

UFPA

PPGEC

Universidade Federal do Pará



Carlos Eduardo Aguiar de Souza Costa

ESTIMATIVAS DE CURVAS IDF E CURVAS DE PERMANÊNCIA NA AMAZÔNIA SOB A INFLUÊNCIA DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

TESE DE DOUTORADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.

Belém – Pará – Brasil

2021

Carlos Eduardo Aguiar de Souza Costa

**ESTIMATIVAS DE CURVAS IDF E CURVAS DE PERMANÊNCIA NA AMAZÔNIA
SOB A INFLUÊNCIA DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil.
Área de Concentração: Engenharia Hídrica

Orientador: Prof. Claudio José Cavalcante Blanco,
Ph.D.

Belém
2021

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

C837e Costa, Carlos Eduardo Aguiar de Souza.
Estimativas de curvas IDF e curvas de permanência
na Amazônia sob a influência de mudanças climáticas/
Carlos Eduardo Aguiar de Souza Costa. - 2021.

Orientador: Cláudio José Cavalcante Blanco

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Belém, 2021.

1.Mudanças climáticas. 2. Gestão de riscos. 3.
Modelos climáticos. 4. Variáveis de engenharia
hidráulica. 5. Cenários climáticos futuros I.Título.

CDD 333.91



ESTIMATIVAS DE CURVAS IDF E CURVAS DE PERMANÊNCIA NA AMAZÔNIA SOB A INFLUÊNCIA DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

AUTOR:

CARLOS EDUARDO AGUIAR DE SOUZA COSTA

TESE SUBMETIDA À BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA

APROVADO EM: 05 / 02 / 2021.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.
Orientador (UFPA)

Prof. Dr. José Francisco de Oliveira Júnior
Membro Externo (UFAL)

Prof. Dr. Francisco Carlos Lira Pessoa
Membro Interno (UFPA)

Prof. Dr. Nélio Moura de Figueiredo
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

Dedico esse trabalho a minha mãe Olivia, minha tia Olindina e a minha avó Celina (in memoriam), com todo meu amor e gratidão, por tudo que fizeram por mim ao longo de minha vida. Espero ser merecedor de todo o esforço e dedicação de vocês por mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me guiar e permitir que eu pudesse chegar à conclusão desta etapa em minha vida.

A toda minha família, em especial à minha mãe Olívia Aguiar, minha avó Celina Aguiar (in memoriam) e minha madrinha Olindina Aguiar, que sempre confiaram em mim e me deram todo apoio, estrutura e amor. Amo vocês!

À minha namorada Maria Luiza Rodrigues, por toda paciência, compreensão, carinho e amor. Obrigado por estar comigo durante toda essa jornada, compartilhando alegrias, tristezas, planos e sonhos. Te amo!

Ao meu orientador, professor Claudio Blanco, pela oportunidade que me deu de evoluir como pessoa e profissional, acreditando em minha capacidade. Agradeço por todo auxílio, orientação e amizade. O senhor tem a minha admiração!

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado.

Aos pesquisadores Luiz Filipe de Assis (UFRJ), Marcos Abílio Sabóia (UFC), Andre Schardong (University of Western Ontario), Manolis Grillakis (Technical University of Crete), pela ajuda, dicas e esclarecimentos, que foram fundamentais para que eu conseguisse desenvolver o trabalho.

A todos meus amigos de infância e graduação, que sempre torceram por mim, e estiveram presentes sempre que precisei ao longo de minha vida. Com vocês compartilhei meus melhores (e piores) momentos e experiências.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa em Água, Energia e Sustentabilidade da Amazônia (GAES) da Universidade Federal do Pará (UFPA) pelo apoio durante a elaboração da tese e pelos momentos de descontração, essenciais para criar laços de amizade que irei levar para vida toda.

À querida amiga Sanny Assis, por todo suporte que me deu durante essa jornada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

À Kely Lobo, por todo carinho, colaboração e, principalmente, pela torcida desde a época da graduação.

A todos que não foram citados, mas que também contribuíram direta e indiretamente para que eu concluísse o doutorado, o meu mais sincero agradecimento. Muito obrigado!

“Não há emoção, há paz.
Não há ignorância, há conhecimento.
Não há paixão, há serenidade.
Não há caos, há harmonia.
Não há morte, há a Força.”
- O código Jedi (Star Wars)

RESUMO

Os impactos nos recursos hídricos globais podem ser mais intensos devido às mudanças climáticas, dificultando o acesso à água e, conseqüentemente, a manutenção da vida. Na Amazônia, o efeito pode ser ainda pior, por se tratar de uma das regiões mais vulneráveis a essas mudanças. Os cenários *Representative Concentration Pathways* (RCPs) são ferramentas essenciais para os *General Circulation Models* (GCMs) e *Global Hydrological Models* (GHMs) simularem mudanças climáticas futuras. Já curvas de Intensidade, Duração e Frequência (IDF) e curvas de permanência de vazão são fundamentais para elaboração de projetos hidráulicos e gerenciamento de riscos. Assim, os objetivos principais deste estudo foram: 1- elaborar projeções de curvas IDF para a bacia hidrográfica do Tapajós nos RCP 4.5 e 8.5, utilizando dados dos GCMs HadGEM2-ES, CanESM2 e MIROC5; e 2- analisar variações nas curvas de permanência e volumes disponíveis do Rio Amazonas utilizando dados do GHM WaterGAP2 forçado pelo MIROC5 e HadGEM2-ES (nos RCPs 6.0 e 8.5). As curvas IDF projetadas foram comparadas com a IDF existente, elaborada a partir de um método estacionário. As curvas de permanência base foram criadas a partir dos últimos 20 anos de vazões observadas e comparadas com as curvas dos cenários futuros (a partir de 2020). Calcularam-se dos volumes decadais. As maiores diferenças para as curvas IDF projetadas foram no MIROC5 (143,15% no RCP 8.5) e as menores diferenças foram no HadGEM2-ES (4% no RCP 4.5) ambas para o período de retorno de 100 anos. As resoluções espaciais de cada GCM influenciaram as curvas IDF, já que o CanESM2 não apresentou resultados satisfatórios e o MIROC5 foi o que melhor representou as possíveis diferenças futuras. A maioria das vazões extremas foram para 2080 a 2099. Para WaterGAP2 (MIROC5), a maioria dos volumes ficaram abaixo da média decadal do século, aumentando a partir de 2060. Para projeções de WaterGAP2 (HadGEM2-ES) os volumes costumam estar próximos ou abaixo da média decadal, com queda a partir de 2060. Diante dos resultados apresentados, o MIROC5 é o modelo mais indicado para estudos de projeções climáticas na Amazônia.

Palavras-Chave: Mudanças Climáticas, Gestão de Risco; Global Hydrological Models; General Circulation Models; RCPs

ABSTRACT

The impacts on global water resources may be more intense due to climate change, making access to water more difficult and, consequently, maintaining life. In the Amazon, the effect may be even worse, as it is one of the regions most vulnerable to these changes. Representative Concentration Pathways (RCPs) scenarios are essential tools for General Circulation Models (GCMs) and Global Hydrological Models (GHMs) to simulate future climate change. Intensity, Duration and Frequency (IDF) curves and flow duration curves are fundamental for the elaboration of hydraulic projects and risk management. Thus, the objective of this study was to elaborate projections of IDF curves for the Tapajós watershed in RCP 4.5 and 8.5, using data from GCMs HadGEM2-ES, CanESM2 and MIROC5. Another objective was to analyze variations in the permanence curves and available volumes of the Amazon River using data from the GHM WaterGAP2 forced by MIROC5 and HadGEM2-ES (in RCPs 6.0 and 8.5). The projected IDF curves were compared with the existing IDF, elaborated using a stationary method. The base permanence curves were created from the last 20 years of observed flows and compared with the curves of future scenarios (from 2020). They were calculated from decadal volumes. The biggest differences for the projected IDF curves were in MIROC5 (143.15% in RCP 8.5) and the smallest differences were in HadGEM2-ES (4% in RCP 4.5) both for the 100-year return period. The spatial resolutions of each GCM influenced their IDF curves, since CanESM2 did not present satisfactory results and MIROC5 was the one that best represented the possible future differences. WaterGAP2 presented the classification "Very Good" for most stations according to statistical validation indicators. Most of the extreme flows were for 2080 to 2099. For WaterGAP2 (MIROC5), most volumes were below the century's decadal average, increasing from 2060. For WaterGAP2 (HadGEM2-ES) projections the volumes are usually close or below the decadal average, falling from 2060 onwards. MIROC5 is the most suitable for studies of climate projections in the Amazon.

Keywords: Climate Change, Risk Management; Global Hydrological Models; General Circulation Models; RCPs

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1 - EFEITO ESTUFA (<i>GREENHOUSE EFFECT</i>) | 22 |
| FIGURA 2 - HISTÓRICO DE VARIAÇÕES DA TEMPERATURA GLOBAL NOS ÚLTIMOS 420.000 ANOS | 23 |
| FIGURA 3 - CENÁRIOS REPRESENTATIVE CONCENTRATION PATHWAYS (RCPs) | 27 |
| FIGURA 4 - INDICAÇÕES DAS MUDANÇAS PROJETADAS POR REGIÃO E NÍVEIS DE CONFIANÇA | 29 |
| FIGURA 5 - GENERAL CIRCULATION MODEL | 33 |
| FIGURA 6 - ESTRUTURA GERAL DOS ELEMENTOS-CHAVE DO PROCESSO E MISSÃO ISIMIP.. | 38 |
| FIGURA 7 - INTERFACE ONLINE DO <i>IDF_CC TOOL</i> | 42 |
| FIGURA 8 - ESTRUTURA DE UMA CURVA DE PERMANÊNCIA | 43 |
| FIGURA 9 - ESQUEMA METODOLÓGICO DO TRABALHO | 46 |
| FIGURA 10 - REGIÃO DE ESTUDO DELIMITADA PELA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TAPAJÓS | 47 |
| FIGURA 11 - MANUSEIO DO SOFTWARE FERRET PARA A LEITURA DE DADOS | 50 |
| FIGURA 12 - ESQUEMATIZAÇÃO DO ALGORITMO DE GERAÇÃO DE CURVAS IDF FUTURAS..... | 51 |
| FIGURA 13 - ÁREA DE ESTUDO E LOCALIZAÇÃO DE ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS | 57 |
| FIGURA 14 - VARIAÇÃO NA MÉDIA DAS INTENSIDADES MÁXIMAS DIÁRIAS DE 2076 A 2100 COM BASE NO HISTÓRICO GCM (1976-2000) | 61 |
| FIGURA 15 - VARIAÇÃO NA MÉDIA DOS TOTAIS ANUAIS DE CHUVA DE 2076 A 2100 COM BASE NO HISTÓRICO GCM (1976-2000) | 62 |
| FIGURA 16 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS IDF PROJETADAS PARA OS RCP 4.5 E RCP 8.5 DO MODELO CANESM2 E A DE SOUZA ET AL. (2012), PARA O <i>Tr</i> DE 25 ANOS..... | 65 |
| FIGURA 17 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS IDF PROJETADAS PARA OS RCP 4.5 E RCP 8.5 DO MODELO CANESM2 E A DE SOUZA ET AL. (2012), PARA O <i>Tr</i> DE 100 ANOS.... | 66 |
| FIGURA 18 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS IDF PROJETADAS PARA OS RCP 4.5 E RCP 8.5 DO MODELO HADGEM2-ES E A DE SOUZA ET AL. (2012), PARA O <i>Tr</i> DE 25 ANOS | 68 |
| FIGURA 19 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS IDF PROJETADAS PARA OS RCP 4.5 E RCP 8.5 DO MODELO HADGEM2-ES E A DE SOUZA ET AL. (2012), PARA O <i>Tr</i> DE 100 ANOS | 68 |
| FIGURA 20 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS IDF PROJETADAS PARA OS RCP 4.5 E RCP 8.5 DO MODELO MIROC5 E A DE SOUZA ET AL. (2012), PARA O <i>Tr</i> DE 25 ANOS | 70 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 21 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS IDF PROJETADAS PARA OS RCP 4.5 E RCP 8.5 DO MODELO MIROC5 E A DE SOUZA ET AL. (2012), PARA O T_r DE 100 ANOS | 70 |
| FIGURA 22 - PROJEÇÕES WATERGAP2 (MIROC5) DE CURVAS DE PERMANÊNCIA ($M^3.S^{-1}$) E VOLUME (KM^3) PARA A ESTAÇÃO E1 | 74 |
| FIGURA 23 - PROJEÇÕES WATERGAP2 (HADGEM2-ES) DE CURVAS DE PERMANÊNCIA ($M^3.S^{-1}$) E VOLUME (KM^3) PARA A ESTAÇÃO E1 | 74 |
| FIGURA 24 - PROJEÇÕES WATERGAP2 (MIROC5) DE CURVAS DE PERMANÊNCIA ($M^3.S^{-1}$) E VOLUME (KM^3) PARA A ESTAÇÃO E2 | 76 |
| FIGURA 25 - PROJEÇÕES WATERGAP2 (HADGEM2-ES) DE CURVAS DE PERMANÊNCIA ($M^3.S^{-1}$) E VOLUME (KM^3) PARA A ESTAÇÃO E2 | 77 |
| FIGURA 26 - PROJEÇÕES WATERGAP2 (MIROC5) DE CURVAS DE PERMANÊNCIA ($M^3.S^{-1}$) E VOLUME (KM^3) PARA A ESTAÇÃO E3 | 78 |
| FIGURA 27 - PROJEÇÕES WATERGAP2 (HADGEM2-ES) DE CURVAS DE PERMANÊNCIA ($M^3.S^{-1}$) E VOLUME (KM^3) PARA A ESTAÇÃO E3 | 79 |
| FIGURA 28 - PROJEÇÕES WATERGAP2 (MIROC5) DE CURVAS DE PERMANÊNCIA ($M^3.S^{-1}$) E VOLUME (KM^3) PARA A ESTAÇÃO E4 | 81 |
| FIGURA 29 - PROJEÇÕES WATERGAP2 (HADGEM2-ES) DE CURVAS DE PERMANÊNCIA ($M^3.S^{-1}$) E VOLUME (KM^3) PARA A ESTAÇÃO E4 | 81 |
| FIGURA 30 - PROJEÇÕES WATERGAP2 (MIROC5) DE CURVAS DE PERMANÊNCIA ($M^3.S^{-1}$) E VOLUME (KM^3) PARA A ESTAÇÃO E5 | 83 |
| FIGURA 31 - PROJEÇÕES WATERGAP2 (HADGEM2-ES) DE CURVAS DE PERMANÊNCIA ($M^3.S^{-1}$) E VOLUME (KM^3) PARA A ESTAÇÃO E5 | 84 |
| FIGURA 32 - PROJEÇÕES WATERGAP2 (MIROC5) DE CURVAS DE PERMANÊNCIA ($M^3.S^{-1}$) E VOLUME (KM^3) PARA A ESTAÇÃO E6 | 85 |
| FIGURA 33 - PROJEÇÕES WATERGAP2 (HADGEM2-ES) DE CURVAS DE PERMANÊNCIA ($M^3.S^{-1}$) E VOLUME (KM^3) PARA A ESTAÇÃO E6 | 86 |
| FIGURA 34 - PROJEÇÕES WATERGAP2 (MIROC5) DE CURVAS DE PERMANÊNCIA ($M^3.S^{-1}$) E VOLUME (KM^3) PARA A ESTAÇÃO E7 | 87 |
| FIGURA 35 - PROJEÇÕES WATERGAP2 (HADGEM2-ES) DE CURVAS DE PERMANÊNCIA ($M^3.S^{-1}$) E VOLUME (KM^3) PARA A ESTAÇÃO E7 | 88 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| TABELA 1 - DADOS DE PRECIPITAÇÃO MÁXIMA, MÉDIA E DESVIO PADRÃO DOS DADOS GERAIS | 47 |
| TABELA 2 - DETALHES SOBRE GCMs UTILIZADOS NO ESTUDO | 49 |
| TABELA 3 - ESTAÇÕES DE MEDIÇÃO DE VAZÃO USADAS COMO PONTOS DE ESTUDO | 57 |
| TABELA 4 - CLASSIFICAÇÕES DE DESEMPENHO GERAL PARA ESTATÍSTICAS RECOMENDADAS | 59 |
| TABELA 5 - VALORES DO TESTE DE KOLMOGOROV-SMIRNOV | 63 |
| TABELA 6 - EQUAÇÕES PARA NOVOS CENÁRIOS E O COEFICIENTE R^2 PARA OS AJUSTES | 64 |
| TABELA 7 - RESULTADOS DO MODELO CANESM2 PARA O PERÍODO DE RETORNO DE 25 ANOS | 64 |
| TABELA 8 - RESULTADOS DO MODELO CANESM2 PARA O PERÍODO DE RETORNO DE 100 ANOS | 65 |
| TABELA 9 - RESULTADOS DO MODELO HADGEM2-ES PARA O PERÍODO DE RETORNO DE 25 ANOS | 67 |
| TABELA 10 - RESULTADOS DO MODELO HADGEM2-ES PARA O PERÍODO DE RETORNO DE 100 ANOS | 67 |
| TABELA 11 - RESULTADOS DO MODELO MIROC5 PARA O PERÍODO DE RETORNO DE 25 ANOS | 69 |
| TABELA 12 - RESULTADOS DO MODELO MIROC5 PARA O PERÍODO DE RETORNO DE 100 ANOS | 69 |
| TABELA 13 - RESULTADOS DE DESEMPENHO WATERGAP2 (MIROC5) | 72 |
| TABELA 14 - RESULTADOS DE DESEMPENHO WATERGAP2 (HADGEM2-ES)..... | 72 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|-------------|--|
| ANA | Agência Nacional de Águas |
| AR5 | 5° Relatório do IPCC |
| AR6 | 6° Relatório do IPCC |
| BESM | Brazilian Earth System Model |
| CanESM2 | Canadian Earth System Model Version 2 |
| CCSM4 | Community Climate System Model – Version 4.0 |
| CDF | Função Cumulativa de Distribuição de Probabilidade |
| CEPED | Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres |
| CMIP3 | Coupled Model Intercomparison Project Phase 3 |
| CMIP5 | Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 |
| CPTEC | Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos |
| DISME-INMET | Distrito Meteorológico do Instituto de Meteorologia Brasileiro |
| ECCC | Environment and Climate Change Canada |
| ENIAC | Electronic Numerical Integrator and Computer |
| ENOS | El Niño-Oscilação Sul |
| ESGF | Earth System Grid Federation |
| ES | Earth System |
| E1 | Estação 1 - Óbidos |
| E2 | Estação 2 - Jatuarana |
| E3 | Estação 3 - Manacapuru |
| E4 | Estação 4 - Itapéua |
| E5 | Estação 5 – Santo Antônio do Içá |
| E6 | Estação 6 – São Paulo de Olivença |
| E7 | Estação 7 - Tabatinga |

| | |
|---------|---|
| FDC | Flow Duration Curve |
| GCMs | General Circulation Models |
| GEE | Gases do Efeito Estufa |
| GHMs | Global Hydrological Models |
| HadGEM2 | Hadley Centre Global Environmental Model Version 2 |
| IDF | Intensidade, Duração e Frequência |
| INPE | Instituto nacional de Pesquisas Espaciais |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| ISIMIP1 | Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project |
| KS | Kolmogorov-Smirnov |
| MIROC5 | Model for Interdisciplinary Research on Climate Version 5 |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| NCAR | National Center for Atmospheric Research |
| NEB | Nordeste do Brasil |
| NetCDF | Network Common Data Format |
| NOAA | National Oceanic and Atmospheric Administration |
| NSE | Nash-Sutcliffe |
| NWP | Numerical Weather Prediction |
| OMM | Organização Mundial de Meteorologia |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| PBIAS | Viés Percentual |
| PBMC | Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas |
| PCHs | Pequenas Centrais Elétricas |
| PDF | Função de Distribuição de Probabilidade |
| PDO | Oscilação Decadal do Pacífico |

