

## Investigação sobre o impacto de mudanças climáticas no volume de reservatórios para geração de energia

Gabriella de Sá Queen



Gabriella de Sá Queen

**INVESTIGAÇÃO SOBRE O IMPACTO DE MUDANÇAS  
CLIMÁTICAS NO VOLUME DE RESERVATÓRIOS PARA  
GERAÇÃO DE ENERGIA**

Trabalho apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina para a Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Farias Pereira

Florianópolis  
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Queen, Gabriella de Sá

Investigação sobre o impacto de mudanças climáticas no  
volume de reservatórios para geração de energia / Gabriella  
de Sá Queen ; orientador, Fábio Farias Pereira -  
Florianópolis, SC, 2016.

87 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.  
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Inclui referências

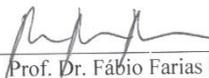
1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Projeções  
climáticas. 3. Energia hidrelétrica. 4. Modelagem  
hidrológica. I. , Fábio Farias Pereira. II. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia  
Sanitária e Ambiental. III. Título.

Gabriella de Sá Queen

**INVESTIGAÇÃO SOBRE O IMPACTO DE MUDANÇAS  
CLIMÁTICAS NO VOLUME DE RESERVATÓRIOS PARA  
GERAÇÃO DE ENERGIA**

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – TCC II.

Florianópolis, 13 de julho de 2016.



Prof. Dr. Fábio Farias Pereira  
Orientador

**Banca Examinadora:**



Prof.ª Dr.ª Nadia Bernardi Bonumá  
Membro da banca



Eng.ª Dr.ª Patrícia Kazue Uda  
Membro da banca



*“Með suð í eyrum við spilum endalaust.”*  
(Sigur Rós)

## RESUMO

O presente estudo buscou investigar os potenciais impactos de mudanças climáticas no volume de cinco usinas hidrelétricas (UHEs) localizadas na bacia do rio Chopim (BRC), no estado do Paraná. A abordagem empregada baseou-se na utilização de projeções de precipitação geradas pelo modelo climático global (GCM) HadCM3 como entrada para o modelo hidrológico distribuído MGB-IPH, a fim de estimar vazões para os cenários A2 e B1, propostos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Dentre os principais resultados observados, destacou-se a considerável disparidade entre os comportamentos intra-anuais das precipitações médias mensais observadas e projetadas, com projeções até 74% menores que a média observada no mês de julho. Tal desarmonia teve grande influência nas vazões simuladas para os cenários analisados, causando reduções percentuais da  $Q_{95}$  na ordem de 80% para os pontos das UHEs. De maneira geral, verificou-se que o cenário A2 apresentou períodos de estiagem mais longos que o cenário B1, resultado que suporta a teoria que incrementos na temperatura terrestre aumentariam também a probabilidade de eventos extremos mais frequentes e intensos. Em contrapartida, o cenário A2 também proporcionou maiores valores de energia firme do que o cenário B1, indicando a possibilidade de suprir maiores demandas energéticas durante seus períodos críticos. Adicionalmente, identificou-se uma tendência do cenário B1 necessitar de reservatórios de menores volumes para garantir  $1 \text{ MW}_{\text{med}}$  de energia em comparação com o cenário A2.

**Palavras-chave:** Projeções climáticas; Energia hidrelétrica; Modelagem hidrológica.



## ABSTRACT

This study investigated potential climate change impacts on the volume of five hydroelectric reservoirs located in the Chopim river basin, in Paraná, Brazil. Rainfall projections generated by the HadCM3 global climate model (GCM) were used as input to the MGB-IPH distributed hydrologic model in order to simulate the streamflow for climate change scenarios A2 and B1, proposed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Results showed significant dissimilarities in the intra-annual variabilities of observed and projected rainfall data, with average monthly projections as much as 74% lower than the observed average for the month of July. This incongruity substantially affected simulated streamflow for all scenarios analyzed, causing minimum river flows in reservoir locations to suffer an 80% decrease, approximately. Scenario A2 presented longer drought periods than scenario B1, supporting the theory that increasing temperatures would likely prompt more frequent and intense extreme events. Notwithstanding, scenario A2 also showed greater values of firm capacity, suggesting that it would be able to meet higher energy demands than scenario B1 even during its droughts. Furthermore, scenario B1 displayed a tenuous tendency to require smaller reservoir storage volumes to supply 1 MWh of energy in comparison to scenario A2.

**Keywords:** Climate projections; Hydropower; Hydrologic modeling.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Anomalias nas temperaturas terrestres. ....	4
Figura 2. Comparação de simulações com e sem a consideração de gases de efeito estufa. ....	5
Figura 3. Diagrama de estratégias para o desenvolvimento sustentável. ....	6
Figura 4. Fluxograma da abordagem geralmente utilizada em estudos de impacto de mudanças climáticas nos recursos hídricos. ....	10
Figura 5. Comparação entre precipitações projetadas pelos GCMs e medida para o cenário atual na bacia do rio Uruguai. ....	12
Figura 6. Classificação de modelos hidrológicos segundo a maneira como lidam com aleatoriedade, variabilidade espacial e variabilidade temporal de fenômenos hidrológicos. ....	14
Figura 7. Caracterização de bacia com uso de dados SIG. ....	15
Figura 8. Fluxograma geral das etapas deste estudo. ....	18
Figura 9. Localização da área de estudo. ....	21
Figura 10. Complexo de UHEs da bacia do rio Chopim. ....	22
Figura 11. Localização das estações fluviométricas, pluviométricas e meteorológicas utilizadas. ....	28
Figura 12. Fluxograma da rotina do MATLAB para preenchimento de falhas por IQD. ....	31
Figura 13. Gráfico de Gantt dos anos consistidos para as estações fluviométricas estudadas. ....	32
Figura 14. Sub-bacias delimitadas e usinas hidrelétricas de energia (UHEs) presentes na área estudada. ....	34
Figura 15. Discretização das unidades de resposta hidrológica. ....	37
Figura 16. Esquema ilustrativo do processo de cálculo do volume de regularização, mostrando o polígono formado pela linha da vazão afluente acumulada mensal ( $Q_{\text{afluente}}$ ) e a linha da vazão de referência ( $Q_{\text{mit}}$ ) durante o período crítico. ....	42
Figura 17. Médias diárias mensais de precipitação na área de estudo para cada cenário. ....	43
Figura 18. Correlação das vazões observadas e simuladas no período de validação e a reta de referência correspondente a pontos de simulação perfeita. Em detalhe: valores dos coeficientes de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e áreas de drenagem referentes às estações fluviométricas estudadas. ....	46
Figura 19. Comparação das curvas de permanência dos valores observados e simulados no período de validação. ....	48
Figura 20. Exemplo de comparação entre hidrograma observado ( $Q_{\text{obs}}$ ) e simulado ( $Q_{\text{sim}}$ ) no período de validação (1986-1990). ....	49

Figura 21. Representação dos períodos críticos e polígonos utilizados para cálculo do volume de regularização para os cenários A2_01 e A2_02 na UHE Salto Grande. ....	55
Figura 22. Evolução da relação $V/E_f$ para cada um dos períodos simulados. Obs.: ponto de 1988-2007 pertencente ao cenário SIM_OBS, sendo somente um parâmetro de referência na comparação dos cenários A2 e B1. ....	57
Figura 23. Relação do volume de regularização adotado com o número de falhas que ocorreriam no período simulado.....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Projeções de variação de temperatura ( $\Delta T$ ) e nível do mar no século XXI. ....	7
Tabela 2. Exemplos de modelos climáticos globais (GCMs). ....	11
Tabela 3. Principais modelos regionais climáticos para América do Sul. ....	13
Tabela 4. Exemplos de modelos hidrológicos físicos. ....	16
Tabela 5. Tipos de vegetação e solo presentes na BRC, suas respectivas áreas de cobertura ( $A_{\text{tipo}}$ ) e parcelas percentuais em relação a área total da bacia ( $A_{\text{tipo}}/A_{\text{tot}}$ ). ....	19
Tabela 6. Relação de UHEs instaladas na bacia do rio Chopim. ....	20
Tabela 7. Parâmetros fixos do modelo MGB-IPH. ....	24
Tabela 8. Parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH. ....	25
Tabela 9. Relação de dados brutos sistema de informação geográfica matriciais (M) e vetoriais (V) utilizados. ....	26
Tabela 10. Relação das estações fluviométricas, pluviométricas e meteorológicas utilizadas e suas respectivas longitudes, latitudes. ....	27
Tabela 11. Descrição das sub-bacias de interesse, incluindo suas respectivas áreas ( $A_{\text{sb}}$ ) e parcelas percentuais em relação a área total da BRC ( $A_{\text{sb}}/A_{\text{tot}}$ ). ....	35
Tabela 12. Descrição dos tipos de solo reclassificados e suas respectivas áreas de cobertura ( $A_{\text{sol}}$ ) e parcelas percentuais em relação a área total da BRC ( $A_{\text{sol}}/A_{\text{tot}}$ ). ....	35
Tabela 13. Descrição dos tipos de vegetação reclassificados e suas respectivas áreas de cobertura ( $A_{\text{veg}}$ ) e parcelas percentuais em relação a área total da BRC ( $A_{\text{veg}}/A_{\text{tot}}$ ). ....	36
Tabela 14. Descrição das URHs definidas, além de suas respectivas áreas de cobertura ( $A_{\text{u}}$ ) e parcelas percentuais em relação a área total da BRC ( $A_{\text{u}}/A_{\text{tot}}$ ). ....	36
Tabela 15. Parâmetros calibráveis das URH utilizados nas simulações. ....	38
Tabela 16. Parâmetros calibráveis das sub-bacias utilizados nas simulações. ....	38
Tabela 17. Classificação da performance da simulação de vazão segundo coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE). ....	39
Tabela 18. Variações percentuais das precipitações mensais médias projetadas pelo modelo HadCM3 para cada cenário em relação à média dos valores observados nas estações pluviométricas estudadas (OBS). ....	44
Tabela 19. Comparação entre as vazões médias ( $Q_{\text{mlt}}$ ), máximas ( $Q_{\text{max}}$ ), mínimas ( $Q_{\text{min}}$ ), e de 95% de permanência ( $Q_{95}$ ) das séries observadas	

(OBS) e simuladas (SIM) e suas respectivas variações percentuais ( $\Delta Q$ ). .....	47
Tabela 20. Variações percentuais das vazões médias de longo período ( $Q_{mlt}$ ), máximas ( $Q_{max}$ ), mínimas ( $Q_{min}$ ), e de 95% de permanência ( $Q_{95}$ ) das séries simuladas para os cenários climáticos A2 e B1 em relação aos valores do cenário SIM_OBS.....	51
Tabela 21. Estimativa das energias firmes ( $E_f$ ) das UHEs estudadas, expressas em $MW_{med}$ , e suas variações percentuais em relação ao cenário SIM_OBS. ....	52
Tabela 22. Volumes para garantia da energia firme calculada para cada cenário, expressos em $hm^3$ . ....	54
Tabela 23. Duração dos períodos críticos ( $\Delta t_{critico}$ ), expressas em meses, e relações volume/energia ( $V/E_f$ ), expressas em $hm^3/MW_{med}$ , referentes às UHEs e cenários estudados. ....	56

## LISTA DE SIGLAS

<b>ANA</b>	Agência Nacional de Águas
<b>ANEEL</b>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<b>BCR</b>	Bacia do rio Chopim
<b>CGH</b>	Central Geradora Hidrelétrica
<b>CPTEC</b>	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
<b>GCM</b>	Modelo Climático Global
<b>GEEs</b>	Gases de Efeito Estufa
<b>IBGE</b>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<b>INPE</b>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
<b>IPCC</b>	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
<b>IPH</b>	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
<b>IQD</b>	Inverso do Quadrado da Distância
<b>NSE</b>	Coefficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe
<b>ONS</b>	Operador Nacional do Sistema Elétrico
<b>PCH</b>	Pequena Central Hidrelétrica
<b>RCM</b>	Modelo Climático Regional
<b>SIG</b>	Sistemas de Informação Geográfica
<b>SIMEPAR</b>	Sistema Meteorológico do Paraná
<b>SIN</b>	Sistema Interligado Nacional
<b>SRTM</b>	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
<b>UHE</b>	Usina Hidrelétrica de Energia
<b>URH</b>	Unidade de Resposta Hidrológica



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	OBJETIVOS .....	2
1.1.1	Objetivo geral.....	2
1.1.2	Objetivos específicos.....	2
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>3</b>
2.1	MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	3
2.1.1	Cenários de emissões .....	6
2.1.2	Impactos em aproveitamentos hidrelétricos .....	8
2.2	MODELAGEM NUMÉRICA.....	9
2.2.1	Modelagem climática .....	10
2.2.2	Modelagem hidrológica.....	13
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>17</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDO .....	19
3.2	MODELO MGB-IPH .....	23
3.3	DADOS BRUTOS .....	26
3.3.1	Dados geográficos .....	26
3.3.2	Séries históricas.....	27
3.3.3	Projeções climáticas .....	29
3.4	PRÉ-PROCESSAMENTO DE DADOS.....	29
3.4.1	Preenchimento de falhas de séries pluviométricas .....	30
3.4.2	Análise de consistência de séries fluviométricas.....	31
3.4.3	Correção de viés das projeções climáticas .....	33
3.4.4	Discretização da bacia.....	33
3.5	VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO.....	38
3.6	AVALIAÇÃO DOS CENÁRIOS CLIMÁTICOS .....	40
3.7	LIMITAÇÕES DO ESTUDO .....	42
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>43</b>

4.1	ALTERAÇÕES NO REGIME PLUVIOMÉTRICO.....	43
4.2	VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO .....	45
4.3	AVALIAÇÃO DOS CENÁRIOS CLIMÁTICOS .....	50
4.3.1	Alterações nas vazões naturais afluentes .....	50
4.3.2	Estimativa das energias firmes .....	52
4.3.3	Volumes de regularização .....	53
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>59</b>
5.1	RECOMENDAÇÕES.....	61
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>62</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Diante da dificuldade em firmar acordos voltados à medidas mitigatórias relacionadas ao fenômeno das mudanças climáticas entre países, observa-se uma crescente preocupação da comunidade científica com este tema nas últimas décadas (REIS e SILVA, 2016). Visando fundamentar tais discussões, estudos recentes analisam as abundantes evidências do aumento acentuado da temperatura terrestre, considerando a sua relação com o incremento progressivo das emissões de gases do efeito estufa ao longo dos anos (EGGLETON, 2012).

Diante desta situação, percebe-se a relevância de investigações sobre como encarar os variados e complexos desafios impostos por este fenômeno. Desde o aumento da probabilidade de desastres naturais, da intensidade de eventos extremos de chuva ou de períodos prolongados de seca, cada possível efeito do aquecimento global traz consigo uma cadeia de variadas consequências naturais, sociais e econômicas (KARAMOUZ *et al.*, 2012).

Um exemplo pertinente na realidade brasileira são os efeitos das mudanças climáticas no setor de energia hidrelétrica, uma vez que esta compõe aproximadamente 61% da matriz energética do país (ANEEL, 2015a). A geração de energia hidráulica possui uma íntima relação com o clima e o ciclo hidrológico (WOLFSON, 2008). Sendo assim, apresenta uma preocupante vulnerabilidade às mudanças climáticas.

Do lado da demanda, tem-se o fato de que temperaturas extremas geralmente levam a um aumento do consumo de energia elétrica, devido ao maior uso de aparelhos refrigeradores ou aquecedores (GUÉGAN *et al.*, 2012). Do lado da oferta, períodos prolongados de seca podem acarretar em uma redução das vazões dos rios, conseqüentemente diminuindo o potencial hidráulico para geração de energia. Ademais, temperaturas mais elevadas também contribuem para maiores perdas por evaporação nos reservatórios das usinas hidrelétricas, constituindo ainda mais um fator dificultante nesta situação (MADANI *et al.*, 2014).

É evidente, portanto, a importância da avaliação destes potenciais impactos a fim de garantir que a demanda de energia sempre seja suprida pelo parque gerador, mesmo durante períodos críticos. Segundo GUILHON *et al.* (2007), estudos hidroclimáticos são essenciais para o planejamento e coordenação de operações de geração de energia hidrelétrica. Neste contexto, o emprego de modelos hidrológicos em conjunto com projeções climáticas é uma estratégia amplamente utilizada na busca de um melhor entendimento das ações recíprocas entre clima e hidrologia (TUCCI, 1998; CATALDI, MACHADO,

GUILHON, *et al.*, 2007; COLLISCHONN, ALLASIA, TUCCI, *et al.*, 2007).

O presente estudo buscou contribuir para o avanço do conhecimento nesta área ao investigar os possíveis efeitos de mudanças climáticas no volume de cinco reservatórios utilizados para geração de energia localizados na bacia do rio Chopim, situada no estado do Paraná. Com este intuito, foram utilizadas projeções de precipitação geradas pelo modelo climático global (GCM) HadCM3 como entrada para o modelo hidrológico distribuído MGB-IPH, a fim de estimar vazões para os cenários A2 e B1, propostos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

A avaliação dos impactos simulados para os cenários em questão baseou-se em três critérios, os quais visaram oferecer diferentes perspectivas acerca do problema estudado: (1) alterações nas vazões naturais afluentes aos reservatórios; (2) estimativa de energias firmes; e (3) volumes de regularização necessários para garantia da energia firme de cada cenário. Por fim, buscou-se ainda ilustrar como este tipo de estudo pode amparar a tomada de decisões e o planejamento estratégico de empreendimentos hidrelétricos em bacias hidrográficas.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 **Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho consistiu em investigar os potenciais impactos de mudanças climáticas no volume de cinco reservatórios para geração de energia situados na bacia do rio Chopim, estado do Paraná.

### 1.1.2 **Objetivos específicos**

- a. Analisar alterações no regime pluviométrico na bacia do rio Chopim a partir de projeções de um modelo climático global para diferentes cenários de mudanças climáticas;
- b. Reproduzir os processos hidrológicos da bacia do rio Chopim utilizando um modelo hidrológico distribuído;
- c. Estimar as vazões naturais afluentes ao complexo de usinas hidrelétricas na bacia do rio Chopim sob regimes pluviométricos influenciados por mudanças climáticas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica deste trabalho envolve três temas principais: as mudanças climáticas, seus impactos em aproveitamentos hidrelétricos e a modelagem numérica. Neste item, primeiramente são discutidas as mudanças climáticas e seus potenciais impactos na sociedade moderna, em especial no setor hidrelétrico. Em seguida, é explorado o tema da modelagem numérica aplicada à hidrologia e ao clima e a importância desta ferramenta em estudos englobando os tópicos previamente mencionados.

### 2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Para entender o que são as mudanças climáticas, é necessário primeiramente definir o que é o clima, para somente depois explorar os fatores determinantes dos processos de mudança. O clima descreve as condições médias prevalentes na atmosfera (temperatura, umidade, radiação, entre outros) e seus efeitos na superfície terrestre. Sendo assim, o clima difere-se do chamado “tempo”, que por sua vez, diz respeito às condições imediatas e locais. O tempo pode sofrer grandes variações dia a dia e até de hora a hora, o clima, por outro lado, é a expressão média do tempo e varia em escalas temporais maiores (WOLFSON, 2008).

Alterações no clima não são algo novo. No entanto, o conceito de “mudanças climáticas” vem ganhando cada vez mais atenção da comunidade científica, uma vez que tem sido observada uma série de evidências que levam à conclusão que o planeta está de fato se aquecendo em alta velocidade (EGGLETON, 2012; IPCC, 2015a).

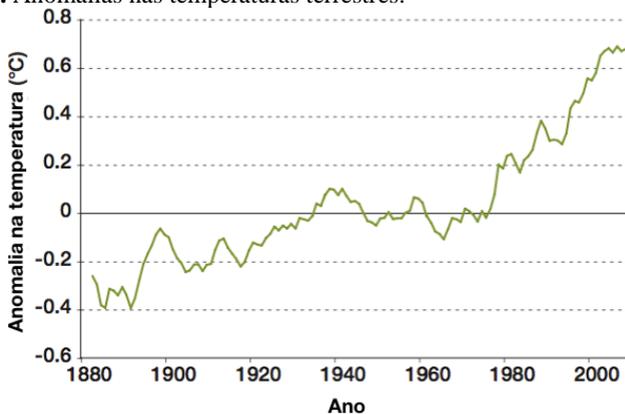
Segundo DESSLER (2011), existem diversos caminhos para a verificação do aquecimento da Terra:

- Medição de temperatura na superfície terrestre;
- Medição de temperatura por satélite;
- Medição de temperatura das massas oceânicas;
- Monitoramento de derretimento de geleiras;
- Monitoramento do aumento do nível do mar.

