Impactos nos Recursos Hídricos que Afetam a Hidroeletricidade	37
4.	IMPACTOS SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA	40
4.1.	Estudos Correlatos	41
5.	METODOLOGIA	47
5.1.	Área de Estudo.....	47
5.2.	Modelos Utilizados.....	52
5.2.1.	ETA.....	52
5.2.2.	MGB-IPH.....	55
5.3.	Preparação das Informações Físicas.....	61
5.4.	Preparação dos Dados Hidrológicos e Meteorológicos.....	66
5.5.	Calibração e Verificação do Modelo	67
5.6.	Simulação Hidrológica e Remoção de Viés	73
5.7.	Determinação dos Impactos na Geração Hidrelétrica	76
6.	RESULTADOS.....	81
6.1.	Preparação do Modelo Hidrológico.....	81

6.1.1. Discretização da bacia hidrográfica	81
6.1.2. Unidades de resposta hidrológica.....	82
6.2. Calibração e Verificação.....	86
6.2.1. Calibração	86
6.2.2. Verificação.....	93
6.3. Projeção de Vazões.....	100
6.3.1. Projeções do período “Presente”	101
6.3.2. Projeções dos períodos “Futuros”	104
6.4. Impactos sobre a Geração de Energia.....	113
7. CONCLUSÕES	122
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
ANEXO I – Parâmetros Fixos.....	136
ANEXO II – Parâmetros Calibráveis.....	138
ANEXO III – Cálculo da Evaporação.....	141

1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade dos recursos hídricos influencia diretamente diversas atividades como irrigação, abastecimento de água, navegação, sistemas de alerta contra cheias, piscicultura, dessedentação de animais, geração de energia, entre outras. Sendo assim, as tomadas de decisões nessas áreas dependem do planejamento dos recursos hídricos, que é baseado nas condições hidrológicas para diferentes escalas de tempo e espaço (SILVA, 2005; SANTANA, 2013; ANA, 2015).

O ciclo hidrológico, e conseqüentemente a disponibilidade hídrica, pode variar principalmente devido a quatro fatores: os usos consuntivos da água, o uso e a ocupação do solo, a variabilidade climática e as mudanças climáticas (ANEEL, 2014). Dentre estes fatores, um que vem despertando considerável preocupação nos dias atuais é as mudanças no clima, que são causadas principalmente devido à grande emissão dos gases de efeito estufa na atmosfera (FBDS, 2009; ANEEL, 2014). Futuras mudanças climáticas podem vir a alterar os padrões de precipitação, pois o aumento da temperatura média leva a alterações nos padrões de pressão atmosférica, ventos e evaporação (FREITAS e SOITO, 2008; SANTANA, 2013; LIMA, COLLISCHONN E MARENGO, 2014).

Focando na geração de energia hidroelétrica, que é o objetivo deste estudo, sabe-se que ela depende diretamente das vazões afluentes aos empreendimentos hidroelétricos, que são influenciadas pelas variações na temperatura, precipitação e evaporação, variáveis que tendem a sofrer alterações devido às mudanças climáticas. Conseqüentemente, essas alterações do clima podem afetar significativamente os sistemas energéticos brasileiros, tanto na produção quanto no consumo de energia, pois as fontes de energias renováveis, inclusive a hidroelétrica, são especialmente sensíveis a essas mudanças, sendo sua renovabilidade dependente basicamente do clima (LUCENA, 2010; SAE, 2015).

A matriz elétrica brasileira é baseada na geração hidrelétrica e, por isso, é altamente dependente dos recursos hídricos. Mesmo tendo apresentado uma redução de 3,7% em comparação ao ano anterior, a principal fonte de geração de energia elétrica em 2015, continuou sendo a hidráulica, representando 64% da matriz elétrica brasileira (EPE, 2016). De acordo com a EPE (2016), a capacidade instalada de energia hidrelétrica continua aumentando (2,8% de 2014 para 2015), mesmo que pouco quando comparada às demais fontes, principalmente eólica e solar, que apresentaram um crescimento de 56,2% e 42,3%, respectivamente, em relação ao ano de 2014. No entanto, a geração em si vem diminuindo devido principalmente às últimas crises hídricas, que causaram significativa queda na disponibilidade de recursos hídricos nos últimos anos e que também fizeram com que os

planejadores do setor elétrico voltassem sua atenção para a necessidade da diversificação das fontes de energia elétrica no país (SANTANA, 2013).

A disponibilidade e confiabilidade da geração de energia elétrica dependem das condições climáticas, que podem variar em razão das mudanças climáticas (FBDS, 2009). A vulnerabilidade de um sistema aos impactos das mudanças climáticas depende da exposição do mesmo e da sua habilidade de se adaptar, podendo essa adaptação ser no sentido de compensação de possíveis danos ou até mesmo aproveitamento de oportunidades associadas às mudanças do clima (FREITAS e SOITO, 2008).

No caso da geração hidrelétrica, as bacias hidrográficas menos reguladas (aquelas que possuem as usinas conhecidas como “fio d’água”), as que sofrem com eventos extremos e aquelas que são exploradas de maneira indevida são as que apresentam maior vulnerabilidade com relação aos efeitos das mudanças climáticas nos recursos hídricos (FREITAS e SOITO, 2008).

Neste contexto, a determinação e avaliação dos possíveis impactos nos recursos hídricos é primordial para o direcionamento da política energética e para a definição de medidas mitigadoras dos seus efeitos na geração hidrelétrica do país como um todo (LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014). No entanto, no planejamento de longo prazo do setor elétrico brasileiro ainda não é considerada a vulnerabilidade do mesmo à variação da disponibilidade hídrica devido aos futuros cenários climáticos (ANEEL, 2014; LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014; SCIANNI, 2014; TIEZZI, 2015)

De acordo com Lima, Collischonn e Marengo (2014) e Scianni (2014) existem duas maneiras de lidar com o risco de déficit de energia no país: a primeira seria a construção de um parque gerador que tivesse a capacidade de suprir a demanda de energia mesmo em períodos com baixos volumes de afluência; já a segunda seria o investimento na melhoria dos modelos de previsão de chuva, possibilitando o dimensionamento adequado do parque e dos sistemas complementares. Claramente a segunda opção é a mais adequada, sendo a primeira inviável economicamente, além de que o enorme investimento necessário acarretaria em tarifas absurdamente altas. Lucena (2010) enfatiza que as projeções obtidas através dos modelos climáticos devem ser utilizadas, como possíveis cenários futuros de tempo e clima, na identificação de vulnerabilidades, avaliação de impactos e criação de estratégias de adaptação em setores estratégicos.

Neste contexto, entra a modelagem hidrometeorológica (atmosfera-vazão), que se trata da integração da modelagem climática com a modelagem hidrológica, onde a primeira é responsável pelas projeções da precipitação e variáveis climáticas futuras, e a segunda pela transformação chuva-vazão (SILVA, 2005). Essa combinação de modelos é uma ferramenta

muito importante nas previsões e projeções de vazão com o intuito de avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre os setores dependentes direta ou indiretamente dos recursos hídricos (BARRIOS, 2013; RIBEIRO JUNIOR, 2013; SAE/FCPC, 2015b;). A boa qualidade das previsões hidrológicas, que depende dos resultados dos modelos climáticos, interfere diretamente na operação e no planejamento do sistema energético nacional, aumentando sua confiabilidade e reduzindo seus custos. Sendo assim, é importante o aperfeiçoamento das metodologias para obtenção de cenários de previsão hidrológicos (ALEXANDRE, 2012).

Diversos autores reconhecem que esses modelos climáticos ainda não representam fielmente as variações do tempo e clima, principalmente quando se tratam das previsões de precipitação. Porém, deixam claro que é importante incluí-los em processos de tomada de decisões, pois fornecem informações valiosas sobre os possíveis efeitos das mudanças climáticas no setor energético que podem ser utilizadas para avaliar, e se necessário aprimorar, a sua capacidade de adaptação (LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014; FBDS, 2009; FREITAS e SOITO, 2008; NOBRE *et al.*, 2016; SCHAEFFER *et al.*, 2008; SCIANNI, 2014; TIEZZI, 2015).

Neste estudo propôs-se avaliar os eventuais efeitos das mudanças climáticas na energia gerada pela usina hidrelétrica Três Marias, localizada na parte alta da região hidrográfica do rio São Francisco, no estado de Minas Gerais. Três Marias é uma usina integrante do Sistema Interligado Nacional – SIN, e, portanto, seu planejamento de operação depende da operação de todo o SIN. No entanto, como o intuito do trabalho é evidenciar a tendência das influências das mudanças climáticas em empreendimentos hidrelétricos e não estimar valores exatos de produção de energia, foi adotada uma operação individual e simplificada para a UHE.

A estimativa da energia gerada foi elaborada com base nas vazões afluentes à usina projetadas para o futuro dividido em três períodos de análise: FUT1 (2011-2040), FUT2 (2041-2070) E FUT3 (2071-2100). A projeção das vazões foi realizada através da combinação das modelagens climática e hidrológica, sendo o modelo hidrológico MGB-IPH alimentado pelas precipitações e outras variáveis climáticas provenientes do modelo climático regional Eta, forçado pelos modelos globais HadGEM2-ES e MIROC5, para os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

É importante ressaltar que os resultados aqui encontrados, além de serem apenas estimativas de possíveis cenários futuros de geração de energia, também não levam em consideração outros fatores que também podem influenciar conjuntamente a energia gerada e que, simultaneamente, também poderão sofrer alterações devido às mudanças climáticas, como, por exemplo, a variação no tempo do uso e ocupação do solo, da demanda dos recursos hídricos e da própria demanda de energia elétrica. Não obstante, a importância

desse tipo de estudo não deve ser diminuída, visto sua relevância (juntamente com outros estudos na área) para a compreensão de que as mudanças climáticas irão influenciar de alguma maneira na vazões dos rios, e conseqüentemente, na geração de energia hidroelétrica. Assim, evidencia-se a necessidade do desenvolvimento de metodologias que possam auxiliar neste entendimento, para que o mesmo seja incluído no planejamento do setor energético brasileiro afim de garantir a disponibilidade e confiabilidade do sistema no futuro a partir de medidas de adaptação e mitigação as mudanças climáticas.

1.1. Objetivos

O objetivo principal deste estudo é a avaliação das influências das mudanças climáticas nas vazões afluentes ao reservatório da usina de Três Marias, e conseqüentemente, na geração de energia elétrica, a partir da modelagem hidroclimática.

Os objetivos específicos são:

- ✓ Ajustar o modelo hidrológico MGB-IPH para simulação de vazões na bacia da usina de Três Marias;
- ✓ Analisar e ajustar as projeções de mudanças climáticas dos modelos atmosféricos regionais Eta-MIROC5 e EtaHadGEM2-ES para a bacia, tendo como base os dados observados;
- ✓ Gerar projeções de vazões afluentes usina de Três Marias, tendo como entrada as projeções de modelos climáticos regionais;
- ✓ Analisar os possíveis impactos sobre a geração de energia hidrelétrica.

1.2. Justificativa do Trabalho

A possibilidade de mudanças climáticas futuras levando a um aquecimento adicional do planeta pode levar a alterações no ciclo hidrológico e, conseqüentemente, na disponibilidade hídrica das bacias hidrográficas. Essas mudanças de temperatura afetam os padrões de pressão atmosférica e ventos, levando a significativas mudanças nos padrões de precipitação. Sendo a matriz elétrica brasileira baseada principalmente na hidroeletricidade, setor altamente dependente da disponibilidade hídrica, é de extrema importância o estudo de modelos climáticos e hidrológicos para a previsão das futuras variações das vazões afluentes aos reservatórios do Sistema Interligado Nacional (SIN). As projeções de chuva e vazão fornecem informações importantes para o setor hidrelétrico com relação aos possíveis

impactos na geração de energia elétrica, permitindo que os responsáveis pela sua gestão tomem decisões que minimizem os impactos e conseqüentemente a vulnerabilidade do suprimento de energia nacional. Uma política energética adequadamente direcionada pode evitar problemas sociais e econômicos em diversos outros setores.

2. PROJEÇÃO CLIMÁTICA

2.1. Mudanças Climáticas

O conceito de mudanças climáticas varia dependendo da fonte. O *Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC (2013) define o evento como qualquer alteração do clima que tenha ocorrido ao longo do tempo, independentemente dessa ser proveniente da variabilidade natural ou da atividade humana; já a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima atribui as mudanças climáticas apenas às atividades humanas, sejam elas diretas ou indiretas, sendo adicionais à variabilidade natural do clima (SANTANA, 2013; PBMC, 2014b). No entanto, Collischonn e Tucci (2001), o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas - PBMC (2014a) e Lima, Collischonn e Marengo (2014) chamam atenção para o fato de que a separação da variabilidade natural e das alterações antrópicas, quando se trata de mudanças climáticas, é uma tarefa extremamente difícil, pois além do primeiro ser transitório e o segundo permanente, a quantidade existente de dados necessários para tal análise é relativamente pequena no Brasil.

A mudança climática é uma alteração de longo prazo do tempo e clima, enquanto que a variabilidade climática é natural e ocorre de forma cíclica. A variabilidade do clima pode ser observada em séries históricas de dados, e a partir destas é possível a avaliação e determinação de previsões de comportamento futuras (CEBDS, 2013). No entanto, esse tipo de avaliação da variabilidade climática, só pôde ser verificado recentemente, pois só agora as séries históricas estão completando períodos de cerca de 100 anos (TUCCI *et al.*, 2002), e por isso alguns fenômenos que ocorrem apenas em longos prazos podem não ter sido considerados no gerenciamento de setores como o de energia e de recursos hídricos.

De acordo com IPCC (2014), a principal causa das mudanças climáticas globais é o aumento na concentração de gases de efeito estufa (GEE). No entanto, não é o único responsável, pois a alteração das quantidades de GEE e aerossóis na atmosfera, das propriedades da superfície terrestre e da radiação solar influenciam no equilíbrio energético do sistema climático (SANTANA, 2013; IPCC, 2014). A atmosfera e a superfície terrestre têm grande interação devido às constantes trocas de fluxo de calor, momento e água. Sendo assim, o comportamento do clima depende significativamente do estado da superfície, que pode ser caracterizada pela umidade do solo, por sua refletividade e temperatura. Com relação às variáveis externas ao sistema atmosférico, mas que também influenciam na variabilidade climática tem-se a temperatura da superfície do mar (TSM), gelo dos oceanos, albedo, umidade do solo e cobertura de neve (SILVA, 2005).

Segundo o Ministério de Ciência e Tecnologia – MCT (2010), muitos dos gases de efeito estufa, como vapor d'água, dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e ozônio (O₃) existem naturalmente na atmosfera do planeta Terra, e são de extrema importância na manutenção da temperatura do mesmo. No entanto, devido às atividades antrópicas, a concentração desses gases vem aumentando, além da emissão daqueles que não existem de maneira natural, levando a alterações significativas no clima, e conseqüentemente na vida da sociedade. De maneira geral, nos países desenvolvidos a principal fonte de emissão do dióxido de carbono é o uso energético de combustíveis fósseis, seguida dos processos industriais de produção de cimento, cal, barrilha, amônia e alumínio e da incineração de lixo (MCT, 2010); já no Brasil, como a participação da energia renovável na matriz elétrica é grande, o principal responsável pelas emissões é a mudança do uso da terra para uso agropecuário (Figura 2-1) (SEEG, 2018).

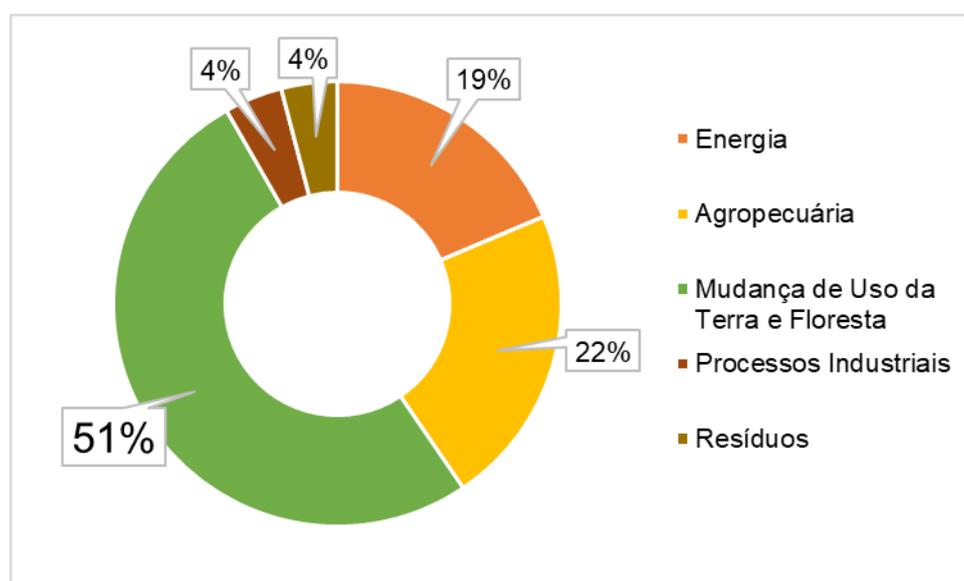


Figura 2-1: Emissões de CO₂ por setor no Brasil no ano de 2016.

Fonte: SEEG, 2018.

Setores estratégicos como biodiversidade, agropecuária, recursos hídricos, energia, e saúde humana, estão vulneráveis às mudanças climáticas (precipitação, temperatura atmosférica, vento, entre outros) de diversas maneiras e em diferentes intensidades. No caso da biodiversidade, a mudança do clima pode levar à migração ou deslocamento das espécies, adaptações das mesmas as novas condições ou, na pior das hipóteses, extinções. Na agricultura, fatores como variações na precipitação e nas temperaturas influenciam de maneira significativa no crescimento da cultura e no calendário agrícola. Nos recursos hídricos as principais alterações podem levar a redução da disponibilidade hídrica em algumas áreas e ao aumento do número e da intensidade de eventos extremos, como cheias e secas. No setor energético, as mudanças climáticas afetam principalmente as energias renováveis, e

estão relacionadas principalmente as alterações das precipitações e evapotranspiração (hidrelétricas), radiação (solar) e intensidade dos ventos (eólica). Por fim, na área da saúde, o principal risco é referente ao aumento da temperatura e ondas de calor e das ocorrências de algumas doenças transmissíveis, como dengue e diarreia (MCTI, 2016b).

2.2. Cenários de Emissões

Como não é possível a previsão de emissões futuras dos GEEs, pois estes dependem de fatores como as alterações demográficas, atividades econômicas, padrões de uso da terra, recursos tecnológicos, decisões sobre a produção de energia e políticas climáticas, foi necessária a criação de cenários que representem os possíveis níveis de emissões para as projeções de possíveis mudanças climáticas (SAE, 2015).

O Quarto Relatório de Avaliação – AR4 do IPCC utilizava uma abordagem “sequencial”, onde primeiramente eram desenvolvidos os cenários socioeconômicos, em seguida os cenários de emissões de GEE e de forçamento radiativo, seguido dos cenários climáticos globais e por fim eram realizados os estudos de impactos, adaptações e vulnerabilidades. Sendo assim, essa abordagem não permitia uma avaliação integrada das diversas fases da sequência, prejudicando os resultados e fazendo com que o tempo de elaboração dos cenários fosse excessivo. Na versão mais recente, o Quinto Relatório de Avaliação – AR5, foi desenvolvida uma abordagem “paralela” para a criação de cenários de mudanças climáticas. Neste caso os modelos climáticos e socioeconômicos de emissões são elaborados simultaneamente, acelerando e melhorando os resultados (MOSS, *et al.*, 2010).

Para o IPCC-AR5 foram definidos novos grupos de entrada para a modelagem atmosférica nos experimentos do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados – Fase 5 (da sigla em inglês - CMIP5), são os chamados Trajetórias de Concentração Representativa, do inglês *Representative Concentration Pathways – RCPs* (SAE, 2015). Eles descrevem quatro diferentes caminhos de emissões e concentrações de gases de efeito estufa, emissão de poluentes atmosféricos e uso do solo que são utilizados como dados de entrada em diversos modelos climáticos para a simulação das consequências nos sistema climático (IPCC, 2014). O cenário RCP 2.6 simula uma rigorosa mitigação das emissões, os cenários RCP 4.5 e 6.0 são intermediários e o cenário RCP 8.5 representa grandes emissões de GEE. Os nomes de cada cenário são relativos aos níveis da forçante radiativa que cada um irá atingir em 2100, 2,6; 4,5; 6,0 e 8,5 W/m² respectivamente (VAN VUUREN *et al.*, 2011).

Os RCPs são baseados na forçante radiativa antropogênica total (quantificação da perturbação da energia do sistema terrestre causada por substâncias e processos antropogênicos (IPCC, 2014)) a ser atingida durante o século XXI. O modelo econômico pode

tomar diferentes caminhos para atingir uma das quatro forçantes radiativas, o que é equivalente aos diferentes caminhos de concentração de GEEs (CHOU *et al.*, 2014b). As principais motivações para a criação de novos cenários foram primeiro, a necessidade de maior quantidade de informação requerida pela atual geração de modelos climáticos e segundo, o crescente interesse em cenários que explorem o impacto da aplicação de diferentes políticas climáticas, o que não era considerado nos antigos cenários – *Special Report on Emission Scenarios* (SRES) (VAN VUUREN *et al.*, 2011). As principais características de cada cenário são apresentadas nas Tabela 2-1 e Tabela 2-2.

Tabela 2-1: Principais características dos RCPs.

Componentes	Cenários			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
Emissões de GEE	Muito baixa	Média-Baixa	Média	Alta
Área agrícola	Média para agricultura e pastagem	Muito baixa para ambos, agricultura e pastagem	Média para agricultura, mas muito baixa para pastagem	Média para ambos, agricultura e pastagem
Poluição do ar	Média-Baixa	Média	Média	Média-Alta

Fonte: Adaptado de VAN VUUREN *et al.*, 2011.

Tabela 2-2: Descrição resumida dos RCPs.

Cenários	Forçante Radiativa
RCP 8.5	Crescente, chegando a 8.5 W/m ² (~1370 ppm CO ₂ eq) em 2100.
RCP 6.0	Estabilização sem ultrapassar 6 W/m ² (~850 ppm CO ₂ eq) e estabilização após 2100.
RCP 4.5	Estabilização sem ultrapassar 4,5 W/m ² (~650 ppm CO ₂ eq) e estabilização após 2100.
RCP 2.6	Pico de ~3 W/m ² (~490 ppm CO ₂ eq) antes de 2100 seguido de declínio.

Fonte: Adaptado de VAN VUUREN *et al.*, 2011.

Segundo MMA (2016a), o cenário RCP 2.6, o mais otimista dos quatro, representa uma redução gradativa das emissões de GEE atingindo emissão zero por volta de 2070. É considerado que em algum momento a absorção de gases de efeito estufa é maior do que as emissões. O aumento esperado da temperatura média terrestre, entre 2010 e 2100, é de 0,3°C a 1,7°C e o aumento do nível do mar de 26 a 55 centímetros.

O cenário RCP 4.5 considera que a demanda energética mundial se estabiliza e a existência de fortes programas de reflorestamento e políticas climáticas rigorosas. Sugere que as emissões de metano se estabilizam e que ocorre um leve aumento das emissões de CO₂ até o valor de 650 ppm até o ano de 2040 (SILVEIRA *et al.*, 2016). Segundo Chou *et al.* (2014b), a forçante radiativa cresce quase linearmente até aproximadamente 2060, onde a taxa de crescimento diminui lentamente até o final do século, quando estabiliza. A temperatura média terrestre sofre um aumento entre 1,1°C e 2,6°C e o nível do mar uma elevação de 32 a 63 centímetros (MMA, 2016a).

O cenário RCP 6.0 apresenta um aumento na temperatura entre 1,4°C e 3,1°C e uma elevação do nível do mar entre 33 e 63 centímetros (MMA, 2016a).

O cenário RCP 8.5 pressupõe um crescimento contínuo da população juntamente com um desenvolvimento tecnológico lento, que resulta em grandes emissões de dióxido de carbono. Esse é o cenário mais pessimista apresentado pelo relatório e corresponde ao caso de não ser realizada nenhuma mudança política para reduzir as emissões e a uma forte dependência de combustíveis fósseis (VAN VUUREN *et al.*, 2011; SILVEIRA *et al.*, 2016). De acordo com Chou *et al.* (2014b), a média global de aquecimento no final do século XXI é de cerca de 4°C e sua forçante radiativa cresce quase linearmente durante esse período. Segundo MMA (2016a), a elevação do nível dos oceanos é de 45 a 82 centímetros.

2.3. Modelos Climáticos

Segundo Chou *et al.* (2014a) e Lima, Collischonn e Marengo (2014), as melhores ferramentas para estudos de mudanças climáticas são os modelos climáticos, que consideram as variações e interações da atmosfera, dos oceanos, da criosfera (áreas com gelo e neve), da vegetação, dos ciclos biogeoquímicos, etc., e são alimentados por informações provenientes dos cenários apresentados anteriormente, como emissões de GEE e uso do solo.

Os modelos climáticos globais e regionais são representações aproximadas de complexos sistemas e suas interações, sendo evidente a existência de incertezas, principalmente quando os resultados de diferentes modelos são comparados (FBDS, 2009; SCHAEFFER *et al.*, 2008). Portanto, resultados de estudos que envolvam projeções provenientes de modelos climáticos devem ser interpretados com cautela. As incertezas estão associadas especialmente a capacidade de representação de todos os processos físicos relevantes, a sensibilidade dos modelos as condições iniciais adotadas, aos valores futuros das variáveis que podem influenciar o sistema climático e a como a mudança dessas variáveis afetam as mudanças climáticas (SAE, 2015; PBMC, 2014a).

Segundo SAE (2015), a confiabilidade de um modelo climático, global ou regional, está baseada nos seguintes critérios: na fundamentação do modelo em leis bem estabelecidas da física; na capacidade do modelo de simular o clima atual, que pode ser verificada pela comparação dos resultados com valores observados ou através da comparação de resultados de diversos modelos; e na capacidade dos modelos de reproduzirem o clima e mudanças climáticas do passado.

O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), criado pelo Programa das Nações Unidas para o Ambiente (PNUA) e pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM) em 1988, é o principal órgão internacional responsável por reunir e avaliar o atual conhecimento sobre as mudanças climáticas e seus possíveis impactos no meio ambiente, na sociedade e na economia (IPCC, 2014; SILVEIRA *et al.*, 2014). Ele é responsável pela certificação dos modelos climáticos existentes no mundo e emite relatórios, no mínimo a cada cinco anos, apresentando a avaliação e os resultados dos diversos modelos (LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014).

Até agora foram publicados cinco relatórios pelo IPCC, os quais confirmam a projeção de aumento da temperatura média da atmosfera, além do aumento do nível do mar e a redução da cobertura de gelo. A Tabela 2-3 apresenta os modelos globais considerados no quinto relatório, os quais resultaram de simulações baseadas nas concentrações observadas de GEE durante o século XX e nas concentrações estimadas de GEE para o século XXI.

Tabela 2-3: Lista dos modelos utilizados no IPCC-AR5 (continua).

Sigla	Modelo	País
BCC-CSM1.1	Beijing Climate Center Climate System Model - version 1.1	China
MIROC5	Model for Interdisciplinary Research on Climate	Japão
HadGEM2-AO	Hadley Global Environment Model 2 – Atmosphere Ocean	Reino Unido
ACCESS1.3	Australian Community Climate and Earth System Simulator version 1.3	Austrália
CSIRO-Mk3.6.0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation Model version Mark 3.6.0	Austrália
BNU-ESM	Beijing Normal University Earth System Model	China
MPI-ESM-MR	Max-Planck-Institut für Meteorologie Earth System Model – Mixed Resolution	Alemanha
ACCESS1.0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) and Bureau of Meteorology	Austrália
MIROC-ESM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute	Japão
MIROC-ESM-CHEM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute	Japão
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques Climate Model version 5	França
MPI-ESM-LR	Max-Planck-Institut für Meteorologie – Earth System Model – Low	Alemanha
CCSM4	Community Climate System Model version 4	Estados Unidos
CMCC-CMS	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	Itália
CESM1-CAM5	Community Earth System Model – Community Atmospheric Model version 5	Estados Unidos
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute	Japão
CESM1-BGC	Community Earth System Model, version 1 – Biogeochemistry	Estados Unidos
CMCC-CM	CMCC-CM Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici Climate Model	Itália
CanESM2	CanESM2 Canadian Earth System Model 2nd generation	Canadá
GISS-E2-H	GISS-E2-H Goddard Institute for Space Studies	Estados Unidos

Tabela 2-3: Lista dos modelos utilizados no IPCC-AR5 (conclusão).

Sigla	Modelo	País
INM-CM4	INM-CM4 Institute for Numerical Mathematics Climate Model 4	Rússia
IPSL-CM5B-LR	IPSL-CM5B-LR Institut Pierre-Simon Laplace Earth System Model for the 5th IPCC report – Low Resolution	França
IPSL-CM5A-LR	IPSL-CM5A-LR Institut Pierre-Simon Laplace Earth System Model for the 5th IPCC report – Low Resolution	França
GFDL-CM3	GFDL-CM3 Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Climate Model 3	Estados Unidos
GFDL-ESM2M	GFDL-ESM2M Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Earth System Model 2	Estados Unidos
HadGEM2-ES	HadGEM2-ES Met Office Hadley Centre -Earth System Models	Reino Unido
IPSL-CM5A-MR	IPSL-CM5A-MR Institut Pierre-Simon Laplace Earth System Model for the 5th IPCC report – Medium Resolution	França

Fonte: SILVEIRA *et al.*, 2016.

A partir da avaliação dos modelos globais do AR5, percebeu-se uma melhora geral em relação aos modelos globais do AR4, especialmente quando se trata da precipitação em regiões tropicais, que teve um aumento na sua correlação padrão espacial de 0,77 para 0,82 (CHOU *et al.*, 2014a, 2014b). Os modelos climáticos padrões que foram considerados no AR4 foram o Modelos acoplados de Circulação Geral Atmosfera-Oceano (MCGAOs), já no AR5 foram adotados os Modelos do Sistema Terrestre (MSTs), que são evoluções dos MCGAOs, incluindo a representação de vários ciclos biogeoquímicos (ciclo do carbono, enxofre ou ozônio) (LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014).

As principais melhorias dos modelos do AR5 em relação aos do AR4 são que a resolução dos modelos é ligeiramente maior; incluem acoplamento mais detalhado com os oceanos; melhora na representação física das nuvens; consideram o ciclo do carbono; melhora dos processos de interação da vegetação com modelos de vegetação dinâmica e usam forçantes radiativas mais completas devidas principalmente a melhor modelagem dos efeitos dos aerossóis (LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014). Outra diferença está relacionada com os cenários de emissão de gases de efeito estufa e socioeconômico, que foi discutida na seção 2.2.

2.3.1. Modelos Climáticos Globais

Os Modelos Climáticos Globais, também conhecidos como Modelos de Circulação Geral (MCGs), são modelos tridimensionais que representam matematicamente - através de equações de fluxo de energia, momento, conservação de massa (SANTANA, 2013; SCIANNI, 2014), lei dos gases (SANTANA, 2013), conservação de energia, continuidade e hidrostática (SCIANNI, 2014) - os processos internos da atmosfera e suas interações com a atmosfera, biosfera, criosfera, hidrosfera e litosfera que possam causar alguma mudança no tempo e no clima (LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014).

Segundo a SAE (2015), os modelos globais possuem resolução horizontal de 100 a 300 km, cerca de 19 a 38 níveis verticais na atmosfera, e nos oceanos, de 20 a 40 níveis; sendo que todas essas células e níveis interagem entre si (Figura 2-2). A grade de células regulares pode variar de 100 a 1000 km e as camadas verticais de 1 a 5 km (SANTANA, 2013).

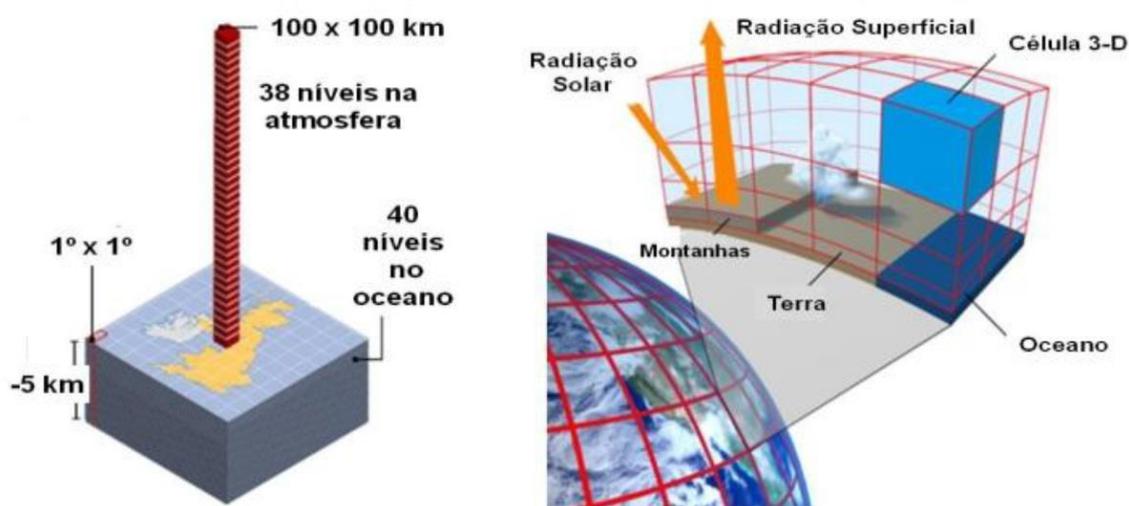


Figura 2-2: Discretização espacial dos Modelos Climáticos Globais.

Fonte: SAE, 2015.

Lucena (2010) afirma que, apesar de todos os estágios de um estudo dos impactos causado nos recursos hídricos pelas mudanças climáticas apresentarem incertezas, a maior delas está definitivamente associada às projeções dos MCGs. A resolução destes modelos é na ordem de dezenas a centenas de quilômetros, o que faz com que sejam inadequados para representar as condições de bacias hidrográficas (SANTANA, 2013; CHOU *et al.*, 2014a, 2014b), principalmente as de pequenas dimensões (LUCENA, 2010).

As principais limitações dos MCGs quando aplicados aos recursos hídricos são que a discretização apenas retrata os processos atmosféricos de macro escala na superfície da terra; processos que variam em microescala, como os hidrológicos, não são adequadamente

representados e o tempo e custo de uma discretização mais detalhada ainda é muito alto (SILVA, 2005; SANTANA, 2013). As resoluções espaciais e temporais dos MCGs fazem com que eventos intensos e de curta duração não sejam adequadamente representados (SCIANNI, 2014).

De acordo com Lucena (2010), a precipitação, a evapotranspiração e a vazão, variáveis importantes para a avaliação do ciclo hidrológico, não são adequadamente representadas por esses modelos. No caso da precipitação, isso acontece porque ela ocorre em uma escala menor do que a grade dos Modelos Climáticos Globais e porque os processos de percolação e escoamento, dependentes de características locais específicas, não são considerados. A evapotranspiração tem sua representação afetada pelo fato de ocorrer na fronteira dos modelos (interação entre atmosfera e superfície terrestre). Como a vazão é dependente da precipitação e da evapotranspiração, conseqüentemente sua estimativa também não é precisa.

Até o momento, as projeções de precipitação realizadas para a América do Sul com os diferentes modelos globais não têm mostrado convergência, já as previsões de temperatura tem apresentado consenso (FREITAS e SOITO, 2008, FBDS, 2009; LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014; SCIANNI, 2014; ANA, 2016). No IPCC-AR5, os modelos que serviram de base para a sua elaboração ainda mostram divergências quanto as projeções de precipitação para várias regiões do Brasil (LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014; SILVEIRA *et al.*, 2016; ANA, 2016).

De acordo com Chou *et al.* (2014a), as projeções de precipitação foram melhoradas entre os relatórios AR4 e AR5 do IPCC devido ao aumento da correlação espacial. IPCC (2013) comenta que modelos globais de grades de até 3,5 km já vem sendo testados, no entanto suas simulações são para no máximo dois anos. Espera-se que no futuro possam ser simuladas projeções de longo prazo, fazendo com que estas sejam mais precisas, permitindo a previsão de eventos extremos.

Santana (2013) chama atenção para o fato de que não existe um MCG ideal ou melhor que os outros, sendo necessária uma análise dos resultados de diversos modelos a fim de explorar os efeitos de diferentes formulações.

2.3.2. Modelos Climáticos Regionais

Como os Modelos Climáticos Globais (MCG) são incapazes de representar adequadamente características dinâmicas locais do clima (características topográficas, das bacias hidrográficas e da costa), foram desenvolvidas técnicas para o escalonamento das variáveis de uma resolução espacial relativamente baixa para escalas locais mais refinadas,

processo conhecido como *downscaling* (LUCENA, 2010; PBMC, 2014a; CHOU *et al.*, 2014b; SAMPAIO e DIAS, 2014). Nessa técnica, as fronteiras do modelo regional são alimentadas pelos dados do modelo global (Figura 2-3) (SILVA, 2005; SANTANA, 2013; CHOU *et al.*, 2014a e 2014b). A vantagem do uso de modelos climáticos regionais está na possibilidade de detalhar os resultados dos modelos globais com um custo computacional relativamente baixo (SAMPALIO e DIAS, 2014), sendo os resultados uma combinação do clima informado pelo MCG e da solução interna do modelo regional (CHOU *et al.*, 2014a).

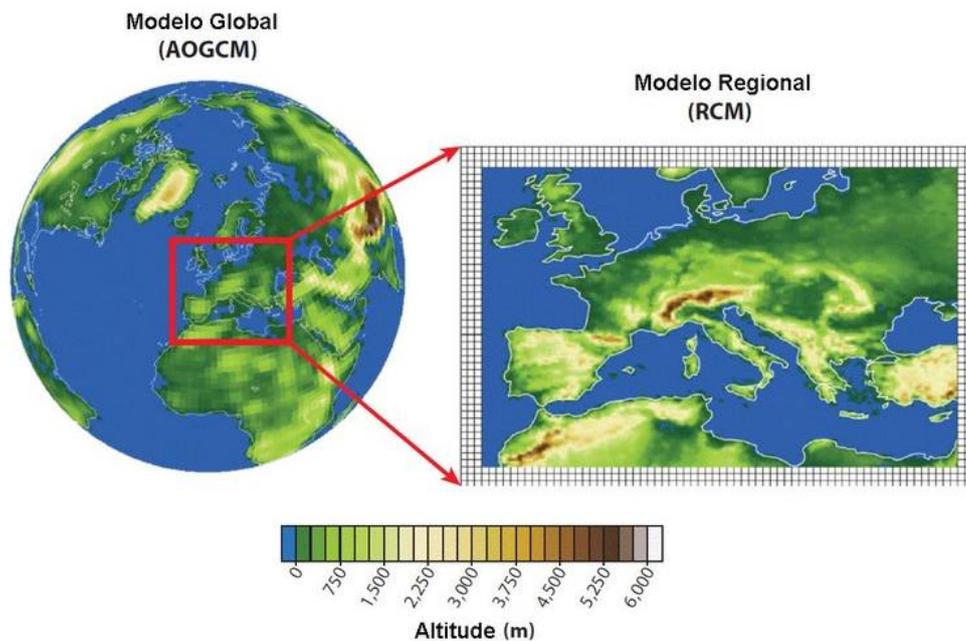


Figura 2-3: Aplicação da técnica *downscaling* em modelos climáticos globais.

Fonte: Adaptado de GIORGI e GUTOWSKI Jr. (2015).

De maneira geral, os Modelos Climáticos Regionais possuem uma resolução espacial e temporal que permitem uma análise mais completa dos processos hidrológicos (LUCENA, 2010). A resolução da grade dos modelos pode variar de 4 a 100 quilômetros e como eles são baseados nos modelos globais, utilizam as mesmas condições de contorno dos modelos de origem (SANTANA, 2013). As incertezas provenientes da introdução de informações dos MCG através das fronteiras do MCR podem ser reduzidas a partir de um processo de perturbação dos membros do MCG de entrada (CHOU *et al.*, 2014a).

De acordo com PBMC (2014a) e SAE (2015), existem dois tipos básicos de *downscaling*:

- ✓ *Downscaling* Dinâmico: trata-se do desenvolvimento de modelos dinâmicos climáticos regionais a partir de condições iniciais e de contorno provenientes de um MCG.

- ✓ *Downscaling* Estatístico/Empírico: relaciona estatisticamente as características do clima global ao regional. Baseia-se nos fatores de larga escala que medem aspectos da circulação global e nas características fisiográficas locais (topografia, uso da terra, entre outras). Possui a desvantagem de requerer séries longas de dados locais e pressupõe estacionariedade entre os preditores e a variável-resposta, o que é questionável quando se trata de mudanças climáticas.

2.4. Projeções Climáticas para o Brasil

Diversos estudos focados nas projeções climáticas para o Brasil já tem utilizado os modelos e cenários propostos pelo AR5 – IPCC. Grande parte deles têm aplicado dois modelos climáticos globais, o HadGEM2-ES (Reino Unido) e o MIROC5 (Japão), refinados pelo modelo regional ETA (resolução horizontal de 20 km e 38 níveis verticais), para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. Na maioria desses estudos as simulações foram feitas para os seguintes períodos: 1961-1990 (período base), 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100.

Os estudos citados neste resumo levantamento das projeções climáticas para o Brasil foram: o projeto denominado “Brasil 2040: cenários e alternativas de adaptação à mudança do clima” elaborado pela Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República (SAE, 2015); a Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima desenvolvida pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI, 2016a e b) e o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima elaborado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2016a e b).

Segundo a SAE (2015), tratando-se das anomalias de temperatura média anual, os três períodos futuros (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) indicam que a região centro-oeste é a que irá apresentar maiores anomalias de temperatura, quando comparada às demais regiões, sendo no período mais recente (2011-2040) projetado um acréscimo de 2,5 °C pelo Eta/HadGEM2-ES (RCP 8.5). Em todos os períodos, quando o modelo regional Eta é forçado pelo modelo global HadGEM2-ES, as anomalias de temperaturas simuladas são superiores as do MIROC5, ou seja, os prognósticos do HadGEM2-ES são sempre mais críticos para o Brasil. No período de 2071-2100, o mesmo apresenta uma anomalia em torno de 4,5°C no cenário RCP 4.5 para todo o país.

No caso das anomalias de precipitação média anual, nos três períodos, as simulações apresentam anomalias positivas para o extremo sul do Brasil e negativas para o restante do país. Nas simulações do modelo Eta/HadGEM2-ES, as anomalias negativas se destacam na região litorânea para os três períodos. O cenário RCP 8.5 se apresenta mais seco na maior

parte do Brasil, mas principalmente no litoral das regiões Nordeste e Sudeste do país (SAE, 2015).

O MCTI (2016b) chama atenção para o fato de que nas projeções futuras, para ambos os cenários, o modelo Eta/HadGEM2-ES sempre apresenta resultados mais intensos do que o Eta/MIROC5. Durante o verão, as simulações sugerem uma redução das precipitações no nordeste da região Nordeste e um aumento na região Sul, podendo alcançar a parte sul da região Sudeste. No entanto, chama atenção para o fato de que a região Sudeste é uma região com baixa previsibilidade climática, que depende da posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) durante o verão, o que afeta significativamente o resultado das projeções.

O MMA (2016a) destaca que os máximos de aquecimento se localizam na região Centro-Oeste em todas as estações do ano e que ao final do século XXI estes máximos se estendem para as regiões Norte, Nordeste e Sudeste do Brasil, podendo variar de 2 °C a 8 °C em algumas áreas. Os centros de máxima redução de chuvas durante o verão localizam-se sobre Centro-Oeste e Sudeste, se expandindo para as regiões da Amazônia. O aumento na quantidade de dias secos consecutivos no Nordeste e a diminuição de dias úmidos consecutivos na região Amazônica são resultados constantemente encontrados nas projeções.

O estudo de Nobre *et al.* (2016) é diferente dos demais por apresentar as projeções para o Brasil diretamente do conjunto de modelos globais do AR5 – IPCC, sem o refinamento por modelos regionais, e também por incluir na sua análise os cenários RCP 2.6 e RCP 6.0. Ele chama atenção para o fato de que, mesmo para os cenários mais otimistas, existe a probabilidade de aquecimento, principalmente para o final do século. Na Figura 2-4 podem ser observadas as probabilidades de aquecimentos para os três anos destacados do século XXI.

