

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS**

**MATEUS NARDINI MENEGAZ**

**PROJEÇÃO DOS IMPACTOS NO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL(SIN) EM  
DIFERENTES CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

**Poços de Caldas/MG**

**2020**

MATEUS NARDINI MENEGAZ

PROJEÇÃO DOS IMPACTOS NO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL(SIN) EM  
DIFERENTES CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

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

Orientador: Prof. Dr. Rafael de Oliveira Tiezzi

Poços de Caldas/MG

2020

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

Menegaz, Mateus Nardini.  
M541p Projeção dos impactos no Sistema Interligado Nacional (SIN) em  
diferentes cenários de mudanças climáticas / Mateus Nardini  
Menegaz. -- Poços de Caldas/MG, 2020.  
78 f. –

Orientador(a): Rafael de Oliveira Tiezzi.  
Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) –  
Universidade Federal de Alfenas, campus Poços de Caldas, 2020.  
Bibliografia.

1. Mudanças climáticas. 2. Bacias hidrográficas. 3. Conservação  
dos recursos hídricos. I. Tiezzi, Rafael de Oliveira. II. Título.

CDD – 551.6

**MATEUS NARDINI MENEGAZ**

**PROJEÇÃO DOS IMPACTOS NO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL(SIN) EM  
DIFERENTES CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

A Banca examinadora abaixo-assinada, aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em: 20 de fevereiro de 2020

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

Assinatura:



Prof. Dr. Luiz Felipe Ramos Turci  
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:



Prof. Dr. André Arruda Lyra  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Assinatura:



Dedico este trabalho aos meus pais, amigos e professores pelo apoio incondicional em toda minha trajetória acadêmica e profissional.

## **AGRADECIMENTOS**

Meus agradecimentos são para todos que de alguma forma me auxiliam no trajeto profissional, acadêmico e pessoal durante toda a realização do estudo. A Universidade Federal de Alfenas, pela disponibilidade de estrutura física e acadêmica para toda execução do projeto.

O Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia Ambiental, pela disponibilidade de um corpo docente mais que qualificado para o desenvolvimento da pesquisa, em especial aos professores, Alexandre Silveira, Flávio Golçalves e Luiz Felipe Turci, por me acolherem no início complicado no programa a qual estava incapacitado de presenciar as aulas durante um tempo.

Ao meu orientador, Rafael de Oliveira Tiezzi, pela disponibilidade e ajuda em toda a trajetória da pesquisa, nas horas de dúvidas e conversas ao longo de 2 anos, que também através do desafio de completar a pesquisa que necessitava de muito empenho me mostrou a importância do foco.

Ao professor Diego Sardinha, que além das excelentes aulas, me aturava por horas e horas na sala ao lado processando os dados e batendo um papo.

Novamente aos demais professores, que de alguma forma, nos corredores, nas salas ou nos cafés ajudaram de alguma forma.

Aos meus amigos, conhecidos por Toretos, pelas horas de conversa, pela ajuda nos momentos difíceis, pelas cervejas e por todo o resto que palavras não medem.

Em especial, a minha família, meus pais, por me darem o suporte emocional e financeiro para completar essa jornada, aos meus irmãos pelas conversas e cervejas, ao meu filho, por nele eu sempre encontrar forças para cada dia ser melhor, para a Be, mãe do meu filho, que sempre me ajudou na criação dele de forma exemplar, e aos tios, primos e irmãos de coração, por fazerem parte da minha vida.

Obrigado, a todos vocês e mais aqueles que me esqueço por hora, a ajuda de vocês foi essencial para todo meu caminho, desde o início até a entrega desta dissertação, sem vocês certeza que não conseguiria.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

*Satisfação em Movimento*  
(Do AUTOR)

## RESUMO

No mundo apenas 2,5% dos recursos hídricos do mundo estão disponíveis para as atividades humanas. Deste aproximadamente 99,7% se encontra de difícil acesso para consumo. Com isso é indispensável o estudo sobre os 0,3% dos recursos hídricos disponíveis para os usos da população. O Brasil é um país com grandes aportes de recursos hídricos, do disponível no mundo, cerca de 12% se encontra no país. Este estudo tem por finalidade o estudo dos possíveis impactos das mudanças climáticas no Sistema Interligado Nacional (SIN). Para realizar a análise foi utilizado 4 modelos climáticos globais: BESM, CanESM, HadGEM2-ES e Miroc5, regionalizados pelo modelo regional climática Eta, desenvolvido pelo CPTEC/INPE, em 3 diferentes cenários: Histórico(1960-1989), RCP 4.5(2010-2099) e RCP 8.5(2010-2099) para obter os dados de precipitação e evapotranspiração. Para obtenção das vazões foram utilizados dois modelos concentrados de chuva-vazão: SMAP e MEL. O estudo demonstra uma certa preocupação quanto a operacionalidade do SIN a longo prazo. A bacias estudadas poderão sofrer com perda das vazões o que consequentemente impacta na capacidade total do sistema. Os subsistemas Centro-Oeste/Sudeste e Nordeste que poderão sofrer os maiores impactos, sendo que nos primeiros meses do ano podem chegar a mais de 50% da capacidade atual. O SIN, como um todo, poderá sofrer perdas na mesma proporção que o subsistema Centro-Oeste Sudeste, uma vez que ele representa 50% da capacidade do SIN. Por fim, é necessário ampliar os estudos sobre mudanças climáticas e seus impactos, a ferramenta de modelos hidrológicos acoplados a modelos climáticos obteve resultados aceitáveis, que são ótimos meios para os tomadores de decisão do país tentarem mitigar os impactos das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas. Modelagem Hidrológica. Bacias Hidrográficas. Recursos Hídricos. Impactos das mudanças climáticas. Sistema Interligado Nacional.



## ABSTRACT

In the world, only 2.5% of the world's water resources are available for human activities. Of this, approximately 99.7% is difficult to access for consumption. Thus, it is essential to study the 0.3% of water resources available for the population's uses. Brazil is a country with large contributions of water resources, of the available in the world, about 12% is in the country. This study aims to study the possible impacts of climate change on the National Interconnected System (SIN). To carry out the analysis, 4 global climate models were used: BESM, CanESM, HadGEM2-ES and Miroc5, regionalized by the Eta regional climate model, developed by CPTEC / INPE, in 3 differ scenarios: History (1960-1989), RCP 4.5 (2010-2099) and RCP 8.5 (2010-2099) to obtain data on precipitation and evapotranspiration. To obtain the flows, two concentrated rain-flow models were used: SMAP and MEL. The study shows some concern about the long-term operationality of the BIPS. The studied basins may suffer from loss of flow, which consequently impacts the total capacity of the system. The Midwest / Southeast and Northeast subsystems that may suffer the greatest impacts, and in the first months of the year they can check more than 50% of the current capacity. The SIN, as a whole, may suffer losses in the same proportion as the Midwest Southeast subsystem, since it represents 50% of the SIN's capacity. Finally, it is necessary to expand studies on climate change and its impacts, the hydrological model tool coupled with climate models obtained acceptable results, which are great ways for the country's decision makers to try to mitigate the impacts of climate change.

Keywords: Climate Change. Hydrological Modeling. Watersheds. Water Resources. Impacts of climate change. National Interconnected System.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Bacias Hidrográficas Brasil.....	15
Figura 2	Oferta Interna de Energia Elétrica.....	17
Figura 3	Precipitação anual média para o período de 1977-2006.....	18
Figura 4	Ilustrativo da relação do GCM com o RCM.....	19
Figura 5	Figura ilustrativa do modelo SMAP.....	23
Figura 6	Fluxograma simplificado da metodologia.....	30
Figura 7	Bacias Hidrográficas estudadas.....	31
Figura 8	Exemplificação da espacialização dos dados.....	33
Figura 9	Gráfico da variação média da vazão mensal média para o período histórico de 1960 a 1989.....	38
Figura 10	Gráfico da Variação Média da vazão mensal média.....	40
Figura 11	Gráfico da Média da ENA (MWmed) Mensal média para o SIN e seus subsistemas.....	43
Figura 12	Gráfico da Amplitude ENA Longo Tempo (ALT), Média ENA Longo tempo (2010-2098) SMAP-MEL para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 e média a longo tempo (MLT) histórico da ENA do SIN.....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Tabela com modelos e variáveis utilizados da plataforma PROJETA.....	32
Tabela 2	Bacias hidrográficas estudadas com respectivo coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe.....	34

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional das Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEM	Balço Energético Nacional
BESM	Brazilian Earth System Model
CanESM	Canadian Earth System Model
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
ENA	Energia Natural Afluente
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GCM	Global Climate Model
HadGEM	Hadley Centre Global Environmental Model
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	International Panel of Climate Changes
MEL	Modelo Estocático Linear
Miroc	Model for Interdisciplinary Research on Climate
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PEN	Plano Energético Nacional
RCM	Regional Climate Model
RCP	Representative Concentration Pathway
SIN	Sistema Interligado Nacional
SMAP	Soil Moisture Accounting Procedure

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1	OBJETIVOS.....	13
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>15</b>
2.1	RECURSOS HÍDRICOS E GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA....	15
2.2	MODELOS CLIMATOLÓGICOS.....	18
<b>2.2.1</b>	<b>Modelos Climáticos Globais.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Modelos Climáticos Regionais.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Modelos de Mudanças Climáticas.....</b>	<b>20</b>
2.2.3.1	Modelos Globais.....	20
2.2.3.2	Regionalização dos Modelos Globais.....	21
2.3	MODELOS HIDROLÓGICOS.....	21
<b>2.3.1</b>	<b>Modelos determinísticos.....</b>	<b>22</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Modelos estocásticos.....</b>	<b>22</b>
<b>2.3.3</b>	<b>SMAP – Soil Moisture Accounting Procedure.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.4</b>	<b>MEL – Modelo Estocástico Linear.....</b>	<b>23</b>
2.4	MUDANÇAS CLIMÁTICAS E MATRIZ ENERGÉTICA.....	24
<b>2.4.1</b>	<b>Mudanças Climáticas.....</b>	<b>24</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Cenários Futuros.....</b>	<b>25</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Impactos.....</b>	<b>26</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Mitigação dos Impactos.....</b>	<b>27</b>
2.5	ENERGIA NATURAL AFLUENTE.....	28
<b>2.5.1</b>	<b>Geravaz.....</b>	<b>28</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>30</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	30
3.2	DADOS DE PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....	31
<b>3.2.1</b>	<b>Espacialização dos dados.....</b>	<b>32</b>
3.3	CALIBRAÇÃO DOS MODELOS SMAP E MEL.....	33
3.4	DADOS DE VAZÃO MENSAL.....	35
<b>3.4.1</b>	<b>Projeção Histórica.....</b>	<b>35</b>

<b>3.4.2</b>	<b>Projeção de Mudanças Climáticas.....</b>	<b>35</b>
3.5	GERAVAZ.....	36
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>37</b>
4.1	VARIAÇÃO MÉDIA DA VAZÃO MÉDIA PARA O PERÍODO HISTÓRICO.....	37
4.2	VARIAÇÃO MÉDIA DA VAZÃO MÉDIA PARA A PROJEÇÃO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	38
4.3	MÉDIA DA ENERGIA NATURAL AFLUENTE MENSAL MÉDIA.....	41
4.4	AMPLITUDE LONGO TEMPO DA ENERGIA NATURAL AFLUENTE	43
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>46</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>48</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>52</b>

## **1 INTRODUÇÃO**

O Brasil é um país privilegiado em recursos naturais, e possui grande parte da reserva mundial de água doce. A reserva está distribuída em todo o território brasileiro, sendo que as regiões mais privilegiadas são a Norte e Centro-Oeste. Apesar de toda água disponível no país, o Nordeste é uma região em que se encontra características de escassez de água. Por este fato, é necessário fomentar discussões em torno dos variados usos dos recursos hídricos nas diferentes regiões. Outro argumento para salientar a importância de aprofundar os conhecimentos na gestão dos recursos hídricos, é o fato de recentemente ter sido observado uma crise de abastecimento de água. Entre os anos de 2014 e 2016 houve um prolongamento do período seco na região Sudeste, causando a diminuição dos reservatórios da região.

No Brasil existe grande representatividade de energias renováveis tanto na matriz energética quanto na matriz elétrica brasileira. Desta forma, é imprescindível a compreensão dos fatores que possam trazer complicações na gestão da matriz. Os recursos renováveis, em especial os recursos hídricos, são altamente dependentes do clima. Então para se trazer metas concretas na gestão dos recursos hídricos, por logo, na gestão do setor elétrico, é necessário a compreensão dos comportamentos climatológicos. Através do entendimento das mudanças climáticas, e as consequências para o clima que elas trazem, será possível nortear tomadas de decisão quanto a manutenção e expansão da matriz elétrica brasileira.

### **1.1 OBJETIVOS**

O objetivo deste projeto de pesquisa é avaliar como as possíveis alterações climáticas previstas em diferentes modelos climatológicos, sobre diferentes cenários, podem impactar o Sistema Interligado Nacional de geração de energia elétrica em suas diferentes bacias hidrográficas.

#### **1.1.1 Objetivo geral**

O objetivo deste estudo é avaliar, dentro dos cenários de mudanças climáticas, os possíveis impactos sobre a geração de energia hidrelétricas em 25 das principais bacias hidrográficas geradoras. Com isso, foi avaliado o Sistema Interligado Nacional

e suas sub-regiões em diferentes períodos.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- a) Realizar o downscale do mapeamento das bacias hidrográficas do SIN;
- b) Gerar dados de vazão, através de dados de precipitação, para cada uma das bacias hidrográficas;
- c) Avaliar a calibração do modelo chuva-vazão;
- d) Avaliar o comportamento da Energia Natural Afluyente ao longo do tempo, em diferentes bacias, sobre os diferentes cenários.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta sessão é apresentado os principais conceitos que foram estudados e avaliados durante a execução do projeto.

### 2.1 RECURSOS HÍDRICOS E GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O Brasil possui uma das maiores disponibilidades hídricas de todo o mundo. Aproximadamente 12% de toda água doce disponível em nosso planeta, se encontra distribuída em 12 diferentes bacias hidrográficas brasileiras, demonstradas na Figura 1. A região norte possui cerca de 80% dos recursos hídricos do país, entretanto é a região menos populosa, representando apenas 8% da população. A região em que se encontram as maiores concentrações populacionais é a sudeste, com aproximadamente 42% da população, assim sendo a região com a maior demanda dos recursos hídricos (ANA, 2019).

Figura 1 – Bacias Hidrográficas Brasil



Fonte: Adaptado de Agência Nacional das Águas – ANA (2019).

Um ponto importante é a necessidade de monitoramento das bacias hidrográfica, desta forma possibilitando a coleta de dados e desenvolvimento de ferramenta de gestão integrada. De acordo com a Conjuntura dos Recursos Hídricos de 2019, publicado pela ANA, existem mais de 21 mil estações, entre pluviométrica e fluviométricas, sobre responsabilidade de diversas entidades e 4.968 diretamente sobre responsabilidade da agência.

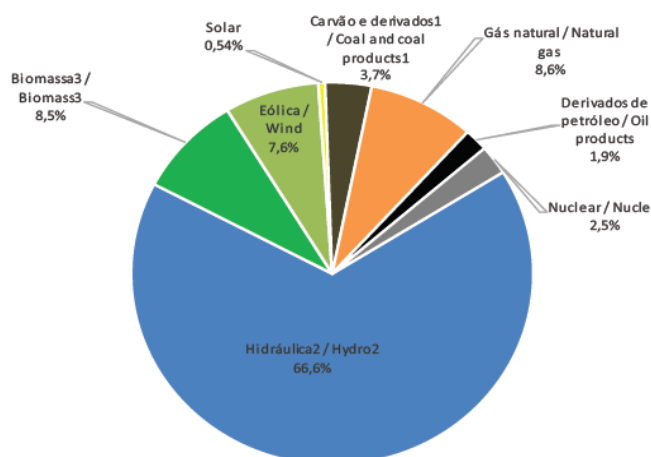
Para o setor elétrico, dentro da rede de monitoramento, existe um regime especial de coleta de dados. As concessionárias outorgadas, atualmente 644 empresas, para exploração do potencial hidráulico de um determinado curso d'água tem a obrigatoriedade de realizar o monitoramento dele (ANA, 2019).

A água possui diversos usos e assim deve ser caracterizada como um recurso de extrema importância e sensibilidade socioeconômica. Sua utilização direta e indireta, pode ser na irrigação, abastecimento de água, lazer, transporte e energia. O consumo de água é de 1.101 m<sup>3</sup>/s, sendo que 66,1% é destinado a irrigação, 11,6% para abastecimento animal, 9,5% para indústria, 9,1% para abastecimento urbano e 3,7% entre mineração, termelétricas e abastecimento rur34a1 (ANA, 2019).

O setor elétrico, que possui um uso indireto da água, também tem que ser analisado na gestão dos recursos hídricos. Como aproximadamente 64% de toda capacidade de geração elétrica instalada são provenientes de fontes hidráulicas, todo uso que possa alterar o regime de escoamento das bacias hidrográficas gera uma influência em nossa matriz elétrica. De acordo com o Plano de Operação Energética 2019/2023 - PEN 2019, entre os anos de 2019 e 2023 já foi contratado 4.937MW para expansão da capacidade instalada por fontes hidráulicas, totalizando um crescimento de 4,5% do setor. Deste modo, nossa matriz de energia elétrica ainda irá ser expandida nos próximos anos (ONS, 2019).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética – EPE, Figura 2, a energia elétrica de fonte hidráulica correspondeu por 66,6% da oferta interna de eletricidade no ano de 2018, sendo a de maior relevância, seguida pela geração por gás natural, 8,6%, biomassa, 8,5% e eólica, 7,6%.

Figura 2 – Oferta Interna de Energia Elétrica



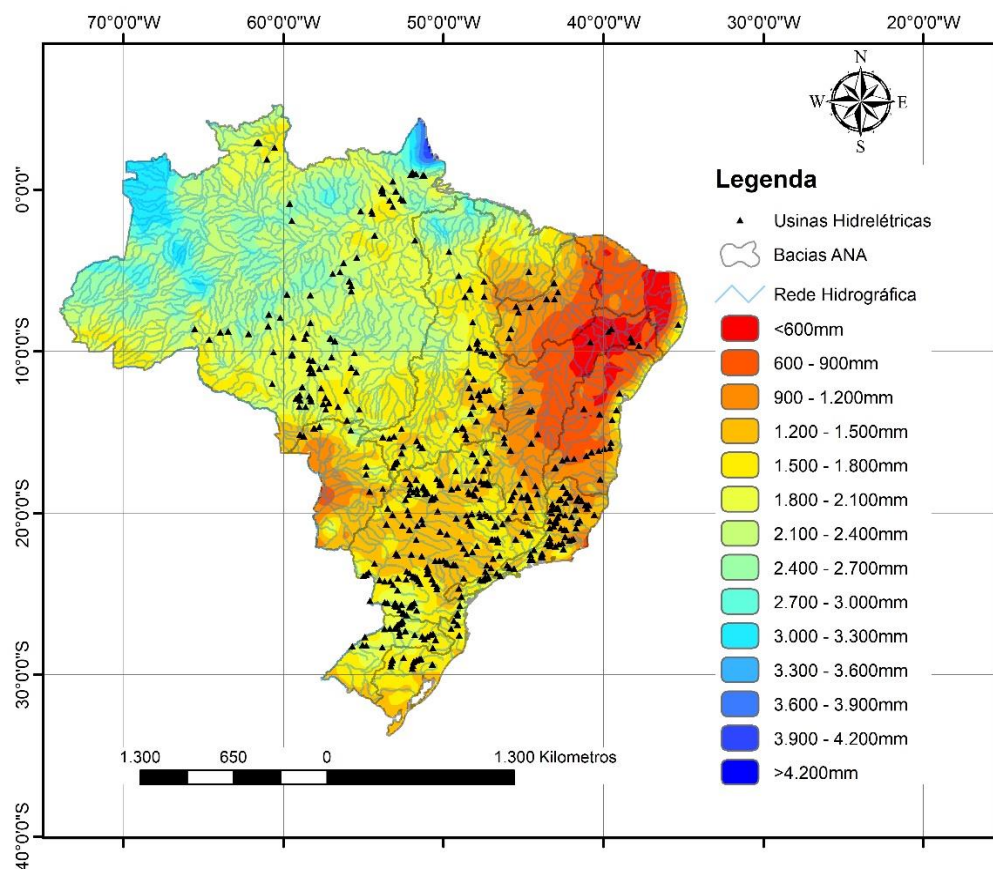
Notas / Notes:

1. Inclui gás de coqueria / Includes coke oven gas
2. Inclui importação de eletricidade / Includes electricity imports
3. Inclui lenha, baaaco de cana, lixívia e outras recuperações / Includes firewood, suarcane baaasse, black-liquor and other primary sources

Fonte: Balanço Energético Nacional – EPE (2019).