É necessário compreender que todos os caminhos expostos levam a resultados interconectados. Por exemplo, com o aumento da temperatura, o gelo se derrete, acumulando mais água nos oceanos. Além disso, oceanos com temperaturas mais elevadas observam a expansão da água, contribuindo para o aumento do nível do mar.

Neste contexto, o *NASA Goddard Institute for Space Studies* conclui que, considerando uma temperatura média de 14°C no período de 1951-1980, é possível verificar um aquecimento de 0,4°C de 1900-1940, seguido por um aquecimento de 0,7°C de 1965 a 2011. A Figura 1 apresenta um gráfico, ilustrando as anomalias de temperatura no último século segundo medições da instituição citada. Segundo o levantamento feito por EGGLETON (2012), outras instituições renomadas em diversos pontos do globo chegaram às mesmas conclusões, incluindo o *British Met Office Hadley Climatic Research Unit* e a *Japan Meteorological Agency*.

**Figura 1.** Anomalias nas temperaturas terrestres.



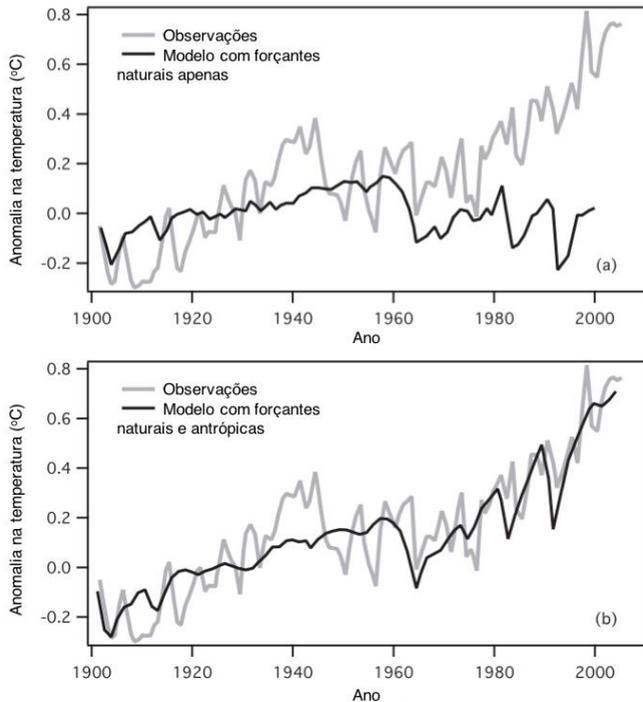
Fonte: EGGLETON (2012).

Outra evidência observada consiste na diminuição sistemática de geleiras, a qual tem sido medidas por centenas de anos. Uma análise dos dados recolhidos mostra que das 144 geleiras monitoradas entre 1900 e 1980, somente 2 avançaram e as 142 restantes sofreram retração (DESSLER, 2011). Ainda, pode-se citar o aumento do nível do oceano. Enquanto o nível do oceano se elevava a uma taxa de aproximadamente 1,5 mm/ano durante o século XX, nas últimas décadas, ele tem crescido a uma taxa em torno de 1,8 mm/ano. Com a expansão térmica e degelo, essa taxa chegou a 3,1 mm/ano no período de 1993 a 2003 (DESSLER, 2011).

Apesar de existirem causas naturais que contribuem para o aquecimento da Terra, as mudanças rápidas e bruscas observadas nas últimas décadas têm sido associadas à emissão de gases do efeito estufa (GEEs), como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso

( $N_2O$ ), entre outros (ARCHER e RAHMSTORF, 2009). Neste sentido, é interessante observar a Figura 2, trazida por DESSLER (2011), a qual mostra na parte de cima uma simulação climática considerando apenas forçantes naturais e, na parte de baixo, uma simulação levando em conta o aumento de emissões de GEEs devido à atividade humana. Verifica-se que a segunda simulação oferece resultados significativamente mais próximos dos dados efetivamente observados.

**Figura 2.** Comparação de simulações com e sem a consideração de gases de efeito estufa.

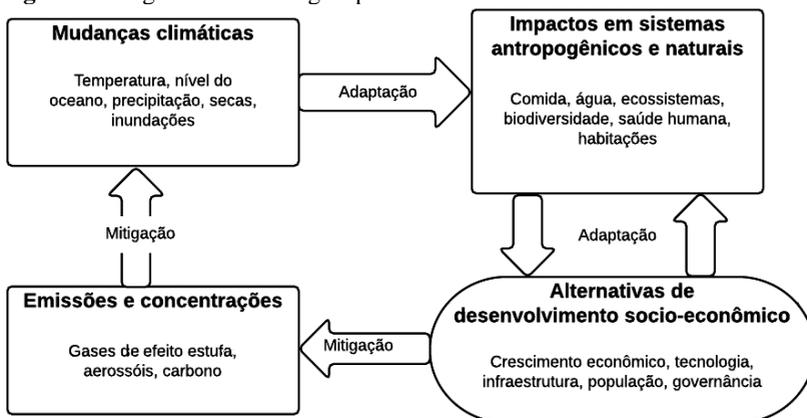


Fonte: DESSLER (2011).

As consequências das mudanças climáticas são variadas e apresentam relações complexas com os diversos setores da sociedade. Por exemplo, o aumento da frequência e intensidade de eventos extremos de temperatura, chuvas ou secas, apresentam riscos de desastres naturais como inundações, além de ameaçar a agricultura, produção de energia e disponibilidade de água potável em períodos prolongados de seca (DESSLER, 2011).

A partir das consequências citadas, pode-se derivar não só questões econômicas, como também questões sociais. Sendo assim, a abordagem do tema das mudanças climáticas deve envolver estratégias holísticas e abrangentes, a fim de contemplar todos os aspectos associados a ele. A Figura 3 apresenta um diagrama ilustrativo das relações de estratégias de mitigação e adaptação para lidar com questão climática em busca de um desenvolvimento sustentável.

**Figura 3.** Diagrama de estratégias para o desenvolvimento sustentável.



Adaptado de: KARAMOUZ et al. (2012).

### 2.1.1 Cenários de emissões

Em busca de melhor preparar a humanidade para o enfrentamento dos desafios impostos pelas mudanças climáticas, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) apresenta quatro possíveis cenários de emissões de GEEs para projeções climáticas. Estes cenários levam em consideração as possíveis linhas de desenvolvimento da humanidade até 2100 (IPCC, 2000).

O **cenário A1** procura descrever um futuro onde ocorre um rápido crescimento econômico, desenvolvimento de tecnologias novas e mais eficientes e com uma população que cresça até o meio do século e depois entre em declínio. Seria observada uma maior interação entre regiões e culturas, resultando em uma redução das diferenças regionais e poder monetário per capita. Este cenário é destrinchado em três alternativas de desenvolvimento de tecnologias no setor energético: (1) foco em combustíveis fósseis (A1FI); (2) foco em fontes de energia alternativas (A1T); e (3) equilíbrio entre as fontes de energia (A1B).

Já o **cenário A2** descreve um mundo altamente heterogêneo, onde a tendência é a preservação das identidades regionais. Desta forma, possui padrões de fertilidade que convergem de maneira lenta, resultando em uma população crescente durante todo o século. O desenvolvimento econômico neste caso tem orientação regional e apresenta padrões de crescimento econômico per capita e evoluções tecnológicas mais fragmentadas e lentas em comparação com outros cenários.

O **cenário B1** é similar ao cenário A1, uma vez que ilustra um mundo cada vez mais convergente, e com o mesmo comportamento de crescimento populacional, que entra em declínio a partir da metade do século. No entanto, a principal diferença se dá pelo fato de apresentar rápidas mudanças em direção a uma sociedade com menor demanda de materiais e introdução de tecnologias limpas e eficientes.

Finalmente, o **cenário B2** representa um futuro onde haveria ênfase em soluções locais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental. É um mundo onde a população cresceria continuamente com uma taxa inferior à do cenário A2, desenvolvimento econômico intermediário e mudanças tecnológicas mais lentas e menos diversificadas do que nos cenários A1 e B1.

A fim de proporcionar um melhor entendimento dos cenários mencionados, a Tabela 1 apresenta as projeções de variação de temperatura e nível do mar no século XXI para cada situação.

**Tabela 1.** Projeções de variação de temperatura ( $\Delta T$ ) e nível do mar no século XXI.

Cenário	$\Delta T^1$ [°C]	Faixa de $\Delta T$ [°C]	Aumento de nível do oceano <sup>2</sup> [m]
Sem mudança <sup>3</sup>	0,6	0,3 – 0,9	N/D
<b>B1</b>	1,8	1,1 – 2,9	0,18 – 0,38
<b>A1T</b>	2,4	1,4 – 3,8	0,20 – 0,45
<b>B2</b>	2,4	1,4 – 3,8	0,20 – 0,43
<b>A1B</b>	2,8	1,7 – 4,4	0,21 – 0,48
<b>A2</b>	3,4	2,0 – 5,4	0,23 – 0,51
<b>A1FI</b>	4,0	2,4 – 6,4	0,26 – 0,59

Fonte: ARCHER e RAHMSTORF (2009).

<sup>1</sup> Considerando temperaturas de 2090-2099 comparadas ao período de 1980-1999.

<sup>2</sup> Considerando os níveis de 2090-2099 comparados com o período de 1980-1999.

<sup>3</sup> Supondo concentrações do ano 2000 constantes.

Como pode ser observado, o cenário B1 é o mais otimista, enquanto o cenário A1FI apresenta as projeções mais preocupantes do ponto de vista do aumento da temperatura terrestre. Entretanto, é importante ressaltar que não existe um cenário que seja mais provável do que os outros (IPCC, 2000).

### 2.1.2 Impactos em aproveitamentos hidrelétricos

A energia hidrelétrica é definida como a energia derivada do fluxo da água, a qual pode ser armazenada e utilizada para diversos fins (EL BASSAM *et al.*, 2013). Essa forma de energia constitui a maior fração da matriz energética brasileira, representando 61,6% da potência instalada no Brasil (ANEEL, 2015a).

Dado o mecanismo de geração deste tipo de energia, as vazões afluentes às usinas hidrelétricas são fator crítico na avaliação de viabilidade desses empreendimentos. Sendo assim, exigem estudos hidrológicos detalhados não só na fase de dimensionamento e aprovação, como também na sua operação e planejamento (CATALDI, MACHADO, SILVA, *et al.*, 2007; CATALDI, MACHADO, GUILHON, *et al.*, 2007; LUCENA, 2010). Neste contexto, ressalta-se a Lei nº 9.987, de 17 de julho de 2000, que introduz o conceito de reserva de disponibilidade hídrica com o fim de garantir a disponibilidade hídrica requerida para aproveitamentos hidrelétricos de potência instalada acima de 1 MW para licitar concessão ou autorizar o uso do potencial de energia hidráulica em corpo hídrico de domínio da União (ANA, 2009).

Os pontos de geração de energia hidrelétrica de pequeno, médio e grande porte podem ser classificados em três categorias (ANEEL, 2008; 2015b):

- **Central Geradora Hidrelétrica (CGH):** até 3 MW de potência instalada;
- **Pequena Central Hidrelétrica (PCH):** entre 3 MW e 30 MW de potência instalada;
- **Usina Hidrelétrica de Energia (UHE):** mais de 30 MW de potência instalada.

Segundo SCHAEFFER *et al.* (2008), o impacto das mudanças climáticas na geração de energia hidrelétrica se daria pelas alterações nos comportamentos médios de vazões dos rios que produzem energia, ou ainda devido a maior probabilidade de eventos extremos, como

tempestades e secas, prejudicando a operação das usinas. No entanto, estas consequências apresentam-se de forma intrincada.

Em relação à oferta, a redução de vazão de um determinado rio não representaria necessariamente uma redução proporcional na geração de energia, uma vez que os reservatórios agem como amortecedores. Porém, deve-se considerar também que uma elevação de temperatura acarretaria numa maior taxa de evaporação da água armazenada nos reservatórios (SCHAEFFER *et al.*, 2008).

Pelo lado da demanda, deve-se notar que temperaturas extremas tendem a causar um aumento no uso de aparelhos refrigeradores ou aquecedores, elevando a procura por energia (GUÉGAN *et al.*, 2012). A relação flutuante entre demanda e oferta, por sua vez, afeta o preço da energia comercializada, aumentando ainda mais a complexidade do problema (MADANI *et al.*, 2014).

Neste sentido, diversos autores salientam a importância de estudos das interações acima citadas, a fim de produzir subsídios para a tomada de decisões e planejamento a curto e longo prazo, garantindo que o parque gerador possa suprir as demandas energéticas mesmo durante períodos críticos de afluência (TUCCI *et al.*, 2003; GUILHON *et al.*, 2007; LIMA *et al.*, 2014).

## 2.2 MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem numérica consiste em uma ferramenta onde são empregados algoritmos e equações para tentar representar um sistema. Neste sentido, o ambiente terrestre pode ser encarado como um conjunto de sistemas trabalhando juntos, com interações e relações complexas entre si. Segundo KARAMOUZ *et al.* (2012), os sistemas de maneira geral apresentam as seguintes características:

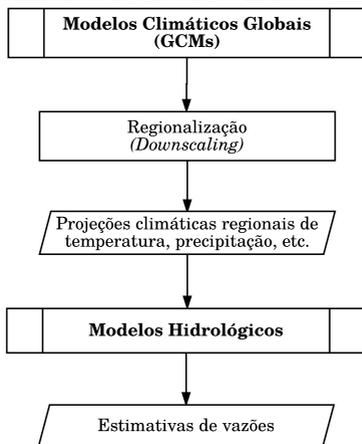
- Possuem uma ordem, ou seja, são um conjunto de elementos os quais se organizam de determinada maneira e tem relações e conexões entre si;
- São generalizações, abstrações, ou idealizações do que acontece na realidade;
- Para funcionarem, necessitam de alguma força ou fonte de energia;
- São identificados por elementos, atributos, e suas relações dentro dos limites desse sistema.

Fica, pois, claro que a modelagem numérica é uma ferramenta de extrema importância, uma vez que a partir de uma boa representação de

um sistema, é possível a realização de simulações e estimativas sob parâmetros variáveis de maneira que se aproximem da realidade. Os resultados destas simulações, por sua vez, permitem chegar a conclusões relevantes não só para monitoramento e operação de variados setores da sociedade, como também para o planejamento futuro da gestão de recursos naturais.

No contexto deste trabalho, é evidente a íntima relação entre as mudanças climáticas e o ciclo hidrológico, sendo útil pensar nesta interação a partir do sistema hidroclimático. Neste sentido, observa-se que a abordagem geralmente empregada em estudos que consideram o impacto da variabilidade climática nos recursos hídricos baseia-se na acoplagem de modelos climáticos e hidrológicos, como representado na Figura 4 (SILVA, 2005; CATALDI, MACHADO, GUILHON, *et al.*, 2007; COLLISCHONN, ALLASIA, TUCCI, *et al.*, 2007; GUILHON *et al.*, 2007; LIMA e LALL, 2010; LIMA *et al.*, 2014; MOHOR *et al.*, 2015).

**Figura 4.** Fluxograma da abordagem geralmente utilizada em estudos de impacto de mudanças climáticas nos recursos hídricos.



Adaptado de: LUCENA (2010).

### 2.2.1 Modelagem climática

Para melhor entendimento do comportamento do clima, foram desenvolvidos os modelos climáticos globais (GCMs). Tais modelos incorporam os princípios de conservação de momento, massa, energia e água em todos os seus estados. As equações Newtonianas de momento

são aplicadas às massas de ar, as leis da termodinâmica e radiação para a energia solar incidente e o calor emitido, além das equações relacionadas aos gases atmosféricos (BURROUGHES, 2007).

Dentre as diversas aplicações dos modelos climáticos, vale citar a simulação do clima passado, a simulação do clima presente (passado recente), estudos de sensibilidade, previsão de variabilidade climática de curto prazo e projeções futuras (LIMA *et al.*, 2014). A Tabela 2 apresenta alguns exemplos de GCMs, como apresentado por KARAMOUZ *et al.* (2012).

**Tabela 2.** Exemplos de modelos climáticos globais (GCMs).

Nome	País	Organização	Resolução
<b>CSIRO-Mk3.0</b>	Austrália	<i>CSIRO Atmospheric Research</i>	192 x 96
<b>UKMO-HadCM3</b>	Reino Unido	<i>Hadley Centre for Climate Prediction and Research</i>	96 x 73
<b>ECHAM5_MPI-OM</b>	Alemanha	<i>Max Planck Institute for Meteorology</i>	192 x 96
<b>GFDL-CM2.1</b>	Estados Unidos	<i>Geophysical Fluid Dynamics Laboratory</i>	144 x 90
<b>GISS-ER</b>	Estados Unidos	<i>NASA/Goddard Institute for Space Shuttles</i>	72 x 46
<b>UKMO-HadGEM1</b>	Reino Unido	<i>Hadley Centre for Climate Prediction and Research</i>	192 x 145

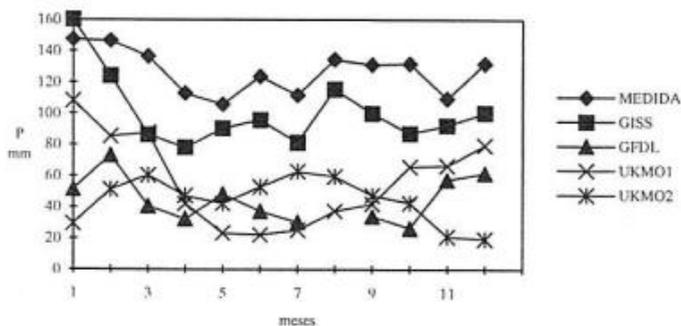
Adaptado de: KARAMOUZ *et al.* (2012).

Um aspecto importante na modelagem climática é a resolução espacial dos modelos. Quanto maior a resolução, melhor a representação do sistema. No entanto, com resoluções menores, pode-se identificar padrões gerais com mais facilidade (KARAMOUZ *et al.*, 2012). Sendo assim, para os modelos globais simularem vários séculos e detectarem as mudanças globais, precisam utilizar grades regulares de tamanhos grandes, ou baixa resolução espacial. Os modelos HadCM3 e ECHAM/OPA, por exemplo, possuem resolução na ordem de 200 a 300 km (LIMA *et al.*, 2014). No entanto, estudos de impactos geralmente possuem caráter regional ou local, necessitando de um maior detalhamento (ADAM *et al.*, 2015).

O estudo do impacto de mudanças climáticas na bacia do rio Uruguai apresentado em TUCCI (1998), por exemplo, ilustra a dificuldade de trabalhar com projeções de GCMs em escala local. Como exposto na Figura 5, o trabalho mencionado verificou discrepâncias acentuadas entre as projeções dos diferentes GCMs e a precipitação

medida no local, a qual foi significativamente subestimada pelos modelos utilizados. Ainda, repara-se o fato que as projeções de precipitação dos GCMs podem divergir de um para o outro devido à maneira como certos processos ou feedbacks climáticos são simulados por cada modelo. Salienta-se que as incongruências na comparação de projeções de diferentes GCMs são destacadas também em diversos outros estudos (FUNG *et al.*, 2010; NÓBREGA *et al.*, 2011; ARNELL e GOSLING, 2013).

**Figura 5.** Comparação entre precipitações projetadas pelos GCMs e medida para o cenário atual na bacia do rio Uruguai.



Fonte: TUCCI (1998).

Diante das informações expostas, nota-se que geralmente são aplicadas técnicas de *downscaling*, processo de “regionalização” que visa aumentar a precisão das projeções de GCMs para uso em estudos locais (PMBC, 2014). Tal operação pode ser de natureza estatística ou dinâmica, caso no qual são gerados modelos climáticos regionais (RCMs) aninhados nos modelos globais (KARAMOUZ *et al.*, 2012; LIMA *et al.*, 2014).

Os principais modelos regionais utilizados por grupos de pesquisa brasileiros encontram-se relacionados na Tabela 3. Dentre estes, destaca-se o modelo regional Eta, baseado no *downscaling* dinâmico de cenários do modelo HadCM3 e fornecido pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (CASTANHARO *et al.*, 2007; CATALDI, MACHADO, SILVA, *et al.*, 2007; CATALDI, MACHADO, GUILHON, *et al.*, 2007; FIGUEIREDO *et al.*, 2007; GUILHON *et al.*, 2007; SANTANA *et al.*, 2011).

**Tabela 3.** Principais modelos regionais climáticos para América do Sul.

Nome	Instituição	Resolução
Eta-CPTEC	INPE	40 km/38L
Eta-CCS	INPE	50 km/38L
HadRM3P	UKMO	50 km/L19
RegCM3	ICTP	50 km/L30

Fonte: PMBC (2014).