| | |
|-----------|--|
| PMEL | Pacific Marine Environmental Laboratory |
| PNMC | Plano Nacional sobre Mudança do Clima |
| PNUMA | Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente |
| RCPs | Representative Concentration Pathways |
| RMSE | Raiz quadrada do erro-médio |
| RSR | Razão entre o RMSE e o desvio padrão dos dados medidos |
| SEEG | Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa |
| SRES | Special Report Emission Scenarios |
| TMAP | Thermal Modeling and Analysis Project |
| UNFCCC | United Nations Framework Convention on Climate Change |
| WaterGAP2 | Water – Global Assessment and Prognosis |
| ZCIT | Zona de Convergência Intertropical |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 | HIPÓTESE..... | 20 |
| 1.2 | OBJETIVOS..... | 20 |
| 1.2.1 | Geral | 20 |
| 1.2.2 | Específicos | 20 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 21 |
| 2.1 | MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS | 21 |
| 2.1.1 | Políticas internacionais de mudanças no clima | 24 |
| 2.1.2 | Mudanças climáticas no Brasil | 27 |
| 2.2 | GENERAL CIRCULATION MODELS (GCMS) | 31 |
| 2.3 | GLOBAL HYDROLOGICAL MODELS (GHMS)..... | 35 |
| 2.4 | RECURSOS HÍDRICOS..... | 39 |
| 2.4.1 | Curvas de intensidade-duração-frequência (IDF) | 40 |
| 2.4.2 | Curvas de permanência de vazões (FDC - Flow Duration Curve) | 43 |
| 3 | MATERIAL E MÉTODOS | 46 |
| 3.1 | CURVAS IDF | 46 |
| 3.1.1 | Área de Estudo e Dados pluviométricos | 46 |
| 3.1.2 | Dados dos Modelos de Circulação Global | 48 |
| 3.1.3 | Leitura e Análise dos Dados de Chuva dos GCMs | 49 |
| 3.1.4 | Downscaling e a Projeção Temporal | 50 |
| 3.1.5 | Equações de Chuvas Intensas | 55 |
| 3.2 | CURVAS DE PERMANÊNCIA | 56 |
| 3.2.1 | Área de estudo e dados de vazão | 56 |
| 3.2.2 | Escolha de GHM e suas simulações | 58 |
| 3.2.3 | Validação de dados e critérios de desempenho | 59 |
| 3.2.4 | Elaboração de curvas de permanência e análise de volume | 59 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 61 |
| 4.1 | CURVAS IDF | 61 |
| 4.1.1 | Variabilidade da chuva baseada nos GCMS | 61 |
| 4.1.2 | Aplicação do teste de Kolmogorov-Smirnov..... | 62 |
| 4.1.3 | Equações de chuvas intensas e curvas IDF projetadas..... | 63 |
| | Modelo CanESM2..... | 64 |
| | Modelo HadGEM2-ES | 66 |
| | Modelo MIROC5 | 69 |
| 4.2 | CURVAS DE PERMANÊNCIA | 71 |
| 4.2.1 | Validação de dados do GHM..... | 71 |
| 4.2.2 | Curvas de permanência e variabilidade de volume | 73 |
| | Estação 1 - Óbidos | 73 |
| | Estação 2 - Jatuarana..... | 75 |
| | Estação 3 - Manacapuru..... | 78 |
| | Estação 4 - Itapéua | 80 |
| | Estação 5 - Santo Antônio do Içá..... | 82 |
| | Estação 6 - São Paulo de Olivença | 84 |
| | Estação 7 - Tabatinga..... | 86 |
| 5 | CONCLUSÃO..... | 89 |
| 6 | SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS | 91 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 92 |
| | APÊNDICE A – VALIDAÇÃO DOS DADOS WATERGAP2 (MIROC5)..... | 106 |
| | APÊNDICE B – VALIDAÇÃO DOS DADOS WATERGAP2 (HADGEM2-ES)..... | 108 |
| | APÊNDICE C – PRIMEIRO ARTIGO PRODUZIDO APROVADO NO JOURNAL OF WATER AND CLIMATE CHANGE (ISSN: 2040-2244) | 110 |
| | APÊNDICE D – SEGUNDO ARTIGO SUBMETIDO À REVISTA CLIMATIC CHANGE (ISSN: 1573-1480) | 111 |

1 INTRODUÇÃO

Com o entendimento de que as mudanças no clima são inevitáveis, a política climática mundial mudou seu enfoque na atenuação para a preparação e adaptação aos impactos futuros (PORTER et al., 2015). Frente a essas preocupações, a Organização Mundial de Meteorologia (OMM) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) criaram em 1988 o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Este órgão reúne, periodicamente, diversos centros de pesquisa em clima pelo mundo para atualizar as modelagens climáticas, elaborar relatórios técnicos e outros produtos sobre os possíveis cenários de emissão de gases de efeito estufa (GEE) e os impactos nos diversos âmbitos climáticos (PACHAURI; MEYER, 2014).

O quinto relatório do IPCC (AR5), aprovado em 2014, indica que o aumento da temperatura do ar é atribuído, especialmente, aos níveis de GEE (DROUET et al., 2015). Na maioria das vezes, o efeito estufa está ligado ao desenvolvimento, a partir disso, houve interesse por parte dos governos em cenários que explorem melhor o impacto de diferentes políticas climáticas, analisando o “custo-benefício” dos objetivos climáticos de longo prazo. Assim, o IPCC solicitou às comunidades científicas que desenvolvessem um conjunto de cenários que substituíssem os antigos (chamados de *Special Report Emission Scenarios - SRES*), e facilitassem a avaliação das situações futuras (BURKHART et al., 2018).

Os cenários RCPs (*Representative Concentration Pathways*) foram propostos, e utilizados amplamente para as simulações futuras (2006 a 2100), sendo eles: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 e RCP 8.5. O número associado ao RCP é o valor do fluxo radiativo ao final do século XXI em W/m^2 (ALEMAN et al., 2017). O cenário RCP 2.6 é o menos provável de ocorrer, enquanto o RCP 4.5 e 6.0 são cenários intermediários e desejados, ou seja, aqueles em que os países consigam controlar os níveis de emissões e o nível de CO_2 na atmosfera estabilize-se logo após 2100. Entretanto, o cenário RCP 8.5 é, reconhecidamente, o que possui mais chances de ocorrência (SCHARDONG et al., 2014a).

Os RCPs são peças essenciais para os *General Circulation Models* (GCMs) e os *Global Hydrological Models* (GHMs), pois é a partir deles que esses modelos numéricos representam os futuros processos físicos na atmosfera, rios/oceanos e superfície terrestre. Os modelos globais são as ferramentas mais avançadas,

atualmente disponíveis para simular a resposta do sistema climático ao aumento das concentrações de GEE (STOCKER et al., 2013). As simulações futuras geradas por GCMs de diferentes países foram reunidas no *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5), projeto idealizado durante o AR5. De forma similar, as saídas (*outputs*) dos GHMs também são reunidas em um projeto baseado nas conjunções do IPCC, o *Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project* (ISIMIP).

Silveira et al. (2013) analisaram a eficiência de alguns modelos globais no Brasil e concluíram que a maioria apresentou correlações elevadas em relação à climatologia observada nas regiões Nordeste, Bacia do Prata e Amazônia. Os modelos foram capazes de capturar eficientemente variações sazonais, principalmente a chuva. De acordo com Soito e Freitas (2011), a Amazônia e o Nordeste representam as regiões mais vulneráveis do país às mudanças climáticas. Na região Amazônica, tivemos nas últimas décadas vários eventos hidrológicos extremos, como as enchentes de 2009, 2012 e 2014, e as secas de 2005 e 2010, que alertaram sobre a vulnerabilidade climática da região (MARENGO; ESPINOZA, 2016). Para Marengo et al. (2009), a ocorrência de eventos extremos como estes pode variar no intervalo de dias até séculos.

Assim, é importante analisar a hidrologia no futuro, justamente para avaliar os possíveis impactos das mudanças climáticas diante da vulnerabilidade social na Amazônia. Estas mudanças influenciam diretamente o ciclo da água, afetando diversos setores estratégicos da sociedade, como abastecimento de água, geração de energia, transporte e produção de alimentos, causando diversos impactos socioeconômicos (GRILLAKIS, 2019). Esses fatos deixam claro que um entendimento completo da disponibilidade e sazonalidade da água deve levar ao uso racional dos recursos hídricos, satisfazendo as necessidades humanas e, ao mesmo tempo, subsidiando o planejamento necessário (PUMO et al., 2016).

Observando estes fatos, os modelos globais são importantes ferramentas de planejamento hidrológico, permitindo examinar variáveis e realizar projeções para o futuro. Por exemplo, o conhecimento de variáveis como curvas de intensidade, duração e frequência (IDF) de chuvas e curvas de permanência de vazões (FDC - *flow duration curve*) constituem informações fundamentais para o dimensionamento de obras hidráulicas (ARAGÃO et al., 2013). Reconhecendo essa alternativa, diversas pesquisas com esse objetivo já vêm sendo realizadas pelo mundo desde a

década de 90 (OVERNEY et al., 1997). O Brasil, por sua vez, ainda possui poucos trabalhos com o mesmo intuito, sendo a maioria recente (SILVA et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2017).

Mais escassos ainda são os trabalhos, com este objetivo, realizados na Amazônia, sendo que esta sofre com carência de infraestruturas, planejamentos técnicos e políticas públicas voltadas para remediação de riscos climáticos. Diante disso, o objetivo deste estudo foi analisar a influência das mudanças climáticas sobre variáveis de engenharia de recursos hídricos em áreas da bacia Amazônica para cenários futuros. Este estudo também objetivou contribuir com informações que otimizem projetos e obras, evitando gastos desnecessários e possíveis adversidades, dando suporte aos gestores, já que a região tem grande potencial estratégico para o país, principalmente no que diz respeito a obras hidráulicas (barragens, navegação, pontes, drenagem etc.).

1.1 HIPÓTESE

Como as mudanças climáticas globais podem vir a influenciar futuramente nas curvas IDF e curvas de permanência de vazões na Amazônia?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

Analisar a influência das mudanças climáticas sobre curvas IDF e curvas de permanência de vazões na Amazônia.

1.2.2 Específicos

- Avaliar as chuvas geradas por GCMs, observando seus comportamentos históricos e futuros;
- Elaborar curvas IDF e equações de chuvas intensas para cenários futuros a partir de dados de GCMs;
- Obter curvas de permanência de vazões para cenários futuros a partir dos dados de GHMs.
- Calcular e avaliar os volumes disponíveis a partir dos dados observados e os gerados por GHMs, observando sua variabilidade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS

Para entender os estudos climatológicos primeiramente é importante distinguir alguns conceitos básicos. Por exemplo, a variação do tempo atmosférico e variações climáticas. Como “tempo” entende-se por ser um estado médio da atmosfera de determinado local em um dado período. O “clima” são modificações sobre determinada área com flutuações atmosféricas por um longo período, já que esta significa uma mudança na circulação geral da atmosfera (AYOADE, 2013). Também existem os conceitos de variabilidade e mudança climática, que são constantemente confundidos. De acordo com a OMM, “variabilidade climática” são variações no estado médio e outras estatísticas do clima em todas as escalas temporais e espaciais, além de eventos climáticos individuais. A “mudança climática” se refere a uma variação estatisticamente significativa no estado médio do clima ou em sua variabilidade, persistindo por um período extenso.

Em outros termos, a variabilidade climática analisa as mudanças que ocorrem em intervalos de tempo menores, como um mês, uma estação ou um ano, enquanto a mudança climática considera períodos de tempo mais longos, normalmente durante décadas. Vale ressaltar que uma das principais diferenças entre esses dois conceitos também está na persistência de condições “anômalas”, quando eventos que costumavam ser raros ocorrem com mais frequência (SHARMA, 2020).

As comprovações das mudanças climáticas globais ficam claras ao comparar passado e presente. Antes do homem existir no planeta, diversas variações já ocorriam no oceano, na superfície e na atmosfera terrestre. O ambiente era mais hostil, com evidências de que as temperaturas possuíam valores bem mais elevados do que os da atualidade (ROHLING et al., 2014).

Entender as mudanças climáticas é um dos maiores desafios do século XXI. Nas tendências atuais, até o final deste século, as emissões de GEE afetaram as condições climáticas de maneira intensa. De fato, o clima pode ser tão diferente das condições futuras como quando a Terra emergiu da última era glacial, há cerca de 20.000 anos. Em outras palavras, pouco mais de 200 anos de atividade humana terão provocado mudanças profundas em nosso sistema climático (HOWARD-GRENVILLE et al., 2014).

É importante entender que o efeito estufa é um fenômeno natural, e acontece através da interação dos componentes da troposfera com a energia emitida pela superfície terrestre (radiação onda longa), a partir da relação da superfície com a energia proveniente do Sol (radiação de onda curta). Esse fenômeno é um dos principais responsáveis pelo aquecimento do ar e, conseqüentemente, por manter a temperatura do planeta em níveis adequados à existência da vida (SAMIMI; ZARINABADI, 2012). Os GEE bloqueiam parte da radiação solar, fazendo com que ela permaneça na troposfera, e com isso provoque seu aquecimento. Na Figura 1 pode-se observar o mecanismo do fenômeno.

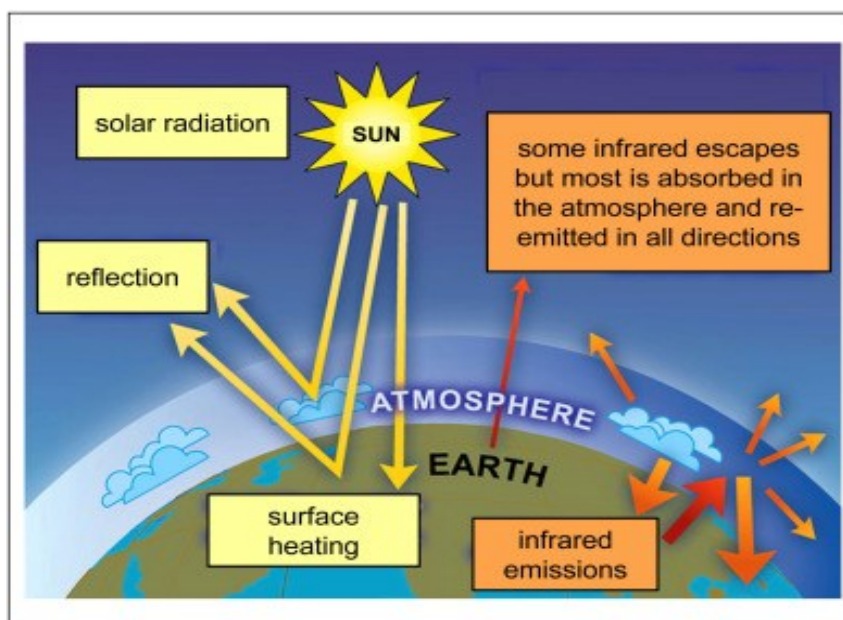


Figura 1 - Efeito Estufa (*Greenhouse Effect*)
Fonte: Anderson et al. (2016)

Mesmo com muitas dúvidas sobre a real causa do aumento das temperaturas no planeta, se natural ou provocada pelo homem, é fato de que elas estão se elevando. Assim, estudos da área de Paleoclimatologia buscam entender os padrões de variabilidade ao longo da história, para a avaliação da possível influência humana sobre o clima. Pesquisando a concentração de gases nocivos na atmosfera, pelo depósito destes em geleiras ao longo dos anos, constatou-se que desde a Revolução Industrial as concentrações cresceram bruscamente, indicando que a ação humana é decisiva nesse circuito climático (KURAHASHI-NAKAMURA et al., 2010; MASSON-DELMOTTE et al., 2013; FOLEY et al., 2013).

Um dos principais trabalhos da área foi realizado por Petit et al. (1999), baseado nos quatro últimos ciclos glaciais/interglaciais do clima terrestre, ou seja, os últimos 420 mil anos do planeta. Segundo os autores, entre um período de máximo glacial (frio extremo) e outro de máximo interglacial (aquecimento máximo), a Terra passou por variações de cerca de 10 °C (Figura 2), sendo que para aquecer 10 graus são necessários por volta de 10 mil anos, enquanto que para resfriar os mesmos 10 graus são necessários de 30 a 50 mil anos.

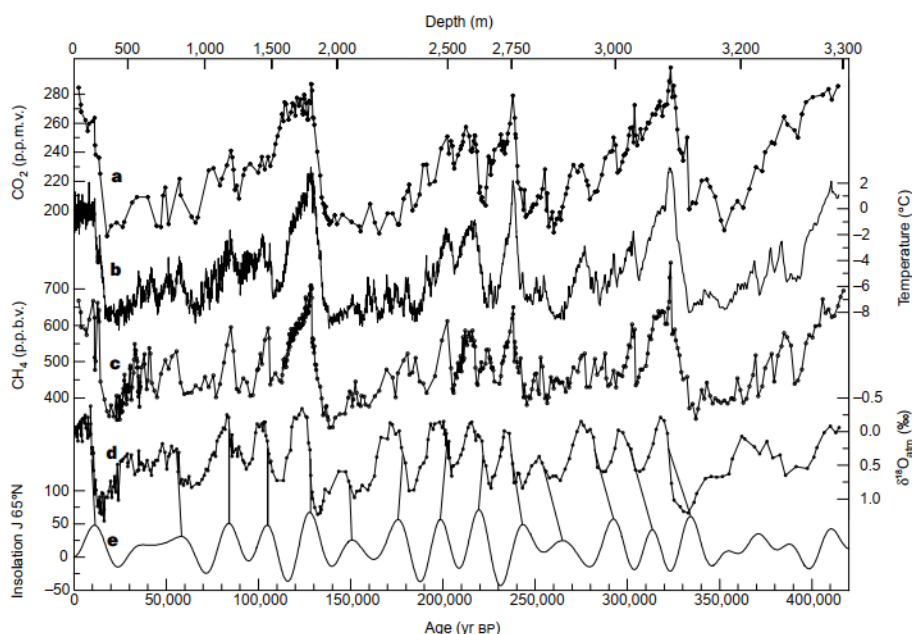


Figura 2 - Histórico de variações da temperatura global nos últimos 420.000 anos
Fonte: Petit et al. (1999)

A diferença de tempo entre os processos de resfriamento e aquecimento ocorre graças aos diversos ciclos de *feedback* entre a superfície e atmosfera, que fazem crescer progressivamente as taxas de aumento de temperatura nos processos de aquecimento global, fenômeno natural conhecido como *snowball effect* (HOFFMAN; SCHRAG, 2002). Tais fatos levam a concluir que mesmo que as mudanças climáticas globais aconteçam de forma cíclica, a humanidade vem interferindo cada vez mais nos processos naturais que regulam o sistema climático do planeta. Isso torna a busca por políticas públicas voltadas para essa área cada vez mais necessárias.

2.1.1 Políticas internacionais de mudanças no clima

A problemática das mudanças climáticas estão cada vez mais em foco atualmente. A certeza é que nenhum governo está protegido de seus impactos, assim como nenhum pode vir a enfrentar de forma isolada os desafios interligados, sendo que estes dependem de decisões políticas muitas vezes complicadas (VICTOR, 2015). A Primeira Conferência Climática Mundial no ano de 1979, em Genebra, acelerou os processos de entendimento, desencadeando uma série de outras conferências científicas e políticas, incluindo as de Villach (1985), Hamburgo (1987) e Toronto (1988). A de 1985 foi particularmente importante, pois nela se firmou a ideia entre os pesquisadores de que o Aquecimento Global era a tendência dominante, e que era causado, ao menos em parte, pelas emissões de GEE, chamando atenção para que os países confrontassem este problema (GUPTA, 2010).