Na Figura 3 podemos observar a distribuição de precipitação no país. Por possuir dimensões continentais, existe uma grande variabilidade na precipitação média anual para cada região. O Norte do país é o local com maior abundância de precipitação, podendo superar os 4.200mm. Já em contrapartida a região Nordeste sofre com períodos longos de seca, algumas regiões possuem precipitações inferiores a 600mm anuais. Ao se observar distribuição espacial das Usinas Hidrelétricas, visivelmente a região Sudeste e Sul são as que mais possuem tais empreendimentos, relacionada a uma precipitação média de 1500mm. Através disto, pode-se concluir que o maior potencial para expansão do setor elétrico seria a região Norte.

Figura 3 – Precipitação anual média para o período de 1977-2006



Fonte: Adaptado de Agência Nacional das Águas – ANA (2020)

## 2.2 MODELOS CLIMATOLÓGICOS

Nesta sessão será apresentado conceitos envolvendo os modelos climáticos e apresentar os modelos utilizados no projeto.

### 2.2.1 Modelos Climáticos Globais

A modelagem climática global tem como objetivo representar as interações entre diversos fatores nas dinâmicas atmosféricas globais. Alguns eventos que influenciam na dinâmica atmosférica global são: a oscilação Sudeste do El Niño, o ciclo de radiação solar com duração média de 11 anos, as erupções vulcânicas, variação da circulação do Atlântico equatorial, aerossóis e gases de efeito estufa (FEELY, 1999; JAENICKE, 1981; SALAWITCH, 2017).

Os modelos climáticos globais (GCM-Global Climate Model) começaram a ser

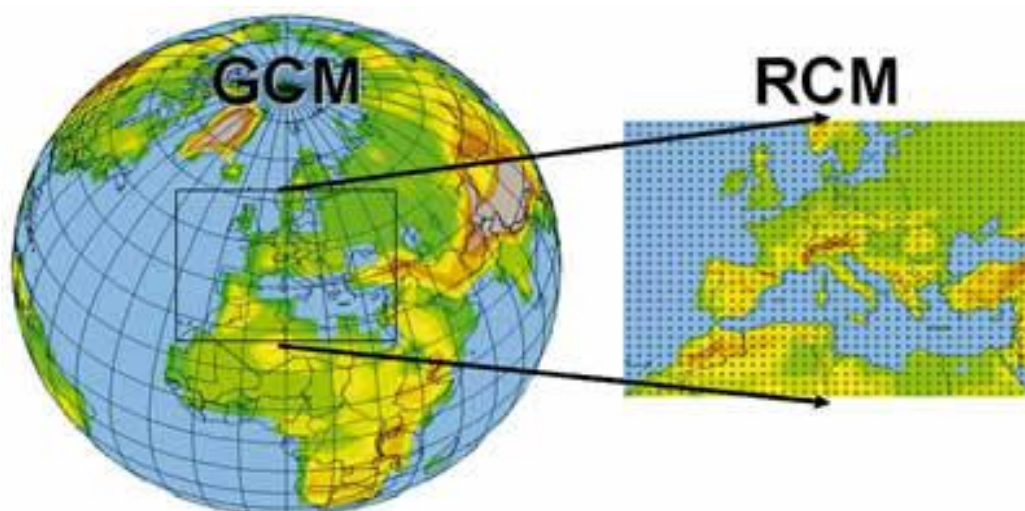
desenvolvido na década de 1960, apenas com modelos de circulação atmosférica. Entretanto com o passar dos anos, os modelos foram se aperfeiçoando e adicionando mais variáveis na modelagem. Os modelos atuais contam, além da circulação atmosférica, com modelos de interação com superfície terrestre, modelos de circulação oceânica com interação com gelo do oceano, modelos de aerossóis, de sulfatos, ciclo de carbono, química atmosférica e vegetação dinâmica. Em geral os modelos climáticos globais possuem resolução espacial de 200km na horizontal e 15-20km de amplitude vertical (BADER, 2008).

Por possuir um volume grande de variáveis, os modelos globais necessitam de supercomputadores para realizar os cálculos numéricos dos modelos. Mesmo com uma baixa resolução, o tempo de processamento dos modelos é considerável. Podemos ressaltar também que devido a sua resolução, os modelos globais perdem a sensibilidade regional climática, uma vez que não irá capturar informações importantes nas interações climáticas, como uso e ocupação do solo, topografia e cobertura vegetal (LUPO, 2013).

## 2.2.2 Modelos Climáticos Regionais

Com a finalidade de aumentar o detalhamento da modelagem climática é necessário realizar o downscale dos modelos climáticos globais. O resultado desse método são os modelos climáticos regionais (RCM – Regional Climate Model).

Figura 4 – Ilustrativo da relação do GCM com o RCM



Fonte: GIORGIO (2008, p 86).

Na Figura 4 é possível observar a relação entre o GCM e o RCM. A regionalização climática é necessária para se detalhar o comportamento de uma determinada região, e utilizam os modelos globais para condições de contorno. Os RCMs possuem uma resolução cerca de 10 vezes mais precisa que os GCM e conseguem representar interações em mesoescala (BADER, 2008).

A resolução dos RCMs é capaz de representar feições de superfícies, tais como lagos, montanhas e regiões de costa tão bem como as demais feições da superfície. Deste modo, melhor representando as interações atmosféricas regionais, com valores mais precisos de temperatura, precipitação e direção e velocidade dos ventos (RUMMUKAINEN, 2010).

### **2.2.3 Modelos de Mudanças Climáticas**

Nesta sessão será apresentado os modelos utilizados na projeção de mudanças climáticas.

#### **2.2.3.1 Modelos Globais**

- **BESM**

O Brazilian Earth System Model version 2.3.1, foi desenvolvido pelo INPE. O modelo possui 28 níveis de atmosfera terrestre, 50 níveis de atmosfera oceânica. Utiliza 12 diferentes tipos de vegetações, interações radioativas de ondas curtas e longas, e sistema convectivo de nuvens. Utilização resolução espacial da ordem de 0,25 a 2 graus latitude e 1 grau em longitude (CHOU *et al.*, 2014a).

- **CanESM2**

O Canadian Earth System Model version 2, consiste em um modelo acoplado de interação oceânica e terrestre. Utiliza componentes de ciclo de carbono, composto por 9 tipos de vegetações em 3 sistemas vegetativos e 2 de matéria orgânica morta.

- **HadGEM2-EM**

O Hadley Centre Global Environmental Model, possui uma resolução espacial de 1.875 graus em longitude e 1.275 em latitude terrestre, utiliza ciclo de carbono utilizando 5 tipos de vegetação e interação atmosférica em 38 níveis. No oceano utiliza resolução espacial de 1/3 graus em nos trópicos e de 1 grau em latitudes superiores a 30° em 40 níveis verticais. Possui modelo de química atmosférica com aerossóis

(COLLINS *et al.*, 2008).

- Miroc5

O Miroc 5 é um modelo desenvolvido no Japão, conhecido como Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC), version 5. Utiliza microfísica de nuvens acoplado com modelo de aerossóis, representação de dinâmica de gelo oceânico. Na superfície utiliza efeitos do albedo em neve e espelhos d'água. Com dinâmica vertical em 40 níveis terrestres e 50 níveis oceânicos, em resolução espacial de aproximadamente 150km na cobertura terrestre e 1 grau no oceano (CHOU *et al.*, 2014a).

### 2.2.3.2 Regionalização dos Modelos Globais

- Eta Model

Este modelo foi adaptado para realizar o downscaling, ou seja, realizar a regionalização dos globais em uma escala mais detalhada para América Central e do Sul. Utilizado pelo CEPTEC/INPE desde 1997 em previsões meteorológicas. A partir de 2010 o modelo foi implementado para mudanças climáticas direcionado pelos modelos globais. O Eta utiliza dinâmica anual do ciclo de vegetação microfísica de nuvens, esquema convectivo de nuvens e balanço de ondas curtas e longas em concentração constante de CO<sub>2</sub> (CHOU *et al.*, 2014a).

Para este estudo foi utilizado o Eta, acoplado em 4 modelos globais: BESM, CaneESM2, HadGEM2-ES e Miroc5, após o acoplamento sendo representados por, Eta-BESM, Eta-CanESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-Miroc5 para se obter dados mensais de precipitação e evapotranspiração para o período de 1960 a 1989 e 2010 a 2099. Possui uma resolução vertical em 38 níveis e espacial em 20km.

## 2.3 MODELOS HIDROLÓGICOS

A modelagem hidrológica tem como base a transformação da precipitação em um determinado local, em vazão de um curso d'água. É muito utilizada na previsão de vazão, uma vez que diversos setores necessitam desta informação para sua operação. Nas cidades, por exemplo, existe a necessidade de conversão chuva-vazão para ter conhecimento sobre possíveis inundações, no setor agrícola é importante para se dimensionar a quantidade de água que se pode utilizar de um determinado curso

d'água e no setor elétrico para se estimar a produção futura de energia (FJELD, 1980; WOOD, 1975).

Os modelos hidrológicos possuem algumas classificações dependendo da abordagem realizada para o modelo. Eles podem ser classificados primeiramente pelo método de estimativa utilizado, ou seja, ele pode utilizar de equações físicas ou probabilísticas. Outro modo de classificação seria quanto a interação do modelo, sendo ele distribuído ou concentrado. No primeiro caso, o modelo utiliza de uma malha de pontos de interesse, com isso seus cálculos serão realizados a partir de um ponto em relação ao seu entorno. Já os modelos concentrados têm um único ponto como objetivo.

### **2.3.1 Modelos Determinísticos**

Um modelo hidrológico determinístico é definido por um modelo matemático com determinadas regras. Cada modelo determinístico possui uma série de parâmetros calibráveis e inputs. Para se obter o resultado do modelo hidrológico são utilizadas diversas equações matemáticas e/ou físicas, por exemplo, equações de evapotranspiração (DEVIA, 2015; JAJARMIZADEH, 2012).

Por se tratar de uma modelagem matemática baseada em equações que representam os parâmetros utilizados, para cada dado de entrada só existirá uma saída correspondente. Para a solução dos modelos é utilizado equações diferenciais, o que demanda uma série temporal extensa e capacidade computacional (DEVIA, 2015; JAJARMIZADEH, 2012).

### **2.3.2 Modelos Estocásticos**

Os modelos hidrológicos estocásticos também são modelos matemáticos. Entretanto seu método é baseado no número de ocorrência em relação ao tempo, desta forma uma mesma entrada pode possuir diferentes saídas (DEVIA, 2015; JAJARMIZADEH, 2012).

Através de regras estatísticas é possível determinar a probabilidade de determinado evento na série de dados, com isso os modelos estocásticos são capazes de realizar previsões.

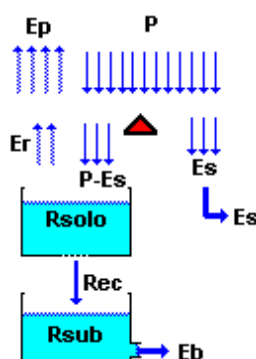


### 2.3.3 SMAP – Soil Moisture Accounting Procedure

O SMAP (LOPES *et al.*, 1982) é um modelo hidrológico concentrado determinístico, que utiliza como input dados de chuva média e evapotranspiração média, para determinar a resposta chuva-vazão de bacias hidrográficas. Sua vantagem é possuir poucos parâmetros calibráveis, e é amplamente utilizado no Brasil pela Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, na previsão de vazões de bacias com plantas hidrelétricas.

O modelo baseou-se no modelo Stanford Waterseh IV e do modelo Mero. Tem como fundamento o balanço hídrico da bacia hidrográfica. Conta com três níveis de reservatórios hipotéticos, sendo eles, o escoamento direto ( $E_d$ ), escoamento básico ( $E_b$ ) e reservatório do solo. A Figura 5 demonstra a metodologia aplicado no modelo.

Figura 5 – Figura ilustrativa do modelo SMAP



Fonte: LOPES *et al.* (1982)

O modelo utiliza dados de precipitação e evapotranspiração como entradas, e vazão como saída. Pode ser aplicado desde escala horário até mensal. Existem algumas adaptações no modelo em que é adicionado mais um reservatório, representando o escoamento de subsuperfície ( $E_{ss}$ ), aplica por Fadiga Jr (2008) em previsões de vazão para bacia incremental à UHE Itaipu.

### 2.3.4 MEL – Modelo Estocástico Linear

Trata-se de um Modelo Estocástico Linear, que usa regressão de médias móveis (ARMA). Por ser um modelo probabilístico, a longo prazo poderá ser simulado vazões de base negativas. Tiezzi *et al.* (2019) utilizou as vazões de base geradas no

modelo SMAP, para a calibração das bacias deste estudo, desta forma diminuindo a incerteza do modelo, adotada também neste estudo.

## 2.4 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E MATRIZ ENERGÉTICA

Nesta sessão serão apresentados conceitos envolvendo as mudanças climáticas, seus estudos, impactos e medidas de mitigação.

### 2.4.1 Mudanças Climáticas

O Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC é uma liderança mundial em questões sobre mudança climática e teve sua criação em 1988 pelo Programa Ambiental das Nações Unidas e pela Organização Mundial de Meteorologia. Formado por pesquisadores de diversas áreas e diversos centros, têm como objetivo realizar revisões e relatórios sobre pesquisas técnicas e socioeconômica sobre os diferentes aspectos das mudanças climáticas.

Desde sua abertura já publicou cinco relatórios de avaliação, sendo que seu quinto e último foi finalizado em dezembro de 2014. O Fifth Assessment Report, ou AR5, fez atualização de todos os estudos referentes as mudanças climáticas e seus possíveis efeitos na sociedade atual (IPCC, 2019).

O primeiro relatório sobre as mudanças climáticas foi publicado em 1990 e foi possível determinar que existe influência antropogênica no balanço atmosférico global. Desde o início da revolução industrial a concentração na atmosfera de gases de efeito estufa têm aumentado, desta forma contribuindo para o aquecimento global. Os modelos estimaram que no século XX a temperatura média do globo estaria 1°C mais quente, já os instrumentos obtiveram um aumento de 0,5°C. Dentro da variabilidade climática, foi possível determinar que os modelos representam a realidade (HOUGHTON, 1996).

O segundo relatório já constava com mais informações sobre os impactos econômicos e sociais das mudanças climáticas. Sua publicação foi em 1995 e já traz a importância da ampliação dos estudos sobre os efeitos das mudanças climáticas, da redução da emissão de gases de efeito estufa, estudos sobre as potências mudanças e adaptação sobre os cenários futuros (YI, 1996).

## 2.4.2 Cenários Futuros

Os estudos de mudanças climáticas utilizam cenários para realizar projeção dos impactos. Estes cenários levam em consideração trajetos socioeconômico globais, tais como crescimentos da população, crescimento do produto interno bruto e emissão de gases de efeito estufa. Através deste e outros parâmetros, os modelos realizam forçantes para perturbá-los e realizar vários trajetos para o futuro.

A partir da publicação do Relatório Especial de Cenários de Emissão em 2000 foi padronizado os estudos de projeções. No relatório foi separado em 4 famílias de cenários, e cada família existindo algumas variações (NAKICENOVIC, 2000).

A família A1 tem como fundamento um rápido crescimento econômico e populacional até a primeira metade do século XXI. Já na segunda metade um rápido aumento a novas tecnologias, diminuição da amplitude da renda per capita entre diferentes regiões do globo. Foi separada em 3 grupos de acordo com a introdução de novas tecnologias, sendo: fonte energética fóssil(A1FI), sem fonte de energia fósseis(A1T) e um balanço entre as todas fonte (A1B) (NAKICENOVIC, 2000).

A família A2 considera um mundo heterogêneo, onde serão mantidas características regionais. O desenvolvimento será regional designado pela renda per capita e as novas tecnologias são lentamente introduzidas ao longo do século XXI (NAKICENOVIC, 2000).

A família B1 descreve um mundo em convergência com a mesma população atual até a primeira metade do século XXI e após este período o crescimento populacional entra em declínio. A introdução de tecnologias mais eficientes e limpas é dada rapidamente, o foco é na sustentabilidade ambiental e socioeconômica (NAKICENOVIC, 2000).

A família B2 é um cenário baseado em soluções tecnológicas regionais, onde o crescimento populacional é menor que a família A2, e seu desenvolvimento de tecnologias limpas mais lentas que os cenários A1 e B1 (NAKICENOVIC, 2000).

Entretanto para se obter uma maior homogeneidade nos estudos sobre as mudanças climáticas o IPCC estabeleceu o conceito de Caminhos de Concentração Representativa (Representative Concentration Pathways-RCP). Os novos cenários foram utilizados nos estudos no AR5 e utilizam de uma melhor compreensão para os estudos. O RCP é separado em 4 cenários, sendo que em todos as forçantes são relacionados a concentração de radiação no final do século XXI. O RCP 2.6 se trata

do cenário mais otimista, com forçantes de baixa intensidade, que em 2100 a concentração de CO<sub>2</sub> eq é de 490 ppm. Os cenários RCP 4.5 e 6.0 são cenários com forçantes em que ao final do século a concentração de CO<sub>2</sub> eq fica em torno de 650 ppm e 850ppm respectivamente. O cenário pessimista, RCP 8.5, leva a uma concentração de 1370ppm de CO<sub>2</sub> eq em 2100 (VAN VUUREN, 2011).

### **2.4.3 Impactos**

Os impactos das mudanças climáticas poderão ser observados em todos o globo, sendo em alguns locais mais impactados que outros. A temperatura média da superfície terrestre em 2100 pode estar de 0,3 a 1,7°C mais quente no cenário mais otimista (RCP2.6) e de 2,6 a 4,8°C no cenário pessimista (RCP 8.5). Já o nível médio do mar poderá estar de 0,26 a 0,85cm dependendo do cenário observado (PACHAURI, 2015).

A biodiversidade será afetada de várias formas e em todos os níveis. Existe a possibilidade de que as mudanças climáticas diminuam a variabilidade genética das populações, isto se deve pelo direcionamento da seleção natural e migração de algumas espécies. O impacto mais significativo pode ser dado na polinização das plantas (BELLARD, 2012).

A polinização é um fator preponderante na manutenção de florestas e da agricultura. Também através do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> e temperatura, as plantas poderão sofrer com seus mecanismos de fotossíntese, agravando ainda mais a produção de alimento em diferentes partes do mundo (FISCHER, 2002).

Alguns estudos relacionam as mudanças climáticas com possíveis danos à saúde humana. Muitas vezes este impacto é de difícil mensuração, devido à suas características. Existem alguns estudos em vetores com transmissão via água e insetos (GITHEKO, 2000; HUNTER, 2003), entretanto os fatores que os direcionam são o aumento de temperatura, inundações e extremos climáticos. As ondas de calor que afetaram a Europa serão mais frequentes, e estão relacionadas com algumas mortes. Os impactos de fortes tempestades e inundações estão associados a mortes por desastres naturais, e assim como ondas de calor, estarão mais frequentes no final do século XXI (HAINES, 2006).

No Brasil os impactos poderão ser sentidos em vários setores. Os setores brasileiros mais sensíveis são o agropecuário e energético, que dependem

diretamente da disponibilidade de recursos naturais.

Alguns estudos apontam que as plantações de algodão no Nordeste poderão sofrer perda de 15% da produção em 2040 (ASSAD, 2013), na produção de café em Minas Gerais e São Paulo será prejudicada, desta forma deslocando a produção para os estados do Sul (CAMARGO, 2010).

No setor energético brasileiro, o impacto mais significativo poderá ser no setor elétrico, o qual aproximadamente 70% depende de geração hidráulica. O SIN poderá sofrer perdas em torno de 3% da capacidade atual, sendo que algumas bacias poderão ter perdas de até 7% (DE LUCENA, 2009).