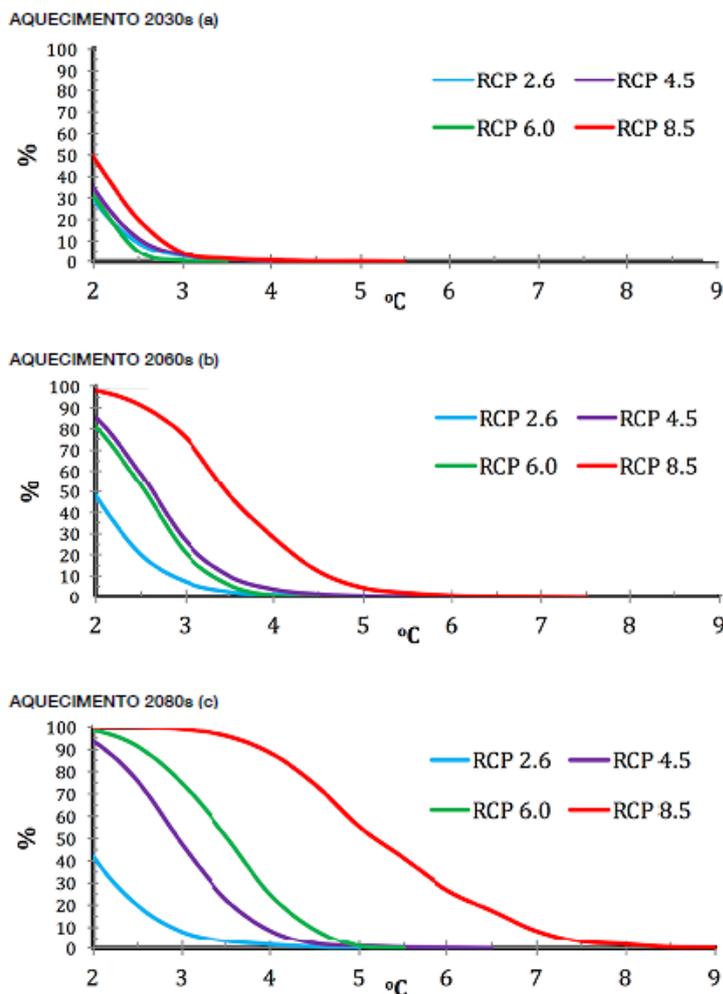


Figura 2-4: Probabilidade de aquecimento nos *timeslices* (fatias no tempo) em 2030s, 2060s e 2090s. As probabilidades de aquecimento foram obtidas a partir dos valores das anomalias do conjunto de projeções dos modelos usados pelo IPCC (CMIP5) em relação ao período pré-industrial.

Fonte: NOBRE *et al.*, 2016.

O estudo de Silveira *et al.* (2016) também trabalha com modelos climáticos globais do AR5 – IPCC (27 modelos), porém foca na região da bacia hidrográfica do rio São Francisco para o período de 2011 a 2100, utilizando os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. Os resultados obtidos indicaram que todos os modelos apresentaram tendência positiva para a temperatura em todo o período analisado, sendo esta substancialmente maior no cenário RCP 8.5 (aproximadamente 4°C no período de 2071 a 2100). Já no caso das precipitações os resultados foram divergentes, no entanto, quando analisados em conjunto, projetam anomalias entre -20% e 20% para cada período de 30 anos de simulação. A avaliação leva os autores a indicarem que cerca de 28% dos modelos “não representaram bem” a sazonalidade da precipitação na região. Outro ponto que chamou a atenção foi o fato do cenário RCP 8.5 apresentar maiores incertezas associadas às projeções de precipitação.

3. PROJEÇÃO DE VAZÕES

A integração de modelos atmosféricos com modelos hidrológicos foi grande motivadora no desenvolvimento de modelos hidrológicos de grande escala, devido à necessidade da melhor representação dos processos terrestres dentro dos modelos atmosféricos. O ideal seria a interação simultânea entre a atmosfera e a superfície, conhecido como modo *on-line*, no entanto, a maior parte dos estudos ainda utiliza a metodologia *off-line*, onde o modelo hidrológico recebe como dado de entrada a precipitação e/ou temperatura fornecida pelo modelo atmosférico (SILVA, 2006).

A incorporação de modelos climáticos e modelos hidrológicos permite estender o horizonte da previsão das vazões para um tempo maior que o de concentração da bacia de interesse, que seria o limite para a previsão baseada nas vazões a montante de uma bacia significativamente grande, e também melhora a qualidade das previsões. Nessa integração, o modelo climático é responsável pela determinação de precipitação e variáveis climáticas futuras e o modelo hidrológico pela determinação das vazões utilizando os resultados do outro modelo como dados de entrada (SILVA, 2005).

Para inserir as variáveis climáticas fornecidas pelos modelos climáticos como dados de entrada no modelo hidrológico – após a discretização e representação das características físicas da bacia e a calibração e verificação do modelo utilizando informações hidroclimáticas observadas provenientes de postos de medição e/ou entidades responsáveis por esse tipo de dados – é necessária a adequação das informações para a grade do modelo hidrológico e em seguida a correção dos erros sistemáticos existente nesses dados, para só então simular as projeções de vazões. A Figura 3-1 ilustra a integração dos modelos.

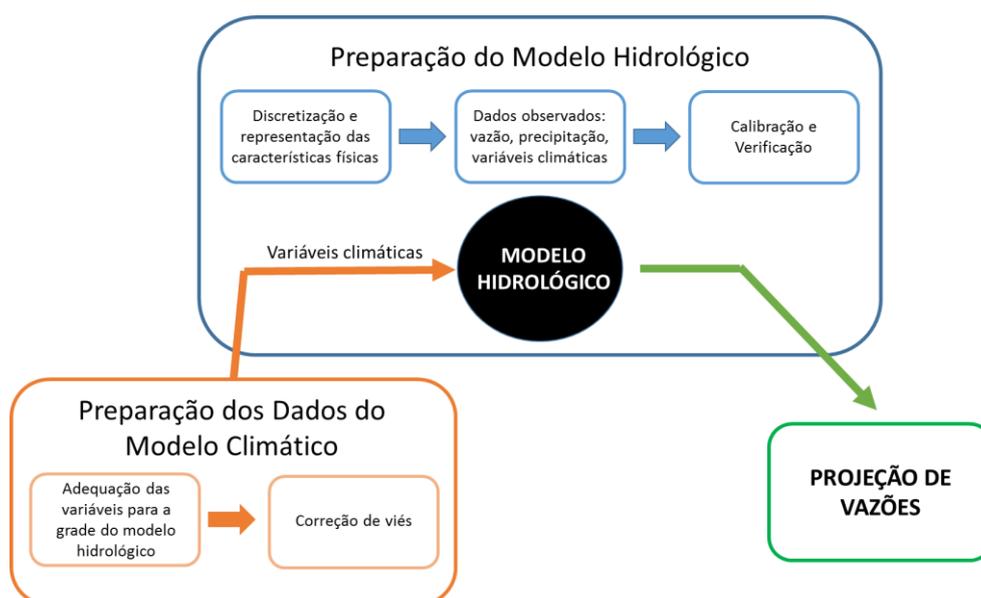


Figura 3-1: Integração dos modelos climáticos e hidrológicos.

É importante ressaltar que, de acordo com Fan, Ramos e Collischonn (2015) e Meller *et al.* (2014), o processo de previsões e projeções hidroclimáticas possui diversas incertezas associadas principalmente com os dados hidrológicos e meteorológicos disponíveis em tempo real, com o equacionamento do modelo, com a calibração do modelo, com as condições iniciais no momento da previsão e com as informações de previsões meteorológicas usadas. Essas incertezas se propagam pelo sistema e devem ser quantificadas, analisadas e se possível, corrigidas.

Devido aos motivos citados acima, principalmente as condições iniciais utilizadas no processo – pois os modelos climáticos são muito sensíveis as condições iniciais da atmosfera no início das previsões (MELLER, *et al.*, 2014; FAN, 2015) – as previsões hidrológicas determinísticas (realizadas a partir de uma única rodada do modelo meteorológico), com relativa frequência, apresentam resultados para simulações de vazões futuras consideravelmente diferentes da realidade (FAN, 2015). Uma maneira de lidar com esse problema é a previsão meteorológica por *ensemble*, onde as simulações são feitas a partir de diferentes modelos meteorológicos ou de diferentes condições iniciais de um único modelo, sendo cada resultado do conjunto de previsões considerado uma possível trajetória de tempo e clima ao longo do tempo (MELLER, *et al.*, 2014; FAN, 2015). No entanto, é recente a utilização desta metodologia nas simulações hidrometeorológicas, e esta vem sendo aplicada principalmente em previsões de curto e médio prazo (FAN, 2015; FAN *et al.* 2016), ou seja, sua eficácia em projeções de mudanças climáticas (longo prazo), que é o caso deste estudo, ainda estão sendo verificadas. Além disso, o método de *ensemble* necessita de uma grande capacidade computacional, mais tempo de processamento e tecnologias que possibilitem o tratamento de grande quantidade de informações (FAN *et al.*, 2016), que no caso de estudos de mudanças climáticas é uma barreira importante, devido a extensão do período temporal analisado e a grande quantidade de dados trabalhadas. Portanto, neste estudo, as projeções serão realizadas pela metodologia determinística.

3.1. Modelos Hidrológicos

Segundo Beven (2001), as principais razões para a utilização de modelos hidrológicos são as limitações das técnicas de medições hidrológicas e do tempo e espaço. Os modelos hidrológicos são responsáveis pela reprodução dos fenômenos hídricos, dentro de uma escala de tempo definida, sendo utilizados na simulação de situações e antecipação de ações (RENNÓ e SOARES, 2000; FILHO *et al.*, 2012). Tratam-se da representação de um sistema físico por meio de relações e equações que podem variar para cada modelo, pois dependem da criatividade e do conhecimento que o modelador possui (BEVEN, 2001; FILHO *et al.*, 2012). Sendo assim, não existe um modelo ideal e sim aquele que melhor se adequa a certo

fenômeno ou situação (RENNÓ e SOARES, 2000). Um modelo é responsável pela representação simplificada da realidade, de maneira a auxiliar o entendimento dos processos que permeiam a mesma. Portanto, a descrição matemática desses processos sempre irá envolver importantes simplificações e aproximações (BEVEN, 2001).

A Figura 3-2 representa os principais componentes e fenômenos do ciclo da água, e são esses processos que devem ser reproduzidos na modelagem hidrológica, variando na sua precisão de acordo com o objetivo do modelador. Segundo Rennó e Soares (2000), de maneira geral, os modelos procuram simular o percurso da água desde a precipitação até sua saída na forma de escoamento para fora da bacia e/ou evapotranspiração.

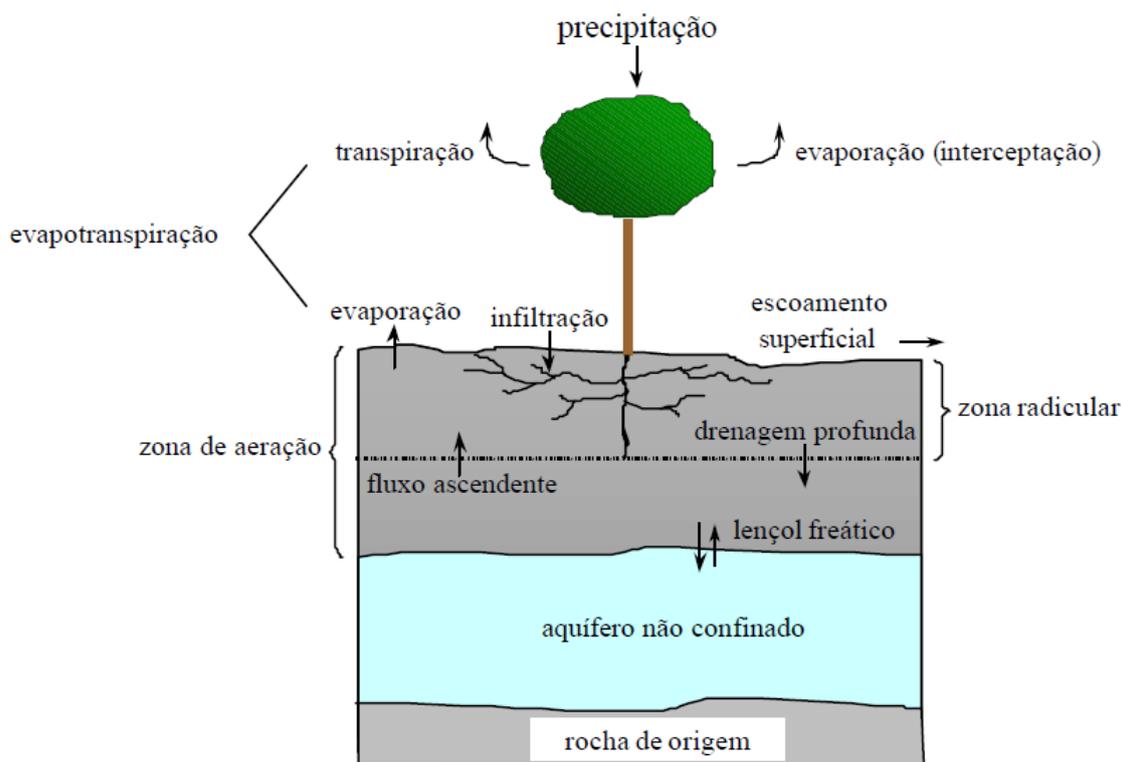


Figura 3-2: Principais componentes do ciclo hidrológico.

Fonte: RENNO e SOARES, 2000.

De maneira simplificada, em um modelo hidrológico o solo pode ser entendido como um reservatório onde o volume varia no tempo devido a diversos fatores, sendo o balanço de água no solo dependente de todas as entradas e saídas do sistema. A principal entrada de água no sistema é realizada através da precipitação, que pode ser interceptada pela cobertura vegetal ou atingir diretamente o solo ou os corpos d'água. A água que é interceptada sofre o processo de evaporação, já a que chega ao solo tem parte infiltrada e parte que escoa superficialmente. A água infiltrada se redistribui no perfil do solo. Simultaneamente, a água pode estar sofrendo o processo de evapotranspiração onde ocorre a evaporação diretamente

da superfície e a transpiração pelas folhas das plantas que retiraram a mesma do solo pelas raízes. Ainda podem ocorrer diversos outros processos mais específicos como perda de água por drenagem profunda, fluxo ascendente de água no solo e fluxo lateral subsuperficial (RENNÓ e SOARES, 2000).

O principal objetivo da utilização de modelos hidrológicos é o aprimoramento das tomadas de decisões relacionadas aos problemas hídricos. A crescente demanda de água e a flutuação dos padrões climáticos a cada ano fazem com que seja necessário o aperfeiçoamento dos modelos hidrológicos (BEVEN, 2001). Suas principais aplicações estão relacionadas à análise de consistência e preenchimento de falhas em séries históricas de vazão, previsões de vazão que podem ser utilizadas no dimensionamento de obras e projetos hídricos, previsão de cenários para planejamento e gestão dos recursos hídricos e avaliação dos efeitos resultantes da modificação do uso do solo (COLLISCHONN *et al.*, 2007; FILHO *et al.*, 2012). A Tabela 3-1 apresenta alguns exemplos de setores que são beneficiados pelos resultados do processo de modelagem hidrológica.

Tabela 3-1: Setores apoiados pela modelagem hidrológica.

SETOR	FOCO
Desenvolvimento Urbano	Abastecimento de água, tratamento de esgoto, drenagem urbana e controle de cheias
Energia	Projeto e operação de hidrelétricas
Transporte	Navegação
Controle de Calamidades	Rompimento de barragens, cheias e estiagens
Gerenciamento de Recursos Hídricos	Concessão do uso da água e controle do uso e conservação da água
Sistema de Informações	Cadastro de usuários e monitoramento de variáveis hidrológicas
Produção Agrícola	Irrigação
Controle Ambiental	Impactos devido obras hidráulicas, despejo de efluentes e uso do solo

Fonte: Adaptado de FILHO *et al.*, 2012.

De maneira geral, os modelos hidrológicos podem ser classificados sob diferentes aspectos (Tabela 3-2): tipos de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos); tipo de relações entre essas variáveis (empíricos ou conceituais); forma da representação dos dados (discretos ou contínuos); existência ou não de relações espaciais (concentrados/pontuais ou distribuídos) e existência de dependência temporal (estacionários/estáticos ou dinâmicos) (RENNÓ e SOARES, 2000; FILHO *et al.*, 2012). A

escolha de qual tipo de modelo deve ser utilizado e seu detalhamento dependem diretamente do objetivo do estudo, da capacidade computacional disponível e da disponibilidade de dados (LUCENA, 2010).

Tabela 3-2: Classificação dos modelos hidrológicos.

ESTOCÁSTICOS	DETERMINÍSTICOS
Pelo menos uma das variáveis envolvidas tem comportamento aleatório	Os conceitos de probabilidade são desprezados, ou seja, uma dados de entrada, mesmo sendo aleatório, irá produzir um único valor de saída
CONCEITUAIS	EMPÍRICOS
Baseiam-se na representação dos processos físicos que envolvem o fenômeno estudado. São subdivididos em semi conceituais e físicos, sendo que o primeiro relaciona as características do processo, já o segundo se representa a física do sistema através de equações diferenciais	Se baseiam em análises estatísticas (modelos caixa-preta) e relações fundamentadas em observações
CONCENTRADOS/PONTUAIS	DISTRIBUÍDOS
Não consideram a variabilidade espacial, sendo a principal variável o tempo	Representam a variabilidade espacial das características físicas da bacia hidrográfica
ESTACIONÁRIOS/ESTÁTICOS	DINÂMICOS
Descrevem os fenômenos em determinado momento (sem variação do tempo)	As variáveis são função do tempo
DISCRETOS	CONTÍNUOS
Modela períodos isolados da série (ex: cheias e secas)	Representam longos períodos da série

Fonte: Adaptado de RENNÓ e SOARES (2000) e FILHO *et al.* (2012).

Com relação a classificação dos modelos hidrológicos sob o tipo de relações entre as variáveis, Collischonn (2001) e Lucena (2010) apresentam uma divisão um pouco diferente: modelos de base física, de base conceitual e estatísticos. Num modelo de base física quaisquer parâmetros ou constantes de suas equações podem ser estimados ou medidos de

forma independente. No entanto, quando a dificuldade da compreensão teórica e de obtenção de dados é grande, os modelos de base conceituais têm substituído os de base física. Eles possuem uma base física mínima (representações matemáticas simplificadas), porém, contém parâmetros que não podem ser medidos diretamente, exigindo uma etapa de ajuste ou calibração. Já, quando não existe uma boa teoria, ou ela é inaplicável com os dados e ferramentas disponíveis, a saída é a utilização de modelos estatísticos, que procuram relacionar causas e efeitos sem se importar com o processo interno de transformação.

3.2. Impactos nos Recursos Hídricos que Afetam a Hidroeletricidade

Os recursos hídricos devem sofrer impactos significativos devido às mudanças climáticas (SILVEIRA *et al.*, 2016). Segundo MMA (2016b), a água será o primeiro meio pelo qual a população e os setores usuários irão sentir os efeitos dessas mudanças. As principais alterações serão referentes aos padrões de temperatura, evaporação e precipitação (intensidade e variabilidade) que deverão impactar a disponibilidade hídrica e também poderão tornar os eventos extremos mais intensos (MMA, 2016b; PBMC, 2014b). É importante ressaltar que os recursos hídricos não são afetados apenas pelas mudanças climáticas, mas também pelo uso e ocupação das bacias hidrográficas, aumento da demanda de água, intensificação de processos que comprometem a qualidade da água e o incremento da intervenção humana em geral, por exemplo. No entanto, nessa seção serão abordados apenas os impactos relacionados diretamente as mudanças no clima.

Para quase todas as atividades humanas são utilizadas grandes quantidades de água, portanto a disponibilidade e qualidade dos recursos hídricos estão diretamente ligadas à vulnerabilidade de diversos setores, sendo necessário um investimento ainda maior no incentivo ao uso sustentável da água (LUCENA, 2010). As mudanças climáticas, por meio principalmente das variações de precipitação e temperatura, podem gerar grandes impactos nos recursos hídricos em aspectos como umidade do solo, reserva subterrânea, evaporação, evapotranspiração e geração de escoamento superficial (SAE, 2015; SILVEIRA *et al.*, 2016).

De maneira geral, o planejamento e a operação da infraestrutura hídrica para o atendimento dos usos múltiplos têm seu dimensionamento baseado em séries hidrológicas, ou seja, pressupões que a estatística das séries observadas irá representar o futuro (estacionariedade das séries hidrológicas). No entanto, as alterações climáticas irão afetar significativamente esse padrão, fazendo necessário que o planejamento dos recursos hídricos leve em consideração as variações e incertezas das mesmas. (MMA, 2016b).

Tratando especificamente da hidroeletricidade, a quantidade de energia que pode ser gerada por uma hidrelétrica não depende apenas de sua capacidade instalada, mas também da variação das vazões afluentes a usina (SCHAEFFER *et al.*, 2012). Os principais parâmetros climáticos que interferem nas vazões dos rios são a temperatura média da atmosfera e a precipitação. Sendo assim, como a geração de energia elétrica no Brasil é baseada na hidroeletricidade, a mesma apresenta significativa vulnerabilidade às mudanças climáticas (MMA, 2016b; ANA, 2016).

Segundo Teotónio *et al.* (2017), os impactos das mudanças climáticas na geração hidroelétrica podem ser de dois tipos: diretos, como as mudanças nas variáveis hidrometeorológicas que afetam diretamente a disponibilidade de água para geração de energia; e indiretos, como o aumento dos conflitos devido à escassez de água. Os principais processos e mecanismos que podem ser afetados diretamente são: a precipitação, o derretimento das geleiras, as mudanças nas vazões dos rios, a evaporação, a sedimentação e a segurança da barragem. O aumento da intensidade e frequência de eventos extremos, como cheias e secas, também pode afetar o sistema hidrelétrico e aumentar os riscos associados a situações críticas de geração de eletricidade. Com relação aos impactos indiretos os mais preocupantes são a competição entre os setores econômicos que de alguma forma dependem dos recursos hídricos e os conflitos entre países que compartilham bacias hidrográficas comuns, podendo o mais a montante interferir na disponibilidade do país a jusante.

Como o planejamento e a operação dos sistemas hidrelétricos são baseados em padrões climáticos históricos, as mudanças climáticas podem afetar a operação de usinas existentes e até comprometer a viabilidade de novos empreendimentos. O planejamento e a operação do sistema, que já são atividades incertas devido a variabilidade climática natural, podem ser tornar muito mais incertas devido as mudanças no clima (SCHAEFFER *et al.*, 2012).

Outra alteração importante que pode ser causada pelas mudanças climáticas é a variação da sazonalidade do ciclo hidrológico. Em regiões onde o degelo é relevante na disponibilidade de água a alteração das temperaturas pode afetar o processo, causando diminuição do volume e alteração do ciclo sazonal, fazendo com que a operação das usinas da bacia afetada deva ser adequada para que não haja redução da energia produzida. Neste caso, é importante ressaltar que se a capacidade do reservatório é reduzida, o degelo antecipado pode levar ao vertimento (desperdício de energia) em uma estação e a falta de água em outra (SCHAEFFER, *et al.*, 2012).

A localização geográfica, a integração do sistema de transmissão e as características individuais das usinas hidrelétricas estão diretamente relacionadas com a intensidade dos impactos que o sistema irá receber. Quanto maior a interconexão do sistema, melhor sua capacidade de contornar algum problema que venha a surgir a partir da compensação permitida pelas diferentes variações regionais, principalmente no caso de países de grandes extensões, como o Brasil (SCHAEFFER, *et al.*, 2012). Com relação às características de cada planta, existe o fato de que uma usina a fio d'água é mais vulnerável as mudanças climáticas e possui uma flexibilidade operacional reduzida, devido a sua baixíssima capacidade de armazenamento (SCHAEFFER, *et al.*, 2012; TEOTÓNIO *et al.*, 2017). Centrais hidrelétricas com reservatórios de regularização podem atenuar os efeitos das variações de vazões, influenciando não apenas a sua geração, mas também a de usinas a jusante (MMA, 2016b; TEOTÓNIO *et al.*, 2017). Reservatórios com menores áreas de superfície são menos afetados quando comparados aos de grandes áreas devido o menor potencial de evaporação (TEOTÓNIO *et al.*, 2017).

Como no Brasil o sistema de geração é interconectado, a avaliação da vulnerabilidade do mesmo deve considerar as possíveis compensações permitidas por essa estruturação. Outra característica importante da matriz elétrica brasileira é a sua diversidade (eólica, solar, térmica, etc.), o que permite certa complementariedade natural da oferta de energia entre as fontes e também deve ser levada em consideração na análise de vulnerabilidades e adaptações (MMA, 2016b). O PBMC (2014b) chama atenção para o fato de que não apenas a base dos recursos energéticos será afetada pelas mudanças no clima, mas também os aspectos de transporte e consumo de energia.

4. IMPACTOS SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA

O Brasil é conhecido pela grande relevância da hidroeletricidade na sua matriz de energia elétrica, tendo o parque hidrelétrico nacional, no passado, chegado a representar 90% da capacidade instalada do país (ANEEL, 2008). No entanto, essa representatividade vem apresentado declínio nos últimos anos, sendo atualmente cerca de 62% (Figura 4-1) (BIG/ANEEL, 2017a). De acordo com a Aneel (2008) isso vem ocorrendo devido a três razões principais: a necessidade de diversificação da matriz elétrica de forma a aumentar a segurança do abastecimento; a dificuldade em ofertar novos empreendimentos hidráulicos pela ausência da oferta de estudos e inventários e o aumento de entraves jurídicos relacionados ao licenciamento ambiental que provocam o aumento da contratação de leilões de outras fontes.

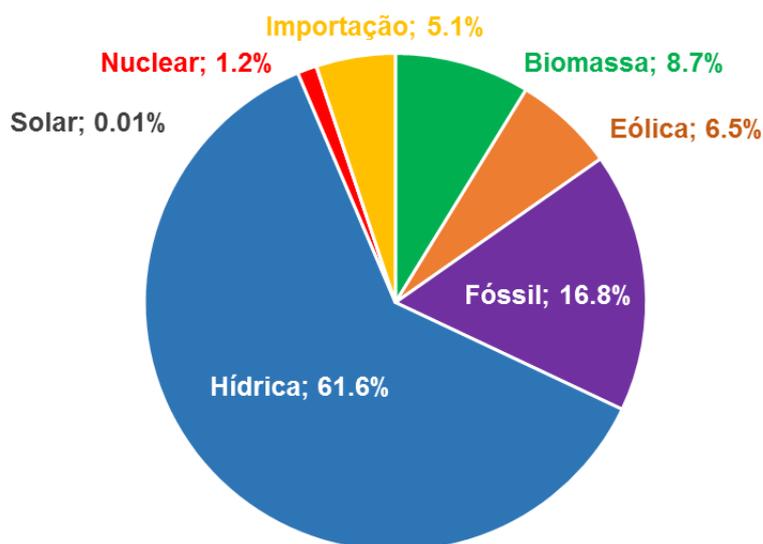


Figura 4-1: Matriz Elétrica Brasileira (Maio de 2017).

Fonte: BIG/ANEEL, 2017a.

Segundo o Banco de Informações de Geração da ANEEL, em maio de 2017 o país possuía 1.263 usinas hidrelétricas em operação, sendo 608 CGHs, 436 PCHs e 219 UHEs. De um total de aproximadamente 152 GW de potência instalada, a geração hidrelétrica era responsável por 98.729 MW, cerca de 65%. Para os próximos anos está prevista uma adição de cerca de 24,6 GW, sendo as hidrelétricas responsáveis por um total de quase 4,7 GW (cerca de 19%), sendo 43 CGHs (3 em construção), 154 PCHs (29 em construção) e 14 UHEs (6 em construção). A maior parte da potência prevista provém de usinas termelétricas e centrais geradoras eólicas (cerca de 32% e 31% respectivamente) (BIG/ANEEL, 2017b).

A EPE é a empresa responsável pela elaboração de estudos e pesquisas que subsidiam o planejamento do setor energético do país, sob responsabilidade do Ministério de Minas e Energia – MME (EPE, 2007c), entre os quais merecem destaque o Plano Nacional

de Energia – PNE, tendo sido elaborado o PNE 2030 em 2007 e estando em elaboração o PNE 2050 (com dois cadernos já publicados); o Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE e o Balança Energético Nacional – BEN. Dentre estes, aqueles que apresentam informações de projeções futuras sobre o setor elétrico, as tendências do comportamento do consumo e demanda de energia elétrica e possíveis opções de geração para o atendimento destas são o PNE e o PDE.

No entanto, analisando os condicionantes, os critérios e os métodos aplicados na avaliação dos potenciais a serem aproveitados e no planejamento da expansão da oferta de energia elétrica pelos dois estudos comentados acima, não encontra-se nenhuma menção as possíveis alterações nos recursos hídricos devido as mudanças climáticas (EPE, 2007a; EPE, 2007b; EPE, 2007c; EPE, 2015). Aparentemente a única consideração feita com relação as mudanças no clima está relacionada com a emissão de gases de efeito estufa (EPE, 2007b; EPE, 2015), condicionante que de maneira geral beneficia a geração hidrelétrica por esta ser uma fonte renovável e com baixos índices de emissão. Portanto, é de extrema importância que sejam desenvolvidos estudos relacionados aos impactos da mudanças climáticas na geração hidrelétrica, para que as metodologias sejam aperfeiçoadas e possam ser aplicadas no planejamento do setor no Brasil.

4.1. Estudos Correlatos

Nessa etapa do trabalho foi realizado um levantamento de trabalhos que avaliaram as influências das mudanças climáticas na geração hidroelétrica considerando os modelos climáticos, a modelagem hidrológica e a transformação vazão-energia hidroelétrica.

Lucena (2010) avalia os impactos das mudanças climáticas globais nos sistema hidrelétricos do Brasil. Ele partiu do modelo climático em escala regional PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies) derivado do modelo global HadCM3 do Hadley Centre, utilizando projeções climáticas dos cenários de emissão A2 e B2 do IPCC-AR4. Para a tradução das variações da precipitação e temperatura em variações nas vazões naturais afluentes aos reservatórios foi aplicada a combinação de duas abordagens, uma empírica/estatística baseada em modelos auto regressivos (modelo SARMA) combinados com coeficientes de sensibilidade hidrológica que modificam as variáveis climáticas segundo os impactos das mudanças climáticas; e outra baseada em equações conceituais de balanço hídrico onde são inseridas as variações climáticas sobre a vazão. Na etapa de modelagem da geração de energia elétrica foi utilizado o modelo SUIISHI-O (Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas para Subsistemas Hidrotérmicos Interligados), que simula a operação mensal e calcula a energia média e firme de cada usina, subsistema ou sistema. A simulação foi realizada para 195 aproveitamentos hidrelétricos do SIN para o período de 2011-2100.

Como resultado foi encontrada uma queda na confiabilidade do sistema devido as mudanças climáticas. A queda de energia firme do Sistema Interligado Nacional - SIN nos cenários A2 e B2 foi de 31% e 29% respectivamente. Porém, com relação à energia média, o impacto não foi relevante quando o sistema é analisado como um todo. No que diz respeito aos impactos regionais, as regiões norte e nordeste apresentaram reduções significativas em sua produção de energia hidroelétrica (energia firme e energia média), sendo a perda de algumas bacias superior a 80%. Nas regiões sul e sudeste a energia firme também é afetada negativamente, porém em menor grau. Dessa maneira, ele conclui que além da compensação dessa energia perdida por outras fontes de energia, também seria necessária uma maior integração do sistema como um todo devido a variabilidade espacial dos impactos (LUCENA, 2010).

A Subsecretaria de Desenvolvimento Sustentável da Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República encomendou diversos estudos relacionados às mudanças climáticas a diversas instituições para a elaboração do projeto “Brasil 2040: cenários e alternativas de adaptação à mudança do clima.” Os estudos foram baseados nos cenários de mudanças climáticas RCP4.5 e RCP8.5, elaborados pelo IPCC-AR5, sendo os modelos climáticos considerados de duas maneiras distintas: utilização dos dados do modelo regional ETA forçado pelos modelos globais HadGEM2-ES e MIROC5 e utilização dos dados de 14 modelos globais direto da grade do modelo global (SAE/FCPC, 2015b). Com relação ao setor energético, foram analisados os impactos no SIN (SAE/FCPC, 2015a).

A determinação das vazões foi baseada em quatro etapas: primeiro a obtenção das evapotranspirações potenciais a partir do modelo ETA pelo método de Hangreaves; obtenção das precipitações dos modelos climáticos para as bacias de interesse e posterior remoção de viés; obtenção das vazões para 24 postos a partir do modelo hidrológico SMAP e obtenção das projeções de vazões para os postos que não possuem o modelo hidrológico calibrado a partir de regressões daqueles que possuem (SAE/FCPC, 2015b). Para avaliação dos impactos das mudanças climáticas na geração hidrelétrica foi determinada a Energia Natural Afluente – ENA para cada subsistema. A ENA foi calculada a partir das vazões naturais e das produtividades equivalentes ao armazenamento de 65% do volume útil dos reservatórios das usinas hidrelétricas (SAE/FCPC, 2015a).

Focando apenas nos resultados provenientes da utilização dos dados do modelo climático regional ETA, obteve-se redução da ENA anual média do SIN como um todo para os três períodos avaliados (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100), sendo a anomalia negativa mais intensa no cenário RCP8.5, para ambos modelos globais. Quando o ETA é forçado pelo HadGEM2-ES, as reduções são superiores a 10% em todos os períodos. Avaliando cada

subsistema, temos que a ENA anual para os setores Norte, Nordeste e Sudeste, sofre redução nos três períodos e para os dois cenários. Já o setor Sul, quando forçado pelo modelo global MIROC5, apresenta aumento nos três períodos, podendo chegar uma anomalia superior a 60% no período final (RCP8.5). No Norte, as reduções nas vazões são superiores a 5% em cada período de 30 anos. No Nordeste, a redução é ainda mais acentuada, podendo chegar a 50% no período de 2071-2100 (RCP8.5). É importante ressaltar que, quando os resultados do ETA são comparados com os resultados obtidos diretamente a partir dos modelos globais, eles tendem a amplificar as anomalias de precipitações em até duas vezes (SAE/FCPC, 2015b).

No estudo de Santana (2013) foi feita uma análise dos possíveis impactos das mudanças climáticas na produção de energia de 4 PCHs inventariadas localizadas na bacia hidrográfica do São Francisco para os períodos futuros 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100. A análise foi feita a partir do ajuste e aplicação do modelo hidrológico MGB, alimentado pelas projeções climáticas futuras geradas pelo modelo atmosférico regional ETA (com resolução de grade de 40 km) ajustado a partir do *downscaling* de cenários do modelo global HadCM3, para o cenário de emissões A1B do IPCC-AR4. Como o cenário de emissões é único, essa versão do ETA apresenta vários membros de um mesmo cenário, obtidos a partir de perturbações no modelo. Os membros utilizados no estudo de Santana (2013) foram o High (M4) e Low (M2), que estão diretamente relacionados com a sensibilidade na resposta da temperatura média global. Na etapa de modelagem hidrológica as simulações foram feitas considerando o efeitos das mudanças climáticas na variáveis precipitação e temperatura. Por fim, a metodologia para a determinação da energia assegurada das PCHs foi baseada na resolução nº 169/ 2001 da ANEEL.

Com relação aos resultados foram feitas duas análises para cada PCH: tempo em que a usina opera em plena carga e energia assegurada. Com relação a primeira análise, para o membro M2, de maneira geral, as variações do tempo de operação não foram tão grandes, sendo mais significativas apenas no último período. Já para o membro M4, a queda no tempo de operação com o passar dos anos foi mais acentuada, chegando em um dos casos a gerar apenas 8% do tempo. Para esse membro, algumas das usinas deixam de utilizar todas as suas turbinas e em alguns casos chegam a ficar parte significativa do tempo (60% em um dos casos) sem gerar com nenhuma de suas máquinas. No caso da energia assegurada, os resultados também não foram nada animadores. Para o membro M2 a energia assegurada reduziu com o passar do tempo, sendo mais significativa, em todas as usinas, no período 2071-2100, sendo que duas das usinas apresentam uma queda com relação ao período observado de mais de 20%. Já para o membro M4 a menor perda de energia assegurada, considerando todas as usinas, foi de quase 10%. Duas usinas apresentaram no último período

redução de cerca de 30%, já nas outras duas a redução chegou a quase 50%. O autor chama a atenção para o fato de que reduções dessa magnitude podem inviabilizar os empreendimentos (SANTANA, 2013).

O trabalho de TIEZZI (2015), também utiliza a regionalização ETA/HadCM3 como modelo climático base, alimentado pelas atribuições do cenário A1B do IPCC-AR4. O estudo utilizou quatro membros do ETA, que estão diretamente relacionados com a sensibilidade do modelo: High (Alta), Mid (Média), Low (Baixa) e Cntrl (Controle). Os dados de chuva gerados pelo modelo climático foram utilizados como entrada nos modelos chuva-vazão MEL (Modelo Estocástico Linear) e SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure). O primeiro é um modelo determinístico de simulação hidrológica e se destaca pela sua simplicidade e quantidade não muito grande de parâmetros calibráveis. Já o MEL é um modelo misto ou de função de transferência que emprega técnicas da Análise de Séries Temporais, utilizando como dados de entrada tanto chuvas observadas quanto chuvas previstas. A aplicação foi realizada para 26 bacias hidrográficas componentes do SIN e o valor final de vazão utilizado nos cálculos da ENA foi uma média aritmética dos resultados dos dois modelos hidrológicos. A ENA foi calculada a partir da produtividade equivalente ao armazenamento de 65% do volume útil dos reservatórios das usinas hidrelétricas e das vazões naturais. A análise foi feita para o período 2011-2100 e os resultados foram expressos em ENA mensal e analisados para o SIN como um todo e para os quatro subsistemas: Sudeste/Centro Oeste (SE/CO), Sul (S), Norte (N) e Nordeste (NE).

De maneira geral o estudo aponta que haverá impacto na ENA do Brasil nos próximos 90 anos, sendo que esse impacto cresce com o passar dos anos, tanto nos casos positivos quanto nos negativos. Na região Sul do país ocorre um aumento significativo na ENA média mensal, sendo que quando comparada à média de longo termo (MLT) ela chega a ser no mínimo 24% e no máximo 109% acima. No Nordeste as projeções mostram que para três dos quatro cenários as cheias perdem sua capacidade e as secas são aprofundadas, piorando consideravelmente a situação dessa região. De maneira geral, os impactos na geração de energia são negativos. As ENAs para o subsistema Norte apontam quedas abruptas, sendo que todos os cenários mostraram projeções pessimistas. As quedas variam de 25% a 69% nos diferentes cenários e períodos considerados. Para o SIN como um todo os resultados são menos drásticos do que as análises regionais, principalmente devido ao fato do subsistema SE/CO ser o mais representativo no sistema nacional e ter sofrido os impactos menos severos. No período de 2071-2100, as variações podem chegar a 15%, tanto para o cenário mais pessimista quanto para o mais otimista (TIEZZI, 2015).

Kopytkovskiy, Geza e McCray (2015) avaliaram os impactos das mudanças climáticas no potencial de hidrogeração a partir da análise da variação dos níveis dos reservatórios na bacia do Alto Colorado (*The Upper Colorado River Basin – UCRB*). Os modelos globais utilizados nesse estudo foram os japoneses MRI-CGCM2.3.2 e MIROC3.2 e o canadense CGCM3.1 para os cenários de emissão A2 e B1 do IPCC-AR4, e passaram pelo processo de *downscaling* BCCA (*bias-corrected constructed analogues*), estando disponíveis para os períodos Histórico (1961-2000), Futuro 1 (2046-2065) e Futuro 2 (2081-2100). As projeções climáticas regionais diárias foram aplicadas no modelo hidrológico WARMF, modelo físico de simulação contínua, que foi simulado para os reservatórios Blue Mesa, Morrow Point e Shadow Mountain. Os resultados foram analisados em função de médias mensais de volume e vertimento dos reservatórios.

O reservatório de Blue Mesa, o maior do estado, está localizado a 7500 pés de altitude e possui uma área de 9200 acres. As projeções mostraram redução de 76-85% de vertimento em 70-73% de volume. Morrow Point possui uma área de 918 acres, a 7150 pés de altitude, e está localizado a 12 milhas a jusante de Blue Mesa. Suas variações de vertimento e volume não são tão significativas quanto as de Blue Mesa, o que é explicado pela capacidade de mitigação dos impactos devido ao controle da vazão pelo reservatório a montante e ao fato da superfície de seu reservatório ser 10 vezes menor do que ao de Blue Mesa, fazendo com que a evaporação seja significativamente menor. Por fim, Shadow Mountain, localizado a 8300 pés de altitude, possui uma área de aproximadamente 1337 acres. O modelo projetou um aumento de vertimento de 8-10% e de 1-5% no volume do reservatório. Outro impacto verificado pelo estudo é a ocorrência do derretimento do gelo antes do normal. Reservatórios pequenos são os mais impactados por esse fenômeno, pois sua capacidade de armazenamento é reduzida, fazendo com que ocorra o vertimento do excesso da água extra, que seria necessária no futuro. Portanto, para se adaptar a essas projeções, seria necessária a acomodação das curvas e políticas de operação (KOPYTKOVSKIY, GEZA E MCCRAY, 2015).

No estudo desenvolvido por Chilkoti, Bolisetti e Balachandar (2017) foi analisado o efeito das mudanças climáticas nos cenários de geração de energia para o período de 2091-2100 na usina hidrelétrica C.H. Corn, localizada no rio Ochlockonee próximo a Tallahassee na Flórida. O modelo hidrológico conceitual HYMOD, previamente calibrado e validado baseado em vazões observadas, foi alimentado pelos dados climáticos fornecidos pelo projeto CORDEX, gerando projeções de vazões que alimentaram o modelo de geração energética, que também foi calibrado e validado anteriormente baseado na geração observada de hidroeletricidade. O projeto CORDEX realiza o *downscaling* e gera ensembles dos modelos globais provenientes do IPCC-AR5, no entanto este estudo utilizou-se apenas três: CanESM2,

EC-EARTH e MPI-ESM-LR. O cenário utilizado na modelagem climática foi o RCP4.5. Os resultados encontrados mostraram um aumento na produção de energia no inverno de em média 56% e no outono de em média 15%. Já no verão ocorreu uma queda de em média 14% na geração.

Lima, Collischonn e Marengo (2014) organizaram um livro totalmente voltado para o efeito das mudanças climáticas na geração de energia hidrelétrica. Foram feitas análises utilizando tanto projeções climáticas fornecidas pelo modelo regional ETA, alimentado pelo modelo global HADCM, em cinco versões diferentes: quatro versões com resolução espacial de 40 km (membros CTRL, LOW, MID e HIGH) e uma versão com resolução espacial de 20 km; todas para o cenário A1B do IPCC-AR4. As simulações foram realizadas para todas as usinas hidrelétricas do SIN segundo o Plano Mensal da Operação – PMO de janeiro de 2012 (parque existente) e o PDE 2030 (parque futuro), para o período de 1961 a 2100, sendo o período 1961-1990 representativo do clima atual, e três períodos futuros: Futuro 01 (2011-2040), Futuro 02 (2041-2070) e Futuro 03 (2071-2100). Na etapa de simulação hidrológica foi utilizado em maior parte das bacias o modelo hidrológico distribuído MGB-IPH. Já nas bacias dos rios Tocantins, Paraíba do Sul e Paranaíba foi utilizada uma versão modificada denominada MGB-INPE. Para a avaliação do impacto no setor de energia elétrica foram determinadas as Energias Asseguradas de cada usina através do modelo NEWAVE, utilizado pelo setor para o planejamento hidrotérmico de médio e longo prazo. Um diferencial desse estudo é que ele incorpora cenários de uso do solo e de usos consuntivos da água nas suas projeções.

Os principais resultados encontrados mostram que a média de redução de energia assegurada para os membros do modelo ETA, para o SIN como um todo, foi de 15% para o parque existente e chega a 25% para o parque futuro, a partir do ano 2041. A maior redução de energia para o parque gerador futuro pode ser explicada pela maior concentração de usinas na Amazônia, para onde o modelo ETA prevê diminuição na chuva. Outro fator que colabora com essa diminuição é a redução de períodos úmidos e o aumento dos períodos secos, que faz com que o baixo poder de regularização da maioria das novas usinas repercuta negativamente na geração de energia no futuro (LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014).

Diversos outros estudos veem sendo realizados nos últimos anos nessa mesma área: Ribeiro Junior (2013); Lucena *et al.* (2009); Majone *et al.* (2016); Maran, Volonterio e Gaudard (2014); Mohor *et al.* (2015); Scianni (2014); entre outros.

5. METODOLOGIA

De maneira resumida, primeiramente foi realizada a discretização da bacia hidrográfica de interesse e feito o levantamento das informações físicas e hidrometeorológicas necessárias como dados de entrada para o modelo MGB-IPH. A seguir foi realizada a calibração e verificação do modelo hidrológico, para que a transformação Chuva-Vazão fosse realizada da melhor maneira possível, a partir das informações observadas de precipitação e vazão e da comparação das vazões geradas pelo modelo com as mesmas para diferentes períodos, afim de verificar a eficácia do modelo para um período diferente do da calibração. Antes de alimentar o MGB-IPH com as informações provenientes do ETA foi realizada a remoção dos erros existentes no conjunto de dados, afim de diminuir as incertezas existentes no processo de modelagem. Por fim, foi realizada a simulação de um período nomeado “Presente” que se estende de 1961 a 1990, e três períodos futuros: “FUT1” (2011 a 2040), “FUT2” (2041 a 2070) e “FUT3” (2071 a 2100); sendo as vazões geradas utilizadas na estimativa da variação da geração de energia futura da usina hidrelétrica Três Marias, através da simulação do balanço hídrico do reservatório. Um fluxograma com as etapas da metodologia pode ser visualizado na Figura 5-1.