A internacionalização da problemática teve seu auge durante a *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC), em 1992, e posteriormente com o Protocolo de Kyoto, em 1997. Durante este último, os países desenvolvidos que mais emitiam gases que intensificam o efeito estufa (CO₂, CH₄, CFC e N₂O), foram reunidos no chamado “Anexo 1” e se comprometeram a reduzir em 5,2%, até o ano de 2012, os níveis de emissões em relação àqueles observados em 1990. Os Estados Unidos (EUA), por sua vez, argumentaram que não iriam reduzir sua contribuição enquanto países em desenvolvimento, que também produzem uma carga alta de emissões (Brasil, China e Índia), não fossem incluídos no grupo. Para Oliveira (2009), a Alemanha foi um dos governos mais ativos nas discussões climáticas internacionais, diferente do Japão e alguns países da União Europeia, que diziam querer aceitar este acordo, porém atrasaram seu vínculo ao documento para “ganhar mais tempo” em seu desenvolvimento, enquanto criticavam o radicalismo dos Estados Unidos.

Em 2001, foi o limite dado para que todos os países que se comprometeram assinassem o tratado. Os Estados Unidos continuaram se mantendo de fora, dessa vez alegando que as metas causariam problemas econômicos para o país. A perda de apoio foi um problema para a Organização das Nações Unidas (ONU), que temiam que esse ato pudesse neutralizar os esforços de outras nações. Apesar do revés causado pela rejeição do protocolo pelos Estados Unidos, os países realmente comprometidos começaram a trabalhar (JOHNSON, 2017). O Protocolo de Kyoto

iniciou o processo em direção a muitas mudanças que o acordo de Paris ajudaria a fazer.

Em dezembro de 2015, um novo acordo global para combater as mudanças climáticas foi adotado pela UNFCCC, o acordo de Paris. Segundo Rogelj et al. (2016), na preparação deste acordo os países apresentaram planos nacionais que explicitam suas intenções para enfrentar o desafio das mudanças climáticas após 2020. A meta climática global do acordo é manter o aumento da temperatura média global abaixo de 2 °C.

Em termos, o acordo de Paris foi um trunfo para o planeta. Com o apoio de quase todas as nações da UNFCCC, os governos estavam mais esperançosos e as reações iniciais foram semelhantes às do Protocolo de Kyoto. Alguns achavam que o acordo não seria forte o suficiente, enquanto outros sentiam que isso causaria muito dano econômico, porém a maioria concordou que era um grande passo na direção certa. Todos os principais produtores de GEE do mundo assinaram o acordo de Paris, que entrou em vigor em novembro de 2016 (DOVIE; LWASA, 2017). Porém, novamente os EUA causaram tumulto, e em junho de 2017, o país anunciou que deixaria o acordo. Muitos líderes mundiais ficaram decepcionados com isso, mas outros concordaram em continuar mesmo sem os EUA.

Mais de duas décadas, após o Protocolo de Kyoto ter definido as metas climáticas globais, os efeitos da mudança no clima já são mais que perceptíveis, e pouco mudou até os dias de hoje. Pela visão política, muitas promessas foram feitas, porém, o individualismo de alguns países vem atrasando o andamento para uma cooperação internacional. Do ponto de vista científico, o cenário muda de situação. Com base nas preocupações com as mudanças no clima, a OMM e o PNUMA criaram em 1988 um órgão híbrido, conjuntamente científico e político, chamado de IPCC.

O IPCC conta com a contribuição de milhares de cientistas e instituições de diversos países, e tem como objetivo sistematizar, periodicamente, o conhecimento científico produzido sobre o clima e suas mudanças pelo mundo. Foram elaborados relatórios em 1990, 1995, 2001, 2007 e 2014. A reunião para redigir o esboço do Sexto Relatório de Avaliação (AR6) foi realizada na Etiópia em maio de 2017, sendo este aprovado em setembro de 2017. As contribuições para o AR6 serão finalizadas em 2021 e o “Relatório de Síntese” no primeiro semestre de 2022, a tempo para a

primeira avaliação global da UNFCCC sobre o acordo de Paris em 2023 (IPCC, 2018).

Os relatórios resultam do esforço de três grupos de trabalho: Grupo 1 (ciência física); Grupo 2 (impacto, adaptação e vulnerabilidade); Grupo 3 (mitigação da mudança climática). A cada relatório, o IPCC também produz uma síntese das conclusões dos três grupos para os formuladores de políticas, que considera a anuência dos representantes dos governos envolvidos. Assim, os relatórios correspondem à aferição periódica do nível de acordo da comunidade científica envolvida no estudo do clima, e o embate de vontades políticas sobre o que fazer a respeito (LEITE, 2015).

As entidades governamentais necessitam não somente das informações das variabilidades históricas, como também das possíveis mudanças futuras na variabilidade climática, para melhor antecipar os seus impactos (DOW; DOWNING, 2016). Por esta razão, o IPCC define cenários climáticos de projeções futuras desde 1990 (então chamados SA90) para investigar as possíveis consequências das mudanças climáticas em diversas realidades (PETERS et al., 2012).

Em 1992, o IPCC divulgou seis novos cenários de emissões (para os GEE), traçando alternativas que vão desde 1990 até 2100, e esses cenários foram chamados de IS92. Posteriormente, em 2000, foram apresentados outros cenários bem diferentes dos anteriores, os SRES (LEGGETT et al., 1992; NAKICENOVIC et al., 2000). Os SRES procuraram, especificamente, excluir os efeitos das mudanças e políticas climáticas na sociedade e na economia. Eles englobam quatro combinações (A1, A2, B1, B2) de mudanças demográficas, desenvolvimento social e econômico e desenvolvimentos tecnológicos (BIERWAGEN et al., 2010).

Durante o AR5 foram definidos os cenários mais atuais, sendo fortemente utilizados para planejamentos, pesquisas e simulações futuras. Os chamados RCPs descrevem quatro diferentes rotas do século XXI de emissões de GEE, concentrações atmosféricas e emissões de poluente. Um cenário de mitigação rigoroso (RCP 2.6), dois cenários intermediários muito semelhantes (RCP 4.5 e RCP 6) e um cenário com emissões muito altas (RCP 8.5), sendo que o número associado ao RCP é o valor do fluxo radiativo ao final do século em W/m^2 (ALEMAN et al., 2017). Cada um dos RCP abrange o período de 1850 a 2100 e na Figura 3 observa-se o comportamento esperado dos cenários.

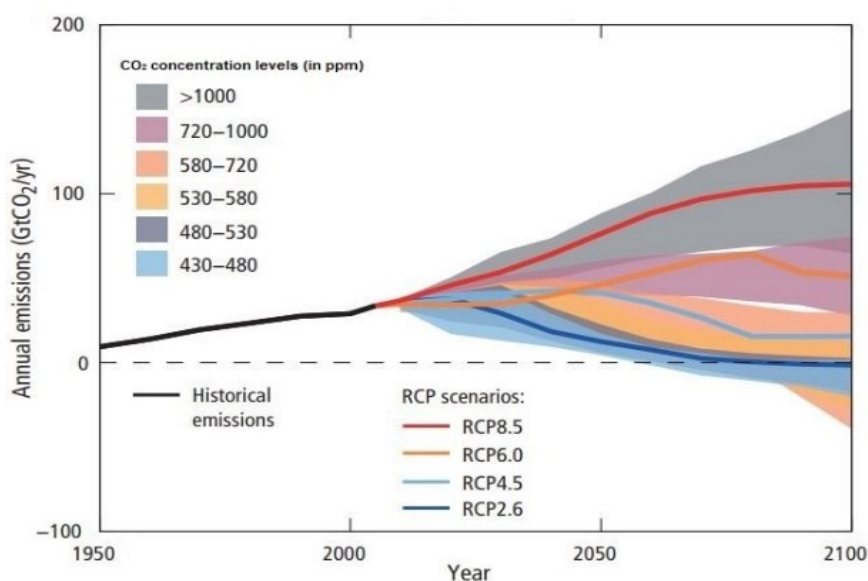


Figura 3 - Cenários Representative Concentration Pathways (RCPs)
Fonte: Adaptado de Pachauri e Meyer (2014)

Van Vuuren et al. (2011) explicam que a palavra "*Representative*" significa que cada um dos RCPs representa um conjunto maior de cenários na literatura, pois como um conjunto eles devem ser compatíveis com todos os cenários disponíveis na literatura científica atual, com e sem política climática. A palavra "*Pathways*" pretende enfatizar que não são cenários finais totalmente integrados, mas sim conjuntos de projeções internamente consistentes, nos quais os componentes do forçamento radiativo são usados nas fases subsequentes. O uso da palavra "*Concentration*" enfatiza que as concentrações são usadas como a principal entrada para os modelos de circulação global.

2.1.2 Mudanças climáticas no Brasil

O Brasil é um dos maiores negociadores do regime climático internacional, talvez por força da quantidade de emissões ou por conta de sua atuação consistente nesse cenário, justamente para defender seu direito ao desenvolvimento (GRANZIERA; REI, 2015). Mesmo estando entre os cinco maiores emissores atuais, o Brasil apresenta um diferencial dos demais, no qual mais de 73% de suas emissões de GEE é por consequência do uso da terra, especialmente do desmatamento da Amazônia e do Cerrado (SEEG, 2018).

Em 2007 foi criado o Comitê Interministerial de Mudança do Clima (CIM), órgão que tinha a atribuição de elaborar, implementar e monitorar o Plano Nacional

sobre Mudança do Clima (PNMC - Lei Nº 12.187), que foi criado posteriormente em 2009. Para Motta (2011), o PNMC é considerado um marco nacional sobre discussões climatológicas, pois oficializa o compromisso do país em elaborar frentes contra as mudanças climáticas, definindo metas e instrumentos próprios. Essa lei determina que o país diminua as emissões para valores entre 36,1% a 38,9% em relação a um cenário global tendencial. Isso significa reduzir o desmatamento da Amazônia em 80%, o do Cerrado em 40% e em restaurar 15 milhões de hectares de pastagens degradadas (AMARAL et al., 2011; RODRIGUES FILHO et al., 2016).

Porém, todo o planejamento definido pode estar ficando cada vez mais distorcido. Azevedo e Angelo (2018) comentam que, em 2016, o Brasil emitiu 2,27 bilhões de toneladas brutas de GEE, representando um crescimento de 9% em relação a 2015 e de 32% em relação a 1990. Do total, 51% provêm do desmatamento, sendo que em 2016 a taxa de desmatamento na Amazônia foi de 7.893 km², mais que o dobro do máximo permitido para o cumprimento da meta de 2020.

Percebe-se que da mesma forma que no cenário internacional, estas metas políticas são dispersas, e necessita de um forte apoio da área científica-tecnológica. Diante de tal fato, em 2009 o Ministério de Ciência e Tecnologia criou o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC), um organismo científico com estrutura baseada no IPCC, cujo objetivo é apontar quais são os impactos das mudanças no clima no Brasil, as principais vulnerabilidades do país e que tipo de ações de adaptação e mitigação podem ser adotadas (FERREIRA; BARBI, 2016). Este órgão fornece dados científicos importantes, que servem como referência para o governo, colaborando na concepção de políticas eficientes de enfrentamento das mudanças no clima.

Cientistas brasileiros iniciaram em 2011 a elaboração do primeiro relatório de avaliação nacional do PBMC, que foi lançado em 2014 em três volumes. Os resultados deste relatório reforçam as projeções de aumento de temperatura e de frequência de eventos extremos apresentados pelo AR5, principalmente em toda a América do Sul, com o maior aquecimento projetado para o sul da Amazônia (PBMC, 2014).

As áreas consideradas mais vulneráveis são notadamente a Amazônia e o nordeste do Brasil (NEB). As incertezas sobre o comportamento futuro do clima são especialmente significativas no que se refere ao que acontecerá com o ciclo

hidrológico. Em relação às chuvas, há incertezas, com estudos mostrando diferentes tendências para algumas regiões, e em outros, há confiabilidade, como para a Região Sul do Brasil e a Bacia do Prata, onde as chuvas vão aumentar, e o leste da Amazônia e o nordeste, onde haverá redução (MARENGO, 2014). Na Figura 4 percebe-se que as projeções de chuvas tendem a diminuir durante o século XXI, sendo as reduções mais intensas no Nordeste (2 a 2,5 mm/dia) e na Amazônia (1 a 1,5 mm/dia).

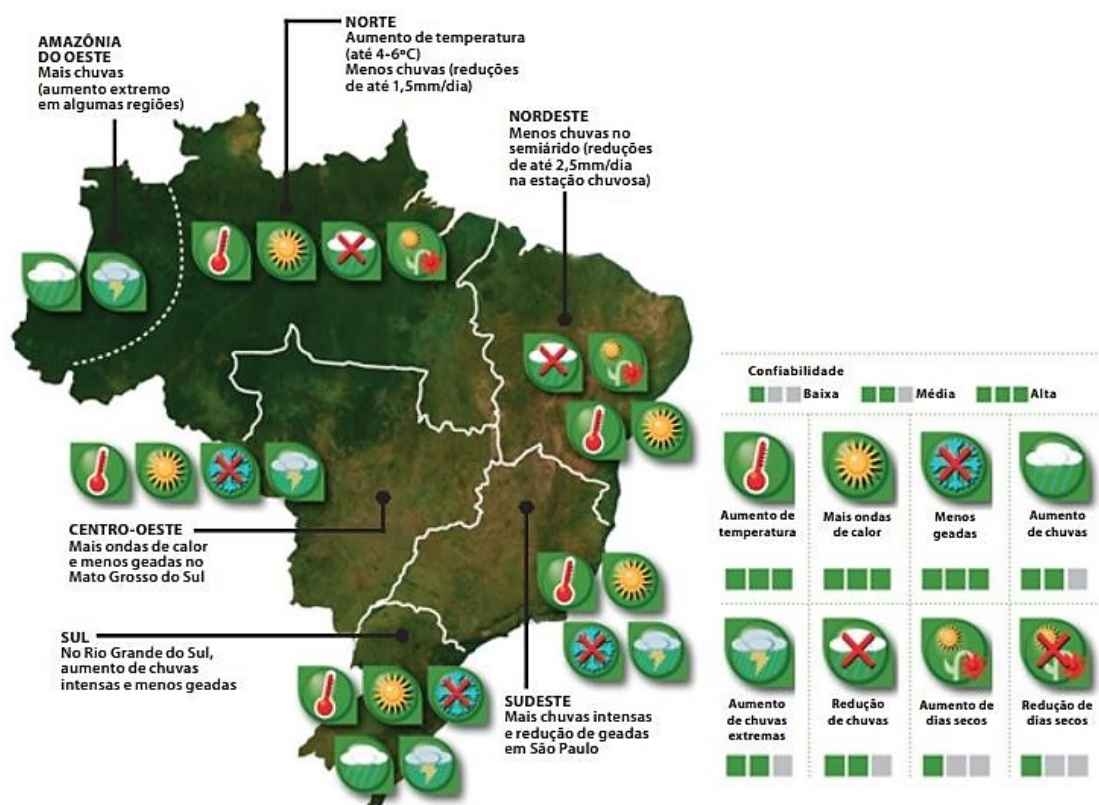


Figura 4 - Indicações das mudanças projetadas por região e níveis de confiança
Fonte: Marengo (2014)

Percebe-se que as mudanças climáticas são uma ameaça para a Floresta Amazônica a longo prazo, devido ao aquecimento e às possíveis reduções da chuva, porém o desmatamento já é uma ameaça imediata. Segundo Marengo et al. (2011), a Amazônia é importante para o mundo inteiro porque captura e armazena o carbono da atmosfera e também exerce um papel fundamental no clima da América do Sul por seu efeito sobre o ciclo hidrológico local. Para os autores, a floresta interage com a atmosfera para regular a umidade dentro da Bacia Amazônica, mas

sua influência estende-se além de suas fronteiras, atingindo outros países, como Peru, Colômbia etc.

É válido afirmar que os próprios ciclos climáticos globais também atuam fortemente na Amazônia, tornando necessárias análises nas escalas intra e interanuais. Um exemplo disso são estudos como de Borma e Nobre (2016), que realizaram verificações decadais e encontraram a permanência de um longo período seco na Amazônia entre 1951 a 2010. Spinoni et al. (2014) afirmam que esse período foi semelhante para diversas partes do planeta, o que reafirma o fator cíclico. Para Watanabe et al. (2014), essa variabilidade decadal ocorre sim de forma natural, independentemente das mudanças causadas pelo homem no clima.

No entanto, existe também uma forte variabilidade interanual na chuva da bacia. Na última década, os anos de 2005 e 2010 foram muito secos e o ano de 2009 foi muito úmido (SATYAMURTY et al., 2013). Nas escalas interanuais, fenômenos climáticos como o *El Niño*-Oscilação Sul (ENOS), influenciado também pelo posicionamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), são reconhecidos como os principais padrões que afetam o clima da Amazônia. A seca de 2010 começou durante um evento do *El Niño* forte daquele ano e depois tornou-se mais intensa (a ZCIT estava mais ao norte, dificultando a formação de chuvas). Esses fenômenos climáticos também foram responsabilizados por vários outros eventos extremos ocorridos, os principais ocorrendo nos anos de 1998, 2005, 2012 e 2015 (PANISSET et al., 2018; ESPINOZA et al., 2013).

Algumas pesquisas podem até afirmar que as mudanças no clima global, ou mesmo regional, fazem parte da variabilidade climática natural. Eventos individuais não podem ser atribuídos diretamente às mudanças no clima ou entendidos como consequência do desmatamento e outras ações humanas. Porém, os eventos extremos e as consequências sociais que acarretam servem como impulso para aumentar o número de estudos nesta área, podendo cada vez mais concluir ou não se essas afirmações são verdadeiras.

Hoje em dia já é possível prever, através de modelos climáticos, as mudanças climáticas no futuro para possivelmente evitar tais consequências. Esses modelos consideram tanto as emissões quanto as transformações naturais e são os instrumentos mais utilizados para fazer projeções do clima. Eles permitem que se façam projeções não apenas de como a temperatura global pode aumentar no

século XXI, mas também de como essas mudanças podem afetar o clima no mundo ou em regiões específicas.

2.2 GENERAL CIRCULATION MODELS (GCMS)

Entre os avanços científicos e tecnológicos que ocorreram no último século, está a habilidade em simular complexos sistemas físicos utilizando modelos numéricos, que constituem uma representação matemática aproximada da realidade. Os GCMs ou Modelos de Circulação Global, também possibilitam prever as condições do tempo, prever o clima da próxima estação para simular características mais gerais do clima futuro, na escala de décadas ou séculos, considerando as modificações antropogênicas e naturais (SAMPAIO; DIAS, 2014).

A história de modelos climáticos começa por volta de 1904, quando o cientista Vilhelm Bjerknes desenvolveu o "teorema da circulação generalizada", que entendia a atmosfera como um motor de circulação de massa de ar, acionado pela radiação solar e defletido pela rotação, expresso em diferenças locais de velocidade, densidade, pressão do ar, temperatura e umidade (GRAMELSBERGER, 2010). Ele descreveu as principais equações utilizadas em um GCM, consistindo nas três equações hidrodinâmicas de movimento, a equação de continuidade, a equação de estado para a atmosfera e os dois teoremas fundamentais da teoria mecânica do calor. Para executar um modelo climático numérico, essas sete equações precisam ser transformadas em uma lista de procedimentos que dividem a atmosfera em várias células de grade e descrevem o impacto dos efeitos físicos e mecânicos sobre os fluidos (GRAMELSBERGER, 2011).