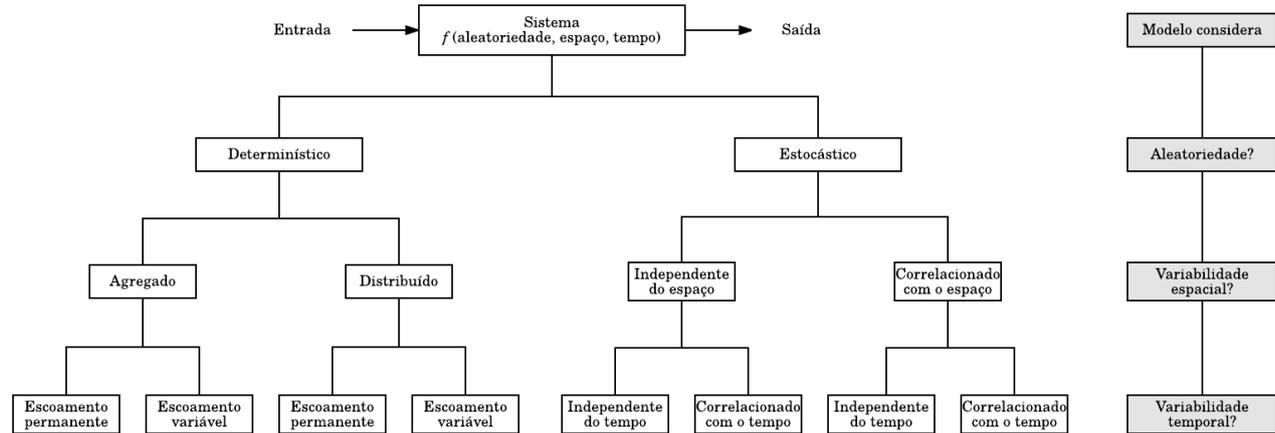
### 2.2.2 Modelagem hidrológica

O sistema hidrológico é definido como uma estrutura ou volume dentro de um limite, o qual recebe entradas, como a água, realiza operações internas e gera, então, saídas (CHOW *et al.*, 1988). Na escala da bacia hidrológica como um todo, os modelos chuva-vazão são valiosas ferramentas para o gerenciamento de recursos hídricos. Tais modelos buscam representar o comportamento hidrológico da bacia e estimar suas respostas sob diferentes condições, a partir da diversificação dos parâmetros e variáveis envolvidos nos fenômenos que compõem suas dinâmicas internas, como a precipitação, infiltração, evaporação e os escoamentos superficial e subsuperficial (BEVEN, 2012).

Salienta-se que, na literatura, não existe apenas uma classificação geral unânime para os diferentes tipos de modelos hidrológicos (CHOW *et al.*, 1988; TUCCI, 1998; BEVEN, 2012; JAYAWARDENA, 2014). Inclusive, JAYAWARDENA (2014) explica que modelos hidrológicos podem ser classificados de diversas maneiras, dependendo do aspecto característico em que se deseja focar. Tais aspectos encontram-se ilustrados na Figura 6.

Em relação à descrição dos processos hidrológicos, os modelos podem ser: (1) **determinísticos**, quando não considerarem aleatoriedade, produzindo sempre as mesmas saídas para uma mesma entrada; ou (2) **estocásticos**, quando possuírem resultados no mínimo parcialmente aleatórios. Logo, pode-se dizer que modelos determinísticos fazem previsões, enquanto modelos estocásticos fazem predições (CHOW *et al.*, 1988). Consequentemente, deve-se levar em conta o nível de aleatoriedade do processo e/ou variáveis a serem analisados na escolha do modelo mais adequado para cada estudo, a fim de minimizar incertezas.

**Figura 6.** Classificação de modelos hidrológicos segundo a maneira como lidam com aleatoriedade, variabilidade espacial e variabilidade temporal de fenômenos hidrológicos.<sup>4</sup>



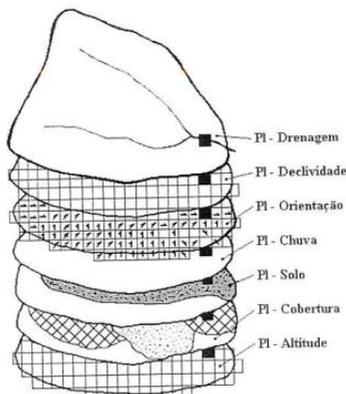
Adaptado de: CHOW *et al.* (1988).

<sup>4</sup> Salienta-se que em publicações mais recentes, a classificação segundo a variabilidade espacial dos fenômenos hidrológicos é descrita por: modelos agregados, modelos semi-distribuídos e modelos distribuídos (TUCCI, 1998; KARAMOUZ *et al.*, 2012; JAYAWARDENA, 2014).

A Figura 6 ilustra ainda que os modelos hidrológicos podem ser classificados segundo a maneira como lidam com o aspecto da variabilidade espacial. Os modelos determinísticos são divididos em: (1) **agregados**, quando se considera a área de estudo inteira como unidade de cálculo; (2) **distribuído**, quando a bacia é dividida em células, permitindo uma melhor representação da variabilidade espacial dos fenômenos hidrológicos; e (3) **semi-distribuído**, quando a área estudada também é discretizada em unidades de cálculo, porém menos complexas do que as utilizadas nos modelos distribuídos (CHOW *et al.*, 1988; BEVEN, 2012; JAYAWARDENA, 2014).

Salienta-se que devido à complexidade associada aos seus cálculos, os modelos hidrológicos distribuídos geralmente utilizam dados de sistemas de informação geográfica (SIG) para melhor caracterizar a área estudada e representar a variabilidade espacial das diversas variáveis (KARAMOUZ *et al.*, 2012), como ilustrado na Figura 7.

**Figura 7.** Caracterização de bacia com uso de dados SIG.



Fonte: SÁ (1995 apud TUCCI, 1998, p. 232)

No caso dos modelos estocásticos, a classificação é definida pela independência ou correlação com o espaço. Assim, os modelos onde variáveis aleatórias em diferentes pontos no espaço exercem algum tipo de influência sobre a outra são considerados correlacionados com o espaço. A classificação destes modelos segundo sua independência ou correlação com o tempo se dá de maneira análoga. Logo, a correlação com o tempo depende se o modelo representa uma sequência de eventos hidrológicos onde o evento anterior afeta o posterior de alguma forma.

Neste contexto, CHOW *et al.* (1988) e KARAMOUZ *et al.* (2012) definem duas categorias principais: os **modelos físicos** e os **modelos abstratos**. Modelos abstratos são os que utilizam conceitos matemáticos e estatísticos para o estabelecimento da relação entre as entradas, como a chuva, e saídas, como o escoamento superficial. Segundo TUCCI (1998), são marcados por sua versatilidade e grande velocidade de resposta. Porém, são limitados em relação à discretização de processos contínuos e na representação matemática de alguns processos físicos. Alguns exemplos deste tipo de modelos são: redes neurais artificiais, redes neurais *fuzzy*, sistemas de lógica *fuzzy*, algoritmos genéticos, entre outros (JAYAWARDENA, 2014).

Por sua vez, os modelos físicos procuram simular os processos físicos que acontecem na realidade, baseados em relações físicas e empíricas observadas (KARAMOUZ *et al.*, 2012). Logo, podem ser de natureza empírica ou conceitual. Nota-se que os modelos conceituais consequentemente constituem a maior parte dos modelos mais proeminentes por serem aplicáveis em diferentes áreas (TUCCI, 1998). Alguns dos principais exemplos atuais dos modelos hidrológicos encontram-se listados na Tabela 4, elaborada a partir de dados da literatura (TUCCI *et al.*, 2003; BEVEN, 2012; KARAMOUZ *et al.*, 2012; JAYAWARDENA, 2014).

**Tabela 4.** Exemplos de modelos hidrológicos físicos.

Modelo	Tipo	Autores
SWM	A	CRAWFORD e LINSLEY (1966)
IHACRES	A	LITTLEWOOD e JAKEMAN (1994)
HEC-HMS	SD	USACE (2000)
VIC	SD	WOOD <i>et al.</i> (1992)
LARSIM	D	BREMICKER (1998)
MGB-IPH	D	COLLISCHONN, ALLASIA, SILVA, <i>et al.</i> (2007)
TOPMODEL	D	BEVEN <i>et al.</i> (1995)

Legenda: A = agregado; SD = semi-distribuído; D = distribuído.

Fonte: elaboração própria.

No que tange estudos hidrológicos de bacias brasileiras, observa-se o amplo uso do modelo hidrológico físico distribuído MGB-IPH, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisa Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) (COLLISCHONN, ALLASIA, TUCCI, *et al.*, 2007; SANTANA *et al.*, 2011; LAURENTIS, 2012; LIMA *et al.*, 2014).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

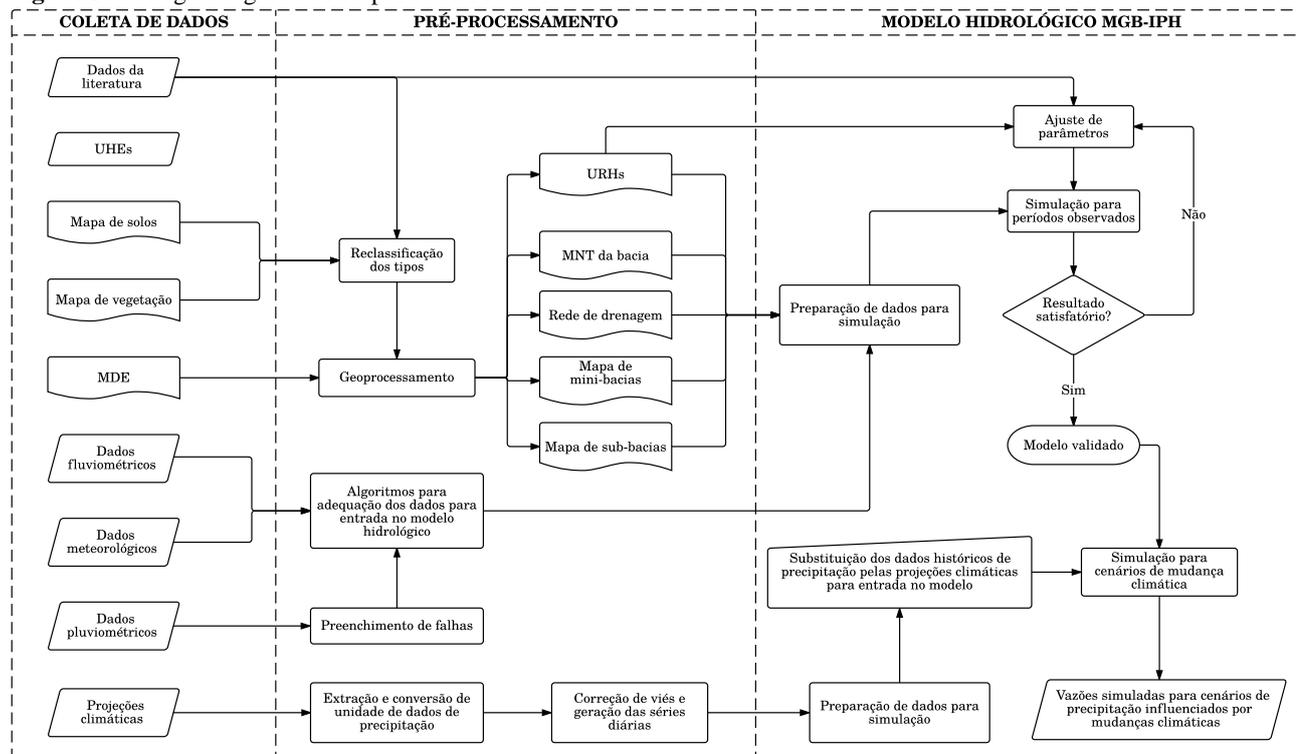
O presente trabalho baseou-se na utilização de um modelo hidrológico distribuído validado para a área de estudo alimentado por projeções de precipitação sob influência de mudanças climáticas. As atividades realizadas podem ser divididas em três categorias principais: (1) coleta de dados brutos; (2) pré-processamento de dados; e (3) simulações hidrológicas. A Figura 8 apresenta um fluxograma ilustrativo das entradas, processos, e produtos envolvidos no presente trabalho. Ressalta-se que, apesar da referida figura representar um processo de ajuste de parâmetros, este estudo não envolve a calibração do modelo hidrológico. Logo, tal ajuste é baseado exclusivamente em valores encontrados na literatura.

Em relação às ferramentas computacionais utilizadas neste estudo, menciona-se:

- ArcGIS, para operações de geoprocessamento e elaboração de mapas;
- MATLAB, para elaboração de rotinas computacionais;
- MapWindow, para uso da interface do modelo MGB-IPH;
- Microsoft Excel, para manipulação de dados;
- Microsoft Visual Studio 2013, para resolução de problemas envolvendo o código-fonte do MGB-IPH.

Nesta sequência desta seção, são discutidos com maior especificidade os materiais e métodos utilizados neste estudo. Primeiramente, são abordadas as principais características da bacia do rio Chopim. Em seguida, o modelo hidrológico distribuído MGB-IPH é apresentado em maior detalhe e são descritos os dados brutos utilizados, incluindo suas características e respectivas fontes. A fim de preparar tais dados para entrada no modelo hidrológico, são apresentados os procedimentos de pré-processamento de dados hidrológicos, climáticos e geográficos. Finalmente, são explanados aspectos relacionados à validação do modelo e critérios para investigação dos impactos gerados.

**Figura 8.** Fluxograma geral das etapas deste estudo.



Fonte: elaboração própria.

### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A bacia do rio Chopim (BRC) possui uma área de 7.240 km<sup>2</sup> e localiza-se no estado do Paraná, estendendo-se entre as coordenadas de 25°38'50" S a 26°36'04" S e 51°30'40" W a 53°17'16" W (Figura 9).

O clima da região segundo a classificação de Köppen é de tipo Cfb – subtropical úmido mesotérmico, com verões frescos e sem estação seca. As temperaturas médias nos meses mais quentes são inferiores a 22°C e nos meses mais frios, inferior a 18°C, com temperatura média anual de 17°C. As médias de chuva anuais situam-se entre 1.700 e 1.800 mm, enquanto a umidade relativa média do ar gira em torno de 80% (GOVERNO DO ESTADO DO PARANÁ, 2010).

A Tabela 5 traz a caracterização da área de estudo segundo os tipos de vegetação e de solo presentes no local. Observa-se que a BRC é predominantemente caracterizada por culturas cíclicas, savana gramíneo-lenhosa e vegetação secundária sem palmeiras, indicando um nível não muito elevado de cobertura vegetal (IBGE, 2012). Em relação aos tipos de solo, verifica-se que a maior parcela da área estudada é composta por latossolos, solo que apresenta boa capacidade de infiltração devido à sua profundidade e alta permeabilidade à água (EMBRAPA, 2006).

**Tabela 5.** Tipos de vegetação e solo presentes na BRC, suas respectivas áreas de cobertura ( $A_{\text{tipo}}$ ) e parcelas percentuais em relação a área total da bacia ( $A_{\text{tipo}}/A_{\text{tot}}$ ).

<b>Categoria</b>	<b>Tipo</b>	<b>Sigla</b>	<b><math>A_{\text{tipo}}</math> [km<sup>2</sup>]</b>	<b><math>A_{\text{tipo}}/A_{\text{tot}}</math> [%]</b>
<b>Vegetação</b>	Culturas cíclicas	CC	4964,0	68,6
	Influência urbana	URB	26,3	0,4
	Corpo d'água continental	AG	0,57	0,0
	Floresta ombrófila mista montana	FOM	13,4	0,2
	Reflorestamento com Pinus	REFP	28,2	0,4
	Savana gramíneo-lenhosa	SAV	977,8	13,5
	Vegetação secundária	VSEC	1229,6	17,0
<b>Solo</b>	Latossolo	LAT	2942,9	40,6
	Nitossolo	NIT	872,7	12,1
	Neossolo	NEO	1594,2	22,0
	Cambissolo	CAM	1830,0	25,3

Fonte: elaboração própria.

Ressalta-se que a área de estudo está inserida na bacia do rio Iguaçu, unidade hidrográfica com um dos maiores parques de geração hidrelétrica no país (ANEEL, 2008). Neste contexto, o rio Chopim é o rio com maior densidade de pontos de geração hidrelétrica, apresentando 5 UHEs dispostas em cascata. A Figura 10 mostra a localização das UHEs mencionadas, conforme informações do Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico (SIGEL) (ANEEL, 2015c). Destaca-se que, segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia 2022 (PDE), está prevista ainda mais uma UHE no rio Chopim em 2019 (BRASIL *et al.*, 2013).

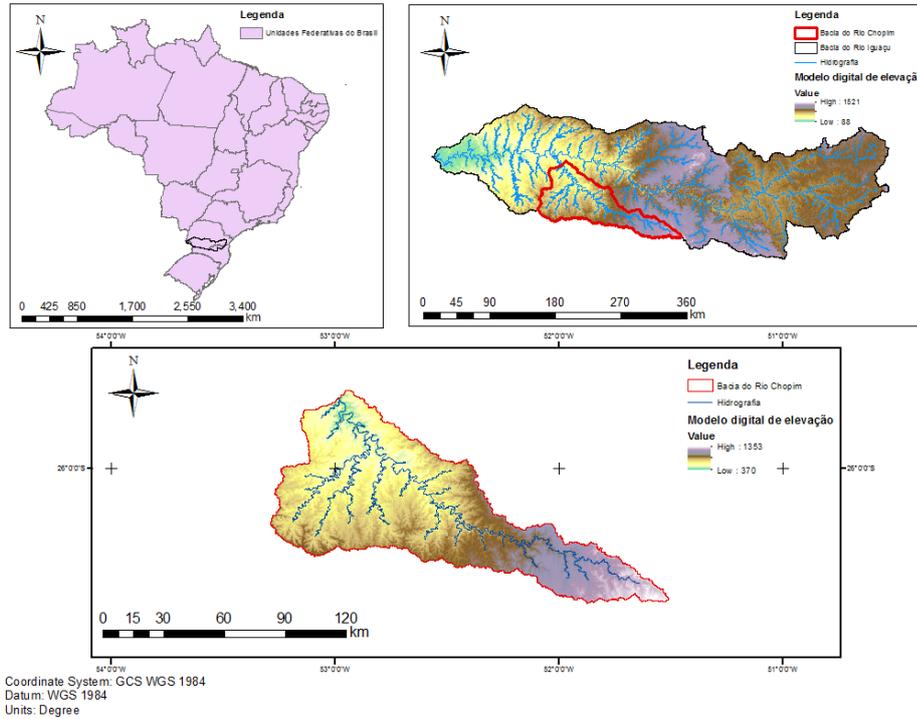
A Tabela 6 traz a relação das UHEs na área de estudo e suas respectivas longitudes, latitudes, potência outorgada e quedas brutas, de acordo com informações contidas nos metadados do SIGEL (ANEEL, 2015c).