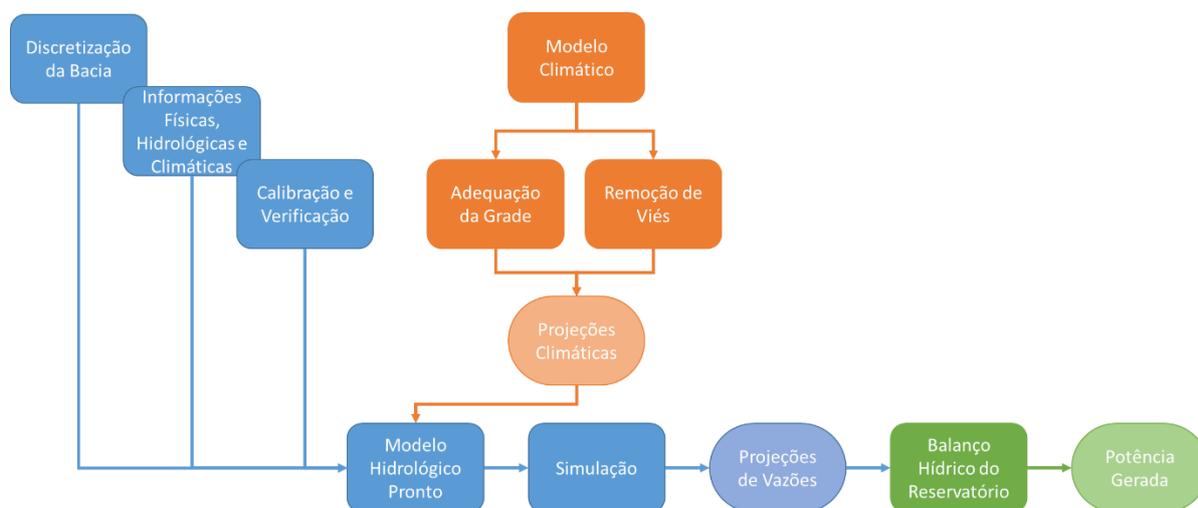


Figura 5-1: Fluxograma da metodologia.

5.1. Área de Estudo

A bacia hidrográfica de interesse possui exutório no posto fluviométrico UHE Três Marias Jusante (42020002) operado pela própria usina, localizado no Rio São Francisco no município de Três Marias, estado de Minas Gerais. Trata-se de parte da Região Hidrográfica do São Francisco, no interior do Alto São Francisco (Figura 5-2). A Região Hidrográfica do São Francisco apresenta 638.323 km² e abrange 503 municípios de sete Unidades da Federação: Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Goiás e Distrito Federal;

sendo cerca de 85% localizados nos dois primeiros estados (MMA, 2006; CBHSF, 2016a). A bacia estudada está em sua totalidade no interior do estado de Minas Gerais, apresentando uma área de 50.946 km².

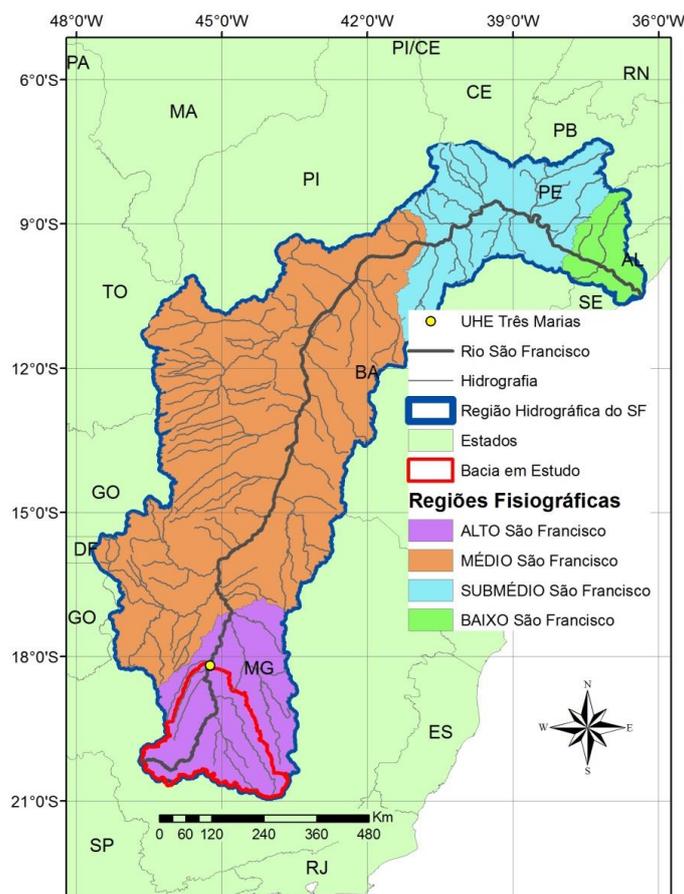


Figura 5-2: Localização da Bacia em estudo.

De acordo com o CBHSF (2015b), a bacia do rio São Francisco apresenta diversos tipos de clima, sendo no Alto São Francisco predominantemente o Aw – Tropical Semiúmido, quente com verão chuvoso e inverno seco. Outros dois tipos climáticos também presentes na região de estudo são o Cwa – Subtropical Úmido e o Cwb – Clima Temperado Úmido (GAMA, 2015b). O primeiro é semelhante ao Aw, no entanto apresenta temperaturas mais baixas principalmente no inverno. Já o segundo é um clima com predomínio de temperaturas amenas durante todo o ano (GAMA, 2015b). A região do Alto SF apresenta temperaturas menores nos meses de Junho, Julho e Agosto, sendo as mínimas de 11-12°C e as máximas de 26-27°C, e mais elevadas entre os meses de Setembro e Março, mínimas de 17-19°C e máximas de 29-31°C (CBHSF, 2015b).

O regime pluviométrico da região do entorno do lago de Três Marias concentra suas chuvas entre os meses de outubro e março. De maneira geral a precipitação se distribui ao longo do ano em dois períodos bem definidos: um período seco de abril a setembro, com

precipitações inferiores a 15 mm (em média) nos meses de junho, julho e agosto; e um período chuvoso de outubro a março, apresentando precipitações superiores a 200 mm nos meses de novembro, dezembro e janeiro (GAMA, 2015a).

Segundo MMA (2006), no Alto São Francisco os setores urbano e industrial são responsáveis por mais de 75% da demanda de água da bacia. No entanto, é importante ressaltar que levantamentos atuais, comparando dados de 2000 e 2010, mostram a elevação da participação da irrigação na região, chegando a ultrapassar os consumos urbanos e industriais (CBHSF, 2015c) (Tabela 5-1).

Tabela 5-1: Evolução das demandas dos diferentes usos consuntivos no Alto São Francisco.

Ano	Vazão de retirada (m ³ /s)					
	Urbano	Rural	Irrigação	Animal	Industrial	Total
2000	18,033	0,550	7,704	2,022	13,823	42,132
2010	19,420	0,535	25,443 (2013)	2,842	17,884	66,124

Fonte: Adaptado de CBHSF, 2015c.

O plano diretor da bacia hidrográfica do entorno da Represa de Três Marias (GAMA, 2015a) elaborou uma análise dos usos consuntivos de água em 2015 e projeções até o ano de 2035 (Tabela 5-2). É visível que a irrigação é a principal responsável pelo consumo consuntivo de água na região e segundo as projeções irá praticamente dobrar até 2035. O segundo maior consumidor de água é o setor da pecuária. No entanto, é importante ressaltar que esses valores não consideram a captação que é feita diretamente no Lago de Três Marias, o que poderia alterar os valores significativamente.

Tabela 5-2 – Usos consuntivos atuais e futuros da bacia hidrográfica do entorno da Represa de Três Marias.

Uso	2015	2020	2025	2035
Urbano	208,6	219,0	230,0	254,7
Rural	31,4	31,4	31,4	31,4
Industrial	65,3	68,3	73,0	83,6
Irrigação	11.996,1	14.814,7	16.254,1	21.193,3
Pecuária	1.848,8	2.099,4	2.390,6	3.134,0
Mineração	164,2	173,1	184,7	211,4
Total	14.314,5	17.405,8	19.163,7	24.908,5

Fonte: GAMA, 2015a.

Além dos usos consuntivos abordados anteriormente existem também os usos não consuntivos da bacia, que são aqueles que não impactam significativamente a disponibilidade quantitativa de água, mas que também dependem do recurso hídrico para suas atividades. Os principais usos presentes na bacia de estudo são: diluição de efluentes, geração de energia, mineração, pesca e aquicultura, turismo e recreação e navegação (GAMA, 2015a; CBHSF, 2015a).

O principal conflito existente entre os usos múltiplos na bacia está relacionado à operação da barragem de Três Marias em relação aos demais usos (turismo, lazer, esporte, abastecimento, navegação, pesca, etc.) (CBHSF, 2015a). Usos relacionados ao turismo e a navegação, ligados diretamente ao reservatório, podem sofrer com o deplecionamento do mesmo para a geração de maior montante de energia; já os empreendimentos a jusante do reservatório podem ser prejudicados pela ação contrária (armazenamento) (GAMA, 2015a).

Com relação a geração de energia a partir de usinas hidrelétricas na bacia em estudo, de acordo com o Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico da Aneel – SIGEL, existem em operação atualmente 21 usinas hidrelétricas na bacia em estudo, sendo 4 usinas hidrelétricas de energia (UHE), 4 pequenas centrais hidrelétricas (PCH) e 13 centrais geradoras hidrelétricas (CGH) (Figura 5-3) (SIGEL/ANEEL, 2017). A Tabela 5-3 apresenta todas as usinas e algumas informações importantes sobre as mesmas.

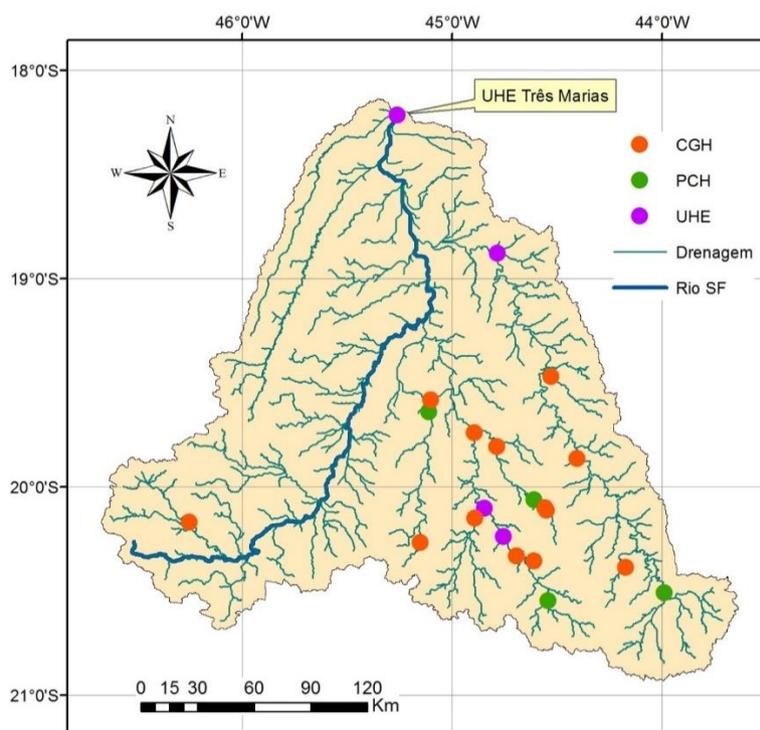


Figura 5-3: Localização das usinas hidrelétricas da bacia de estudo por tipo de usina.

Fonte: Adaptado de SIGEL/ANEEL, 2017.

Tabela 5-3: Usinas hidrelétricas em operação na bacia em estudo.

Tipo	Usina	Rio	Município 1	Município 2	Estado	PI* (kW)
CGH	Britos	São João ou Cornélio	Igaratinga		MG	680
CGH	Cachoeira Velonorte	Ribeirão dos Macacos	Cachoeira da Prata		MG	160
CGH	Camarão	Lambari	Pedra do Indaiá		MG	910
CGH	Caquende	Macaúbas	Piedade dos Gerais		MG	950
CGH	Companhia Tecidos Santanense	São João	Pará de Minas		MG	1.472
CGH	Coronel João de Cerqueira Lima	São João	Itaúna		MG	1.152
CGH	Coronel Jove Soares Nogueira (Antiga Benfica)	São João ou Cornélio	Itaúna		MG	1.000
CGH	Divinópolis	Itapeçerica	Divinópolis		MG	999
CGH	Doutor Augusto Gonçalves	São João	Itaúna		MG	1.648
CGH	Florestal	Ribeirão Florestal	Florestal		MG	458
CGH	Pitangui (Cachoeira Bento Lopes)	Pará	Conceição do Pará		MG	1.400
CGH	Retiro do Indaiá	Lambari	Bom Despacho	Leandro Ferreira	MG	990
CGH	Samburá	Samburá	São Roque de Minas		MG	955
PCH	Caixão	São João	Itaúna		MG	1.172
PCH	Dorneles	Pará	Passa Tempo		MG	4.700
PCH	João de Deus	Lambari	Bom Despacho		MG	1.548
PCH	Salto do Paraopeba	Paraopeba	Jeciaba	Congonhas	MG	2.460
UHE	Cajuru	Pará	Carmo do Cajuru	Divinópolis	MG	7.200
UHE	Gafanhoto	Pará	Divinópolis		MG	14.000
UHE	Retiro Baixo	Paraopeba	Curvelo	Pompéu	MG	83.657
UHE	Três Marias	São Francisco	Três Marias	São Gonçalo do Abaeté	MG	396.000

Fonte: Adaptado de SIGEL/ANEEL, 2017.

Na bacia também existem alguns empreendimentos que estão em fase avançada de concretização. Os mesmos são apresentados na Tabela 5-4.

Tabela 5-4: Projetos de usinas hidroelétricas em fases avançadas de concretização na bacia em estudo.

Usina	Tipo	Rio	Potência (kW)	Estado
Caquende	PCH	Macaúbas	4.000	Construção com outorga
Juliões	PCH	Macaúbas	3.400	Construção com outorga
Rio Funchal	CGH	Funchal	1.000	Construção não iniciada

Fonte: Adaptado de SIGEL/ANEEL, 2017.

A usina hidrelétrica de Três Marias, oficialmente denominada Bernardo Mascarenhas, começou a ser construída em 1958 e foi inaugurada no dia 25 de julho de 1962. O empreendimento originou de um plano idealizado com o objetivo de desenvolver a região do Vale do São Francisco, que definiu que a regularização do rio São Francisco era a questão-chave para o desenvolvimento da regional, sendo a recomendação à construção de uma série de barragens para a melhoria das condições de navegação (na estiagem), do controle de enchentes, da produção de hidroeletricidade, da irrigação, do aproveitamento agrícola das áreas vazantes e do saneamento urbano (CEMIG, 2012).

A UHE Três Marias iniciou seu funcionamento com duas unidades geradoras de 66 MW de potência cada e com o passar do tempo mais quatro entraram em operação, totalizando uma potência instalada de 396 MW (CEMIG, 2012). Atualmente operada pela Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG, apresenta um reservatório que possui um volume de 19.528 hm³ e uma área alagada de 1.040 km², tendo a barragem um comprimento de 2.700 m e altura máxima de 75 m (GAMA, 2015b). Os municípios atingidos diretamente pelo reservatório são: Abaeté, Biquinhas, Felixlândia, Morada Novas de Minas, Paineiras, Pompéu, São Gonçalo do Abaeté e Três Marias (CEMIG, 2012).

5.2. Modelos Utilizados

5.2.1. ETA

O Eta é um modelo numérico atmosférico regional que é utilizado operacionalmente, desde 1997, pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) para previsões meteorológicas; desde 2002 para previsões climáticas sazonais; e desde 2010 pela Segunda Comunicação Nacional do

Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC). O modelo possui uma resolução horizontal de 20 km e 38 camadas verticais e cobre maior parte da América do Sul e a América Central (Figura 5-4) (CHOU *et al.*, 2014a; MCTI, 2016b).

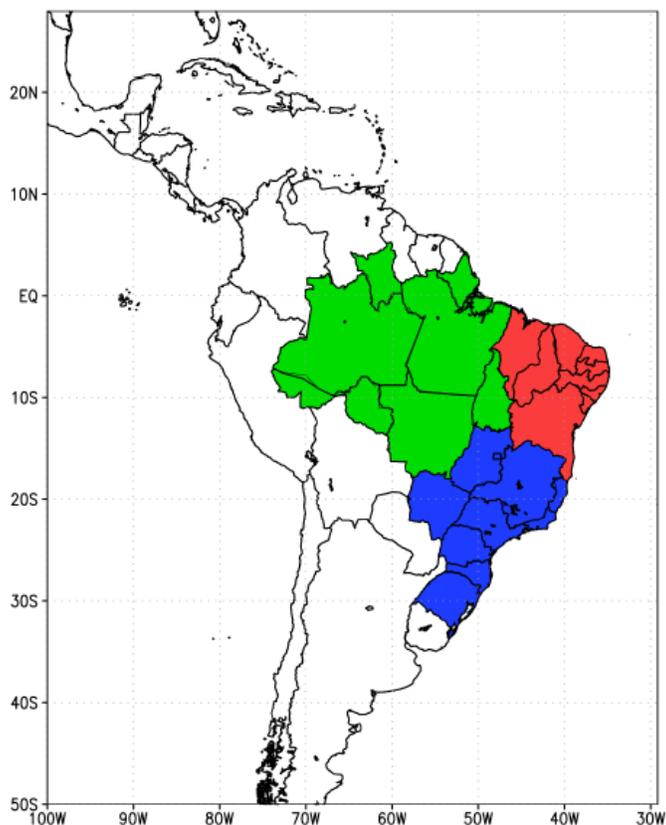


Figura 5-4: Domínio do modelo climático regional ETA. Destaque para a região do Brasil.

Fonte: CHOU *et al.*, 2014a.

O modelo Eta utiliza a coordenada vertical η (Eta), que é aproximadamente horizontal em áreas montanhosas e é adequada para áreas com topografia íngreme, como a Cordilheira dos Andes na América do Sul (CHOU *et al.*, 2014a e 2014b). As convecções profundas e rasas são parametrizadas pelo modelo Betts-Miller, modificado pela microfísica das nuvens segundo o modelo de Zhao. Os processos da superfície terrestre são representados pelo modelo NOAH, com o ciclo anual de folhas verdes da vegetação, considerando 12 tipos de vegetação e 9 tipos de solo. Os fluxos radiativos são representados pelo modelo Lacis-Hansen, para ondas curtas, e pelo modelo Fels-Schwarzkopf, para ondas longas (CHOU *et al.*, 2014a). A concentração de CO₂ é

considerada constante em 360 ppm na simulação do clima presente, já nos períodos futuros, varia de acordo com os cenários (MCTI, 2016b).

A versão mais recente do modelo Eta é adaptada para estudos de mudanças climáticas e foi aplicada na Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. O modelo é alimentado por três modelos globais oceano-atmosfera: BESM (*Brazilian Earth System Model*), HadGEM2-ES (*Hadley Centre Global Environmental Model*) e MIROC5 (*Model for Interdisciplinary Research on Climate*) (CHOU *et al.*, 2014a). No entanto este estudo irá apenas utilizar as simulações alimentadas pelos HadGEM2-ES e MIROC5. A temperatura da superfície do mar diária e a umidade e a temperatura iniciais do solo são fornecidas pelos modelos globais (CHOU *et al.*, 2014a e 2014b).

O modelo global HadGEM2-ES é um modelo em ponto de grade com resolução N96 (aproximadamente 1.875 graus de longitude e 1.275 graus de latitude) e 38 níveis de atmosfera (CHOU *et al.*, 2014a e 2014b). No oceano o modelo apresenta 40 níveis na vertical, e, na horizontal, a resolução varia de 1/3 graus nos trópicos a 1 grau em latitudes maiores que 30°. O ciclo do carbono é modelado através do sistema de vegetação dinâmica TRIFFID (*Top-down Representation of Interactive Foliage Including Dynamics*). O modelo também inclui a modelagem da química atmosférica e dos aerossóis (CHOU *et al.*, 2014a).

O modelo global MIROC5, desenvolvido pelo Japão, está atualmente na sua 5ª versão, apresentando uma resolução horizontal de aproximadamente 150 km e 40 níveis verticais na atmosfera (CHOU *et al.*, 2014a e 2014b). Ele é acoplado como o modelo oceânico COCO 4.5, com 50 níveis de profundidade e 1° de resolução horizontal. Os fluxos radiativos são determinados através da distribuição-k. O modelo de aerossóis (SPRINTARS) é acoplado a um modelo de microfísica das nuvens junto com um esquema de radiação, que utiliza o modelo de superfície terrestre MATSIRO. O MIROC5 também representa as rotas dos rios, o efeito do albedo na neve e a termodinâmica e dinâmica do gelo dos oceanos (CHOU *et al.*, 2014a).

A partir da comparação das simulações do modelo regional Eta alimentado pelos modelos globais MIROC5 e HadGEM2-ES com dados observados foi possível verificar que ambos, porém principalmente o primeiro, subestimam as temperaturas máximas tanto no verão quanto no inverno. Já as temperaturas mínimas apresentam grande espalhamento, o que é o indicativo da presença de diferentes erros. O modelo MIROC5 apresenta uma

melhor correlação espacial entre as simulações e a temperatura observada. Com relação às precipitações, ela foi subestimada em grandes áreas no verão austral; já no inverno, foi superestimada no sul da Amazônia e subestimada no sul e na costa leste do Nordeste brasileiros. Ambos os modelos aparentemente simulam mais eventos extremos do que o observado, porém o modelo HadGEM2-ES indica períodos úmidos, já o MIROC5 mostra tendências de períodos secos (CHOU *et al.*, 2014a). Chou *et al.* (2014a) chama atenção para a importância da avaliação dos erros na simulação do clima presente para que seja possível a atribuição de graus de confiança as simulações dos cenários do clima futuro.

As principais variáveis determinadas pelo modelo são: temperatura do ar, umidade do ar, vento horizontal, pressão atmosférica à superfície, energia cinética turbulenta, umidade e temperatura do solo, e água líquida ou gelo das nuvens; e a partir dessas variáveis são simulados diversos processos para elaboração de outras variáveis que dependem diretamente dessas (LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014). Para o modelo hidrológico MGB-IPH são necessárias como dados de entrada as variáveis precipitação, velocidade do vento em superfície, radiação solar, temperatura em superfície, pressão atmosférica em superfície e umidade relativa do ar (COLLISCHONN, 2001; LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014). Para mais informações consultar CHOU *et al.* (2014a) e CHOU *et al.* (2014b).

5.2.2. MGB-IPH

O MGB – IPH (Modelo de Grandes Bacias) é um modelo semi conceitual distribuído (apresenta uma base física mínima e base conceitual representando a variabilidade espacial das características da bacia), responsável pela simulação do processo de transformação da chuva em vazão em grandes bacias (geralmente maiores do que 10.000 km²). Ele foi criado com o intuito de complementar a modelagem hidrológica no sentido de criar um modelo adequado para grandes bacias, a partir da identificação das variáveis cuja distribuição espacial é relevante e quais destas devem apresentar uma representação física rigorosa, sendo possível a representação de forma conceitual das demais variáveis e processos, fazendo com que a modelagem seja possível (COLLISCHONN e TUCCI, 2001). O modelo foi desenvolvido por Collischonn (2001) que baseou-se na estrutura do modelo LARSIM (BREMICKER, 1998), com algumas adaptações do modelo VIC-2L (LIANG *et al.*, 1994) (SILVA, 2005).

Na versão original do modelo, no processo de discretização da área de estudo, a bacia era subdividida em células quadradas (elementos regulares), porém, recentemente

essa característica sofreu alterações, e atualmente a bacia é discretizada em unidades irregulares, chamadas minibacias – formadas pela área de drenagem de cada trecho da hidrografia – que são definidas a partir de dados do relevo de um Modelo Digital de Elevação (MDE) (FAN e COLLISCHONN, 2014). Uma opção do modelo é a adoção de uma subdivisão em sub-bacias, que são macro áreas de drenagem que englobam diversas minibacias. Apesar dessa etapa ser opcional, ela facilita consideravelmente o processo de calibração, pois permite a definição de diferentes parâmetros para cada sub-bacia (LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014).

As minibacias são então subdivididas em Unidades de Resposta Hidrológica (URH), que são áreas que apresentam comportamento hidrológico similar, baseado nas características físicas do solo (capacidade de armazenamento d'água, profundidade, porosidade, condutividade hidráulica) e da cobertura vegetal (índice de área foliar, interceptação, profundidade das raízes, albedo) (COLLISCHONN *et al.*, 2007; LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014; FAN e COLLISCHONN, 2014). A variabilidade espacial das características físicas de cada minibacia é representada pelas URHs, de respostas hidrológicas distintas que a compõe, permitindo que o modelo compute o balanço vertical de água e determine as parcelas dos escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo (LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014).

As etapas de discretização em minibacias e sub-bacias e a divisão da bacia em URHs são processadas em um programa de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas (SIG) e é realizada de maneira subjetiva. É importante que essa definição seja feita levando em consideração o fato de que quanto mais classes forem definidas, mais difícil será a calibração do modelo e os parâmetros se tornarão cada vez menos previsíveis (LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014). Segundo Silva (2005), com o desenvolvimento de tecnologias SIG foi possível desenvolver, ao longo da última década, diferentes modelos hidrológicos distribuídos, sendo possível incorporar informações espaciais e condições de contorno como topografia, vegetação, uso e tipo de solo, precipitação e evaporação; melhorando significativamente o desempenho desses modelos para grandes áreas.

A Tabela 5-5 apresenta de maneira resumida as informações elaboradas no SIG necessárias para aplicação do MGB-IPH:

Tabela 5-5: Informações espaciais geradas através do SIG.

Informação	Descrição
Modelo Digital de Elevação	Topografia digital da bacia em células quadradas. Comumente utiliza-se a disponibilizada pela Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).
Direções de Fluxo	Arquivo em que cada célula quadrada tem um código indicador da direção em que a água escoar naquele local.
Área Acumulada	Arquivo em que o valor de cada célula que compõe a bacia corresponde ao número de células localizadas a montante.
Rede de Drenagem	Mapa com a rede de drenagem representada por células quadradas.
Minibacias	Bacia hidrográfica de cada trecho do rio.
Sub-bacias	Unidades maiores do que as minibacias e menores do que a bacia, úteis para a definição de valores de parâmetros e para os procedimentos de calibração.
Unidades de Resposta Hidrológica	Unidades definidas pelo cruzamento de informações de uso do solo, solo e geologia.

Fonte: Adaptado de LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014.

A extração de informações sobre as características físicas das minibacias são realizadas por uma rotina automática do SIG. Um resumo das informações existentes sobre cada minibacia é apresentado a seguir (LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014):

- ✓ Número das minibacias em ordem topológica (de montante para jusante);
- ✓ Coordenadas do centroide;
- ✓ Sub-bacia a qual pertence a minibacia;
- ✓ Área de drenagem da minibacia em km²;
- ✓ Área de drenagem total a montante de cada minibacia em km²;
- ✓ Comprimento e declividade do trecho de rio, pertencente à rede de drenagem, que atravessa a minibacia;
- ✓ Comprimento e declividade do afluente mais longo dentro de uma minibacia;
- ✓ Número da minibacia localizada imediatamente a jusante;
- ✓ Ordem do curso d'água da minibacia;
- ✓ Porcentagem da área da minibacia em que existe cada uma das URH.

Dados relativos às informações hidrológicas e climatológicas devem ser preparados e fornecidos ao modelo pelo usuário. A Tabela 5-6 sumariza esses dados de entrada:

Tabela 5-6: Dados hidrológicos e climatológicos de entrada do modelo MBG-IPH.

Dados de Entrada	Descrição
Dados de Chuva	Precipitação diária em diferentes pontos da bacia hidrográfica em milímetros de chuva.
Dados de Vazão	Informações diárias de vazão providas de estações fluviométricas na bacia hidrográfica.
Dados de Clima	Médias climáticas mensais dos parâmetros Temperatura, Vento, Umidade Relativa, Insolação e Pressão Atmosférica da região de estudo.

Fonte: FAN e COLLISCHONN, 2014.

O modelo representa os seguintes processos: balanço de água no solo, evapotranspiração, escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo na célula e escoamento na rede de drenagem (COLLISCHONN e TUCCI, 2001; TUCCI *et al.*, 2002; SILVA, 2005; COLLISCHONN *et al.*, 2007). Segue uma breve descrição dos mesmos, para mais detalhes consultar COLLISCHONN *et al.* (2007):

- ✓ Balanço hídrico do solo: é determinado independentemente para cada URH, a partir das características e parâmetros do mesmo. A URH recebe uma precipitação descontada da interceptação (que depende do tipo da cobertura vegetal); uma fração da precipitação é imediatamente transformada em escoamento superficial, o que depende do armazenamento de água na camada de solo; além disso, o solo é drenado pelo escoamento subterrâneo e sub-superficial e sofre o processo de transpiração, que junto com o a evaporação da água interceptada definem a evapotranspiração; por fim, em algumas situações, o solo pode receber um fluxo de umidade ascendente (Figura 5-5);

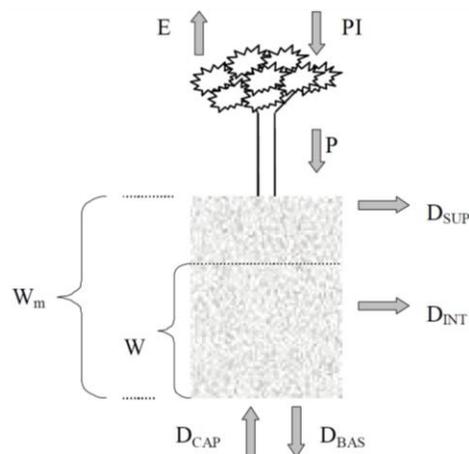


Figura 5-5: Balanço hídrico na camada de solo.

Fonte: COLLISCHONN e TUCCI, 2001.

- ✓ Evapotranspiração: o modelo determina a evaporação e transpiração através da equação de Penman-Monteith independentemente para cada URH. A energia disponível para a evapotranspiração é utilizada para evaporar a água interceptada pela vegetação, que depende da cobertura do solo expressa pelo índice de área foliar (IAF) (Tabela 5-7), e da superfície do solo; caso ainda reste energia, ela irá atender o processo de transpiração, que depende da resistência superficial (depende da umidade do solo) e da resistência aerodinâmica (está relacionada com a altura média da vegetação) adequadas para o tipo de cobertura vegetal.

Tabela 5-7: IAF de coberturas vegetais.

Tipo de Cobertura	IAF	Fonte
Coníferas	6,0	Bremicker (1998)
Soja irrigada	7,5*	Fontana <i>et al.</i> (1992)
Soja não irrigada	6,0*	Fontana <i>et al.</i> (1992)
Arroz de sequeiro	6,0*	Oliveira e Machado (1999)
Floresta Amazônica	6,0 a 9,6*	Honzák <i>et al.</i> (1996)
Pastagem amazônica (estiagem)	0,5	Roberts <i>et al.</i> (1996)
Pastagem amazônica (época úmida)	3,9	Roberts <i>et al.</i> (1996)
Savana africana (região semi-árida – Sahel)	1,4*	Kabat <i>et al.</i> (1997)
Cerrado (estiagem)	0,4	Miranda <i>et al.</i> (1996)
Cerrado (época úmida)	1,0	Miranda <i>et al.</i> (1996)

*valor máximo durante o ciclo anual

Fonte: COLLISCHONN e TUCCI, 2001.

- ✓ Escoamento na célula: o escoamento é a parcela que deixa a camada do solo em direção a rede de drenagem, porém, não atinge a rede imediatamente, sofrendo amortecimento no interior da célula. Esse efeito é representado pela passagem do escoamento por reservatórios lineares para cada escoamento (superficial, sub-superficial e subterrâneo). Esse é o local onde o escoamento de diferentes URHs se encontram (Figura 5-6);

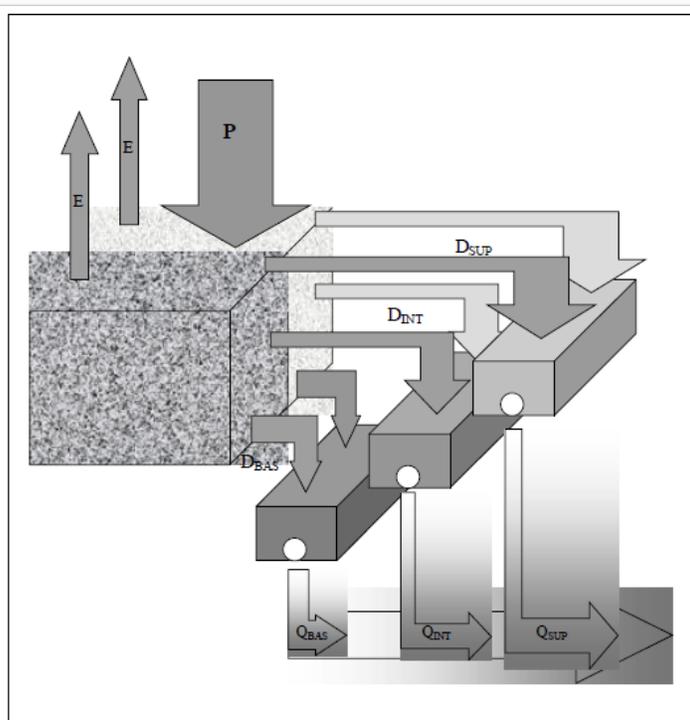


Figura 5-6: Esquema de escoamento no interior de uma célula com dois blocos.

Fonte: COLLISCHONN e TUCCI, 2001.

- ✓ Escoamento na rede de drenagem: a propagação do escoamento nos trechos dos rios é feita a partir do método Muskingum-Cunge, que "... relaciona a vazão de saída de um trecho de rio em um intervalo de tempo qualquer, às vazões de entrada e saída no intervalo de tempo anterior e à vazão de entrada no intervalo atual." (COLLISCHONN e TUCCI, 2001). Os parâmetros do método são determinados com base no comprimento, na declividade, na rugosidade e na largura média de cada trecho de rio.

5.3. Preparação das Informações Físicas

O modelo MGB-IPH necessita de uma série de informações físicas sobre a bacia na etapa de pré-processamento. A partir do *software* ArcGis foram realizados diversos processos para a geração de arquivos (layers em formato raster) com informações relacionadas ao relevo, drenagem e tipo e uso do solo da bacia hidrográfica em estudo. Os arquivos elaborados foram: o modelo digital de elevação (MDE), as direções de escoamento, a rede de drenagem, as minibacias (bacias por trechos de rio), as sub-bacias e as unidades de resposta hidrológica (URHs). O ArcGis, vinculado a ferramenta ArcHydro (estrutura de dados e conjunto de ferramentas desenvolvida em parceria pela Universidade do Texas e pela empresa ESRI), é utilizado para automatizar os processos de extração de informação e preparação dos dados para modelagem hidrológica. A Tabela 5-8 apresenta uma breve descrição dos mesmos:

Tabela 5-8: Informações físicas geradas pelo SIG e utilizadas como dados de entrada pelo MGB-IPH.

Informação	Descrição
Modelo Digital de Elevação	Topografia digital da bacia em células quadradas.
Direções de Escoamento	Arquivo em que cada célula quadrada tem um código indicador da direção em que a água escoa naquele local.
Rede de Drenagem	Mapa com a rede de drenagem representada por células quadradas.
Minibacias	Bacia hidrográfica de cada trecho de rio.
Sub-bacias	Unidades maiores do que as minibacias e menores do que a bacia.
Unidades de Resposta Hidrológica	Definidas pelos cruzamento de informações de uso do solo, solo e geologia.

Fonte: Adaptado de LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014.

A metodologia dessa etapa foi baseada nos manuais disponibilizados pelo Grupo de Pesquisa de Hidrologia de Grande Escala do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) (COLLISCHONN *et al.*, 2010a e 2010b; FAN, *et al.*, 2010a, 2010b e 2010c).

Para elaboração do MDE foram utilizadas as informações topográficas disponibilizada pelo CGIAR-CSI (*Consortium for Spatial Information*), órgão de pesquisa

internacional pioneiro em aplicações de Sistemas de Informações Geográficas (GIS) e Sensoriamento Remoto (SR) (CGIAR-CSI, 2016), que possuem resolução de 90 m e foram geradas a partir de dados de radar obtidos no projeto SRTM, produzido originalmente pela NASA. As cartas utilizadas na elaboração do mosaico que abrange a bacia hidrográfica de interesse foram: SRTM 27_16, SRTM 27_17, SRTM 28_16 e SRTM 28_17 (Figura 5-7).

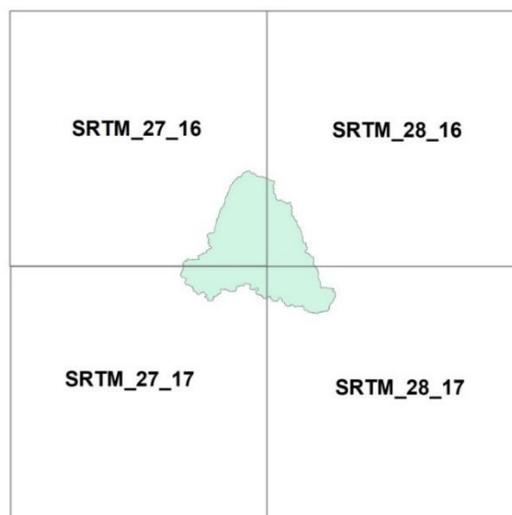


Figura 5-7: Cartas SRTM utilizadas na elaboração do mosaico da bacia.

A divisão da bacia em Sub-bacias, que são macro áreas de drenagem que abrangem várias minibacias, é opcional, porém, facilita consideravelmente o processo de calibração do modelo hidrológico, pois os parâmetros calibráveis são estabelecidos baseados nessa subdivisão, ou seja, cada sub-bacia pode apresentar diferentes valores para os parâmetros calibráveis (LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014). Sendo assim, a discretização em sub-bacias foi baseada em 4 postos fluviométricos que contêm uma boa série de dados e que representam os principais afluentes do rio São Francisco a montante da UHE Três Marias. A Tabela 5-9 apresenta as informações das estações fluviométricas utilizadas:

Tabela 5-9: Sub-bacias geradas na discretização da bacia hidrográfica em estudo.

Sub-bacia	Posto Fluviométrico	Rio	Área (km²)
01	Porto das Andorinhas	São Francisco	14.005
02	Velho da Taipa	Pará	7.342
03	Ponte da Taquara	Paraopeba	8.746
04	UHE Três Marias	São Francisco	50.946

As unidades de resposta hidrológica (URHs) representam uma combinação única do tipo de solo e do uso da terra, e apresentam o mesmo comportamento hidrológico independente de sua localização no interior da bacia. A definição das URHs é relativamente subjetiva, não existindo regra geral para sua elaboração. Sua composição irá depender dos dados disponíveis, do grau de complexidade com que se pretende representar a bacia, dos objetivos da aplicação do modelo e dos recursos computacionais disponíveis (FAN *et al.*, 2010a).

Na elaboração das URHs foi utilizado um mapa de tipos de solos, em escala 1:1.000.000, de toda a bacia do São Francisco, baseado nos levantamentos do projeto RADAM Brasil, elaborado pela Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF) e fornecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) e um mapa de uso e ocupação do solo elaborado por Silva (2005) baseado em imagens de satélite Landsat TM e ETM, com resolução de 30 m, obtidas no banco de dados *Global Land Cover Facility* da Universidade de Maryland e num mapa de irrigação da região da bacia do rio São Francisco, elaborado pela CODEVASF e cedido pela Aneel.

As URHs são definidas a partir da superposição dos mapas de tipos de solos e de uso e ocupação do solo. No entanto, antes dessa união é necessária a reclassificação dos mesmos de maneira que os tipos e usos dos solos que apresentem um comportamento hidrológico similar representem uma mesma classe. Isso é feito para que no final do processamento exista um número de URHs suficiente para representar adequadamente o comportamento hidrológico da bacia, mas de maneira que não seja excessivo a ponto de dificultar a modelagem sem acrescentar ganhos significativos de informações. É recomendado que o número de URHs seja relativamente baixo, sendo permitidas no máximo 12 na versão atual do modelo (FAN, *et al.*, 2010a).

Na reclassificação do mapa de solo da bacia foi utilizado o modelo do Serviço de Conservação do Solo (SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (USDA) para a estimação do escoamento superficial adaptado por Sartori, Neto e Genovez (2005) para representação dos solos brasileiros. De maneira geral, essa metodologia divide os solos em quatro grupos: potencial de escoamento superficial baixo (A), moderado (B), alto (C) e muito alto (D). No entanto, da maneira como a classificação é tratada pelo modelo SCS, faltam algumas características importantes quando a intenção é uma classificação relacionada com o comportamento hidrológico das classes. Sendo assim, a adaptação utilizada como referência é importante no sentido que é voltada justamente

para a classificação hidrológica do solo (SARTORI, NETO e GENOVEZ, 2005). A Tabela 5-10 apresenta os detalhes de cada classe.

Tabela 5-10: Classificação Hidrológica do Solo para as Condições Brasileiras (continua).

<p>Grupo Hidrológico A</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Solos muito profundos (prof. > 200 cm) ou profundos (100 a 200 cm); ✓ Solos com alta taxa de infiltração e com alto grau de resistência e tolerância à erosão; ✓ Solos porosos com baixo gradiente textural (< 1,20); ✓ Solos de textura média; ✓ Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione alta macroporosidade em todo o perfil; ✓ Solos bem drenados ou excessivamente drenados; ✓ Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1; ✓ A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: média/média, argilosa/argilosa e muito argilosa/muito argilosa. <p>Enquadra-se neste grupo o: LATOSSOLO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macroporosidade; LATOSSOLO AMARELO e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso.</p>
<p>Grupo Hidrológico B</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Solos profundos (100 a 200 cm); ✓ Solos com moderada taxa de infiltração, mas com moderada resistência e tolerância a erosão; ✓ Solos porosos com gradiente textural variando entre 1,20 e 1,50; ✓ Solos de textura arenosa ao longo do perfil ou de textura média com horizonte superficial arenoso; ✓ Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione boa macroporosidade em todo o perfil; ✓ Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1; ✓ A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/arenosa, arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa e argilosa/muito argilosa. <p>Enquadra-se neste grupo o: LATOSSOLO AMARELO e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa; LATOSSOLO BRUNO; NITOSSOLO VERMELHO; NEOSSOLO QUARTZARÊNICO; ARGISSOLO VERMELHO ou VERMELHO AMARELO de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta.</p>

Tabela 5-10: Classificação Hidrológica do Solo para as Condições Brasileiras (conclusão).

<p>Grupo Hidrológico C</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Solos profundos (100 a 200 cm) ou pouco profundos (50 a 100 cm); ✓ Solos com baixa taxa de infiltração e baixa resistência e tolerância à erosão; ✓ São solos com gradiente textural maior que 1,50 e comumente apresentam mudança textural abrupta; ✓ Solos associados a argila de atividade baixa (Tb); ✓ A textura nos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/média e média/argilosa apresentando mudança textural abrupta; arenosa/argilosa e arenosa/muito argilosa. <p>Enquadra-se neste grupo o:</p> <p>ARGISSOLO pouco profundo, mas não apresentando mudança textural abrupta ou ARGISSOLO VERMELHO, ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos profundos e apresentando mudança textural abrupta; CAMBISSOLO de textura média e CAMBISSOLO HÁPLICO ou HÚMICO, mas com características físicas semelhantes aos LATOSSOLOS (latossólico); ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO; NEOSSOLO FLÚVICO.</p>
<p>Grupo Hidrológico D</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Solos com taxa de infiltração muito baixa oferecendo pouquíssima resistência e tolerância a erosão; ✓ Solos rasos (prof. < 50 cm); ✓ Solos pouco profundos associados à mudança textural abrupta ou solos profundos apresentando mudança textural abrupta aliada à argila de alta atividade (Ta), minerais de argila 2:1; ✓ Solos argilosos associados à argila de atividade alta (Ta); ✓ Solos orgânicos. <p>Enquadra-se neste grupo o:</p> <p>NEOSSOLO LITÓLICO; ORGANOSSOLO; GLEISSOLO; CHERNOSSOLO; PLANOSSOLO; VERTISSOLO; ALISSOLO; LUVISSOLO; PLINTOSSOLO; SOLOS DE MANGUE; AFLORAMENTOS DE ROCHA; Demais CAMBISSOLOS que não se enquadram no Grupo C; ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta.</p>

Fonte: SARTORI, NETO e GENOVEZ, 2005.