Em 1922, Lewis Richardson publicou um sistema numérico para previsão do tempo, usando versões simplificadas das equações de Bjerknes. A ideia de Richardson era dividir um território em uma grade de células, cada uma com seu próprio conjunto de números descrevendo a pressão do ar, temperatura e similares, conforme medido em uma determinada hora (GLEDITSCH, 2020). Assim, o cientista aplicou seu método numérico e calculou as mudanças na pressão atmosférica e nos ventos em dois pontos da Europa Central, porém com cálculos pesados para a época, os resultados foram grosseiros e não realísticos.

Somente nos anos 30 é que os matemáticos identificaram os problemas com o método numérico usado por Richardson e nas questões de equilíbrio entre o campo da pressão e do vento nas condições iniciais do modelo predictor. Também

em 1930, o matemático John Von Neumann conduziu a construção de um computador chamado *Electronic Numerical Integrator and Computer* (ENIAC) no Instituto de Estudos Avançados de Princeton, nos Estados Unidos. Essa máquina foi finalizada no final da Segunda Guerra Mundial e serviu inicialmente para fazer os complexos cálculos que viabilizaram a construção das primeiras bombas atômicas. Logo depois da guerra, o computador foi usado para tentar realizar as previsões meteorológicas baseadas em pesquisas que já vinham sendo realizadas desde a descoberta de Bjerknes (BALAJI, 2015). Mas foi apenas no final dos anos 40 que as primeiras previsões realmente foram realizadas, quando Von Neumann convidou Jule Charney, um meteorologista visionário, para liderar um novo grupo de meteorologia, que reduziu complexos modelos matemáticos, otimizando as previsões realizadas pelo computador. O grupo obteve resultados que pareciam bastante realistas, e em um experimento característico eles modelaram os efeitos de uma grande cadeia de montanhas no fluxo de ar em um continente (WEART, 2010).

Como se percebe, um modelo climático é composto por diversos algoritmos que representam aproximações numéricas de equações fundadas nas leis físicas dos movimentos da atmosfera e as suas interações com o sistema climático. Os primeiros modelos mais eficientes foram projetados para prever o clima para um período de até três dias, sendo que a primeira simulação de maior extensão (um mês) foi realizada por Norman Phillips em 1956. O cientista iniciou a simulação a partir de um fluxo ao longo dos pontos de latitude da Terra, estimulando pequenas perturbações aleatórias e um distúrbio em forma de onda com comprimento 6.000 km, encontrando uma certa similaridade entre as trocas de energia da onda e os dados observados (PHILLIPS, 1956).

Nos dias atuais, existe a possibilidade de prever o tempo com dias ou semanas de antecedência, e com índices de acerto muito altos. No entanto, ainda é impossível fazer uma previsão precisa, de meses por exemplo, do início e especificidades de estações chuvosas, ou mesmo a ocorrência, frequência e duração de estações climáticas anuais. Segundo Edward Lorenz, pioneiro na aplicação da teoria matemática do caos em meteorologia, a previsibilidade atmosférica possui um limite teórico de até duas semanas, justamente pela natureza caótica da atmosfera do planeta (MCWILLIAMS, 2019).

Do ponto de vista tecnológico, para previsões mais complexas do clima global, deve ocorrer o acoplamento de diversos modelos que consideraram todo o

sistema climático, ou seja, as interações mútuas da atmosfera com a hidrosfera, a biosfera e a criosfera. Levando isso em consideração, atualmente, as equações dos GCMs são resolvidas por extensos métodos numéricos e necessitam de computadores de altíssimo desempenho, capazes de fazer intensas operações por segundo, e os resultados são apresentados como pontos de grade, com a resolução variando de um modelo para o outro, que interagem entre si conforme observado na Figura 5.

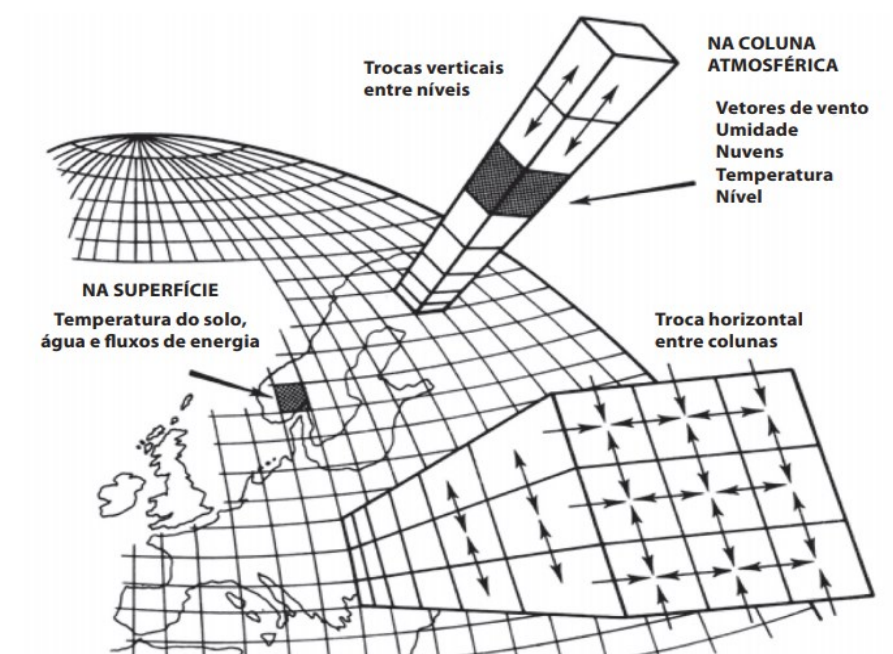


Figura 5 - General Circulation Model
Fonte: Sampaio e Dias (2014)

Os dados de entrada para os modelos são dados meteorológicos globais, derivados de estações meteorológicas, boias oceânicas, balões atmosféricos, dados de satélite etc. Segundo Weng (2007), as observações realizadas por satélites começaram a ter mais precisão entre as décadas de 60 e 70, passando a melhorar a qualidade das previsões, viabilizando também o tempo das projeções. Uma técnica chamada “assimilação de dados” trouxe grandes contribuições para a utilização dos dados de satélite, permitindo um grande avanço para os modelos. Essa técnica foi desenvolvida para fornecer condições iniciais em satélites através de previsões numéricas do tempo, conhecidas como *Numerical Weather Prediction* (NWP), realizando estimativas dos valores das observações existentes e hipotéticas (LYNCH, 2006).

Para realizar projeções futuras mais extensas, além dos dados de entrada usuais, os GCMs devem ser parametrizados por um conjunto de condições de contorno, que são justamente os cenários de emissões que tentam representar as várias probabilidades de desenvolvimento do ser humano. Como comentado anteriormente, esses cenários são propostos pelo IPCC, sendo os mais recentes criados durante o AR5, chamados de RCPs. Diversas instituições de pesquisa espalhadas pelo mundo desenvolveram modelos de circulação global mesmo antes do primeiro IPCC acontecer, consequência da evolução dos computadores.

O Brasil começou a utilizar de fato a modelagem climática no início dos anos 90, com a implantação do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Mesmo assim, no Brasil o desenvolvimento e a utilização de modelos climáticos globais ainda são atividades bem recentes. O primeiro modelo desta classe, o *Brazilian Earth System Model* (BESM), foi criado pelo INPE somente em 2012, sendo um conjunto de programas computacionais que permite simular a evolução dos principais parâmetros do clima em escala global (NOBRE et al., 2013). O BESM roda em um supercomputador denominado “Tupã” e seus cenários climáticos já foram aceitos pela comunidade científica internacional, que reúne dados climáticos do mundo todo (incluindo os gerados pelo CMIP3 e CMIP5), a *Earth System Grid Federation* (ESGF). Este órgão também é originário do IPCC e este fato iniciou a participação do Brasil como nação fornecedora de projeções em escala planetária das mudanças climáticas (BRASIL, 2016).

O Brasil é o primeiro e único país da América do Sul a possuir o seu próprio GCM, mas mesmo com esse grande avanço deve-se levar em consideração que o BESM ainda não fornece cenários tão detalhados como os gerados por outros modelos globais mais robustos, assim como alguns dados disponíveis são insuficientes, dificultando sua utilização em algumas pesquisas (PIVETTA, 2013; ESGF, 2018). Porém, espera-se que no futuro o modelo possa evoluir no cenário mundial e começar a fornecer informações mais completas, principalmente sobre importantes fenômenos que acontecem em regiões tropicais, o que também pode torná-lo uma importante ferramenta nacional, colaborando para prever possíveis eventos extremos que venham a acontecer em diversas partes do Brasil.

Por sua vez, alguns GCMs de outros países já vêm sendo bastante utilizados em território brasileiro, principalmente na Amazônia (CHOU et al., 2017; MARENGO,

2014; VILLAMAYOR et al., 2018). Exemplos desses são os *Hadley Centre Global Environmental Model Version 2* (HadGEM2), *Model for Interdisciplinary Research on Climate Version 5* (MIROC5) e *Canadian Earth System Model Version 2* (CanESM2). O modelo britânico HadGEM2 com acoplamento ES (*Earth System*) é o melhor entre os três em compreender as contribuições dos *feedbacks* biogeoquímicos para a evolução do sistema climático global, pois não necessita de correções de fluxos atmosféricos (BETTS et al., 2015).

O modelo japonês MIROC5 foi desenvolvido para melhor simulação da variabilidade climática influenciadas por fenômenos climáticos. Por exemplo, este modelo simula o ENOS de forma mais realista que outros, e também projeta eficientemente a precipitação climatológica, principalmente para a área de influência da ZCIT, como é o caso da Amazônia (WATANABE et al., 2010). Os dados derivados do CanESM2 são robustos, mas alguns resultados demonstram que ele superestima a resposta a GEE e sua variabilidade climática interna é menor que a de outros modelos (GILLETT et al., 2012).

Mesmo com suas diferenças, de maneira geral, os GCMs já vêm sendo utilizados em diversos estudos pelo mundo para previsões de possíveis eventos extremos, mostrando-se um excelente recurso para a prevenção dos impactos sociais e econômicos causados por desastres naturais. Em seu trabalho, Dastagir (2015) encontrou tendências significativas de eventos extremos, como ciclones, a partir de projeções climáticas em Bangladesh. Da mesma forma, McInnes et al. (2016) realizaram projeções para prever altas de maré para a zona costeira da Austrália, onde vive 80% da população. Diante de tais fatos, estudos utilizando projeções de modelos climáticos devem ser incentivados para que cada vez mais as perdas sejam minimizadas, contribuindo com a sociedade e também com os avanços das pesquisas.

2.3 GLOBAL HYDROLOGICAL MODELS (GHMS)

As mudanças em ciclos naturais acabam tendo implicações sociais e econômicas. Devido à globalização, o comércio virtual de água, por exemplo, tornou-se um fator importante em seu ciclo global (ISLAM et al., 2007). Isso leva à noção do "sistema global de água", no qual o fluxo global está conectado a outros sistemas por meio de relações físicas e econômicas. Este sistema é ainda mais complicado

pela interferência direta dos seres humanos através de retiradas ou armazenamento de água (ROST et al., 2008).

Dessa forma, existem modelos que tentam simular a hidrologia global com processos associados semelhantes a vários componentes hidrológicos dos GCMs. No entanto, estes diferem nos detalhes da descrição de processos, abordagens de estimativa de parâmetros, escalas de tempo e resolução espacial de dados de entrada (GUDMUNDSSON et al., 2012). Exemplos desses modelos são os *Global Hydrological Models* (GHMs), que são calibrados em escalas de ecossistemas, regiões climáticas ou grandes bacias hidrográficas.

O primeiro GHM foi proposto por Vörösmarty et al. (1989), e nas últimas duas décadas vem ocorrendo um desenvolvimento substancial nos GHMs. Estes modelos são baseados em balanço de energia ou equilíbrio hidrológico, ou ambos. Segundo Sood e Smakhtin (2015), as questões estruturais como o número de camadas de solo, número de classificações de uso da terra, aplicações de água de irrigação e armazenamento de reservatórios, são tratados de forma diferente nos vários modelos, e suas complexidades variam com base em seus objetivos e aplicações. Os autores comentam ainda que existem atualmente pelo menos 12 GHMs (ou ferramentas que podem ser interpretadas como tal).

O desempenho de qualquer modelo hidrológico depende da qualidade e escala dos dados de entrada disponíveis, especialmente a chuva. Os dados pluviométricos tradicionais permanecem limitados em todo o mundo, porém os satélites podem fornecer coleta ininterrupta de dados meteorológicos globais e, portanto, ajudar a melhorar a entrada primária para os modelos hidrológicos. A explosão da disponibilidade global de dados de satélites nas últimas duas décadas também contribuiu para o desenvolvimento desses modelos, que estão se tornando mais complexos e resolutos à medida que mais funcionalidades são adicionadas a eles (SMITH, 2016). A maioria dos GHMs é executada em uma escala temporal diária, porém, para a avaliação de longo prazo dos impactos da mudança climática e do impacto no comércio global de água, uma escala temporal mensal é suficiente e pode simplificar o processo de calibração (MELSEN et al., 2016).

Todos os modelos fornecem saída no nível de grade (principalmente na resolução de $0,5^\circ$). Esses resultados em nível de grade são agregados à escala da bacia hidrográfica, com base no número de grades que se enquadram dentro de um limite da bacia, o formato e a resolução da rede são ditados pela disponibilidade de

dados meteorológicos globais e recursos computacionais (PRUDHOMME et al., 2011). A principal saída de todos os modelos é a vazão, que é derivada do particionamento da precipitação pluviométrica em evapotranspiração, umidade do solo, fluxo rápido e lento (embora os termos usados possam ser diferentes, por exemplo, escoamento superficial, fluxo lateral e escoamento de base).

Um dos principais GHMs disponíveis (e mais utilizados) é o *Water Global Analysis and Prognosis Version 2* (WaterGAP2), considerado único, pois embora seja um modelo hidrológico global, combina o cálculo da disponibilidade de água na escala da bacia hidrográfica com a modelagem do uso da água a partir da dinâmica da estrutura e das mudanças tecnológicas nos diversos setores locais (DÖLL; SCHMIED, 2012). O WaterGAP2 foi criado em 1996 pelo Centro de Pesquisa de Sistemas Ambientais da Universidade de Kassel na Alemanha, e desde 2003 vem passando por atualizações periódicas pela Universidade de Frankfurt (DÖLL et al., 2003).

Assim como o WaterGAP2, de acordo com Van Huijgevoort (2014), vários outros GHMs também já estão inseridos nos projetos do IPCC, incluindo os novos cenários climáticos e socioeconômicos desenvolvidos como parte AR5, que são usados como força (a partir de GCMs) para avaliar possíveis impactos futuros em diferentes setores (como agricultura, indústria, ecossistemas, infraestrutura e saúde). Assim, entre janeiro de 2012 e janeiro de 2013, foi criado o projeto *Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project* (ISIMIP), reunindo modelos de impacto global (entre eles os GHMs) de cinco setores diferentes (WARSAWSKI et al., 2014).

O ISIMIP tem como objetivo fornecer uma estrutura consistente para simulações de impacto climático de vários modelos entre setores e em escalas temporais e espaciais. Essa organização é projetada para complementar e fornecer uma visão abrangente dos riscos da mudança climática em diferentes níveis de aquecimento global (WARREN, 2011). O ISIMIP emprega conjuntos de modelos múltiplos para que as incertezas nas diferentes etapas de modelagem consideradas possam ser avaliadas quantitativamente. As principais características da missão e do processo do ISIMIP são exibidas na Figura 6.

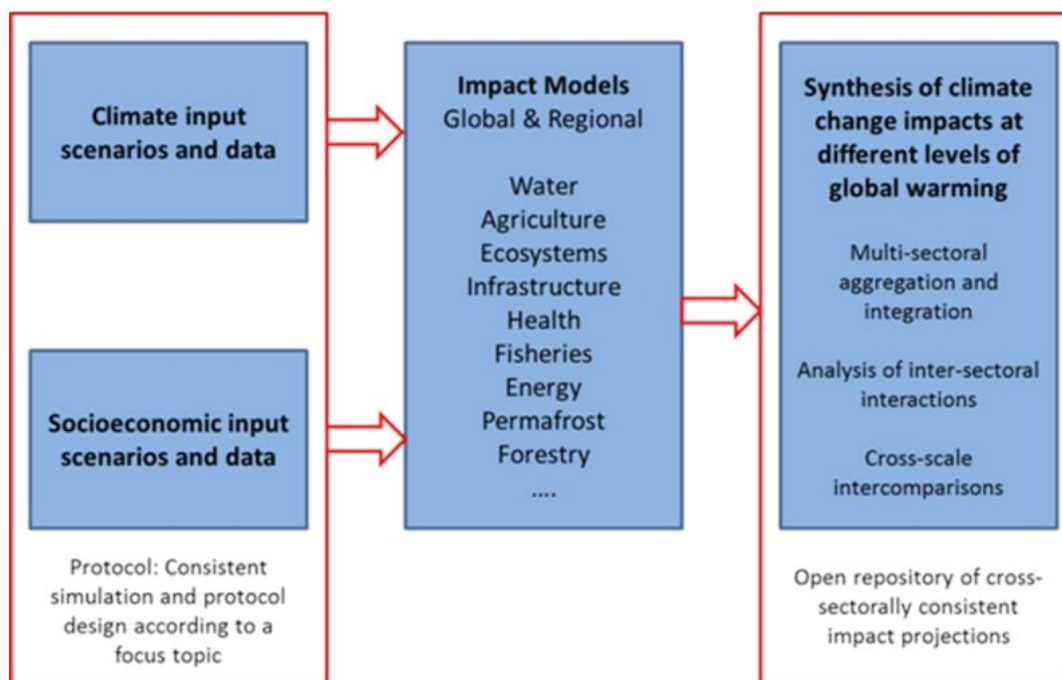


Figura 6 - Estrutura geral dos elementos-chave do processo e missão ISIMIP
Fonte: ISIMIP (2018)

O principal resultado do projeto é um repositório de acesso aberto de simulações de impactos análogos aos arquivos dos projetos CMIP para simulações de modelos climáticos globais. Este arquivo permite pesquisas e análises que contribuem para a literatura científica e fornece uma base para avaliações de impactos, assim como o IPCC. O projeto tem o duplo propósito de facilitar a compreensão do desenvolvimento de modelos na comunidade científica, além de fornecer resultados quantitativos que estão prontamente disponíveis para as partes interessadas e a sociedade em geral.

O cronograma do primeiro procedimento (chamado *fast-track*) foi elaborado para fornecer o primeiro conjunto de resultados a tempo para a avaliação do IPCC, em preparação para o AR5 de avaliação. Para promover os objetivos acima, além desta linha do tempo estreita, uma segunda fase (ISIMIP2 a/b) de longo prazo do ISIMIP foi iniciada em maio de 2013, planejada para incorporar modelos regionais, bem como setores e sistemas adicionais (ISIMIP, 2018).

Os GHMs já estão sendo usados para avaliar a resposta hidrológica às mudanças climáticas e para projetar a situação futura dos recursos hídricos na Amazônia. No entanto, alguns estudos ainda usam cenários anteriores aos RCPs. Por exemplo, Van Huijgevoort et al. (2014) analisaram variáveis hidrometeorológicas para o SRES A2, concluindo que, na Amazônia, é difícil definir mudanças futuras

nas secas e enchentes, possivelmente devido à divergência dos dados de GHM nestes cenários para a região. Wanders e Van Lanen (2015), também utilizando o cenário A2, conseguiram definir a possibilidade de aumento das secas até 2100.

Ainda são poucos os estudos em que os GHMs usam os cenários RCP que se utilizam da Amazônia como área de estudo, e a maioria não é baseada no mais recente protocolo de simulação ISIMIP (FRIELER et al., 2017). Grande parte destes estudos faz uma análise geral da bacia, portanto, é necessário um incentivo em trabalhos que vêm a contribuir para uma melhor percepção de variações futuras mais específicas nos recursos hídricos, principalmente nas vazões e volumes disponíveis.