#### **2.4.4 Mitigação dos Impactos**

A mitigação dos impactos é o maior desafio sobre as mudanças climáticas. A dificuldade em mensurar os impactos, gera uma dificuldade ainda maior em como mitigá-los. Entretanto é de conhecimento geral que a mudança no estilo de vida mundial deverá sofrer alterações, seja para mitigar os impactos ou adaptar aos mesmos.

Um contribuinte para as mudanças climáticas é a emissão antropogênica de CO<sub>2</sub> e está ligado ao consumismo. Estabelecer indicadores e objetivos quanto a emissão de gases de efeito estufa é uma forma de mitigar o impacto, pois através deles é possível avaliar se as ações tomadas estão surtindo efeito (EDENHOFER, 2014).

Pode-se abordar de diversas formas a mitigação e grande maioria delas estarão associadas a redução de consumo de combustíveis fósseis, aumento de energias renováveis e aumento da eficiência.

Para a redução da utilização de combustíveis fósseis faz-se necessário desenvolver novas tecnologias limpas ou aumentar a disponibilidade das atuais. Nos últimos anos houve um grande incentivo a energias eólicas e solares, levando ao barateamento da tecnologia. No Brasil entre os anos de 2019 e 2023 já foi contratado 2.295MW de energia eólica e 1.573MW de energia solar, representando um crescimento dos setores em 15,3% e 76,6% respectivamente.

## 2.5 ENERGIA NATURAL AFLUENTE

A Energia Natural Afluente - ENA é uma medida de potencial de geração de energia para uma determinada usina hidrelétrica. Seu cálculo é feito a partir das vazões naturais dos cursos d'água e das produtibilidades das usinas equivalente ao armazenamento de 65% do volume útil de aproveitamento. Pode-se calcular a ENA em base diária, semanal, mensal ou anual, para cada bacia hidrográfica geradora, assim como para um conjunto de usinas e subsistemas elétricos.

De acordo com os procedimentos de rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, o cálculo de ENA pode-se resumir nas seguintes expressões:

$$ENAbacia(t) = \sum_{i=1}^n (Qnat(i, t) * p(i)) \quad (1)$$

$$ENAsubsistema(t) = \sum_{j=1}^m (Qnat(j, t) * p(j)) \quad (2)$$

Onde,  $i$  = aproveitamento pertencente ao sistema de aproveitamentos da bacia considerada;  $n$  = número de aproveitamentos existentes no sistema de aproveitamentos da bacia considerada;  $Qnat$  = vazão natural do aproveitamento no intervalo de tempo considerado;  $p$  = produtividade média do conjunto turbina-gerador do aproveitamento hidrelétrico, referente à queda obtida pela diferença entre o nível de montante, correspondente a um armazenamento de 65% do volume útil, e o nível médio do canal de fuga;  $j$  = aproveitamento pertencendo ao sistema de aproveitamentos do subsistema considerado;  $m$  = número de aproveitamentos existente no sistema de aproveitamentos do subsistema considerado.

### 2.5.1 Geravaz

O modelo GERAVAZ utiliza metodologia de sistema de suporte a decisão (SSD). Este sistema é de grande importância para tomadores de decisão, auxiliando os mesmo a observarem um aspecto mais abrangente do problema estudado. Dentro da interface do GERAVAZ é possível a utilização dos modelos SMAP, MEL e SMAP-

MEL combinado, sendo o último com o auxílio do SSD na ponderação dos modelos para um melhor resultado (LOPES *et al.*, 2008).

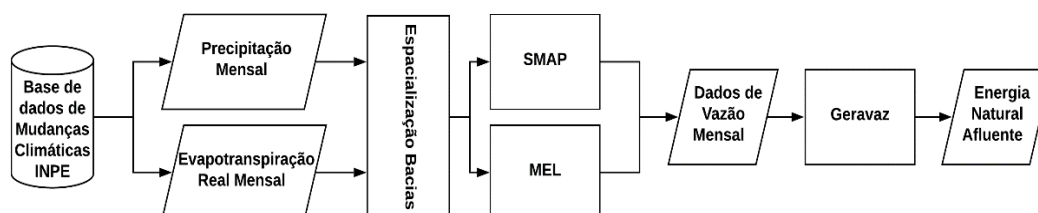
O modelo também conta com a ferramenta que realiza a modelagem da ENA para cada bacia introduzida no banco de dados do modelo.

### 3 METODOLOGIA

Nesta sessão será apresentado a metodologia utilizada para atingir os resultados do projeto. Primeiramente, é obtido os dados de projeção de mudanças climáticas no portal PROJETA do INPE, em seguida é feito uma espacialização dos dados nas bacias hidrográficas estudadas, seguido pela modelagem hidrológica dos dados climáticos, e por fim realizado a modelagem para obtenção do ENA.

A figura 6 demonstra o fluxograma simplificado da metodologia adotada.

Figura 6 – Fluxograma simplificado da metodologia



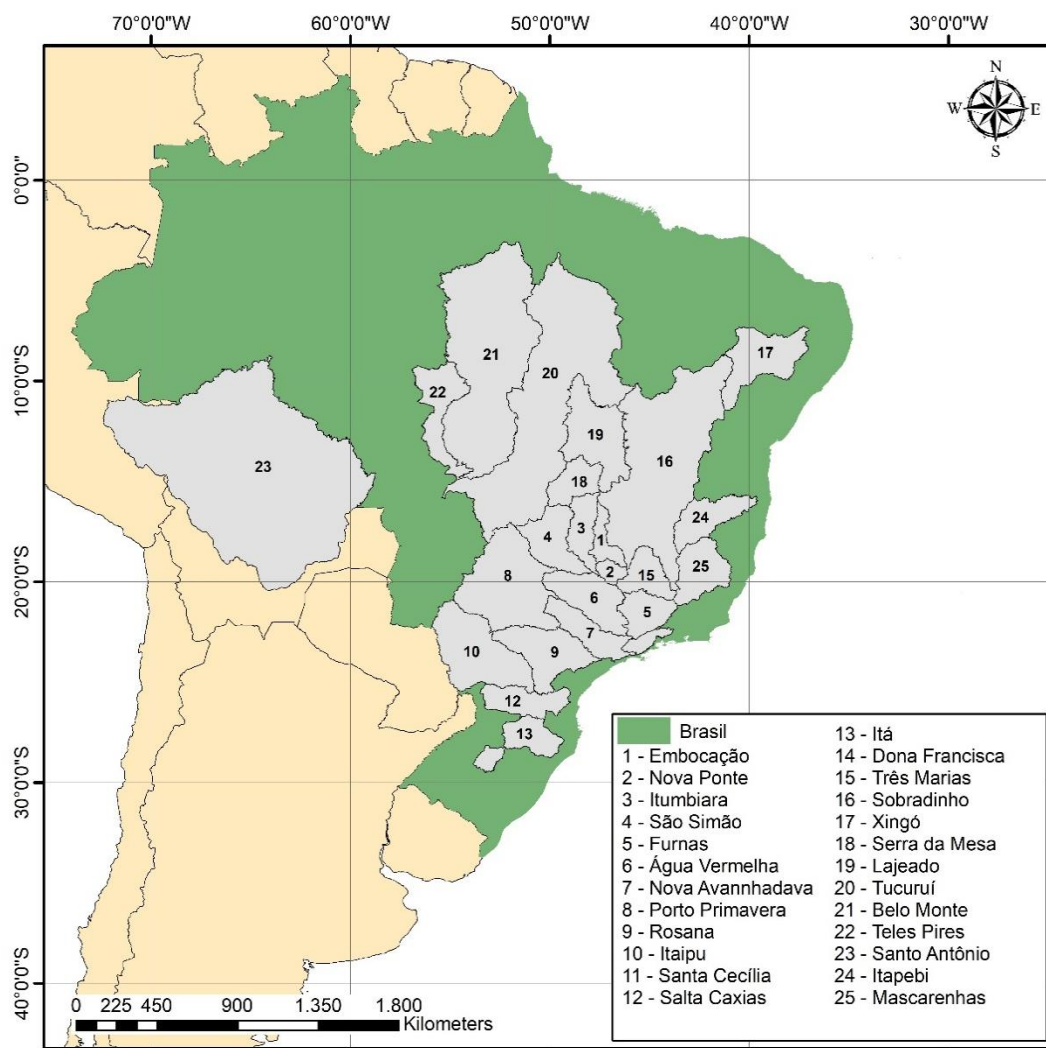
Fonte: Do autor (2020)

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

As 25 bacias representadas neste estudo, figura 7, são de importantes usinas hidrelétricas no Brasil (figura 7), possuindo 217 usinas hidrelétrica de médio e grande porte, com capacidade instalada de 101,9GW. Ainda existem no país pequenas centrais hidrelétricas capacidade instalada de 5,2GW, totalizando 107,1GW (67,3% da capacidade instalada de geração de energia elétrica do país) (TIEZZI *et al.* 2019). Diferentemente de Tiezzi *et al.* (2019) este estudo não contempla a bacia do rio Tapajós, pois o empreendimento hidrelétrico se encontra suspenso por motivos ambientais.



Figura 7 – Bacias Hidrográficas estudadas



Fonte: Do autor (2020).

### 3.2 DADOS DE PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Os dados de precipitação utilizados neste estudo foram disponibilizados pelo CPTEC/INPE, através da plataforma PROJETA, Projeto de Mudança do Clima para América do Sul Regionalizados pelo Eta. Para mais detalhes ver Chou *et al.* (2014a), Chou *et al.* (2014b) e Lyra *et al.* (2017). Os GMC utilizados são os que possuem a regionalização pelo Eta para América do Sul com escala de 20km x 20km. Importante salientar que para esta rodada de projeções dos modelos pelo AR5 houve um aumento no detalhamento do modelo Eta, que anteriormente utilizava apenas escala de 40km x 40km.

Cada célula do modelo representa um dado de precipitação mensal, contudo

não representa as delimitações das bacias hidrográficas utilizadas. Como cada bacia possuir diversas células do modelo climático, foi feito a média do total mensal precipitado para cada bacia.

A média mensal de precipitação é uma escala satisfatória para este estudo, o qual cobre praticamente 50% do território do Brasil

Tabela 1 – Tabela com modelos e variáveis utilizados da plataforma PROJETA

<b>Modelo Utilizado</b>	<b>Variável Utilizada</b>
<b>Eta-BESM, RCP 4.5, 20km-20km</b>	Evapotranspiração (EVTP), Precipitação (PREC)
<b>Eta-BESM, RCP 8.5, 20km-20km</b>	
<b>Eta-CanESM2, RCP 4.5, 20km-20km</b>	
<b>Eta-CanESM2, RCP 8.5, 20km-20km</b>	
<b>Eta-HadGEM2-ES, RCP 4.5, 20km-20km</b>	
<b>Eta-HadGEM2-ES, RCP 485, 20km-20km</b>	
<b>Eta-MIROC5, RCP 4.5, 20km-20km</b>	
<b>Eta-MIROC5, RCP 8.5, 20km-20km</b>	

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

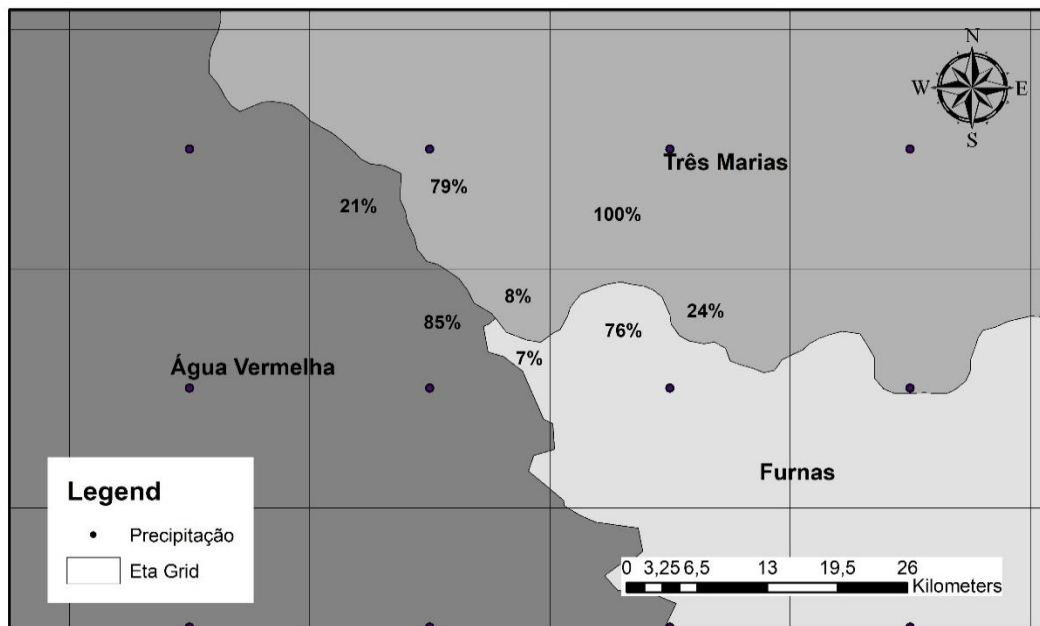
### 3.2.1 Espacialização dos dados

A espacialização dos dados é realizada para não haver superposição de precipitação. Pois, a espacialização dos dados de precipitação é diferente dos limites das bacias hidrográficas, podendo assim para uma única célula de precipitação haver 3 diferentes bacias hidrográficas (Figura 8).

Então, a precipitação da bacia em uma célula com intercessões é ponderada

pela representatividade espacial dela, ou seja, a precipitação total mensal da célula em questão, será dividida de acordo com a proporcionalidade espacial que a bacia hidrográfica representa (Figura 8).

Figura 8 – Exemplificação da espacialização dos dados



Fonte: Do autor (2020)

### 3.3 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS SMAP E MEL

A calibração dos modelos adotados para este estudo foram realizadas por Tiezzi et al.(2019), e a eficiência foi medida a partir do coeficiente de Nash-Sutcliffe, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Bacias hidrográficas estudadas com respectivo coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (continua)

		<b>Nash-Sutcliffe Efficiency</b>		
<b>Grande Bacia</b>	Bacia	Nº	SMAP	MEL
<b>Paraná</b>	Emborcação	1	0.785	0.771
	Nova Ponte	2	0.911	0.832
	Itumbiara	3	0.735	0.819
	São Simão	4	0.869	0.897
	Furnas	5	0.941	0.880
	Água Vermelha	6	0.726	0.814
	Nova Avandava	7	0.886	0.839
	Porto Primavera	8	0.745	0.762
	Rosana	9	0.832	0.736
	Itaipu	10	0.565	0.675
<b>Paraíba do Sul</b>	Santa Cecília	11	0.730	0.838
<b>Iguaçu</b>	Salta Caxias	12	0.646	0.608
<b>Uruguai</b>	Itá	13	0.582	0.534
<b>Jacuí</b>	Dona Francisca	14	0.729	0.684
<b>São Francisco</b>	Três Marias	15	0.855	0.740
	Sobradinho	16	0.826	0.841
	Xingó	17	0.030	0.351
<b>Tocantins</b>	Serra da Mesa	18	0.771	0.849
	Lajeado	19	0.856	0.804
	Tucuruí	20	0.625	0.876

Tabela 2 – Bacias hidrográficas estudadas com respectivo coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (conclusão)

Grande Bacia	Bacia	Nº	SMAP	MEL
<b>Xingu</b>	Belo Monte	21	0.743	0.859
<b>Tapajós</b>	Teles Pires	22	0.830	0.889
	Santo Antônio	23	0.578	0.940
<b>Jequitinhonha</b>	Itapebi	24	0.791	0.853
<b>Doce</b>	Mascarenhas	25	0.809	0.812

Fonte: Adaptado de TIEZZI (2019).

### 3.4 DADOS DE VAZÃO MENSAL

Nesta sessão será apresentado como foi realizado a avaliação dos dados de vazões modelados.

#### 3.4.1 Período Histórico

O período histórico é compreendido pela média mensal de 1960 a 1989. Este período foi avaliado para observar os desvios médios de cada bacia em relação aos dados de vazão adotados pela ONS.

Para avaliar a variação média de cada bacia, foi adotada a equação a seguir:

$$\text{Variação Média da Vazão} = \left( \frac{\text{Média da Vazão Mensal Média Histórica Modelada}}{\text{Vazão Mensal Média Histórica ONS}} - 1 \right) \quad (3)$$

#### 3.4.2 Projeção de Mudanças Climáticas

Para os cenários de projeção de mudanças climáticas, RCP 4.5 e RCP 8.5, foi adotado três diferentes períodos, compreendidos pelos anos de 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2099. Considerando o erro encontrado no período histórico, para se observar a variação média qual cada bacia hidrográfica estará sujeita no futuro, foi adotado a média mensal histórica modelada na variação média de vazão em cada

bacia, demonstrada na equação a seguir:

$$\text{Variação Média da Vazão} = \left( \frac{\text{Média da Vazão Mensal Média Cenários Modelada}}{\text{Média da Vazão Mensal Média Histórica Modelada}} - 1 \right) \quad (4)$$

### 3.5 GERAFAZ

Para este estudo foi utilizado o modelo GERAFAZ, desenvolvido por Lopes *et al.* (2008) apenas com a finalidade de auxílio na geração da ENA.

O horizonte de usinas instaladas e em operação é de 2014, desta forma algumas usinas de grande importância, como Belo Monte e Jirau, não foram contempladas no cálculo da ENA para o país e em seus subsistemas.

## 4 RESULTADO E DISCUSSÕES

Nesta sessão será apresentado os resultados encontrados durante o projeto e discussões sobre eles.

### 4.1 VARIAÇÃO MÉDIA DA VAZÃO MENSAL MÉDIA PARA O PERÍODO HISTÓRICO

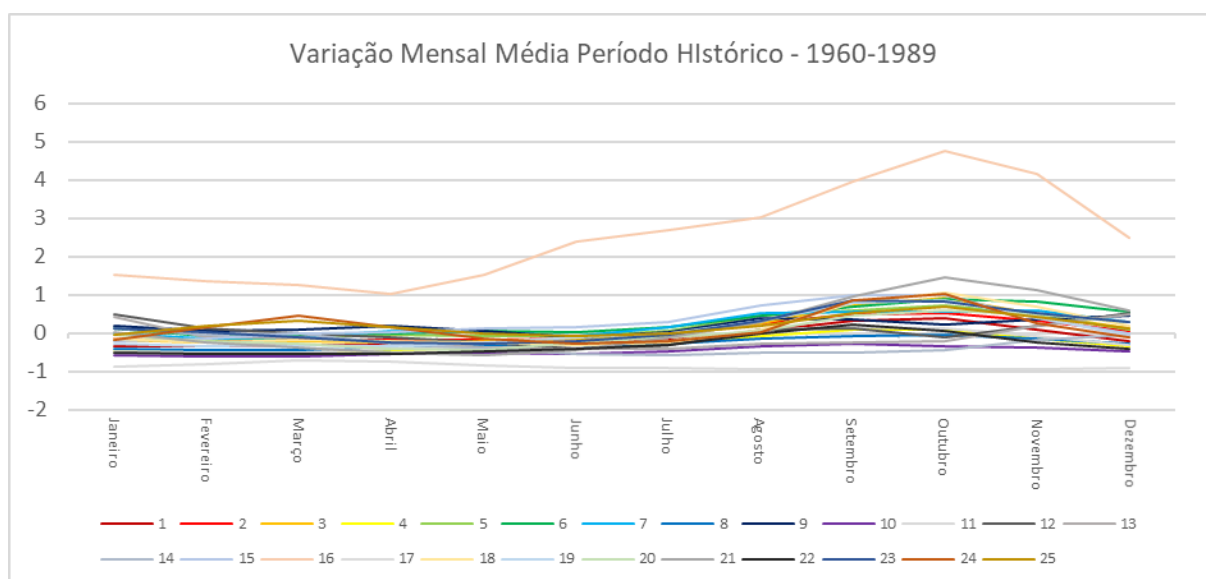
A Figura 9 demonstra a variação média das vazões mensais médias para as 25 bacias estudadas no período considerado histórico, 1960 a 1989. Pode-se observar que em grande parte das bacias é encontrado uma variação negativa de vazão, desta forma em média os modelos subestimam os valores de vazão. Para a bacia hidrográfica de Sobradinho (16) houve uma superestimação da vazão de forma exagerada, em que para todo o período avaliado a vazão encontrado foi o dobro da vazão observada. Também é observado que nos meses de setembro, outubro e novembro, de modo geral, há uma superestimação das vazões. É importante salientar que a calibração realizada por Tiezzi *et al.* (2019) foi realizada com dados reais para o período de 4 anos, 1997 a 2001, sendo assim esperado uma variabilidade quando utiliza a mesma para séries temporais extensas. Desta forma, apesar de existir variabilidade entre as vazões modeladas e as observadas, os valores encontrados são aceitáveis.