**Tabela 6.** Relação de UHEs instaladas na bacia do rio Chopim.

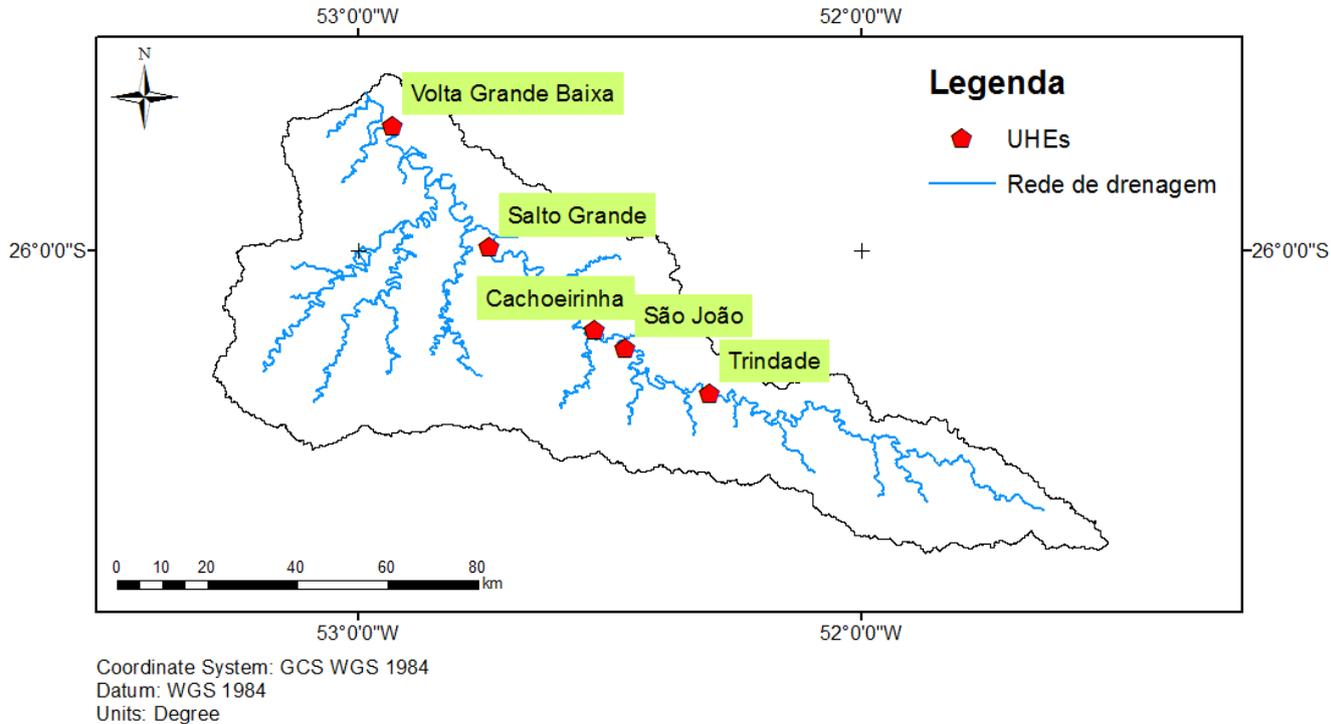
UHE	Sigla	Long.	Lat.	Potência outorgada [kW]	Queda bruta [m]
<b>Volta Grande Baixa</b>	VGB	-52,93°	-25,75°	54.700	29,5
<b>Salto Grande</b>	SG	-52,74°	-25,99°	47.000	42,3
<b>Cachoeirinha</b>	CCH	-52,53°	-26,16°	45.000	64,0
<b>São João</b>	SJ	-52,47°	-26,19°	60.000	89,0
<b>Trindade</b>	TDD	-52,30°	-26,28°	36.500	37,0

Fonte: elaboração própria

**Figura 9.** Localização da área de estudo.



Fonte: elaboração própria.

**Figura 10.** Complexo de UHEs da bacia do rio Chopim.

Fonte: elaboração própria.

### 3.2 MODELO MGB-IPH

Tendo em vista as informações expostas no item 2.2.2, o presente trabalho fez uso do modelo MGB-IPH para estimativa de vazões na BRC, desenvolvido pelo IPH na UFRGS. Tal modelo, descrito em detalhe nas publicações de COLLISCHONN, ALLASIA, SILVA, *et al.* (2007) e FAN e COLLISCHONN (2014), foi elaborado para aplicações em grandes bacias (maiores que 1.000 km<sup>2</sup>), com altos tempos de concentração, características heterogêneas e onde a diferença entre os divisores de água superficial e subterrânea pode ser desprezada (IPH, 2015).

Incorporando métodos como Penman-Monteith e Muskingum-Cunge, o MGB-IPH assemelha-se aos modelos LARSIM e VIC-2L e é composto por um conjunto de algoritmos que englobam o balanço de água no solo, a evapotranspiração, os escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo e escoamento na rede de drenagem (TUCCI *et al.*, 2003; ADAM *et al.*, 2015).

Dentre as razões para sua escolha neste estudo, pode-se citar: (1) modelo elaborado no Brasil e de código aberto, facilitando não só a compreensão dos processos e cálculos envolvidos, como também a resolução de eventuais problemas; (2) modelo elaborado para aplicações em grandes bacias (maiores que 1.000 km<sup>2</sup>) e características heterogêneas, descrição compatível com a área de estudo deste trabalho; e (3) dados de entrada facilmente obtidos por meio de órgãos públicos e revisão bibliográfica (IPH, 2015).

Sendo um modelo distribuído, o MGB-IPH considera a variabilidade espacial dos processos hidrológicos por meio da discretização da bacia estudada, gerando mini-bacias ou blocos, áreas de drenagem correspondentes a cada um dos trechos de cursos d'água. Por sua vez, as mini-bacias são caracterizadas por unidades de resposta hidrológica (URHs), as quais consistem em regiões com características similares de solo e vegetação heterogeneamente distribuídas (LAURENTIS, 2012; ADAM *et al.*, 2015).

A partir destas operações, exploradas em maior detalhe no item 3.4.4, o modelo então calcula os processos hidrológicos para cada uma das URHs componentes da mini-bacia, propagando a vazão acumulada a montante para a célula de jusante (NÓBREGA *et al.*, 2011).

No que tange os parâmetros de simulação do modelo MGB-IPH, estes são classificados como fixos ou calibráveis. Os parâmetros fixos, listados na Tabela 7, são caracterizados pelo fato do modelo ser pouco sensível às variações de seus valores (COLLISCHONN, 2001). Nota-se que estes não incluem parâmetros como coeficiente de rugosidade de Manning e variáveis relacionadas ao movimento de água no solo, os quais são definidos no código fonte do modelo (LIMA *et al.*, 2014).

**Tabela 7.** Parâmetros fixos do modelo MGB-IPH.

<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>
<b>Índice de Área Foliar</b>	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.
<b>Albedo</b>	O albedo é a parcela da radiação solar refletida ao atingir a superfície do solo, considerando sua cobertura vegetal.
<b>Resistência Superficial</b>	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.
<b>Altura de Dossel</b>	A altura média da vegetação é utilizada no modelo hidrológico para estimar a resistência aerodinâmica, que atua no controle de 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 *et al.* (2014).

Por sua vez, os parâmetros calibráveis, descritos na Tabela 8, representam os parâmetros mais sensíveis do modelo e estão associados às propriedades físicas das URHs (LIMA *et al.*, 2014).

**Tabela 8.** Parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH.

Parâmetro	Símbolo	Descrição
<b>Capacidade de armazenamento do solo</b>	$W_m$	Capacidade de armazenamento de água no solo.
<b>Forma da relação entre armazenamento e saturação</b>	$b$	Parâmetro empírico que define a variabilidade da capacidade de armazenamento do solo em torno de $W_m$ .
<b>Vazão durante a estiagem</b>	$K_{bas}$	Controla a vazão durante a estiagem. Valores mais altos implicam maior escoamento subterrâneo.
<b>Quantidade de água que escoo subsuperficialmente</b>	$K_{int}$	Controla a quantidade de água da camada de solo que escoo subsuperficialmente.
<b>Forma da curva de redução de drenagem intermediária</b>	$XL$	Controla a forma da curva de redução da drenagem intermediária ou subsuperficial do solo.
<b>Fluxo do reservatório subterrâneo para a camada superficial</b>	$CAP$	Controla a possibilidade de retorno de água subterrânea para a camada de solo.
<b>Armazenamento residual</b>	$W_c$	Limita o armazenamento residual e subterrâneo.
<b>Calibração da propagação superficial</b>	$CI$	Parâmetro para calibração da propagação superficial nas mini-bacias.
<b>Calibração da propagação subsuperficial</b>	$CS$	Parâmetro para calibração da propagação subterrânea nas mini-bacias.
<b>Retardo do reservatório subterrâneo</b>	$CB$	Parâmetro que representa o retardo do reservatório subterrâneo.
<b>Vazão de base</b>	$QB$	Fluxo de base da mini-bacia.

Fonte: LIMA *et al.* (2014).

Para o alcance dos objetivos geral e específicos deste estudo, a utilização do modelo MGB-IPH envolveu duas etapas: (1) validação do modelo a partir da comparação de dados simulados e observados, com o intuito de verificar seu desempenho na reprodução dos processos hidrológicos da bacia do rio Chopim; (2) simulações de vazões para os cenários de mudanças climáticas A2 e B1, substituindo os dados pluviométricos medidos por projeções climáticas geradas pelo modelo GCM HadCM3 como dados de entrada.

Neste sentido, o item 3.5 oferece uma melhor descrição dos aspectos referentes à validação do modelo. Com relação às projeções climáticas, os itens 3.3.3 e 3.4.3 detalham os processos de coleta dos dados brutos e de preparação destes para entrada no modelo hidrológico.

### 3.3 DADOS BRUTOS

#### 3.3.1 Dados geográficos

Como abordado na descrição do modelo hidrológico MGB-IPH, a caracterização e discretização da área de estudo exigem diferentes dados de sistemas de informação geográfica (SIG). Na Tabela 9, pode ser observada a relação destes dados, além de suas respectivas características e fontes.

**Tabela 9.** Relação de dados brutos sistema de informação geográfica matriciais (M) e vetoriais (V) utilizados.

<b>Dado</b>	<b>Tipo</b>	<b>Escala</b>	<b>Fonte</b>	<b>Referências</b>
<b>Modelo digital de elevação</b>	M	1:250.000	SRTM <sup>1</sup>	(MIRANDA, 2005)
<b>Mapa de tipos de solo</b>	V	1:5.000.000	EMBRAPA	(EMBRAPA, 2001; INPE, 2015)
<b>Mapa de vegetação</b>	V	1:1.000.000	Projeto RADAM	(IBGE, 2015a; b)

Fonte: elaboração própria.

<sup>1</sup> Sigla para *Shuttle Radar Topography Mission*, iniciativa da NASA.

### 3.3.2 Séries históricas

Neste trabalho, foram utilizadas séries históricas de 7 estações pluviométricas, 5 estações fluviométricas e 2 estações meteorológicas localizadas na área de estudo e suas redondezas. Estes dados foram obtidos do site HidroWeb da Agência Nacional das Águas (ANA, 2015), do Instituto ÁguasParaná, e do Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR), respectivamente.

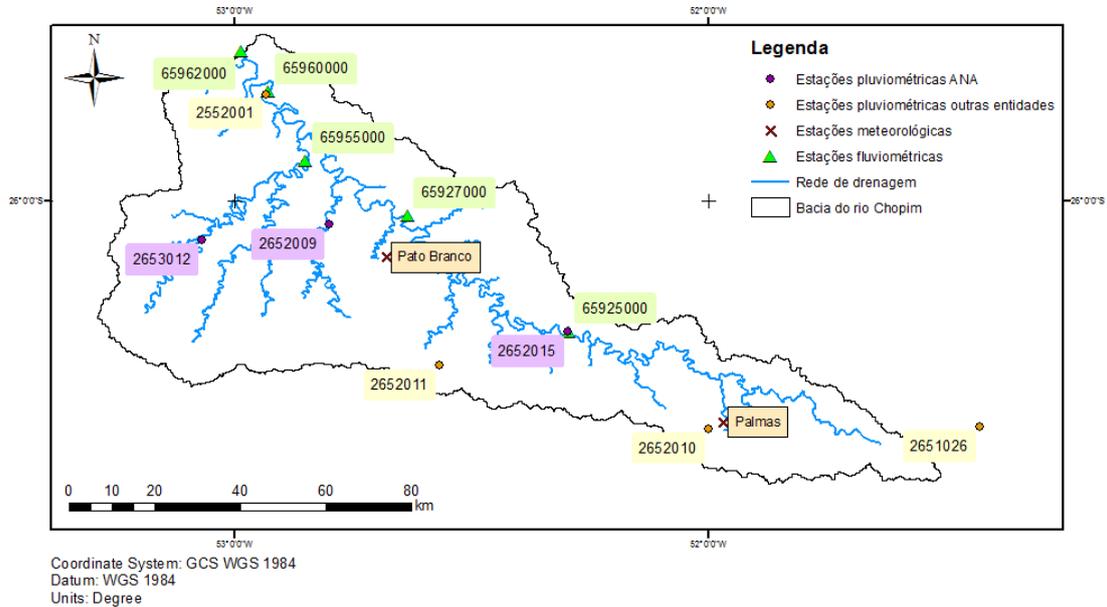
A Tabela 10 traz a relação de todas as estações levantadas, além de suas respectivas coordenadas. Ademais, para melhor visualização das informações apresentadas, a Figura 11 traz um mapa ilustrando a localização das estações fluviométricas, pluviométricas e meteorológicas analisadas.

**Tabela 10.** Relação das estações fluviométricas, pluviométricas e meteorológicas utilizadas e suas respectivas longitudes, latitudes.

<b>Tipo</b>	<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Long.</b>	<b>Lat.</b>
<b>Fluviométrica</b>	65925000	Salto Claudelino	-52,29°	-26,28°
<b>Fluviométrica</b>	65927000	Porto Palmeirinha	-52,63°	-26,03°
<b>Fluviométrica</b>	65955000	Balsa do Santana	-52,85°	-25,91°
<b>Fluviométrica</b>	65960000	Águas do Verê	-52,93°	-25,77°
<b>Fluviométrica</b>	65962000	Flor da Serra	-52,98°	-25,68°
<b>Pluviométrica</b>	2552001	Águas do Verê	-52,93°	-25,77°
<b>Pluviométrica</b>	2651026	Iratim	-51,43°	-26,48°
<b>Pluviométrica</b>	2652009	Ponto do Vitorino	-52,80°	-26,05°
<b>Pluviométrica</b>	2652010	Palmas	-52,00°	-26,48°
<b>Pluviométrica</b>	2652011	Mariópolis	-52,57°	-26,35°
<b>Pluviométrica</b>	2652015	Salto Claudelino	-52,29°	-26,28°
<b>Pluviométrica</b>	2653012	Francisco Beltrão	-53,07°	-26,08°
<b>Meteorológica</b>	26285158	Palmas	-51,97°	-26,47°
<b>Meteorológica</b>	26075241	Pato Branco	-52,68°	-26,12°

Fonte: elaboração própria.

**Figura 11.** Localização das estações fluviométricas, pluviométricas e meteorológicas utilizadas.



Fonte: elaboração própria.

Os dados meteorológicos incluem as variáveis: (1) pressão atmosférica; (2) precipitação; (3) radiação solar; (4) temperatura máxima; (5) temperatura média; (6) temperatura mínima; (7) umidade relativa; (8) velocidade do vento.

Vale ressaltar que o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) disponibiliza diversas séries de vazões de UHEs incluídas na BRC. Porém, optou-se por não utilizá-las, uma vez que incluem dados sintéticos e adicionariam ainda mais incerteza ao estudo (ONS, 2014).

### 3.3.3 Projeções climáticas

Como previamente mencionado, as simulações das vazões naturais afluentes ao complexo de reservatórios estudado para cenários climáticos baseou-se em projeções de precipitação média mensal geradas a partir de cenários de emissão de GEEs do IPCC, apresentados no item 2.1.1. A fim de obter resultados referentes aos dois extremos do leque destas possibilidades, foram analisados os cenários B1 (menor aumento de temperatura) e A2 (maior aumento de temperatura) e os períodos de 2011-2030 e 2080-2099

Não obstante o emprego preponderante do RCM Eta-CPTEC mencionado no item 2, o presente estudo fez uso de projeções do GCM HadCM3 devido a impossibilidade de obter dados do referido RCM.

Os dados brutos das projeções climáticas foram obtidos por meio do *Data Distribution Centre* do IPCC (IPCC, 2015b), onde são disponibilizados em formato NetCDF. Sendo assim, foi elaborada uma rotina computacional no programa MATLAB para extração dos valores das células correspondentes à latitude e longitude da BRC. Com o objetivo de exportar dados em unidades compatíveis com as das séries observadas, a rotina incluiu também a conversão de unidade das projeções de  $\text{kg/m}^2.\text{s}$  para  $\text{mm/d}$ .

## 3.4 PRÉ-PROCESSAMENTO DE DADOS

O pré-processamento das séries históricas de dados hidrológicos envolveu: (1) o preenchimento de falhas das séries pluviométricas; (2) a análise de consistência e disponibilidade temporal dos dados fluviométricos; (3) a correção de viés das projeções climáticas para geração de séries sintéticas diárias para os cenários estudados; e (4) discretização da bacia com uso de ferramentas de geoprocessamento.

### 3.4.1 Preenchimento de falhas de séries pluviométricas

As falhas das séries históricas pluviométricas utilizadas neste estudo foram preenchidas para o período de 1988-2007 por uma das seguintes alternativas:

1. Em casos onde houvesse estação pluviométrica muito próxima (a menos de 10 km) e com dados disponíveis, foram usados os dados desta estação para substituir manualmente as falhas da estação analisada, sem utilização de qualquer método de interpolação espacial;
2. Nos demais casos, foi utilizado o método do inverso do quadrado da distância (IQD), utilizando as 3 estações pluviométricas mais próximas com dados disponíveis.

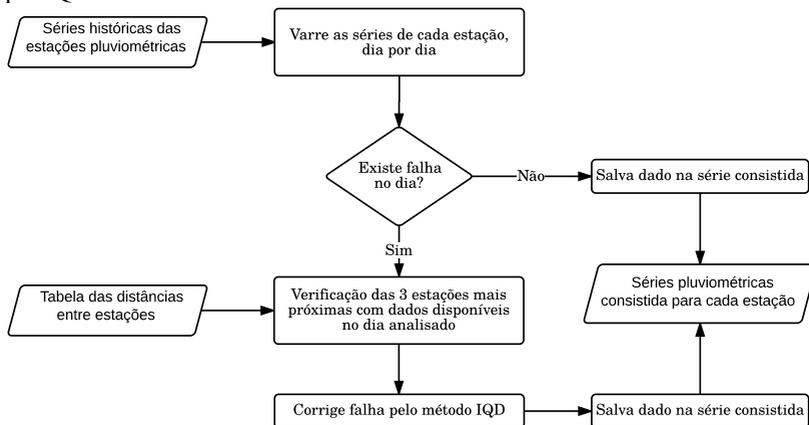
O método do inverso do quadrado da distância consiste em uma técnica de interpolação espacial (TUCCI, 1998), a qual permite a estimativa de valores em pontos não monitorados a partir de dados observados em pontos conhecidos, conforme a Equação (1).

$$X_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i^2} \times X_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i^2} \right)} \quad (1)$$

Onde:  $X_p$  corresponde ao valor estimado na estação  $p$ ;  $d_i$  corresponde à distância da estação  $i$  a estação  $p$ ;  $X_i$  corresponde ao valor observado na estação  $i$ ; e  $n$  corresponde ao número total de estações próximas avaliadas.

Dado o grande volume de dados a serem processados, foi desenvolvida uma rotina no programa MATLAB para realizar o preenchimento de falhas segundo a alternativa 2. A rotina elaborada realiza os cálculos de IQD utilizando como dados de entrada as séries históricas disponíveis e uma tabela relacionando cada estação com as demais, de acordo com as distâncias entre elas. A Figura 12 apresenta o fluxograma do algoritmo da rotina em questão.

**Figura 12.** Fluxograma da rotina do MATLAB para preenchimento de falhas por IQD.



Fonte: elaboração própria.

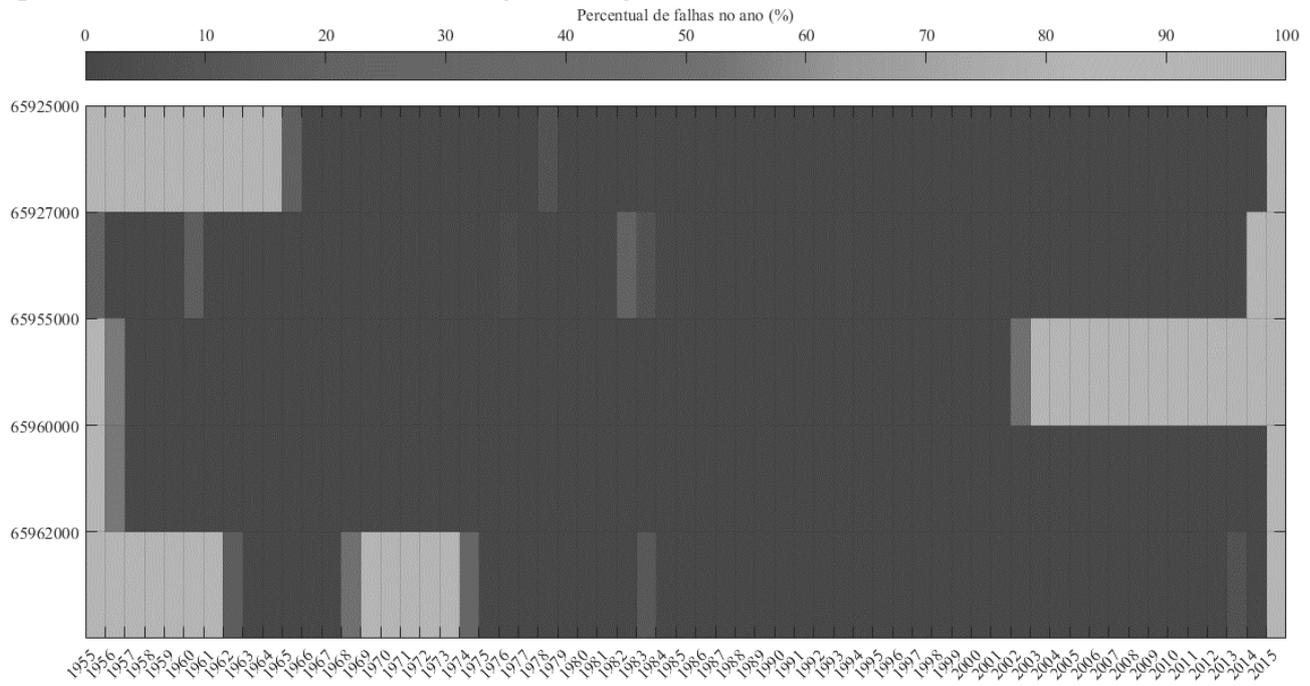
Como previamente mencionado, as séries históricas brutas das estações pluviométricas foram importadas do site HidroWeb, da ANA. A tabela de proximidade entre estações foi elaborada por meio do programa ArcGIS, o qual permite a criação de uma tabela com cada estação e suas respectivas distâncias das demais no formato ASCII.