No caso do mapa de uso e ocupação do solo não foi necessário o procedimento de reclassificação, pois o mesmo já foi realizado pelo autor do mapa, Silva (2005).

Por fim, após a reclassificação individual dos mapas de tipos de solo e uso e ocupação do solo, foi feita a superposição dos mesmos e uma nova reclassificação, onde novamente foram reunidas as classes com comportamento hidrológico similar de maneira que resultassem em menos de 12 URHs.

5.4. Preparação dos Dados Hidrológicos e Meteorológicos

Além das informações físicas necessárias como dados de entrada na modelagem hidrológica, também são necessárias informações fluviométricas, pluviométricas e climatológicas.

Nessa etapa foram levantados todos os postos pluviométricos, existentes no banco de dados Hidroweb (ANA, 2017), localizados no interior da bacia de estudo e a cerca de 50 km dos limites da bacia. No total foram utilizadas 159 estações pluviométricas (Figura 5-8). Na escolha dos postos foi suposto que a confiabilidade dos dados consistidos disponibilizados pela ANA estivesse garantida, e para que a variabilidade espacial fosse bem representada foram utilizados mesmo os postos que apresentaram pequenos períodos de dados. Caso haja erros muito grosseiros nestes dados, os mesmos podem ser percebidos na etapa de ajuste do modelo, e conseqüentemente corrigidos. Os únicos excluídos foram aqueles que apresentavam muitas falhas em suas medições.

Os dados de vazões observadas foram obtidos dos postos fluviométricos utilizados na delimitação das sub-bacias da bacia em estudo, como já foi explicado na seção anterior. A exceção é o caso da sub-bacia da UHE Três Marias, onde foram utilizadas as vazões naturais obtidas no site do ONS (2017), por representarem as vazões sem a interferência do reservatório. Isso foi feito porque o MGB-IPH não simula os efeitos de reservatórios, e como o posto utilizado como exutório da bacia fica localizado a jusante do reservatório de Três Marias foi necessária a utilização das vazões naturais. A Figura 5-8 mostra a localização das estações na bacia. Como o MGB-IPH é ideal para a simulação de grandes bacias, foi adotado um critério preliminar onde foram escolhidos apenas os postos que apresentaram área de drenagem maior ou igual a 4.000 km², devido à grande extensão da bacia e ao fato do modelo apresentar melhores respostas quanto maior for a dimensão da bacia (COLLISCHONN e TUCCI, 2001; SILVA, 2005).

Enfim, os dados climatológicos foram obtidos a partir de estações meteorológicas, localizadas no interior da bacia hidrográfica e nas suas proximidades, com dados históricos mensais de temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, pressão atmosférica e radiação solar ou insolação (Figura 5-8). No total foram 11 estações meteorológicas pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) estando os dados disponíveis

no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP). Da mesma maneira que no caso das estações pluviométricas, foi suposto que a confiabilidade dos dados disponibilizados pela INMET estivesse garantida, e para que a variabilidade espacial fosse bem representada foram utilizados mesmo os postos que apresentaram pequenos períodos de dados.

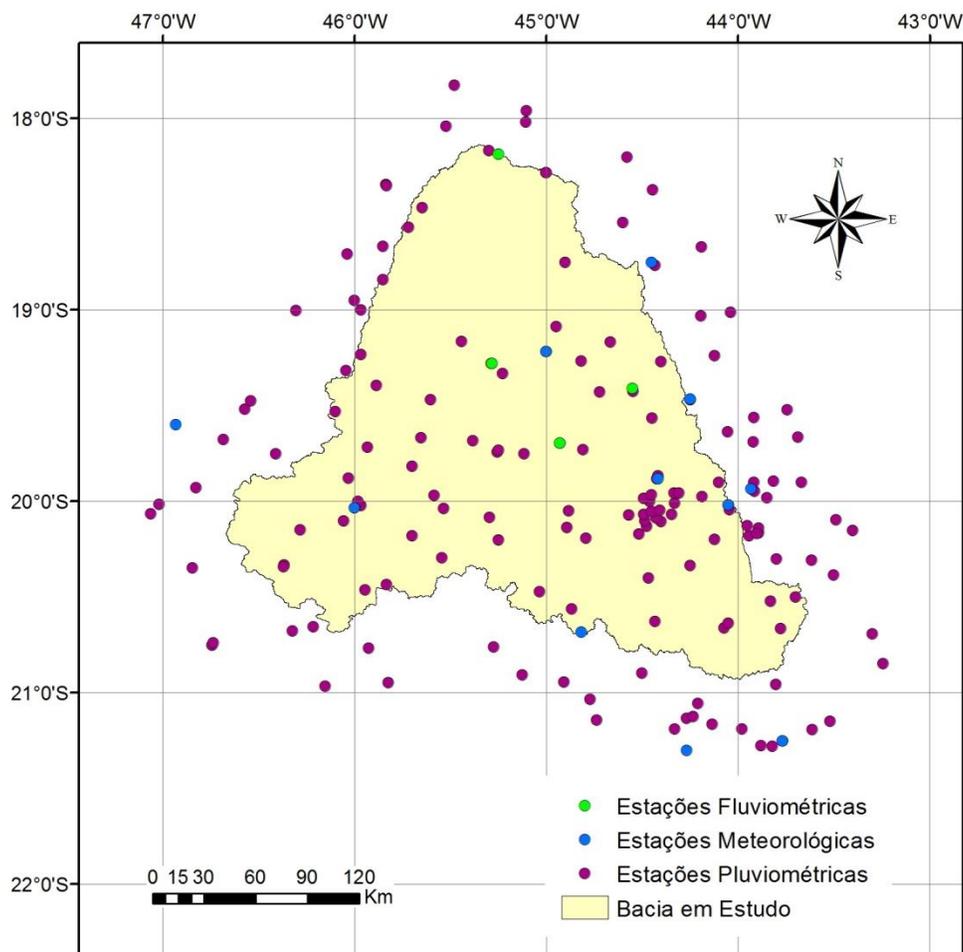


Figura 5-8: Estações pluviométricas, fluviométricas e meteorológicas.

5.5. Calibração e Verificação do Modelo

O modelo MGB-IPH possui dois tipos de parâmetros: fixos e calibráveis. Os parâmetros fixos (Tabela 5-11), que são o albedo, índice de área foliar (IAF), resistência superficial e altura da cobertura vegetal, apresentam valores que podem ser medidos ou que não influenciam de maneira tão significativa nos resultados, sendo assim, foram definidos com base na literatura (COLLISCHONN, 2001; COLLISCHONN e TUCCI, 2001 e SILVA, 2005). Já os parâmetros calibráveis, podem ser modificados para cada sub-bacia e

URH, e influenciam de maneira importante nos resultados do processo de modelagem (COLLISCHONN, 2001 e COLLISCHONN e TUCCI, 2001). A Tabela 5-12 apresenta os parâmetros que são considerados na calibração. Os valores utilizados para os parâmetro fixos podem ser consultados no ANEXO I – Parâmetros Fixos.

Tabela 5-11: Parâmetros fixos do modelo MGB-IPH.

Parâmetro Fixo	Descrição
Índice de Área Foliar (IAF)	O IAF expressa a relação entre a área das folhas de todas as plantas e da área de uma parcela de solo. É um parâmetro adimensional ($m^2.m^{-2}$) e que, em geral, pode ser medido ou estimado a partir de informações na bibliografia.
Albedo	O albedo é a parcela da radiação solar refletida ao atingir a superfície do solo, considerando sua cobertura vegetal.
Resistência Superficial	A resistência superficial representa a resistência ao fluxo de umidade do solo, através das plantas até a atmosfera. Esta resistência é diferente para os diversos tipos de plantas e depende de variáveis ambientais, como a umidade do solo, a temperatura do ar e a radiação recebida pela planta.
Altura do Dossel	A altura média da vegetação é utilizada nos modelos hidrológicos para estimar a resistência aerodinâmica, que atua no controle da evapotranspiração. Quanto maior a resistência aerodinâmica, menor é o fluxo de evapotranspiração. A resistência aerodinâmica é considerada menor em florestas, onde a altura média da vegetação é maior e intensifica a turbulência do vento.

Fonte: LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014.

Tabela 5-12: Parâmetros de calibração do modelo MGB-IPH.

Variável	Unidade	Significado
Calibração da propagação subsuperficial (CS)	(adimensional)	Parâmetro para a calibração da propagação subterrânea nas minibacias.
Calibração da propagação superficial (CI)	(adimensional)	Parâmetro para a calibração da propagação subsuperficial nas minibacias.
Retardo do reservatório subterrâneo (CB)	dias	Parâmetro que representa o retardo do reservatório subterrâneo.
Quantidade de água que escoia subsuperficialmente (K_{INT})	mm	Parâmetro que controla a quantidade de água da camada de solo que escoia subsuperficialmente.
Vazão durante a estiagem (K_{BAS})	mm	Parâmetro que controla a vazão durante a estiagem. Valores mais altos implicam maior escoamento subterrâneo.
Capacidade de armazenamento do solo (W_m)	mm	Capacidade de armazenamento de água no solo.
Forma da relação entre armazenamento e saturação (b)	(adimensional)	Parâmetro empírico que define a variabilidade da capacidade de armazenamento do solo em torno de W_m .
Armazenamento residual (W_c)	mm	Limita o armazenamento residual e subterrâneo.
Fluxo do reservatório subterrâneo para camada superficial (CAP)	mm	Controla a possibilidade de retorno de água subterrânea para a camada de solo.
Forma da curva de redução da drenagem intermediária (XL)	(adimensional)	Controla a forma da curva de redução da drenagem intermediária ou subsuperficial do solo.
Vazão de base (QB)	m^3/s	Parâmetro que representa o fluxo de base da minibacia.

Fonte: Adaptado de LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014.

Os modelos hidrológicos são baseados em equações matemáticas que possuem parâmetros que caracterizam os processos hidrológicos que ocorrem na bacia hidrográfica, no entanto, alguns desses parâmetros representam abstrações da realidade, e por isso, não podem ser medidos, sendo necessário o processo de calibração para o ajuste dos mesmos (BRAVO, COLLISCHONN e TUCCI, 2009). Sendo assim, o principal objetivo da

calibração é que a concordância entre os dados observados e obtidos pelos modelos seja a melhor possível (LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014).

É importante ressaltar que a existência de diversas incertezas nos resultados calculados pelo modelo, devidas a erros nos dados medidos, na estrutura do modelo e nos parâmetros obtidos por calibração, faz com que os valores dos parâmetros calibráveis não seja único e sim uma faixa de valores e diferentes combinações que geram resultados semelhantes (COLLISCHONN, 2001; COLLISCHONN e TUCCI, 2003; BRAVO, COLLISCHONN e TUCCI, 2009). Segundo Tucci *et al.* (2002), a escolha de um conjunto de parâmetros irá variar de acordo com o objetivo da aplicação do modelo, pois geralmente, não é possível a otimização de várias funções objetivos diferentes, e portanto, existe também uma incerteza neste processo.

A verificação da qualidade da calibração é baseada na avaliação de hidrogramas e em três funções objetivos: coeficiente de Nash-Sutcliffe das vazões calculadas e observadas (NS), coeficiente de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões calculadas e observadas (NSLog) e erro relativo de volume total dos hidrograma (ΔV) (COLLISCHONN, 2001; TUCCI *et al.*, 2002; LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014). A Tabela 5-13 apresenta as equações e uma breve descrição de cada função. O processo de calibração deve ser repetido até que a qualidade da calibração seja aceitável para o objetivo do trabalho.

Tabela 5-13: Funções objetivo para calibração do modelo MGB-IPH.

Equação	Descrição
$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (QC_i - QO_i)^2}{\sum_{i=1}^N (QC_i - QO_m)^2}$	<p>Possui valor máximo igual a 1, que é considerado o ajuste perfeito. É muito influenciado pelas vazões máximas, portanto, quando seu valor é próximo de 1, significa que o modelo está obtendo um bom ajuste para as cheias. Quando apresenta valor acima de 0,75 o desempenho do modelo é considerado bom, quando fica entre 0,36 e 0,75 o desempenho é considerado adequado.</p>
$NS_{log} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\log(QC_i) - \log(QO_i))^2}{\sum_{i=1}^N (\log(QC_i) - \log(QO_m))^2}$	<p>Também apresenta valor máximo igual a 1, no entanto, é mais influenciado pelas vazões mínimas, portanto, quando seu valor é próximo da unidade, o modelo está representando adequadamente as estiagens.</p>
$\Delta V = \frac{\sum_{i=1}^N QC_i - \sum_{i=1}^N QO_i}{\sum_{i=1}^N QO_i}$	<p>Não possui valor máximo nem mínimo e não é influenciado de maneira diferenciada pelos períodos de cheia ou estiagem. Seu valor representa a diferença percentual entre a soma de todas as vazões calculadas e observadas. Função útil na verificação dos cálculos de evapotranspiração. O ideal é que os valores se mantenham entre -10% e 10%.</p>

Onde: QC_i é a vazão calculada num intervalo de tempo i ; QO_i é a vazão observada neste mesmo intervalo de tempo; N é o número de intervalos de tempo; QO_m é a média das vazões observadas no período de N intervalos de tempo e $QO_m \log$ é a média dos logaritmos das vazões observadas no período de N intervalos de tempo.

Fonte: Adaptado de COLLINSCHONN (2001); TUCCI *et al.* (2002); LIMA, COLLISCHONN e MARENGO (2014).

Como é improvável que se encontre um conjunto de parâmetros capaz de produzir, ao mesmo tempo, valores ótimos para todas ou maioria das funções objetivo (TUCCI *et al.*, 2002, COLLISCHONN e TUCCI, 2001), no caso deste estudo, que está relacionado com a geração de hidroeletricidade, a função objetivo a qual se deu preferência foi o erro de volume (ΔV). No entanto, é importante analisar criticamente os resultados fornecidos pela calibração, pois como ela é um problema de infinitas soluções, podem existir soluções que

atendam as equações, mas não representem a realidade lógica do problema ou os valores esperados dos parâmetros (COLLISCHONN e TUCCI, 2003).

Basicamente, existem dois métodos de calibração, a calibração manual e a automática. A primeira metodologia utilizada neste estudo foi a calibração automática multi-objetivo, que é baseada em uma técnica de algoritmos genéticos (algoritmos de otimização global baseados em mecanismos de seleção natural e da genética), o MOCOM-UA (*Multiobjective Complex Evolution Method* – Universidade do Arizona) (YAPO *et al.*, 1998), descrita com detalhes em Collischonn (2001) e Tucci *et al.* (2002). O objetivo dessa técnica é otimizar, ao mesmo tempo, várias funções que avaliam vários aspectos da qualidade do ajuste entre os hidrograma calculados e observados. No entanto, muito provavelmente, não será apresentada uma única solução, e sim uma região de soluções não dominadas, denominada região de Pareto. Essa região separa as infinitas soluções possíveis em “boas” (não dominadas) e “más” (dominadas), cabendo ao usuário do modelo avaliar as soluções não dominadas e decidir adotar uma ou mais delas (BRAVO, COLLISCHONN e TUCCI, 2009; COLLISCHONN e TUCCI, 2003; TUCCI *et al.*, 2002, COLLISCHONN e TUCCI, 2001).

No caso da calibração automática, o usuário deve fornecer uma primeira estimativa dos parâmetros calibráveis, que neste caso foi adaptada do trabalho de Silva (2005), que realizou a modelagem hidrológica para toda a bacia hidrográfica do São Francisco. Feito isso o algoritmo do modelo hidrológico simula as vazões das sub-bacias escolhidas e determina coeficientes que deveriam ser multiplicado pelos parâmetros calibráveis inicialmente fornecidos com o intuito aproximar o hidrograma calculado do observado e melhorar as funções objetivos apresentadas na Tabela 5-13. Esses novos parâmetros determinados são frutos de diversas iterações realizadas pelo algoritmo, e como explicado anteriormente, não é fornecida apenas uma solução, e sim, um conjunto delas, sendo a escolha feita pelo usuário de acordo com o objetivo do estudo.

Após a calibração automática foi realizada a calibração manual afim de garantir que os valores sugeridos pela calibração automática se enquadrassem em intervalos reais sugeridos pela literatura e para a correção de eventuais problemas observados nos hidrogramas simulados. Na calibração manual a alteração dos parâmetros é feita pelo usuário da maneira como ele preferir, baseada em seu conhecimento e na sua observação do comportamento dos processos hidrológicos às variações do parâmetros calibráveis. Caso as solução encontrada após uma primeira tentativa não seja considerada adequada,

os parâmetros calibráveis iniciais devem ser alterados e o processo deve ser refeito até a obtenção de um resultado satisfatório.

O processo de calibração foi feito para o período de 1970 a 1979. Os parâmetros calibráveis XL, CAP, W_c , CS, CI e CB foram considerados fixos e foram baseados em Silva (2005). Os demais são apresentados no ANEXO II – Parâmetros Calibráveis.

Após a etapa de calibração deve-se efetuar a verificação da mesma, baseada também em vazões observadas, mas para um período diferente ao da calibração. No caso, ela foi realizada para o período de 1990 a 1999. O processo, nada mais é, do que a simulação de um período diferente do utilizado na calibração com a intenção de verificar se o modelo consegue representar adequadamente um período que não o da calibração. Caso ocorram erros significativos, suas origens devem ser investigadas para aplicação de possíveis melhorias nos resultados das previsões.

5.6. Simulação Hidrológica e Remoção de Viés

A representação do clima presente e futuro realizada pelos modelos climáticos não são perfeitas, apresentando erros sistemáticos que ocorrem devido principalmente à imperfeita conceituação dos processos e fenômenos relacionados ao clima e a discretização espacial dos modelos (LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014). Portanto, é necessária a remoção de viés das variáveis climatológicas que serão utilizadas como dados de entrada no modelo hidrológico, evitando assim, a propagação dos erros.

As projeções climáticas do modelo regional Eta, utilizadas neste estudo, foram disponibilizadas pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – CPTEC/INPE para os períodos “Presente” (1961-1990), “FUT1” (2011-2040), “FUT2” (2041-2070) e “FUT3” (2071-2100), forçado por dois modelos globais, HadGEM2-ES e MIROC5 (Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5), para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 do IPCC AR5. Mais informações sobre essa versão do Eta podem ser encontradas em Chou, *et al.* (2014a) e Chou *et al.* (2014b).

Primeiramente, como os valores das variáveis climatológicas fornecidas pelo modelo Eta estão distribuídos em uma grade regular com resolução espacial de 20 km, para ingressar com essas informações no MGB-IPH é necessária a obtenção desses valores para o centróide de cada minibacia (LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014), que neste estudo não estão dispostos em uma grade regular.

No caso das variáveis do clima: temperatura, pressão atmosférica em superfície, umidade relativa do ar, vento em superfície e radiação de onda curta incidente em superfície, tanto obtidas quanto observadas, o centroide da minibacia recebe o valor da variável do ponto de grade do modelo climático e do posto climatológico mais próximo, respectivamente. Para os dados obtidos e observados de precipitação o procedimento é um pouco mais complexo. Após a identificação do ponto de grade do modelo e do posto pluviométrico mais próximo do centroide de cada minibacia, devem ser encontrados todos os pontos de grade e postos pluviométricos, respectivamente, que estiverem dentro de um raio de duas vezes essa distância e realizada uma interpolação dos dados pelo método do inverso da distância ao quadrado (LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014).

Para a remoção do viés foram aplicadas duas metodologias diferentes, uma para os dados de precipitação e outra para as demais variáveis. No caso dos dados de precipitação a metodologia utilizada foi o *mapeamento* quantil-quantil (*Quantile-Quantile mapping*). Já no caso das variáveis – temperatura, pressão atmosférica em superfície, umidade relativa do ar, vento em superfície e radiação de onda curta incidente em superfície – a metodologia foi a taxa de câmbio (*Delta Change*). Ambos os métodos são descritos com mais detalhes em Lima, Collischonn e Marengo (2014).

O mapeamento quantil-quantil, segundo Lima, Collischonn e Marengo (2014), trata-se da comparação das funções cumulativas de probabilidade da variável observada e da variável estimada nos períodos atual e futuro. Na primeira etapa da metodologia os dados diários de precipitação de cada mês do ano, do modelo climático (atual e futuro) e observados, são agrupados e têm suas funções cumulativas de probabilidades estimadas. Então, é realizada a remoção de viés do período atual, onde o valor diário corrigido é igual ao valor observado que possui a mesma probabilidade acumulada (Figura 5-9). Por fim, é feita a revisão de viés do período futuro, onde se verifica qual é o valor da probabilidade acumulada da precipitação estimada atual que possui o mesmo valor de precipitação do valor diário da série futura, sendo o valor diário corrigido igual ao valor observado que apresenta a mesma probabilidade acumulada (Figura 5-10). Mais informações sobre a metodologia podem ser encontradas em Bárdossy e Pegram (2011).

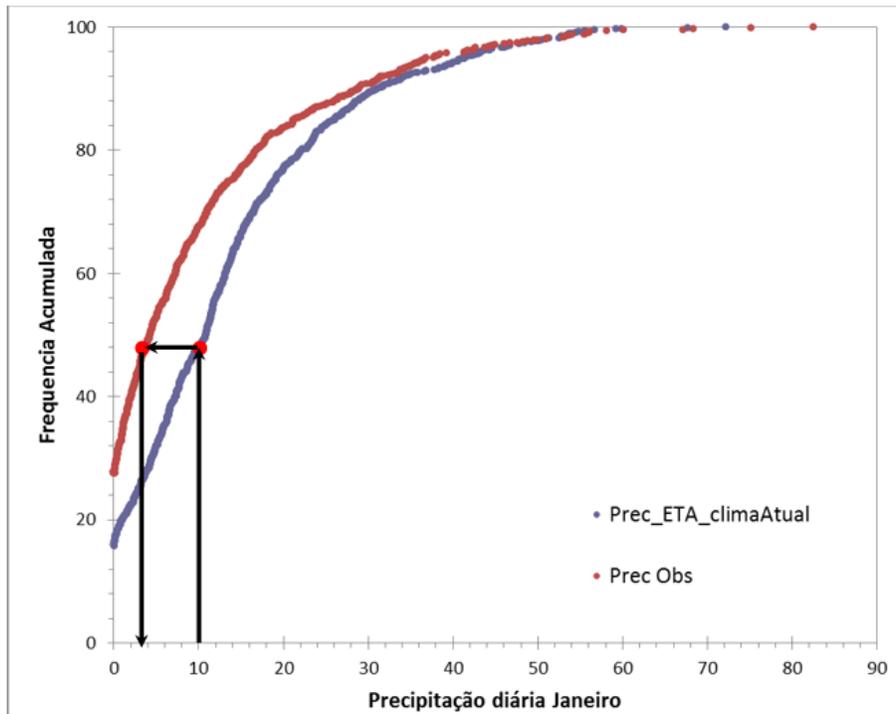


Figura 5-9: Remoção de viés do período atual.

Fonte: LIMA, COLLISCHONN, MARENGO, 2014.

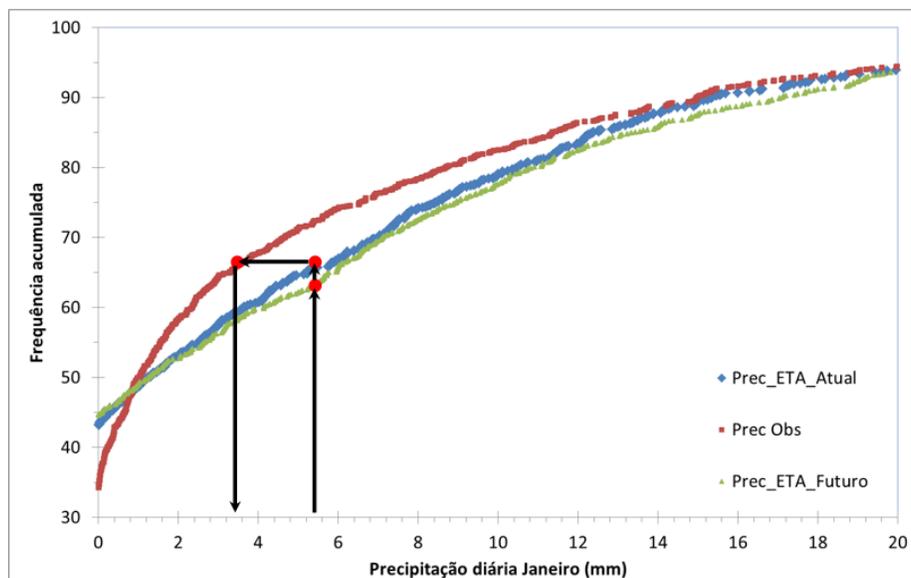


Figura 5-10: Remoção de viés do período futuro.

Fonte: LIMA, COLLISCHONN, MARENGO, 2014.

O método de taxa de câmbio baseia-se na determinação das diferenças entre os valores estimados pelos modelos climáticos para o período “Presente” e para os períodos

futuros. Primeiramente devem ser determinadas as normais climatológicas dos dados estimados pelo modelo climático para o período “Presente” e para os períodos futuros. A seguir deve ser calculado o quociente entre os valores dos períodos futuros e “Presente”, resultando em uma taxa de câmbio para cada mês do ano. Em seguida essa taxa de câmbio deve ser multiplicada pelos valores diários da série de dados observados do período presente. Por fim, deve ser verificado se os valores diários obtidos na série temporal corrigida não superam os limites físicos. Caso isso ocorra, deve ser adotado o valor limite (LIMA, COLLISCHONN e MARENGO, 2014). O modelo hidrológico MGB-IPH será alimentado pela série temporal corrigida. Mais informações sobre a metodologia podem ser encontradas em Gellens e Roulin (1998).

Após a remoção dos erros das informações provenientes do modelo climático é possível a realização da etapa de simulação. As vazões da bacia foram simuladas para o período de base “Presente” de 1961 a 1990 e para três períodos futuros: “FUT1” de 2011 a 2040, “FUT2” de 2041 a 2070 e “FUT3” de 2071 a 2100; para os modelos climáticos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5; e para ambos cenários do IPCC AR5 (RCP 4.5 e RCP 8.5). O modelo hidrológico foi alimentado pelas seguintes variáveis do modelo climático: precipitação, velocidade do vento em superfície, radiação solar, temperatura em superfície, pressão atmosférica em superfície e umidade relativa do ar.

5.7. Determinação dos Impactos na Geração

Hidrelétrica

Para a determinação da potência gerada pela UHE Três Marias a partir das projeções de vazões afluentes ao reservatório, obtidas através das etapas anteriores da metodologia, foram realizadas simulações baseadas no balanço hídrico do reservatório. De maneira geral, a variação do volume de um reservatório num intervalo de tempo específico depende, do volume de água previamente existente no reservatório, do volume de água que chega no reservatório (vazão afluente), do volume de água que precipita sobre a área do reservatório (precipitação), do volume de água que evapora do reservatório (evaporação) e do volume de água que sai do reservatório (vazão defluente), que é composta pelas vazões turbinadas, vertidas, vazões ambientais e de usos consuntivos. Sendo assim, inicialmente foi realizado um primeiro balanço, sem considerar os limites do reservatório (Equação 1).

$$V_B(\text{hm}^3) = V_I + \left(\frac{Q_A \times 3600 \times 24}{10^6} \right) + \left(\frac{P}{1000 \times A_I} \right) - \left(\frac{E}{1000 \times A_I} \right) - \left(\frac{Q_T \times 3600 \times 24}{10^6} \right) \quad (1)$$

Onde: V_B é o volume do reservatório no final do intervalo de tempo (hm^3); V_I é o volume inicial do reservatório (hm^3); Q_A é a vazão afluente (m^3/s); P é a precipitação (mm); A_I é a área inundada do reservatório (km^2); E é a evaporação (mm) e Q_T é a vazão turbinada (m^3/s).

No entanto, o volume final do balanço anterior pode ser maior do que o volume máximo suportado pelo reservatório ($V_{M\acute{A}X}$), que no caso de Três Marias é de 19.528 (hm^3). Portanto, se isso ocorrer, esse excesso de volume de água deve ser vertido (V_V) podendo ser determinado pela equação a seguir (Equação 2).

$$V_V(\text{hm}^3) = V_B - 19.528 \quad (2)$$

Portanto o volume final do reservatório (V_F) será igual a V_B quando a sentença $V_B < V_{M\acute{A}X}$ for satisfeita, senão será igual a $V_{M\acute{A}X}$. A Tabela 5-14 apresenta informações técnicas necessárias do aproveitamento hidrelétrico de Três Marias:

Tabela 5-14: Informações técnicas da UHE Três Marias.

Parâmetro	Valor
Nível a jusante	515,7 (m)
Cota Mínima	549,2 (m)
Cota Máxima	572,5 (m)
Volume Mínimo	4250 (hm^3)
Volume Máximo	19528 (hm^3)

Fonte: ONS,2016.

Com relação as variáveis necessárias para alimentar a Equação 1 temos que o volume inicial do reservatório (V_I) num intervalo de tempo qualquer é igual ao volume final do reservatório no intervalo de tempo anterior, ou seja, $V_{I(t)} = V_{F(t-1)}$. Como o volume inicial dos períodos simulados não era conhecido, o mesmo foi considerado igual ao volume máximo ($V_{M\acute{A}X}$) apenas para o primeiro intervalo de tempo. As vazões afluentes (Q_A) foram determinadas para cada intervalo a partir da modelagem hidrometeorológica realizada nas etapas anteriores deste estudo. As precipitações (P) foram obtidas do mesmo modelo climático regional que alimentou a modelagem hidrológica nas etapas anteriores, o modelo ETA.

A evaporação do reservatório foi determinada pela equação de Penman (TUCCI, 2012) (Equação 3):

$$E_0 \left(\frac{mm}{dia} \right) = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} \times \frac{qef}{L} + E_i}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} \quad (3)$$

Onde: qef é a radiação efetiva (mm/dia); L é o calor latente de vaporização; E_i é o termo aerodinâmico e a parcela da equação Δ/γ pode ser calculada através da equação a seguir (Equação 4):

$$\frac{\Delta}{\gamma} = \frac{38640 \times 10^{7.5T/(273.3+T)}}{(273.3 + T)^2} \quad (4)$$

Onde: T é a temperatura (°C).

Para a determinação da radiação efetiva (qef) utiliza-se a Equação 5 a seguir:

$$\frac{qef}{L} = G(1 - a) - \sigma T^4 (0.56 - 0.09e_a^{0.5})(0.1 + 0.9p) \quad (5)$$

Onde: L é o calor latente de vaporização; a é o albedo; T é a temperatura (°K); σ é a constante de Stefan-Boltzman; $p = h/h_{M\acute{A}X}$ é a proporção entre horas efetivas de brilho solar e o máximo possível; $G = R_t(0.24 + 0.58p)$ é a radiação incidente de onda curta (cal/cm².dia), R_t é a radiação no topo da atmosfera (cal/cm².dia); $e_a = \frac{Ue_s}{100}$ é a pressão parcial do vapor da água (mmHg); U é a umidade relativa do ar; $e_s = 4.58 \times 10^{7.5T/(273.3+T)}$ é a pressão de vapor saturado (mmHg), sendo T a temperatura (°C).

Por fim, o termo aerodinâmico (E_i) é determinado segundo a Equação 6:

$$E_i = 0.35 \left(0.5 + \frac{w_2}{160} \right) (e_s - e_a) \quad (6)$$

Onde: w_2 é a velocidade do vento medida a 2 metros de altura (km/dia).

A Tabela 5-15 a seguir apresenta os valores e fontes dos parâmetros necessários para os cálculos demonstrados acima:

Tabela 5-15: Parâmetros utilizados na determinação da evaporação do reservatório da UHE Três Marias.

Parâmetro	Valor	Fonte
L	$59 \text{ cal. cm}^{-2}. \text{mm}^{-1}$	TUCCI (2012)
T	Obtido do modelo climático ETA	-
R_t	Tabelado para as diferentes latitudes e para cada mês do ano*	TUCCI (2012)
h	Obtido do modelo climático ETA	-
$h_{M\acute{A}X}$	Tabelado para as diferentes latitudes e para cada mês do ano*	TUCCI (2012)
α	0.05	TUCCI (2012)
σ	$1.19 \times 10^{-7} \text{ cal. } ^\circ\text{K}^{-4} / \text{cm}^2. \text{dia}$	TUCCI (2012)
U	Obtido do modelo climático ETA	-
w_2	Obtido do modelo climático ETA	-

* Os valores podem ser consultados no Anexo III.

A área inundada do reservatório (A_I) é função da cota do reservatório (C), que é função do volume do reservatório (V_I). Sendo assim, a partir de um conjunto de dados observados foram elaboradas curvas de tendência que permitem a determinação destes parâmetros para todo o período de tempo estudado. A Tabela 5-16 apresenta a relação existente entre os três parâmetros:

Tabela 5-16: Relação Cota-Área-Volume do reservatório de Três Marias.

Cota (m)	Área (km ²)	Volume (hm ³)
549,20	315,75	4250,00
549,96	416,92	6300,00
556,90	593,42	10100,00
562,86	788,38	14500,00
572,50	1009,32	19528,00

Fonte: BRAVO, 2006.

Por fim, a determinação da vazão turbinada (Q_T) foi feita considerando-se uma relação linear entre o volume máximo e mínimo do reservatório. Na condição de volume máximo as turbinas utilizam a máxima capacidade de vazão. Caso o reservatório atinja o mínimo operacional, que corresponde a 0% do volume útil, a vazão turbinada também será zero. Essa é uma regra conservadora em termos de geração de energia, uma vez que

preserva o volume do reservatório quando há uma redução no mesmo, minimizando o tempo que permanece em condições muito baixas. A operação real da UHE Três Marias é realizada de forma centralizada pelo ONS e depende das condições de todo o SIN. Por isso, neste trabalho não se buscou reproduzir a operação real da usina. Dessa forma, adotou-se uma regra operativa simples, visando avaliar o impacto relativo dos cenários climáticos em relação as condições do período de referência.

Ao resolver o equacionamento apresentado acima para diversos intervalos de tempo, é possível então, a partir da determinação da vazão turbinada (Q_T) e das características do maquinário da UHE Três Marias, o cálculo da potência gerada pela mesma (Equação 7).

$$P = HQ_Tk \quad (7)$$

Onde: H é a queda (m), determinada pela diferença entre a cota do reservatório naquele intervalo de tempo (C) e o nível a jusante (apresentado na Tabela 5-14) e k é a produtibilidade específica média do conjunto turbina-gerador, que no caso é de 0,008564 (MW.s/m⁴) (ONS, 2016).

6. RESULTADOS

6.1. Preparação do Modelo Hidrológico

6.1.1. Discretização da bacia hidrográfica

A discretização em sub-bacias foi realizada baseada em 4 postos fluviométricos que contêm uma boa série de dados segundo os critérios de consistência apresentados na metodologia de maneira que cada um dos principais afluentes do rio São Francisco, a montante de UHE Três Marias, fosse representado por uma sub-bacia (Figura 6-1). A discretização em minibacias, que é a delimitação da bacia hidrográfica de cada trecho de rio, resultou em 671 células. A localização dos postos e seus dados foram obtidos no sistema de informações hidrológicas HidroWeb da ANA.

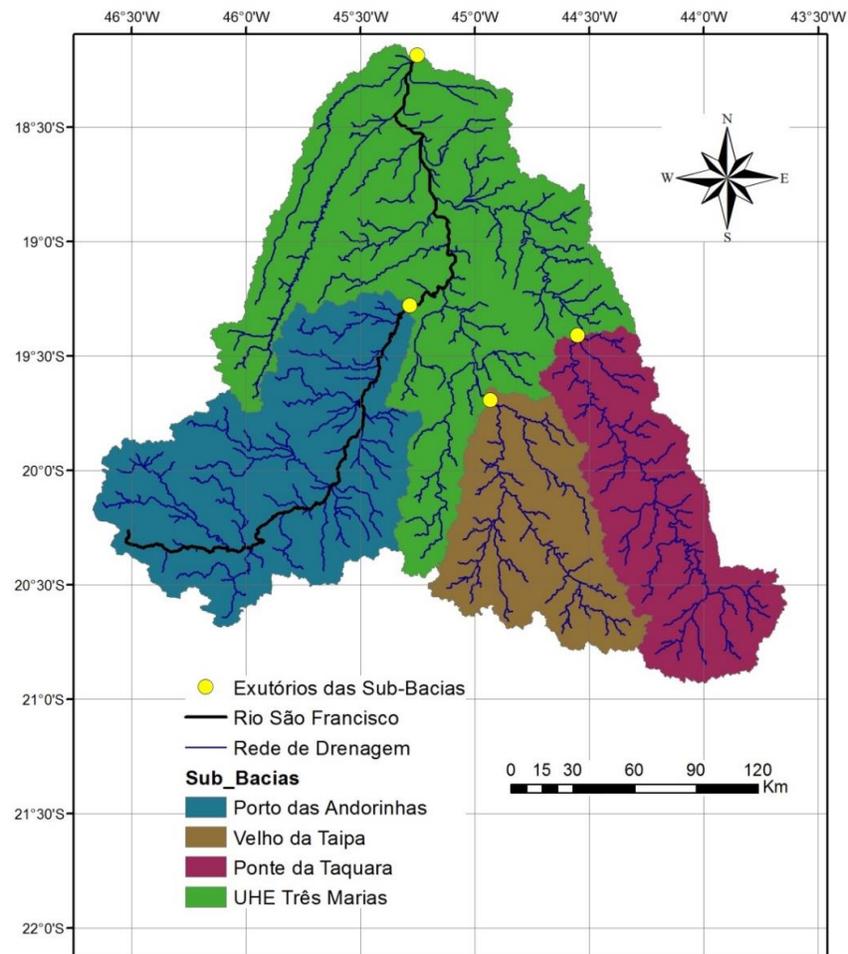


Figura 6-1: Discretização em sub-bacias e rede de drenagem da bacia rio São Francisco a montante do posto fluviométrico UHE Três Marias Jusante.

6.1.2. Unidades de resposta hidrológica

Primeiramente, o mapa de solos foi reclassificado segundo a metodologia de Sartori, Neto e Genovez (2005). A Tabela 6-1 apresenta quais os solos existentes na região que compõem cada grupo hidrológico e o mapa com a reclassificação dos grupos de solos é apresentado na Figura 6-2.

Tabela 6-1: Grupos de solos da bacia pertencentes a cada grupo hidrológico da reclassificação.

Grupo Hidrológico	Grupos de Solos
A	Latossolo Ferrífero Húmico, Latossolo Roxo Distrófico, Latossolo Vermelho Amarelo, Latossolo Vermelho Escuro
B	Solos Arenoquartzosos Profundos, Areias Quartzozas Hidromórficas, Podzólico Vermelho Escuro, Regosol
C	Solos Aluviais, Cambissolos, Podzol
D	Afloramento de Rocha, Planosol, Podzólico Vermelho Amarelo, Solos Halomórficos, Solos Hidromórficos, Solos Litólicos

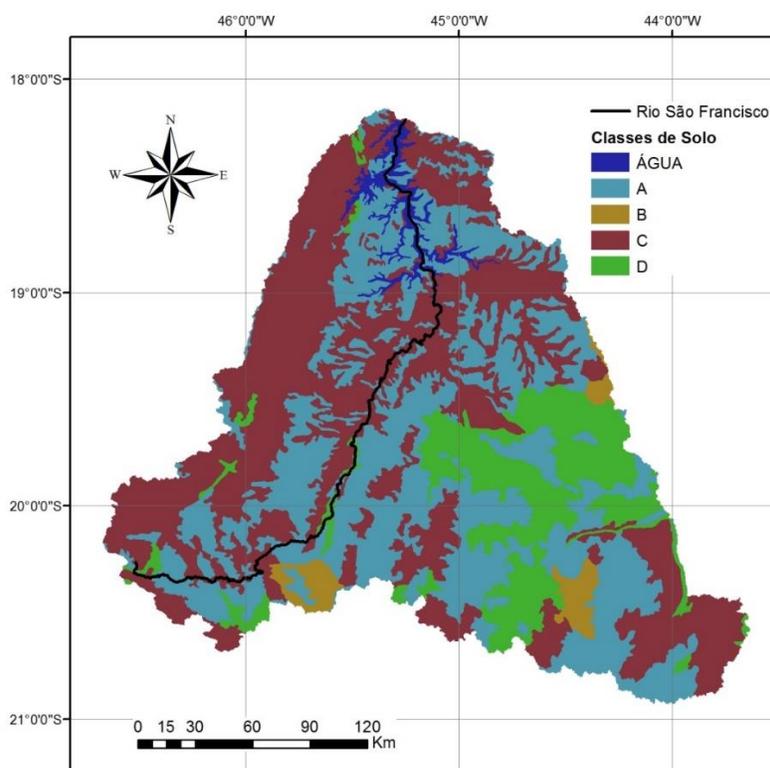


Figura 6-2: Reclassificação do mapa de solos da bacia em estudo.

No caso do mapa de uso e ocupação do solo não foi necessário o procedimento de reclassificação, pois o mesmo já foi realizado pelo autor do mapa, Silva (2005). Na Tabela 6-2 é apresentada uma breve descrição de cada classe, e na Figura 6-3 é possível visualizar a distribuição espacial dos diferentes usos existentes na bacia de interesse.

Tabela 6-2: Definição das classes de uso e ocupação do solo referentes a bacia em estudo.

Classe	Descrição
Pastagem/Agricultura	As áreas de agricultura, pastagem, campo limpo e rupestre foram agrupadas por apresentarem semelhanças quanto ao porte físico, profundidade de raízes e características de transpiração
Agricultura Irrigada	Áreas ocupadas por diversas variedades de culturas irrigadas
Cerrado/Cerradão	Agrupamento dos dois tipos de cerrado
Área Degradada	Áreas com ocorrência de erosão, mineração ou desgaste por excesso de pastoreio
Reflorestamento	Áreas reflorestadas com eucaliptos e pinus, quase sempre destinados à produção de carvão vegetal
Floresta	Vegetação predominante de árvores de grande porte
Água	Rios, lagos, lagoas e represas

Fonte: Adaptado de Silva (2005).

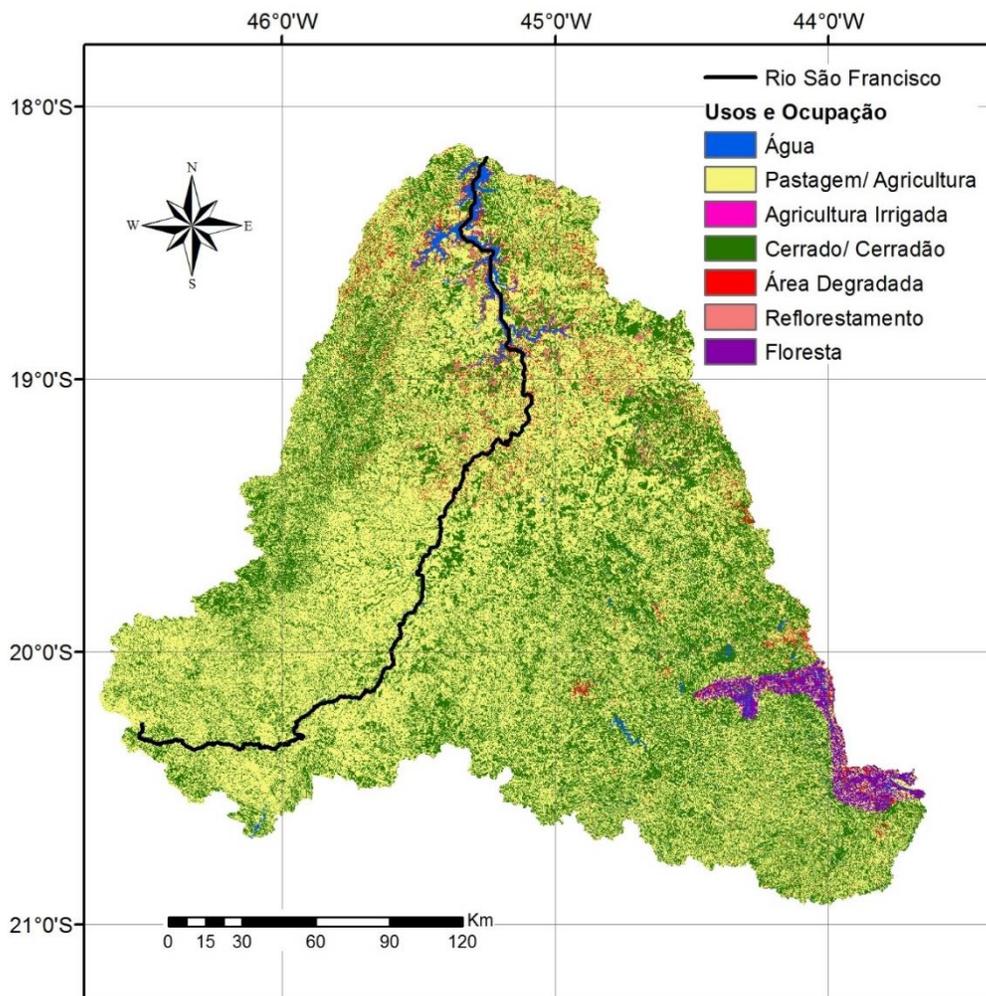


Figura 6-3: Mapa de uso e ocupação do solo da bacia em estudo.