Contudo, com a avaliação do período histórico foi determinado que para estudos futuros utilizando o acoplamento de modelos meteorológicos em modelos hidrológicos é necessário a realização de calibração do modelo hidrológico de acordo com o modelo meteorológico utilizado, através desta, os valores modelados irão possuir uma melhor representação da realidade.

Por fim, a calibração poderá ser realizada com diferentes períodos, para melhor representar a variabilidade do clima, contribuindo ainda mais para a precisão dos modelos hidrológicos. Os dados encontram-se em apêndice.

Figura 9 – Gráfico da variação média da vazão mensal média para o período

Histórico de 1960 a 1989



Fonte: Do autor (2020)

#### 4.2 VARIAÇÃO MÉDIA DA VAZÃO MENSAL MÉDIA PARA A PROJEÇÃO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A Figura 10 demonstra a variação média para as vazões nos cenários futuros de mudanças climáticas. Para efetuar uma modelagem com um valor mais próxima do real foi realizado a variação futura em relação ao período histórico modelado, uma vez que no período histórico modelado, as bacias hidrográficas estudadas apresentaram certa variabilidade em relação ao observado.

Na Figura 10 A e 10 B, é observado a variação dos modelos para o período de 2010 a 2039, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 respectivamente. Este período é importante pois parte dele já foi observado, uma vez que este estudo foi concluído no ano de 2020. Em ambos cenários era esperado em média uma vazão inferior ao período histórico, e esta tendência pode ser notada atualmente. No ano de 2014 houve um prolongamento da seca que afetou reservatórios do sudeste do Brasil, fato que pode ser compreendido na figura 10, em que a variação negativa de vazão se intensifica nos meses de junho, julho, agosto e setembro, meses que na região são tipicamente sem precipitações.

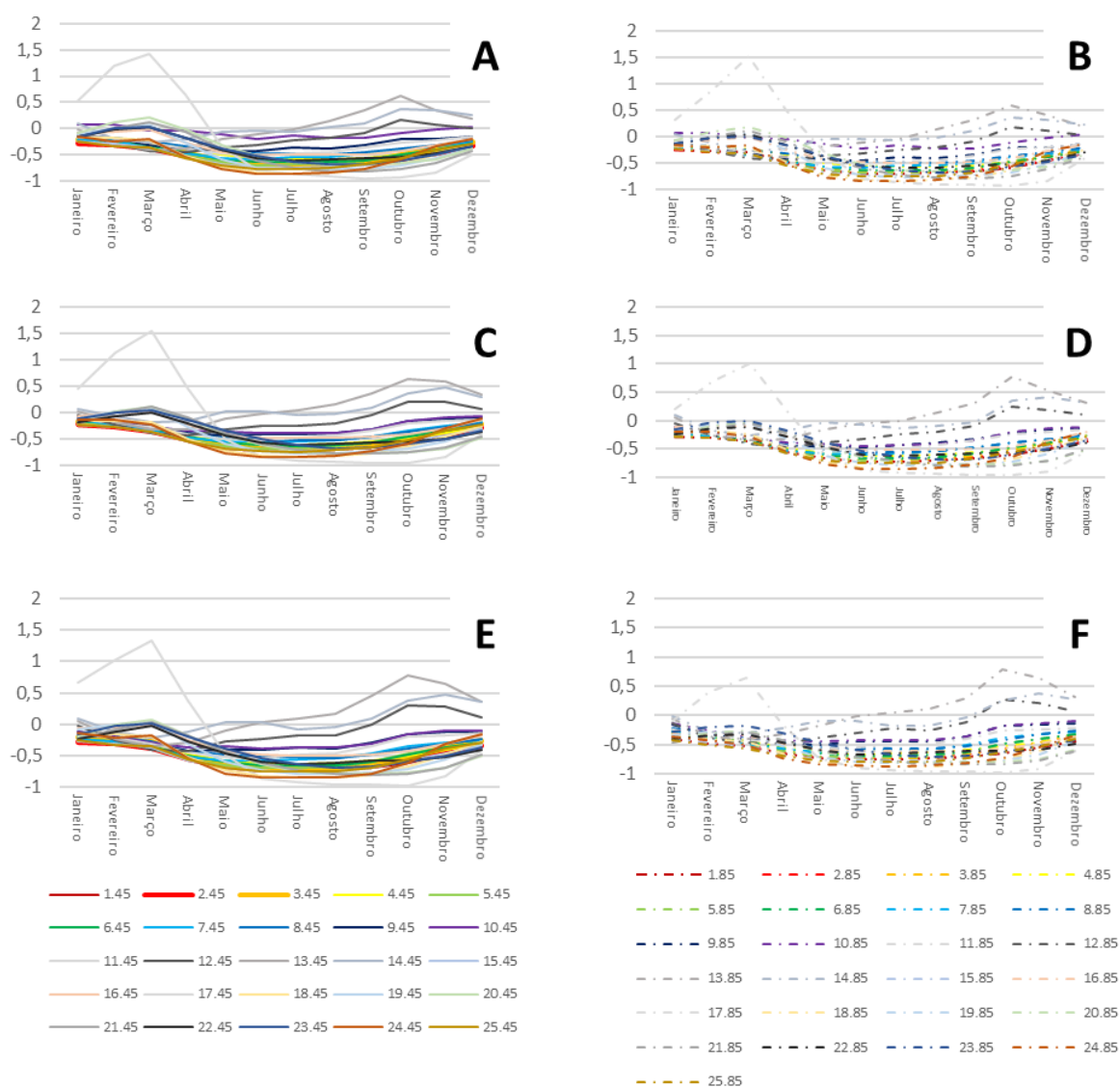
A Figura 10 C e 10 D representa os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 respectivamente para o período de 2040 a 2069. Este período contempla uma



projeção de mais longo prazo, entretanto, na gestão de recursos hídricos de extrema importância. Assim como no período anterior, a tendência de grande parte das bacias é de sofrerem perda de vazão média. Ao compararmos os cenários para o mesmo período, pode-se observar que no cenário pessimista, a perda de vazão é um pouco mais acentuada, alarmando ainda mais para uma gestão eficiente dos recursos hídricos. As bacias localizadas no sul do país, Santo Caxias(12), Itá(13) e Dona Francisca(14), não irão sofrer tanto com os efeitos das mudanças climáticas, no cenário otimista é esperado um ganho na vazão média para os meses de junho à dezembro, sendo que para os demais meses um pequena perda na vazão média. A bacia do Xingó(17) não será impactada nos primeiros meses do ano, contudo no segundo semestre severamente impactada, podendo chegar a perda de quase 100% da vazão da bacia.

A Figura 10 E e 10 F, apresenta a variação da vazão para os cenários otimista e pessimista no final do século, 2070 a 2099. Neste período é seguido o mesmo dos demais, com uma perda considerável de vazão por todo território do Brasil, sendo em ambos cenários mais intensificado que o período anterior. Os dados encontram-se em apêndice.

Figura 10- Gráfico da Variação Média da vazão mensal média



Fonte: Do autor (2020)

- Legenda: A) RCP 4.5 – 2010 a 2039.  
 B) RCP 8.5 – 2010 a 2039.  
 C) RCP 4.5 – 2040 a 2069.  
 D) RCP 8.5 – 2040 a 2069.  
 E) RCP 4.5 – 2070 a 2099.  
 F) RCP 8.5 – 2070 a 2099.

Com isso, em todos os cenários e períodos avaliados, a tendência de variação de vazão é para perda dela, caracterizando um cenário crítica para todos os usos da água. A região que será menos afetada será a região sul do país, que era esperado,

uma vez que no futuro espera-se um deslocamento de precipitação para o sul. A região Sudeste e Nordeste poderá sofrer impactos relevantes, uma vez que a região sudeste é ocupada por 42% da população do país, e a região nordeste já possui secas severas.

#### 4.3 MÉDIA DA ENERGIA NATURAL AFLUENTE MENSAL MÉDIA

A Energia Natural Afluente é uma metodologia de avaliação do potencial de produção média que uma usina hidrelétrica pode gerar. Leva em consideração a vazão natural da bacia hidrográfica e a produtividade do conjunto turbina-gerador da usina. A ONS, órgão responsável pela operação do setor elétrico brasileiro, utiliza a mesma para a avaliação do potencial de geração e por consequência na gestão dos recursos energéticos. A Figura 11 demonstra a Energia Natural Afluente para o Brasil e seus subsistemas, nos cenários otimistas e pessimistas de mudanças climáticas, RCP 4.5 e RCP 8.5, em diferentes períodos, 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098, e compara a mesma com a média a longo tempo (MLT) para observar como o sistema irá se portar no futuro.

Para o subsistema Centro-Oeste/Sudeste (ENA 1), responsável por cerca de 50% de geração de energia do país, o impacto na produção será considerável. Ao comparar a MLT com todos os cenários avaliados, ao longo de todo anos pode-se esperar perda na capacidade de produção e eletricidade. Nos meses de setembro, outubro e novembro, não se espera perda na capacidade, entretanto nos meses de janeiro, fevereiro e março a capacidade de produção será em torno da metade da MLT, causando grande preocupação para o setor por se tratar do período de maior demanda do sistema. A preocupação é ainda maior ao se avaliar os cenários de mudanças climáticas, em que no RCP 8.5, no final do século a perda de produção para o início do ano é ainda maior.

O subsistema Sul (ENA 2) será a menos impactado de todos os subsistemas, em que em todos os cenários futuros a produção poderá ser praticamente a mesma encontrada atualmente. Nos meses de novembro e dezembro pode-se esperar até um ganho da capacidade de produção do subsistema. No cenário mais pessimista, ao final do século, o subsistema poderá perder ligeiramente a capacidade de produção, entretanto não sendo muito prejudicada.

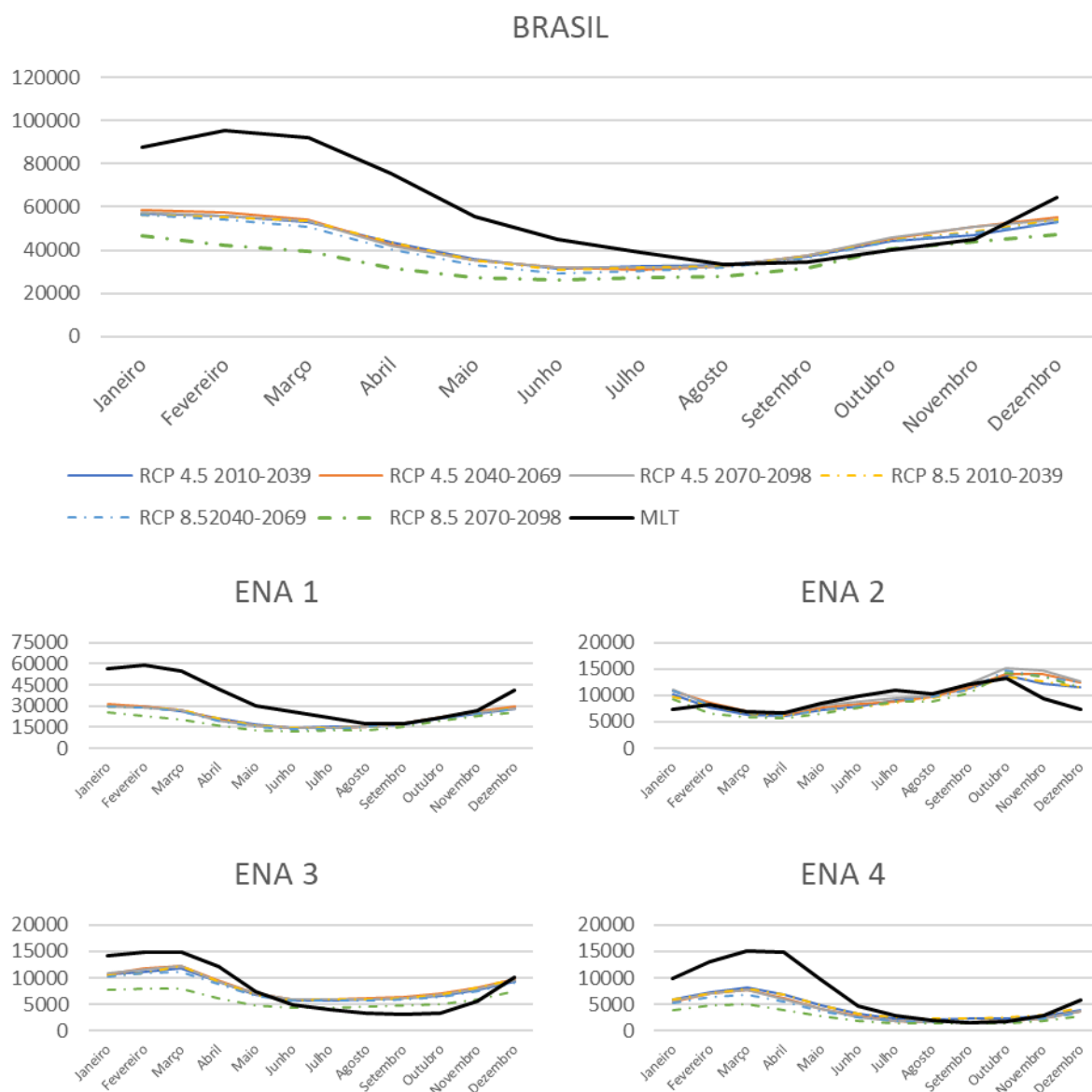
O subsistema Nordeste (ENA 3) poderá se comportar diferentes das demais

regiões, uma vez que no primeiro semestre do ano é esperado uma perda de capacidade em relação a capacidade atual, e no segundo semestre um ganho na capacidade de produção. Esta tendência é observada em todos os cenários, apesar de, como nos demais subsistemas, no cenário pessimista ao final do século a perda no primeiro semestre ser mais acentuada e o ganho no segundo menos acentuado.

O subsistema Norte (ENA 4), segue a mesma tendência de perda de capacidade ao final do século no cenário RCP 8.5, entretanto, neste a capacidade para os meses de fevereiro, março e abril, poderá ser 70% menos do que a atual. Novamente para o primeiro semestre é esperado um perda considerável para o subsistema, e para o segundo semestre a manutenção do potencial de produção.

Com isso, ao se avaliar a ENA de todo o Sistema Interligado Nacional, que é a somatório de todos subsistemas, poderá haver uma perda considerável de forma geral. A capacidade de produção nos primeiros meses do ano, que em seu pico é próximo de 100.000 MWmed, em média caíra para em torno de 55.000MWmed, podendo ao final do século cair para em torno de 40.000MWmed, desta forma o sistema estará tendo um perde de aproximadamente 60% da sua capacidade para os primeiros meses do ano. A perda de capacidade pode ser prolongada até o mês de julho, sendo que a partir de agosto que o sistema interligado nacional não sofrerá impacto. Nos meses de setembro, outubro e novembro poderá ligeiramente ganhar capacidade, mas no mês de dezembro irá ter uma perda novamente. Os dados encontram-se em apêndice.

Figura 11 – Gráfico da Média da ENA(MWmed) Mensal média para o SIN e seus subsistemas



Fonte: Do autor (2020).

#### 4.4 AMPLITUDE LONGO TEMPO DA ENERGIA NATURAL AFLUENTE

Para realizar uma avaliação mais completa dos futuros impactos no SIN pelas mudanças climáticas, foi realizado uma análise dos máximos e mínimos encontrados em todo o período de projeção, 2010-2098, e comparado com a média longo tempo do SIN, a média a longo tempo de ambos cenários, RCP 4.5 e RCP 8.5, de 2010 a 2098 e a amplitude a longo tempo (ALT).

A amplitude a longo tempo foi realizada com o mínimo valor médio entre os modelos SMAP e MEL encontrado nos períodos anteriormente avaliados, 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098, em ambos cenários, pessimista e otimista, e o máximo valor encontrado em mesmo período.

Na Figura 12, é possível observar que em todos modelos climáticos avaliados, o cenário futuro do SIN é relativamente preocupante. Em todos os modelos, nos meses de janeiro a julho, existe a tendência de diminuição da capacidade total do sistema. Nos meses de agosto, setembro e outubro a expectativa é mais otimista, sendo que em 3 dos 4 modelos a capacidade irá se manter a mesma e no modelo climático Miroc poderá até haver um certo ganho capacidade.

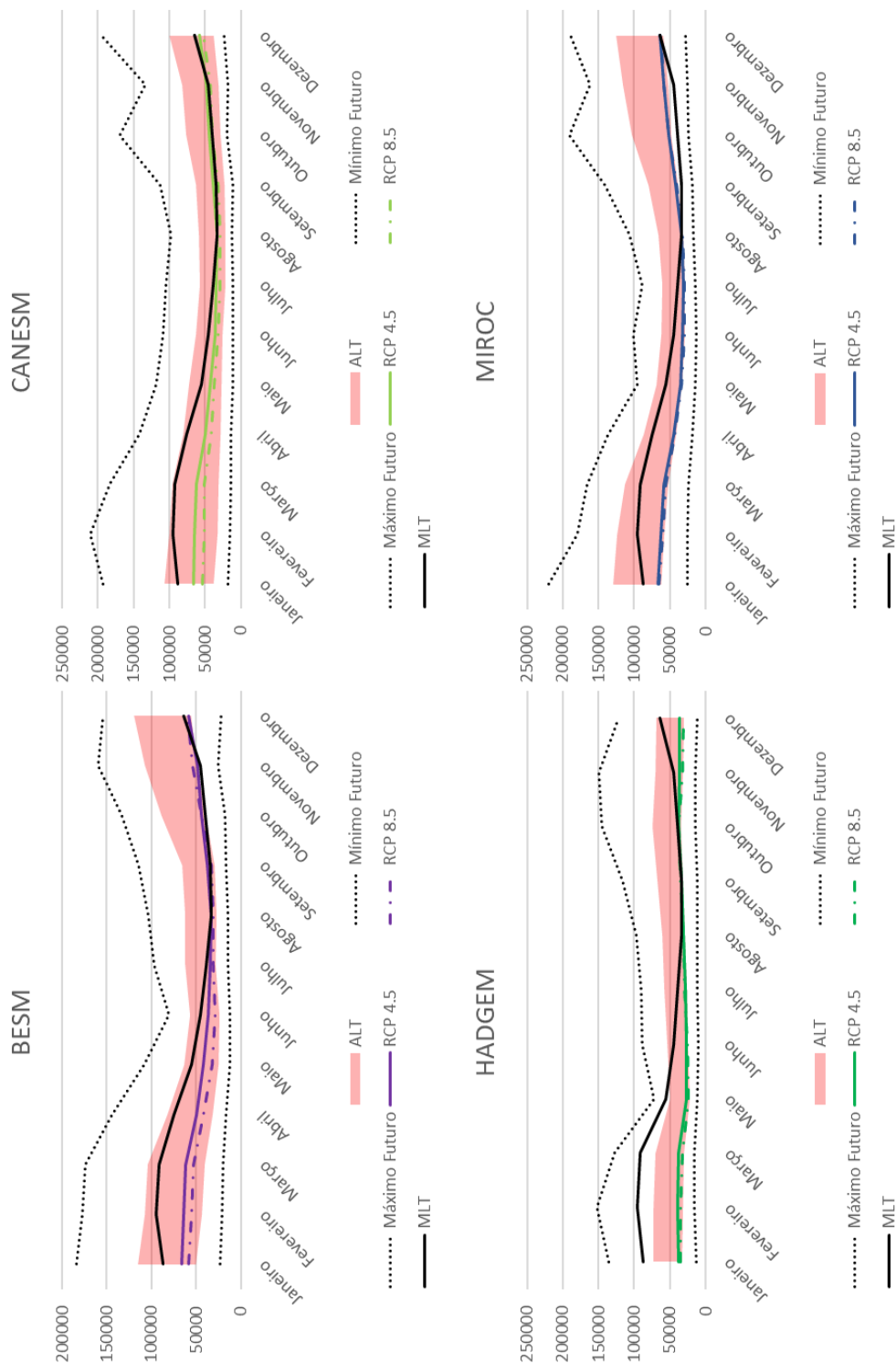
Também é possível observar em todos modelos avaliado que a média dos valores futuros e do passado estão mais próximo do limite inferior da amplitude, desta forma, caracterizando uma preocupação a longo tempo, em que poderá esperar a tendência de menor capacidade geral do SIN.