### 3.4.2 Análise de consistência de séries fluviométricas

Para verificação das falhas presentes nas séries fluviométricas obtidas, foi elaborado um programa no MATLAB com interface gráfica, permitindo a visualização das vazões diárias observadas e o número de falhas em cada ano. Desta forma, foi possível a rápida identificação de valores com alta probabilidade de inconfiabilidade, além da verificação dos anos com dados consistidos em cada estação.

A Figura 13 apresenta um gráfico Gantt da disponibilidade temporal de dados em cada uma das estações estudadas. Com base nestas informações, foram escolhidos o período de 1986-1990 para validação do modelo hidrológico e o período de 1988-2007 para as simulações posteriores.

**Figura 13.** Gráfico de Gantt dos anos consistidos para as estações fluviométricas estudadas.



Fonte: elaboração própria.

### 3.4.3 Correção de viés das projeções climáticas

Para possibilitar a entrada dos dados no modelo hidrológico, as projeções de médias mensais referentes aos cenários estudados foram transformadas em séries diárias pela técnica correção de viés simples (KIRONO *et al.*, 2011), conforme a Equação (2).

Assim, foram calculadas as médias mensais de cada estação pluviométrica e obtidas as diferenças percentuais entre as médias observadas e as médias projetadas para cada mês. Tais perturbações foram então aplicadas às séries observadas a fim de representar séries influenciadas por mudanças climáticas, ao mesmo tempo mantendo a variabilidade temporal observada.

$$P_i = P_{obs,i} \times \frac{\bar{P}_{GCM,m(i)}}{\bar{P}_{obs,m(i)}} \quad (2)$$

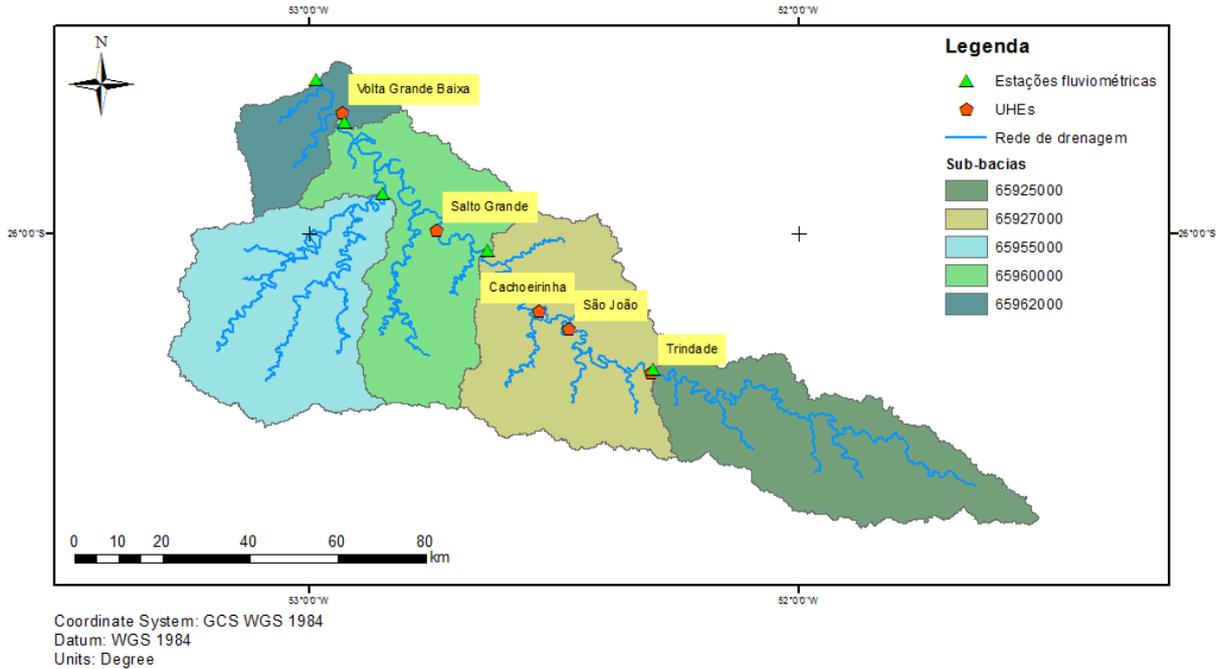
Onde:  $P_i$  corresponde à precipitação corrigida no dia  $i$  [mm/d];  $P_{obs,i}$  corresponde à precipitação observada no dia  $i$  [mm/d];  $\bar{P}_{GCM,m(i)}$  corresponde à precipitação média projetada pelo GCM para o mês  $m$ , referente ao dia  $i$  [mm/d]; e  $\bar{P}_{obs,m(i)}$  corresponde à precipitação média observada no mês correspondente ao dia  $i$  [mm/d].

### 3.4.4 Discretização da bacia

O processo de discretização da bacia foi realizado por meio da ferramenta ArcHydro, desenvolvida para o pacote computacional ArcGIS, utilizando os dados SIG relacionados no item 3.3.1. Esta etapa envolveu: (1) a determinação das direções de fluxo a partir do modelo numérico do terreno; (2) a geração da rede de drenagem; (3) a delimitação das mini-bacias; e (4) a delimitação de sub-bacias de interesse.

Para delimitação das sub-bacias de interesse, foram adotados locais onde houvesse postos fluviométricos como pontos de exutório, a fim de proporcionar volumes de controle verificáveis. A Figura 14 traz um mapa com as UHEs presentes em cada sub-bacia, permitindo verificar sua disposição em cascata. Na Tabela 11, estão listadas as características de cada sub-bacia, listadas de jusante a montante.

**Figura 14.** Sub-bacias delimitadas e usinas hidrelétricas de energia (UHEs) presentes na área estudada.



Fonte: elaboração própria.

**Tabela 11.** Descrição das sub-bacias de interesse, incluindo suas respectivas áreas ( $A_{sb}$ ) e parcelas percentuais em relação a área total da BRC ( $A_{sb}/A_{tot}$ ).

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	$A_{sb}$ [km <sup>2</sup> ]	$A_{sb}/A_{tot}$ [%]
<b>65925000</b>	Salto Claudelino	1.658	23
<b>65927000</b>	Porto Palmeirinha	3.392	47
<b>65955000</b>	Balsa do Santana	1.721	24
<b>65960000</b>	Águas do Verê	6.695	92
<b>65962000</b>	Flor da Serra	7.240	100

Fonte: elaboração própria.

Para a definição das URHs, os tipos de solos e vegetação presentes na área de estudo foram reclassificados a fim de que suas diferentes possíveis combinações não excedessem o limite recomendado de 5 URHs (IPH, 2015).

Adotando o potencial de escoamento superficial como parâmetro de referência para reclassificação dos tipos de solo, estes foram categorizados entre: (1) solos rasos, com alto potencial de escoamento superficial; e (2) solos profundos, com baixo potencial de escoamento superficial. O detalhamento deste processo encontra-se apresentado na Tabela 12.

**Tabela 12.** Descrição dos tipos de solo reclassificados e suas respectivas áreas de cobertura ( $A_{sol}$ ) e parcelas percentuais em relação a área total da BRC ( $A_{sol}/A_{tot}$ ).

<b>Reclassificação</b>	<b>Tipos de solo</b>	$A_{sol}$ [km <sup>2</sup> ]	$A_{sol}/A_{tot}$ [%]
<b>Solo profundo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LAT</li> <li>• NIT</li> </ul>	3815,7	52,7
<b>Solo raso</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• NEO</li> <li>• CAM</li> </ul>	3424,2	47,3

Fonte: elaboração própria.

Com base na densidade da cobertura vegetal, os tipos de vegetação mencionados no item 3.1 foram reclassificados em duas categorias: agricultura e cerrado. Destaca-se que áreas ocupadas por certos tipos de vegetação consideradas muito pequenas no contexto deste trabalho foram reclassificadas de acordo com o tipo de vegetação das áreas adjacentes, como indicado na Tabela 13.

**Tabela 13.** Descrição dos tipos de vegetação reclassificados e suas respectivas áreas de cobertura ( $A_{veg}$ ) e parcelas percentuais em relação a área total da BRC ( $A_{veg}/A_{tot}$ ).

Reclassificação	Tipos de vegetação	$A_{veg}$ [km <sup>2</sup> ]	$A_{veg}/A_{tot}$ [%]
<b>Agricultura</b>	• CC	5023,8	69,4
	• URB*		
	• AG*		
	• FOM*		
	• REFP*		
<b>Cerrado</b>	• SAV	2216,1	30,6
	• VSEC		

Observação: Campos com \* indicam áreas muito pequenas, as quais foram reclassificadas de acordo com as áreas adjacentes.

Fonte: elaboração própria.

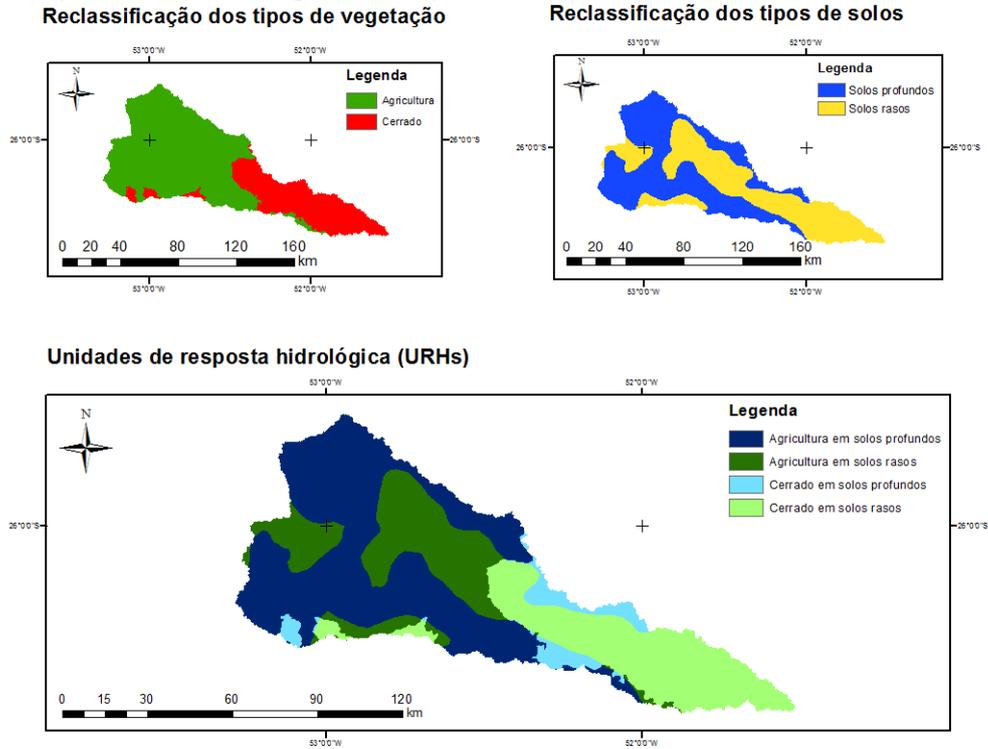
A partir da combinação dos mapas de solos e vegetação reclassificados, foram então definidas as URHs, representadas na Figura 15. A Tabela 14 apresenta descrição de cada URH e suas respectivas áreas.

**Tabela 14.** Descrição das URHs definidas, além de suas respectivas áreas de cobertura ( $A_u$ ) e parcelas percentuais em relação a área total da BRC ( $A_u/A_{tot}$ ).

URH	$A_u$ [km <sup>2</sup> ]	$A_u/A_{tot}$ [%]
<b>Agricultura em solos profundos</b>	3411,6	47,1
<b>Agricultura em solos rasos</b>	1607,5	22,2
<b>Cerrado em solos profundos</b>	401,5	5,5
<b>Cerrado em solos rasos</b>	1819,3	25,1

Fonte: elaboração própria.

**Figura 15.** Discretização das unidades de resposta hidrológica.



Fonte: elaboração própria.

### 3.5 VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO

A validação do modelo MGB-IPH foi baseada nos dados de séries históricas apresentados no item 3.2 e em valores de parâmetros calibráveis encontrados em literatura para regiões de características similares às da área de estudo (COLLISCHONN *et al.*, 2010b; a), como consta na Tabela 15.

**Tabela 15.** Parâmetros calibráveis das URH utilizados nas simulações.

URH	Parâmetro						
	$W_m$	$b$	$K_{bas}$	$K_{int}$	$XL$	$CAP$	$W_c$
<b>Agricultura em solos profundos</b>	400,0	0,10	0,20	10,00	0,60	0,00	0,10
<b>Agricultura em solos rasos</b>	200,0	0,10	0,20	10,00	0,60	0,00	0,10
<b>Cerrado em solos profundos</b>	400,0	0,10	0,20	10,00	0,60	0,00	0,10
<b>Cerrado em solos rasos</b>	200,0	0,10	0,20	10,00	0,60	0,00	0,10

Fonte: elaboração própria.

Os parâmetros calibráveis referentes às sub-bacias delimitadas encontram-se listados na Tabela 16.

**Tabela 16.** Parâmetros calibráveis das sub-bacias utilizados nas simulações.

Sub-bacia	Parâmetro	Valor	Unidade
<b>Todas</b>	$CI$	8,0	
<b>Todas</b>	$CS$	40,0	
<b>Todas</b>	$CB$	600,0	h
<b>Todas</b>	$QB$	0,1	$m^3/(s/km^2)$

Fonte: elaboração própria.

A análise da adequação dos dados simulados em relação aos dados observados pode ser amparada por diferentes medidores de desempenho. Dentre eles, observa-se ser predominante a utilização do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), do coeficiente de Nash-Sutcliffe para logaritmos ( $NS_{log}$ ) e diferença de volumes ( $\Delta V$ ) em aplicações hidrológicas (TUCCI, 1998; TUCCI *et al.*, 2003; ALLASIA *et al.*, 2006; LIMA *et al.*, 2014).

Como explica LIMA *et al.* (2014), cada um dos medidores de desempenho mencionados oferece uma perspectiva específica sobre a série simulada. Sendo assim, estes podem ser diferenciados principalmente pelo fato do NSE ter propensão a dar maior importância aos picos de vazão, do  $NS_{\log}$  ser menos sensível aos picos e mais sensível aos períodos de recessão de vazão e da  $\Delta V$  permitir a verificação da existência de desvios sistemáticos de superestimativa ou subestimativa da vazão.

Neste estudo, a avaliação da performance das simulações realizadas foi analisada segundo coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, calculado conforme a Equação (3).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \overline{Q_0})^2} \quad (3)$$

Onde:  $NSE$  corresponde ao coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe;  $Q_0^t$  corresponde à vazão observada no tempo  $t$ ;  $Q_m^t$  corresponde ao valor de vazão simulado no tempo  $t$ ; e  $\overline{Q_0}$  corresponde à média das vazões observadas.

O medidor de desempenho escolhido é adimensional e varia de  $-\infty$  a 1, sendo 1 o valor ótimo. Desta forma, julga-se que quanto mais próximo de 1 o NSE obtido, melhor o desempenho do modelo.

Ressalta-se que os valores considerados satisfatórios deste coeficiente diferem consideravelmente na literatura variando desde 0,4 a 0,8, de acordo com diferentes modelos hidrológicos e autores (MORIASI *et al.*, 2007). Sendo assim, os resultados deste trabalho foram analisados de acordo com a classificação geral para dados mensais proposta por MORIASI *et al.* (2007) e apresentada na Tabela 17.

**Tabela 17.** Classificação da performance da simulação de vazão segundo coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE).

Performance	NSE
Muito boa	$0,75 < NSE \leq 1,00$
Boa	$0,65 < NSE \leq 0,75$
Satisfatória	$0,50 < NSE \leq 0,65$
Insatisfatória	$NSE \leq 0,50$

Adaptado de MORIASI *et al.* (2007).

### 3.6 AVALIAÇÃO DOS CENÁRIOS CLIMÁTICOS

Os potenciais impactos associados aos cenários estudados foram avaliados com base em três aspectos: (1) alterações nas vazões naturais afluentes aos reservatórios; (2) estimativa das energias firmes; e (3) volume de regularização requerido para garantia da energia firme estimada para cada cenário.

No que tange o primeiro critério citado, as vazões naturais afluentes são definidas como as vazões que ocorrem em uma seção do rio na qual não existem fatores externos que alterem seu regime, como por exemplo a operação de reservatórios à montante (GUILHON *et al.*, 2007). Ressalta-se que tais informações são insumos cruciais para o planejamento e gerenciamento das operações do Sistema Interligado Nacional (SIN), que coordena e controla a geração e transmissão de energia elétrica no Brasil (FIGUEIREDO *et al.*, 2007; SILVA *et al.*, 2007). Assim, permitirão uma melhor compreensão dos efeitos diretos da variação da precipitação no regime fluviométrico do rio Chopim.

Como referência de comparação, foram analisadas as vazões médias de longo período, máximas e mínimas para cada cenário. Adicionalmente, foram examinadas as vazões de permanência  $Q_{95}$ , ou seja, a vazão do curso d'água que é superada ou igualada 95% do tempo (CRUZ e TUCCI, 2008). A seleção da  $Q_{95}$ , especificamente, apoia-se no fato desta ser amplamente utilizada no planejamento de recursos hídricos. Inclusive, nota-se que o estudo da  $Q_{95}$  é um dos requisitos para a declaração de reserva de disponibilidade hídrica (DRDH), parte do processo de obtenção de outorga de direito de uso dos recursos hídricos para aproveitamentos hidrelétricos (ANA, 2009).

Outrossim, a energia firme ( $E_f$ ) foi adotada como segundo parâmetro de avaliação dos cenários a fim de obter perspectivas do ponto energético. Tal conceito diz respeito à energia média gerada pela usina ao longo do período crítico do sistema de referência do SIN (MME, 2008). Devido à falta de informações específicas sobre cada UHE e da bacia em geral, a  $E_f$  foi calculada pelo o método recomendado para estudos preliminares que consta no Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas do MME (2007), descrito na Equação (4).

$$E_f = 0,0088 \times Hlm \times Qlm \quad (4)$$

Onde:  $E_f$  corresponde à energia firme do aproveitamento [ $MW_{med}$ ];  $Hlm$  corresponde à queda líquida média do aproveitamento

[m];  $Q_{lm}$  corresponde à descarga líquida média do aproveitamento durante o período crítico do SIN [ $m^3/s$ ]; e 0,0088 é um coeficiente que leva em conta a massa específica da água, a gravidade, e o rendimento da turbina e do gerador, permitindo expressar a energia em  $MW_{med}$ .

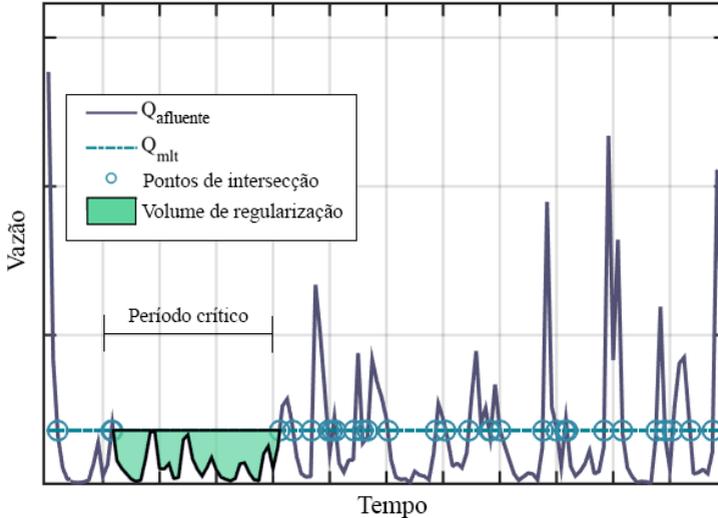
Atenta-se ao fato que a escassez de dados mencionada levou a aproximações das variáveis deste cálculo. Uma vez que a queda líquida média consiste na queda bruta menos as perdas de carga hidráulicas, tal valor foi estimado assumindo perdas hidráulicas de valor equivalentes a 3% da queda bruta (MME, 2007). Ademais, para contornar a falta de dados referentes à descarga líquida média durante o período crítico do SIN (MME, 2008), adotou-se a vazão média de longo período ( $Q_{mlt}$ ) para os cálculos de energia firme.