Fonte: Adaptado de Silva, 2005.

O mapa de uso e ocupação do solo (Figura 6-3) não destaca as áreas urbanas, que são de extrema importância devido à alta capacidade de geração de escoamento superficial, portanto foi feito um levantamento manual das áreas mais significativas e estas foram acrescentadas ao mesmo na etapa de construção das URHs. razão das URHs é necessária a combinação dos mapas de tipo e uso e ocupação do solo, apresentados anteriormente. O agrupamento realizado deve ser analisado e então reagrupado de maneira que existam no máximo 12 URHs. Blocos que possuem água devem ser combinados. Classes com pequena representatividade em questão de área, e que não apresentam nenhum comportamento hidrológico de destaque podem ser unidas a outras classes similares com maior relevância. A Figura 6-4 mostra o mapa final que apresenta as 7 URHs que foram utilizadas neste trabalho.

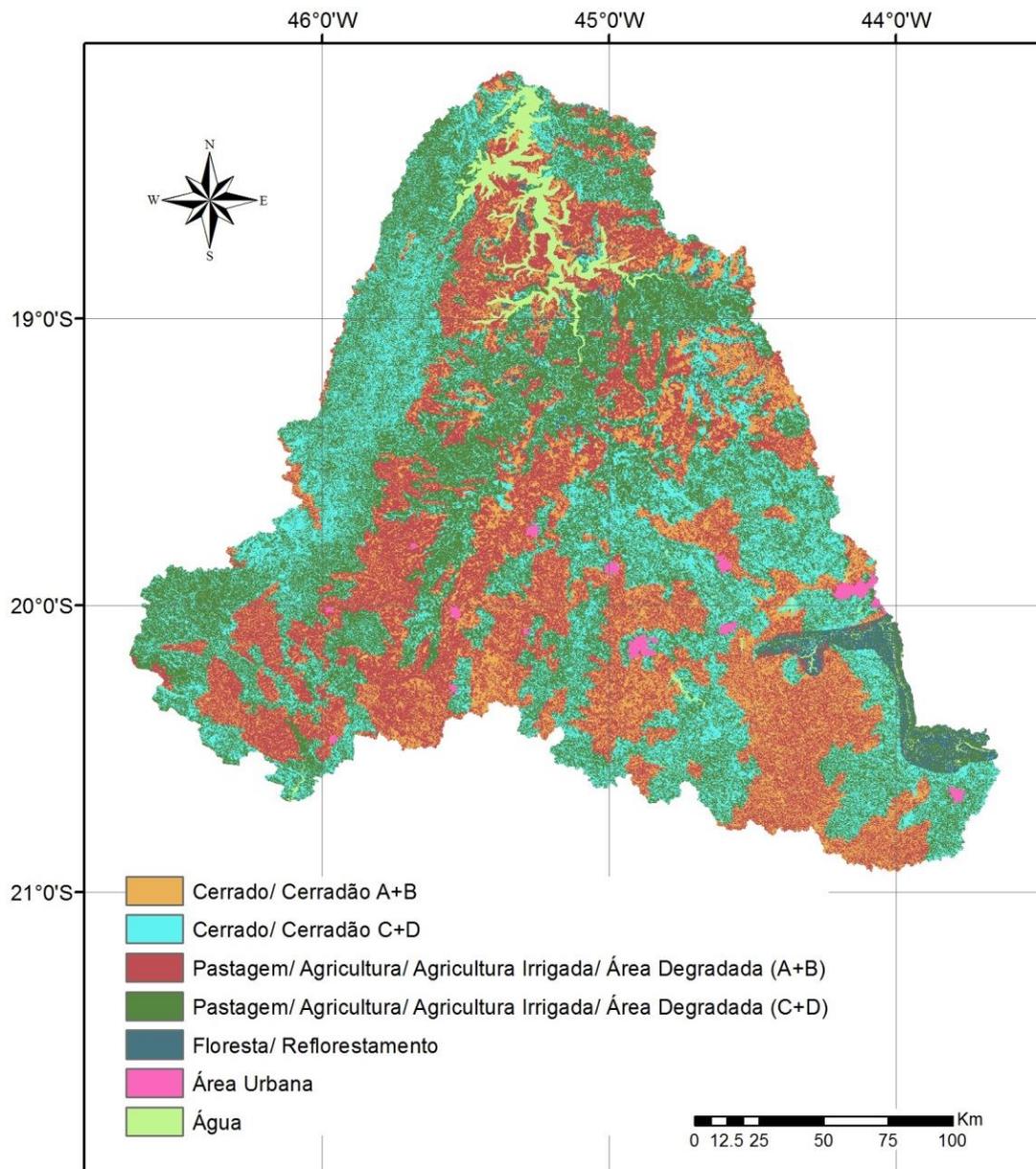


Figura 6-4: Unidades de Resposta Hidrológica da bacia em estudo.

É possível observar que maior parte da bacia é representada pelas URHs de Cerrado/Cerradão e Pastagem/Agricultura, tanto com solos de alto quanto de baixo escoamento superficial. No sudeste se destaca uma área de Floresta/Reflorestamento e a região metropolitana de Belo Horizonte. A maioria das cidades de grande extensão fica mais ao sul da bacia.

6.2. Calibração e Verificação

O processo de calibração e verificação foi realizado para cada uma das 4 sub-bacias definidas anteriormente (Figura 6-1). Os dados observados coletados para bacia de estudo estendem-se de 1960 a 2015. Sendo assim, após análise dos dados, foi selecionado o período de 1970 a 1979 para o processo de calibração; e o período de 1990 a 1999 para a verificação do ajuste. A calibração foi realizada em duas etapas, primeiramente de forma automática pelo algoritmo citado na metodologia e em seguida os resultados foram refinados manualmente.

Como o objetivo do estudo é a avaliação dos efeitos das mudanças climáticas na usina hidrelétrica Três Marias foi necessária a calibração de toda a bacia a montante do local da usina, que foi dividida nas 4 sub-bacias já mencionadas. Com relação às demais hidrelétricas existentes na bacia, nenhuma delas foi considerada na calibração, pois o volume de seus reservatórios pode ser considerado relativamente pequeno, sendo suas influências nos hidrogramas a jusante pouco significativa.

6.2.1. Calibração

A Tabela 6-3 apresenta os valores das funções objetivos para o período de calibração do modelo MGB-IHP. Os valores obtidos para os parâmetros calibráveis estão disponibilizados no ANEXO II – Parâmetros Calibráveis. Na Tabela 6-3 é possível observar que o ajuste do modelo foi muito bom na maioria das bacias, visto que a maioria das funções NS e NS_{Log} estão acima de 0,80 e os erros de volume são relativamente baixos. É importante ressaltar que a calibração foi realizada não apenas de maneira que as funções objetivos fossem otimizadas, mas também atentando para a manutenção dos valores dos parâmetros dentro de intervalos possíveis e reais citados na literatura (COLLISCHONN, 2001; SILVA, 2005). Foi estipulado um limite para o erro de volume de no máximo $\pm 6\%$ para o processo de calibração manual, visto que na calibração automática todos ficaram abaixo de 4%.

Tabela 6-3: Funções objetivo obtidas no processo de calibração para o período de 1970 a 1979.

Sub-bacia	Posto Fluviométrico	Rio	NS	NS _{Log}	ΔV (%)
01	Porto das Andorinhas	São Francisco	0,878	0,928	5,830
02	Velho da Taipa	Pará	0,808	0,772	5,477
03	Ponte da Taquara	Paraopeba	0,869	0,891	5,321
04	UHE Três Marias	São Francisco	0,826	0,822	3,390

Além das funções objetivos, também foi avaliado o comportamento dos hidrogramas calculados pelo modelo MGB-IPH quando comparados aos hidrogramas das vazões observadas nas quatro sub-bacias. As Figura 6-5, Figura 6-6, Figura 6-7 e Figura 6-8 apresentam as comparações dos hidrogramas calculados e observados para todo o período da calibração. Já a Figura 6-9 mostra apenas um período de três anos (1970-1972) para melhor visualização dos detalhes.

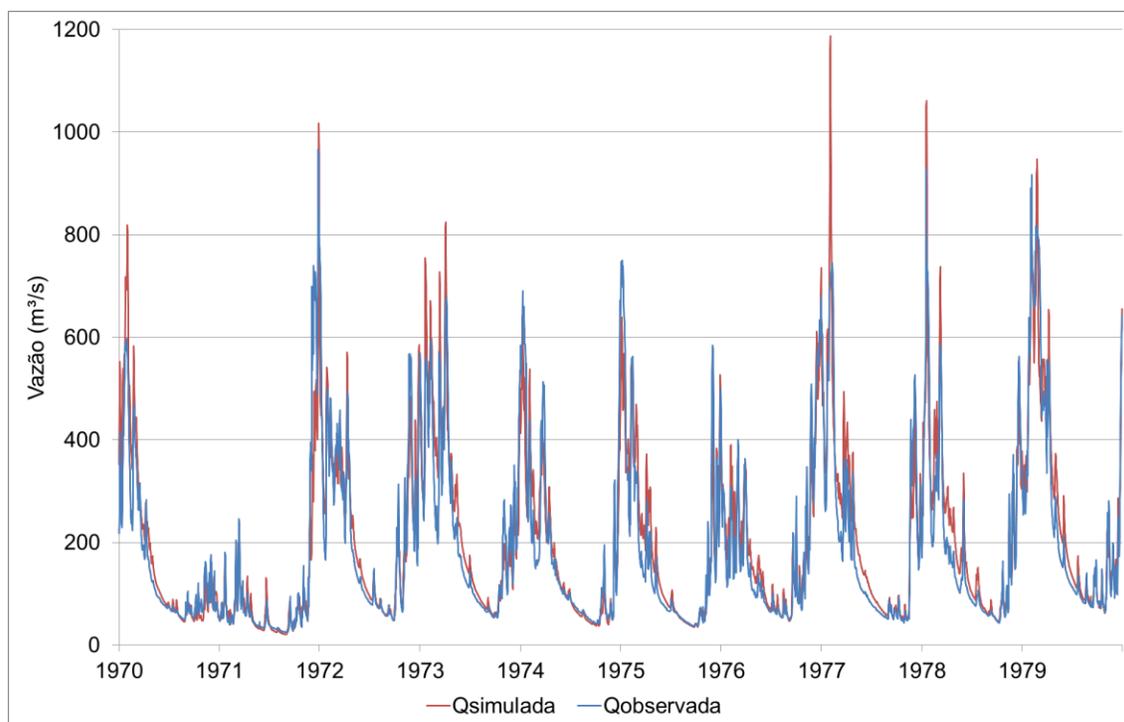


Figura 6-5: Comparação entre os hidrogramas de vazões diárias calculado e observado para a sub-bacia Porto das Andorinhas (Calibração).

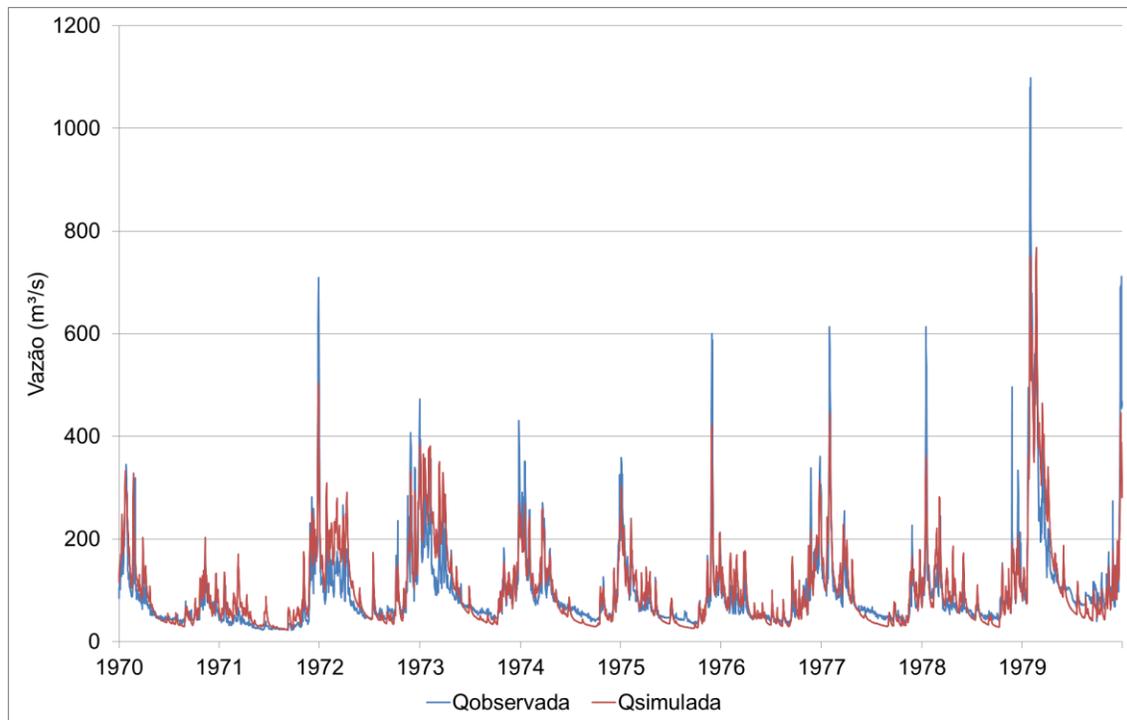


Figura 6-6: Comparação entre os hidrogramas de vazões diárias calculado e observado para a sub-bacia Velho da Taipa (Calibração).

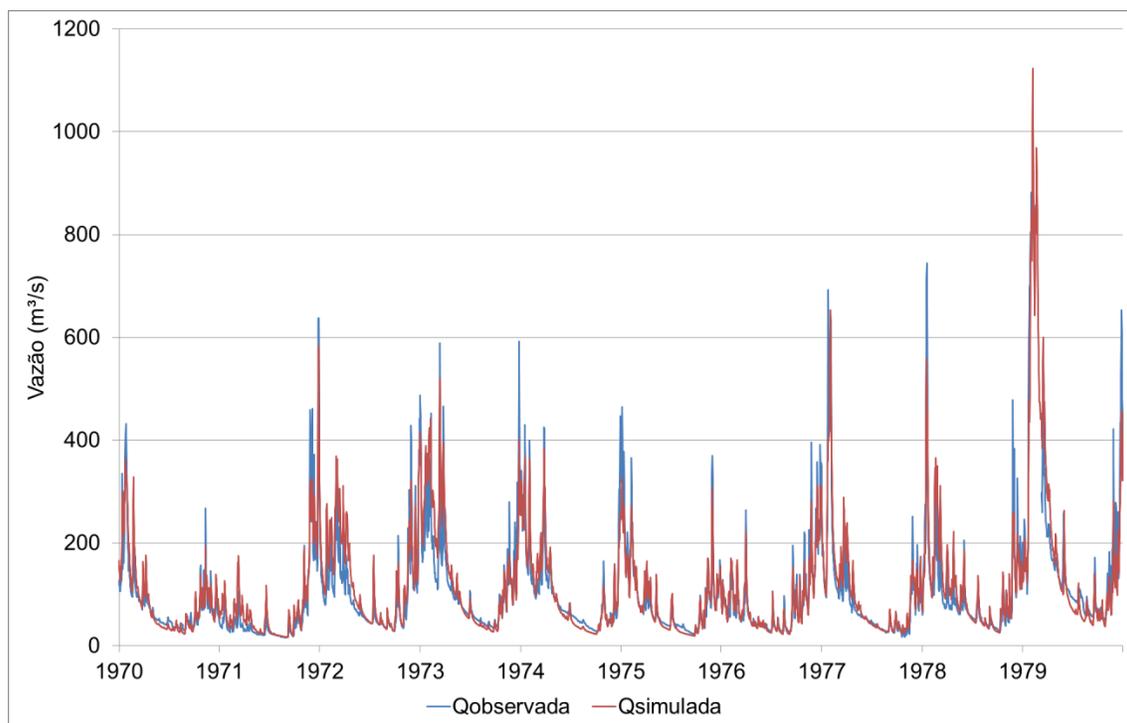


Figura 6-7: Comparação entre os hidrogramas de vazões diárias calculado e observado para a sub-bacia Ponte da Taquara (Calibração).

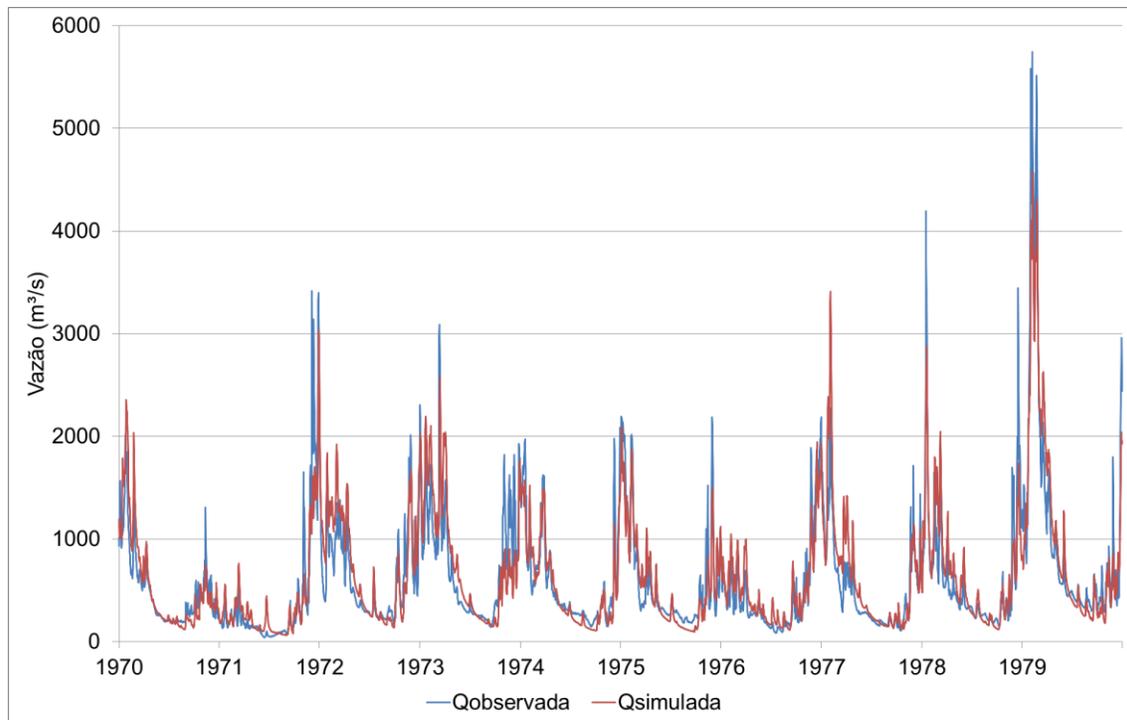


Figura 6-8: Comparação entre os hidrogramas de vazões diárias calculado e observado para a sub-bacia Três Marias (Calibração).

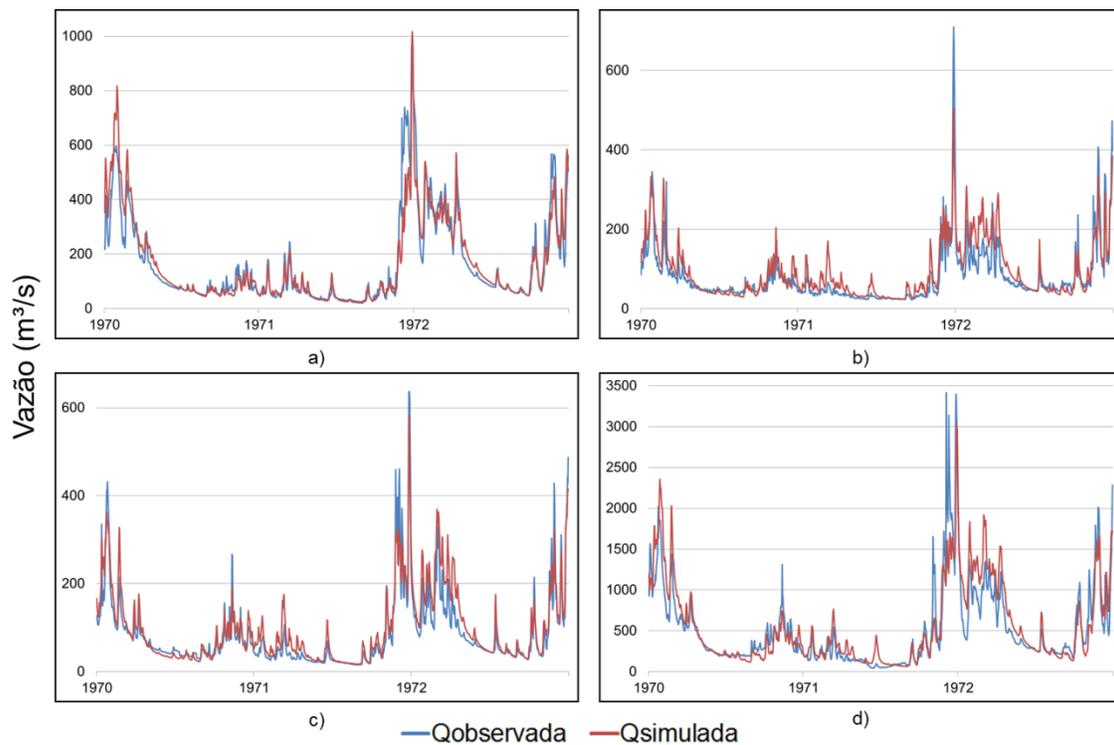


Figura 6-9: Hidrogramas de vazões diárias para as sub-bacias Porto das Andorinhas (a), Velho da Taipa (b), Ponte da Taquara (c) e UHE Três Marias (d) (1970-1972) (Calibração).

Nos hidrogramas acima é possível observar que a sazonalidade e as amplitudes são, de maneira geral, muito bem representadas. Analisando a Figura 6-5, observa-se que na calibração do posto Porto das Andorinhas, apesar do bom comportamento geral do hidrograma, a maioria dos picos de grandes cheias é superestimada. Já na Figura 6-6 ocorre o contrário, o modelo não alcança a maioria dos picos mais altos de vazão do posto Velho da Taipa e no caso das vazões de estiagem o modelo estima, na maioria das vezes, vazões um pouco mais baixas. Esta foi a sub-bacia que apresentou a pior calibração das quatro sub-bacias consideradas, no entanto, ainda assim os hidrogramas estão bem próximos.

No caso do posto Ponte da Taquara (Figura 6-7) as vazões dos picos das grandes cheias também não são alcançadas, mas de maneira menos expressiva do que as vazões do posto do Velho da Taipa. Por fim, a sub-bacia de Três Marias (Figura 6-8) foi bem representada pelo modelo de maneira geral, no entanto seu hidrograma calculado é visualmente menos semelhante ao observado quando comparado aos das demais sub-bacias. Uma explicação para isso pode ser a observação feita por Silva (2005), de que devido ao fato das vazões naturais afluentes a Três Marias terem sido estimadas por técnicas de balanço hídrico, poderão ocorrer diferenças entre os valores calculados e “observados” para essa sub-bacia, que se devem aos erros provenientes da estimativa das vazões consideradas como observadas.

As curvas de permanência apresentadas na Figura 6-10, responsáveis por indicar com que frequência uma vazão de certa magnitude é igualada ou excedida durante o período de registro de vazões, mostram como o modelo representou muito bem as vazões das quatro sub-bacias, apresentando uma pequena superestimação das vazões mais baixas, entre 5% e 50% de permanência aproximadamente.

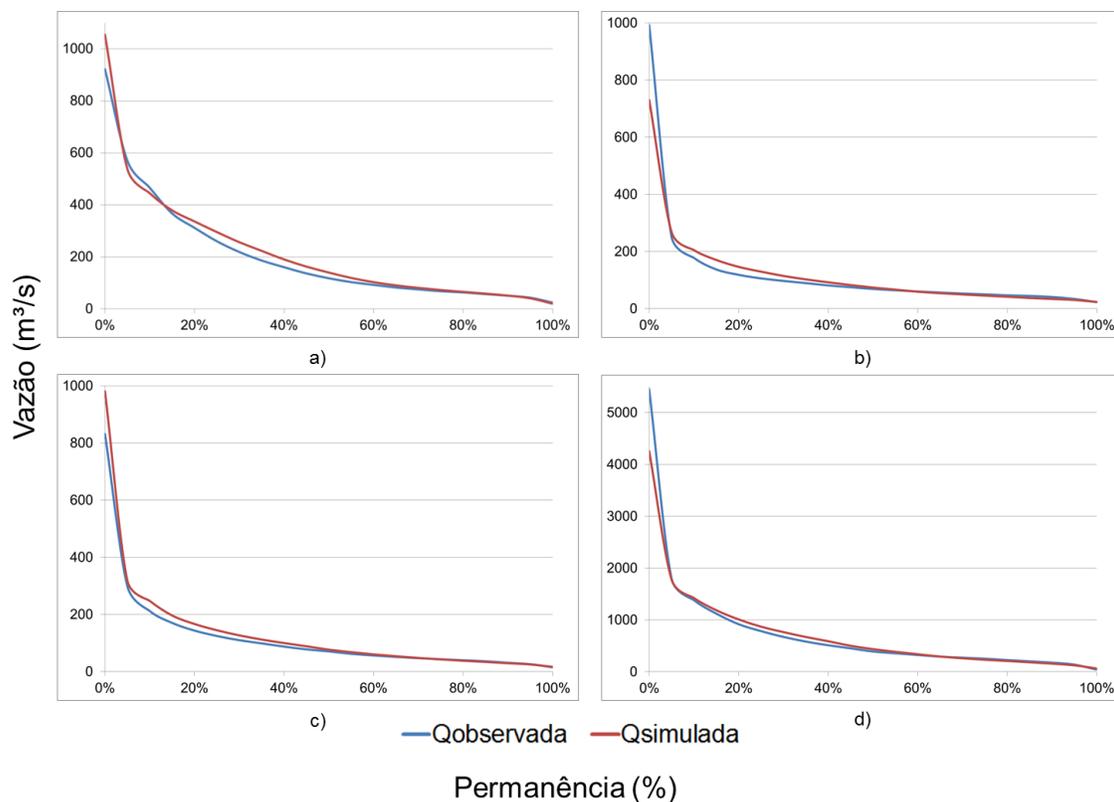


Figura 6-10: Curvas de Permanência das vazões diárias das sub-bacias Porto das Andorinhas (a), Velho da Taipa (b), Ponte da Taquara (c) e UHE Três Marias (d) (Calibração).

Na Figura 6-11, que apresenta a dispersão entre os dados calculados e os observados, é possível perceber que nas quatro sub-bacias, para a maioria das vazões, não existe uma tendência de super/subestimação. No entanto, especialmente nas bacias Ponte da Taquara (c) e UHE Três Marias (d), é possível detectar uma tendência de subestimação das vazões mais elevadas. Porém, isto é algo normal, e no caso deste estudo não irá interferir nos resultados visto que as comparações entre as vazões do presente e do futuro serão feitas apenas entre resultados simulados pelo modelo e não com as vazões observadas.

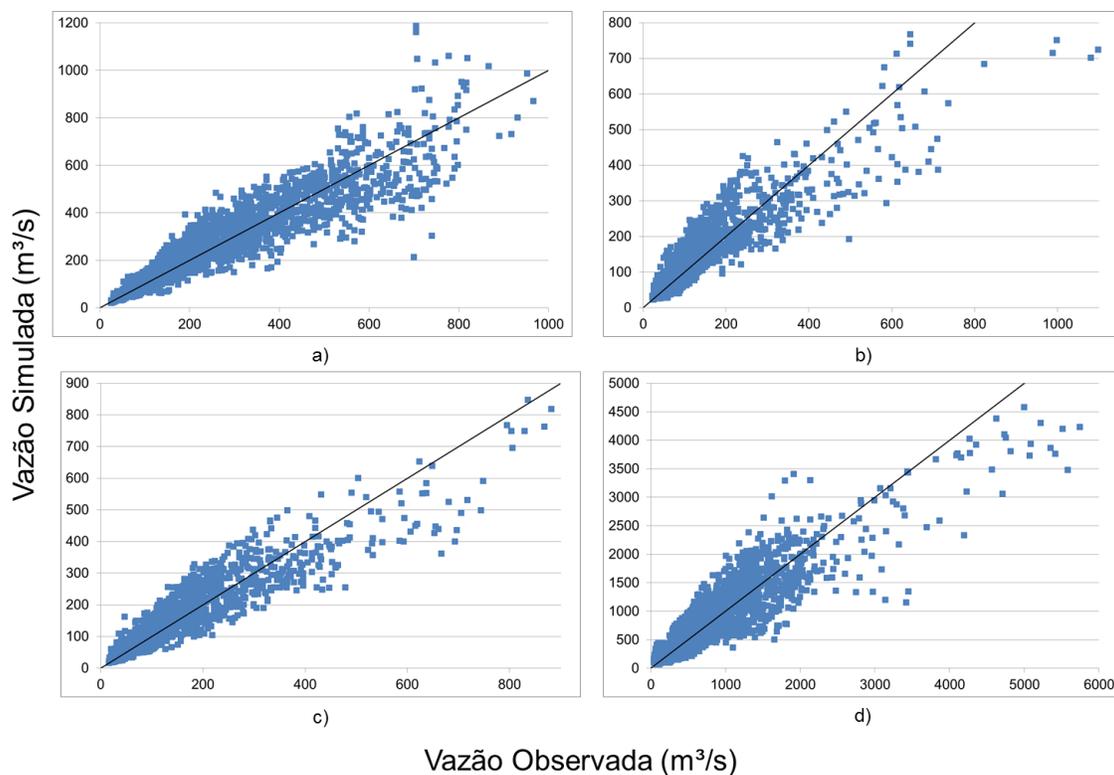


Figura 6-11: Dispersão entre as vazões diárias calculadas e observadas para o período de calibração para as sub-bacias Porto das Andorinhas (a), Velho da Taipa (b), Ponte da Taquara (c) e UHE Três Marias (d) (Calibração).

Por fim, ao analisar as curvas apresentadas na Figura 6-12 é possível perceber que o modelo representou adequadamente a sazonalidade de todas as sub-bacias. No entanto, a calibração resultou em uma pequena superestimação das vazões médias dos meses do início do ano. Porém, como o objetivo do estudo é a projeção de vazões para o futuro e este processo já apresenta várias incertezas, o refinamento da calibração colaboraria muito pouco na melhora dos resultados finais, sendo um gasto computacional e de tempo desnecessário.

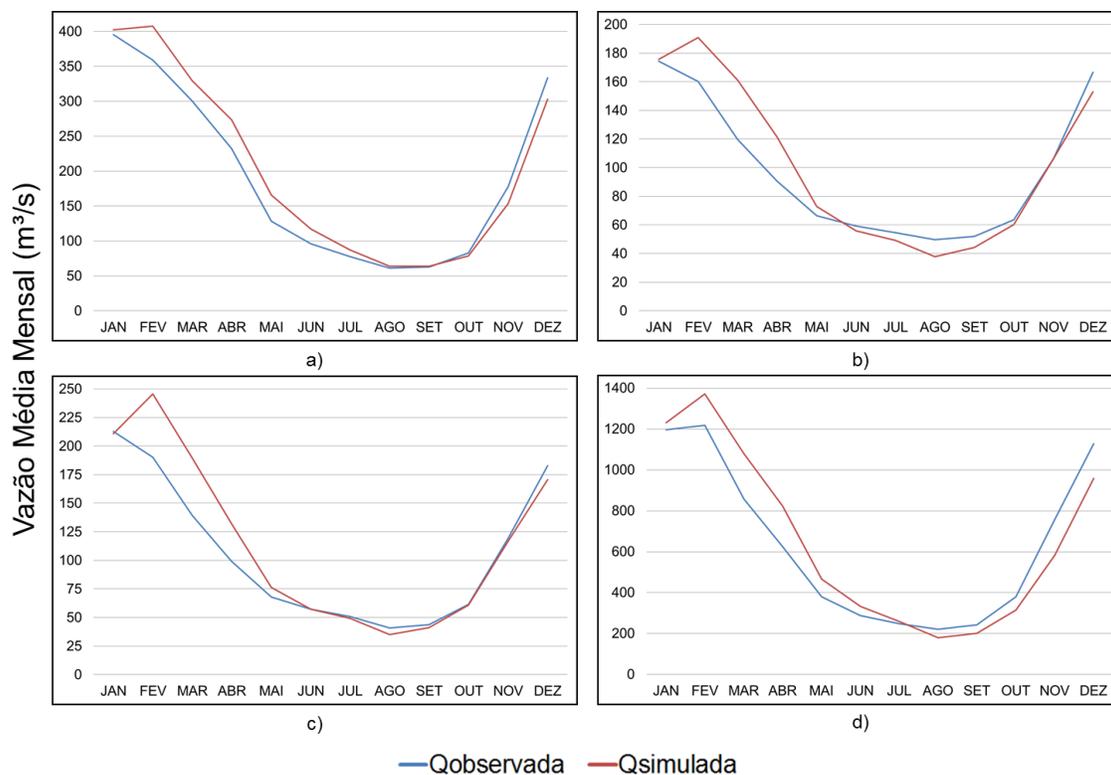


Figura 6-12: Vazões Médias Mensais das sub-bacias Porto das Andorinhas (a), Velho da Taipa (b), Ponte da Taquara (c) e UHE Três Marias (d) (Calibração).

6.2.2. Verificação

A Tabela 6-4 apresenta os valores encontrados para as funções objetivo na etapa de verificação do modelo hidrológico. Essa etapa é necessária para a verificação da capacidade do MGB-IPH em simular vazões de períodos diferentes daquele para o qual foi calibrado. De maneira geral, as vazões continuam sendo bem representadas pelo modelo, apesar da piora na maioria das funções objetivo. Destaque para a sub-bacia Ponte da Taquara que teve todas as suas funções melhoradas para o período de 1990 a 1999. Nas demais sub-bacias as funções NS e NS_{Log} sofreram pequenas reduções, com exceção do NS_{Log} para a sub-bacia Porto das Andorinhas que teve uma pequena melhora. Já as funções de erro de volume (ΔV) foram consideravelmente afetadas, no entanto, continuam apresentando valores aceitáveis para esse tipo de estudo.

Tabela 6-4: Funções objetivo obtidas no processo de verificação para o período de 1990 a 1999.

Sub-bacia	Posto Fluviométrico	Rio	NS	NS_{Log}	ΔV (%)
01	Porto das Andorinhas	São Francisco	0,817	0,925	11,688
02	Velho da Taipa	Pará	0,810	0,770	16,742
03	Ponte da Taquara	Paraopeba	0,814	0,825	-2,929
04	UHE Três Marias	São Francisco	0,858	0,872	12,050

As Figura 6-13, Figura 6-14, Figura 6-15 e Figura 6-16 apresentam as comparações dos hidrogramas calculados e observados para todo o período de verificação. Já a Figura 6-17 mostra apenas um período de três anos (1990-1992) para melhor visualização dos detalhes. Analisando os hidrogramas percebe-se que eles continuam sendo bem representados pelo modelo. Na Figura 6-13, observa-se que a sub-bacia Porto das Andorinhas, apesar do bom comportamento geral do hidrograma, novamente apresenta superestimação da maioria dos picos de grandes cheias. Já na Figura 6-14 ocorre o contrário, o modelo não alcança a maioria dos picos mais altos de vazão da sub-bacia Velho da Taipa e ao contrário do período de calibração, as vazões de estiagem calculadas são de maneira geral um pouco mais altas do que as observadas. No caso do posto Ponte da Taquara (Figura 6-15) as vazões dos picos das grandes cheias também não são alcançadas, mas de maneira menos expressiva do que as vazões do posto do Velho da Taipa e as vazões mais baixas são em alguns anos levemente subestimadas. Por fim, a sub-bacia de Três Marias (Figura 6-16) foi bem representada pelo modelo de maneira geral, apresentando pequenas subestimações de alguns picos de cheia e uma superestimação geral das demais vazões que pode ser observada na Figura 6-17(d).

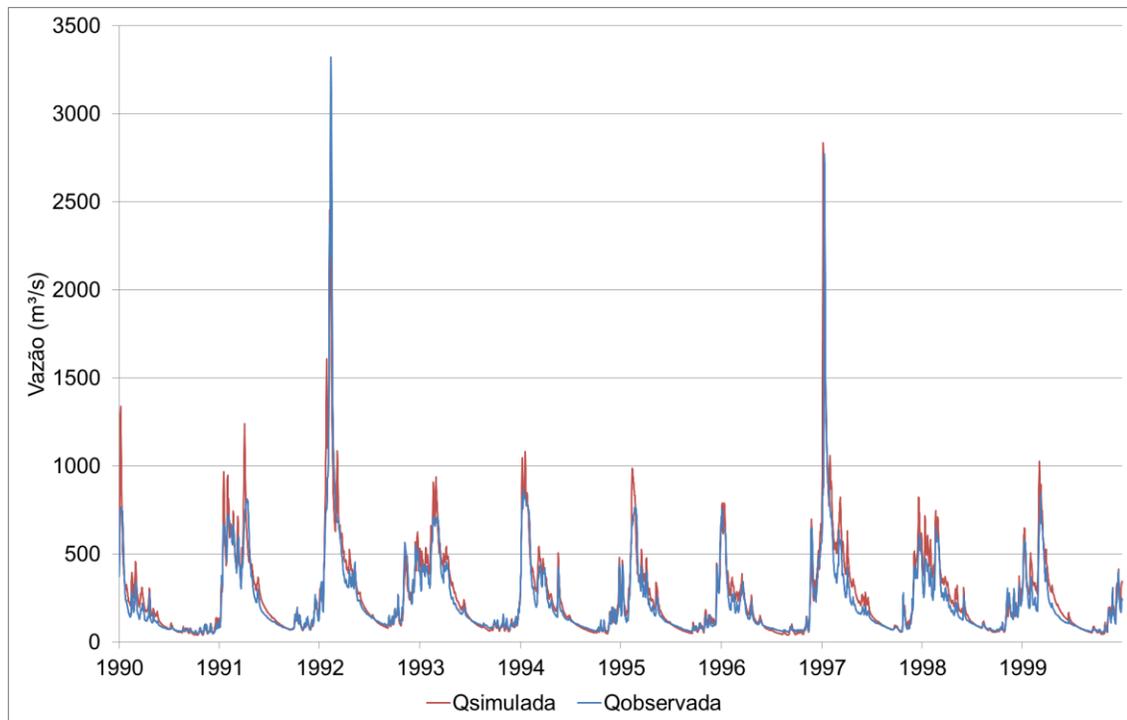


Figura 6-13: Comparação entre os hidrogramas de vazões diárias calculado e observado para a sub-bacia Porto das Andorinhas (Verificação).

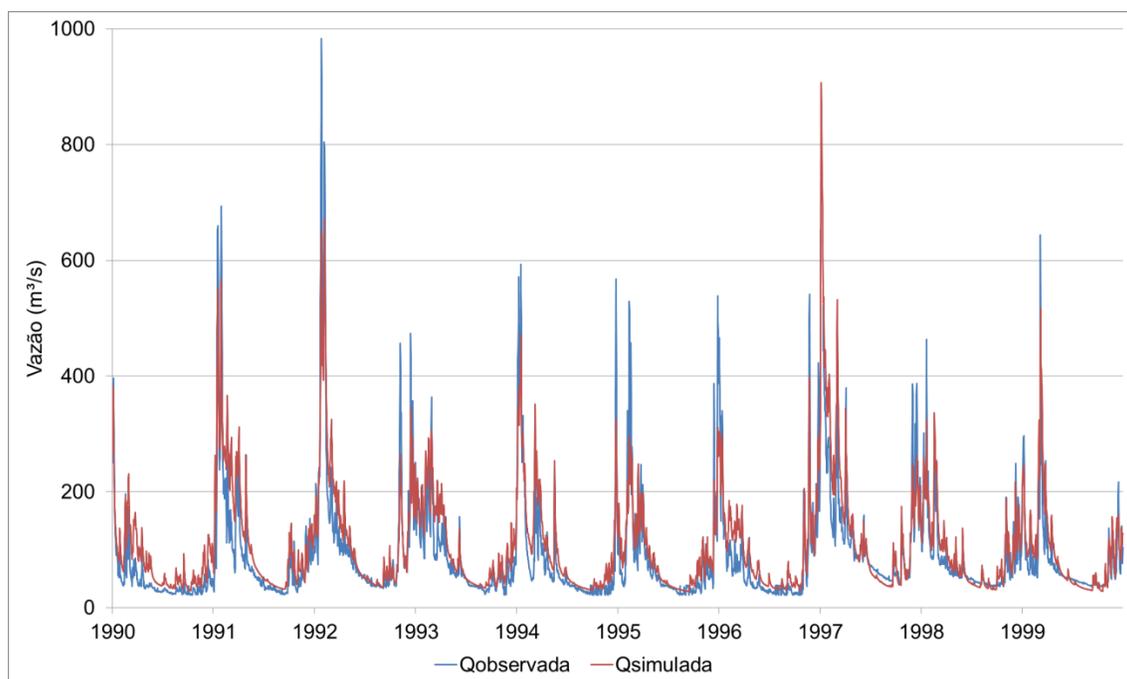


Figura 6-14: Comparação entre os hidrogramas de vazões diárias calculado e observado para a sub-bacia Velho da Taipa (Verificação).

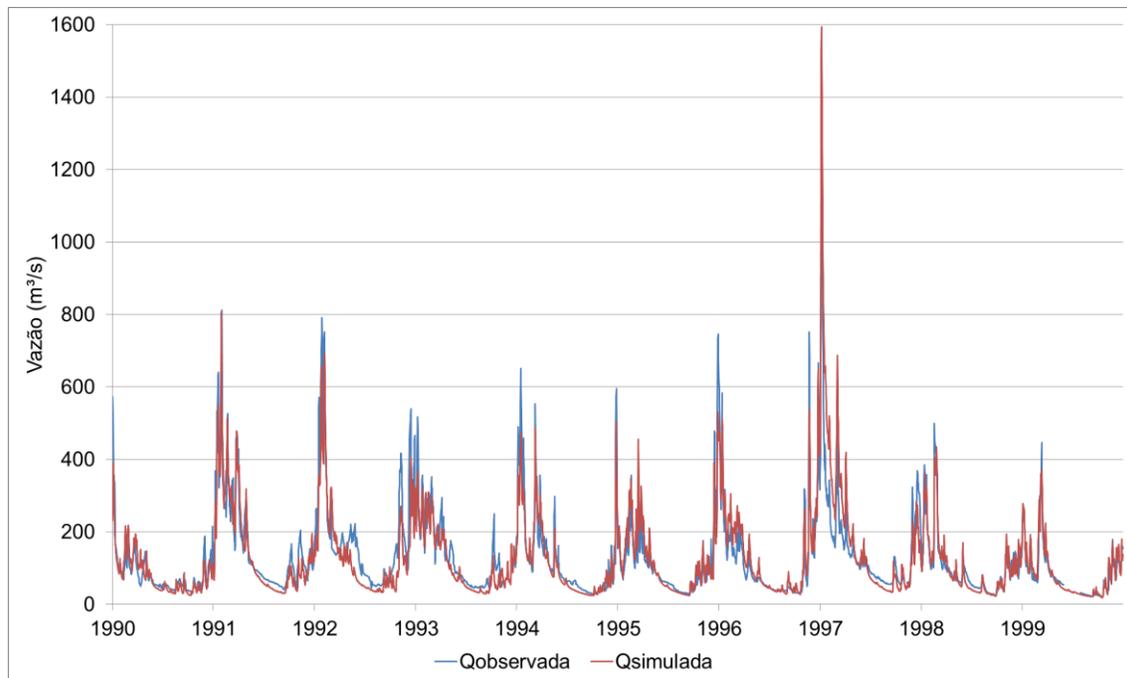


Figura 6-15: Comparação entre os hidrogramas de vazões diárias calculado e observado para a sub-bacia Ponte da Taquara (Verificação).