O limite superior da amplitude, caracteriza a máxima capacidade que o SIN poderá ter para cada mês dentro dos períodos avaliado. Entretanto, como já observado anteriormente, essa capacidade máxima será esporádica, aumentando ainda mais a preocupação em relação a todo o sistema.

Analisando apenas a média longo tempo dos cenários futuros, em 2 dos 4 modelos demonstram uma ligeira perda de capacidade no cenário mais pessimista. Sendo que no Miroc e Hadgem a perda de capacidade seria quase imperceptível entre os cenários.

No futuro, de modo geral, é esperado uma perda de capacidade do SIN, de 30% a 60%, de janeiro a maio, perda de até 20%, de junho a agosto, e a manutenção da capacidade no restante do ano. Os dados encontram-se em apêndice.

Figura 12 - Gráfico da Amplitude ENA Longo Tempo (ALT), Média ENA Longo tempo (2010-2098) SMAP-MEL para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 e média a longo tempo(MLT) histórico da ENA do SIN



Fonte: Do autor (2020).

## 5 CONCLUSÕES

Este estudo teve o objetivo de avaliar os impactos das mudanças climáticas em 25 bacias hidrográficas brasileiras responsáveis pela geração de grande parte da energia elétrica no país. Os modelos climáticos utilizados foram regionalizados pelo Eta, RCM desenvolvido pelo CPTEC/INPE. Já as condições de contorno globais foram utilizadas os modelos BESM, CanESM, HadGEM2-ES e Miroc5. Os modelos climáticos são a entrada de dados dos modelos hidrológicos de chuva-vazão, SMAP e MEL. Ambos os modelos foram calibrados por Tiezzi *et al.* (2019).

Primeiramente foi avaliado a variabilidade dos dados encontrados em um período histórico, de 1960 a 1989. A média dos modelos utilizados apresentaram considerável variabilidade, em alguns casos até acentuada variabilidade. Isto demonstra que se deve realizar uma calibração do conjunto modelo climático e modelo hidrológica para se obter melhores resultados. Isto se deve, pois os modelos climáticos comportam-se diferente das condições reais, uma vez que são modelos. Com isto, era esperado certa variabilidade na modelagem, assim como a variabilidade própria dos modelos hidrológicos. Entretanto pode-se concluir que o acoplamento de modelos climáticos em modelos hidrológicos é uma ferramenta útil na projeção de vazão em bacias hidrográficas e servem de norteadores para tomadores de decisão na gestão dos recursos hídricos.

Em um segundo momento, foi avaliado qual poderá ser a variação das vazões nas diferentes bacias estudadas. Através dos cenários, RCP 4.5 e RCP 8.5 é observado uma variação negativa considerada em grande parte das bacias hidrográficas estudadas, sendo apenas as bacias da região Sul do país que não se espera um impacto acentuado. Nos períodos estudados, 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2089, foi observado uma gradativa perda de vazão, sempre mais acentuadas nos meses de julho a outubro. O cenário RCP 8.5, quase sempre espera-se uma vazão menor que no cenário RCP 4.5, alarmando ainda mais para uma eficiente gestão dos recursos hídricos.

Por fim, foi avaliado o impacto da variação das vazões na capacidade de produção de eletricidade do SIN. Nos subsistemas do SIN, o que poderá sofrer maior impacto é o subsistema Centro-OesteSudeste, grande responsável pela geração de eletricidade do país. Este impacto é considerável, uma vez que a região também é a mais populosa e que demanda mais energia. Nos meses de maior demanda o impacto



é ainda maior, gerando um alerta para a ONS, que é a responsável pela manutenção do sistema. A região Nordeste e Norte 4 também irão sofrer no primeiro semestre, não possuindo um impacto relevante no restante do ano. Já na região Sul não irá sofrer tanto impacto de acordo com os modelos utilizados. O Brasil como um todo irá sofrer perdas relevantes para o setor elétrica, com perda em torno de 50% da capacidade de produção nos primeiros meses do ano.

Então, conclui-se que o SIN como um todo irá sofrer com as mudanças climáticas, uma vez que a geração de eletricidade do país depende 64% de fontes hidráulicas. A ONS terá que intensificar o investimento em fontes alternativas para o SIN, sendo a eólica e solar as com grandes enfoques. Isto se deve, pois são duas fontes de energias limpas e com grande potencial no Brasil, além de estudiosos de mudanças climáticas colocarem como as principais fontes de energias a serem investidas.

Através deste estudo, foi observado a grande importância de ampliar os estudos de modelagem climática acoplada a modelagem hidrológica. Os responsáveis por políticas públicas, de gestão de recursos hídricos e gestão energéticas poderão utilizar tais resultados para tomar medidas mitigadoras quanto aos impactos das mudanças climáticas, desta forma também aumentando a eficiência em toda a gestão.

## REFERÊNCIAS

ANA. Agência Nacional de Águas. [2020] Disponível em: <http://dadosabertos.ana.gov.br/>. Acesso em: 10 jan. 2020

ANA - Agência Nacional de Águas. **Conjuntura do Recursos Hídricos no Brasil 2019**: Informe Anual. Brasília, 2019.

ANEEL. Banco de Informações de Geração, atualizado em 14 de julho de 2018. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>, Acesso em 14 jul. 2018.

ASSAD, Eduardo Delgado *et al.* Impacts of climate change on the agricultural zoning of climate risk for cotton cultivation in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 1, p. 1-8, 2013.

BADER, David C. *et al.* Climate models: an assessment of strengths and limitations. Washington, **US Department of Energy Publications**.v. 8. 2008.

BELLARD, Céline *et al.* Impacts of climate change on the future of biodiversity. **Ecology letters**, v. 15, n. 4, p. 365-377, 2012.

CAMARGO, Marcelo Bento Paes de. The impact of climatic variability and climate change on arabic coffee crop in Brazil. **Bragantia**, v. 69, n. 1, p. 239-247, 2010.

CHOU, S.C., *et al.* Evaluation of the Eta simulations nested in three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, p. 438-454. <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.35039>. 2014a

CHOU, S.C., *et al.* Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v.3 , p. 512-527. <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>. 2014b

DEVIA, Gayathri K.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A review on hydrological models. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 1001-1007, 2015.

DE LUCENA, André Frossard Pereira *et al.* The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil. **Energy Policy**, v. 37, n. 3, p. 879-889, 2009.

EDENHOFER, Ottmar. **Climate change 2014**: mitigation of climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética, 2007. **Plano Nacional de Energia – 2030**. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <http://www.epe.gov.br> Acesso em: abril, 2019.

FADIGA JR, Francisco Martins *et al.* Modelos de previsão de vazões para a bacia incremental à UHE Itaipu. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 2, p. 65-75, 2008.

FEELY, Richard A. *et al.* Influence of El Niño on the equatorial Pacific contribution to atmospheric CO<sub>2</sub> accumulation. **Nature**, v. 398, n. 6728, p. 597, 1999.

FISCHER, Günther; SHAH, Mahendra M.; VAN VELTHUIZEN, H. T. **Climate change and agricultural vulnerability**. 2002.

FJELD, MAGNE; AAM, S. An implementation of estimation techniques to a hydrological model for prediction of runoff to a hydroelectric power station. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 25, n. 2, p. 151-163, 1980.

FUCHS, Vanessa Boanada. Blaming the weather, blaming the people: socio-environmental governance and a crisis attitude in the Brazilian electricity sector. 19. ed. São Paulo: **Ambiente & Sociedade**, 2016.

GIORGIO F., Regionalization of climate change information for impact assessment and adaptation. In: WMO Boletim 57(2). **WMO 2008**, p 86-92. Disponível em: [https://library.wmo.int/index.php?lvl=bulletin\\_display&id=1102#.XnpHzHJv\\_IU](https://library.wmo.int/index.php?lvl=bulletin_display&id=1102#.XnpHzHJv_IU). Acesso em: 24 mar. 2020.

GITHEKO, Andrew K. *et al.* Climate change and vector-borne diseases: a regional analysis. **Bulletin of the World Health Organization**, v. 78, p. 1136-1147, 2000.

HAINES, Andy *et al.* Climate change and human health: impacts, vulnerability and public health. **Public health**, v. 120, n. 7, p. 585-596, 2006.

HOUGHTON, E. **Climate change 1995: The science of climate change: contribution of working group I to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

HUNTER, Paul R. Climate change and waterborne and vector - borne disease. **Journal of applied microbiology**, v. 94, p. 37-46, 2003.

IBGE. Banco de Dados: IBGE Cidades, atualizado em 14 de julho de 2018. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>, Acesso em: 14 de julho de 2018

IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp. 2013.

IPCC. 2018, <http://www.ipcc.ch/>. Acesso em: 27 set. 2019.

JAENICKE, Ruprecht. Atmospheric aerosols and global climate. In: BERGER, A. **Climatic variations and variability: facts and theories**. Dordrecht: Springer, v. 72, p. 577-597, 1981.

JAJARMIZADEH, Milad; HARUN, Sobri; SALARPOUR, Mohsen. A review on theoretical consideration and types of models in hydrology. **Journal of Environmental Science and Technology**, v. 5, n. 5, p. 249-261, 2012.

LOPES J. E. G., BRAGA B.P.F., CONEJO J.G.L. SMAP - A Simplified Hydrological Model, Applied Modelling in Catchment Hydrology, V.P.Singh, **Water Resources Publications**, 1982.

LOPES J. E. G., *et al.* Previsão climática de vazões para o sistema interligado nacional. In: II SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO SUL-SUDESTE, 2008, Rio de Janeiro. **Anais[...]** Rio de Janeiro, 2008. v. 1.

LUPO, Anthony; KININMONTH, William. **Global climate models and their limitations**. Climate change reconsidered II: Physical science, p. 9-148, 2013.

LYRA, A., *et al.* **Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution** *Theor Appl Climatol*. doi:10.1007/s00704-017-2067-z. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-017-2067-z>, 2017.

MME - Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2019**: ano base 2018. Rio de Janeiro: Epe - Empresa de Pesquisa Energética, 2019.

MME - Ministério de Minas e Energia. **Matriz Energética Nacional 2030**. Rio de Janeiro: Epe - Empresa de Pesquisa Energética, 2017.

NAKICENOVIC, Nebojsa et al. **Special report on emissions scenarios (SRES), a special report of Working Group III of the intergovernmental panel on climate change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Plano da Operação Energética 2019/2023**: PEN 2019. Rio de Janeiro, 2019. ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, <http://www.ons.org.br> , Acesso em: 27 set 2019.

PACHAURI, Rajendra K. et al. **Climate change 2014**: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

RUMMUKAINEN, Markku. State - of - the - art with regional climate models. Wiley Interdisciplinary Reviews: **Climate Change**, v. 1, n. 1, p. 82-96, 2010.

SALAWITCH, Ross J.; CANTY, Timothy P. **Paris climate agreement**: beacon of hope. Springer International Publishing, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-46939-3.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2020.

TIEZZI, Rafael O., *et al.* Trends of streamflow under climate change for 26 Brazilian basins. **Water Policy**, v.21, n. 1, p.206-221, 2019.

VAN VUUREN, Detlef P. *et al.* The representative concentration pathways: an overview. **Climatic change**, v. 109, n. 1-2, p. 5, 2011.

YI, Hoe-söng. **Climate change 1995**: Economic and social dimensions of climate change: Contribution of Working Group III to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

WOOD, Eric F.; HARLEY, Brendan M. The application of hydrological models in analysing the impact of urbanization. **Application of Mathematical Models in Hydrology and Water Resources Systems**, p. 265-278, 1975.

**APÊNDICE A – Artigo: Análise de variação sazonal da vazão em 25 bacias sobre diferentes cenários de mudanças climáticas acoplado nos modelos hidrológicos SMAP e MEL. Mateus Nardini Menegaz, Rafael de Oliveira Tiezzi**

**Resumo**

No mundo apenas 2,5% dos recursos hídricos do mundo estão disponíveis para as atividades humanas. Deste aproximadamente 99,7% se encontra de difícil acesso para consumo. Com isso é indispensável o estudo sobre os 0,3% dos recursos hídricos disponíveis para os usos da população. O Brasil é um país com grandes aportes de recursos hídricos, do disponível no mundo, cerca de 12% se encontra no país. Este estudo tem por finalidade o estudo dos possíveis impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos brasileiros. Para isso, fez-se uma análise sazonal, período chuvoso, compreendendo pelos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, e seco meses de junho, julho e agosto. Para realizar a análise foi utilizado 4 modelos climáticos globais: BESM, CanESM, HadGEM2-ES e Miroc5, regionalizados pelo modelo regional climática Eta, desenvolvido pelo CPTEC/INPE, em 3 diferentes cenários: Histórico(1960-1989), RCP 4.5(2010-2099) e RCP 8.5(2010-2099) para obter os dados de precipitação e evapotranspiração. Para obtenção das vazões foi utilizados dois modelos concentrados de chuva-vazão: SMAP e MEL. Os dados obtidos no estudo indicam relevantes impactos em todo território brasileiro, sendo as regiões Norte e Nordeste fortemente impactadas, a região Sudeste com impacto moderado, entretanto com indicativos de períodos de secas prolongadas para o final do século 21. Por último a região Sul é mais otimista para as projeções, sendo o impacto baixo em relação as demais regiões.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas. Modelagem Hidrológica. Bacias Hidrográficas. Recursos Hídricos.

**I- Introdução**

Os recursos hídricos do mundo podem ser classificados em duas categorias, água salgada que representa 97,5% da água sendo distribuída nos oceanos, e água doce, que representa o restante da água disponível, 2,5%, sendo que destes 68,9% encontra-se em geleiras, 29,9% em aquíferos, 0,3% em rios e lagos e 0,9% em outros

locais.(Postel, 1996; Shiklomanov, 1998)

O Brasil possui uma das maiores disponibilidades hídricas de todo o mundo. Aproximadamente 12% de toda água doce disponível em nosso planeta, se encontra distribuída em 12 diferentes bacias hidrográficas brasileiras. A região norte possui cerca de 80% dos recursos hídricos do país, entretanto é a região menos populosa, representando apenas 5% da população. A região em que se encontram as maiores concentrações populacionais é a sudeste, assim sendo a região com a maior demanda dos recursos hídricos. (ANA, 2018)

A água possui diversos usos e assim deve ser caracterizada como um recurso de extrema importância e sensibilidade socioeconômica. Sua utilização direta e indireta, pode ser na irrigação, abastecimento de água, lazer, transporte e energia

Em 2025 espera-se um consumo global de aproximadamente 2.300 km<sup>3</sup>/ano, sendo a agricultura responsável por 1.900 km<sup>3</sup>/ano, a indústria 100 km<sup>3</sup>/ano, as cidades 100km<sup>3</sup>/ano e 200km<sup>3</sup>/ano de evapotranspiração. (Cosgrove, 2014).

No Brasil consumo de água é de 1.158 m<sup>3</sup>/s, sendo que 68,4% é destinado a irrigação, 10,8% para abastecimento animal, 8,8% para indústria, 8,6% para abastecimento urbano e 3,4% entre mineração, termelétricas e abastecimento rural. (ANA, 2018)

O consumo por recursos hídricos é crescente no Brasil, podendo chegar a aumentar em 24% até 2030. Este aumento é relativo ao crescimento econômico e a urbanização prevista para os próximos anos. Vale a pena ressaltar a importância da água na matriz elétrica nacional, a qual em 2017 possuía 1.335 empreendimentos hidrelétricos, destes 221 usinas hidrelétricas(UHE), as quais as 25 principais bacias serão avaliadas neste estudo.(ANA, 2018)

É necessário desenvolver metodologias de avaliação à riscos e vulnerabilidade do Brasil em relação as mudanças climáticas. Todos setores são dependentes indiretos de fatores climáticos, entretanto o setor elétrico brasileiro é extremamente sensível aos mesmos.

Existem poucos estudos em nível nacional do impacto das mudanças climáticas em nossos recursos hídricos. Tiezzi et al. (2019) calibrou os modelos hidrológicos de chuva vazão e avaliou os impactos para as mesmas bacias utilizadas neste estudo, contudo, os modelos de mudanças climáticas utilizado são do Fourth Assessment Report, AR4, produzido pelo Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. Com isso, se buscou atualizar as informações encontrados pelos autores utilizando os

necários do Fifth Assessment Report, AR5, publicado pelo IPCC em dezembro de 2014.

Os modelos climáticos utilizados no AR5 são de escala globais, GCM(Global Climate Model), sendo condicionantes de contorno de modelos climáticos regionalizado, RCM(Regional Climate Model), que possuem um melhor detalhamento de informações para um determinado local. O objetivo deste trabalho é avaliar os possíveis impactos na vazão em diferentes bacias, para o RCM Eta, desenvolvido pelo, Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, CPTEC, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, utilizando os GCM, BESM, CaneESM2, HadGEM-2 e Miroc5. Para atingir o objetivo, foi utilizado os modelos chuva-vazão, SMAP, que é um modelo físico de previsão de vazão, e MEL, que é um modelo estocástico probabilístico. Os cenários avaliados são o histórico, que compreende ao período de 1960 a 1989, para se avaliar a respostas dos modelos, e para projeções de mudanças climáticas com RCP 4.5, cenário otimista em relação a mudança do clima, e RCP 8.5, cenário mais pessimista. Ambos cenários de projeção utilizaram o período de 2010 a 2099(90 anos) e comparados com o período histórico de 1931 a 2018(87 anos), disponibilizados pela Operados Nacional do Sistema Elétrico, ONS.

## **II- Modelos**

### ***Cenários***

Os cenários de projeção de mudanças climáticas do AR5 utilizam cominhos de concentração de radiação. O RCP 4.5 e 8.5 são variações na radiação na superfície terrestre para o final do século 21 em 4.5 e 8.5 W/m<sup>2</sup>. A variação de temperatura será entre 0,3 e 1,7 °C para o primeiro cenário, e de 2,6 a 3,8°C, para o RCP 8.5 em 2100.(IPCC, 2013).

### ***Modelos Climáticos***

#### ***1. BESM***

O Brazilian Earth System Model version 2.3.1, foi desenvolvido pelo INPE. O modelo possui 28 níveis de atmosfera terrestre, 50 níveis de atmosfera oceânica. Utiliza 12 diferentes tipos de vegetações, interações radioativas de ondas curtas e



longas, e sistema convectivo de nuvens. Utilização resolução espacial da ordem de 0,25 a 2 graus latitude e 1 grau em longitude(Chou et al, 2014a)

## 2. *CanESM2*

O Canadian Earth System Model version 2, consiste em um modelo acoplado de interação oceânica e terrestre. Utiliza componentes de ciclo de carbono, composto por 9 tipos de vegetações em 3 sistemas vegetativos e 2 de matéria orgânica morta.

## 3. *HadGEM2-EM*

O Hadley Centre Global Environmental Model, possui uma resolução espacial de 1.875 graus em longitude e 1.275 em latitude terrestre, utiliza ciclo de carbono utilizando 5 tipos de vegetação e interação atmosférica em 38 níveis. No oceano utiliza resolução espacial de 1/3 graus em nos trópicos e de 1 grau em latitudes superiores a 30° em 40 níveis verticais. Possui modelo de química atmosférica com aerossóis.(Collins et al, 2008)

## 4. *Miroc5*

O Miroc 5 é um modelo desenvolvido no Japão, conhecido como Model for Interdisciplinary Research on Climate(MIROC), version 5. Utiliza microfísica de nuvens acoplado com modelo de aerossóis, representação de dinâmica de gelo oceânico. Na superfície utiliza efeitos do albedo em neve e espelhos água. Com dinâmica vertical em 40 níveis terrestres e 50 níveis oceânicos, em resolução espacial de aproximadamente 150km na cobertura terrestre e 1 grau no oceano.(Chou et al, 2014a)

## 5. *Eta Model*

Este modelo foi adaptado para realizar o downscaling, ou seja, realizar a regionalização dos globais em um escala mais detalhada para América Central e do Sul. Utilizado pelo CEPTEC/INPE desde 1997 em previsões meteorológicas. A partir de 2010 o modelo foi implementado para mudanças climáticas direcionado pelos modelos globais. O Eta utiliza dinâmica anual do ciclo de vegetação microfísica de nuvens, esquema convectivo de nuvens e balanço de ondas curtas e longas em concentração constante de CO<sub>2</sub>.(Chou et al, 2014a)

Para este estudo foi utilizado o Eta, acoplado em 4 modelos globais: BESM, CaneESM2, HadGEM2-ES e Miroc5, após o acoplamento sendo representados por, Eta-BESM, Eta-CanESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-Miroc5 para se obter dados mensais de precipitação para o período de 1960 a 1990 e 2010 a 2099. Possui uma resolução vertical em 38 níveis e espacial em 20km.