2.4 RECURSOS HÍDRICOS

Os recursos hídricos são afetados tanto pelo clima quanto por intervenções humanas. As mudanças climáticas podem produzir grandes impactos no ciclo da água e, subsequentemente, na sua disponibilidade e demanda. O IPCC aponta impactos de grande magnitude sobre a América do Sul, especialmente quanto a recursos hídricos e setores econômicos relacionados, impondo a necessidade de formular medidas de adaptação, com vistas a gerenciar riscos climáticos (HADDELAND et al., 2013). Assim, tornou-se essencial a elaboração de subsídios ao planejamento nacional de longo prazo que incorporem a mudança do clima. A ocorrência de eventos extremos e suas graves consequências que ocorreram no Brasil, ilustram bem a necessidade de uma estratégia de adaptação para o país, principalmente no setor de construções de barragens e grandes obras de engenharia, uma vez que o período de recorrência de enchentes poderá modificar-se (NOBRE, 2005). Enxurradas mais frequentes também poderão afetar negativamente a atividade agrícola no país, acelerando a perda de fertilidade dos solos, fato este que merece devida atenção.

Verificando o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais é possível notar que eventos extremos afetaram diretamente, entre 1991 e 2012, mais de 96,2 milhões de brasileiros, e incidentes como estiagens e inundações já mataram cerca 2.475 pessoas nesse mesmo período (CEPED, 2012). Diante de tantas evidências das consequências que eventos extremos podem causar, parece claro que a engenharia de recursos hídricos se encontra diante de dois complexos desafios, por um lado a

preparação para o enfrentamento dos inúmeros efeitos dos fenômenos (adaptação) e por outro o combate as suas causas (mitigação).

Algumas ideias acerca da adaptação vêm ganhando mais espaço, já que a noção inicial é que mitigação é responsabilidade global e adaptação é local. Focando nas medidas de adaptação, ressalta-se que essas precisam ser proativas, ou seja, não lidar com os impactos depois que ocorrerem, mas tentar evitar ao máximo que venham a acontecer (AMUNDSEN et al., 2010). Assim, entende-se o porquê de pesquisas relacionando as mudanças climáticas e variáveis utilizadas em projetos de obras hidráulicas terem ganhado enfoque no cenário mundial, uma vez que podem evitar grandes perdas, ou mesmo grandes catástrofes em um futuro não muito distante.

2.4.1 Curvas de intensidade-duração-frequência (IDF)

Curvas IDF representam relações entre o período de retorno de um evento de chuva, a intensidade da chuva e sua duração, que pode ser obtida através de uma distribuição de probabilidade, para caracterizar as propriedades de um evento extremo em uma determinada área (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Suposições confiáveis de intensidade de chuva são necessárias também para análises hidrológicas, planejamento, gerenciamento e projetos de infraestruturas hidráulicas.

Os atuais conceitos de projeto de infraestrutura para lidar com enchentes e chuvas torrenciais são baseados em curvas IDF locais. As curvas são geralmente baseadas em dados históricos de chuva e projetadas para capturar a intensidade e a frequência para diferentes durações (CHENG.; AGHAKOUCHAK, 2014). As curvas IDF atuais são baseadas no conceito de estacionariedade temporal, que assume que a probabilidade de ocorrência de eventos extremos de chuva não deve mudar significativamente ao longo do tempo. No entanto, espera-se justamente o contrário, que as mudanças climáticas influenciem no ciclo hidrológico e alterem a intensidade, duração ou frequência dos extremos climáticos ao longo do tempo, denominada também de “não-estacionariedade”.

Observa-se que os eventos de chuva vêm se intensificando, o que torna a atualização de curvas IDF, considerando as mudanças no clima, cada vez mais necessária, principalmente em obras que terão impacto na sociedade. De acordo com Singh et al. (2016), na última década várias pesquisas foram realizadas para atualizar e prever as curvas IDF para o futuro, no entanto os métodos para avaliar as

mudanças que irão ocorrer e sua incerteza em um clima não-estacionário ainda são limitados, mesmo tenha provado bastante confiáveis.

Os modelos climáticos vêm tornando-se um importante instrumento para realizar os estudos de atualização de curvas IDF. Exemplos disso são trabalhos como de De Paola et al. (2014), que realizaram atualizações de curvas IDF para três cidades africanas, Addis Abeba (Etiópia), Dar Es Salaam (Tanzânia) e Douala (Camarões). Para estimar a influência da mudança climática nas curvas, os autores utilizaram dados de simulações no clima durante o período de 2010 a 2050, fornecidas pelo *Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatic*. As curvas IDF projetadas mostraram desvios moderados entre os dois cenários, RCP 4.5 e RCP 8.5, enquanto variações substanciais dependeram mesmo das resoluções utilizadas. Analisando o fator do crescente período de retorno, foi possível notar que o efeito da mudança climática nas três cidades envolveu um aumento da frequência de eventos extremos, alertando as autoridades quanto a vulnerabilidade da população.

A contribuição de modelos climáticos para atualizações de curvas está tornando-se muito forte no mundo (ZHOU et al., 2018; MAURER et al., 2017; RODRÍGUEZ et al., 2014). Porém, o maior exemplo fica por conta do Canadá, quando em 2014 foi desenvolvido o “IDF_CC Tool”. Esta ferramenta incorpora informações de GCMs de acordo com o RCP escolhido, para gerar curvas IDF projetadas em qualquer localidade do país, auxiliando todos os profissionais e pesquisas que necessitem de tais informações. Na Figura 7 observa-se a *home online* da ferramenta.

SIMONOVIC et al. (2017) realizaram uma análise da ferramenta, elaborando curvas para 567 estações meteorológicas espalhadas pelo Canadá e utilizando dados do GCM canadense (CanESM2) disponíveis na plataforma. Os resultados indicaram uma redução na precipitação pluviométrica extrema nas regiões centrais do país, sob análises específicas, e aumentos em outras regiões. Os autores também concluíram que ferramentas como estas podem ajudar a preencher lacunas importantes relacionadas ao acesso a informações de impactos climáticos locais, colaborando bastante com os tomadores de decisões.

Até então no Brasil, poucos trabalhos foram realizados nos últimos anos com este objetivo. Schardong et al. (2014b), baseando-se na ferramenta canadense, geraram curvas IDF projetadas a partir de um GCM para uma estação pluviométrica localizada na cidade de São Paulo, e compararam com a equação existente utilizada

pela prefeitura. Os resultados constataram um aumento de aproximadamente 4,5% nos eventos extremos de chuvas, para o cenário de menor emissão (RCP 2.6) e cerca de 30% para cenário de maior emissão (RCP 8.5), o que é preocupante, visto que a cidade frequentemente sofre com inundações.



Figura 7 - Interface online do *IDF_CC tool*

Sabóia et al. (2017) realizaram um estudo para avaliar o impacto de possíveis cenários de mudanças climáticas no sistema de drenagem urbana em Fortaleza (CE), utilizando dados de seis GCMs para os RCPs 4.5 e 8.5. Os autores encontraram valores alarmantes para os aumentos de intensidades pluviométricas nos dois cenários, e também avaliaram a viabilidade econômica de se utilizar diferentes curvas IDF para projetar um novo sistema de drenagem “preparado” para essas mudanças.

Silva et al. (2018), também baseados na “*IDF_CC tool*”, geraram curvas IDF sob efeito das mudanças climáticas utilizando vários GCMs, para os cenários RCPs 4.5 e 8.5. Os autores tinham o objetivo de apresentar uma análise das medidas de mitigação para inundações em uma bacia hidrográfica localizada no centro da cidade de São Paulo, analisando reservatórios de retenção. Os resultados mostraram que as mudanças propostas no sistema de drenagem poderiam ajudar a reduzir o risco e os danos das inundações. Ressaltando que nenhum estudo

semelhante aos anteriores foi realizado na Amazônia, sendo que os cenários de mudanças climáticas nessa região impõem uma ameaça significativa (pela falta de planejamento e infraestrutura) e precisam de atenção imediata dos planejadores das cidades locais, atentando-se não apenas ao comportamento das chuvas, mas também das vazões.

2.4.2 Curvas de permanência de vazões (FDC - *Flow Duration Curve*)

As curvas de permanência são funções hidrológicas fortemente utilizadas em estudos de gerenciamento da qualidade da água, abastecimento público, potencial hidrelétrico, planejamento de irrigação, reservatórios etc. (ELETROBRAS, 2000; BOOKER; SNELDER, 2012; BLANCO et al., 2013). O primeiro uso de FDCs ocorreu em 1880, realizado por Clemens Herschel; já a primeira revisão dos usos da curva de permanência vazões, possivelmente, tenha sido feita por Searcy em 1959 e posteriormente por Vogel e Fennessey em 1955 (CRUZ; TUCCI, 2008).

Para Vogel e Fennessey (1990) esta curva representa a relação entre a magnitude e a frequência de vazões diárias, semanais, mensais, anuais (ou qualquer outro período) de uma determinada bacia hidrográfica, fornecendo a porcentagem de tempo em que uma determinada vazão é igualada ou excedida para um determinado período (Figura 8).

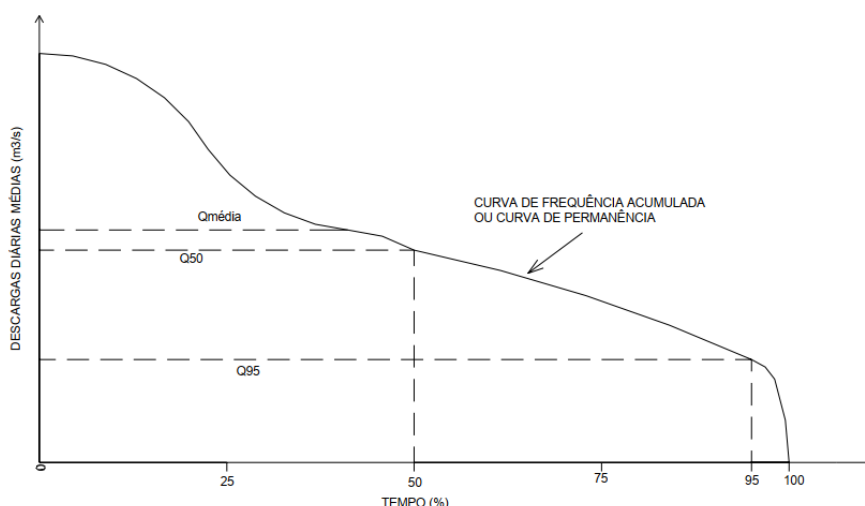


Figura 8 - Estrutura de uma curva de permanência
Fonte: Eletrobras (2000)

De acordo com alguns autores (CASTELLARIN et al., 2007; VIOLA et al., 2011; VERMA et al., 2017), para se gerar as curvas, geralmente, é utilizado um

procedimento não paramétrico que consiste em duas etapas: (a) as vazões observadas q_i , $i = 1, 2, \dots, N$, são classificadas em ordem decrescente para produzir um conjunto de vazões $q(1)$, $i = 1, 2, \dots, N$, onde N é o comprimento da amostra, e $q(1)$ e $q(N)$ são os maiores e os menores eventos de vazões observadas, respectivamente; (b) cada observação ordenada $q(i)$ é então traçada em função da sua correspondente duração D_i , que é, geralmente, adimensional e coincide com uma estimativa, p_i , da probabilidade de excedência de $q(i)$. Para estimar p_i a plotagem de posição mais utilizada é a de Weibull (Equação 1).

$$p_i = P(Q > q_{(i)}) = \frac{i}{N+1} \quad (1)$$

Em 1995, Vogel e Fennessey realizaram um estudo relativo à escolha de procedimento não-paramétrico de estimativa de percentis. Ao comparar a estimativa por Weibull com o método de divisão em classes, eles concluíram que Weibull produz uma curva ligeiramente mais suave e representativa que a técnica por classes. Os autores afirmam ainda que, mesmo para pequenas amostras, a estimativa por Weibull pode estimar tão bem quanto os estimadores mais complexos.

A FDC é uma ferramenta hidrológica tão importante quanto às curvas IDF, pois também permite avaliar as influências diretas das mudanças no clima, principalmente pela relação da chuva com a vazão. A vazão, assim como todas as outras variáveis utilizadas para a caracterização de processos hidrológicos, possui comportamento aleatório, que a torna também muito sensível às variabilidades climáticas, necessitando de uma adequada avaliação, tornando as suas projeções de extrema necessidade.

Mesmo com estudos recentes, os GHMs vêm se tornando instrumentos bastante utilizados pelo mundo para realizar análises futuras de vazões. Um exemplo disso é o trabalho de Wanders e Wada (2015) onde os autores utilizaram um GHM para estudar as mudanças nas vazões de 1971 a 2099 e analisar as projeções para reservatórios de água, considerando os quatro cenários de RCP. Os resultados mostraram um impacto significativo da mudança climática e do uso da água em grandes partes da Ásia, Oriente Médio e Mediterrâneo, onde a contribuição relativa dos seres humanos sobre a severidade da seca pode ser próxima a 100%.

As diferenças entre as RCPs foram pequenas, indicando que o uso da água será proporcional às mudanças no clima. Os reservatórios irão tender a reduzir o impacto da seca em grandes regiões da Europa e da América do Norte.

Novamente, Van Huijgevoort et al. (2014) utilizaram cinco GHMs para estudar projeções de secas para o mundo todo (incluindo Amazônia), no período histórico (1971-2000) e no período futuro (2071-2100), definindo baixas vazões que se mantivessem abaixo de 20%. Os autores concluíram que em climas frios, as combinações projetaram uma mudança de regime e baixas vazões para o período futuro na maioria das bacias (em torno de 65%), e que a duração das secas irá aumentar na maioria dos modelos selecionados. Tais dados são alarmantes, reafirmando a importância de realizar estudos semelhantes no Brasil, principalmente na Amazônia, uma região altamente suscetível a eventos extremos e que sofre com infraestrutura e políticas públicas precárias para evitar possíveis impactos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Na Figura 9 observa-se o esquema das etapas metodológicas para a realização do estudo, com destaque em vermelho.

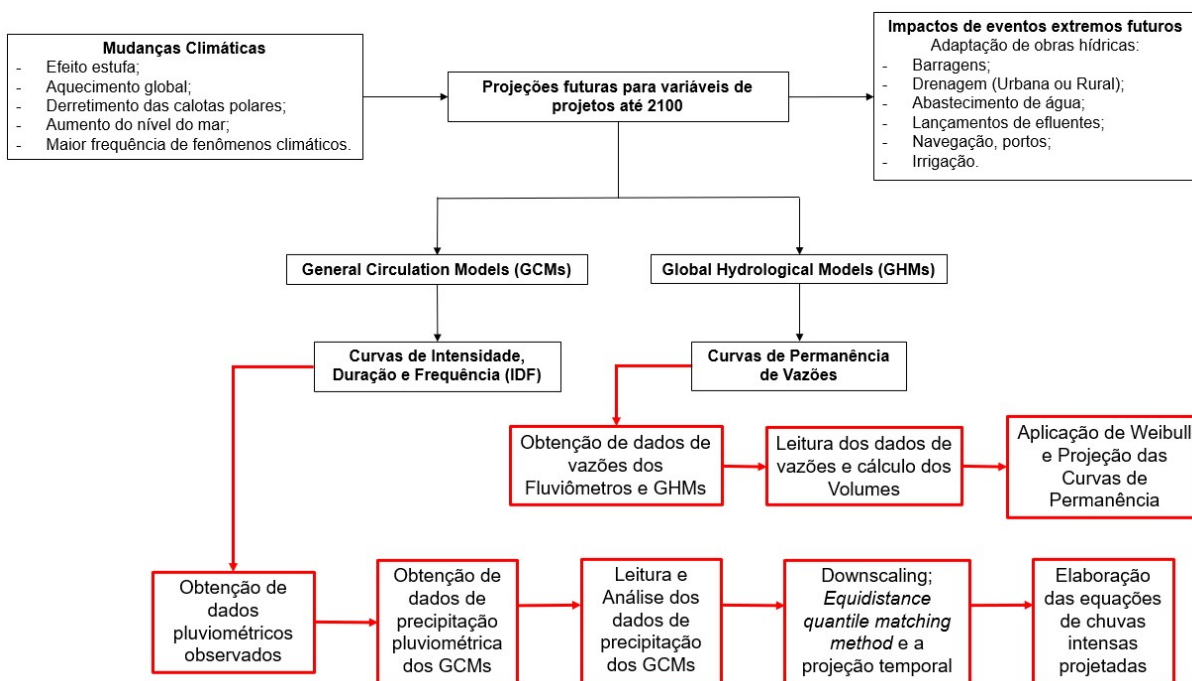


Figura 9 - Esquema metodológico do trabalho

3.1 CURVAS IDF

3.1.1 Área de Estudo e Dados pluviométricos

Os dados pluviométricos horários utilizados neste estudo não possuem falhas e foram obtidos juntos ao 2º Distrito Meteorológico do Instituto de Meteorologia (DISME-INMET). A série histórica é de 10 anos (2008 a 2017), referente à estação de código 82191, registrada na OMM. Ressalta-se que os dados dos GCMs foram lidos por meio do *software* FERRET para o mesmo ponto em que a estação está localizada (04° 16' 37,12"S e 55° 59' 35,11"W), ou seja, situada próximo ao rio Tapajós. Os dados foram apresentados na escala horária e organizados em planilha. A precipitação média anual foi de 1.630,26 mm e a média mensal de 185,2 mm. A média horária foi de 0,23 mm (60 minutos) a 5,18 mm (1.440 minutos), com desvio padrão (DP) variando de 1,78 mm a 12,81 mm. Os máximos foram obtidos separando os intervalos de tempo específicos e organizados na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados de precipitação máxima, média e desvio padrão dos dados gerais

| Anos | Máximos (mm) | | | | | | |
|--------------|--------------|----------|----------|----------|----------|------------|------------|
| | 60 min. | 120 min. | 240 min. | 360 min. | 720 min. | 1.080 min. | 1.440 min. |
| 2008 | 90,80 | 103,20 | 112,6 | 116,80 | 120,20 | 120,20 | 120,20 |
| 2009 | 43,60 | 72,20 | 78 | 81 | 81,40 | 97,40 | 98,20 |
| 2010 | 66,40 | 83,20 | 85,2 | 88,80 | 100 | 100 | 104,20 |
| 2011 | 59,40 | 73,40 | 86 | 105 | 109,60 | 110,40 | 110,40 |
| 2012 | 39 | 55,20 | 60,6 | 71,60 | 91 | 102 | 102 |
| 2013 | 73,20 | 103,60 | 110,4 | 111,80 | 113,80 | 127,20 | 127,80 |
| 2014 | 65,20 | 90 | 93,2 | 94,60 | 94,60 | 109,20 | 116 |
| 2015 | 44,80 | 50,80 | 56 | 61 | 80 | 81,20 | 81,20 |
| 2016 | 42,80 | 57,40 | 63 | 69,80 | 71 | 71 | 72,60 |
| 2017 | 53,80 | 59,80 | 82 | 89 | 105,20 | 106 | 106,40 |
| Média | 57,90 | 74,88 | 82,70 | 88,94 | 96,68 | 102,46 | 103,90 |
| DP | 16,41 | 19,53 | 19,44 | 18,56 | 16,00 | 16,74 | 16,88 |

A bacia hidrográfica do Rio Tapajós (Figura 10) é uma das bacias que possui maior potencial de geração de energia elétrica do Brasil, com uma área de 764.183 km², quase o tamanho da Suécia e Noruega juntas (FEARNSIDE, 2015). Com relação ao clima, a chuva na bacia do Tapajós varia de 2.100 a 2.300 mm ao ano, e é fortemente influenciada pelo fenômeno ENOS (CORRÊA et al., 2016). O principal sistema atmosférico atuante na região é a ZCIT (FIGUEIREDO; BLANCO, 2016).