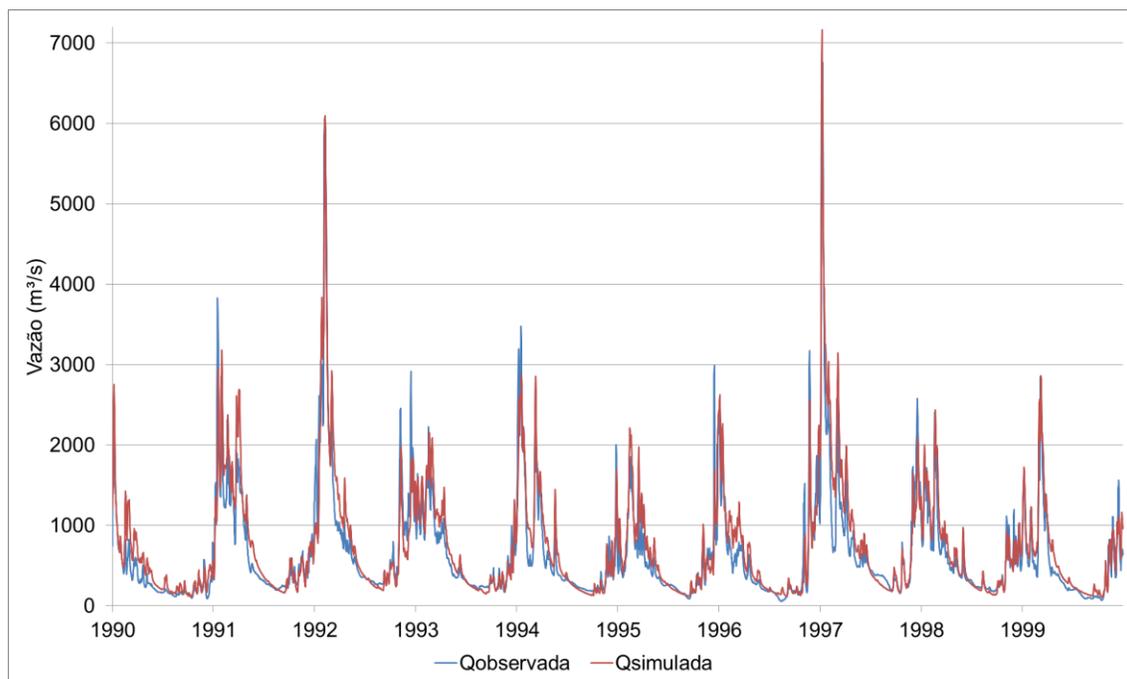


Figura 6-16: Comparação entre os hidrogramas de vazões diárias calculado e observado para a sub-bacia Três Marias (Verificação).

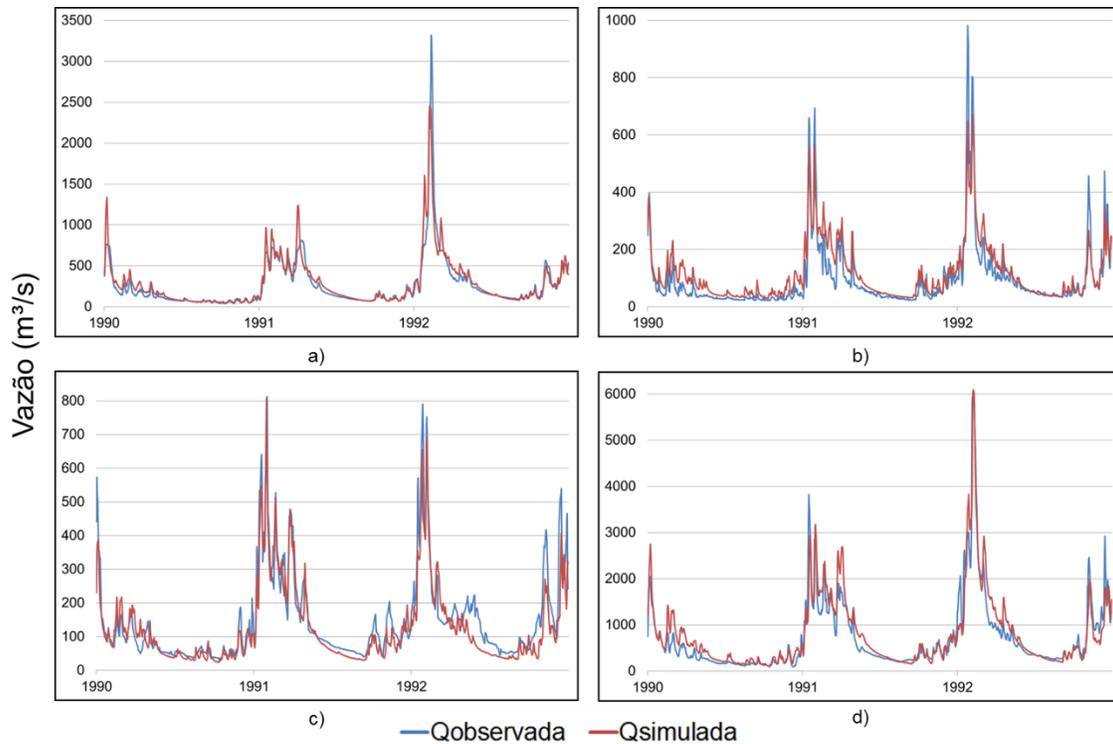


Figura 6-17: Hidrogramas de vazões diárias para as sub-bacias Porto das Andorinhas (a), Velho da Taipa (b), Ponte da Taquara (c) e UHE Três Marias (d) (1970-1972) (Verificação).

Analisando as curvas de permanência apresentadas na Figura 6-18 é possível observar que, com exceção da sub-bacia Ponte da Taquara (c), o modelo tendeu a superestimar as vazões menos frequentes, ou seja, mais altas (de 5% a 50% aproximadamente). No entanto, essa diferença não é muito elevada e o modelo representa de maneira adequada praticamente todas as vazões, apresentando problemas apenas na simulação de algumas das vazões de cheias extremas.

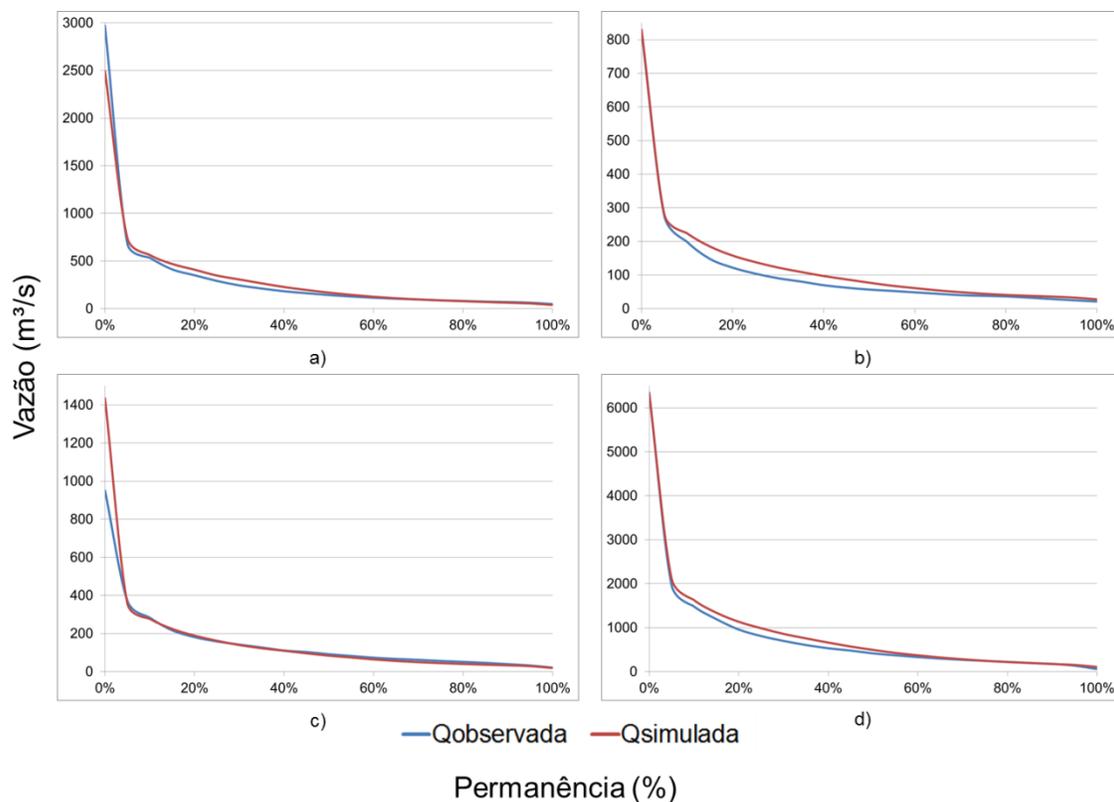


Figura 6-18: Curvas de Permanência das vazões diárias das sub-bacias Porto das Andorinhas (a), Velho da Taipa (b), Ponte da Taquara (c) e UHE Três Marias (d) (Verificação).

Ao analisar a dispersão das vazões diárias (Figura 6-19) é possível observar que nas quatro sub-bacia a grande parte das vazões não apresenta nenhuma tendência a ser subestimadas ou superestimadas. Nas sub-bacias Porto das Andorinhas (a) Velho da Taipa (b) as vazões de cheia extremas tenderam a ser subestimadas pelo modelo. Já na sub-bacia Ponte da Taquara (c) ocorreu o contrário, tendo as vazões de cheia extremas sido superestimadas pelo MGB-IPH, completamente o oposto do que ocorreu no período de calibração. Na UHE Três Marias não é possível definir nenhuma tendência de sub/superestimação, diferente da tendência a subestimação verificada no período da calibração.

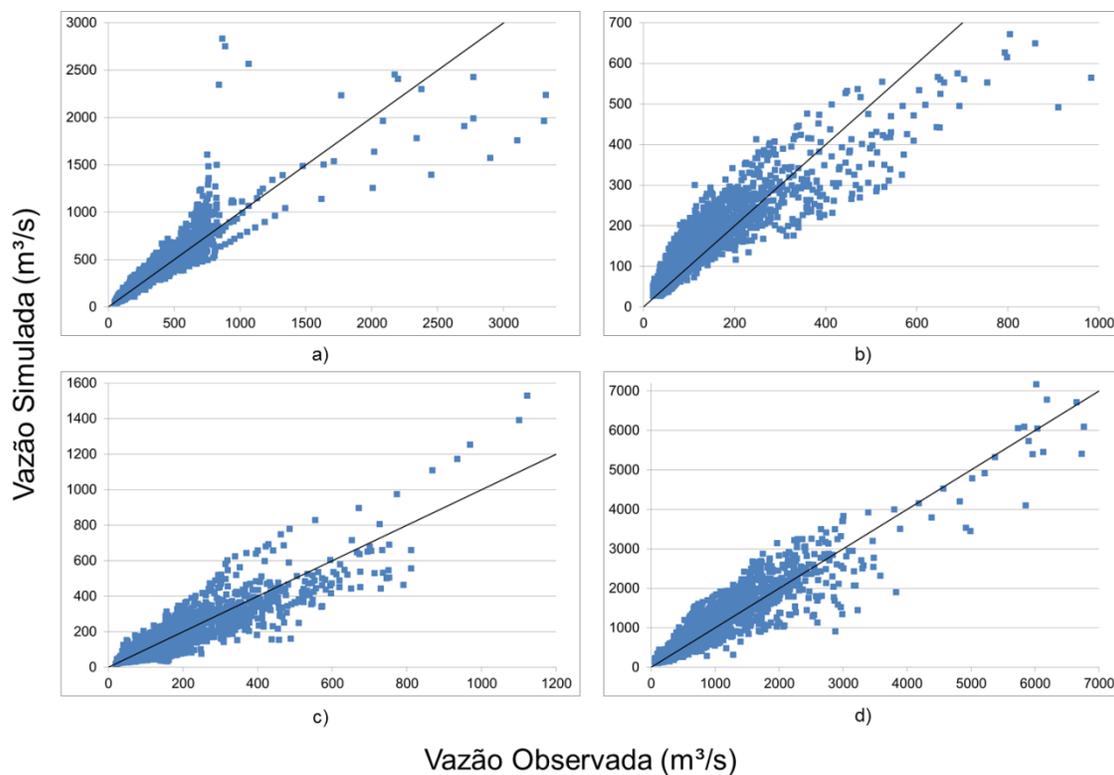


Figura 6-19: Dispersão entre as vazões diárias calculadas e observadas para o período de calibração para as sub-bacias Porto das Andorinhas (a), Velho da Taipa (b), Ponte da Taquara (c) e UHE Três Marias (d) (Verificação).

Por fim, na Figura 6-20 é possível avaliar o comportamento do modelo no período de verificação com relação a manutenção da sazonalidade anual das sub-bacias em estudo. Com relação à sazonalidade todas as bacias se comportaram de maneira adequada, representando bem as subidas e decidas das vazões nas épocas de cheia e estiagem. No entanto, pode ser observado que para os meses do começo do ano o modelo tende a superestimar as vazões médias mensais, da mesma maneira que no período de calibração, porém as diferenças são aceitáveis pelos motivos já apresentados na etapa anterior.

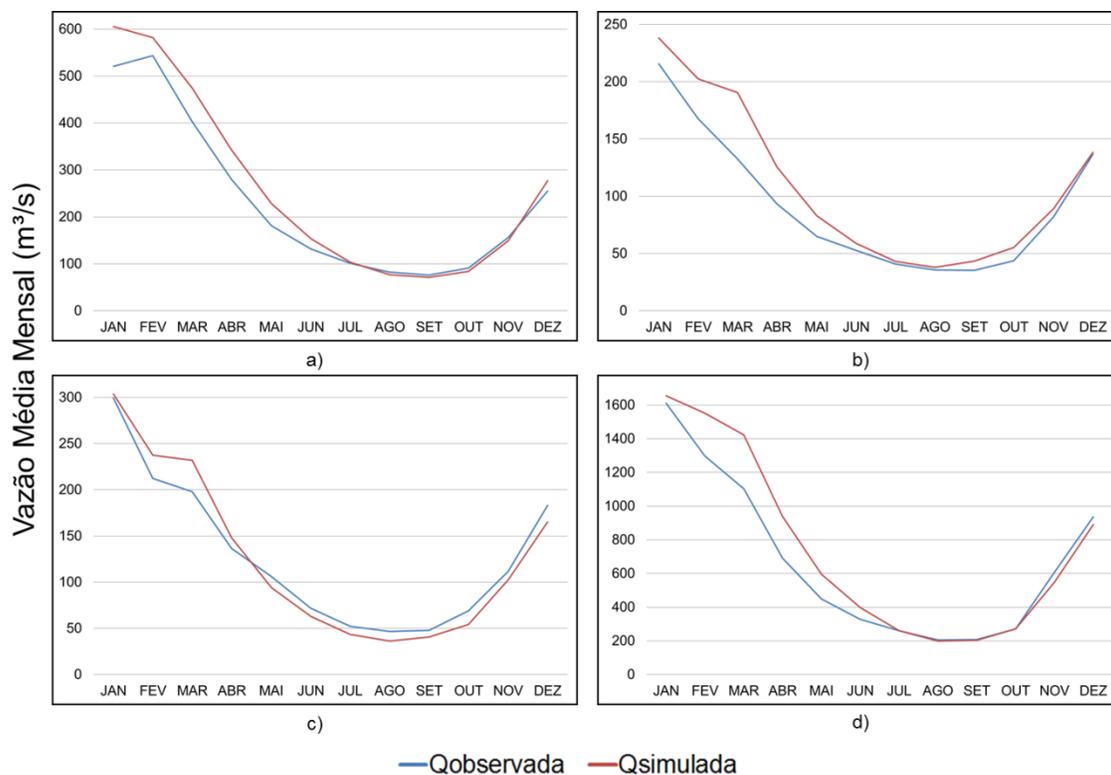


Figura 6-20: Vazões Médias Mensais das sub-bacias Porto das Andorinhas (a), Velho da Taipa (b), Ponte da Taquara (c) e UHE Três Marias (d) (Verificação).

A partir da análise das etapas de calibração e verificação da representação das vazões das bacias em estudo pelo modelo hidrológico MGB-IPH é possível determinar que as vazões calculadas e observadas são suficientemente semelhantes, visto os diversos erros inerentes de um processo de modelagem. Na tentativa de representar o relevo, a hidrografia, o ciclo hidrológico, o tipo e uso do solo e outras características físicas das bacias hidrográficas sem muita informação proveniente de medições, o modelo se apresentou adequado para realização da próxima etapa, que é a projeção de vazões para períodos futuros a partir de projeções de precipitação e outras variáveis climáticas fornecidas pelo modelo climático regional.

6.3. Projeção de Vazões

Primeiramente serão apresentados os resultados das simulações realizadas para o período “Presente” (1961-1990) a partir das projeções climáticas dos modelos regionais Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, com a intenção de comparar as vazões simuladas por ambos modelos com as vazões observadas. Esta etapa do trabalho foi realizada apenas para a UHE Três Marias.

Para os períodos futuros, também simulados apenas para a UHE Três Marias, foram realizadas 12 projeções, sendo para cada modelo climático regional (Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5) realizadas simulações para três períodos futuros (FUT1 – 2011 a 2040, FUT2 – 2041 a 2070 e FUT3 – 2071 a 2100) para cada um dos dois cenários do IPCC-AR5 (RCP4.5 e RCP8.5). Essas projeções serão comparadas com as vazões calculadas pelo MGB-IPH alimentado pelos modelos climáticos para o período “Presente”.

Como os períodos analisados são muito extensos e hidrogramas diários gerados a partir dos resultados seriam muito difíceis de analisar e interpretar, optou-se avaliar as vazões de referência $Q_{95\%}$, $Q_{50\%}$ e $Q_{5\%}$, onde $Q_{x\%}$ indica que as vazões são maiores ou iguais ao valor obtido durante $x\%$ do tempo.

6.3.1. Projeções do período “Presente”

Na Figura 6-21 podemos observar que ambos os modelos, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, simularam adequadamente a sazonalidade da UHE Três Marias. No entanto ambos superestimaram as vazões médias dos meses do início do ano. É importante ressaltar que tanto na calibração quanto na verificação da sub-bacia Três Marias o modelo hidrológico tendeu a superestimar as vazões (Figura 6-12 e Figura 6-20), portanto, pode ser que a diferença entre as projeções para o presente e as vazões observadas seja menor do que a apresentada na Figura 6-21. Segundo Chou *et al.* (2014a), para a região de estudo, o modelo Eta-MIROC5 tende a superestimar as precipitações no verão, o que é coerente com a tendência de superestimação das vazões neste estudo. No entanto, o mesmo estudo verifica que o modelo Eta-HadGEM2-ES tende a subestimar as precipitações da região, ao contrário do que ocorreu aqui.

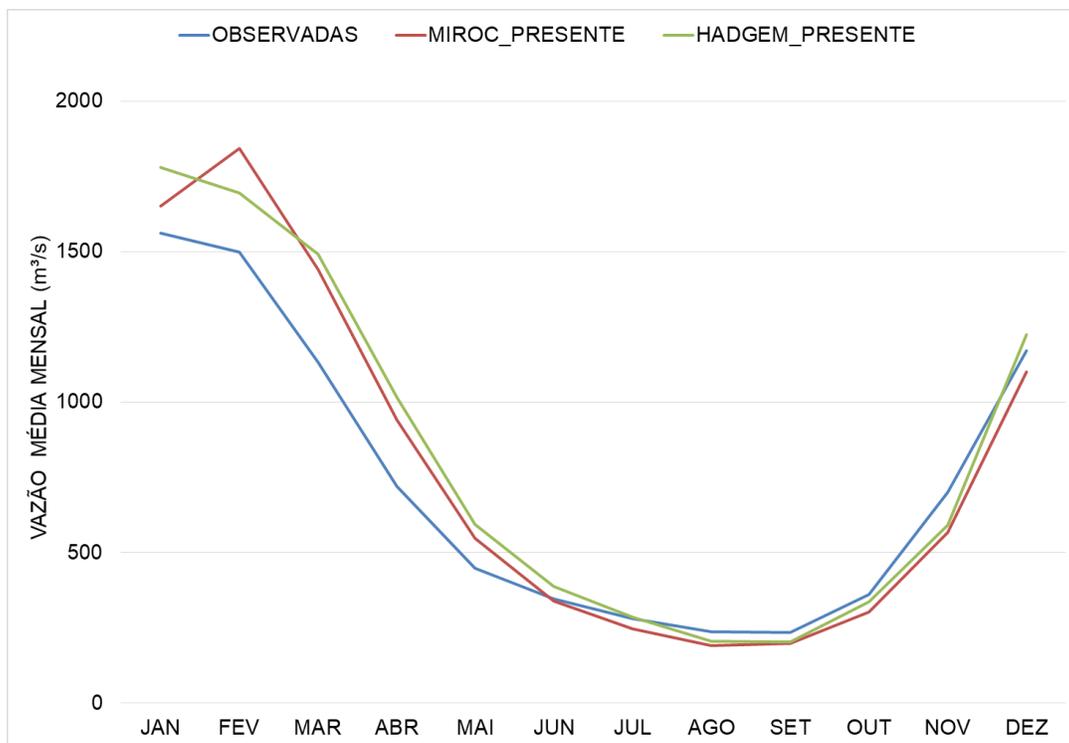


Figura 6-21: Vazões médias mensais observadas e calculadas (Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5) para o período “Presente”.

Nas curvas de permanência apresentadas nas Figura 6-22 e Figura 6-23 é possível observar a tendência dos modelos climáticos de superestimar as vazões mais altas (menos frequentes) e subestimar as vazões mais baixas (mais frequentes), sendo a diferença entre vazões calculadas e observadas muito mais significativa para o modelo Eta-HadGEM2-ES, cerca de 45% e -58% respectivamente (Tabela 6-5), do que para o modelo Eta-MIROC5. As vazões com permanência em 50% do tempo são bem representadas por ambos os modelos, no entanto, as demais vazões foram melhores representadas pelo Eta-MIROC5.

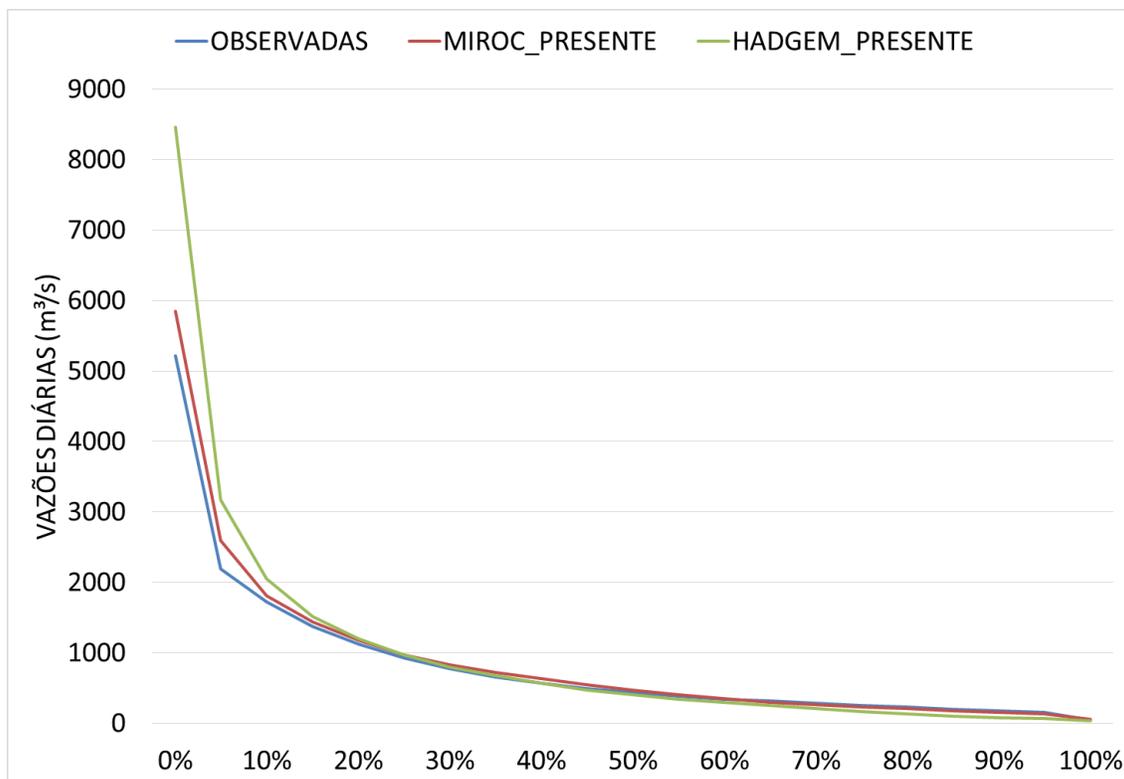


Figura 6-22: Curva de Permanência das vazões diárias observadas e calculadas (Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5) para o período "Presente".

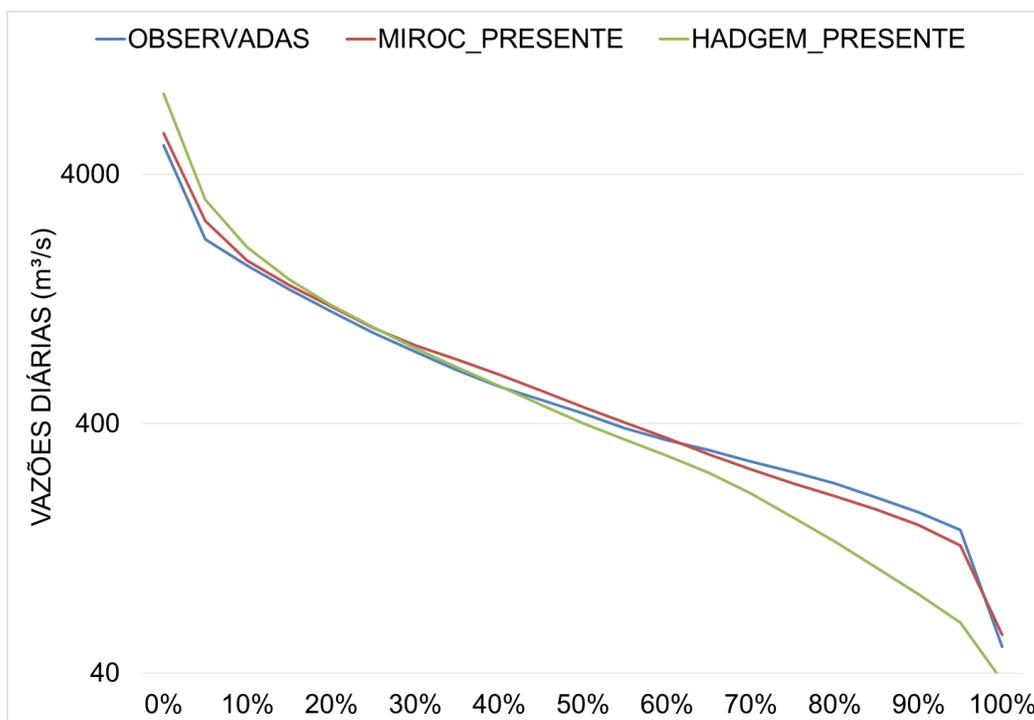


Figura 6-23: Curva de Permanência em escala logarítmica das vazões diárias observadas e calculadas (Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5) para o período "Presente".

Tabela 6-5: Vazões de referência observadas e calculadas (Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5) para o período “Presente”.

Vazão de Referência	Observadas	HadGEM2-ES	OBS x HadGEM	MIROC5	OBS x MIROC
Q ₅	2193,10	3173,43	44,7%	2598,25	18,5%
Q ₅₀	439,50	403,30	-8,2%	466,86	6,2%
Q ₉₅	150,00	63,80	-57,5%	129,99	-13,3%

6.3.2. Projeções dos períodos “Futuros”

Para as vazões mais baixas (Q₉₅), percebemos através da Figura 6-24 que a tendência é que elas diminuam, quando comparadas as vazões do período “Presente”, mesmo que em alguns casos ela apresente um aumento entre períodos futuros, que é o caso do Eta-MIROC5 no período “FUT2” do cenário RCP4.5 e do Eta-HadGEM2-ES nos períodos “FUT2” do cenário do RCP8.5 e “FUT3” do cenário RCP4.5. Pelo gráfico também é possível perceber que o modelo Eta-HadGEM2-ES reduz as vazões de maneira um pouco mais expressiva do que o Eta-MIROC5 tanto quando se foca no valor final de vazão, quanto quando essa diminuição é comparada a projeção do período “Presente” do próprio modelo. As diferenças em relação aos cenários de emissões ficam mais evidentes no modelo Eta-HadGEM2-ES, onde o RCP8.5 apresenta vazões bem menores para o períodos “FUT1” e “FUT3”.

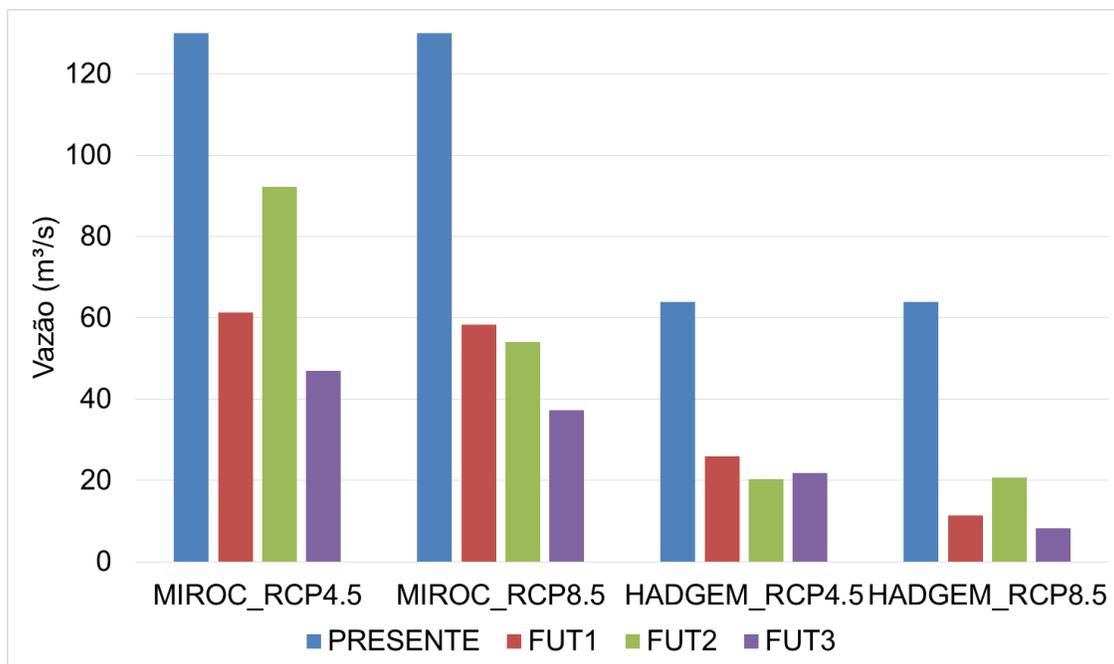


Figura 6-24: Comparação entre as Q_{95} calculadas para o período “Presente” e para os períodos “Futuro1”, “Futuro2” e “Futuro3” para os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

Com relação as vazões com permanência de 50% do tempo (Figura 6-25) a tendência geral continua sendo a redução das vazões, sendo novamente o modelo Eta-HadGEM2-ES aquele que apresenta reduções mais consideráveis quando as vazões dos períodos futuros são comparadas com as do período “Presente” e também com relação aos valores finais. Comparando as reduções das Q_{95} com as Q_{50} é possível perceber que o impacto do Eta-MIROC5 é bastante reduzido para a segunda, já no caso do Eta-HadGEM2-ES o impacto reduz bem menos. A previsão do Eta-HadGEM2-ES para o cenário RCP8.5 é a mais pessimista de todas, reduzindo vazões que antes eram na faixa de 400 m³/s para pouco mais de 75 m³/s no período de 2071-2100. Neste caso é possível perceber a nítida diferença entre as projeções para os diferentes cenários, sendo o RCP8.5 visivelmente mais pessimista.

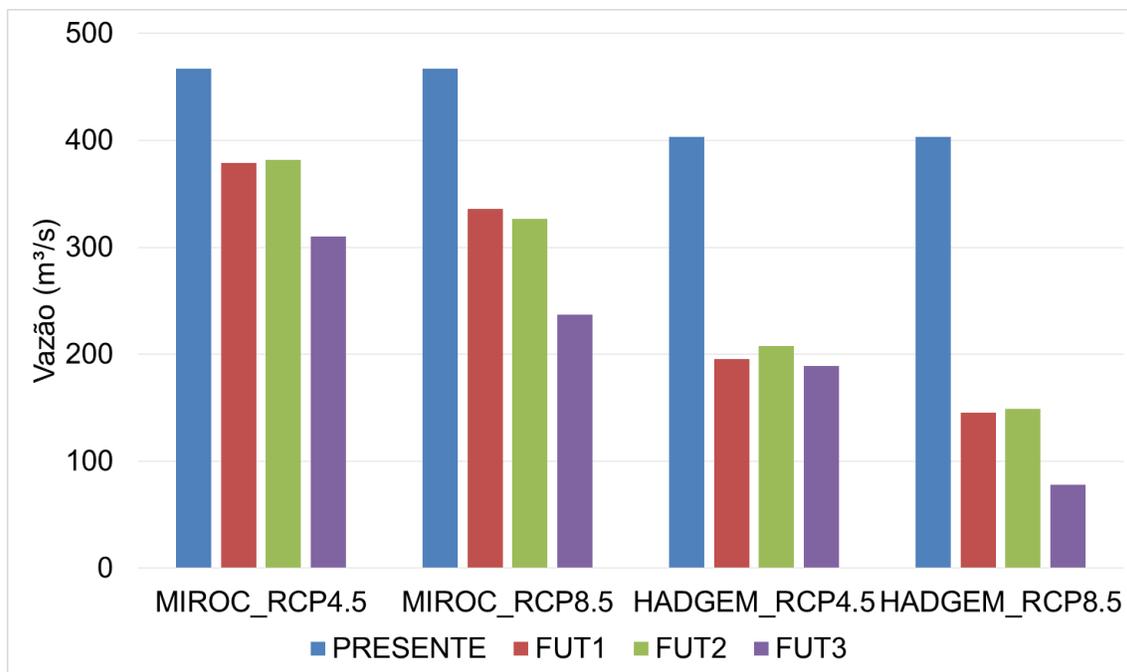


Figura 6-25: Comparação entre as Q_{50} calculadas para o período “Presente” e para os períodos “Futuro1”, “Futuro2” e “Futuro3” para os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

Por fim, para as $Q_{5\%}$ (Figura 6-26), que são aquelas vazões mais altas e menos frequentes, ambos modelos apresentam reduções muito menores do que as apresentadas pelas demais vazões de referência ($Q_{95\%}$, $Q_{50\%}$). O modelo Eta-MIROC5 apresenta reduções bem menos significativas com relação ao período “Presente” quando comparado ao Eta-HadGEM2-ES, e as diferenças entre os cenários RCP4.5 e RCP8.5 são pouco expressivas. No caso do Eta-HadGEM2-ES a diferença entre os cenários é facilmente percebida através do gráfico. Quando os modelos Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES são comparados com relação os valores finais de vazão, as vazões do segundo no cenário RCP8.5 são as mais pessimistas, chegando a uma redução de quase 50% no período de 2071-2099.

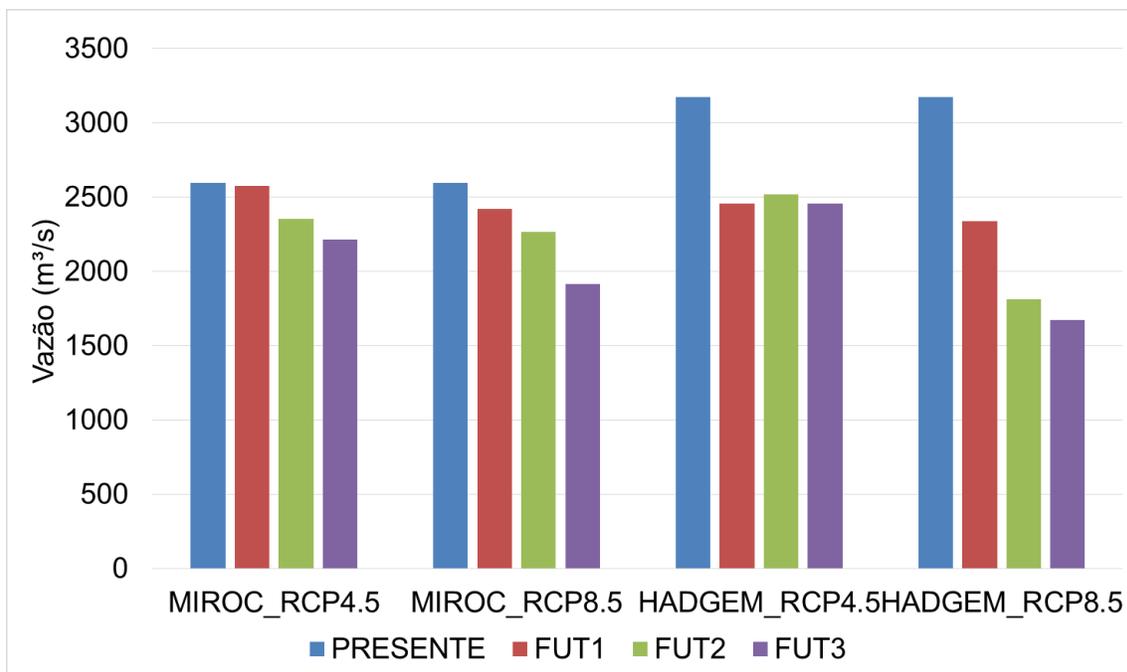


Figura 6-26: Comparação entre as Q_5 calculadas para o período “Presente” e para os períodos “Futuro1”, “Futuro2” e “Futuro3” para os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

Na Tabela 6-6 é possível observar as diferenças percentuais entre as vazões simuladas para o “Presente” e as vazões projetadas para os três períodos futuros do estudo pelos modelos Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES. No caso do Eta-MIROC5 as vazões mais baixas e frequentes ($Q_{95\%}$) são as mais afetadas independente do período e do cenário de emissão, passando de 50% de redução em praticamente todas as simulações. Para as $Q_{50\%}$ também são observadas reduções em todas as simulações, no entanto o cenário RCP8.5 é consideravelmente mais pessimista. No caso das vazões de permanência de 5% continua ocorrendo a redução das vazões, porém de maneira menos expressiva.

Para o modelo Eta-HadGEM2-ES a redução das $Q_{95\%}$ e $Q_{50\%}$ são ambas consideráveis, sendo as $Q_{50\%}$ pouco menos pessimistas. Nos dois casos é possível observar que o cenário RCP8.5 é mais pessimista que o RCP4.5, como esperado. Com relação as $Q_{5\%}$ as vazões também são reduzidas, porém elas são menos expressivas quando comparadas as demais vazões de referência, mesmo assim, continuam sendo valores consideráveis. De maneira geral, ambos modelos apresentam maior redução nas vazões mais frequentes ($Q_{95\%}$), sendo que o Eta-HadGEM2-ES apresenta também uma redução semelhante nas vazões de permanência de 50%. Já as vazões $Q_{5\%}$ também sofrem redução, mas essa é muito mais significativa par ao modelo Eta-HadGEM2-ES.

Tabela 6-6: Comparação entre as vazões de referência projetadas para os períodos futuros (FUT1, FUT2 e FUT3) e o período “Presente” para os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

Série de Vazões	Q95 (m ³ /s)	Q50 (m ³ /s)	Q5 (m ³ /s)	Q95 (%)	Q50 (%)	Q5(%)
MIROC_Presente	129,99	466,86	2598,25	-	-	-
MIROC_RCP4.5_FUT1	61,32	379,20	2577,04	-52,8%	-18,8%	-0,8%
MIROC_RCP4.5_FUT2	92,22	381,42	2352,38	-29,1%	-18,3%	-9,5%
MIROC_RCP4.5_FUT3	46,98	309,83	2213,74	-63,9%	-33,6%	-14,8%
MIROC_RCP8.5_FUT1	58,31	335,93	2418,87	-55,1%	-28,0%	-6,9%
MIROC_RCP8.5_FUT2	53,94	326,89	2268,20	-58,5%	-30,0%	-12,7%
MIROC_RCP8.5_FUT3	37,21	237,07	1915,81	-71,4%	-49,2%	-26,3%
HadGEM_Presente	63,80	403,30	3173,43	-	-	-
HadGEM_RCP4.5_FUT1	25,82	195,34	2455,22	-59,5%	-51,6%	-22,6%
HadGEM_RCP4.5_FUT2	20,23	207,54	2520,14	-68,3%	-48,5%	-20,6%
HadGEM_RCP4.5_FUT3	21,86	188,75	2458,66	-65,7%	-53,2%	-22,5%
HadGEM_RCP8.5_FUT1	11,36	145,27	2338,87	-82,2%	-64,0%	-26,3%
HadGEM_RCP8.5_FUT2	20,69	148,60	1813,97	-67,6%	-63,2%	-42,8%
HadGEM_RCP8.5_FUT3	8,13	77,76	1673,67	-87,3%	-80,7%	-47,3%

É importante ressaltar que, como na seção 6.3.1 ficou evidente que ambos os modelos climáticos regionais tendem a superestimar as vazões mais altas (Q_{5%}) e subestimar as vazões mais baixas (Q_{95%}), é provável que as projeções das Q_{5%} estejam sendo mais otimistas do que realmente podem ser, tendendo para uma maior redução das vazões; e as Q_{95%} mais pessimistas do que poderiam ser, devendo ser na verdade um pouco maiores. No entanto, como o objetivo deste trabalho não é a determinação exata das vazões afluentes ao reservatório e sim uma estimativa que possa ser utilizada no planejamento do setor elétrico para auxiliar a tomada de decisões, as projeções podem ser consideradas adequadas.

A Figura 6-27 apresenta vazões observadas afluentes a UHE Três Marias para um período relativamente recente, 1999-2017, onde pode ser observada uma visível mudança na média das vazões quando se compara o período de 1999-2011 com o de 2011-2017 (ONS, 2018a). A vazão média chegou a reduzir quase 40% nesse período, diminuindo de cerca de 630 m³/s para 395 m³/s. Essa situação reforça um importante resultado que vem

sendo mostrado pelos estudos que avaliam os impactos das mudanças climáticas nas séries hidrológicas: o fato de que as tendências indicam a desconstrução do fenômeno de estacionariedade das mesmas, ou seja, a premissa de que as estatísticas das séries observadas são representativas do futuro não poderá mais ser aceita. Essa não-estacionariedade irá afetar significativamente a gestão dos recursos hídricos e o planejamento e operação das infraestruturas hídricas de atendimento ao usos múltiplos (ANA, 2015), inclusive a geração hidroelétrica, que é um setor que tem-se baseado fortemente nessa premissa. Essa situação é uma das principais justificativas para o desenvolvimento de estudos onde se tentam avaliar essas alterações, além de seus impactos e medidas de mitigação.

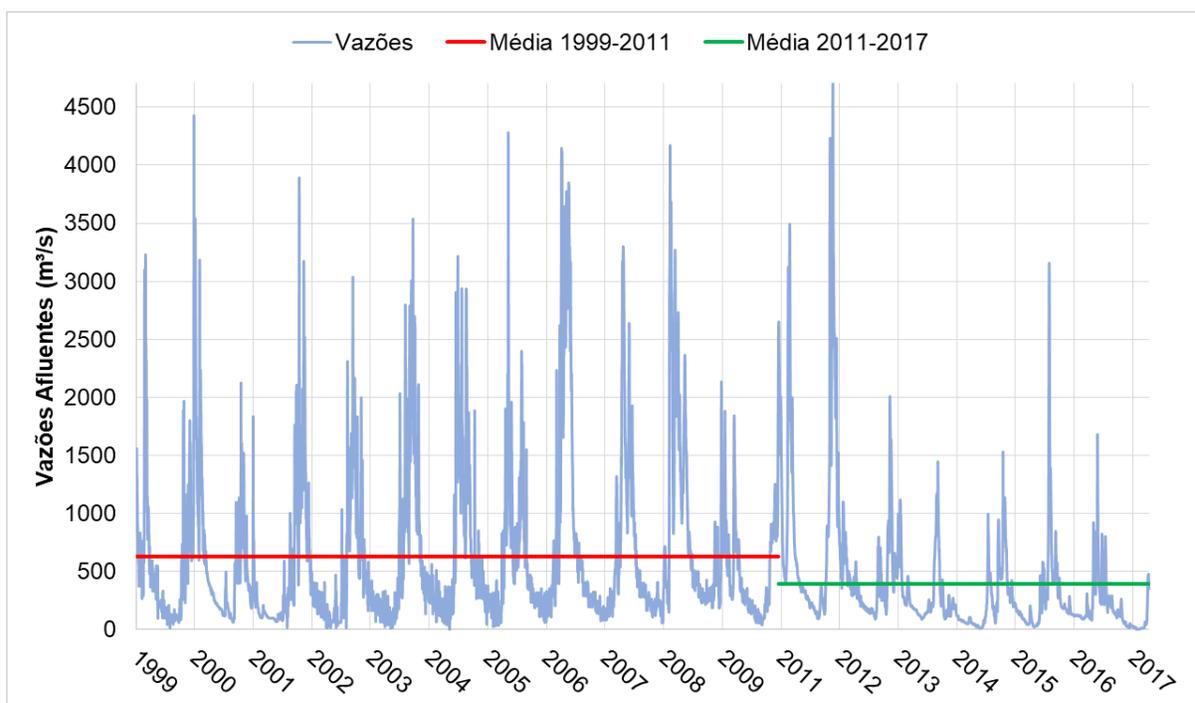


Figura 6-27: Vazões diárias observadas afluentes a UHE Três Marias.

Fonte: ONS, 2018a.