A escolha do terceiro ângulo da avaliação buscou adicionar uma visão relacionada à demanda de área física para o reservatório. Para tal, selecionou-se o volume de regularização, definido como volume necessário para garantia de uma certa vazão (TUCCI, 1998). Sendo assim, a comparação dos cenários simulados baseou-se nos volumes de regularização para garantir a energia firme de cada cenário, utilizando a  $Q_{mlt}$  como vazão de referência.

Desta forma, foi elaborada uma rotina no MATLAB para o cálculo dos volumes de regularização para os diferentes casos simulados. Foram consideradas “falhas” todos os momentos onde a vazão simulada afluyente era menor que a  $Q_{mlt}$ . Assim, foi possível a identificação do maior período de estiagem segundo o hidrograma de cada cenário. O volume de regularização referente à vazão  $Q_{mlt}$  foi então estimado de acordo com a área do maior polígono formado pela linha da  $Q_{mlt}$  e das vazões simuladas abaixo desta, como ilustrado na Figura 16.

Salienta-se que nestes cálculos adotou-se passo de tempo mensal, utilizando valores referentes às vazões acumuladas em cada mês.

**Figura 16.** Esquema ilustrativo do processo de cálculo do volume de regularização, mostrando o polígono formado pela linha da vazão afluyente acumulada mensal ( $Q_{\text{afluyente}}$ ) e a linha da vazão de referência ( $Q_{\text{mlt}}$ ) durante o período crítico.



Fonte: elaboração própria.

### 3.7 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

O presente estudo não leva em conta possíveis alterações em uso e ocupação do solo, além da alocação de usos da água ou quaisquer outras mudanças, adotando a precipitação como único parâmetro variável nas simulações. Neste sentido, nota-se que a configuração em cascata dos reservatórios estudados também é desconsiderada, simplificação que teve importante consequência nos resultados finais.

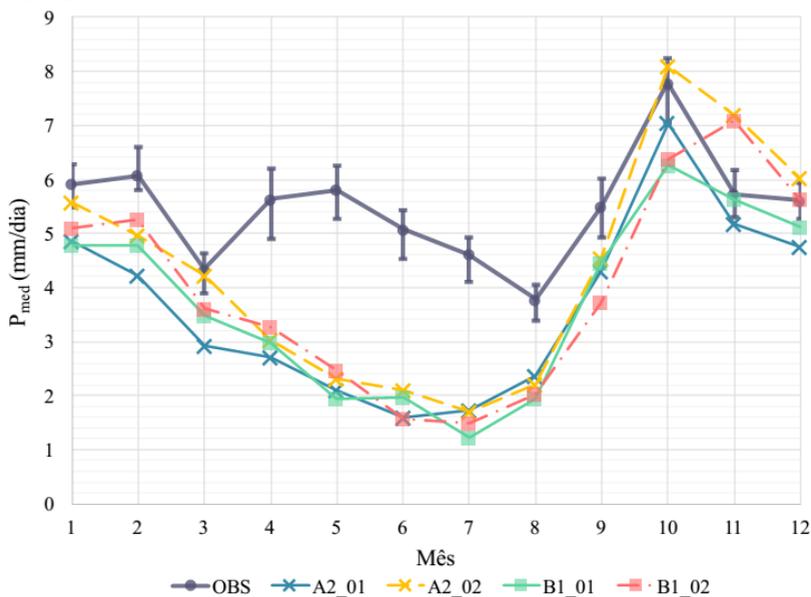
Ainda, devido à resolução espacial do GCM HadCM3 e às dimensões da área de estudo, foram utilizados os mesmos valores de projeções de precipitação para toda a bacia. Sendo assim, atenta-se à perda da variabilidade espacial nas séries pluviométricas resultantes do processo de correção de viés previamente descrito.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ALTERAÇÕES NO REGIME PLUVIOMÉTRICO

A Figura 17 apresenta as precipitações médias mensais observadas nas estações pluviométricas da área de estudo e as médias projetadas pelo GCM UKMO-HadCM3 para os cenários A2 e B1 nos períodos de 2011-2030 e 2080-2099.

**Figura 17.** Médias diárias mensais de precipitação na área de estudo para cada cenário.



Legenda: OBS = valores médios, mínimos e máximos observados nas estações pluviométricas estudadas na área de estudo durante o período de 1988-2007; A2\_01 = cenário A2 no período de 2011-2030; A2\_02 = cenário A2 no período de 2080-2099; B1\_01 = cenário B1 no período de 2011-2030; B1\_02 = cenário B1 no período de 2080-2099.

Fonte: elaboração própria.

De maneira geral, observa-se que os cenários analisados apresentam menores valores de precipitação média mensal para quase todos os meses do ano em relação aos dados observados. É notável a acentuada disparidade entre as médias projetadas e as observadas entre

os meses de abril e agosto. Destaca-se principalmente o mês de julho, o qual inclui projeções até 74% menores do que a média dos valores observados para o mesmo mês no período de 1988-2007, como apresentado na Tabela 18. Tais alterações no comportamento intra-anual do regime pluviométrico da bacia do rio Chopim sugerem que os cenários de emissões de gases de efeito estufa estudados proporcionariam invernos consideravelmente menos chuvosos.

Ainda, percebe-se que o cenário A2\_02 (período de 2080-2099) apresenta maiores precipitações médias mensais em 10 dos 12 meses do ano quando comparada ao cenário A2\_01 (período de 2011-2030). A evolução das precipitações médias mensais do cenário B1 entre os dois períodos mencionados apresenta comportamento mais complexo, não permitindo identificar uma tendência clara.

**Tabela 18.** Variações percentuais das precipitações mensais médias projetadas pelo modelo HadCM3 para cada cenário em relação à média dos valores observados nas estações pluviométricas estudadas (OBS).

Mês	Cenário				
	OBS [mm/d]	A2_01 [Δ%]	A2_02 [Δ%]	B1_01 [Δ%]	B1_02 [Δ%]
1	5,9	-18	-6	-19	-14
2	6,1	-30	-18	-21	-14
3	4,3	-33	-2	-20	-16
4	5,6	-52	-46	-47	-42
5	5,8	-64	-60	-66	-57
6	5,1	-69	-59	-61	-69
7	4,6	-62	-63	-74	-67
8	3,8	-37	-42	-48	-46
9	5,5	-22	-17	-19	-32
10	7,8	-10	4	-20	-18
11	5,7	-10	26	-2	24
12	5,6	-15	7	-9	0

Legenda: OBS = valores médios observados nas estações pluviométricas estudadas na área de estudo durante o período de 1988-2007; A2\_01 = cenário A2 no período de 2011-2030; A2\_02 = cenário A2 no período de 2080-2099; B1\_01 = cenário B1 no período de 2011-2030; B1\_02 = cenário B1 no período de 2080-2099.

Fonte: elaboração própria.

As inconsistências expostas pelos resultados obtidos ilustram as incertezas associadas ao uso de projeções de modelos climáticos globais anteriormente discutidas. Dada a escala local deste estudo, destaca-se o fator agravante decorrente da desarmonia entre a resolução espacial do HadCM3 e as dimensões da área de estudo. Neste sentido, cabe traçar um paralelo dos resultados obtidos com aqueles observados por TUCCI (1998) na avaliação do impacto de mudanças climáticas na bacia do rio Uruguai, mencionado no item 2.2.1. Percebe-se que na referida investigação, as projeções dos GCM UKMO também subestimaram as precipitações observadas no local examinado, o qual é razoavelmente próximo à bacia do rio Chopim.

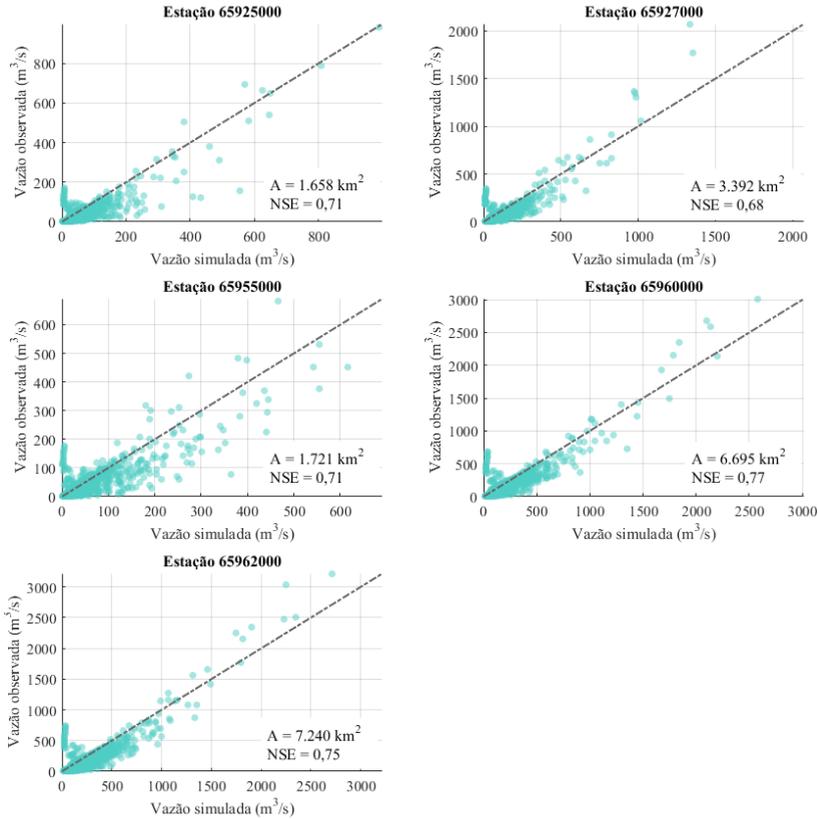
Ainda, resgata-se a grande variabilidade verificada dentre as projeções dos diferentes GCMs para o mesmo cenário e região no estudo supracitado, ilustrada na Figura 5 do item 2.2.1. Tais resultados permitiram a conclusão que as projeções climáticas mais próximas dos valores observados no rio Uruguai foram geradas pelo GCM GISS (TUCCI, 1998). Sendo assim, infere-se que, analogamente, outros GCMs potencialmente apresentariam projeções mais concordantes com os dados observados na bacia do rio Chopim, tornando-se opções mais adequadas para o presente estudo do que o modelo HadCM3.

#### 4.2 VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO

Conforme descrito no item 2.2.2, a verificação da performance do modelo MGB-IPH na representação dos processos hidrológicos da área de estudo baseou-se no período de 1986 e 1990 e fez uso de valores de parâmetros calibráveis obtidos da literatura. Na Figura 18, podem ser observadas as correlações entre as vazões observadas e simuladas, além dos valores dos coeficientes de eficiência de Nash-Sutcliffe e áreas de drenagem referentes às estações fluviométricas estudadas.

Constata-se que os valores do NSE variaram entre 0,68 e 0,77 nos pontos estudados, desempenho classificado como “bom” e “muito bom” de acordo com os critérios definidos por MORIASI *et al.* (2007), apresentados no item 3.5. Examinando valores de NSE e as áreas de drenagem referentes a cada estação, percebe-se não haver uma ligação palpável entre a performance do modelo e a área da bacia. Neste sentido, nota-se que os resultados obtidos chocam com os encontrados no estudo realizado por ALLASIA *et al.* (2006), no qual foi detectada uma tendência do modelo MGB-IPH reproduzir mais satisfatoriamente bacias de maiores dimensões.

**Figura 18.** Correlação das vazões observadas e simuladas no período de validação e a reta de referência correspondente a pontos de simulação perfeita. Em detalhe: valores dos coeficientes de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e áreas de drenagem referentes às estações fluviométricas estudadas.



Fonte: elaboração própria.

Pela análise visual das nuvens de dispersão da Figura 18, é possível verificar grandes densidades de pontos onde o valor observado é superior ao valor simulado na faixa do eixo x correspondente às vazões mais reduzidas. Tal constatação sugere uma tendência de o modelo subestimar significativamente as vazões de base das bacias. Outrossim, verifica-se que os pontos referentes aos picos de vazão situam-se relativamente próximos a reta de referência em geral, apontando reproduções decentes deste aspecto.

Sendo assim, vista a propensão do NSE a dar maior importância aos picos de vazão, abordada no item 3.5, tal interpretação representa uma possível justificativa para os coeficientes oportunos obtidos neste estudo. Todavia, dadas as especificidades dos indicadores  $NS_{\log}$  e  $\Delta V$  também apresentadas no item 3.5, salienta-se que estes possivelmente permitiriam identificar com mais apreço as fraquezas do modelo na reprodução dos processos hidrológicos da BRC.

Na Tabela 19, estão listados os valores das vazões médias, máximas, mínimas e da  $Q_{95}$  das séries observada e simulada para as estações fluviométricas analisadas, as quais encontram-se ordenadas de jusante a montante. Os dados apresentados permitem verificar reduções extremamente acentuadas nas vazões mínimas simuladas, com valores de 70% a 94% menores do que os valores observados.

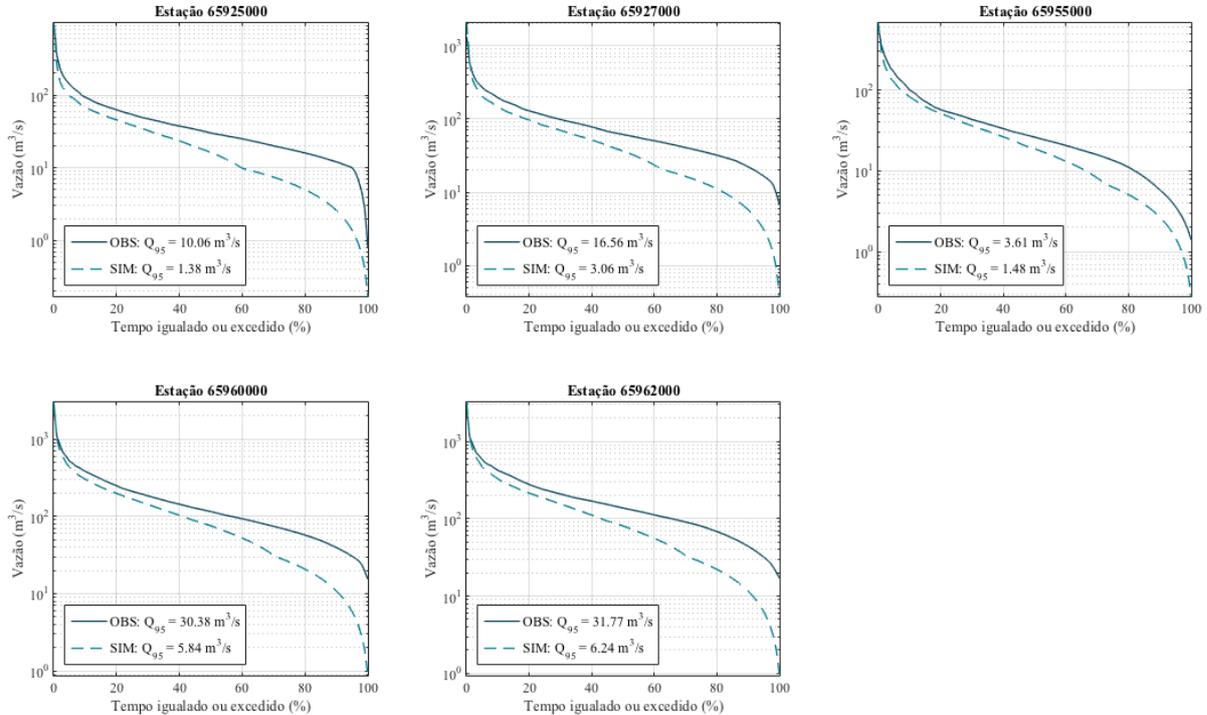
Ainda, destaca-se o fato de que apenas uma das cinco estações fluviométricas apresentou redução de menos de 80% da  $Q_{95}$  original. Estas drásticas variações também podem ser visualizadas nas curvas de permanência calculadas para as séries observada e simulada no período de validação, apresentadas na Figura 19.

**Tabela 19.** Comparação entre as vazões médias ( $Q_{mlt}$ ), máximas ( $Q_{max}$ ), mínimas ( $Q_{min}$ ), e de 95% de permanência ( $Q_{95}$ ) das séries observadas (OBS) e simuladas (SIM) e suas respectivas variações percentuais ( $\Delta Q$ ).

Estação	$Q_{mlt}$ [m <sup>3</sup> /s]			$Q_{max}$ [m <sup>3</sup> /s]			$Q_{min}$ [m <sup>3</sup> /s]			$Q_{95}$ [m <sup>3</sup> /s]		
	OBS	SIM	$\Delta Q$ [%]	OBS	SIM	$\Delta Q$ [%]	OBS	SIM	$\Delta Q$ [%]	OBS	SIM	$\Delta Q$ [%]
<b>65925000</b>	49	32	-35	990	984	-1	0,8	0,2	-79	10,0	1,4	-86
<b>65927000</b>	96	68	-29	1356	2064	+52	6,7	0,4	-94	16,6	3,0	-82
<b>65955000</b>	46	36	-22	615	681	+11	1,4	0,3	-80	3,6	1,5	-59
<b>65960000</b>	182	136	-25	2581	3007	+17	15,3	0,9	-94	30,4	5,8	-81
<b>65962000</b>	204	147	-28	2710	3211	+18	17,0	0,9	-94	31,8	6,2	-80

Fonte: elaboração própria.

**Figura 19.** Comparação das curvas de permanência dos valores observados e simulados no período de validação.

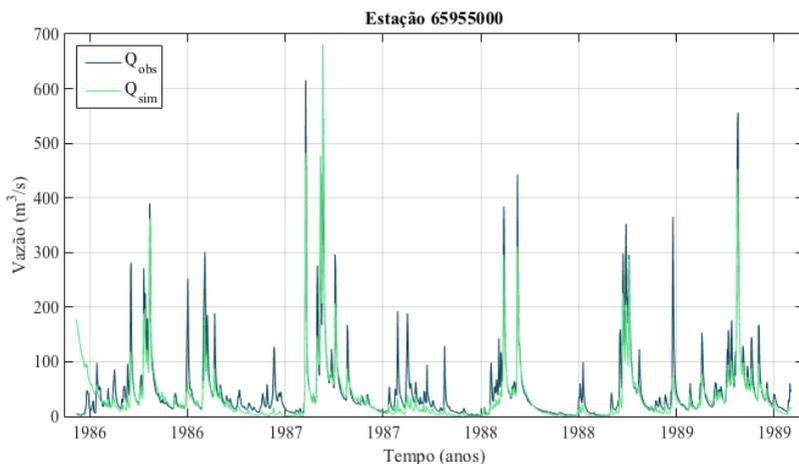


Fonte: elaboração própria.

Pelo exposto, deduz-se que tal variação se deve principalmente pelo fato da vazão de base ser constantemente subestimada ao longo do tempo, resultando em séries sintéticas com maior ocorrência de vazões reduzidas. Neste contexto, vale mencionar que este comportamento poderia ser suavizado pelo ajuste dos parâmetros calibráveis do modelo, como a capacidade de armazenamento de água no solo ( $W_m$ ) e o próprio fluxo de base da mini-bacia ( $Q_B$ ).

No que tange a análise dos hidrogramas das séries observadas e sintéticas, verifica-se que o início da série simulada é caracterizado por valores muito superiores aos observados, como exemplificado na Figura 20. Tal comportamento pode ser justificado pelo fato do modelo não levar em conta as condições iniciais da área de estudo, necessitando de um “período de aquecimento” para representação adequada do sistema hidrológico.

**Figura 20.** Exemplo de comparação entre hidrograma observado ( $Q_{obs}$ ) e simulado ( $Q_{sim}$ ) no período de validação (1986-1990).



Adicionalmente, é possível reparar que os picos e vales dos hidrogramas possuem magnitudes desconformes, porém ocorrem em tempos coincidentes. Sendo assim, constata-se que a principal discrepância entre tais gráficos consistiu em um deslocamento vertical dos valores simulados em relação aos observados. Uma vez que tal deficiência não afetaria significativamente a comparação de variações

percentuais entre cenários, os parâmetros calibráveis adotados para validação foram considerados adequados para as demais simulações.