Figura 10 - Região de estudo delimitada pela bacia hidrográfica do Rio Tapajós

Próximo ao ponto de estudo está prevista a construção da Usina Hidrelétrica São Luiz do Tapajós. Segundo Fearnside (2016), esta será a quarta maior hidrelétrica do país, com capacidade para 8.040 MW. Na bacia do Tapajós está previsto um número expressivo de barragens; até 2022 são mais de 40 projetos, entre Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) e Usinas hidrelétricas (UHEs), sendo que essas últimas irão possuir uma geração superior a 30 MW cada (LEES et al., 2016). Mas não são apenas as hidrelétricas que têm potencial de impacto na área. Outras obras de grande porte estão previstas para o futuro, como a construção de portos fluviais para escoamento de grãos, fazendo com que a população aumente ou exploda nos próximos anos (MELO et al., 2017). O rio Tapajós e seus afluentes são foco de planos do Ministério dos Transportes, que pretende convertê-lo em hidrovia para transporte de soja do Mato Grosso até portos no rio Amazonas.

O ponto de estudo escolhido é estratégico não só pela via fluvial, mas também rodoviária, pois a localização dá acesso a duas principais rodovias da Amazônia, a BR-163 e BR-230 (Transamazônica). A conclusão de obras previstas para essas rodovias também irá propiciar o deslocamento da produção agrícola, que deverá acelerar o desenvolvimento e a ocupação na área. Também há um planejamento de uma ferrovia, batizada de “Ferrogrão”, com autorização para um estudo de viabilidade do projeto que irá transportar cerca de 40% da produção de grãos nessa região (WALKER; SIMMONS, 2018).

3.1.2 Dados dos Modelos de Circulação Global

Os centros de pesquisa ao redor do mundo disponibilizaram os dados do CMIP5 através do endereço eletrônico *World Climate Research Programme* (<https://esgf-node.llnl.gov>) em formato *Network Common Data Format* (NetCDF). Neste site, podem-se encontrar as saídas dos GCMs para 725 variáveis climáticas (precipitação, vento, radiação, concentração de SO₄, entre outras) para todos os cenários RCPs e para a simulação histórica. O experimento histórico serve como base para os cenários futuros de cada GCM (2006-2100), pois é alinhado em mudanças atmosféricas naturais e antropogênicas observadas entre 1850 e 2005.

Os dados utilizam a nomenclatura “r_i_p_” quanto à configuração das simulações realizadas. O “r” equivale ao número de realizações, “i” significa as diferentes inicializações com implicações físicas e o “p” são as perturbações na física para cada um dos modelos simulados (SILVEIRA et al., 2013). Alguns

modelos disponibilizam saídas com mais de uma condição inicial (r1i1p1, r2i1p1 e r3i1p1). Porém, neste trabalho optou-se apenas por dados de chuva diária com a configuração inicial r1i1p1, pela maior disponibilidade e para manter as condições iniciais do GCM. Consideraram-se apenas os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 por três motivos: 1) São os principais representantes de cenários otimista e realista no futuro; 2) São os mais utilizados em estudos científicos; 3) A ocorrência do cenário RCP 2.6 é quase improvável. Foram escolhidos os três GCMs mais comumente utilizados em estudos climáticos na Amazônia, e com trabalhos consolidados na literatura mundial. Na Tabela 2 observa-se alguns detalhes desses modelos.

Tabela 2 - Detalhes sobre GCMs utilizados no estudo

| Modelo | Nome Completo | País | Instituição | Resolução espacial (Long. x Lat.) |
|------------|---|-------------|---|-----------------------------------|
| CanESM2 | Canadian Earth System Model Version 2 | Canadá | Canadian Climate Center for Modeling and Analysis | 2,8° x 2,8° |
| HadGEM2-ES | Hadley Centre Global Environmental Model Version 2 - Earth System | Reino Unido | Met Office Hadley Centre | 1,875° x 1,25° |
| MIROC5 | Model for Interdisciplinary Research on Climate Version 5 | Japão | Center for Climate System Research | 1,4° x 1,4° |

3.1.3 Leitura e Análise dos Dados de Chuva dos GCMs

A leitura foi realizada através da ferramenta de análise de dados em grade FERRET, instalada no sistema operacional Linux Ubuntu 16.04 LTS. Este *software* foi desenvolvido pelo *Thermal Modeling and Analysis Project* (TMAP) do *Pacific Marine Environmental Laboratory* (PMEL/NOAA), em Seattle, EUA, com objetivo de analisar os resultados de seus modelos numéricos de oceano e compará-los com dados observacionais em grade (OHUNAKIN et al., 2015).

Os recursos que tornam o FERRET diferente de outros programas são a sua flexibilidade matemática, formatação geofísica, conexão "inteligente" a sua base de dados e o gerenciamento de memória para cálculos extensos (FERRET, 2019). O *software* é amplamente utilizado na comunidade científica para analisar dados de modelos GCM, criar gráficos e mapas (Figura 11) com qualidade de publicação (TOST, 2017; ROBSON et al., 2016).

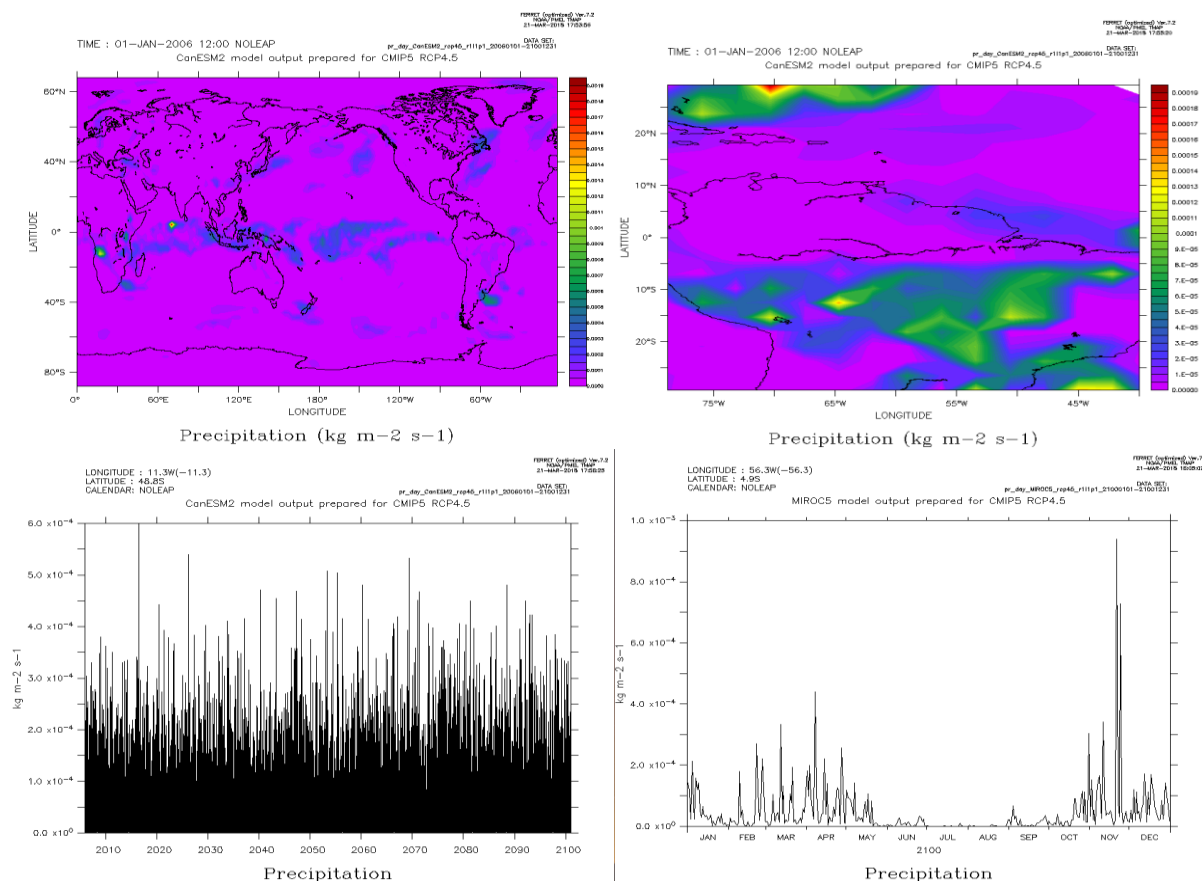


Figura 11 - Manuseio do software FERRET para a leitura de dados

3.1.4 Downscaling e a Projeção Temporal

Devido à falta de resolução espacial suficiente, os resultados dos GCMs precisam ser pós-processados antes de serem usados. Os métodos de *Downscaling* (ou diminuição de escala), seja o dinâmico ou estatístico, são necessários para remover desvios sistemáticos em modelos e transformar padrões climáticos simulados para uma resolução espacial mais refinada de interesse local (SACHINDRA et al., 2014). A natureza computacional intensiva dificulta o uso de *Downscaling* dinâmico, pois ele usa modelos de alta resolução para simular processos físicos. Em contraste, numerosos estudos mostram que o desempenho do *Downscaling* estatístico (espacial e temporal) pode ser semelhante ao dinâmico, pois eles são computacionalmente acessíveis e transformam as projeções climáticas de escala maior em uma escala mais precisa através de funções estatísticas (WANG et al., 2016).

Li et al. (2010) propuseram uma metodologia de *Downscaling* estatístico simples, um método de correção de viés chamado *Equidistance quantile matching method* (Método da Correspondência de Quantis Equidistantes), que possui a

vantagem de incorporar explicitamente mudanças na variabilidade do clima futuro, relacionando as funções de distribuição cumulativa entre as variáveis. Baseado nesse método, Srivastav et al. (2014a) desenvolveram um algoritmo para ser aplicado no procedimento de atualização de curvas IDF. Este algoritmo foi incorporado a um projeto da *Canadian Water Network*, chamado “IDF_CC Tool”, uma ferramenta *web* acessível a todos os interessados no desenvolvimento de curvas de IDF que considerem impactos projetados de mudanças climáticas (SIMONOVIC et al., 2016). A ferramenta inclui um conjunto de procedimentos matemáticos: (1) algoritmos de análise estatística; (2) algoritmo de otimização; (3) algoritmo de seleção do GCM; e (4) algoritmo de atualização IDF.

Utilizou-se neste estudo o último algoritmo, disponibilizado por Srivastav et al. (2014b), que foi manuseado e adaptado através de linguagem MATLAB com as necessidades e dados disponíveis para o estudo. Na Figura 12 pode-se observar a esquematização do algoritmo.

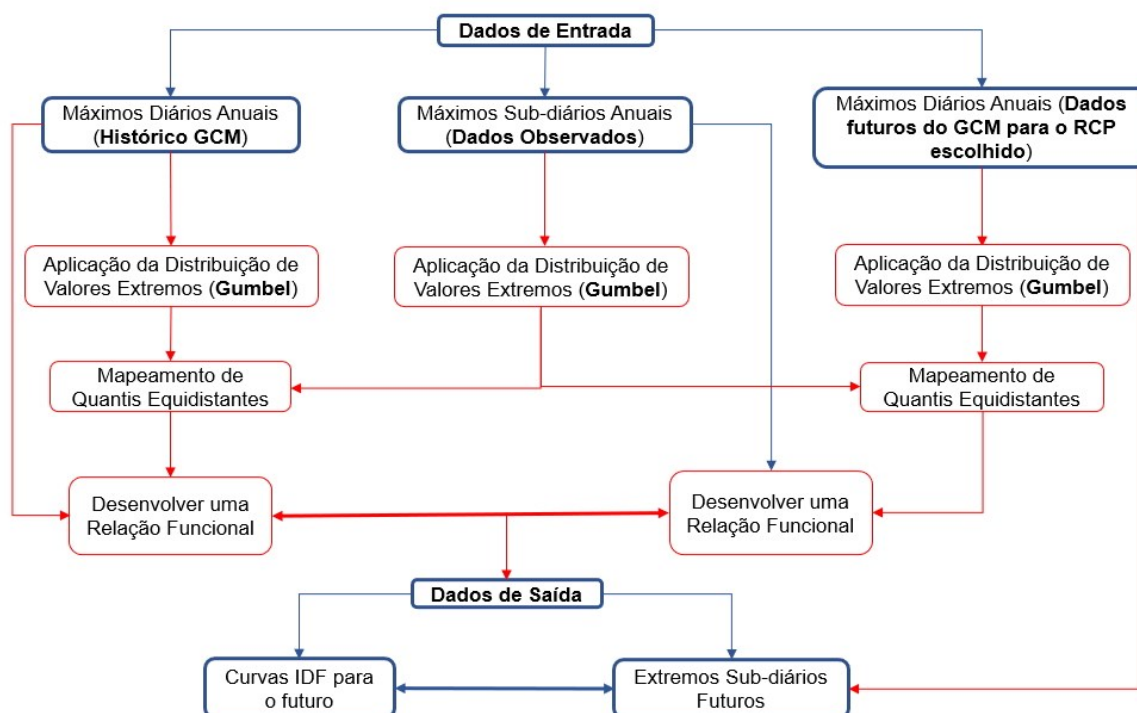


Figura 12 - Esquematização do algoritmo de geração de curvas IDF futuras

O código computacional, em linguagem simbólica, é composto por nove etapas sequenciais, descritas a seguir, de acordo com Srivastav et al. (2014b).

- (1) Extração dos máximos sub-diários da série histórica observada:

$$X_{max}^{STN} = \begin{bmatrix} X_{1,max}^{STN,60min} & X_{1,max}^{STN,120min} & \dots & X_{1,max}^{STN,1440min} \\ X_{2,max}^{STN,60min} & X_{2,max}^{STN,120min} & \dots & X_{2,max}^{STN,1440min} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{N,max}^{STN,60min} & X_{N,max}^{STN,120min} & \dots & X_{N,max}^{STN,1440min} \end{bmatrix}$$

Onde N representa o total de anos e $X_{i,max}^{STN,y}$ a precipitação pluviométrica máxima sub-diária em uma estação (STN) por uma determinada duração “y” em um ano “i”.

- (2) Extrair os máximos diários para o período de base histórica do modelo de GCM selecionado:

$$X_{max}^{GCM} = \begin{bmatrix} X_{1,max}^{GCM} \\ X_{2,max}^{GCM} \\ \vdots \\ X_{N,max}^{GCM} \end{bmatrix}$$

Onde N representa o total de anos e $X_{i,max}^{GCM}$ a precipitação pluviométrica máxima diária do modelo GCM em um ano “i”.

- (3) Extrair os máximos diários para os cenários RCPs do modelo de GCM selecionado:

$$X_{max}^{GCM,cen} = \begin{bmatrix} X_{1,max}^{GCM,4.5} & X_{1,max}^{GCM,8.5} \\ X_{2,max}^{GCM,4.5} & X_{2,max}^{GCM,8.5} \\ \vdots & \vdots \\ X_{N,max}^{GCM,4.5} & X_{N,max}^{GCM,8.5} \end{bmatrix}$$

Onde N desta vez representa o total de anos para o período futuro e $X_{max}^{GCM,cen}$ a precipitação pluviométrica máxima diária do modelo GCM.

- (4) Nas Equações 2, 3 e 4 observa-se o ajuste de uma função de distribuição de probabilidade aos máximos diários (cada um dos máximos sub-diários observados e

os máximos gerados pelo modelo GCM, incluindo a série histórica e os cenários futuros):

$$PDF^{GCM} = f(\theta^{GCM} / x_{max}^{GCM}) \quad (2)$$

$$PDF_y^{STN} = f(\theta^{STN,y} / x_{max}^{STN,y}) \quad (3)$$

$$PDF^{GCM,cen} = f(\theta^{GCM} / x_{max}^{GCM,cen}) \quad (4)$$

Onde PDF representa a função de distribuição de probabilidade; $f()$ é a função; e θ é o parâmetro da distribuição ajustada.

(5) As funções acumuladas de probabilidade dos máximos diários da série histórica do GCM e dos máximos sub-diários observados são igualadas com o objetivo de estabelecer uma relação estatística, usando o princípio do mapeamento de quantil. Assim, é possível se obter os máximos sub-diários do modelo GCM (Equação 5). Esse processo é chamado de “*downscaling espacial*” dos máximos diários do modelo:

$$Y_{max,y}^{STN} = CDF ((invCDF(x_{max}^{GCM} / \theta^{GCM})) / \theta^{STN,y}) \quad (5)$$

Onde $Y_{max,y}^{STN}$ é a série máxima sub-diária (após sofrer o *downscaling*) para uma duração “y”; CDF significa função cumulativa de distribuição de probabilidade; e invCDF significa CDF inversa.

(6) Estabelecer uma relação estatística similar que expresse a mudança entre os máximos diários da série histórica e os máximos dos cenários futuros. Esse processo é chamado de “*downscaling temporal*” dos máximos diários dos cenários RCPs para os máximos diários do GCM histórico referente ao período atual (Equação 6):

$$Y_{max}^{GCM,cen} = CDF ((invCDF(x_{max}^{GCM} / \theta^{GCM})) / \theta^{GCM,cen}) \quad (6)$$

Onde $Y_{max}^{GCM, cen}$ seria “equivalência de quantis” entre o período base e o período futuro.

(7) Encontrar a função mais apropriada para relacionar $Y_{max,y}^{STN}$ e X_{max}^{GCM} . Como se utilizou uma distribuição de probabilidade de Gumbel, pode-se admitir que a relação entre essas duas variáveis é linear (Equações 7 e 8):

$$Y_{max,y}^{STN} = f(X_{max}^{GCM}) \quad (7)$$

$$Y_{max,y}^{STN} = a_1 x X_{max}^{GCM} + b_1 \quad (8)$$

(8) De maneira análoga, deve-se encontrar a função mais apropriada para relacionar $Y_{max}^{GCM, cen}$ e X_{max}^{GCM} (Equações 9 e 10):

$$Y_{max}^{GCM, cen} = f(X_{max}^{GCM}) \quad (9)$$

$$Y_{max}^{GCM, cen} = a_2 x X_{max}^{GCM} + b_2 \quad (10)$$

(9) Para calcular os máximos sub-diários dos cenários futuros, deve-se combinar as Equações 8 e 9, substituindo X_{max}^{GCM} por $Y_{max}^{GCM, cen}$ na Equação 10, obtendo-se a Equação 11:

$$X_{max,y}^{STN, futura} = a_1 x \left[\frac{X_{max}^{GCM, futura} - b_2}{a_2} \right] + b_1 \quad (11)$$

Schardong et al. (2018) afirmam que a distribuição de Gumbel utilizada no método tem sido amplamente recomendada para estudos hidrológicos e adotada como padrão pela agência *Environment and Climate Change Canada* (ECCC). A organização também sugere a utilização do método dos momentos no procedimento estatístico para estimar parâmetros de distribuição. A quantidade dos dados sub-diários observados utilizados para calcular as curvas IDF deve ser igual ou superior a 10 anos, sendo este valor também estipulado pela ECCC (SCHARDONG et al., 2018). Assim, utilizou-se como base para a correção de viés 10 anos (2008-2017) de

dados horários, sendo a entrada os máximos de 1, 2, 4, 6, 12, 18 e 24 horas. Os dados dos máximos históricos dos GCMs foram de 30 anos (1976-2005) e o de máximos futuros dos GCMs foram 95 anos (2006-2100), também como os utilizados por Srivastav et al. (2014b), assim como os períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos.

Para verificar se o ajuste da distribuição de Gumbel aos dados foi satisfatório, utilizou-se o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (KS; Equação 12) com significância de 1% e 5%. Considerando-se uma amostra de 30 elementos (GCM histórico), o valor crítico será de 0,290 para significância de 1% e 0,242 para significância de 5%. Já para uma amostra de 95 elementos (cenários futuros), o valor crítico será de 0,167 e 0,140 (para 1% e 5% respectivamente).

$$D_{max} = \max |P_0(x) - P_s(x)| \quad (12)$$

Onde D_{max} é o valor crítico do teste KS; $P_0(x)$ é a precipitação empírica; $P_s(x)$ é a precipitação teórica obtida através da PDF.