Em estudo semelhante, Santana (2013) avaliou as variações nas vazões futuras da bacia do rio São Francisco a partir dos cenários de mudanças climáticas utilizando o mesmo modelo climático que este estudo (porém em um versão diferente) e o mesmo modelo hidrológico. Para a usina de Três Marias os resultados encontrados mostram que a vazão média da sub-bacia tende a se manter constante ou apresentar uma pequena queda ao longo do períodos futuros. No caso das vazões de referência ($Q_{5\%}$, $Q_{50\%}$ e $Q_{95\%}$) a redução apresentada por Santana (2013) mostra-se bem menos pessimista que a obtida neste

estudo, chegando em alguns casos a apresentar até mesmo aumento nas vazões. No entanto, ambos trabalhos coincidem no sentido de que as vazões mais frequentes, quando reduzidas, são as mais afetadas (Tabela 6-7).

Tabela 6-7: Diferenças em termos percentuais, entra as vazões extremas e medianas observadas (MGB) e as projeções futuras para os diferentes membros do modelo Eta. Projeções referentes às vazões afluentes à usina de Três Marias.

Vazão Afluente à Usina de Três Marias	Membro M2			Membro M4		
	2011 a	2041 a	2071 a	2011 a	2041 a	2071 a
	2040	2070	2099	2040	2070	2099
Q _{5%}	+5,3%	+5,8%	+9,7%	+6,2%	-9,4%	-28,6%
Q _{50%}	+6,1%	+3,8%	+5,4%	-1,2%	-17,3%	-29,4%
Q _{95%}	-1,6%	-6,2%	-6,6%	-8,2%	-20,0%	-33,3%

Fonte: SANTANA, 2013.

Em relação ao período de projeção de 2011 a 2040, percebe-se que Santana (2013) encontrou tendências de aumento de vazão para os dois membros simulados em seu estudo (Tabela 6-7). No entanto, as condições climáticas atuais, apresentadas na Figura 6-27, parecem seguir uma tendência mais parecida com a apresentada neste estudo, de diminuição tanto das vazões médias como das vazões de referência analisadas (Tabela 6-6).

É importante chamar atenção para o fato de que no estudo de Santana (2013) as variáveis climáticas alteradas pelas mudanças do clima consideradas, obtidas do modelo Eta como dados de entrada para o MGB-IPH, foram apenas a precipitação e a temperatura. Já no caso deste estudo foram consideradas mais variáveis, como pressão, velocidade do vento, insolação e umidade. Esse fato pode ser um dos motivos que fizeram com que as projeções deste estudo fossem mais pessimistas em relação ao outro. Outra diferença entre os estudos, que pode também ter colaborado nesse efeito, é o fato das análises elaboradas por Santana (2013) terem sido feitas com base nas vazões médias mensais e este estudo ter avaliado as vazões diárias, o que costuma reduzir um pouco os valores.

A equipe de hidrologia do Projeto Estratégico de P&D nº 010/2008 (ANEEL, 2014) realizou um estudo das alterações das vazões no futuro devido as mudanças climáticas também utilizando o modelo climático regional Eta (porém para uma versão e resolução diferente da utilizada neste estudo) e o modelo hidrológico MGB-IPH. O estudo foi realizado para todo o SIN, porém as principais usinas de cada bacia hidrográfica tiveram destaque

em algumas análises, como é o caso de Três Marias. A partir da Figura 6-28 percebe-se que as projeções indicam anomalias negativas expressivas tanto nas vazões médias quanto nas $Q_{95\%}$. Destacam-se as reduções nas vazões dos membros MID e HIGH do Eta40, que no período de 2071 a 2099 alcançam reduções de mais de 50%. As reduções desses dois cenários são as que mais se aproximam deste estudo.

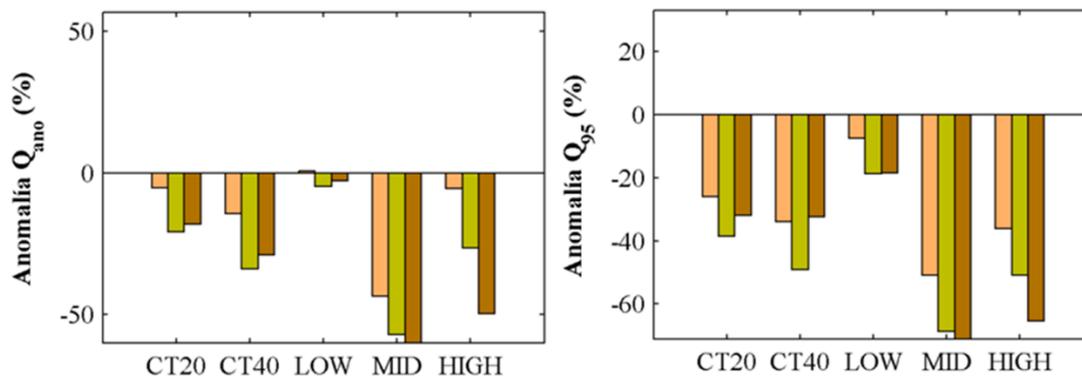


Figura 6-28: Anomalias das vazões na bacia afluente a usina de Três Marias para o modelo Eta.

Fonte: ANEEL, 2014.

É interessante ressaltar que o mesmo trabalho também analisa projeções de vazão desenvolvidas a partir de cinco modelos globais (GFCM, HADCM, PEHM, RCG e NCCC) e que estes apresentam tendências de aumento das vazões para praticamente todos os modelos, tanto para as vazões médias quanto para a $Q_{95\%}$ (Figura 6-29).

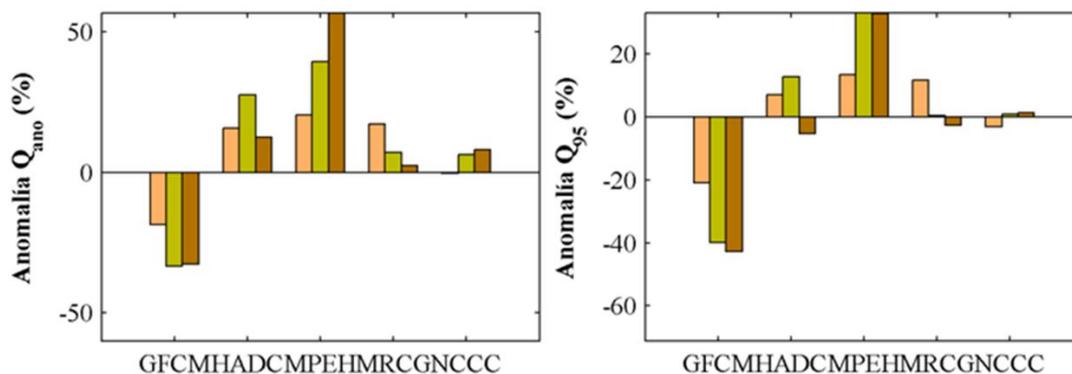


Figura 6-29: Anomalias nas vazões da bacia afluente a usina de Três Marias para os modelos globais.

Fonte: ANEEL, 2014.

No estudo desenvolvido por Lucena (2010) as projeções climáticas são provenientes do modelo global HadCM3, para os cenários A2 e B2 do IPCC (menos e mais pessimista,

respectivamente), onde foi aplicado o modelo de *downscaling* dinâmico PRECIS (Providing Regional Climate for Impact Studies) com resolução espacial de 50 km. A transformação chuva-vazão foi realizada através da combinação de uma análise hidrológica do balanço hídrico com uma análise estatística responsável por incorporar os possíveis efeitos das mudanças climáticas globais sobre a variabilidade sazonal das vazões.

Lucena (2010) avalia as alterações nas vazões a partir de um índice que reflete a evolução do excedente hídrico anual das bacias em estudo, que é aplicado posteriormente na média histórica de vazão natural afluente ao reservatório gerando uma série de vazão anual para as condições climáticas dos cenários A2 e B2. A Figura 6-30 mostra a variação desse índice no tempo, que, apesar de não poder ser comparado diretamente com os resultados deste estudo, evidenciam a diminuição das vazões com o passar do tempo em relação ao período base.

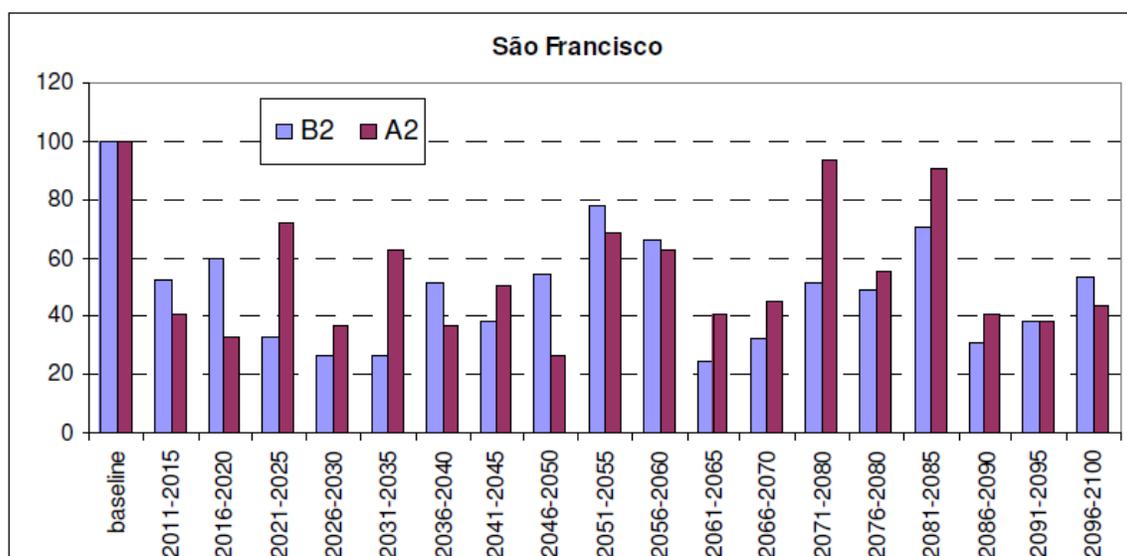


Figura 6-30: Impacto sobre a vazão anual estimada pelo excedente hídrico. *Baseline* = 100.

Fonte: LUCENA, 2010.

Por fim, vale a pena chamar a atenção para o estudo realizado por Tiezzi (2015), onde foi feita uma análise das variações das vazões de todo o SIN devido as mudanças climáticas utilizando o modelo climático Eta em uma versão mais antiga do que a utilizada neste estudo e uma modelagem hidrológica conjunta com dois modelos, o SMAP e o MEL. Os resultados encontrados por Tiezzi (2015) são o oposto dos encontrados neste estudo.

Segundo ele, a tendência para a bacia de Três Marias é de aumento de vazão, variando entre cerca de 50% a 90%.

Como destaca Lucena (2010), ainda existe um grande nível de incerteza em estudos a respeito de impactos hidrológicos das mudanças climáticas globais. Por isso é importante a elaboração de diversos estudos, inevitavelmente entre eles existindo resultados conflitantes, para que as metodologias aplicadas possam ser analisadas e comparadas, permitindo o aprimoramento de metodologias futuras capazes de diminuir as incertezas do processo de modelagem.

6.4. Impactos sobre a Geração de Energia

Primeiramente serão apresentados os resultados das simulações da Potência Gerada pela usina hidrelétrica de Três Marias determinadas a partir das vazões resultantes do item anterior (6.3). Os períodos simulados foram os mesmo das vazões afluentes: “PRESENTE” (1961-1990), “FUT1” (2011-2040), “FUT2” (2041-2070) E “FUT3” (2071-2100), sendo o intuito a comparação do primeiro com os demais para destacar as tendências de impactos na geração hidrelétrica devido as mudanças climáticas.

No caso das simulações da Potência Gerada de Três Marias, é possível observar que as variações da potência média seguiram de maneira geral as tendências da vazões, onde ambos modelos projetaram reduções da variável, sendo o Eta-HadGEM2-ES aquele que apresentou as projeções mais pessimistas para os períodos futuros em relação ao período “Presente” (Figura 6-31). Ainda no mesmo gráfico é interessante visualizar como ambos modelos climáticos reagiram de maneira mais pessimista para o cenário RCP8.5, cenário onde praticamente não são tomadas atitudes para minimização das mudanças climáticas. É importante ressaltar no entanto, que as reduções sofridas pela potência média são percentualmente menores do que as ocorridas nas vazões afluentes (Tabela 6-6 e Figura 6-32). Isso ocorre devido a existência do reservatório, que permite o acúmulo e a utilização da água da maneira planejada pelo operador, ou seja, a potência irá depender da vazão turbinada (que é influenciada pelo volume/cota do reservatório, pelas decisões do operador, pelos demais usos do reservatório além da geração hidroelétrica, pela vazão máxima de engolimento das turbinas, etc.) e não diretamente das vazões afluentes.

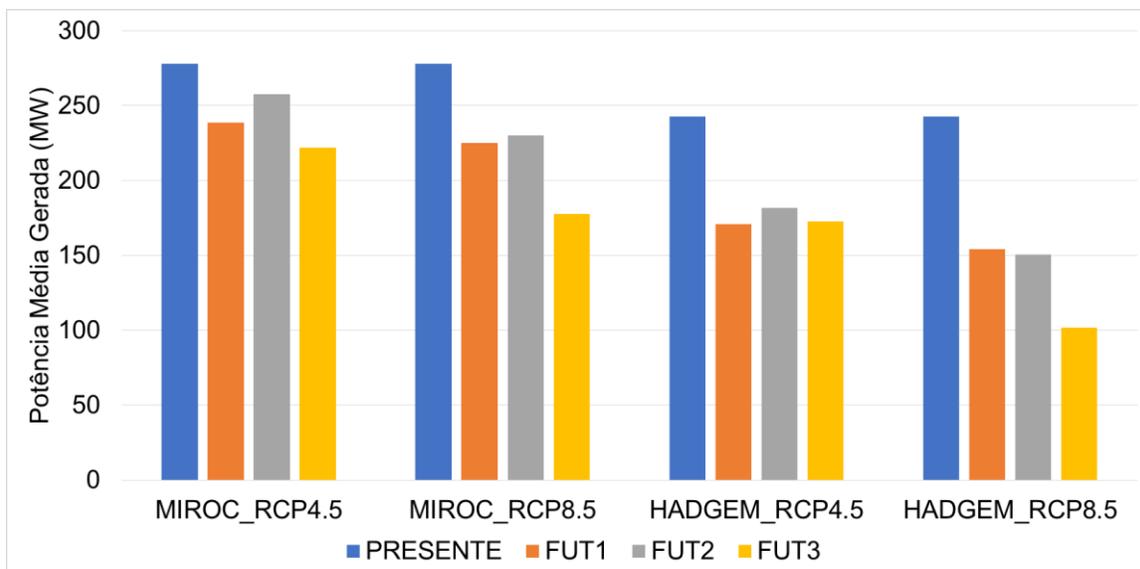


Figura 6-31: Simulação da Potência Média Gerada pela UHE Três Marias para os período “PRESENT” e futuros para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 (modelos climáticos Eta_Miroc5 e Eta-HadGEM2-ES).

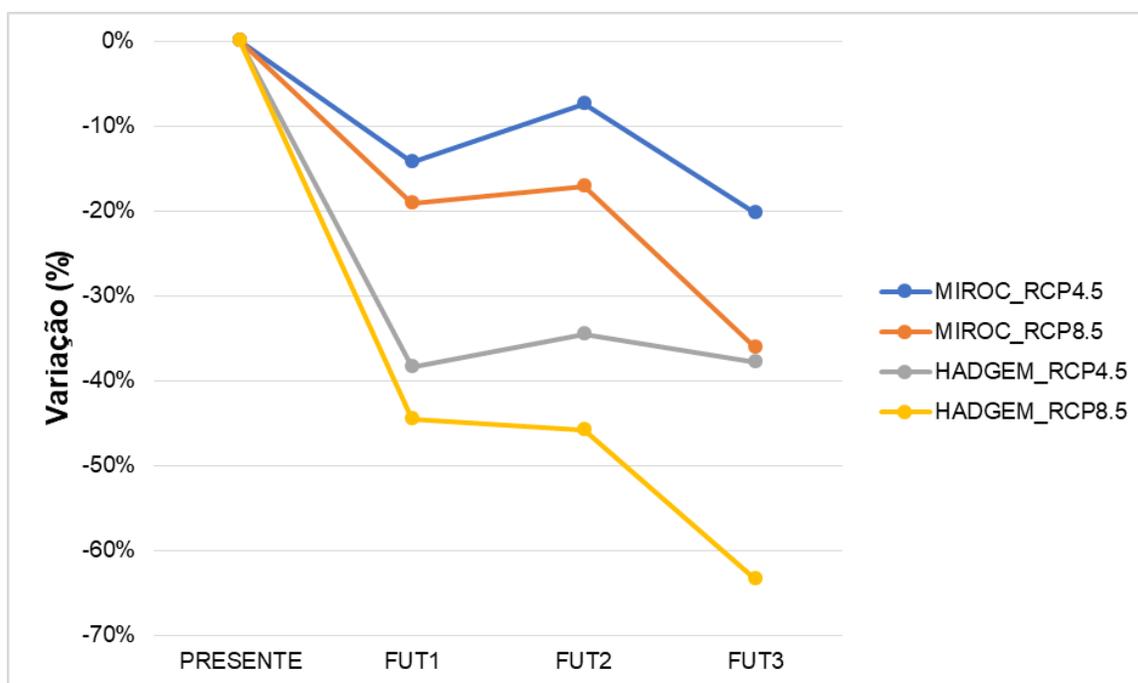


Figura 6-32: Variação da Potência Média Gerada dos períodos futuros (FUT1, FUT2 e FUT3) em relação ao período “PRESENT”.

Nos gráficos a seguir são apresentadas as curvas de permanência das simulações de Potência Gerada para o período “Presente” e para os períodos futuros “FUT1”, “FUT2” e “FUT3” para os modelos Eta-MIROC5 (Figura 6-33 e Figura 6-34) e Eta-HadGEM2-ES (Figura 6-35 e Figura 6-36) para os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5.

Na Figura 6-33 é possível observar que a potência média do período “Presente” para o modelo Eta-MIROC5, que é de 278 MW, apresenta uma permanência de aproximadamente 45% e nos períodos futuros, essa mesma potência reduz sua permanência para valores entre 30% e 40%. De maneira geral, a potência gerada sofre reduções em praticamente toda a curva, para todos os períodos futuros, sendo um pouco mais acentuada nas potências mais frequentes. Destaca-se o fato de que no período “FUT2” as reduções das potências, quando comparadas com os outros períodos futuros, são menores em praticamente qualquer permanência (excluindo-se as potências até cerca de 27% quando comparadas com o período “FUT1”). Já o período “FUT3” mostra-se o mais pessimista na geração de energia em qualquer permanência, mas principalmente na potências menos frequentes (até cerca de 60% de permanência).

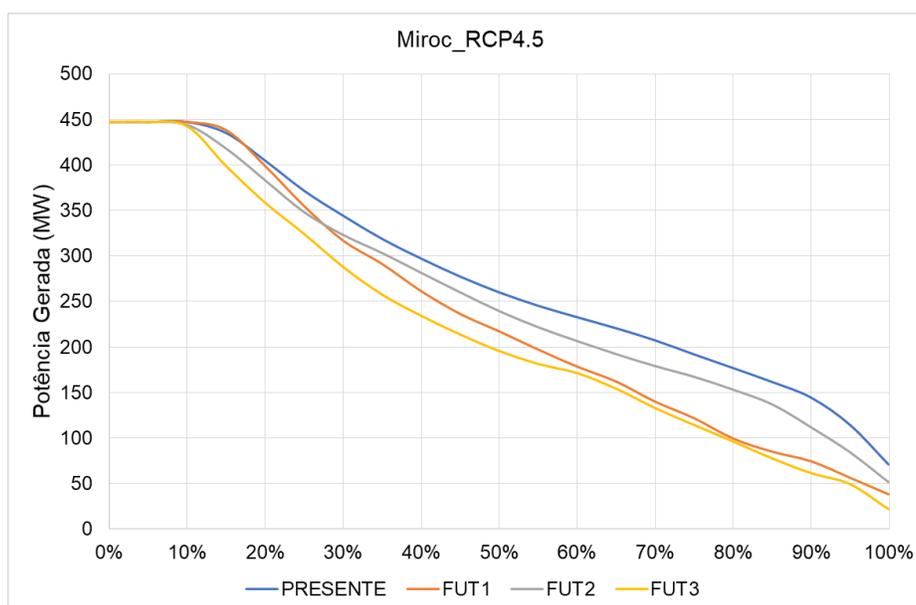


Figura 6-33: Curva de permanência da potência gerada (MW) das simulações do modelo climático Eta-MIROC5 no cenário RCP4.5 para os períodos “Presente”, “FUT1”, “FUT2” e “FUT3”.

A Figura 6-34 também apresenta a permanência das potências gerada do modelo Eta-MIROC5, mas neste caso para o cenário RCP8.5. Sendo assim, a potência média do período “Presente” continua sendo de 278 MW com permanência de 45%. No entanto, é possível observar que este cenário é muito mais pessimista que o primeiro, visto que essa mesma potência tem sua permanência reduzida para menos de 35% nos períodos “FUT1” e “FUT2” e para apenas 18% no “FUT3”, o que seria extremamente preocupante. Novamente, o período “FUT3” é o que se mostrou mais pessimista, sendo as maiores

reduções de permanência novamente nas potências menos frequentes (entre 10% e 30%). Neste cenário, os períodos “FUT1” e “FUT2” ficaram bastante próximos.

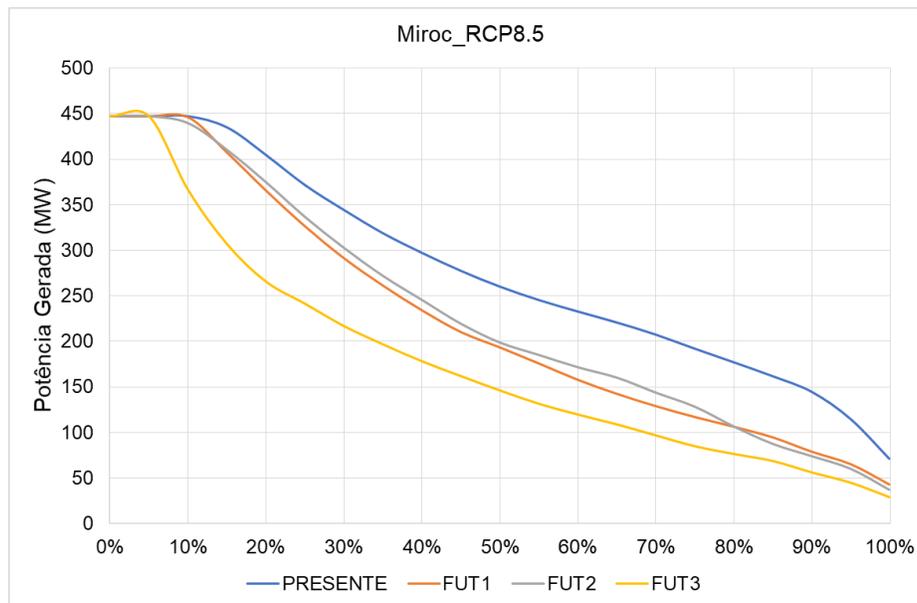


Figura 6-34: Curva de permanência da potência gerada (MW) das simulações do modelo climático Eta-MIROC5 no cenário RCP8.5 para os períodos “Presente”, “FUT1”, “FUT2” e “FUT3”.

O próximo gráfico apresenta as simulações do modelo climático Eta-HadGEM2-ES (Figura 6-35). Neste caso, é possível perceber que além de apresentar uma maior redução geral nas potências do período “Presente” com relação ao modelo Eta-MIROC5, o mesmo mostra reduções de potência nos períodos futuros mais significativas do que o outro modelo já no cenário RCP4.5. A potência média para o período “Presente” do modelo Eta-HadGEM2-ES é de 242,8 MW e possui permanência de 48%, já nos períodos futuros ela é significativamente reduzida, chegando a 26% no “FUT1”, mas se recuperando um pouco nos períodos posteriores, porém, ainda ficando abaixo dos 35% de permanência. De maneira geral, as potências que mostraram maiores reduções foram as de permanência entre 20% e 60%, e os três períodos se mantiveram bem próximos, tendo apenas o “FUT2” as permanências entre 10% e 50% um pouco menos afetadas.

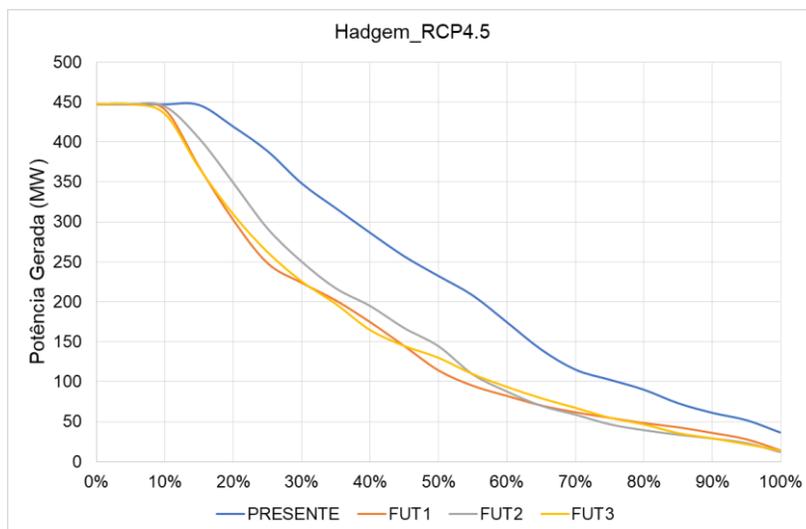


Figura 6-35: Curva de permanência da potência gerada (MW) das simulações do modelo climático Eta-HadGEM2-ES no cenário RCP4.5 para os períodos “Presente”, “FUT1”, “FUT2” e “FUT3”.

Por fim, na Figura 6-36 podem ser visualizadas as reduções das potências geradas nas simulações do modelo Eta-HadGEM2-ES para o cenário RCP8.5. Essa simulação foi a mais pessimista de todas, com destaque para o período “FUT3” onde a permanência da potência média do período presente caiu de 48% para 11% e onde as potências menos frequentes (de 10% a 40%) sofreram reduções consideráveis. Mesmo os cenários menos pessimistas, “FUT1” e “FUT2”, apresentaram reduções graves, de 25% e 21% respectivamente.

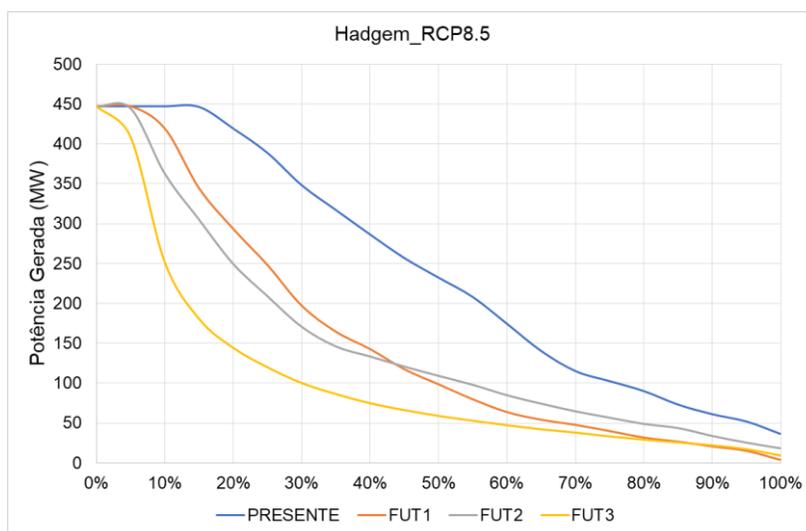


Figura 6-36: Curva de permanência da potência gerada (MW) das simulações do modelo climático Eta-HadGEM2-ES no cenário RCP8.5 para os períodos “Presente”, “FUT1”, “FUT2” e “FUT3”.

A Tabela 6-8 apresenta as novas permanências da potência gerada média do período “Presente” de cada modelo climático em cada cenário de emissão para os períodos futuros. A partir desses resultados é possível observar que a projeção do Eta-HadGEM2-ES para o cenário RCP8.5 é a mais pessimista de todas, em todos os períodos futuros, tendo destaque o fato da potência média de 242,8 MW do período “Presente” ter sua permanência reduzida de 48% para 11% no período de 2071-2100 (FUT3). Ou seja, essa mesma potência irá ocorrer apenas 11% do tempo aos invés dos quase 50% do passado.

O Eta-MIROC5 no cenário RCP8.5 apresenta a segunda maior redução de permanência, sendo que ela cai de 45% no período “Presente” para 18% no “FUT3”. No entanto, quando comparado com o Eta-HadGEM2-ES no cenário RCP4.5, os períodos “FUT1” e “FUT2” deste são um pouco mais pessimistas.

Tabela 6-8: Permanência da potência média do período “Presente” em relação aos períodos futuros.

Modelo Climático	PRESENTE	FUT1	FUT2	FUT3
Eta-MIROC5 RCP4.5	45%	37%	40%	31%
Eta-MIROC5 RCP8.5	45%	32%	34%	18%
Eta-HadGEM2-ES RCP4.5	48%	26%	31%	27%
Eta-HadGEM2-ES RCP8.5	48%	25%	21%	11%

É importante ressaltar que as simulações realizadas neste estudo levam em consideração apenas as influências das mudanças climáticas nas vazões afluentes, no entanto, outros fatores (também influenciáveis pelas mudanças no clima) podem acarretar em alterações na relação mudanças climáticas-hidroeletricidade, como, mudanças no uso do solo, diferentes usos da água, diferentes cenários energéticos, entre outros (LUCENA, 2010).

Outro ponto importante para se chamar a atenção é que, como já foi dito anteriormente, as simulações apresentadas neste estudo não pretendem fornecer informações exatas sobre acontecimentos futuros, e sim chamar a atenção para possíveis cenários e tendências de redução da geração de energia elétrica na UHE Três Marias. Assim como em ANA (2015), a principal informação que este estudo vem passar é de que, bem ou mal, as séries de vazões que até atualmente vem sendo consideradas como estacionárias no dimensionamento de estruturas hidráulicas e no planejamento de setores

ligados aos recursos hídricos, sofrerão alterações. Esse resultado é muito importante a partir do momento em que permite identificar vulnerabilidades, potenciais impactos e possíveis medidas de mitigação (LUCENA, 2010).

O setor elétrico brasileiro, pelo menos em sua parte hidroelétrica (que foi a verificada neste estudo), não considera no planejamento e expansão de longo prazo as variáveis climáticas não estacionárias (EPE, 2007a; EPE, 2007b; EPE, 2007c; LUCENA, 2010; ANEEL, 2014; EPE, 2015; ANA, 2015; TIEZZI, 2015), fazendo com que este tipo de estudo seja muito importante no sentido de desenvolver adequadamente metodologias para que as mudanças climáticas possam ser inseridas no planejamento energético brasileiro futuro. Essas informações irão auxiliar não apenas na determinação do montante a ser gerado, mas também na adaptação da operação ou mesmo da estrutura das usinas já existentes e no planejamento de novas usinas que terão sua localização dependente da variação espacial dos impactos climáticos.

É importante chamar atenção para o fato de que recentemente (outubro de 2017) o Ministério de Minas e Energia lançou um edital em parceria com o Banco Mundial para analisar as metodologias do planejamento energético utilizadas no Brasil para propor formas de incorporar as mudanças climáticas (MME, 2017). Esse tipo de iniciativa vem para fortalecer a importância deste estudo e mostra que o setor energético está iniciando os esforços para inserir as mudanças do clima no planejamento futuro.

Segundo as simulações de potência apresentadas acima, percebe-se que as mesmas tendem a sofrer reduções expressivas devido as variações das vazões afluentes, que podem ser afetadas pelas mudanças climáticas. No entanto, é importante lembrar que a variação da vazão não influencia apenas a geração de energia elétrica, mas também os demais usos de água tanto a montante como a jusante do reservatório. Atividades como navegação, piscicultura, irrigação, controle de cheias, abastecimento de água e recreação são impactadas diretamente pela variação do volume do reservatório. Sendo ainda as atividades de irrigação e abastecimento de água afetadas também a jusante do mesmo, em razão das variações de vazões efluentes que irão depender da operação do reservatório para a geração de energia. Portanto, a operação do reservatório não pode apenas ser baseada nas projeções de vazão afluentes, mas também deve considerar os demais usuários dos recursos hídricos para que os mesmos não sejam afetados de maneira desastrosa em pró da hidroeletricidade. Conflitos entre os usos múltiplos, principalmente entre a geração de energia elétrica e os demais, já são significativos na região da usina de

Três Marias, o que aumenta a necessidade de um planejamento conjunto dos recursos hídricos e do setor energético.

No caso deste estudo foi analisada uma usina hidrelétrica que possui um grande reservatório, Três Marias. No entanto, muitas outras usinas no país, principalmente as construídas mais recentemente e as planejadas para os próximos anos, são usinas conhecidas como “fio d’água” (com baixíssimas capacidade de armazenamento de água e sem capacidade de regularização), portanto, as mesmas estão muito mais sujeitas aos impactos das mudanças climáticas na vazões afluentes. Essa opção do setor tem a pretensão de reduzir os impactos ambientais, no entanto, aumenta a vulnerabilidade do mesmo as possíveis mudanças no clima. Sendo assim, no sentido de reduzir essa falta de segurança do setor elétrico brasileiro com relação aos impactos, usinas com reservatório poderiam ser benéficas (LUCENA, 2010; LIMA, COLLISNCHONN e MARENGO, 2014; TIEZZI, 2015; ANA, 2015).

Outro ponto que deve ser observado sobre a usina escolhida para este estudo é o de que ela é integrante do Sistema Interligado Nacional – SIN, o que faz com que seja necessário que os valores de potência encontrados neste estudo sejam analisados com cautela, pois a operação da mesma não depende apenas da usina isolada e sim da combinação da operação centralizada definida pelo ONS (LUCENA, 2010; TIEZZI, 2015). Sendo assim, se esta análise fosse realizada considerando todo o SIN, provavelmente os resultados apresentariam um redução menos acentuada ou que pelo menos não afete tanto a produção energética do país como um todo. A interligação de uma país de grandes dimensões como o Brasil também é benéfica no sentido de que o mesmo irá sofrer diferentes impactos em sua extensão (LUCENA, 2010), portanto, a operação futura deve levar isso em consideração, podendo amenizar os riscos focando a geração em áreas menos atingidas, se possível.

Alguns estudos com a mesma linha de raciocínio que este apresentam resultados semelhantes para a região próxima à bacia de Três Marias. No estudo realizado por Santana (2013) foi analisado o efeito das mudanças climáticas na energia gerada e assegurada de quatro aproveitamentos hidrelétricos inventariados da bacia hidrográfica do rio São Francisco, sendo três deles muito próximos a UHE Três Marias. Os resultados encontrados, assim como neste estudo, não foram nada otimistas. Segundo o autor a menor redução de energia assegurada no melhor cenário foi de cerca de 10%, o que é

muito impactante, principalmente para quando os empreendimentos são usinas a fio d'água, que é o caso do estudo de Santana (2013).

Lucena (2010) utilizou o modelo SUIISHI-O para realizar a simulação da transformação das vazões, já influenciadas pelas mudanças climáticas, em energia gerada. Seus resultados para a bacia do rio São Francisco também não foram nada otimistas. A análise foi feita em cima dos valores da energia firme e da energia média para o período de 2011 a 2100. Para o cenário A2, menos pessimista, a variação em relação ao cenário de referência foi de -69% para a energia firme e -45% para a energia média. Já para o cenário B2, os valores encontrados foram de -77% e -52%, respectivamente. Comparando com os resultados encontrados neste estudo, vemos que as projeções para a energia média se assemelham mais com as geradas pelo modelo Eta-HadGEM2-ES, que é baseado no mesmo modelo global utilizado como base por Lucena (2010), só que numa versão mais recente.

Por fim, ao verificar informações reais de geração de energia elétrica da Usina Três Marias dos últimos 19 anos é possível observar uma recente redução de geração nos últimos quatro anos (Figura 6-37). Não é possível afirmar com certeza, mas este fenômeno pode ser um indício de que as projeções pessimistas encontradas neste estudo já estejam em curso.

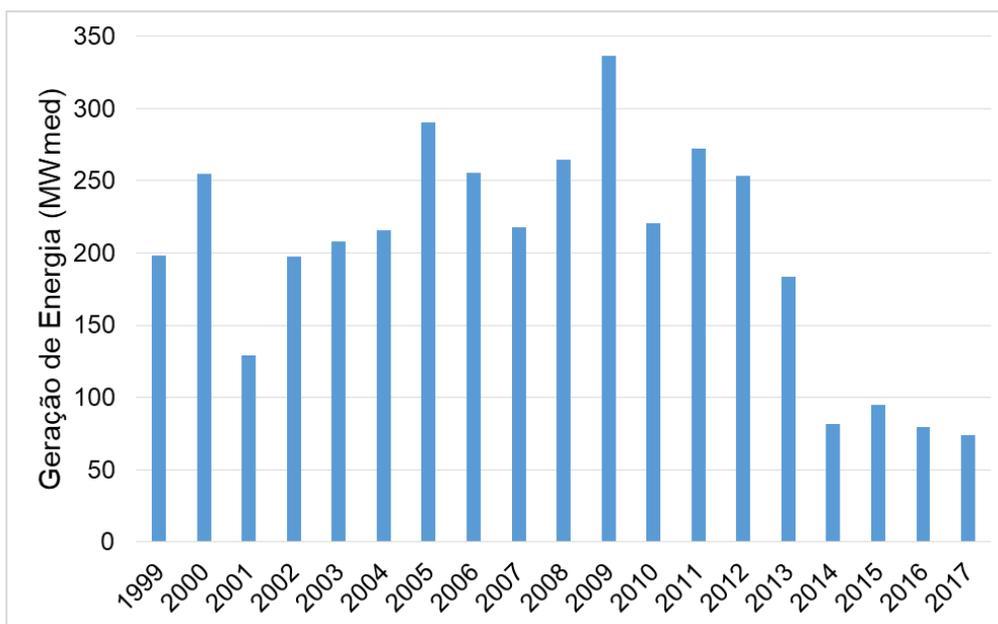


Figura 6-37: Geração de energia na usina de Três Marias para o período de 1999 a 2017.

Fonte: ONS, 2018b.

7. CONCLUSÕES

Visto a importância da hidroeletricidade na matriz elétrica brasileira e a sua vulnerabilidade às possíveis mudanças climáticas, este estudo teve como objetivo principal a análise da tendência de variação das vazões afluentes à bacia hidrográfica da usina de Três Marias, e, conseqüentemente, da geração de energia elétrica da mesma, devido às mudanças no clima.

A partir da calibração do modelo MGB-IHP e das variáveis climáticas do modelo climático regional Eta, forçado pelos modelos globais HadGEM2-ES e MIROC5 para os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5, foi possível realizar a projeção das vazões afluentes à usina de Três Marias e a simulação da geração de energia para os períodos futuros “FUT1” (2011-2040), “FUT2” (2041-2070) e “FUT3” (2071-2100).

Primeiramente foi realizada a verificação do desempenho dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 na representação das vazões observadas através da simulação do período “Presente” (1961-1990). Nesta análise, apesar das incertezas existentes no processo de modelagem, foi possível perceber que o modelo Eta-MIROC5 representou melhor as condições da bacia de Três Marias, se mostrando adequado em toda a curva de permanência das vazões. Já o modelo Eta-HadGEM2-ES apresentou reduções nas vazões menos frequentes e elevações nas vazões mais frequentes muito significativas, sendo mais adequado para a simulação de frequências menos extremas.

Nas projeções realizadas para os períodos futuros foi possível observar que ambos modelos projetaram reduções de vazões, sendo o Eta-HadGEM2-ES o mais pessimista dos dois. As reduções ocorreram para todas as vazões de referência analisadas ($Q_{95\%}$, $Q_{50\%}$ e $Q_{5\%}$), sendo mais acentuadas das menos frequentes para as mais frequentes. Nas projeções do modelo Eta-MIROC5, para o cenário RCP8.5, a redução das vazões mais frequentes ultrapassa os 50% já no período “FUT1”. Já nas $Q_{50\%}$, para o mesmo cenário, as reduções são de cerca de 30% nos dois primeiros períodos e chegam a quase 50% no “FUT3”. No caso do Eta-HadGEM2-ES, as reduções das $Q_{95\%}$ para o cenário menos pessimista (RCP4.5) são superiores a 59%, chegando no mais pessimista a quase 88%. Já para as vazões com 50% de permanência, as reduções são um pouco menores, mas chegam a cerca de 80% no período “FUT3” do cenário RCP8.5. Com relação às vazões menos frequentes (mais elevadas), a tendência também é de diminuição, no entanto as variações são menos expressivas do que as encontradas para as demais permanências.

A partir das projeções das vazões afluentes ao reservatório de Três Marias foi possível a simulação da potência gerada pela usina hidroelétrica para verificação das influências das mudanças climáticas na geração de energia elétrica da bacia. A redução das potências médias seguiu, de maneira geral, a mesma tendência das vazões, no entanto as variações foram menos expressivas. Essa diferença é esperada, visto que as potências não dependem apenas das vazões afluentes. No modelo Eta-MIROC5, a menor redução de potência média foi de 7,4% e a maior de 36,1%. Já no caso do modelo Eta-HadGEM2-ES, a menor redução foi de 34,6% chegando a 63,4% no caso mais extremo. Ambos modelos apresentaram projeções mais amenas para o cenário RCP4.5 e mais severas para o RCP8.5, como esperado.

Para complementar a análise dos impactos na potência gerada, foi verificada a alteração, com o passar do tempo, da permanência da potência média do período “Presente” de cada modelo para ambos cenários. Os resultados mostram que, como esperado, para um mesmo modelo, mas cenários diferentes, a redução da permanência é mais expressiva para o cenário RCP8.5. Já, quando a comparação é feita entre os dois modelos, o Eta-HadGEM2-ES é mais pessimista que o Eta-MIROC5. No pior caso, a redução é de 48% para 11% no período “FUT3” do cenário RCP8.5 do modelo Eta-HadGEM2-ES.

Um detalhe importante que deve ser destacado na interpretação dos resultados encontrados é que a usina de Três Marias é integrante do SIN. Na simulação realizada neste estudo ela foi considerada uma usina independente, de modo que os valores encontrados devem ser mais pessimistas do que seriam caso fosse considerado todo o sistema interligado nas simulações. Isso ocorreria devido à capacidade de transmissão de energia entre os subsistemas, permitindo a redução da vulnerabilidade do setor elétrico brasileiro às mudanças climáticas. Devido à grande extensão do país, os impactos climáticos deverão variar espacialmente, podendo permitir que o impacto negativo de um local seja compensado pelo impacto positivo de outro.

É importante ressaltar que a UHE Três Marias é uma usina de regularização, no entanto a maioria das hidrelétricas que vêm sendo construídas atualmente ou que estão planejadas para os próximos anos são usinas a fio d’água, ou seja, com baixa capacidade de armazenamento e regularização das vazões. Isso vem acontecendo com a intenção de amenizar os impactos ambientais associados aos grandes reservatórios. Portanto, é

possível assumir que a vulnerabilidade do sistema se intensifica a partir do momento em que este se baseia nesse tipo de usina.

Ao observar os resultados encontrados neste estudo é possível perceber que o setor elétrico brasileiro, altamente dependente da disponibilidade de recursos hídricos, poderá sofrer impactos consideráveis na produção de energia devido às mudanças climáticas. No entanto, é importante lembrar que, devido principalmente as incertezas vinculadas tanto à modelagem climática quanto à hidrológica, a intenção deste estudo não é a determinação exata das vazões e potências futuras e sim indicar tendências que possam ser utilizadas no planejamento do setor elétrico para auxiliar na tomada de decisões.

Destaca-se o fato de que analisando dados observados de vazões afluentes ao reservatório de Três Marias e de energia gerada do mesmo, percebe-se que estes vêm sofrendo redução significativa nos últimos anos. Esse fato pode indicar que as projeções estão no caminho certo, o que significaria a desconstrução do fenômeno de estacionariedade que vem sendo adotado tanto no planejamento quanto no dimensionamento de estruturas hidráulicas no setor elétrico brasileiro e em muitos outros setores dependentes dos recursos hídricos.

Por fim, é importante ressaltar que a redução das vazões na bacia não irá afetar apenas a geração hidrelétrica, mas também os demais usos da água, que dependem principalmente das vazões mais frequentes, assim como a hidroeletricidade. Sendo assim, é inevitável o aumento dos conflitos entre os diversos usuários dos recursos hídricos, que já é significativo, principalmente quando se trata da geração de energia elétrica.

Desta forma, fica evidente a importância da modelagem hidroclimática no planejamento do setor energético e dos demais setores dependentes dos recursos hídricos. Um sistema de projeção permitiria a antecipação de variáveis influenciáveis pelos possíveis cenários de mudanças climáticas, auxiliando o processo de tomada de decisão e apoiando a criação de medidas de mitigação e adaptação às mudanças do clima.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA – Agência Nacional de Águas. Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos: Subsídios ao Plano Nacional de Adaptação às Mudanças Climáticas. Brasília: ANA, 2015.