## Modelos Hidrológicos

### 1. SMAP

O SMAP(Lopes et al., 1982) é um modelo hidrológico concentrado determinístico, que utiliza como input dados de chuva média e evapotranspiração média, para determinar a resposta chuva-vazão de bacias hidrográficas. Sua vantagem é possuir poucos parâmetros calibráveis, e é amplamente utilizado no Brasil pela Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, na previsão de vazões de bacias com plantas hidrelétricas.

### 2. MEL

Trata-se de um Modelo Estocástico Linear, que usa regressão de médias móveis (ARMA). Por ser um modelo probabilístico, a longo prazo poderá ser simulado vazões de base negativas. Tiezzi et al.(2019) utilizou as vazões de base geradas no modelo SMAP, para a calibração das bacias deste estudo, desta forma diminuindo a incerteza do modelo, adotada também neste estudo.

## III- Dados e Metodologia

### *Área de Estudo*

As 25 bacias representadas neste estudo são de importantes usinas hidrelétricas no Brasil (figura 1 e 2), possuindo 217 usinas hidrelétrica de médio e grande porte, com capacidade instalada de 101,9GW. Ainda existem no país pequenas centrais hidrelétricas capacidade instalada de 5,2GW, totalizando 107,1GW(67,3% da capacidade instalada de geração de energia elétrica do país) (Tiezzi et al, 2019). Diferentemente de Tiezzi et al. (2019) este estudo não contempla a bacia do rio Tapajós, pois o empreendimento hidrelétrico se encontra suspenso por motivos ambientais.

Grande Bacia	Região	Bacia	N°	Nash-Sutcliffe Efficiency	
				SMAP	MEL
Paraná	Sudeste	Emborcação	1	0.785	0.771
		Nova Ponte	2	0.911	0.832

		Itumbiara	3	0.735	0.819
		São Simão	4	0.869	0.897
		Furnas	5	0.941	0.880
		Água Vermelha	6	0.726	0.814
		Nova Avanhandava	7	0.886	0.839
		Porto Primavera	8	0.745	0.762
		Rosana	9	0.832	0.736
		Itaipu	10	0.565	0.675
<b>Paraíba do Sul</b>	Sudeste	Santa Cecília	11	0.730	0.838
<b>Iguaçu</b>	Sul	Salta Caxias	12	0.646	0.608
<b>Uruguai</b>	Sul	Itá	13	0.582	0.534
<b>Jacuí</b>	Sul	Dona Francisca	14	0.729	0.684
<b>São Francisco</b>	Nordeste	Três Marias	15	0.855	0.740
		Sobradinho	16	0.826	0.841
		Xingó	17	0.030	0.351
<b>Tocantins</b>	Norte	Serra da Mesa	18	0.771	0.849
		Lajeado	19	0.856	0.804
		Tucuruí	20	0.625	0.876
<b>Xingu</b>	Norte	Belo Monte	21	0.743	0.859
<b>Tapajós</b>	Norte	Teles Pires	22	0.830	0.889
		Santo Antônio	23	0.578	0.940
<b>Jequitinhonha</b>	Sudeste	Itapebi	24	0.791	0.853
<b>Doce</b>	Sudeste	Mascarenhas	25	0.809	0.812

Figura 1 - Eficiência de Nash-Sutcliffe e localização das 25 bacias.(Tiezzi et al, 2019)

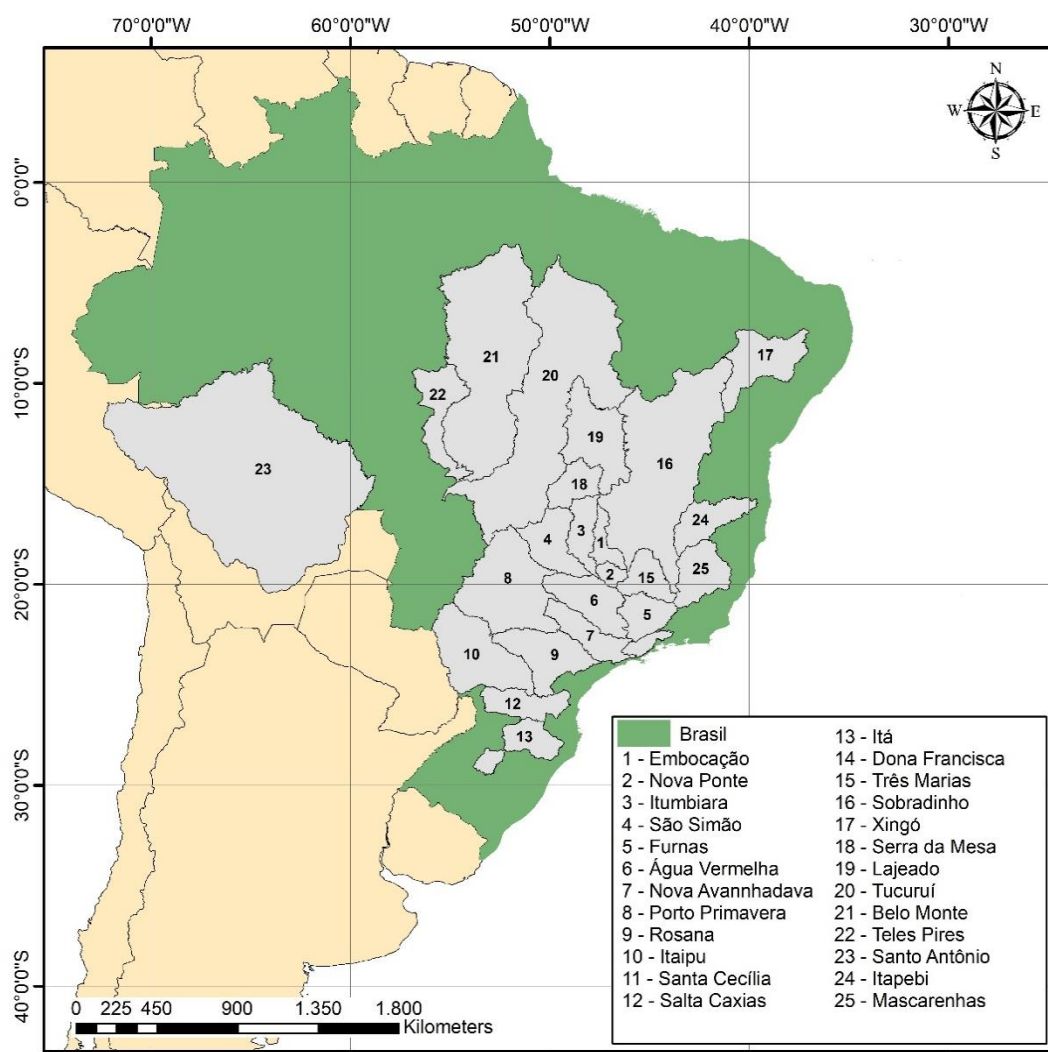


Figura 2 - Bacias estudadas(Tiezzi et al, 2019)

### **DADOS DE PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO**

Os dados de precipitação utilizados neste estudo foram disponibilizados pelo CPTEC/INPE, através da plataforma PROJETA, Projeto de Mudança do Clima para América do Sul Regionalizados pelo Eta. Para mais detalhes ver Chou et al. (2014a), Chou et al. (2014b) e Lyra et al (2017). Os GMC utilizados são os que possuem a regionalização pelo Eta para América do Sul com escala de 20km x 20km. Importante salientar que para esta rodada de projeções dos modelos pelo AR5 houve um aumento no detalhamento do modelo Eta, que anteriormente utilizava apenas escala de 40km x 40km.

Cada célula do modelo representa um dado de precipitação mensal, contudo não representa as delimitações das bacias hidrográficas utilizadas. Como cada bacia

possuir diversas células do modelo climático, foi feita a média do total mensal precipitado para cada bacia.

A média mensal de precipitação é uma escala satisfatória para este estudo, o qual cobre praticamente 50% do território do Brasil. As vazões determinadas através do fluxograma (figura 3) são comparadas com o histórico de vazão média mensal disponibilizado pelo ONS.



Figura 3 - Fluxograma da metodologia

### **ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS**

A espacialização dos dados é realizada para não haver superposição de precipitação. Pois, a espacialização dos dados de precipitação é diferente dos limites das bacias, podendo assim para uma única célula de precipitação haver 3 diferentes bacias hidrográficas. (figura 4)

Então, a precipitação da bacia em uma célula com intercessões é ponderada pela representatividade espacial dela, ou seja, a precipitação total mensal da célula em questão, será dividida de acordo com a proporcionalidade espacial que a bacia possui. (figura 4)

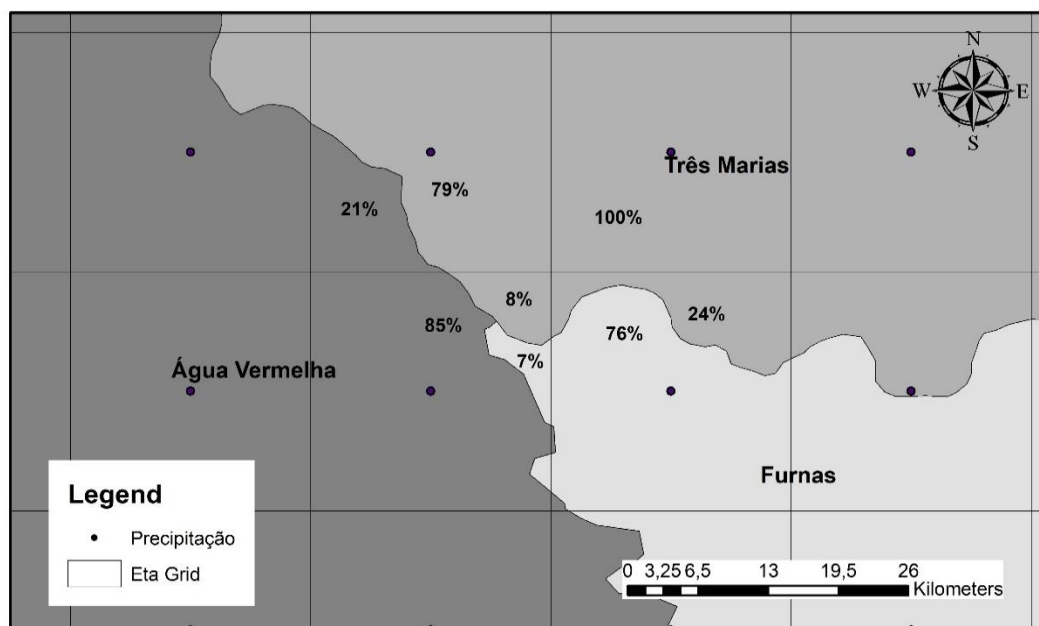


Figura 4 – Representação da espacialização dos dados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### *Variação Média da Vazão Mensal Média para o Período Histórico*

A figura 5 demonstra a variação média das vazões mensais médias para as 25 bacias estudadas no período considerado histórico, 1960 a 1989. Pode-se observar que em grande parte das bacias é encontrado uma variação negativa de vazão, desta forma em média os modelos subestimam os valores de vazão. Para a bacia hidrográfica de Sobradinho(16) houve um superestimação da vazão de forma exagerada, em que para todo o período avaliado a vazão encontrado foi o dobro da vazão observada. Também é observado que nos meses de setembro, outubro e novembro, de modo geral, há uma superestimação das vazões. É importante salientar que a calibração realizada por Tiezzi et al(2019) foi realizada com dados reais para o período de 4 anos, 1997 a 2001, sendo assim esperado uma variabilidade quando utiliza a mesma para séries temporais extensas. Desta forma, apesar de existir variabilidade entre as vazões modeladas e as observadas, os valores encontrados são aceitáveis.

Contudo, com a avaliação do período histórico foi determinado que para estudos futuros utilizando o acoplamento de modelos meteorológicos em modelos hidrológicos é necessário a realização de calibração do modelo hidrológico de acordo

com o modelo meteorológico utilizado, através desta, os valores modelados irão possuir uma melhor representação da realidade.

Por fim, a calibração poderá ser realizada com diferentes períodos, para melhor representar a variabilidade do clima, contribuindo ainda mais para a precisão dos modelos hidrológicos.

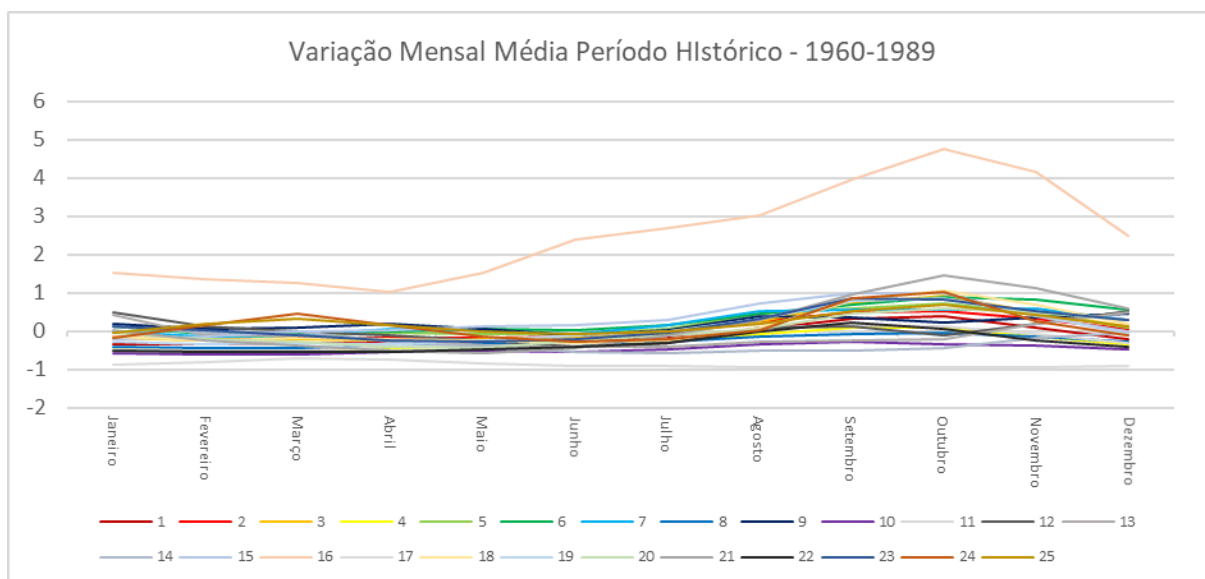


Figura 5 – Gráfico da variação média da vazão mensal média para o período histórico de 1960 a 1989.

### ***Variação Média da Vazão Mensal Média para a Projeção de Mudanças Climáticas***

A figura 6 demonstra a variação média para as vazões nos cenários futuros de mudanças climáticas. Para efetuar uma modelagem com um valor mais próxima do real foi realizado a variação futura em relação ao período histórico modelado, uma vez que no período histórico modelado, as bacias hidrográficas estudadas apresentaram certa variabilidade em relação ao observado.

Na figura 6 A e 6 B, é observado a variação dos modelos para o período de 2010 a 2039, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 respectivamente. Este período é importante pois parte dele já foi observado, uma vez que este estudo foi concluído no ano de 2020. Em ambos cenários era esperado em média uma vazão inferior ao período histórico, e esta tendência pode ser notada atualmente. No ano de 2014 houve um prolongamento da seca que afetou reservatórios do sudeste do Brasil, fato que

pode ser compreendido na figura 6, em que a variação negativa de vazão se intensifica nos meses de junho, julho, agosto e setembro, meses que na região são tipicamente sem precipitações.

A figura 6 C e 6 D representa os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 respectivamente para o período de 2040 a 2069. Este período contempla uma projeção de mais longo prazo, entretanto, na gestão de recursos hídricos de extrema importância. Assim como no período anterior, a tendência de grande parte das bacias é de sofrerem perda de vazão média. Ao compararmos os cenários para o mesmo período, pode-se observar que no cenário pessimista, a perda de vazão é um pouco mais acentuada, alarmando ainda mais para uma gestão eficiente dos recursos hídricos. As bacias localizadas no sul do país, Santo Caxias(12), Itá(13) e Dona Francisca(14), não irão sofrer tanto com os efeitos das mudanças climáticas, no cenário otimista é esperado um ganho na vazão média para os meses de junho à dezembro, sendo que para os demais meses um pequena perda na vazão média. A bacia do Xingó(17) não será impactada nos primeiros meses do ano, contudo no segundo semestre severamente impactada, podendo chegar a perda de quase 100% da vazão da bacia.

A figura 6 E e 6 F, apresenta a variação da vazão para os cenários otimista e pessimista no final do século, 2070 a 2099. Neste período é seguido o mesmo dos demais, com uma perda considerável de vazão por todo território do Brasil, sendo em ambos cenários mais intensificado que o período anterior.



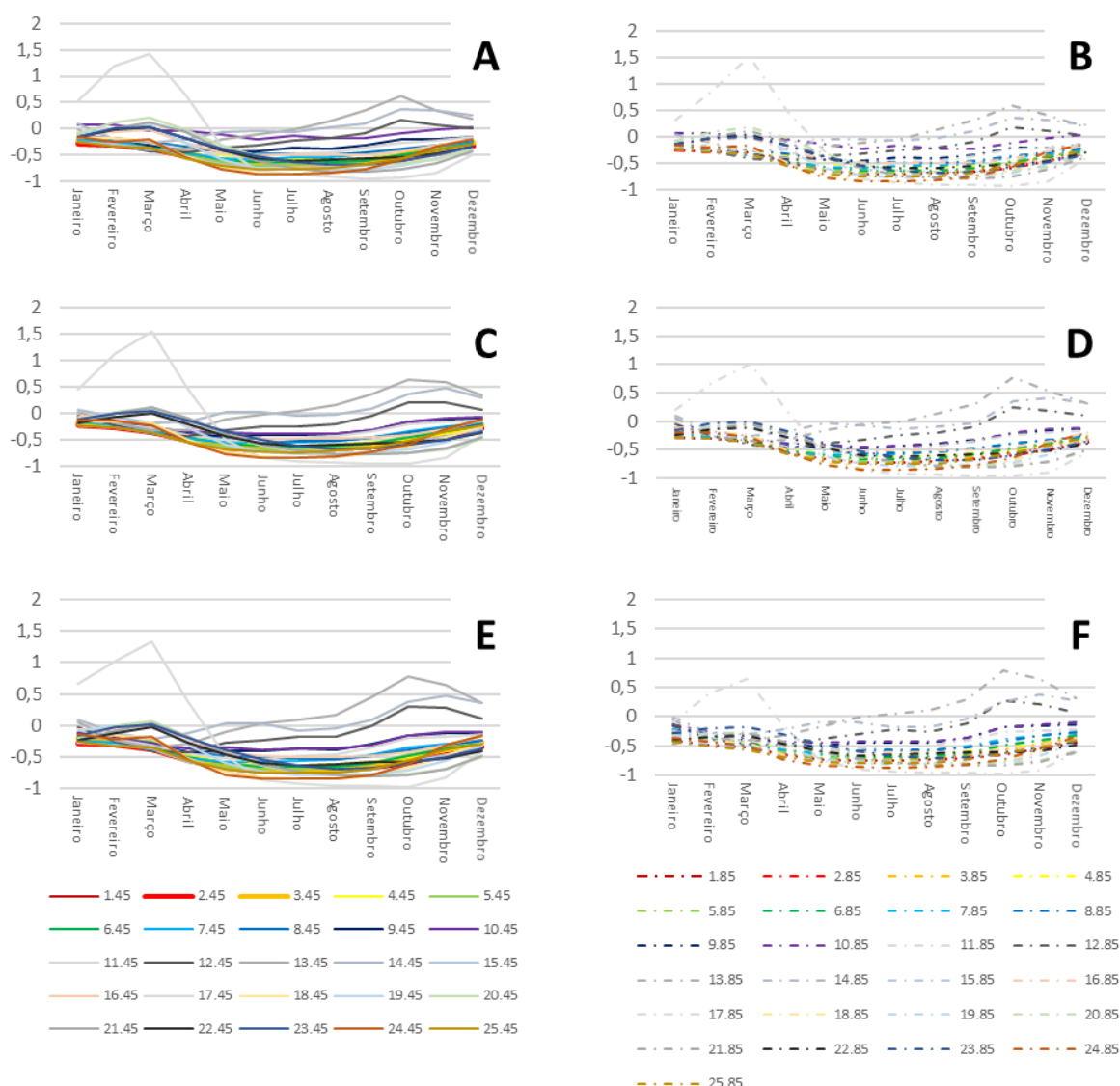


Figura 6- Gráfico da Variação Média da vazão mensal média: (A) RCP 4.5 – 2010 a 2039, (B) RCP 8.5 – 2010 a 2039, (C) RCP 4.5 – 2040 a 2069, (D) RCP 8.5 – 2040 a 2069, (E) RCP 4.5 – 2070 a 2099, (F) RCP 8.5 – 2070 a 2099.