3.1.5 Equações de Chuvas Intensas

Sherman, em 1931, estabeleceu uma relação matemática que expressava as curvas IDF, e que atualmente é a mais utilizada (Equação 13).

$$I = \frac{a \cdot Tr^b}{(t+c)^d} \quad (13)$$

Onde I é a intensidade de chuva (mm/h); Tr é o período de retorno (anos); t é a duração em min; a , b , c e d são constantes específicas de cada localidade.

Para o cálculo da constante “ c ”, utilizou-se o método citado por Sabóia et al. (2017) e Sobrinho et al. (2014), no qual dentro dos N anos de dados utilizados no estudo, há a ocorrência de eventos extremos a cada 5 anos. Assim, dividiram-se os 95 anos utilizados para as projeções por 5 anos e o resultado aproximou-se mais do Tr de 25 anos, sendo o escolhido, definindo o parâmetro “ A ” (Equação 14).

$$I = \frac{A}{(t+c)^d} \quad (14)$$

Em seguida foi realizada uma anamorfose, linearizando os dados através de um gráfico bilogarátmico entre I e t para o Tr definido no método anterior. Nesse gráfico foram denominados os pontos (I_1, t_1) e (I_2, t_2) como sendo os pontos inicial e final da curva, respectivamente. Também foi determinado a partir desta curva o ponto I_3 através da Equação 15 e o t_3 utilizando a equação gerada no gráfico pela relação de potência, que foi a que melhor se ajustou aos dados.

$$I_3 = \sqrt{I_1 \cdot I_2} \quad (15)$$

A partir disto, a constante “c” pode ser obtida pela Equação 16.

$$c = \frac{t_3^2 - t_1 \cdot t_2}{t_1 + t_2 - 2 \cdot t_3} \quad (16)$$

Posteriormente, foi plotado novamente um gráfico bilogarátmico das intensidades do Tr escolhido em função das durações deslocadas pela constante c ($t+c$), para a determinação das constantes “A” e “d”, verificando-se que o melhor ajuste aos pontos é novamente de potência, gerando a Equação 17, com a constante “d”.

$$I = A \cdot (t + c)^{-d} \quad (17)$$

O valor da constante “d” utilizado foi o gerado para o Tr escolhido, enquanto a constante “A” irá variar para obtenção das constantes “a” e “b”. Para cada Tr foi criado um gráfico semelhante ao anterior, que forneceu novos valores para o parâmetro “A”. Novamente criou-se um gráfico bilogarátmico entre os valores de “A” obtidos e todos os Tr . Assim, depois do ajuste da relação de potência a Equação 18 foi gerada, na qual pode-se retirar os valores das constantes “a” e “b”.

$$y = a \cdot x^b \quad (18)$$

3.2 CURVAS DE PERMANÊNCIA

3.2.1 Área de estudo e dados de vazão

O Rio Amazonas é o maior sistema fluvial do mundo em termos de drenagem e vazão, recebendo os principais afluentes da bacia amazônica (Figura 13). Drena uma área maior que $6,5 \times 10^6 \text{ km}^2$ e sua vazão média é de quase $209.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, contribuindo com aproximadamente 20% do fluxo global anual de água doce para os

oceanos (ESPINOZA-VILLAR et al., 2018). Os dados de vazão diária utilizados neste estudo foram obtidos no sistema HIDROWEB (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>) da Agência Nacional de Águas (ANA, 2020). A Tabela 3 mostra as sete estações fluviométricas selecionadas com dados disponíveis, que estão localizadas na extensão brasileira do rio Amazonas.

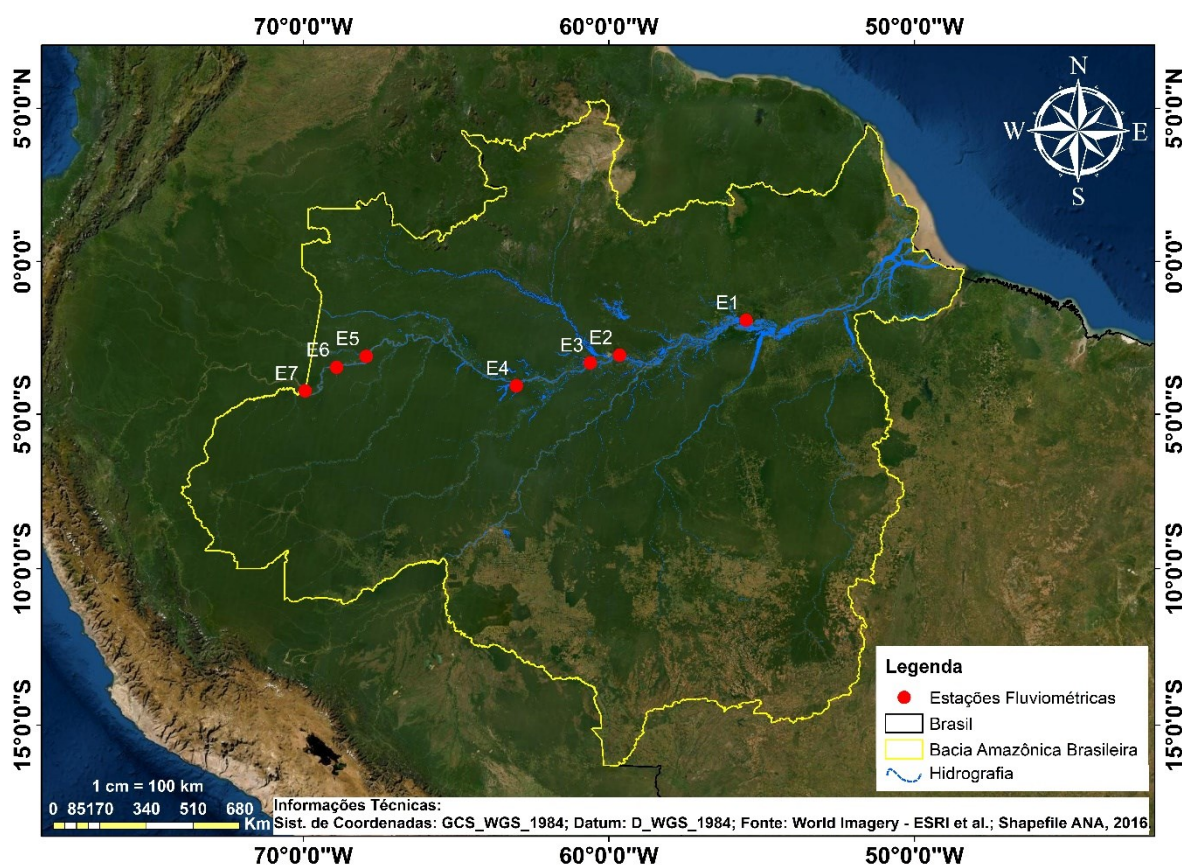


Figura 13 - Área de estudo e localização de estações fluviométricas

Tabela 3 - Estações de medição de vazão usadas como pontos de estudo

| Ponto | Código ANA | Estações | Vazão média ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) | Período de anos | Porcentagem de falhas |
|-------|------------|-----------------------|--|-----------------|-----------------------|
| E1 | 17050001 | Óbidos | 174.001,48 | 1968 - 2019 | 2,08% |
| E2 | 15030000 | Jatuarana | 126.019,98 | 1977 - 2015 | 0,99% |
| E3 | 14100000 | Manacapuru | 102.122,37 | 1972 - 2018 | 4,37% |
| E4 | 13150000 | Itapéua | 86.809,63 | 1971 - 2017 | 4,16% |
| E5 | 11500000 | Santo Antônio do Içá | 57.724,17 | 1973 - 2019 | 3,48% |
| E6 | 11400000 | São Paulo de Olivença | 46.813,59 | 1973 - 2019 | 2,72% |
| E7 | 10100000 | Tabatinga | 3.7871,80 | 1995 - 2017 | 3,20% |

3.2.2 Escolha de GHM e suas simulações

Em sua primeira fase (Fast Track), o ISIMIP forneceu o primeiro conjunto de projeções de impacto multi-modelos consistentes e intersetoriais (WARSZAWSKI et al., 2014). Numa segunda fase, o primeiro protocolo de simulação (ISIMIP2a) foi dedicado a simulações históricas, com vista à avaliação detalhada dos modelos. Neste trabalho, foi escolhido o protocolo mais recente, o ISIMIP2b, pois foi desenvolvido em resposta ao Relatório Especial do IPCC que se previa atingir 1,5 °C da temperatura média global até o final do século. Centros de pesquisa em todo o mundo disponibilizaram dados de saída de modelo para o projeto ISIMIP por meio do site da ESGF (<https://esg.pik-potsdam.de/search/isimip/>).

Neste trabalho, devido à disponibilidade de dados na plataforma ISIMIP, optou-se por escolher um cenário de emissões intermediárias (RCP 6.0) e o cenário de altas emissões RCP 8.5 para realizar as análises. Vale ressaltar que as simulações de GHMs para uso futuro como dados de entrada incluem um conjunto de variáveis atmosféricas geradas por quatro GCMs: GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR e MIROC5. Tendo em vista a disponibilidade de dados para vazões diárias futuras, buscou-se as combinações GCM-GHM que mais se adequassem aos cenários escolhidos e tivessem aplicação comprovada em trabalhos consolidados na comunidade científica (DÖLL et al., 2020; SAEED et al., 2018). Com o objetivo de otimizar o tempo de análise, mas ao mesmo tempo obter resultados consistentes, optou-se por utilizar dados simulados de GHM a partir das variáveis dos GCMs MIROC5 e HadGEM2-ES, sendo entre todas as opções, dois dos modelos mais utilizados em estudos de clima no Brasil e na Amazônia (COSTA et al., 2020; DERECZYNSKI et al., 2020; ALMAGRO et al., 2017).

O GHM escolhido foi o WaterGAP2, pois é um dos poucos que passou por um processo de calibração geral. Por esse motivo, ele supera outros GHMs em várias bacias hidrográficas ao redor do mundo, tendo um desempenho melhor na maioria das simulações (ZAHERPOUR et al., 2019). Os dados obtidos foram lidos para os mesmos pontos de localização das estações fluviométricas (Tabela 3). Como os dados dos GHMs vêm em formato de grade, a leitura também foi realizada por meio da ferramenta de análise e interpolação de dados FERRET (FERRET, 2019).

3.2.3 Validação de dados e critérios de desempenho

A validação foi aplicada por meio de FDCs com os dados diários da série total disponível para cada estação fluviométrica (Tabela 3) e dados diários dos GHMs. Para estes dados simulados optou-se por combinar os dados históricos (1850-2005) com os de cada RCP (2006-2099) para obter séries correspondentes aos mesmos períodos dos dados observados (Historical + RCP 6.0 e Historical + RCP 8.5). Como base para a avaliação de desempenho, o trabalho de Moriasi et al. (2007) recomendou três estatísticas quantitativas: eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE – Equação 19); o viés percentual (PBIAS - Equação 20) e a razão entre a raiz quadrada do erro médio (RMSE) e o desvio padrão dos dados medidos (RSR – Equação 21). Os autores também definiram a classificação de desempenho para cada variável (Tabela 4).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Obs - Sim)^2}{\sum_{i=1}^n (Obs - Obs\ média)^2} \quad (19)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Obs - Sim) * 100}{\sum_{i=1}^n Obs} \quad (20)$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Obs - Sim)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Obs - Obs\ média)^2}} \quad (21)$$

Onde Obs e Sim são as vazões observadas e simuladas, respectivamente, e n é o número de pontos de dados observados.

Tabela 4 - Classificações de desempenho geral para estatísticas recomendadas

| Desempenho | RSR | NSE | PBIAS (%) |
|----------------|---------------------------|------------------------|------------------------------|
| Muito bom | $0,00 \leq RSR \leq 0,50$ | $0,75 < NSE \leq 1,00$ | $PBIAS < \pm 10$ |
| Bom | $0,50 < RSR \leq 0,60$ | $0,65 < NSE \leq 0,75$ | $\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$ |
| Satisfatório | $0,60 < RSR \leq 0,70$ | $0,50 < NSE \leq 0,65$ | $\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$ |
| Insatisfatório | $RSR > 0,70$ | $NSE \leq 0,50$ | $PBIAS \geq \pm 25$ |

Fonte: Adaptado de Moriasi et al. (2007)

3.2.4 Elaboração de curvas de permanência e análise de volume

As FDCs foram elaboradas a partir do método de Weibull. Foram utilizados períodos de 20 anos para manter a consistência e separar janelas de tempo

semelhantes até o final do século. As FDCs do período base foram criados a partir dos últimos 20 anos de dados observados de cada estação para comparação com os cenários futuros (definidos a partir de 2020). Conforme sugerido por Strayer et al. (2014), para uma análise mais pontual, optou-se por apurar os volumes decadais no mesmo período das FDCs, uma vez que a variabilidade interdimensional dos volumes inclui muitos processos de mudança (uso do solo, eventos climáticos extremos, mudança morfológica na inundação).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CURVAS IDF

4.1.1 Variabilidade da chuva baseada nos GCMS

Antes da elaboração das curvas IDF realizou-se uma análise prévia dos dados que foram gerados pelos modelos GCMS, para verificar as possíveis mudanças no regime pluviométrico nos próximos 100 anos na área de estudo. As médias dos dados pluviométricos máximos diários e chuvas anuais foram comparados entre suas respectivas bases históricas e suas projeções futuras. Para isso, foi escolhido o período de 1976 a 2000 e 2076 a 2100 para todos os modelos, nos dois cenários RCPs escolhidos. Na Figura 14, observa-se as variações das médias de chuvas máximas diárias.

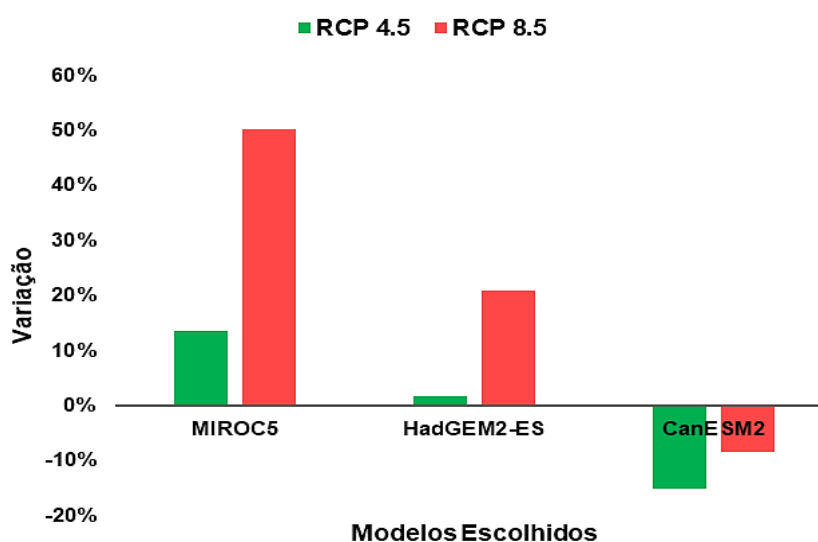


Figura 14 - Variação na média das intensidades máximas diárias de 2076 a 2100 com base no histórico GCM (1976-2000)

O modelo MIROC5 apresentou a maior variação para o RCP 8.5 (50,22%), valor quase quatro vezes maior do que para o cenário RCP 4.5 (13,41%). Para o modelo HadGEM2-ES novamente, o cenário RCP 8.5 também apresentou uma maior variabilidade (20,94%) quando comparado ao cenário RCP (1,56%). Isso demonstra que no cenário mais realista, as chuvas máximas irão aumentar, assim como Agilan e Umamahesh (2016) comentaram em seu estudo na região da Índia, criando um alerta para que a preocupação no dimensionamento de obras de engenharia de recursos hídricos seja intensificada. O modelo CanESM2 foi o que

diferiu dos outros, já que em seus dois cenários, ele demonstrou uma diminuição na variação. No RCP 4.5 foi de -15,07% e no RCP 8.5 foi -8,46%. Estes valores podem estar relacionados à diminuição dos volumes anuais de chuva, como pode-se observar na Figura 15.

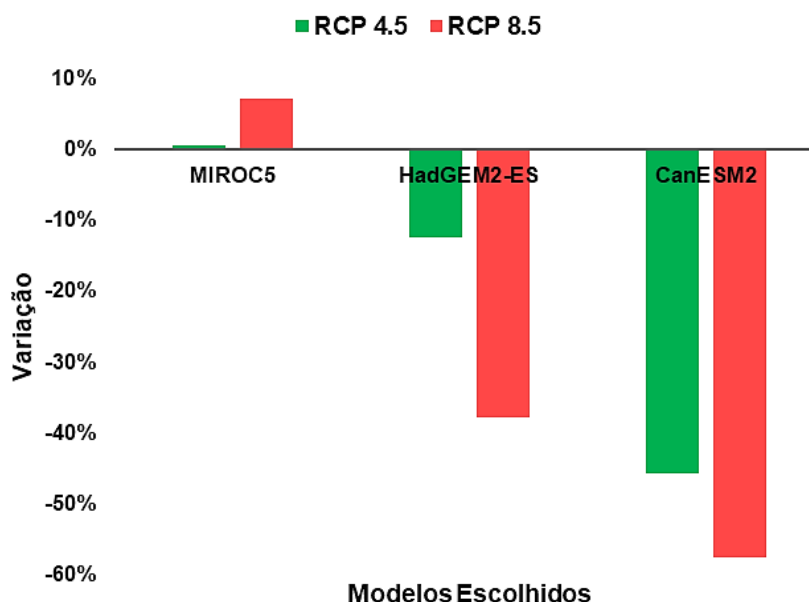


Figura 15 - Variação na média dos totais anuais de chuva de 2076 a 2100 com base no histórico GCM (1976-2000)

É notório em diversas pesquisas, como a de Pachauri e Meyer (2014), que a chuva irá diminuir na maioria dos resultados dos modelos do CMIP5, tanto para o cenário RCP 4.5 quanto para o RCP 8.5. No segundo, a diminuição será ainda mais severa, como se comprova analisando a Figura 15. O modelo CanESM2 demonstrou uma diminuição alarmante para os dois cenários, mais da metade (-57,64%) para o RCP 8.5 e de -45,74% para o outro cenário. Os valores também foram significativos nas projeções do HadGEM2-ES (RCP 8.5 foi de -37,89% e RCP 4.5 de -12,37%). O modelo MIROC5 não apresentou diminuições na precipitação pluviométrica, e os dados de elevação não foram relevantes, sendo 0,52% para RCP 4.5 e 7,29% para o RCP 8.5.

4.1.2 Aplicação do teste de Kolmogorov-Smirnov

O valor do teste de aderência demonstrou que, mesmo utilizando as significâncias de 1% e 5%, a maioria das projeções de séries de chuvas máximas

geradas pelos modelos globais utilizados ajustaram-se adequadamente a distribuição de Gumbel (Tabela 5).

Tabela 5 - Valores do teste de Kolmogorov-Smirnov

| Modelos | Resultado do teste de aderência | | |
|-------------------|---------------------------------|-------|-------|
| | Histórico | 4.5 | 8.5 |
| MIROC5 | 0,132 | 0,077 | 0,080 |
| HagGEM2-ES | 0,133 | 0,074 | 0,139 |
| CanESM2 | 0,159 | 0,135 | 0,199 |

Ocorreu apenas uma aderência que não foi satisfatória, a do modelo CanESM2 para o cenário futuro mais “agressivo” (RCP 8.5), permanecendo acima dos valores críticos de 0,167 e 0,140 (1% e 5% respectivamente), o que pode significar que a distribuição de Gumbel não é ideal, nesse caso, para as projeções de séries de chuvas. Levando em consideração que o teste é calculado através da maior diferença entre as CDFs empírica e teórica, um fato a se notar é que o modelo CanESM2 apresentou os maiores valores entre todos, o que pode supor que esse modelo é o menos adequado para realizar as projeções futuras esperadas neste trabalho.