ANA – Agência Nacional de Águas. Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos: avaliação e Diretrizes para Adaptação. Brasília: ANA, GGES, 2016.

ANA – Agência Nacional de Águas. Sistema de Informações Hidrológicas – HidroWeb. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em: janeiro de 2017.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de Energia Elétrica do Brasil 3ª Edição. Brasília, 2008.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Relatório Final de Hidrologia do Projeto Estratégico de P&D nº 010/2008 da ANEEL – “Efeitos de mudanças climáticas no regime hidrológico de bacias hidrográficas e na energia assegurada de aproveitamentos hidrelétricos”. 2014.

ALEXANDRE, A. M. B. Previsão de Vazões Mensais para o Sistema Interligado Nacional Utilizando Informações Climáticas. Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará – UFCE. Fortaleza, 2012.

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

BARRIOS, F. M. C. Simulação Hidrológica em uma Bacia Hidrográfica Andina sob Cenários de Mudanças Climáticas. Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte, 2013.

BEVEN, K. J. *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. 2ª Edição. Lancaster University, UK: Wiley-BlackWell, 2001. 488 p.

BIG/ANEEL. Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica. Matriz de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: maio de 2017a.

BIG/ANEEL. Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica. Capacidade de Geração do Brasil. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: maio de 2017b.

BRAVO, J. M. Otimização da Operação de um Reservatório para Controle de Cheias com Base na Previsão de Vazão. Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2006.

BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W. e TUCCI, C. E. M. Verificação da Eficiência e Eficácia de um Algoritmo Evolucionário Multi-Objetivo na Calibração Automática do Modelo Hidrológico IPH II. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 14, n. 3, p. 37-50, jul/set. 2009.

BREMICKER, M. Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells für das Weser und das Ostsee Einzugsgebiet als Baustein eines Atmosphären-Hydrologie-Modells. Dissertation - Geowissenschaftlicher Fakultät, Albert-Ludwigs-Universität. Freiburg, 1998.

CBHSF – Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2016-2025. Volume 1 – Caracterização da bacia hidrográfica – 1ª parte. REV1. Salvador, 2015a.

CBHSF – Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2016-2025. Volume 2 – Caracterização da bacia hidrográfica – 2ª parte. REV1. Salvador, 2015b.

CBHSF – Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2016-2025. Volume 7 – Usos, balanço hídrico e síntese do diagnóstico. REV1. Salvador, 2015c.

CEBDS – Conselho Empresarial Brasileiro para Desenvolvimento Sustentável. Estudo sobre Adaptação e Vulnerabilidade à Mudança Climática: O caso do setor elétrico brasileiro. Rio de Janeiro, 2013.

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. Energia da Gente – Informativo Mensal para os Empregados da CEMIG. Ano IX, nº 91, agosto/setembro, 2012.

CHILKOTI, V.; BOLISETTI, T. e BALACHANDAR, R. Climate Change Impact Assessment on Hydropower Generation Using Multi-Model Climate Ensemble. *Renewable Energy*, 109, 510-517, feb. 2017.

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. e MARENGO, J. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. *American Journal of Climate Change*, 3, 438-454, 2014a.

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. e MARENGO, J. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. *American Journal of Climate Change*, 3, 512-525, 2014b.

CGIAR-CSI – Consortium for Spatial Information. SRTM 90m Digital Elevation Data. Disponível em: <http://srtm.csi.cgiar.org/>. Acesso em: setembro de 2016.

COLLISCHONN, W. Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. Tese de Doutorado submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2001.

COLLISCHONN, W. e TUCCI, C. E. M. Simulação Hidrológica de Grande Bacias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 6, n. 1, p. 95-118, jan/mar. 2001.

COLLISCHONN, W. e TUCCI, C. E. M. Ajuste Multiobjetivo dos Parâmetros de um Modelo Hidrológico. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v.8, n.3, p. 27-39, jul/set. 2003.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C. e TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, 52:5, 878-895, oct. 2007.

COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C.; PAIVA, R. C. D.; FAN, F. M. e KAYSER, R. Manual Introdutório para Aplicação do Modelo MGB-IPH – Versão 2.0. Porto Alegre: IPH, 2010a.

COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C.; PAIVA, R. C. D.; FAN, F. M. e KAYSER, R. Manual de Discretização de Bacias para Aplicação do Modelo MGB-IPH – Versão 2.0. Porto Alegre: IPH, 2010b.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Plano Nacional de Energia 2030. Caderno temático: Projeções. Brasília, 2007a.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Plano Nacional de Energia 2030. Caderno temático: Geração Hidrelétrica, 2007b.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Plano Nacional de Energia 2030. Rio de Janeiro, 2007c.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2024. Brasília, 2015.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2016: Ano base 2015. Rio de Janeiro, 2016.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C.; PAIVA, R. C. D. e KAYSER, R. Manual de Definição de Unidades de Resposta Hidrológica (Blocos) do Modelo MGB-IPH. Versão 2.0. Porto Alegre: IPH, 2010a.

FAN, F. M.; BUARQUE, D. C.; COLLISCHONN, W.; PAIVA, R. C. D. e KAYSER, R. Manual do PrePro-MBG para Aplicação do Modelo MGB-IPH. Versão 4.1. Porto Alegre: IPH, 2010b.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; KAYSER, R.; BUARQUE, D. C. e PAIVA, R. C. D. Manual de Aplicação do Modelo MGB-IPH Integrado à Interface Mapwindow. Versão 2.0. Porto Alegre: IPH, 2010c.

FAN, F. M. e COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 19, n. 1, p. 243-254, jan/mar. 2014.

FAN, F. M.; RAMOS, M. H. e COLLISCHONN, W. Sobre o uso de Previsões Hidrológicas Probabilísticas para Tomada de Decisão. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 914-926, out/dez. 2015.

FAN, F.M. Previsão por Conjunto de Vazões Afluentes a Reservatórios em Grandes Bacias Hidrográficas Brasileiras. Tese de Doutorado submetida ao programa de Pós-Graduação

em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2015.

FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W. e BUARQUE, D. C. Sobre o Uso da Persistência de Previsões Determinísticas de Vazão para a Tomada de Decisão. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 31, n. 2, p. 218-228, 2016. 43

FBDS – Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável. Mudanças Climáticas e Eventos Extremos no Brasil. Rio de Janeiro, 2009.

FILHO, G. M. M., ANDRADE, R. S., JUNIOR, J. C. Z. e FILHO, L. N. L. M. Modelos Hidrológicos: Conceitos e Aplicabilidades. Revista de Ciências Ambientais, Canoas, v. 6, n. 2, p. 35-47, 2012.

FREITAS, M. A. V. e SOITO, J. L. S. Energia e Recursos Hídricos. Parcerias Estratégicas. Mudança do clima no Brasil: vulnerabilidade, impactos e adaptação – Centro de Gestão de Estudos Estratégicos (CGEE), v. 13, n 27. Brasília, 2008.

GAMA – Engenharia e Recursos Hídricos LTDA. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Entorno da Represa Três Marias. R6 – Resumo Executivo. Maceió, julho de 2015a.

GAMA – Engenharia e Recursos Hídricos LTDA. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Entorno da Represa Três Marias. R5 – Relatório Final. Fase A – Diagnóstico Estratégico e Cenários de Desenvolvimento. Volume I – Meio Físico-Biótico e Disponibilidades Hídricas. Maceió, julho de 2015b.

GELLENS, D. e ROULIN, E. Streamflow response of Belgian catchments to IPCC climate change scenarios. Journal of Hydrology. 210, 242-258, jul. 1998.

GIORGI F. e GUTOWSKI Jr. W. J. Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative. Annual Review of Environment and Resources, v.40, 2015.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate. Cambridge, Reino Unido and New York, EUA. Cambridge University Press, 2013.

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, Switzerland, 2014.

KOPYTKOVSKIY, M.; GEZA, M. e MCCRAY, J. E. Climate-change Impacts on Water Resources and Hydropower Potential in the Upper Colorado River Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 473-493, feb. 2015.

LIANG, X., LETTENMAIER, D., WOOD, E. F. e BURGE, S. J. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research*. v.99, n. D7, p. 14.415-14.428, July. 1994.

LIMA, J. W. M., COLLISCHONN, W. e MARENGO, J. A. Efeitos das Mudanças Climáticas na Geração de Energia Elétrica. São Paulo: AES Tietê, 2014. 360 p.

LUCENA, A. F. P.; SZKLO, A. S.; SCHAEFFER, R.; SOUZA, R. R.; BORBA, B. S. M. C.; COSTA, I. V. L.; PEREIRA JÚNIOR, A. O. e CUNHA, S. H. F. The Vulnerability of Renewable Energy to Climate Change in Brazil. *Energy Policy*, 37, 879-889, oct. 2009.

LUCENA, A. F. P. Proposta Metodológica para Avaliação da Vulnerabilidade às Mudanças Climáticas Globais no Setor Hidroelétrico. Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 2010.

MAJONE, B.; VILLA, F.; DEIDDA, R. e BELLIN, A. Impacto f Climate Change and Water Use Policies on Hydropower Potential in the South-Eastern Alpine Region. *Science of the Total Environment*, 543, 965-980, may. 2016.

MARAN, S.; VOLONTERIO, M. e GAUDARD, L. Climate Change Impacts on Hydropower in an Alpine Catchment. *Environmental Science and Policy*, 43, 15-25, 2014.

MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia. Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Brasília, 2010.

MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – Sumário Executivo. Brasília, 2016a.

MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – Volume II. Brasília, 2016b.

MELLER, A.; COLLISCHONN, W.; FAN, F.; BUARQUE, D. C.; PAIVA, R. C. D.; DIAS, P. L. S. e MOREIRA, D. S. Previsão de Cheias por Conjunto em Curto Prazo. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.19, n. 3, p. 33-49, jul/set 2014.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco. Brasília, 2006.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima. Volume I: Estratégia Geral. Brasília, 2016a.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima. Volume II: Estratégias Setoriais e Temáticas. Brasília, 2016b

MME – Ministério de Minas e Energia. Análise dos Reflexos das Mudanças Climáticas nas Metodologias de Planejamento de Sistemas Elétricos. Termo de Referências Nº 66. Outubro de 2017. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/40650095/TDR+n%C2%BA+66+-+SPE-MME+-+Projeto+META.pdf/9cfc5cb9-ace4-4fc2-a0cb-bc2486a20988>.

MOHOR, G. S.; RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J. e SIQUEIRA JÚNIO, J. L. Exploratory Analyses for the Assessment of Climate Change Impacts on the Energy Production in an Amazon Run-of-River Hydropower Plant. Journal of Hydrology: Regional Studies, 4, 41-59, apr. 2015.

MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VANVUUREN, D. P.; CARTER, T. R.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T.; MEEH, G.A.; MITCHELL, J. F. B.; NAKICENOVIC, N.; RIAHI, K.; SMITH, S. J.; STOUFFER, R.J.; THOMSON, A. M.; WEYANT, J. P. e WILBANK, T. J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment”, Nature, Londres, Reino Unido, v. 463, p. 747-756, feb. 2010.

NOBRE, C. A., MARENGO, J. A., SOARES, W. R., ASSAD, E., SCHAEFFER, R., SCARANO, F. R. e HACON, S. S. Riscos de Mudanças Climáticas do Brasil e Limites à Adaptação. Brasília, 2016.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Inventário de Dados Técnicos de Aproveitamentos Hidroelétricos. Atualizado em 2016. Disponível em: <http://apps05.ons.org.br/operacao/hidrologia.aspx>.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Séries Históricas de Vazões. Disponível em: http://www.ons.org.br/operacao/vazoes_naturais.aspx. Acesso em: janeiro de 2017.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Histórico de Operação: Dados Hidrológicos/Vazões. Disponível em: http://ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/dados_hidrologicos_vazoes.aspx. Acesso em: janeiro de 2018a.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Histórico de Operação: Geração de Energia. Disponível em: http://ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx. Acesso em: janeiro de 2018b.

PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Primeiro Relatório de Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho I: Base Científica das Mudanças Climáticas. Rio de Janeiro: COPPE, 2014a.

PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Primeiro Relatório de Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho II: Impactos, Vulnerabilidades e Adaptação às Mudanças Climáticas. Rio de Janeiro: COPPE, 2014b.

RENNÓ, C. D. e SOARES, J. V. Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental. Programa de Ciência e Tecnologia para Gestão de Ecossistemas. Ação “Métodos, modelos e geoinformação para gestão ambiental”. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2000.

RIBEIRO JÚNIOR, L. U. Aprimoramento de um Instrumento de Gestão para Operação de Reservatórios Hidrelétricos com Usos Múltiplos sob Condições de Mudanças Climáticas: estudo de caso UHE de Furnas. Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na área de Recursos Hídricos, da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas, 2013.

SAE – Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. Brasil 2040: cenários e alternativas de adaptação à mudança do clima – Resumo Executivo. Brasília, 2015.

SAE/FCPC - Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República e Fundação Cearense de Pesquisa e Cultura. Relatório III: “Adaptação às Mudanças do Clima: cenário e alternativas – recursos hídricos”. Fortaleza, 2015a. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/informma/itemlist/category/160-adaptacao?start=14#saiba-mais>. Acesso em: outubro de 2016.

SAE/FCPC - Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República e Fundação Cearense de Pesquisa e Cultura. Aditivo Relatório IV: “Adaptação às Mudanças do Clima: cenário e alternativas – recursos hídricos”. Fortaleza, 2015b. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/informma/itemlist/category/160-adaptacao?start=14#saiba-mais>. Acesso em: outubro de 2016.

SAMPAIO G. e DIAS P. L. S. Evolução dos modelos climáticos e de previsão de tempo e clima. Dossiê Clima. Revista USP, n. 103, p. 41-54, 2014.

SANTANA, T. B. Impacto de Mudanças Climáticas sobre o Regime de Vazões e a Geração Hidrelétrica de Energia. Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. Itajubá, 2013.

SARTORI, A.; NETO, F. L. e GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 10, n. 4, p. 05-18, out/dez. 2005.

SCIANNI, L. A. Avaliação Preliminar do Efeito das Mudanças Climáticas na Geração de Energia Elétrica. Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. Itajubá, 2014.

SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. S.; LUCENA, A. F. P.; SOUZA, R. R.; BORBA, B. S. M. C.; COSTA, I. V. L.; JÚNIOR, A. O. P. e CUNHA, S. H. F. Mudanças Climáticas e Segurança Energética no Brasil. Rio de Janeiro, 2008.

SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. S.; LUCENA, A. F. P.; BORBA, B. S. M. C.; NOGUEIRA, L. P. P.; FLEMING, F. P.; TROCCOLI, A.; HARRISON, M. e BOULAHYA, M. S. Energy Sector Vulnerability to Climate Change: a review. Energy, 38, 1-12, 2012.

SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. Base de Dados: Emissões por setor. Disponível em: <http://seeg.eco.br/>. Acesso em: fevereiro de 2018.

SIGEL/ANEEL – Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico da Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <http://sigel.aneel.gov.br/portal/home/index.html>. Acesso em: janeiro de 2017.

SILVA, B. C. Previsão Hidroclimática de Vazão para a Bacia do rio São Francisco. Tese de Doutorado submetida ao programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2005.

SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. e COLLISCHONN, W. Previsão de Vazão com Modelos Hidroclimáticos. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 11, n. 3, p. 15-29, jul/set. 2006.

SILVEIRA, C. S.; FILHO, F. A. S.; LOPES, J. E. G.; BARBOSA, P. S. F. e 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. 14, p. 59-71, out/dez. 2014.

SILVEIRA, C. S.; FILHO, F. A. S.; MARTINS, E. S. P. R.; OLIVEIRA, J. L.; COSTA, A. C.; NOBREGA, M. T.; SOUZA, S. A. e SILVA, R. F. V. Mudanças Climáticas na Bacia do Rio São Francisco: uma análise para precipitação e temperatura. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 416-428, abr/jun. 2016.

TEOTÓNIO, C.; FORTES, P.; ROEBELING, P.; RODRIGUEZ, M. e ROBAINA-ALVES, M. Assessing the Impacts of Climate Change on Hydropower Generation and the Power Sector in Portugal: a partial equilibrium approach. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 74, 788-799, mar. 2017.

TIEZZI, R. O. Variabilidade Hidroclimatológica e seus Efeitos no Suprimento de Energia Elétrica do Sistema Interligado Nacional. Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas, 2015.

TUCCI, C. E. M., CLARKE, R. T., DIAS, P. L. S. e COLLISCHONN, W. Previsão de Médio Prazo da Afluência de Reservatórios com base na Previsão Climática. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH) – UFRGS e Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG) – USP. Porto Alegre, 2002.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 4ª Edição. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2012. 943 p.

VAN VUUREN, D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; HURTT, G. C.; KRAM, T.; KREY, V.; LAMARQUE, J.; MASUI, T.; MEINSHAUSEN, M.; NAKICENOVIC, N.; SMITH, S. J. e ROSE, S. K. The Representative Concentration Pathways: an overview. *Climatic Change*, 109, 5-31, 2011.

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

ANEXO II – Parâmetros Calibráveis

LEGENDA

Cerab → Cerrado/ Cerradão (Solos A e B)

Cercd → Cerrado/ Cerradão (Solos C e D)

Pasab → Pastagem/ Agricultura/ Agricultura Irrigada/ Área Degradada (Solos A e B)

Pascd → Pastagem/ Agricultura/ Agricultura Irrigada/ Área Degradada (Solos C e D)

Flo → Floresta/ Reflorestamento

Urb → Área Urbana

Wm → Capacidade de armazenamento do solo

b → forma da relação entre armazenamento e saturação

Kbas → Vazão durante a estiagem

Kint → Quantidade de água que escoa subsuperficialmente

XL → Forma da curva de redução da drenagem intermediária

CAP → Fluxo do reservatório subterrâneo para camada superficial

Wc → Armazenamento residual

CS → Calibração da propagação subsuperficial

CI → Calibração da propagação superficial

CB → Retardo do reservatório subterrâneo

QB → Vazão de base

Sub-bacia Porto das Andorinhas

URH	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
caaab	791.8	0.72	0.44	26.78	0.67	0.00	0.05
caacd	267.3	0.90	0.26	26.78	0.67	0.00	0.05
cerab	1714.1	0.16	0.49	28.39	0.67	0.00	0.05
cercd	610.7	0.26	0.47	14.19	0.67	0.00	0.05
pasab	857.1	0.20	0.40	28.60	0.67	0.00	0.05
pascd	305.3	0.39	0.18	14.30	0.67	0.00	0.05
flo	1285.6	0.16	0.64	28.00	0.67	0.00	0.05
urb	120.2	0.82	0.05	46.17	0.67	0.00	0.05
agua	0.0	0.00	0.00	00.00	0.00	0.00	0.00
CS	39.46						
CI	353.10						
CB	4800.00						
QB_M3/SKM2	0.0100						

Sub-bacia Velho da Taipa

URH	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
caaab	319.8	0.67	0.42	12.09	0.67	0.00	0.05
caacd	152.4	0.85	0.25	12.09	0.67	0.00	0.05
cerab	2479.2	0.23	1.14	26.75	0.67	0.00	0.05
cercd	1542.7	0.31	1.09	16.72	0.67	0.00	0.05
pasab	1239.6	0.36	0.70	42.16	0.67	0.00	0.05
pascd	771.3	0.46	0.67	26.36	0.67	0.00	0.05
flo	1859.4	0.23	0.87	40.03	0.67	0.00	0.05
urb	126.2	0.91	0.05	23.70	0.67	0.00	0.05
agua	0.0	0.00	0.00	00.00	0.00	0.00	0.00
CS	39.96						
CI	100.20						
CB	6300.00						
QB_M3/SKM2	0.0100						

Sub-bacia Ponte da Taquara

URH	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
caaab	639.6	0.67	0.42	12.09	0.67	0.00	0.05
caacd	304.8	0.85	0.25	12.09	0.67	0.00	0.05
cerab	2382.8	0.19	0.74	18.50	0.67	0.00	0.05
cercd	1332.9	0.27	0.39	11.57	0.67	0.00	0.05
pasab	1191.4	0.29	0.87	20.43	0.67	0.00	0.05
pascd	666.4	0.41	0.47	12.78	0.67	0.00	0.05
flo	1787.1	0.14	1.09	19.02	0.67	0.00	0.05
urb	126.2	0.91	0.05	23.70	0.67	0.00	0.05
agua	0.0	0.00	0.00	00.00	0.00	0.00	0.00
CS	39.96						
CI	100.20						
CB	3600.00						
QB_M3/SKM2	0.0100						

Sub-bacia UHE Três Marias

URH	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
caaab	499.5	1.20	0.33	16.23	0.67	0.00	0.05
caacd	302.1	1.51	0.19	16.23	0.67	0.00	0.05
cerab	2577.5	0.25	0.96	36.85	0.67	0.00	0.05
cercd	1419.7	0.27	0.43	29.96	0.67	0.00	0.05
pasab	1288.8	0.27	1.02	49.97	0.67	0.00	0.05
pascd	709.8	0.29	0.46	40.62	0.67	0.00	0.05
flo	1933.2	0.28	1.44	36.09	0.67	0.00	0.05
urb	167.7	1.51	0.05	16.23	0.67	0.00	0.05
agua	0.0	0.00	0.00	00.00	0.00	0.00	0.00
CS	20.70						
CI	125.75						
CB	4000.00						
QB_M3/SKM2	0.0100						

ANEXO III – Cálculo da Evaporação

LEGENDA

R_t → Radiação no topo da atmosfera

$hmáx$ → máximo de horas de sol possível

p → proporção entre horas efetivas de brilho solar e o máximo possível

G → radiação incidente de onda curta

e_s → pressão de vapor saturado

e_a → pressão parcial do vapor da água

q_{ef} → radiação efetiva

L → calor latente de vaporização

E_i → Evaporação inicial

Período HISTÓRICO (Dados observados)

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Temperatura	22.1	22.3	22.3	21.1	19.4	18.4	18.3	20.4	21.9	22.2	22	21.7
Umidade	78.3	76.9	74.8	74.3	69.1	63.8	59.2	51.8	55.3	66.5	75	79.8
Insolação	5.1	6.2	6.6	7.6	7.8	8.3	8.4	8.5	7.1	5.8	5.4	4.7
Vento	1.8	1.7	1.5	1.4	1.4	1.7	2	2.1	2.3	2	1.9	1.8
R_t	968	932	850	743	637	590	620	702	814	903	956	974
$hmáx$	13.1	12.7	12.2	11.7	11.3	11.1	11.1	11.5	12	12.5	13	13.2
p	0.389	0.488	0.541	0.650	0.690	0.748	0.757	0.739	0.592	0.464	0.415	0.356
G	450.9	487.6	470.7	458.2	407.9	397.5	420.9	469.4	474.7	459.7	459.8	434.9
e_s	19.95	20.19	20.19	18.76	16.89	15.87	15.77	17.97	19.70	20.07	19.82	19.46
e_a	15.62	15.53	15.10	13.94	11.67	10.12	9.34	9.31	10.90	13.34	14.87	15.53
q_{ef}/L	5.85	6.15	5.69	5.06	3.88	3.32	3.54	4.29	5.11	5.57	5.86	5.69
Δ/γ	2.50	2.53	2.53	2.37	2.16	2.05	2.04	2.28	2.47	2.51	2.49	2.45
E_i	2.23	2.31	2.33	2.12	2.29	2.85	3.56	4.95	5.37	3.72	2.65	2.03
E_o (mm/dia)	4.8	5.1	4.7	4.2	3.4	3.2	3.5	4.5	5.2	5.0	4.9	4.6

Período FUT1 – Modelo ETA-Miroc RCP4.5

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Temperatura	23.1	23.4	23.4	22.0	20.6	19.7	19.6	21.7	23.5	23.8	23.2	23.1
Umidade	77.2	74.2	71.5	69.4	65.8	59.1	55.1	47.2	46.7	63.8	71.5	75.8
Insolação	4.8	6.4	6.7	8.0	7.5	8.0	8.0	8.3	6.9	5.4	5.2	4.6
Vento	1.7	1.6	1.5	1.4	1.4	1.7	2.1	2.2	2.3	1.9	1.9	1.7
R_t	968	932	850	743	637	590	620	702	814	903	956	974
$hmáx$	13.1	12.7	12.2	11.7	11.3	11.1	11.1	11.5	12	12.5	13	13.2
p	0.364	0.503	0.548	0.684	0.665	0.720	0.720	0.721	0.579	0.436	0.402	0.349
G	436.5	495.5	474.1	473.0	398.5	387.9	407.7	461.9	468.8	444.9	452.5	430.8
e_s	21.17	21.59	21.64	19.78	18.17	17.21	17.16	19.42	21.74	22.06	21.38	21.16
e_a	16.35	16.02	15.47	13.73	11.97	10.16	9.46	9.16	10.15	14.07	15.29	16.04
q_{ef}/L	5.73	6.26	5.73	5.14	3.81	3.22	3.43	4.16	4.90	5.45	5.79	5.66
Δ/γ	2.63	2.68	2.69	2.48	2.31	2.20	2.19	2.44	2.70	2.73	2.66	2.63
E_i	2.43	2.70	2.84	2.71	2.75	3.49	4.37	6.06	7.17	4.30	3.28	2.54
E_o (mm/dia)	4.8	5.3	4.9	4.4	3.5	3.3	3.7	4.7	5.5	5.1	5.1	4.8

Período FUT2 – Modelo ETA-Miroc RCP4.5

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Temperatura	24.0	24.0	24.3	22.7	21.1	20.6	20.1	22.2	24.3	24.8	24.5	24.2
Umidade	75.1	75.9	72.8	70.4	65.2	59.9	56.1	50.0	51.6	62.4	72.2	74.8
Insolação	5.2	6.1	6.8	8.1	7.8	8.1	8.1	8.1	6.9	5.6	5.2	5.0
Vento	1.7	1.6	1.5	1.4	1.4	1.7	2.0	2.1	2.3	2.0	1.9	1.7
Rt	968	932	850	743	637	590	620	702	814	903	956	974
hmáx	13.1	12.7	12.2	11.7	11.3	11.1	11.1	11.5	12	12.5	13	13.2
p	0.396	0.479	0.556	0.694	0.690	0.727	0.730	0.704	0.572	0.452	0.396	0.380
G	454.7	482.4	478.1	477.3	407.9	390.3	411.2	455.0	465.6	453.4	449.2	448.6
es	22.41	22.34	22.74	20.70	18.77	18.19	17.65	20.11	22.74	23.53	23.11	22.70
ea	16.83	16.96	16.55	14.57	12.24	10.89	9.90	10.06	11.74	14.69	16.69	16.97
qef/L	5.95	6.19	5.87	5.27	3.90	3.31	3.50	4.24	5.06	5.57	5.84	5.91
Δ/γ	2.77	2.76	2.80	2.58	2.37	2.31	2.25	2.52	2.80	2.89	2.84	2.80
Ei	2.75	2.57	2.81	2.68	2.86	3.61	4.35	5.83	6.66	4.82	3.38	2.81
Eo (mm/dia)	5.1	5.2	5.1	4.5	3.6	3.4	3.8	4.7	5.5	5.4	5.2	5.1

Período FUT3 – Modelo ETA-Miroc RCP4.5

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Temperatura	24.5	24.6	24.5	23.3	22.3	21.0	20.7	22.7	25.0	25.4	24.8	24.5
Umidade	74.2	71.8	70.2	67.8	62.3	58.0	53.5	45.0	47.5	56.8	69.6	71.8
Insolação	5.0	6.4	6.8	8.0	7.7	7.9	8.1	8.0	6.9	5.7	5.2	4.9
Vento	1.7	1.7	1.5	1.5	1.4	1.7	2.1	2.2	2.4	2.0	1.9	1.7
Rt	968	932	850	743	637	590	620	702	814	903	956	974
hmáx	13.1	12.7	12.2	11.7	11.3	11.1	11.1	11.5	12	12.5	13	13.2
p	0.379	0.508	0.558	0.685	0.678	0.714	0.728	0.692	0.574	0.453	0.403	0.375
G	445.4	498.2	479.3	473.5	403.2	386.0	410.6	450.3	466.2	453.8	453.1	445.5
es	23.03	23.13	23.06	21.48	20.14	18.68	18.33	20.64	23.73	24.26	23.47	23.04
ea	17.08	16.60	16.18	14.56	12.55	10.83	9.81	9.30	11.27	13.79	16.34	16.54
qef/L	5.86	6.32	5.83	5.21	3.87	3.26	3.46	4.07	4.98	5.48	5.85	5.83
Δ/γ	2.84	2.85	2.84	2.67	2.52	2.36	2.32	2.58	2.91	2.97	2.88	2.84
Ei	2.93	3.20	3.16	3.11	3.29	3.93	4.80	6.71	7.88	5.74	3.77	3.20
Eo (mm/dia)	5.1	5.5	5.1	4.6	3.7	3.5	3.9	4.8	5.7	5.5	5.3	5.1

Período FUT1 – Modelo ETA-Miroc RCP8.5

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Temperatura	23.1	23.5	23.6	22.1	20.8	19.7	19.8	21.7	23.9	24.4	23.6	23.5
Umidade	76.0	73.0	69.7	67.8	62.5	57.6	53.4	43.5	45.6	57.5	68.5	72.9
Insolação	4.8	6.3	6.9	8.0	7.7	8.0	8.0	8.0	6.9	5.5	5.2	4.8
Vento	1.7	1.7	1.5	1.4	1.4	1.8	2.1	2.2	2.4	2.0	1.9	1.7
Rt	968	932	850	743	637	590	620	702	814	903	956	974
hmáx	13.1	12.7	12.2	11.7	11.3	11.1	11.1	11.5	12	12.5	13	13.2
p	0.363	0.498	0.569	0.684	0.683	0.716	0.722	0.699	0.577	0.441	0.401	0.365
G	436.0	492.7	484.4	473.0	405.3	386.7	408.5	453.3	467.8	447.7	452.0	440.1
es	21.17	21.69	21.90	20.00	18.37	17.16	17.27	19.48	22.26	22.88	21.88	21.65
ea	16.08	15.83	15.26	13.57	11.49	9.89	9.22	8.47	10.14	13.15	14.99	15.77
qef/L	5.70	6.21	5.81	5.11	3.79	3.18	3.39	3.99	4.88	5.38	5.75	5.73
Δ/γ	2.63	2.69	2.71	2.51	2.33	2.19	2.21	2.45	2.75	2.82	2.71	2.69
Ei	2.56	2.87	3.08	2.85	3.00	3.68	4.61	6.45	7.58	5.35	3.69	2.89
Eo (mm/dia)	4.8	5.3	5.1	4.5	3.6	3.3	3.8	4.7	5.6	5.4	5.2	5.0

Período FUT2 – Modelo ETA-Miroc RCP8.5

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Temperatura	24.5	25.0	24.8	23.2	21.9	21.3	21.1	23.4	25.4	26.1	25.3	25.0
Umidade	75.1	72.4	72.1	70.0	64.1	57.2	52.0	43.8	47.7	56.2	69.0	73.0
Insolação	5.0	6.6	6.6	8.0	7.8	8.2	8.4	8.3	6.8	5.9	5.3	5.0
Vento	1.7	1.5	1.5	1.4	1.4	1.7	2.0	2.3	2.4	1.9	1.9	1.6
Rt	968	932	850	743	637	590	620	702	814	903	956	974
hmáx	13.1	12.7	12.2	11.7	11.3	11.1	11.1	11.5	12	12.5	13	13.2
p	0.383	0.518	0.542	0.686	0.690	0.742	0.760	0.722	0.571	0.469	0.411	0.379
G	447.6	503.9	471.1	474.1	407.9	395.6	422.1	462.3	464.7	462.5	457.2	447.7
es	23.09	23.71	23.46	21.33	19.75	18.96	18.75	21.57	24.33	25.41	24.14	23.81
ea	17.33	17.17	16.90	14.92	12.66	10.84	9.75	9.46	11.61	14.28	16.66	17.38
qef/L	5.90	6.43	5.82	5.27	3.93	3.31	3.50	4.14	5.00	5.59	5.92	5.91
Δ/γ	2.84	2.91	2.88	2.65	2.48	2.39	2.37	2.68	2.97	3.09	2.95	2.92
Ei	2.86	3.05	2.97	2.82	3.05	4.08	5.05	7.30	7.93	5.98	3.97	3.09
Eo (mm/dia)	5.1	5.6	5.1	4.6	3.7	3.5	4.0	5.0	5.7	5.7	5.4	5.2

Período FUT3 – Modelo ETA-Miroc RCP8.5

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Temperatura	26.4	26.4	26.4	25.3	23.9	22.9	22.6	25.1	27.9	28.8	27.8	26.7
Umidade	71.0	70.4	68.6	65.6	61.0	54.8	47.9	37.4	36.5	43.6	60.2	67.7
Insolação	5.2	6.5	7.1	8.2	7.7	8.0	8.5	8.5	7.4	6.0	5.4	5.0
Vento	1.7	1.6	1.4	1.4	1.4	1.8	2.2	2.3	2.4	2.0	1.8	1.6
Rt	968	932	850	743	637	590	620	702	814	903	956	974
hmáx	13.1	12.7	12.2	11.7	11.3	11.1	11.1	11.5	12	12.5	13	13.2
p	0.399	0.515	0.578	0.705	0.677	0.725	0.770	0.743	0.618	0.479	0.419	0.375
G	456.2	502.2	489.2	482.1	403.0	389.7	425.7	470.9	486.9	467.8	461.7	445.9
es	25.75	25.83	25.79	24.23	22.27	20.97	20.55	23.92	28.18	29.61	27.97	26.28
ea	18.28	18.19	17.69	15.90	13.57	11.49	9.83	8.94	10.30	12.91	16.84	17.80
qef/L	6.04	6.48	6.05	5.40	3.95	3.31	3.46	4.02	4.90	5.43	5.93	5.89
Δ/γ	3.13	3.13	3.13	2.96	2.75	2.61	2.57	2.93	3.38	3.53	3.36	3.18
Ei	3.65	3.62	3.61	3.60	3.76	4.80	6.28	9.06	11.26	9.18	5.66	4.08
Eo (mm/dia)	5.5	5.8	5.5	4.9	3.9	3.7	4.3	5.3	6.4	6.3	5.9	5.5

Período FUT1 – Modelo ETA-HadGEM RCP4.5

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Temperatura	24.9	24.7	24.6	23.7	21.4	19.9	20.1	22.3	24.0	24.4	23.9	24.0
Umidade	50.3	58.2	57.6	54.9	51.1	47.8	41.2	34.7	27.9	33.6	42.5	50.4
Insolação	5.8	6.2	7.1	7.8	7.8	8.2	8.3	8.7	7.2	5.9	5.6	5.2
Vento	1.9	1.8	1.7	1.5	1.5	1.8	2.1	2.2	2.4	2.2	2.1	2.0
Rt	968	932	850	743	637	590	620	702	814	903	956	974
hmáx	13.1	12.7	12.2	11.7	11.3	11.1	11.1	11.5	12	12.5	13	13.2
p	0.441	0.492	0.581	0.663	0.687	0.742	0.751	0.760	0.601	0.473	0.431	0.397
G	479.8	489.5	490.5	464.1	406.7	395.4	418.7	478.1	478.9	464.3	468.3	457.8
es	23.58	23.35	23.17	21.92	19.15	17.43	17.66	20.13	22.38	22.85	22.22	22.39
ea	11.85	13.59	13.33	12.03	9.79	8.34	7.27	6.98	6.25	7.67	9.45	11.29
qef/L	5.75	5.92	5.62	4.77	3.52	2.95	3.08	3.83	4.34	4.90	5.38	5.52
Δ/γ	2.89	2.87	2.85	2.72	2.41	2.22	2.25	2.52	2.77	2.82	2.75	2.77
Ei	6.27	5.06	4.89	4.56	4.30	4.76	5.95	7.77	10.12	8.85	7.30	6.05
Eo (mm/dia)	5.9	5.7	5.4	4.7	3.7	3.5	4.0	4.9	5.9	5.9	5.9	5.7

Período FUT2 – Modelo ETA-HadGEM RCP4.5

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Temperatura	25.5	25.6	24.9	24.0	22.0	20.8	20.8	23.0	25.1	25.6	25.6	24.9
Umidade	56.0	61.3	63.5	61.6	56.8	49.3	47.8	39.6	30.9	34.3	39.2	53.9
Insolação	5.6	6.3	6.9	7.6	7.8	8.3	8.4	8.6	7.3	6.1	5.8	5.3
Vento	1.9	1.7	1.7	1.5	1.5	1.8	2.1	2.2	2.4	2.1	2.0	1.9
Rt	968	932	850	743	637	590	620	702	814	903	956	974
hmáx	13.1	12.7	12.2	11.7	11.3	11.1	11.1	11.5	12	12.5	13	13.2
p	0.427	0.495	0.562	0.652	0.690	0.748	0.757	0.752	0.612	0.491	0.446	0.399
G	471.9	491.5	481.0	459.2	407.9	397.5	420.9	474.6	484.1	473.6	476.9	459.1
es	24.53	24.62	23.67	22.31	19.88	18.43	18.38	21.11	23.92	24.64	24.57	23.56
ea	13.73	15.08	15.04	13.75	11.29	9.08	8.78	8.36	7.39	8.46	9.63	12.69
qef/L	5.84	6.07	5.71	4.96	3.73	3.04	3.34	4.03	4.53	5.04	5.42	5.65
Δ/γ	3.00	3.00	2.90	2.76	2.49	2.33	2.33	2.63	2.93	3.01	3.00	2.89
Ei	5.69	4.69	4.23	3.89	3.94	4.90	5.52	7.53	10.47	9.37	8.32	5.86
Eo (mm/dia)	5.8	5.7	5.3	4.7	3.8	3.6	4.0	5.0	6.0	6.1	6.1	5.7

Período FUT3 – Modelo ETA-HadGEM RCP4.5

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Temperatura	26.3	26.2	25.8	24.7	23.1	21.9	21.5	24.0	25.5	26.3	26.0	26.1
Umidade	52.9	59.0	62.5	57.6	52.7	49.6	47.0	31.0	30.3	26.8	40.4	49.8
Insolação	5.7	6.4	6.9	7.8	7.8	8.3	8.4	8.8	7.3	6.1	5.7	5.3
Vento	1.9	1.8	1.6	1.5	1.4	1.8	2.1	2.3	2.5	2.1	2.1	1.9
Rt	968	932	850	743	637	590	620	702	814	903	956	974
hmáx	13.1	12.7	12.2	11.7	11.3	11.1	11.1	11.5	12	12.5	13	13.2
p	0.435	0.503	0.563	0.670	0.687	0.748	0.754	0.765	0.609	0.487	0.439	0.404
G	476.8	495.3	481.4	467.2	406.9	397.5	420.1	480.1	482.8	471.7	472.9	462.2
es	25.59	25.47	24.91	23.39	21.18	19.73	19.23	22.41	24.51	25.73	25.17	25.32
ea	13.54	15.03	15.57	13.46	11.16	9.78	9.03	6.95	7.42	6.89	10.16	12.60
qef/L	5.86	6.09	5.75	4.96	3.66	3.12	3.34	3.73	4.51	4.77	5.43	5.64
Δ/γ	3.11	3.10	3.04	2.87	2.64	2.48	2.42	2.77	2.99	3.12	3.06	3.08
Ei	6.49	5.28	4.48	4.57	4.49	5.21	5.93	9.30	11.14	10.94	8.45	6.72
Eo (mm/dia)	6.0	5.9	5.4	4.9	3.9	3.7	4.1	5.2	6.2	6.3	6.2	5.9

Período FUT1 – Modelo ETA-HadGEM RCP8.5

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Temperatura	25.2	24.8	25.3	24.3	22.8	21.7	21.3	22.7	24.0	24.8	24.3	24.7
Umidade	45.2	52.0	50.4	49.9	47.2	43.1	42.4	38.7	35.5	26.4	33.1	38.9
Insolação	6.0	6.7	7.6	8.0	7.8	8.3	8.3	8.7	7.4	6.2	5.9	5.7
Vento	2.0	2.0	1.8	1.6	1.5	1.8	2.1	2.2	2.5	2.2	2.2	2.1
Rt	968	932	850	743	637	590	620	702	814	903	956	974
hmáx	13.1	12.7	12.2	11.7	11.3	11.1	11.1	11.5	12	12.5	13	13.2
p	0.457	0.531	0.620	0.682	0.690	0.748	0.751	0.761	0.616	0.500	0.456	0.434
G	489.0	510.5	509.7	472.4	407.9	397.5	419.0	478.2	486.0	478.3	482.2	478.7
es	24.10	23.51	24.25	22.79	20.86	19.44	19.00	20.64	22.41	23.48	22.83	23.31
ea	10.88	12.23	12.22	11.37	9.84	8.39	8.06	7.99	7.95	6.20	7.56	9.07
qef/L	5.73	5.97	5.63	4.72	3.47	2.88	3.17	4.00	4.68	4.77	5.25	5.46
Δ/γ	2.95	2.89	2.97	2.81	2.60	2.45	2.40	2.58	2.77	2.88	2.81	2.87
Ei	7.34	6.18	6.10	5.45	5.05	5.65	6.19	7.59	9.30	10.26	8.89	8.20
Eo (mm/dia)	6.1	6.0	5.7	4.9	3.9	3.7	4.1	5.0	5.9	6.2	6.2	6.2

Período FUT2 – Modelo ETA-HadGEM RCP8.5

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Temperatura	27.0	26.3	26.4	26.0	24.3	23.5	23.1	24.9	26.0	26.5	26.7	27.0
Umidade	44.3	56.5	54.6	51.0	46.9	41.4	41.0	31.4	27.1	17.0	15.9	29.9
Insolação	5.9	6.6	7.4	8.1	7.8	8.3	8.4	8.8	7.5	6.5	6.3	5.9
Vento	2.0	1.8	1.8	1.5	1.5	1.8	2.1	2.3	2.5	2.3	2.2	2.1
Rt	968	932	850	743	637	590	620	702	814	903	956	974
hmáx	13.1	12.7	12.2	11.7	11.3	11.1	11.1	11.5	12	12.5	13	13.2
p	0.453	0.520	0.609	0.692	0.690	0.748	0.757	0.765	0.625	0.522	0.488	0.443
G	486.6	504.9	504.4	476.7	407.9	397.5	420.9	480.1	490.2	489.9	499.8	484.1
es	26.73	25.67	25.76	25.25	22.82	21.69	21.24	23.62	25.21	26.01	26.24	26.67
ea	11.84	14.51	14.05	12.87	10.70	8.99	8.70	7.43	6.84	4.41	4.16	7.98
qef/L	5.76	6.13	5.78	4.91	3.55	2.90	3.21	3.79	4.43	4.46	4.75	5.30
Δ/γ	3.23	3.12	3.13	3.07	2.81	2.69	2.64	2.90	3.07	3.15	3.18	3.22
Ei	8.13	5.84	5.94	5.73	5.53	6.56	7.22	9.82	12.02	13.16	13.11	10.52
Eo (mm/dia)	6.3	6.1	5.8	5.1	4.1	3.9	4.3	5.3	6.3	6.6	6.8	6.5

Período FUT3 – Modelo ETA-HadGEM RCP8.5

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Temperatura	29.6	29.3	29.2	28.2	27.0	25.9	25.3	26.9	28.5	29.0	29.1	29.5
Umidade	31.5	39.0	41.1	41.3	34.4	33.3	37.1	26.7	11.7	1.5	0.8	16.4
Insolação	6.0	7.0	7.7	8.1	7.8	8.3	8.2	8.8	7.7	6.5	6.4	6.0
Vento	2.0	1.9	1.9	1.6	1.6	1.9	2.1	2.4	2.6	2.3	2.3	2.1
Rt	968	932	850	743	637	590	620	702	814	903	956	974
hmáx	13.1	12.7	12.2	11.7	11.3	11.1	11.1	11.5	12	12.5	13	13.2
p	0.462	0.550	0.635	0.695	0.690	0.748	0.743	0.765	0.638	0.518	0.493	0.452
G	491.5	520.9	517.0	477.8	407.9	397.5	416.0	480.1	496.5	488.1	502.6	488.9
es	31.11	30.56	30.37	28.67	26.69	25.00	24.25	26.62	29.18	30.07	30.21	30.85
ea	9.78	11.92	12.48	11.83	9.19	8.32	8.99	7.11	3.41	0.44	0.23	5.06
qef/L	5.49	5.89	5.59	4.68	3.19	2.66	3.13	3.61	3.57	3.11	3.37	4.82
Δ/γ	3.68	3.63	3.61	3.43	3.22	3.05	2.97	3.22	3.48	3.58	3.59	3.66
Ei	11.88	10.12	9.53	8.13	8.30	8.91	8.81	12.21	17.22	18.11	18.16	14.93
Eo (mm/dia)	6.9	6.8	6.4	5.5	4.4	4.2	4.6	5.7	6.6	6.4	6.6	7.0