Com isso, em todos os cenários e períodos avaliados, a tendência de variação de vazão é para perda dela, caracterizando um cenário crítica para todos os usos da água. A região que será menos afetada será a região sul do país, que era esperado, uma vez que no futuro espera-se um deslocamento de precipitação para o sul. A região Sudeste e Nordeste poderá sofrer impactos relevantes, uma vez que a região sudeste é ocupada por 42% da população do país, e a região nordeste já possui secas severas.

#### IV- CONCLUSÃO

Este estudo teve o objetivo de avaliar os impactos das mudanças climáticas em 25 bacias hidrográficas brasileiras responsáveis pela geração de grande parte da energia elétrica no país. Os modelos climáticos utilizados foram regionalizados pelo Eta, RCM desenvolvido pelo CPTEC/INPE. Já as condições de contorno globais foram utilizados os modelos BESM, CanESM, HadGEM2-ES e Miroc5. Os modelos climáticos são a entrada de dados dos modelos hidrológicos de chuva-vazão, SMAP e MEL. Ambos os modelos foram calibrados por Tiezzi et al (2019).

Primeiramente foi avaliado a variabilidade dos dados encontrados em um período histórico, de 1960 a 1989. A média dos modelos utilizados apresentaram considerável variabilidade, em alguns casos até acentuada variabilidade. Isto demonstra que deve-se realizar uma calibração do conjunto modelo climático e modelo hidrológica para se obter melhores resultados. Isto se deve, pois os modelos climáticos comportam-se diferente das condições reais, uma vez que são modelos. Com isto, era esperado certa variabilidade na modelagem, assim como a variabilidade própria dos modelos hidrológicos. Entretanto pode-se concluir que o acoplamento de modelos climáticos em modelos hidrológicos é uma ferramenta útil na projeção de vazão em bacias hidrográficas e servem de norteadores para tomadores de decisão na gestão dos recursos hídricos.

Em um segundo momento, foi avaliado qual poderá ser a variação das vazões nas diferentes bacias estudadas. Através dos cenários, RCP 4.5 e RCP 8.5 é observado uma variação negativa considerada em grande parte das bacias hidrográficas estudadas, sendo apenas as bacias da região Sul do país que não se espera um impacto acentuado. Nos períodos estudados, 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2089, foi observado uma gradativa perda de vazão, sempre mais acentuadas nos meses de julho a outubro. O cenário RCP 8.5, quase sempre espera-se uma vazão menor que no cenário RCP 4.5, alarmando ainda mais para uma eficiente gestão dos recursos hídricos.

Por fim, é de grande importância a manutenção e aprimoramento das análises deste estudo, pois as mesmas poderão auxiliar na prevenção de futuros impactos. O acoplamento de modelos hidrológicos em modelos climáticos, é uma ferramenta para objetivar a gestão de recursos hídricos, entretanto é necessário desenvolver ou calibrar modelos hidrológicos específicos para modelos climáticos. Com isso,

contribuindo para o planejamento dos recursos hídricos com uma melhor precisão, diminuindo os possíveis riscos futuros de crise hídrica.

## AGRADECIMENTOS

Os Autores agradecem ao CPTEC/INPE e UNIFAL-MG

## REFERÊNCIAS

ANA - Agência Nacional de Águas. Conjuntura do Recursos Hídricos no Brasil 2018: informe anual. Brasília, 2018.

ANA - Agência Nacional de Águas. Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos: avaliações e diretrizes para adaptação. Brasília, 2016.

Chou, S.C, Lyra, A. , Mourão, C. , Dereczynski, C. , Pilotto, I. , Gomes, J. , Bustamante, J. , Tavares, P. , Silva, A. , Rodrigues, D. , Campos, D. , Chagas, D. , Sueiro, G. , Siqueira, G. , Nobre, P. and Marengo, J. (2014) Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. American Journal of Climate Change, 3, 438-454. doi:10.4236/ajcc.2014.35039. [http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52887#.VakHg\\_IViko](http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52887#.VakHg_IViko)

Chou, S.C, Lyra, A. , Mourão, C. , Dereczynski, C. , Pilotto, I. , Gomes, J. , Bustamante, J. , Tavares, P. , Silva, A. , Rodrigues, D. , Campos, D. , Chagas, D. , Sueiro, G. , Siqueira, G. and Marengo, J. (2014) Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. American Journal of Climate Change, 3, 512-527. doi: 10.4236/ajcc.2014.35043. [http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52877#.Vaklh\\_IVikp](http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52877#.Vaklh_IVikp)

Collins, W.J., N. Bellouin, M. Doutriaux-Boucher, N. Gedney, T. Hinton, C. D. Jones, S. Liddicoat, G. Martin, F. O'Connor, J. Rae, C. Senior, I. Totterdell, S. Woodward, T. Reichler, J. Kim, 2008: Evaluation of the HadGEM2 model. Met Office Hadley Centre Technical Note no. HCTN 74, available from Met Office, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB <http://www.metoffice.gov.uk/publications/HCTN/index.html>

COSGROVE, William J.; RIJSBERMAN, Frank R. World water vision: making water everybody's business. Routledge, 2014.

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on

Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Lyra, A., Tavares, P., Chou, S.C., Sueiro, G., Dereczynski, C.P., Sondermann, M., Silva, A., Marengo, J., Giarolla, A. 2017. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution Theor Appl Climatol. doi:10.1007/s00704-017-2067-z. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-017-2067-z>

POSTEL, Sandra L.; DAILY, Gretchen C.; EHRLICH, Paul R. Human appropriation of renewable fresh water. Science, v. 271, n. 5250, p. 785-788, 1996.

Tiezzi, Rafael O. ; Barbosa, Paulo S. F. ; Lopes, João E. G. ; Francato, Alberto L. ; Zambon, Renato C. ; Silveira, Alexandre ; Menezes, Paulo H. B. J. ; Isidoro, Jorge M. G. P. Trends of streamflow under climate change for 26 Brazilian basins.. Water Policy, 2019, Vol.21 (1), p.206-221

## APÊNDICE B – Tabelas de Resultados

Tabela B1 - Variação média da vazão mensal média para o período histórico.

BACIA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1	-0,35	-0,35	-0,32	-0,32	-0,27	-0,25	-0,17	0,06	0,32	0,39	0,10	-0,20
2	-0,15	-0,20	-0,16	-0,18	-0,17	-0,13	-0,03	0,25	0,49	0,53	0,33	0,07
3	-0,18	-0,25	-0,22	-0,23	-0,20	-0,16	-0,06	0,25	0,73	0,91	0,50	0,11
4	-0,48	-0,49	-0,48	-0,44	-0,37	-0,32	-0,26	-0,08	0,09	0,10	-0,14	-0,36
5	-0,16	-0,16	-0,12	-0,05	-0,09	-0,09	0,05	0,46	0,59	0,73	0,50	0,10
6	0,12	-0,07	-0,04	0,00	0,05	0,04	0,14	0,46	0,70	0,88	0,83	0,56
7	0,00	-0,13	-0,09	0,05	0,01	-0,07	0,17	0,53	0,57	0,56	0,58	0,30
8	-0,40	-0,44	-0,45	-0,40	-0,34	-0,33	-0,27	-0,14	-0,06	-0,03	-0,13	-0,26
9	0,18	0,06	0,10	0,19	0,07	-0,09	0,03	0,38	0,37	0,23	0,35	0,45
10	-0,56	-0,60	-0,60	-0,56	-0,52	-0,54	-0,48	-0,34	-0,28	-0,35	-0,37	-0,47
11	-0,47	-0,52	-0,51	-0,42	-0,37	-0,35	-0,20	0,08	0,16	0,13	-0,08	-0,30
12	0,49	0,14	-0,02	-0,09	-0,25	-0,39	-0,29	0,09	0,14	-0,10	0,19	0,51
13	0,43	-0,12	-0,10	-0,20	-0,36	-0,41	-0,42	-0,27	-0,24	-0,22	0,19	0,50
14	0,12	-0,04	-0,01	-0,28	-0,42	-0,55	-0,58	-0,52	-0,50	-0,43	-0,19	-0,03
15	-0,19	-0,15	-0,02	0,03	0,14	0,15	0,31	0,72	1,00	0,98	0,38	-0,01
16	1,53	1,37	1,27	1,04	1,52	2,39	2,69	3,03	3,95	4,75	4,15	2,49
17	-0,86	-0,79	-0,71	-0,74	-0,83	-0,90	-0,91	-0,93	-0,94	-0,94	-0,94	-0,92
18	-0,14	-0,24	-0,16	-0,22	-0,26	-0,29	-0,23	0,08	0,78	1,06	0,70	0,19

19	-0,29	-0,33	-0,30	-0,34	-0,25	-0,11	0,00	0,32	0,78	0,87	0,41	-0,07
20	-0,05	-0,20	-0,27	-0,42	-0,45	-0,24	-0,11	0,05	0,47	0,59	0,49	0,28
21	0,04	-0,26	-0,39	-0,52	-0,56	-0,43	-0,11	0,29	0,95	1,45	1,12	0,60
22	-0,51	-0,55	-0,55	-0,53	-0,49	-0,41	-0,29	-0,02	0,22	0,05	-0,24	-0,42
23	0,14	0,02	-0,09	-0,23	-0,26	-0,20	-0,05	0,33	0,86	0,84	0,51	0,30
24	-0,19	0,14	0,47	0,15	-0,15	-0,28	-0,21	0,03	0,87	1,02	0,25	-0,11
25	-0,04	0,20	0,31	0,14	0,00	-0,06	-0,02	0,19	0,51	0,68	0,42	0,13

Tabela B2 - Variação média da vazão mensal média para o período 2010-2039.

BACIA.CENÁRIO	JAN	FEV	MA R	ABR	MAI	JUN	JUL	AG O	SET	OUT	NOV	DEZ
1.45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,24	0,28	0,32	0,50	0,64	0,71	0,71	0,70	0,68	0,60	0,48	0,33
1.85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,25	0,28	0,31	0,48	0,64	0,70	0,71	0,70	0,67	0,59	0,47	0,32
2.45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,27	0,30	0,36	0,51	0,64	0,70	0,69	0,68	0,65	0,57	0,46	0,32
2.85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,25	0,31	0,34	0,51	0,64	0,70	0,69	0,68	0,64	0,55	0,45	0,31
3.45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,21	0,24	0,27	0,46	0,62	0,69	0,70	0,69	0,64	0,51	0,38	0,25
3.85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,22	0,24	0,26	0,45	0,62	0,68	0,69	0,69	0,62	0,49	0,36	0,24
4.45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,21	0,20	0,25	0,35	0,49	0,56	0,58	0,59	0,55	0,48	0,40	0,29
4.85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,19	0,22	0,23	0,34	0,50	0,56	0,58	0,59	0,55	0,48	0,39	0,27
5.45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,22	0,25	0,37	0,51	0,64	0,69	0,67	0,66	0,60	0,49	0,40	0,27
5.85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,20	0,27	0,36	0,52	0,64	0,69	0,68	0,67	0,60	0,46	0,40	0,26
6.45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,22	0,24	0,34	0,46	0,57	0,64	0,64	0,64	0,60	0,50	0,40	0,28
6.85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,21	0,28	0,34	0,47	0,58	0,65	0,65	0,65	0,61	0,49	0,40	0,27
7.45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,21	0,23	0,37	0,46	0,55	0,57	0,53	0,54	0,48	0,40	0,34	0,24
7.85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,21	0,27	0,37	0,48	0,56	0,59	0,55	0,55	0,50	0,39	0,35	0,24
8.45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,16	0,16	0,24	0,32	0,42	0,47	0,48	0,50	0,46	0,38	0,30	0,23
8.85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,15	0,19	0,25	0,33	0,43	0,48	0,49	0,51	0,47	0,37	0,30	0,21



	0,08			0,01	0,31	0,53	0,64	0,68	0,67	0,65	0,58	0,38
<b>20.85</b>	-	0,08	0,19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,08			0,03	0,32	0,53	0,63	0,67	0,66	0,64	0,56	0,35
<b>21.45</b>	-	0,02	0,13	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,16			0,06	0,38	0,60	0,74	0,80	0,81	0,77	0,65	0,43
<b>21.85</b>	-	-	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,17	0,01		0,09	0,40	0,60	0,73	0,79	0,80	0,76	0,63	0,40
<b>22.45</b>	-	-	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,14	0,02		0,17	0,39	0,56	0,61	0,59	0,57	0,54	0,48	0,33
<b>22.85</b>	-	-	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,13	0,03		0,15	0,40	0,56	0,61	0,59	0,56	0,53	0,46	0,31
<b>23.45</b>	-	0,00	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,14			0,17	0,38	0,53	0,64	0,69	0,67	0,60	0,49	0,33
<b>23.85</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,15	0,02	0,01	0,17	0,38	0,54	0,65	0,69	0,67	0,58	0,48	0,34
<b>24.45</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,15	0,24	0,20	0,55	0,77	0,85	0,85	0,84	0,76	0,59	0,33	0,19
<b>24.85</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,16	0,22	0,16	0,53	0,78	0,84	0,85	0,83	0,75	0,59	0,28	0,14
<b>25.45</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,24	0,33	0,36	0,56	0,70	0,76	0,76	0,75	0,69	0,55	0,39	0,28
<b>25.85</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,24	0,31	0,32	0,55	0,70	0,75	0,76	0,75	0,69	0,54	0,38	0,27

Tabela B3 - Variação média da vazão mensal média para o período 2040-2069.

BACIA.CENÁRIO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
<b>1.45</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,25	0,28	0,35	0,53	0,66	0,71	0,71	0,69	0,66	0,58	0,46	0,32
<b>1.85</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,29	0,31	0,37	0,55	0,67	0,73	0,72	0,70	0,66	0,60	0,49	0,36
<b>2.45</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,23	0,27	0,36	0,53	0,64	0,70	0,69	0,67	0,63	0,53	0,41	0,30
<b>2.85</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,28	0,31	0,38	0,55	0,66	0,72	0,70	0,68	0,63	0,55	0,45	0,33
<b>3.45</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,18	0,21	0,27	0,48	0,63	0,69	0,70	0,68	0,61	0,49	0,35	0,23
<b>3.85</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,21	0,24	0,29	0,50	0,64	0,71	0,71	0,69	0,61	0,51	0,37	0,26
<b>4.45</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,23	0,25	0,30	0,45	0,56	0,61	0,62	0,60	0,55	0,48	0,39	0,30





	0,28	0,30	0,37	0,58	0,70	0,76	0,75	0,73	0,67	0,58	0,46	0,33
<b>16.45</b>	-	0,00	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,08			0,23	0,41	0,47	0,49	0,48	0,46	0,42	0,30	0,15
<b>16.85</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,12	0,09	0,08	0,28	0,45	0,51	0,51	0,52	0,50	0,46	0,34	0,20
<b>17.45</b>	0,45	1,12	1,54	0,44	-	-	-	-	-	-	-	-
					0,50	0,86	0,92	0,95	0,96	0,95	0,85	0,42
<b>17.85</b>	0,21	0,69	1,00	0,16	-	-	-	-	-	-	-	-
					0,61	0,88	0,91	0,95	0,96	0,97	0,90	0,53
<b>18.45</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,15	0,16	0,19	0,50	0,73	0,82	0,84	0,83	0,78	0,65	0,46	0,26
<b>18.85</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,20	0,18	0,23	0,52	0,73	0,82	0,85	0,84	0,78	0,68	0,49	0,29
<b>19.45</b>	-	0,03	0,09	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,13			0,28	0,59	0,73	0,78	0,77	0,74	0,70	0,56	0,32
<b>19.85</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,15	0,06	0,04	0,33	0,62	0,75	0,78	0,78	0,76	0,72	0,57	0,34
<b>20.45</b>	-	0,02	0,11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,19			0,13	0,41	0,61	0,74	0,78	0,77	0,75	0,68	0,48
<b>20.85</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,24	0,09	0,03	0,23	0,48	0,65	0,75	0,79	0,78	0,77	0,70	0,51
<b>21.45</b>	-	-	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,21	0,01		0,09	0,40	0,59	0,71	0,77	0,79	0,77	0,66	0,46
<b>21.85</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,27	0,13	0,04	0,21	0,46	0,63	0,73	0,78	0,80	0,79	0,70	0,50
<b>22.45</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,18	0,06	0,01	0,21	0,44	0,57	0,62	0,59	0,57	0,55	0,51	0,37
<b>22.85</b>	-	-	-0,11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,24	0,14		0,29	0,48	0,61	0,63	0,60	0,58	0,57	0,52	0,40
<b>23.45</b>	-	0,00	0,04	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,13			0,15	0,36	0,51	0,62	0,68	0,67	0,60	0,50	0,35
<b>23.85</b>	-	-	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,15	0,02		0,19	0,38	0,54	0,64	0,69	0,68	0,59	0,49	0,35
<b>24.45</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,15	0,15	0,23	0,55	0,78	0,84	0,85	0,82	0,74	0,59	0,31	0,12
<b>24.85</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,20	0,19	0,29	0,55	0,78	0,85	0,85	0,83	0,76	0,65	0,36	0,20
<b>25.45</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,24	0,27	0,36	0,55	0,68	0,74	0,75	0,72	0,66	0,52	0,34	0,24
<b>25.85</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,29	0,30	0,37	0,57	0,70	0,75	0,76	0,74	0,66	0,57	0,40	0,28

Tabela B4 - Variação média da vazão mensal média para o período 2070-2099.

BACIA.CENÁRI	JAN	FEV	MA	ABR	MAI	JUN	JUL	AG	SET	OUT	NOV	DEZ
--------------	-----	-----	----	-----	-----	-----	-----	----	-----	-----	-----	-----





	0,16	0,03		0,18	0,38	0,53	0,63	0,68	0,68	0,60	0,50	0,36
<b>23.85</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,28	0,19	0,18	0,30	0,46	0,59	0,67	0,71	0,70	0,62	0,53	0,42
<b>24.45</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,13	0,22	0,18	0,53	0,77	0,83	0,84	0,83	0,78	0,60	0,30	0,15
<b>24.85</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,37	0,43	0,51	0,73	0,83	0,86	0,87	0,87	0,82	0,74	0,55	0,34
<b>25.45</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,24	0,33	0,35	0,56	0,69	0,74	0,75	0,74	0,69	0,55	0,38	0,29
<b>25.85</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,43	0,50	0,56	0,70	0,77	0,79	0,79	0,79	0,74	0,63	0,52	0,40

Tabela B5 – Média Mensal Energia Natural Afluente para o cenário RCP 4.5 e período 2010-2039.

<b>MÊS</b>	<b>ENA1</b>	<b>ENA2</b>	<b>ENA3</b>	<b>ENA4</b>	<b>BRASIL</b>
<b>JANEIRO</b>	29.943	10.113	10.671	6.005	56.732
<b>FEVEREIRO</b>	29.563	7.763	11.060	7.365	55.751
<b>MARÇO</b>	26.598	6.362	11.929	8.150	53.040
<b>ABRIL</b>	21.497	6.114	9.254	6.839	43.704
<b>MAIO</b>	16.794	7.299	6.793	4.828	35.714
<b>JUNHO</b>	14.604	7.827	5.743	3.213	31.387
<b>JULHO</b>	15.111	9.044	5.757	2.422	32.333
<b>AGOSTO</b>	15.331	9.959	5.871	2.190	33.351
<b>SETEMBRO</b>	17.345	11.337	6.091	2.225	36.997
<b>OUTUBRO</b>	21.283	13.789	6.710	2.343	44.126
<b>NOVEMBRO</b>	24.346	12.215	7.845	2.799	47.206
<b>DEZEMBRO</b>	28.290	11.468	9.349	4.006	53.113

Tabela B6 – Média Mensal Energia Natural Afluente para o cenário RCP 4.5 e período 2040-2069.