### 4.3 AVALIAÇÃO DOS CENÁRIOS CLIMÁTICOS

A fim de facilitar a compreensão das informações expostas, este item utiliza as seguintes siglas para os diferentes cenários de simulação:

- SIM\_OBS = simulação a partir da série histórica de 1988-2007;
- A2\_01 = simulação para o cenário A2 no período 2011-2030;
- A2\_02 = simulação para o cenário A2 no período 2080-2099;
- B1\_01 = simulação para o cenário B1 no período 2011-2030;
- B1\_02 = simulação para o cenário B1 no período 2080-2099.

#### 4.3.1 Alterações nas vazões naturais afluentes

A Tabela 20 lista as vazões médias, máximas, mínimas e de 95% de permanência referentes às séries simuladas para os cenários estudados. Salienta-se que as deficiências observadas durante a etapa de validação do modelo hidrológico estão embutidas em todos os resultados apresentados, permitindo uma comparação neutra entre os diferentes cenários. Sendo assim, conclui-se que as acentuadas reduções nas vazões apresentadas em relação ao cenário SIM\_OBS são majoritariamente atribuídas à variação dos dados de entrada pluviométricos.

Com base nesta dedução, é possível notar a grande sensibilidade do sistema hidrológico estudado às disparidades entre o comportamento intra-anual das projeções do modelo HadCM3 e das precipitações médias mensais observadas na BRC, aspecto destacado no item 4.1. Por este motivo, a análise dos resultados obtidos neste estudo focou na comparação entre as projeções dos períodos de 2011-2030 e 2080-2099 dos cenários A2 e B1.

Os resultados obtidos seguem a mesma tendência de redução de vazões observada por SCHAEFFER *et al.* (2008) em estudo similar na bacia do rio Paraná. Porém, verificou-se que as reduções observadas nas vazões da BRC foram significativamente maiores. Uma possível justificativa para esta diferença consiste no fato que o estudo mencionado utilizou projeções geradas por um sistema de modelagem regional, o qual proporcionou um aumento da resolução dos resultados do modelo HadCM3. Ademais, fatores como a considerável diferença entre as áreas das bacias estudadas, os cenários selecionados e os

períodos de referência analisados também podem ter contribuído para as discrepâncias em questão.

**Tabela 20.** Variações percentuais das vazões médias de longo período ( $Q_{mlt}$ ), máximas ( $Q_{max}$ ), mínimas ( $Q_{min}$ ), e de 95% de permanência ( $Q_{95}$ ) das séries simuladas para os cenários climáticos A2 e B1 em relação aos valores do cenário SIM\_OBS.

$Q_{ref}$	UHE	Cenário				
		SIM_OBS [m <sup>3</sup> /s]	A2_01 [Δ%]	A2_02 [Δ%]	B1_01 [Δ%]	B1_02 [Δ%]
$Q_{mlt}$	VGB	145,9	-74	-53	-74	-67
	SG	77,1	-74	-53	-74	-67
	CCH	50,9	-74	-53	-74	-67
	SJ	47,9	-74	-53	-74	-67
	TDD	35,3	-73	-53	-74	-68
$Q_{max}$	VGB	4423,5	-80	-68	-82	-72
	SG	2582,5	-73	-56	-74	-64
	CCH	1666,0	-64	-52	-69	-63
	SJ	1562,9	-66	-52	-71	-61
	TDD	1194,8	-73	-52	-72	-61
$Q_{min}$	VGB	0,9	-81	-72	-82	-80
	SG	0,4	-86	-78	-87	-85
	CCH	0,3	-87	-80	-88	-86
	SJ	0,3	-86	-79	-88	-86
	TDD	0,2	-88	-81	-89	-88
$Q_{95}$	VGB	6,7	-84	-71	-84	-77
	SG	3,4	-80	-65	-80	-73
	CCH	2,2	-76	-63	-78	-72
	SJ	2,0	-77	-63	-79	-72
	TDD	1,5	-80	-63	-79	-72

Fonte: elaboração própria.

Verifica-se que as mudanças percentuais em relação ao cenário SIM\_OBS das vazões de referência analisadas são extremamente similares para todas as UHEs de acordo com o cenário. Estes resultados se devem à perda de variabilidade espacial devido à resolução espacial do GCM utilizado, uma vez que foram utilizados os mesmos valores

médios projetados para correção de viés das séries de todas as estações pluviométricas estudadas.

Os resultados obtidos mostram que ambos os cenários A2 e B1 apresentam aumentos da  $Q_{95}$  entre os períodos de 2011-2030 e 2080-2099. Entretanto, observa-se que o cenário A2 disfruta de acréscimos consideravelmente maiores que o cenário B1 entre os períodos em questão, com incrementos na faixa de 57% a 87% e 28% a 40%, respectivamente. A UHE Cachoeirinha destaca-se como o aproveitamento que demonstra as menores alterações percentuais ao longo do tempo, enquanto as UHEs Volta Grande Baixa e Salto Grande, situadas à jusante, são as que sofrem as maiores variações percentuais nos cenários estudados.

Dada a disposição em cascata dos reservatórios estudados, é imperativo ressaltar que caso fosse considerado o efeito da retirada d'água dos aproveitamentos à montante, seriam esperados impactos maiores nas UHEs situadas mais à jusante do rio Chopim.

#### 4.3.2 Estimativa das energias firmes

Os resultados referentes à estimativa das energias firmes dos aproveitamentos estudados encontram-se apresentados na Tabela 21, na qual constam os valores de energia firme (Ef) de cada UHE e suas variações percentuais em relação ao valor inicial (SIM\_OBS).

**Tabela 21.** Estimativa das energias firmes (Ef) das UHEs estudadas, expressas em  $MW_{med}$ , e suas variações percentuais em relação ao cenário SIM\_OBS.

UHE	Parâmetro	Cenário				
		SIM_OBS	A2_01	A2_02	B1_01	B1_02
VGB	Ef	36,76	8,37	15,38	8,52	11,09
	$\Delta Ef$	0%	-77%	-58%	-77%	-70%
SG	Ef	27,86	6,18	11,49	6,27	8,19
	$\Delta Ef$	0%	-78%	-59%	-78%	-71%
CCH	Ef	27,81	6,14	11,23	6,17	8,03
	$\Delta Ef$	0%	-78%	-60%	-78%	-71%
SJ	Ef	36,44	8,04	14,69	8,08	10,5
	$\Delta Ef$	0%	-78%	-60%	-78%	-71%
TDD	Ef	11,16	2,40	4,38	2,40	3,12
	$\Delta Ef$	0%	-79%	-61%	-79%	-72%

Fonte: elaboração própria.

A partir do estudo de viabilidade da UHE Volta Grande Baixa da ANEEL (ANEEL, 2003), sabe-se que o valor de energia firme real deste aproveitamento era estimado em  $30,59 \text{ MW}_{\text{med}}$ , utilizando uma vazão crítica equivalente a  $155,60 \text{ m}^3/\text{s}$ . Tendo em vista que o resultado obtido apresenta um aumento de cerca de 20% da energia firme real utilizando uma vazão crítica ( $Q_{\text{mlt}}$ ) de 6% menor do que a citada no documento mencionado, as aproximações adotadas com relação à estimativa da queda líquida e vazão crítica utilizadas nos cálculos das energias firmes foram consideradas aceitáveis.

Nota-se que para o período de 2011-2030, os cenários A2 e B1 apresentam praticamente a mesma variação percentual em relação a energia firme calculada para o período de 1988-2007. A análise dos valores referentes ao período de 2080-2099 mostra uma tendência de recuperação, com aumento da energia firme calculada para todas as UHes estudadas em ambos os cenários. Verifica-se que o cenário A2 proporcionaria valores de energia firme de 83% a 86% maiores do que o período precedente (A2\_01), resultados mais desejáveis do que os aumentos proporcionados pelo cenário B1, os quais giram em torno de 30%.

Neste contexto, vale citar o estudo da vulnerabilidade do sistema de energia elétrica à mudança climática no Brasil, apresentado em MARENGO *et al.* (2009). Apesar de relevantes diferenças em metodologia, a referida investigação também contemplou o aspecto da energia firme para todas as bacias hidrográficas brasileiras. No que tange a bacia do Paraná, verificou-se uma redução de 38% da energia firme para o cenário A2 no período de 2025-2100. Mais uma vez, nota-se que os resultados obtidos para a BRC seguem a mesma tendência observada na literatura, porém com alterações consideravelmente mais elevadas.

#### 4.3.3 Volumes de regularização

Na Tabela 22, estão apresentados os volumes de regularização necessários para garantia das energias firmes estimadas para cada cenário, juntamente com suas variações percentuais em relação ao cenário SIM\_OBS.

Analisados isoladamente, pode-se afirmar que os volumes obtidos para o cenário A2 seguem a mesma tendência geral de “recuperação” a longo termo observada nos critérios de avaliação previamente expostos, com resultados mais favoráveis no período de 2080-2099 em relação ao período de 2011-2030. Os valores do cenário B2, por sua vez, não

revelam correlações ou padrões detectáveis. Todavia, constata-se que a avaliação exclusiva dos volumes não oferece conclusões relevantes.

Logo, nota-se ser essencial a consideração de outros aspectos, como a energia firme e a duração de períodos críticos para uma interpretação qualitativa significativa dos dados apresentados.

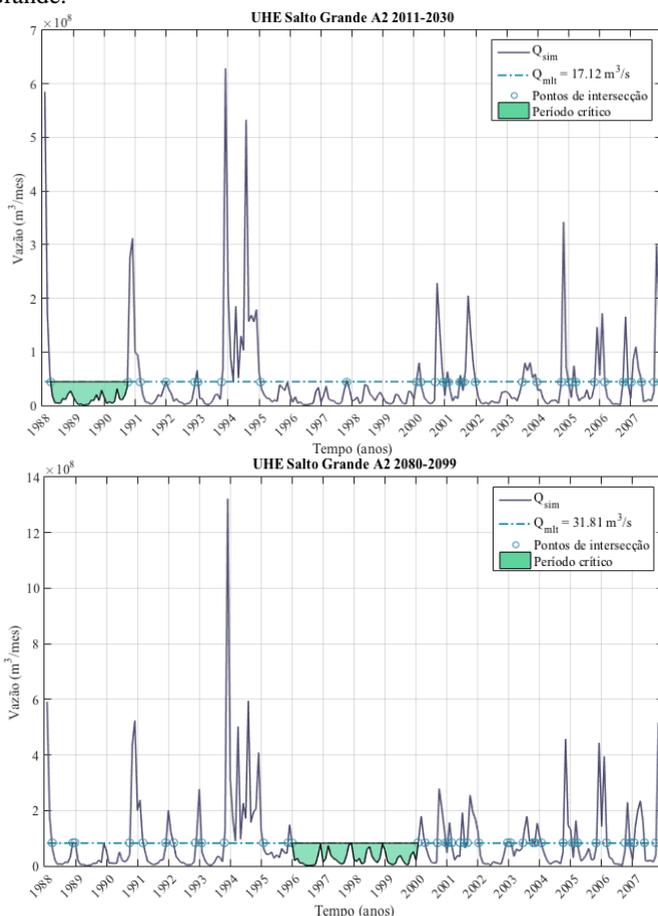
**Tabela 22.** Volumes para garantia da energia firme calculada para cada cenário, expressos em hm<sup>3</sup>.

UHE	Parâmetro	Cenário				
		SIM_OBS	A2_01	A2_02	B1_01	B1_02
<b>VGB</b>	V	4974,8	2932,5	3620,5	1998,4	2263,1
	$\Delta V$	0%	-41%	-27%	-60%	-55%
<b>SG</b>	V	2664,2	960,5	2631,8	1007,4	891,4
	$\Delta V$	0%	-64%	-1%	-62%	-67%
<b>CCH</b>	V	1737,5	605,1	894,7	629,5	557,9
	$\Delta V$	0%	-65%	-49%	-64%	-68%
<b>SJ</b>	V	1633,8	568,5	842,7	590,8	521,6
	$\Delta V$	0%	-65%	-48%	-64%	-68%
<b>TDD</b>	V	1208,8	405,9	816,6	447,2	329,4
	$\Delta V$	0%	-66%	-32%	-63%	-73%

Fonte: elaboração própria.

A asserção supracitada é corroborada, por exemplo, pelos resultados referentes à UHE Salto Grande no cenário A2\_02. Observa-se que apesar de haver uma redução de apenas 1% do volume inicial, o referido cenário garantiria uma energia firme 59% menor do que a do cenário SIM\_OBS. Sendo assim, verifica-se que para garantia de uma mesma quantidade de energia, a UHE Salto Grande necessitaria de maiores reservatórios no cenário A2\_02 em comparação com o SIM\_OBS. Como apresentado na Figura 21, isto se deve à acentuada mudança na duração do período crítico dos hidrogramas dos cenários A2\_01 e A2\_02, a qual passa de 33 meses para 49 meses.

**Figura 21.** Representação dos períodos críticos e polígonos utilizados para cálculo do volume de regularização para os cenários A2\_01 e A2\_02 na UHE Salto Grande.



Fonte: elaboração própria.

Sendo assim, visando incluir os fatores previamente mencionados na análise dos volumes calculados, a Tabela 23 traz a listagem da duração dos períodos críticos de estiagem para cada cenário e UHE, além de suas respectivas relações volume/energia ( $V/E_f$ ). Tal índice representa o volume necessário em  $\text{hm}^3$  para a garantia  $1 \text{ MW}_{med}$  de energia, sendo obtido pela divisão do volume de regularização pela energia firme de cada cenário.

**Tabela 23.** Duração dos períodos críticos ( $\Delta t_{\text{crítico}}$ ), expressas em meses, e relações volume/energia (V/Ef), expressas em  $\text{hm}^3/\text{MW}_{\text{med}}$ , referentes às UHEs e cenários estudados.

UHE	Parâmetro	Cenário				
		SIM_OBS	A2_01	A2_02	B1_01	B1_02
VGB	$\Delta t_{\text{crítico}}$	19	50	35	30	28
	V/Ef	135,3	350,5	235,4	234,5	204,2
SG	$\Delta t_{\text{crítico}}$	20	33	49	35	20
	V/Ef	95,6	155,4	229,1	160,7	108,8
CCH	$\Delta t_{\text{crítico}}$	20	30	26	30	20
	V/Ef	62,5	98,6	79,6	101,9	69,5
SJ	$\Delta t_{\text{crítico}}$	20	30	26	30	20
	V/Ef	44,8	70,7	57,4	73,1	49,7
TDD	$\Delta t_{\text{crítico}}$	19	30	35	35	19
	V/Ef	108,3	169,2	186,4	186,5	105,7

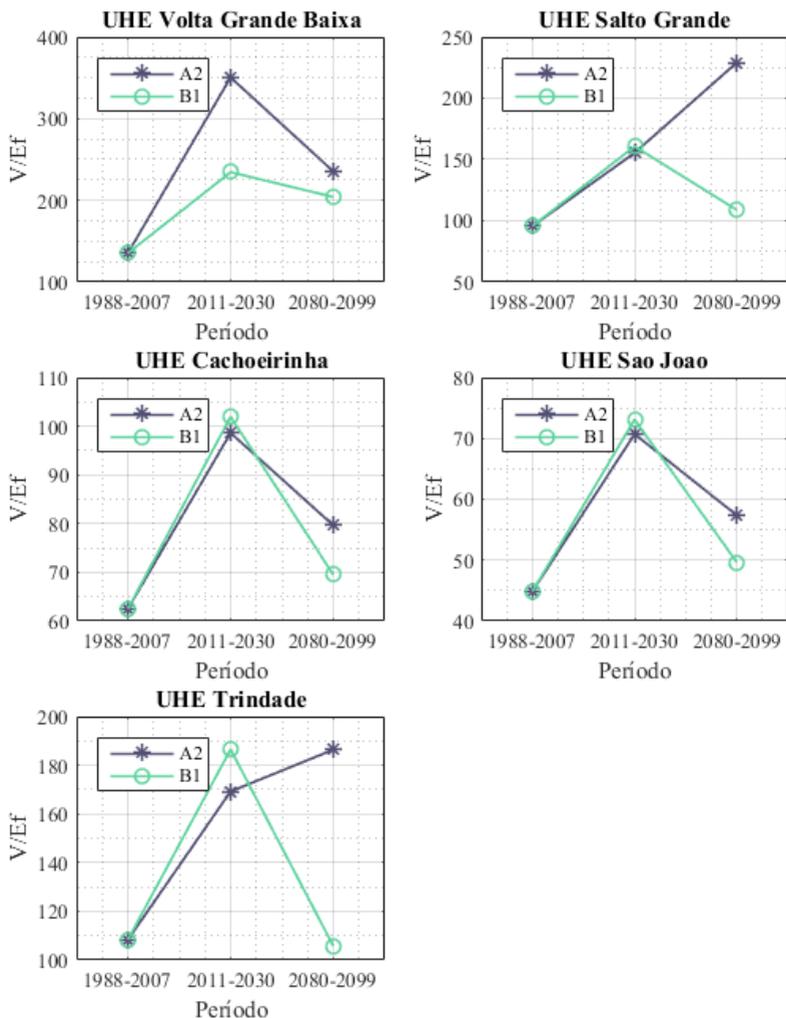
Fonte: elaboração própria.

Os resultados apresentados indicam que, neste contexto, o cenário B1 é o que proporcionaria impactos mais desejáveis em comparação ao cenário A2, devido às menores relações V/Ef e variações nas durações dos períodos de estiagem em geral. Salienta-se principalmente a diferença nos períodos de estiagem no estudo hidrológico da UHE Volta Grande Baixa, onde o cenário A2\_01 apresenta duração de 50 meses, comparados aos 30 meses do cenário B1\_01. Ainda, é possível observar que para todas as UHEs, o cenário A2\_02 acarretaria em maiores relações de V/Ef do que o cenário B1\_02, destacando-se as UHEs Salto Grande e Trindade (Figura 22).

Nota-se que indicadores como a relação V/Ef podem ser de grande valia para tomada de decisões relacionadas ao planejamento de bacias hidrográficas. A utilização destes dados como insumo auxiliaria, por exemplo, a avaliação do benefício construir ou manter uma UHE de certo volume levando em conta não só a demanda de energia, mas também a disponibilidade de área na região.

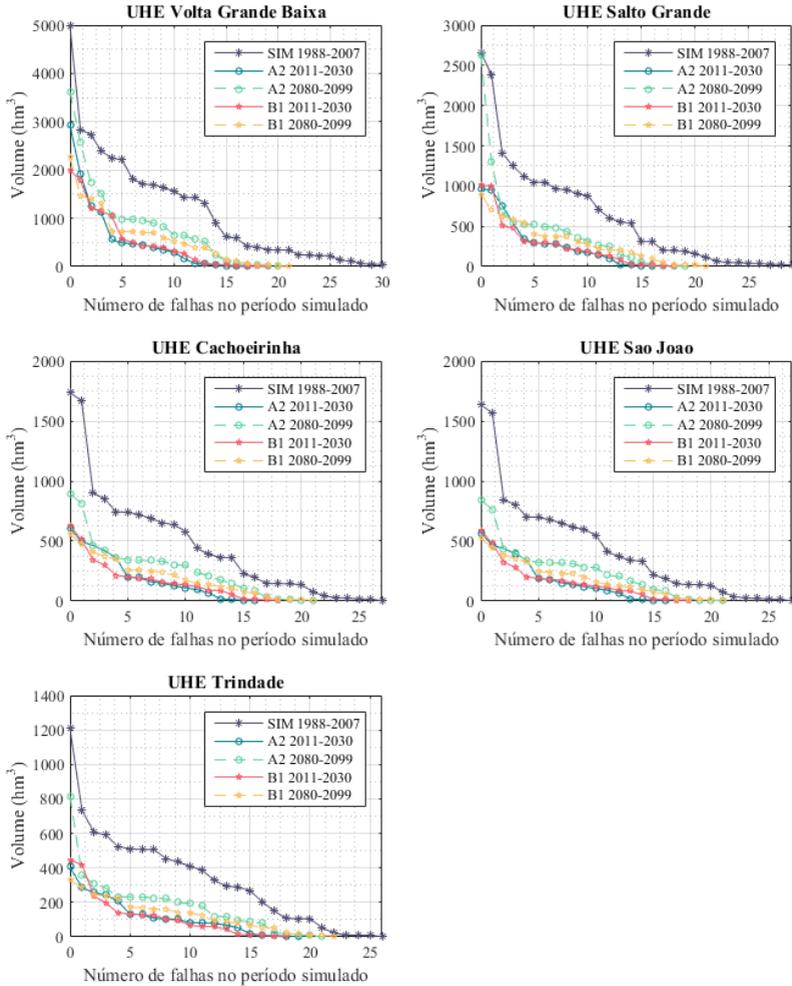
Neste sentido, decisões deste cunho também poderiam ser melhor amparadas pela elaboração de materiais como os gráficos apresentados na Figura 23, os quais relacionam o volume do reservatório adotado para garantia da energia firme com o número de falhas que o mesmo apresentaria em um período de 20 anos.

**Figura 22.** Evolução da relação  $V/Ef$  para cada um dos períodos simulados. Obs.: ponto de 1988-2007 pertencente ao cenário SIM\_OBS, sendo somente um parâmetro de referência na comparação dos cenários A2 e B1.



Fonte: elaboração própria.

**Figura 23.** Relação do volume de regularização adotado com o número de falhas que ocorreriam no período simulado.



Fonte: elaboração própria.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresentado propôs-se a investigar possíveis impactos de mudanças climáticas nos volumes de cinco usinas hidrelétricas (UHEs) localizadas na bacia do rio Chopim (BRC), no estado do Paraná. Para este fim, foram realizadas: (1) a análise das alterações no regime pluviométrico da BRC de acordo com projeções climáticas do GCM HadCM3 referentes aos cenários de emissões de GEEs A2 e B1 do IPCC; (2) a avaliação do desempenho do modelo MGB-IPH na reprodução dos processos hidrológicos da bacia; (3) a estimativa de vazões para os cenários de mudança climática, utilizando as projeções climáticas de precipitação como entrada no modelo hidrológico validado.

A análise das alterações no regime pluviométrico da BRC permitiu a verificação de uma disparidade expressiva entre os comportamentos intra-anuais das médias mensais das precipitações observadas e das projetadas pelo modelo climático. Observou-se que os cenários examinados proporcionariam reduções significativas principalmente no período de inverno. Neste contexto, destaca-se o mês de julho, o qual apresentou reduções de até 74% da média observada durante o período de 1988-2007.

Nota-se que os resultados obtidos corroboraram a constatação mencionada no item 2.2.1 sobre a dificuldade no uso de GCMs em estudos de caráter local. Desta forma, é possível inferir que a desarmonia entre a resolução espacial do GCM e as dimensões da BRC foi um fator contribuinte para a discordância detectada entre os dados estudados. Todavia, vale ressaltar que as projeções de diferentes GCMs podem divergir de maneira considerável entre si. Tal asserção admite a possibilidade de haver outro GCM que seja mais adequado a área estudada, a despeito da escala de suas projeções.

No que tange a validação do modelo hidrológico, constatou-se que foi possível reproduzir satisfatoriamente os processos hidrológicos da BRC pelo modelo MGB-IPH com os parâmetros calibráveis encontrados em literatura. Observou-se que os coeficientes de Nash-Sutcliffe variaram entre 0,68 e 0,77, desempenho classificado como “bom” e “muito bom” de acordo com os critérios apresentados no item 3.5. A principal deficiência detectada nas simulações realizadas foi uma importante tendência do modelo hidrológico de subestimar a vazão de base da bacia ao longo do tempo, acarretando em um deslocamento vertical do hidrograma simulado em relação ao observado.

A avaliação dos resultados associados às simulações dos cenários climáticos fundamentou-se em três aspectos: (1) alterações nas vazões naturais afluentes aos reservatórios; (2) estimativa das energias firmes; e (3) volume de regularização necessário para garantia da energia firme de cada cenário. Os critérios adotados permitiram ilustrar a complexidade associada à dinâmica do sistema hidroclimático, oferecendo perspectivas diferentes acerca do problema analisado. Entretanto, levaram a conclusões elusivas e até aparentemente contraditórias, não sendo possível apontar claras tendências analisando os três parâmetros supracitados em conjunto.

Foram identificadas drásticas reduções nas vazões e valores de energia firme nas simulações referentes às projeções dos cenários A2 e B1 no período de 2011-2030 comparadas ao cenário SIM\_OBS (período de 1988-2007 simulado), apesar do pequeno intervalo entre os períodos analisados. Em contrapartida, observou-se que o período de 2080-2099 proporcionou resultados mais desejáveis do que o período de 2011-2030 para ambos os cenários em geral. Uma vez que o único dado de entrada alterado nas simulações realizadas, verificou-se a extrema sensibilidade do sistema às alterações no regime pluviométrico previamente discutidas. Diante disto, entende-se que a utilização das projeções do GCM HadCM3 em conjunto com a técnica de remoção de viés simples na geração das séries sintéticas diárias dos cenários climáticos não foi a metodologia mais indicada para o estudo da BRC.

Apesar dos cenários A2 e B1 serem considerados “pessimista” e “otimista” do ponto de vista do aumento da temperatura terrestre, tais classificações não apresentaram correlações diretas com os resultados deste trabalho. Como exemplo, nota-se que o cenário A2 proporcionou valores de  $Q_{95}$  e energia firme em torno de 60% menores que os valores iniciais (SIM\_OBS) a longo prazo (2080-2099), resultados mais oportunos do que as reduções de cerca de 70% no cenário B1 para o mesmo período.

No entanto, a análise dos períodos críticos associados ao cálculo dos volumes de regularização para cada cenário revelou que o cenário A2 tende a apresentar períodos de estiagem de maior duração do que o cenário B1 de maneira geral. Cabe ressaltar que tal resultado vai de acordo com a teoria que incrementos na temperatura terrestre aumentariam também a probabilidade de eventos extremos mais frequentes e intensos.

Diante das investigações realizadas, constatou-se que os impactos de mudanças climáticas no volume de reservatórios para geração de energia não devem ser analisados isoladamente na busca de conclusões

relevantes. Observou-se que indicadores como a relação  $V/E_f$  podem ser de extrema valia no planejamento de bacias hidrográficas envolvendo aproveitamentos hidrelétricos, além dos parâmetros convencionais. A título de exemplo, destaca-se que o referido índice representa um subsídio pertinente para avaliação custo/benefício da utilização de uma maior área superficial da região para a produção de uma dada quantidade de energia. Com relação aos resultados obtidos neste estudo, nota-se que o cenário B1 apresentou relações  $V/E_f$  menores a longo termo, indicando que necessitaria de menores volumes que o cenário A2 para garantia de cada  $1 \text{ MW}_{\text{med}}$  de energia.

## 5.1 RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos dentro do escopo deste estudo permitiram identificar novos caminhos a serem investigados para uma melhor compreensão do tema abordado. Levando em conta às incertezas pertinentes ao uso de GCMs, sugere-se o levantamento de projeções de precipitação de outros modelos climáticos globais. A comparação destes dados, por sua vez, permitiria verificar qual dos GCMs seria mais adequado para a BRC. Não obstante, deve-se frisar que a realização de um estudo similar a este utilizando projeções de modelos climáticos regionais é fortemente recomendada.

Adicionalmente, sendo possível a obtenção de mais dados referentes UHEs da bacia do rio Chopim, considera-se interessante a exploração de outros aspectos relacionados a estes empreendimentos. Alguns exemplos incluem a estimativa da própria geração de energia ou a estimativa perdas por evaporação. A partir destes estudos, seria válido também integrar projeções de população e demanda energética, visando incluir o componente humano na avaliação dos impactos de mudanças climáticas na região.

Propõe-se também a avaliação de desempenho da simulação de vazões pelos índices  $NS_{\log}$  e  $\Delta V$ , além da incorporação de informações como alterações no uso do solo ou projeções de outras variáveis climáticas neste trabalho. A ponderação de outros parâmetros ofereceria uma ideia da sensibilidade do sistema a cada um deles, proporcionando um melhor entendimento do comportamento hidrológico da bacia. Finalmente, julga-se que um estudo mais aprofundado, considerando as retiradas de aproveitamentos à montante, elucidaria de forma menos abstrata os possíveis impactos de mudanças climáticas nos empreendimentos hidrelétricos da BRC.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAM, K. N.; FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W. Mudanças climáticas e vazões extremas na Bacia do Rio Paraná. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 999-1007, 2015.

ALLASIA, D. G.; SILVA, B. C. D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Large basin simulation experience in South america. Seventh IAHS Scientific Assembly, 2006, Foz do Iguaçu, Brazil. IAHS Publ.

ANA. **Manual de Estudos de Disponibilidade Hídrica para Aproveitamentos Hidrelétricos**. Brasília, DF: Agência Nacional de Águas: 45 p. 2009.

\_\_\_\_\_. HidroWeb. 2015. Disponível em: < <http://hidroweb.ana.gov.br/> >. Acesso em: setembro de 2015.

ANEEL. **UHE Volta Grande Baixa - Estudo de Viabilidade**. 2003

\_\_\_\_\_. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL: 236 p. 2008.

\_\_\_\_\_. Banco de Informações de Geração. 2015a. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm> >. Acesso em: novembro de 2015.

\_\_\_\_\_. **Resolução Normativa nº 673, de 4 de agosto de 2015** 2015b.

\_\_\_\_\_. SIGEL - Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico. 2015c. Disponível em: < <http://sigel.aneel.gov.br/sigel.html> >. Acesso em: agosto de 2015.

ARCHER, D.; RAHMSTORF, S. **The Climate Crisis: An Introductory Guide to Climate Change**. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2009.

ARNELL, N. W.; GOSLING, S. N. The impacts of climate change on river flow regimes at the global scale. **Journal of Hydrology**, v. 486, p. 351-364, 4/12/ 2013. ISSN 0022-1694. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169413001224> >.

BEVEN, K. J. **Rainfall-Runoff Modelling: The Primer**. Wiley, 2012. ISBN 9780470714591. Disponível em: < <https://books.google.fr/books?id=oB5G3ekgxpG> >.

BEVEN, K. J.; LAMB, R.; QUINN, P.; ROMANOWICZ, R.; FREER, J. Topmodel. In: SINGH, V. P. (Ed.). **Computer Models of Watershed Hydrology**. Fort Collins, Colorado: Water Resources Publications, 1995. p.627-668.

BRASIL; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano Decenal de Expansão de Energia 2022. Brasília, 2013.

BREMICKER, M. **Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells für das Weser und das Ostsee Einzugsgebiet als Baustein eines Atmosphären-HydrologieModells**. 1998. Tese (PhD). Geowissenschaftlicher Fak. der Albert-Ludwigs-Univ, Freiburg, Alemanha.

BURROUGHS, W. J. **Climate Change: A Multidisciplinary Approach**. 2. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

CASTANHARO, G.; GIBERTONI, R. F. C.; MULLER, I. I.; ANDRIOLO, M. V.; KAVISKI, E.; GUILHON, L. G. F.; ROCHA, V. F. Previsão de Vazões na Bacia do Rio Iguaçu Baseada no Modelo SMAP e com Incorporação de Informações de Precipitação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 3, p. 57-68, 2007.

CATALDI, M.; MACHADO, B. G. D. F.; SILVA, S. B. D.; GUILHON, L. G. F.; ACHÃO, C. D. C. L. Aplicação das Técnicas de Mineração de Dados como Complemento às Previsões Estocásticas Univariadas de Vazão Natural: Estudo de Caso para a Bacia do Rio Iguaçu. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 3, p. 83-92, 2007.

CATALDI, M.; MACHADO, C. O.; GUILHON, L. G. F.; CHOU, S. C.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F. Análise das Previsões de Precipitação Obtidas com a Utilização do Modelo Eta como Insumo para Modelos de Previsão Semanal de Vazão Natural. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 3, p. 5-12, 2007.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. New York: Tata McGraw-Hill Education, 1988. ISBN 9780070702424. Disponível em: < <https://books.google.com.br/books?id=RRwidSsBJrEC> >.

COLLISCHONN, W. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. 2001. (PhD). Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

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

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; TUCCI, C. E. M.; PAZ, A. R. Coupling meteorological and hydrological models for medium-range streamflow forecasts in the Parana basin. **IAHS-AISH Publication**, v. 313, p. 167-173, 2007.

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

\_\_\_\_\_. **Manual de Exemplos do Modelo MGB-IPH: Rio das Almas**. Porto Alegre, RS: UFRGS 2010b.

CRAWFORD, N. H.; LINSLEY, R. K. **Digital simulation in hydrology: Stanford watershed model IV**. Stanford University. Stanford, Califórnia, p.210. 1966

CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 1, p. 111-124, 2008.

DESSLER, A. **Introduction do Modern Climate Change**. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.

EGGLETON, T. **A Short Introduction to Climate Change**. New York and Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 246.

EL BASSAM, N.; MAEGAARD, P.; SCHLICHTING, M. L. Distributed Renewable Energies for Off-Grid Communities. **Distributed Renewable Energies for Off-Grid Communities**, p. 167-174, 2013. ISSN 9780123971784.

EMBRAPA. **Mapa de Solos do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE 2001.

\_\_\_\_\_. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE SOLOS. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI 2006.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, p. 243-254, 2014.

FIGUEIREDO, K.; BARBOSA, C. R. H.; CRUZ, A. V. A. D.; VELLASCO, M.; PACHECO, M. A. C.; CONTRERAS, R. J.; BARROS, M.; SOUZA, R. C.; MARQUES, V. D. S.; DUARTE, U. M.; MENDES, M. H. Modelo de Previsão de Vazão com Informação de Precipitação Utilizando Redes Neurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 3, p. 69-82, 2007.

FUNG, C. F.; LOPEZ, A.; NEW, M. **Modelling the Impact of Climate Change on Water Resources**. John Wiley & Sons, 2010. ISBN 9781405196710. Disponível em: < <https://books.google.fr/books?id=ttkBj-ps96EC> >.

GOVERNO DO ESTADO DO PARANÁ. **Bacias Hidrográficas do Paraná**. Secretaria do Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos - SEMA. Curitiba. 2010 Disponível em: < [http://www.meioambiente.pr.gov.br/arquivos/File/corh/Revista\\_Bacias\\_Hidrograficas\\_do\\_Parana.pdf](http://www.meioambiente.pr.gov.br/arquivos/File/corh/Revista_Bacias_Hidrograficas_do_Parana.pdf) >.

GUÉGAN, M.; UVO, C. B.; MADANI, K. Developing a module for estimating climate warming effects on hydropower pricing in California. **Energy Policy**, v. 42, p. 261-271, 3// 2012. ISSN 0301-4215. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421511009815> >.

GUILHON, L. G. F.; ROCHA, V. F.; MOREIRA, J. C. Comparação de Métodos de Previsão de Vazões Naturais Afluentes a Aproveitamentos Hidroelétricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, p. 13-20, 2007.

IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE 2012.

\_\_\_\_\_. Mapas temáticos. 2015a. Disponível em: < [ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas\\_tematicos/vegetacao/](ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/vegetacao/) >. Acesso em: setembro de 2015.

\_\_\_\_\_. O IBGE disponibiliza conjunto de informações históricas sobre a vegetação do Brasil. 2015b. Disponível em: < <http://saladeimprensa.ibge.gov.br/noticias?view=noticia&id=1&busca=1&idnoticia=2892> >. Acesso em: setembro de 2015.

INPE. Ambdata. 2015. Disponível em: < <http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/> >. Acesso em: setembro de 2015.

IPCC. **Summary for Policymakers: Emissions Scenarios**. p.27. 2000

\_\_\_\_\_. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Geneva, Switzerland, p.151. 2015a

\_\_\_\_\_. Data Distribution Centre. 2015b. Disponível em: < <http://www.ipcc-data.org/ar4/model-UKMO-HADCM3.html> >. Acesso em: dezembro de 2015.

IPH. MGB-IPH. 2015. Disponível em: < <https://www.ufrgs.br/hge/mgb-iph/> >. Acesso em: agosto de 2015.

JAYAWARDENA, A. W. **Environmental and Hydrological Systems Modelling**. Taylor & Francis, 2014. ISBN 9780415465328. Disponível em: < <https://books.google.fr/books?id=InlcAgAAQBAJ> >.

KARAMOUZ, M.; NAZIF, S.; FALAHI, M. **Hydrology and Hydroclimatology: Principles and Applications**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2012.

KIRONO, D. G. C.; HENNESSY, K.; MPELASOKA, F.; KENT, D. **Approaches for generating climate change scenarios for use in drought projections – a review**. CSIRO. Australia. 2011

LAURENTIS, G. L. D. **Modelo de Transferência de Riscos Hidrológicos como Estratégia de Adaptação às Mudanças Globais Segundo Cenários de Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos**. 2012. Tese de doutorado Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

LIMA, C. H. R.; LALL, U. Climate informed long term seasonal forecasts of hydroenergy inflow for the Brazilian hydropower system. **Journal of Hydrology**, v. 381, p. 65-75, 2010.

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

LITTLEWOOD, I. G.; JAKEMAN, A. J. A new method of rainfall–runoff modelling and its applications in catchment hydrology. In: ZANNETTI, P. (Ed.). **Environmental Modeling**. Southampton, UK: Computational Mechanics Publications, v.2, 1994. p.143-171.

LUCENA, A. F. P. D. **Proposta Metodológica para Avaliação da Vulnerabilidade às Mudanças Climáticas no Setor Hidrelétrico**. 2010. Tese de doutorado COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MADANI, K.; GUÉGAN, M.; UVO, C. B. Climate change impacts on high-elevation hydroelectricity in California. **Journal of Hydrology**, v. 510, p. 153-163, 2014.

MARENCO, J. A.; SCHAEFFER, R.; PINTO, H. S.; ZEE, D. M. W. **Mudanças Climáticas e Eventos Extremos no Brasil**. Rio de Janeiro. 2009 Disponível em: < [http://www.fbds.org.br/cop15/FBDS\\_MudancasClimaticas.pdf](http://www.fbds.org.br/cop15/FBDS_MudancasClimaticas.pdf) >.

MIRANDA, E. E. D., . Brasil em Relevô. Campinas, 2005. Disponível em: < <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br> >. Acesso em: agosto de 2015.

MME. **Manual de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas**. Ministério de Minas e Energia - MME. Brasília. 2007

\_\_\_\_\_. **Considerações Sobre a Repotenciação e Modernização de Usinas Hidrelétricas**. Rio de Janeiro. 2008 Disponível em: < [http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20081201\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20081201_1.pdf) >.

MOHOR, G. S.; RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J.; JÚNIOR, J. L. S. 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**, v. 4, p. 41-59, 2015.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations.

**American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007. ISSN 0001-2351.

NÓBREGA, M. T.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; PAZ, A. R. Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 15, n. 2, p. 585-595, 2011. ISSN 1607-7938. Disponível em: < <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/585/2011/> >.

ONS. Atualização de séries históricas de vazões - período 1931 a 2013. 2014. Disponível em: < <http://www.ons.org.br/download/operacao/hidrologia/Atualiza%C3%A7%C3%A3o%20de%20S%C3%A9ries%20Hist%C3%B3ricas%20de%20Vaz%C3%B5es%20-%201931%20a%202013.pdf> >. Acesso em: setembro de 2015.

PMBC. **Base científica para mudanças climáticas**. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p.464. 2014

REIS, D. A. D.; SILVA, L. F. Análise de dissertações e teses brasileiras de Educação Ambiental: compreensões elaboradas sobre o tema "mudanças climáticas". **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 22, p. 145-162, 2016. ISSN 1516-7313. Disponível em: < [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-73132016000100145&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-73132016000100145&nrm=iso) >.

SÁ, J. F. **Integração de Modelo Distribuído e Geoprocessamento**. 1995. Dissertação de Mestrado IPH, UFRGS, Rio Grande do Sul.

SANTANA, T. B.; SILVA, B. C. D.; SANTOS, A. H. M. **Estimativa de impactos de mudanças climáticas nas vazões do rio São Francisco**. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Maceió, AL: ABRH 2011.

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

SILVA, B. C. D. **Previsão hidroclimática de vazão para a bacia do rio São Francisco**. 2005. Tese (Doutorado). Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SILVA, B. C. D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; CORBO, M. D. Previsão Hidroclimática de Vazão de Curto Prazo na Bacia do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, p. 31-42, 2007.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 1 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1998.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; COLLISCHONN, W.; DA SILVA DIAS, P. L.; DE OLIVEIRA, G. S. Long-term flow forecasts based on climate and hydrologic modeling: Uruguay River basin. **Water Resources Research**, v. 39, n. 7, p. n/a-n/a, 2003. ISSN 1944-7973. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1029/2003WR002074> <http://onlinelibrary.wiley.com/store/10.1029/2003WR002074/asset/wrcr9655.pdf?v=1&t=ipnznoae&s=de2b9611a823a2df88cecafe5149e3d969de85> >.

USACE. **HEC-HMS Hydrologic Modeling System User's Manual**. CENTER, H. E. Davis, Califórnia: US Army Corps of Engineers 2000.

WOLFSON, R. **Energy, environment, and climate**. 1 ed. New York: W. W. Norton & Company, Inc, 2008. 531.

WOOD, E. F.; LETTENMAIER, D. P.; ZARTARIAN, V. G. A land-surface hydrology parameterization with subgrid variability for general circulation models. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 97, n. D3, p. 2717-2728, 1992. ISSN 2156-2202. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1029/91JD01786> >.