<b>MÊS</b>	<b>ENA1</b>	<b>ENA2</b>	<b>ENA3</b>	<b>ENA4</b>	<b>BRASIL</b>
<b>JANEIRO</b>	31.601	10.771	10.749	5.571	58.692
<b>FEVEREIRO</b>	30.038	8.626	11.795	7.023	57.481
<b>MARÇO</b>	27.146	7.101	12.304	7.811	54.361
<b>ABRIL</b>	20.578	6.440	9.490	6.193	42.701
<b>MAIO</b>	16.263	7.787	6.994	4.189	35.233
<b>JUNHO</b>	14.491	8.489	5.992	2.740	31.713
<b>JULHO</b>	14.314	8.906	5.909	1.892	31.021
<b>AGOSTO</b>	15.266	9.624	6.102	1.641	32.632
<b>SETEMBRO</b>	17.732	11.623	6.369	1.713	37.437
<b>OUTUBRO</b>	22.511	14.075	6.959	1.865	45.410
<b>NOVEMBRO</b>	26.278	13.963	8.092	2.400	50.734
<b>DEZEMBRO</b>	29.446	12.355	9.798	3.662	55.262

Tabela B7– Média Mensal Energia Natural Afluente para o cenário RCP 4.5 e período 2070-2099.

<b>MÊS</b>	<b>ENA1</b>	<b>ENA2</b>	<b>ENA3</b>	<b>ENA4</b>	<b>BRASIL</b>
<b>JANEIRO</b>	29.990	11.007	10.986	5.665	57.649
<b>FEVEREIRO</b>	29.225	8.260	11.521	6.970	55.976
<b>MARÇO</b>	26.817	6.915	12.379	7.642	53.754
<b>ABRIL</b>	19.800	6.669	9.419	5.881	41.769
<b>MAIO</b>	16.079	8.157	6.992	4.021	35.249
<b>JUNHO</b>	14.337	8.922	6.024	2.654	31.938
<b>JULHO</b>	14.643	9.612	5.965	1.854	32.075
<b>AGOSTO</b>	14.936	9.946	5.981	1.610	32.474
<b>SETEMBRO</b>	17.631	12.216	6.160	1.641	37.649
<b>OUTUBRO</b>	22.281	15.121	6.816	1.785	46.004
<b>NOVEMBRO</b>	25.584	14.719	8.067	2.356	50.726
<b>DEZEMBRO</b>	28.260	12.712	9.593	3.618	54.183

Tabela B8– Média Mensal Energia Natural Afluente para o cenário RCP 8.5 e período 2010-2039.

<b>MÊS</b>	<b>ENA1</b>	<b>ENA2</b>	<b>ENA3</b>	<b>ENA4</b>	<b>BRASIL</b>
<b>JANEIRO</b>	30.112	9.709	10.517	5.991	56.329
<b>FEVEREIRO</b>	28.809	8.130	10.995	7.147	55.080
<b>MARÇO</b>	26.885	6.493	12.217	8.049	53.644
<b>ABRIL</b>	21.376	6.024	9.417	6.790	43.607
<b>MAIO</b>	16.559	7.194	6.800	4.729	35.281
<b>JUNHO</b>	14.402	7.695	5.816	3.202	31.115
<b>JULHO</b>	14.785	8.691	5.835	2.467	31.778
<b>AGOSTO</b>	14.994	9.577	5.938	2.231	32.741
<b>SETEMBRO</b>	17.157	11.137	6.230	2.323	36.847
<b>OUTUBRO</b>	21.902	13.623	6.916	2.439	44.881
<b>NOVEMBRO</b>	24.670	12.678	8.120	2.973	48.441
<b>DEZEMBRO</b>	28.804	11.504	9.672	4.261	54.240

Tabela B9– Média Mensal Energia Natural Afluente para o cenário RCP 8.5 e período 2040-2069.

<b>MÊS</b>	<b>ENA1</b>	<b>ENA2</b>	<b>ENA3</b>	<b>ENA4</b>	<b>BRASIL</b>
<b>JANEIRO</b>	29.764	10.907	10.221	5.257	56.150
<b>FEVEREIRO</b>	28.616	8.176	10.924	6.360	54.076
<b>MARÇO</b>	26.113	6.858	11.241	6.861	51.074
<b>ABRIL</b>	19.342	6.208	8.917	5.549	40.015
<b>MAIO</b>	15.496	7.271	6.558	3.791	33.117
<b>JUNHO</b>	13.402	7.844	5.613	2.495	29.354
<b>JULHO</b>	13.863	8.765	5.630	1.785	30.043
<b>AGOSTO</b>	14.899	9.669	5.751	1.598	31.917
<b>SETEMBRO</b>	17.556	10.990	6.022	1.664	36.233
<b>OUTUBRO</b>	21.364	14.744	6.416	1.744	44.268
<b>NOVEMBRO</b>	24.802	13.596	7.617	2.257	48.272
<b>DEZEMBRO</b>	28.148	12.458	9.194	3.476	53.277

Tabela B10 – Média Mensal Energia Natural Afluente para o cenário RCP 8.5 e período 2070-2098.

<b>MÊS</b>	<b>ENA1</b>	<b>ENA2</b>	<b>ENA3</b>	<b>ENA4</b>	<b>BRASIL</b>
<b>JANEIRO</b>	25.493	9.246	7.817	4.013	46.569
<b>FEVEREIRO</b>	22.755	6.510	8.043	4.698	42.006
<b>MARÇO</b>	20.433	5.781	8.056	5.056	39.327
<b>ABRIL</b>	15.803	5.668	6.165	3.972	31.607
<b>MAIO</b>	12.753	6.575	4.890	2.781	26.999
<b>JUNHO</b>	12.192	7.672	4.403	1.921	26.188
<b>JULHO</b>	12.649	8.722	4.417	1.463	27.251
<b>AGOSTO</b>	12.921	8.760	4.489	1.378	27.548
<b>SETEMBRO</b>	15.354	10.474	4.699	1.432	31.958
<b>OUTUBRO</b>	19.897	14.172	5.114	1.476	40.659
<b>NOVEMBRO</b>	22.533	13.519	5.902	1.772	43.726
<b>DEZEMBRO</b>	25.228	11.642	7.495	2.827	47.192

Tabela B11– Média a Longo Tempo para a Energia Natural Afluyente horizonte 2014.

<b>MÊS</b>	<b>ENA1</b>	<b>ENA2</b>	<b>ENA3</b>	<b>ENA4</b>	<b>BRASIL</b>
<b>JANEIRO</b>	56.312	7.277	14.157	9.787	87.533
<b>FEVEREIRO</b>	58.952	8.358	14.894	13.060	95.264
<b>MARÇO</b>	55.040	7.007	14.827	15.108	91.982
<b>ABRIL</b>	41.729	6.590	12.071	14.877	75.267
<b>MAIO</b>	30.125	8.566	7.310	9.672	55.673
<b>JUNHO</b>	25.735	9.941	4.820	4.731	45.227
<b>JULHO</b>	21.343	10.919	3.969	2.803	39.034
<b>AGOSTO</b>	17.824	10.332	3.454	1.982	33.592
<b>SETEMBRO</b>	17.679	12.009	3.091	1.590	34.369
<b>OUTUBRO</b>	21.279	13.266	3.392	1.804	39.741
<b>NOVEMBRO</b>	27.172	9.366	5.553	2.971	45.062
<b>DEZEMBRO</b>	41.166	7.388	10.210	5.732	64.496

Tabela B12 – Energia Natural Afluente modelo BESM.

Variável	Sistema	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<b>Máximo Futuro</b>	ENA1	86.249	74.930	67.401	58.188	43.053	27.855	35.334	43.083	45.779	59.111	77.189	66.428
	ENA2	20.378	13.207	9.982	10.589	12.499	16.613	22.972	20.991	26.514	32.807	33.499	27.182
	ENA3	51.328	53.142	63.400	51.793	37.647	25.692	28.871	29.834	34.018	32.627	39.862	45.102
	ENA4	25.961	36.310	33.503	23.502	14.878	10.102	9.381	9.278	8.678	8.616	8.900	15.430
	BRASIL	183.916	177.589	174.286	144.072	108.077	80.262	96.558	103.186	114.989	133.161	159.450	154.142
<b>Mínimo Futuro</b>	ENA1	13.370	12.652	11.636	9.612	7.633	8.164	8.707	8.430	9.190	9.266	14.824	12.504
	ENA2	4.961	3.384	2.246	1.450	1.216	1.279	2.274	2.989	4.068	5.441	6.860	5.858
	ENA3	1.766	1.801	2.432	2.746	1.561	1.481	1.731	1.966	2.031	1.862	1.930	1.911
	ENA4	2.738	3.247	4.051	3.066	1.855	1.542	1.230	1.012	902	828	1.412	1.662
	BRASIL	22.835	21.084	20.365	16.874	12.265	12.466	13.942	14.397	16.191	17.397	25.026	21.935
<b>Média RCP 4.5</b>	ENA1	28.577	27.242	24.545	19.491	15.209	12.778	14.022	14.080	15.896	20.981	25.599	28.605
	ENA2	9.454	7.076	5.251	5.232	6.275	8.109	9.172	9.782	11.145	14.551	14.958	12.152
	ENA3	12.618	13.622	15.022	11.635	8.382	6.714	6.631	6.567	6.547	7.276	9.172	11.598
	ENA4	7.152	9.269	10.230	8.270	5.908	3.759	2.591	2.065	1.976	2.119	2.759	4.577
	BRASIL	57.802	57.209	55.048	44.628	35.773	31.360	32.415	32.494	35.564	44.927	52.487	56.932
<b>Média RCP 8.5</b>	ENA1	29.237	26.618	24.174	18.694	14.258	12.010	13.370	13.711	14.761	20.926	26.286	29.807
	ENA2	8.301	5.929	4.898	4.391	4.797	6.548	8.569	8.682	9.457	13.292	14.436	12.045
	ENA3	13.590	14.167	14.935	11.696	8.499	6.998	7.000	6.934	6.771	7.822	9.960	13.020
	ENA4	7.188	8.447	9.153	7.129	4.814	3.059	2.202	1.826	1.767	2.045	2.863	5.076
	BRASIL	58.316	55.161	53.161	41.909	32.368	28.615	31.141	31.153	32.756	44.085	53.545	59.949
<b>Mínimo ALT</b>	BRASIL	65.352	64.465	63.772	51.246	38.528	33.043	34.506	34.988	36.825	49.680	58.066	64.053
<b>Máximo ALT</b>	BRASIL	49.906	43.283	40.761	31.276	25.016	24.152	27.966	26.879	28.870	39.320	49.311	55.467



Tabela B13 – Energia Natural Afluente modelo CanESM2.

Variável	Sistema	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<b>Máximo Futuro</b>	ENA1	99.325	111.222	87.935	57.409	50.018	47.371	40.701	39.201	49.035	67.356	66.179	99.471
	ENA2	36.655	27.646	21.377	25.821	30.293	31.075	35.476	30.002	36.723	69.542	34.282	45.106
	ENA3	38.582	50.086	52.368	39.344	27.488	21.475	19.410	19.625	18.893	24.208	25.793	41.746
	ENA4	17.924	21.581	22.085	18.858	11.373	9.643	9.511	8.750	8.507	8.215	8.053	9.871
	BRASIL	192.486	210.535	183.765	141.432	119.172	109.564	105.098	97.578	113.158	169.321	134.307	196.194
<b>Mínimo Futuro</b>	ENA1	9.475	8.994	9.069	8.002	6.836	7.099	6.439	6.553	6.049	9.246	10.274	10.779
	ENA2	5.742	3.065	2.413	2.663	1.326	1.870	2.225	2.848	1.886	7.243	5.732	10.003
	ENA3	1.279	1.188	1.177	1.059	1.266	1.480	1.730	1.966	2.031	1.862	1.611	1.400
	ENA4	1.870	1.818	1.729	1.672	1.129	1.047	925	862	803	777	868	1.074
	BRASIL	18.366	15.065	14.388	13.396	10.557	11.496	11.319	12.229	10.769	19.128	18.485	23.256
<b>Média RCP 4.5</b>	ENA1	35.893	35.834	33.134	25.095	19.988	17.085	15.829	15.096	16.516	19.240	23.235	29.655
	ENA2	16.066	12.192	10.214	10.400	12.702	11.472	11.571	11.757	14.813	17.762	18.427	18.505
	ENA3	9.437	10.338	11.283	8.340	5.997	5.111	5.003	4.989	5.019	4.987	5.489	7.259
	ENA4	4.870	6.055	6.790	5.369	3.733	2.536	1.801	1.623	1.658	1.624	1.766	2.759
	BRASIL	66.266	64.419	61.421	49.204	42.421	36.204	34.204	33.465	38.006	43.613	48.916	58.178
<b>Média RCP 8.5</b>	ENA1	29.153	28.428	27.417	20.728	16.970	14.770	13.241	13.414	14.531	17.034	20.298	26.964
	ENA2	14.636	10.420	9.086	9.436	12.147	10.787	9.734	10.371	11.684	16.998	16.448	16.248
	ENA3	6.776	7.661	8.650	6.452	4.658	4.136	4.073	4.122	4.195	4.205	4.556	6.197
	ENA4	3.822	4.698	5.178	4.217	2.948	2.042	1.566	1.498	1.565	1.532	1.686	2.561
	BRASIL	54.386	51.207	50.330	40.834	36.724	31.735	28.614	29.404	31.975	39.770	42.988	51.971
<b>Mínimo ALT</b>	BRASIL	68.445	67.076	64.854	52.640	44.635	37.448	36.422	36.398	40.072	47.384	50.609	62.264
<b>Máximo ALT</b>	BRASIL	37.908	32.633	31.475	28.538	27.053	25.113	21.469	21.552	22.694	28.524	31.454	37.997

Tabela B14 – Energia Natural Afluente modelo HadGEM2-ES.

Variável	Sistema	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<b>Máximo Futuro</b>	ENA1	75.579	75.057	68.745	44.906	31.388	35.346	38.056	37.603	60.380	67.850	81.518	64.891
	ENA2	19.746	13.985	12.145	19.924	16.915	30.122	28.567	33.339	32.271	45.407	34.260	23.657
	ENA3	27.357	40.959	29.231	26.035	13.985	13.346	14.850	16.795	15.023	23.231	25.316	23.937
	ENA4	13.329	22.652	16.670	15.696	10.616	10.249	8.834	9.164	8.845	8.294	8.002	9.044
	BRASIL	136.011	152.653	126.791	106.561	72.904	89.063	90.307	96.901	116.519	144.782	149.096	121.529
<b>Mínimo Futuro</b>	ENA1	8.364	9.900	9.318	6.962	7.224	6.657	6.815	6.612	6.285	7.430	8.054	7.190
	ENA2	2.202	2.078	1.813	1.145	1.846	990	1.805	1.843	3.075	4.267	3.402	1.813
	ENA3	1.227	1.164	1.522	1.250	1.267	1.480	1.730	1.966	2.031	1.862	1.611	1.400
	ENA4	1.525	1.959	2.566	1.807	1.481	1.098	1.037	946	874	757	770	995
	BRASIL	13.318	15.101	15.219	11.164	11.818	10.225	11.387	11.367	12.265	14.316	13.837	11.398
<b>Média RCP 4.5</b>	ENA1	19.671	21.008	19.643	15.498	12.543	11.907	12.763	13.445	14.832	16.813	17.304	18.675
	ENA2	7.614	6.090	5.278	5.203	6.911	8.615	10.070	11.134	12.750	15.376	12.020	8.866
	ENA3	5.814	6.751	7.410	5.710	4.277	3.890	4.067	4.186	4.233	4.290	4.593	5.367
	ENA4	4.142	5.227	5.729	4.787	3.407	2.375	1.827	1.724	1.777	1.808	2.117	2.966
	BRASIL	37.241	39.075	38.061	31.198	27.138	26.786	28.727	30.489	33.593	38.287	36.033	35.874
<b>Média RCP 8.5</b>	ENA1	18.809	19.429	17.753	14.436	11.654	11.535	13.570	13.647	15.315	16.524	15.285	16.471
	ENA2	7.718	6.179	4.896	4.825	5.957	8.276	10.408	11.438	13.765	15.475	12.176	8.877
	ENA3	4.586	5.139	5.614	4.774	3.699	3.419	3.700	3.763	3.875	3.727	3.592	3.969
	ENA4	3.332	4.175	4.499	4.136	3.203	2.331	1.918	1.795	1.831	1.761	1.802	2.287
	BRASIL	34.445	34.922	32.762	28.171	24.512	25.561	29.596	30.644	34.785	37.486	32.855	31.604
<b>Mínimo ALT</b>	BRASIL	40.015	41.812	40.299	32.991	28.027	28.905	30.828	31.801	36.020	40.271	38.977	38.111
<b>Máximo ALT</b>	BRASIL	32.558	31.103	30.059	24.972	22.087	24.209	26.341	28.550	31.023	34.622	30.968	30.505

Tabela B15 – Energia Natural Afluente modelo Miroc5.

Variável	Sistema	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<b>Máximo Futuro</b>	ENA1	110.547	81.682	72.510	61.835	41.276	42.947	39.674	51.214	75.959	94.358	88.887	93.809
	ENA2	32.693	20.776	18.510	14.620	17.138	22.621	18.131	22.457	24.251	50.737	27.628	32.249
	ENA3	53.831	54.970	54.219	39.479	25.615	25.436	22.471	24.011	31.281	36.673	35.943	45.374
	ENA4	22.712	22.323	21.354	20.497	11.987	9.799	9.061	8.909	9.587	9.656	9.960	18.364
	BRASIL	219.783	179.751	166.593	136.431	96.016	100.803	89.337	106.591	141.078	191.424	162.418	189.796
<b>Mínimo Futuro</b>	ENA1	17.686	17.498	15.209	11.977	9.092	8.301	9.728	11.429	12.396	17.213	18.571	21.141
	ENA2	3.391	3.108	2.352	1.462	1.395	1.876	1.822	2.144	3.544	3.391	2.705	3.779
	ENA3	2.002	2.330	2.751	2.162	1.584	1.480	1.730	1.966	2.031	2.206	2.404	2.682
	ENA4	1.751	3.149	3.758	2.854	1.759	1.328	1.162	1.065	1.003	978	1.344	1.142
	BRASIL	24.830	26.085	24.070	18.455	13.830	12.985	14.442	16.604	18.974	23.788	25.024	28.744
<b>Média RCP 4.5</b>	ENA1	36.994	33.684	29.397	22.227	17.517	15.878	15.934	17.887	22.764	30.421	34.626	36.799
	ENA2	9.388	7.481	6.498	4.930	5.236	5.605	6.017	6.698	8.125	9.383	8.817	9.146
	ENA3	14.119	13.760	13.553	10.763	8.178	7.154	6.998	7.434	8.287	9.940	11.782	12.952
	ENA4	6.575	7.565	8.378	6.843	4.544	2.996	2.121	1.970	2.170	2.544	3.463	4.641
	BRASIL	67.076	62.490	57.827	44.762	35.474	31.633	31.069	33.989	41.345	52.288	58.688	63.539
<b>Média RCP 8.5</b>	ENA1	36.628	32.431	28.565	21.503	16.862	15.013	14.881	16.314	22.150	29.734	34.136	36.332
	ENA2	9.160	7.892	6.630	5.213	5.153	5.337	6.192	6.850	8.562	10.955	9.997	10.301
	ENA3	13.122	12.983	12.820	9.742	7.474	6.557	6.404	6.752	7.761	8.840	10.746	11.962
	ENA4	6.007	6.953	7.792	6.268	4.103	2.725	1.934	1.824	2.063	2.206	2.985	4.161
	BRASIL	64.917	60.258	55.806	42.726	33.593	29.632	29.411	31.740	40.536	51.735	57.864	62.755
<b>Mínimo ALT</b>	BRASIL	87.533	95.264	91.982	75.267	55.673	45.227	39.034	33.592	34.369	39.741	45.062	64.496
<b>Máximo ALT</b>	BRASIL	67.652	65.926	59.989	45.638	36.215	32.573	32.389	34.893	42.244	55.386	62.260	66.470