4.1.3 Equações de chuvas intensas e curvas IDF projetadas

Para uma melhor análise, as curvas IDF projetadas foram comparadas entre si e também com a obtida por Souza et al. (2012) para o mesmo ponto. Essa curva está sendo considerada como a atual para região de estudo. Os autores desenvolveram equações de chuvas intensas para diversas estações com dados históricos de no mínimo 10 anos. A curva desenvolvida pelos autores foi denominada de “Souza et al.”, para facilitar a discussão. Na Tabela 6 observa-se essa equação e as projetadas para os cenários futuros, juntamente com seus respectivos valores de ajuste com relação as curvas.

Tabela 6 - Equações para novos cenários e o coeficiente R^2 para os ajustes

| Equações – Curvas IDF | | | | |
|-----------------------|--|--------|--|--------|
| Souza et al. (2012) | $I = \frac{1073,27 \cdot Tr^{0,1317}}{(t + 9,785)^{0,7242}}$ | | $R^2 = 0,9939$ | |
| Modelos | RCP 4.5 | R^2 | RCP 8.5 | R^2 |
| CanESM2 | $I = \frac{2038 \cdot Tr^{0,294}}{(t + 14,773)^{0,919}}$ | 0,9965 | $I = \frac{2012,3 \cdot Tr^{0,283}}{(t + 14)^{0,915}}$ | 0,9964 |
| HagGEM2-ES | $I = \frac{2350 \cdot Tr^{0,177}}{(t + 14,385)^{0,905}}$ | 0,9967 | $I = \frac{2516,6 \cdot Tr^{0,242}}{(t + 14,379)^{0,920}}$ | 0,9964 |
| MIROC5 | $I = \frac{3583,2 \cdot Tr^{0,267}}{(t + 13,335)^{0,936}}$ | 0,9955 | $I = \frac{4087,4 \cdot Tr^{0,284}}{(t + 13,45)^{0,943}}$ | 0,9954 |

Vale ressaltar que o Tr de 25 e 100 anos foram utilizados para gerar as curvas IDF da comparação a seguir, já que é necessário explicitar possíveis mudanças nos padrões de chuvas causadas por mudanças climáticas em curto e longo prazo.

Modelo CanESM2

Nas curvas IDF geradas pelo modelo CanESM2, observa-se uma proximidade entre os valores das curvas para os dois cenários (em ambos TRs), o que demonstra pouca variação entre as intensidades em cada uma. Nas Tabelas 7 e 8 observam-se as quantidades totais de precipitação pluviométrica apresentando as intensidades de chuva para diferentes durações em diferentes períodos de retorno.

Tabela 7 - Resultados do modelo CanESM2 para o período de retorno de 25 anos

| Duração (min) | Souza et al. (2012) | | RCP 4.5 | | RCP 8.5 | |
|---------------|---------------------|--------------------|------------|--------------------|------------|--------------------|
| | Total (mm) | Intensidade (mm/h) | Total (mm) | Intensidade (mm/h) | Total (mm) | Intensidade (mm/h) |
| 60 | 75,78 | 75,78 | 99,83 | 99,83 | 97,33 | 97,33 |
| 120 | 96,71 | 48,35 | 127,81 | 63,90 | 124,66 | 62,33 |
| 240 | 120,38 | 30,10 | 139,39 | 34,85 | 136,05 | 34,01 |
| 360 | 135,91 | 22,65 | 144,67 | 24,11 | 141,39 | 23,57 |
| 720 | 166,14 | 13,84 | 147,13 | 12,26 | 144,17 | 12,01 |
| 1.080 | 186,40 | 10,36 | 161,83 | 8,99 | 158,39 | 8,80 |
| 1.440 | 202,12 | 8,42 | 163,90 | 6,83 | 160,42 | 6,68 |

Tabela 8 - Resultados do modelo CanESM2 para o período de retorno de 100 anos

| Duração (min) | Souza et al. (2012) | | RCP 4.5 | | RCP 8.5 | |
|---------------|---------------------|--------------------|------------|--------------------|------------|--------------------|
| | Total (mm) | Intensidade (mm/h) | Total (mm) | Intensidade (mm/h) | Total (mm) | Intensidade (mm/h) |
| 60 | 90,96 | 90,96 | 123,92 | 123,92 | 120,07 | 120,07 |
| 120 | 116,08 | 58,04 | 158,11 | 79,06 | 153,26 | 76,63 |
| 240 | 144,49 | 36,12 | 171,60 | 42,90 | 166,45 | 41,61 |
| 360 | 163,14 | 27,19 | 176,26 | 29,38 | 171,20 | 28,53 |
| 720 | 199,42 | 16,62 | 175,60 | 14,63 | 171,04 | 14,25 |
| 1.080 | 223,74 | 12,43 | 194,99 | 10,83 | 189,69 | 10,54 |
| 1.440 | 242,61 | 10,11 | 197,43 | 8,23 | 192,06 | 8,00 |

Verifica-se que a principal diferença entre as curvas IDF nos TRs são as intensidades, já que seu comportamento é idêntico, observando também que as do TR 100 são maiores. Quando comparadas com a de Souza et al., percebe-se uma diferença em torno de 30% nas curvas dos cenários futuros, até aproximadamente os 240 minutos, quando as curvas começam a ficar sobrepostas. Para este modelo as diferenças não foram altas entre os dois cenários (Figura 16 e 17), sendo para o RCP 4.5 uma diferença de 31,73% (TR 25) e 36,24% (TR 100), 28,43% para o RCP 8.5 (TR 25) e 32% (TR 100). Para a duração de 1.440 minutos, as curvas subestimaram os valores de Souza et al. (2012), apresentando uma diferença média de -20% nos dois TRs.

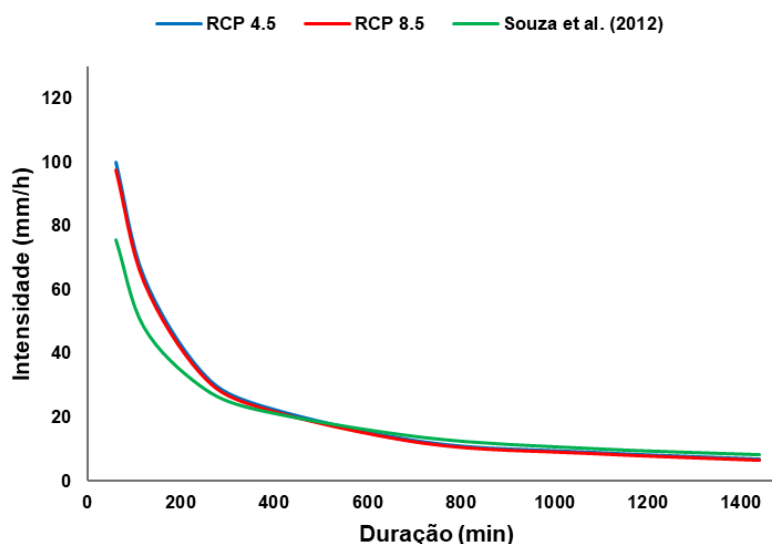


Figura 16 - Comparação entre as Curvas IDF projetadas para os RCP 4.5 e RCP 8.5 do modelo CanESM2 e a de Souza et al. (2012), para o Tr de 25 anos

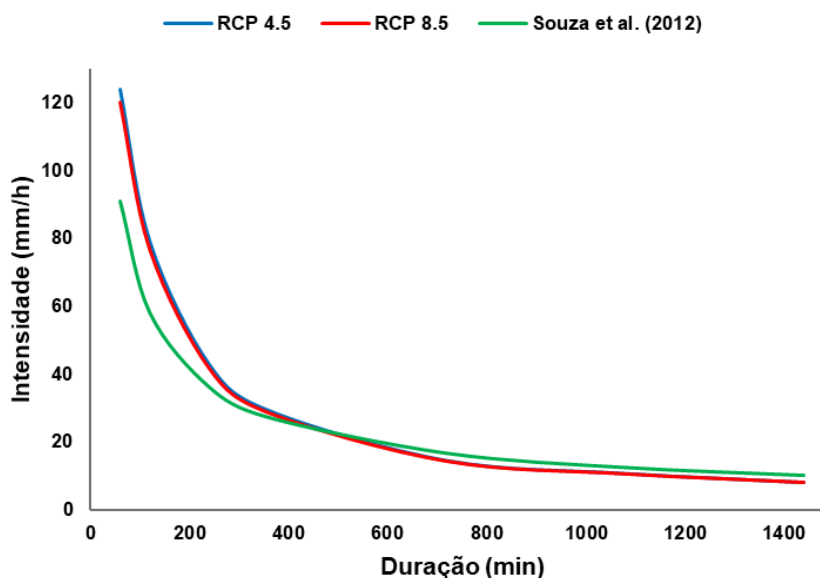


Figura 17 - Comparação entre as Curvas IDF projetadas para os RCP 4.5 e RCP 8.5 do modelo CanESM2 e a de Souza et al. (2012), para o T_r de 100 anos

Espera-se que quando comparadas, as curvas para os cenários futuros tenham valores diferentes das obtidas por Souza et al. (2012), já que os autores utilizaram dados históricos para criar curvas para os dias atuais. Ressalta-se que os autores utilizaram um método considerado estacionário (método das relações) para obter estas curvas, o que reafirma ainda mais o fato de que as curvas projetadas possivelmente irão possuir valores diferentes. A diferença observada pode significar também que este modelo não é eficiente para este tipo de metodologia, o que reafirma os resultados obtidos durante a aplicação do teste KS. Isso corrobora com os resultados de Sabóia (2016), que observa a baixa resolução espacial do modelo CanESM2, ou seja, $2,8^\circ \times 2,8^\circ$ (Longitude x Latitude). Este detalhe pode ser o responsável por essa ineficiência, o que segundo Silva et al. (2018) é perigoso, pois dimensionar sistemas com base em projeções que não representam a realidade de mudanças climáticas pode não ser suficiente para mitigar os impactos futuros sobre a população.

Modelo HadGEM2-ES

Verificando-se as Tabelas 9 e 10 observam-se que os cenários, gerados pelo modelo HadGEM2-ES, apresentaram valores um pouco mais diferentes entre si.

Tabela 9 - Resultados do modelo HadGEM2-ES para o período de retorno de 25 anos

| Duração (min) | Souza et al. (2012) | | RCP 4.5 | | RCP 8.5 | |
|---------------|---------------------|--------------------|------------|--------------------|------------|--------------------|
| | Total (mm) | Intensidade (mm/h) | Total (mm) | Intensidade (mm/h) | Total (mm) | Intensidade (mm/h) |
| 60 | 75,78 | 75,78 | 82,13 | 82,13 | 102,93 | 102,93 |
| 120 | 96,71 | 48,35 | 105,54 | 52,77 | 131,71 | 65,86 |
| 240 | 120,38 | 30,10 | 115,73 | 28,93 | 143,54 | 35,89 |
| 360 | 135,91 | 22,65 | 121,47 | 20,24 | 148,74 | 24,79 |
| 720 | 166,14 | 13,84 | 126,21 | 10,52 | 150,80 | 12,57 |
| 1.080 | 186,40 | 10,36 | 137,47 | 7,64 | 166,11 | 9,23 |
| 1.440 | 202,12 | 8,42 | 139,27 | 5,80 | 168,22 | 7,01 |

Tabela 10 - Resultados do modelo HadGEM2-ES para o período de retorno de 100 anos

| Duração (min) | Souza et al. (2012) | | RCP 4.5 | | RCP 8.5 | |
|---------------|---------------------|--------------------|------------|--------------------|------------|--------------------|
| | Total (mm) | Intensidade (mm/h) | Total (mm) | Intensidade (mm/h) | Total (mm) | Intensidade (mm/h) |
| 60 | 90,96 | 90,96 | 94,82 | 94,82 | 124,39 | 124,39 |
| 120 | 116,08 | 58,04 | 121,51 | 60,75 | 158,70 | 79,35 |
| 240 | 144,49 | 36,12 | 132,70 | 33,17 | 172,23 | 43,06 |
| 360 | 163,14 | 27,19 | 138,11 | 23,02 | 176,88 | 29,48 |
| 720 | 199,42 | 16,62 | 141,21 | 11,77 | 176,16 | 14,68 |
| 1.080 | 223,74 | 12,43 | 154,94 | 8,61 | 195,64 | 10,87 |
| 1.440 | 242,61 | 10,11 | 156,93 | 6,54 | 198,08 | 8,25 |

No cenário RCP 4.5 as intensidades mantiveram-se acima da curva definida por Souza et al. (2012) até aproximadamente 180 minutos (Figuras 18 e 19), com cerca de 8% (TR 25) de diferença e 4% (TR 100), quando começaram a apresentar valores abaixo, chegando até cerca -31,09% (TR 25) e -35,31% (TR 100). Já no cenário RCP 8.5, inicialmente as curvas projetadas e a de Souza et al. apresentaram uma distância maior, cerca de 35% de diferença entre si nos dois TRs. A curva projetada neste cenário manteve-se superior à curva de Souza et al. até pouco mais de 400 minutos, ponto onde quando começou a diminuir, chegando ao final abaixo da curva mencionada, com uma diferença de -16,77% (TR 25) e -18,35% (TR 100).

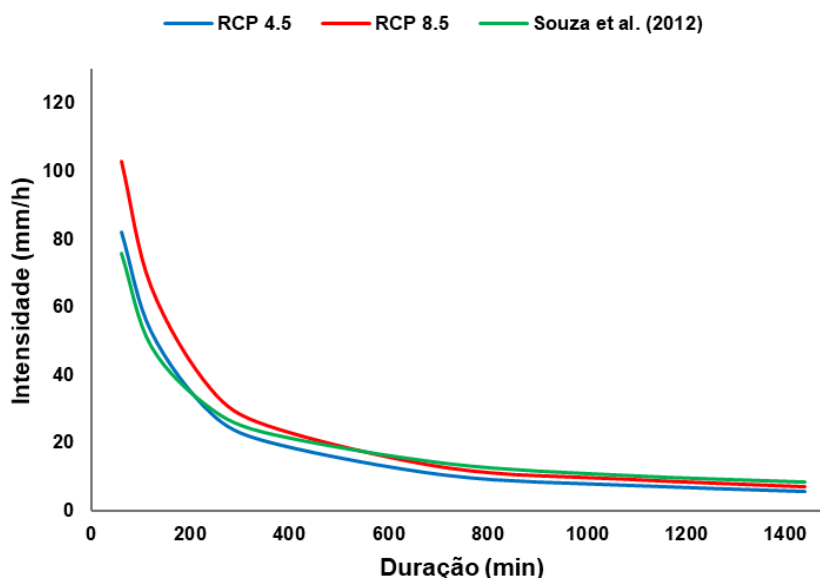


Figura 18 - Comparação entre as Curvas IDF projetadas para os RCP 4.5 e RCP 8.5 do modelo HadGEM2-ES e a de Souza et al. (2012), para o Tr de 25 anos

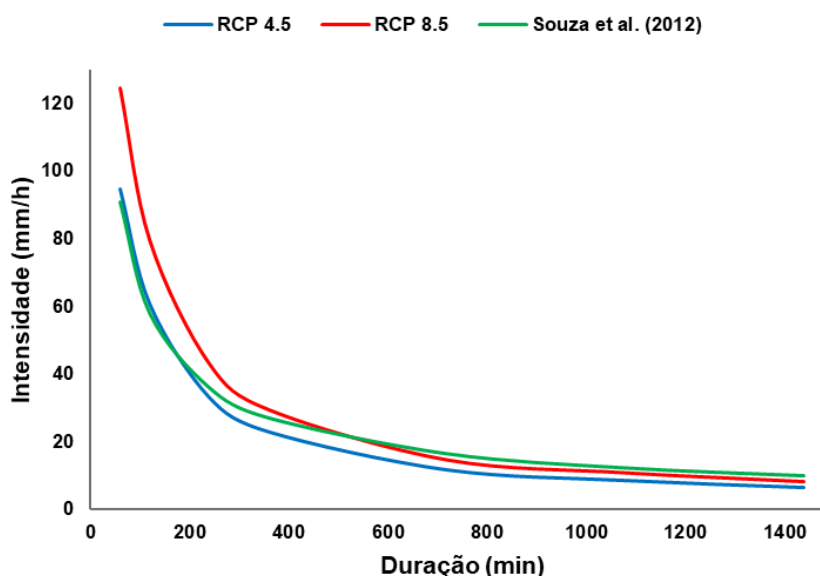


Figura 19 - Comparação entre as Curvas IDF projetadas para os RCP 4.5 e RCP 8.5 do modelo HadGEM2-ES e a de Souza et al. (2012), para o Tr de 100 anos

Pode-se dizer que o modelo HadGEM2-ES apresentou resultados razoáveis para as curvas IDF, porém alguns valores continuaram a se sobrepôr e ficar muito próximos da curva de Souza et al. (2012). Nesse caso, o *Downscaling* estatístico pode não ter sido suficiente para refinar os dados e obter resultados mais satisfatórios, o que por sua vez, poderia ser obtido facilmente se o modelo sofresse um *Downscaling* dinâmico. Assim como no estudo de Schardong et al. (2014b), a

metodologia se mostrou eficaz e de fácil aplicação, com baixo uso de recursos computacionais. Contudo, a tendência é a utilização de modelos regionais mais detalhados, com melhor resolução espacial e temporal. Isso é perceptível no trabalho de Liew et al. (2014), que utilizaram um modelo regional mais refinado para gerar as curvas, chamado WRF/ERA40, e obtiveram melhores resultados na projeção das curvas IDF.

Modelo MIROC5

O modelo MIROC5 foi o que apresentou melhores resultados. Nas Tabelas 11 e 12 nota-se que os valores de intensidades foram mais altos que nos outros modelos, possivelmente representando mais fielmente, como as mudanças climáticas irão afetar as chuvas.

Tabela 11 - Resultados do modelo MIROC5 para o período de retorno de 25 anos

| Duração (min) | Souza et al. (2012) | | RCP 4.5 | | RCP 8.5 | |
|------------------|---------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|---------------|-----------------------|
| | Total (mm) | Intensidade (mm/h) | Total (mm) | Intensidade (mm/h) | Total (mm) | Intensidade (mm/h) |
| 60 | 75,78 | 75,78 | 150,44 | 150,44 | 176,43 | 176,43 |
| 120 | 96,71 | 48,35 | 191,46 | 95,73 | 224,14 | 112,07 |
| 240 | 120,38 | 30,10 | 207,04 | 51,76 | 241,78 | 60,45 |
| 360 | 135,91 | 22,65 | 211,01 | 35,17 | 245,08 | 40,85 |
| 720 | 166,14 | 13,84 | 206,94 | 17,24 | 237,65 | 19,80 |
| 1.080 | 186,40 | 10,36 | 231,49 | 12,86 | 267,26 | 14,85 |
| 1.440 | 202,12 | 8,42 | 234,32 | 9,76 | 270,48 | 11,27 |

Tabela 12 - Resultados do modelo MIROC5 para o período de retorno de 100 anos

| Duração (min) | Souza et al. (2012) | | RCP 4.5 | | RCP 8.5 | |
|------------------|---------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|---------------|-----------------------|
| | Total (mm) | Intensidade (mm/h) | Total (mm) | Intensidade (mm/h) | Total (mm) | Intensidade (mm/h) |
| 60 | 90,96 | 90,96 | 186,18 | 186,18 | 221,17 | 221,17 |
| 120 | 116,08 | 58,04 | 236,41 | 118,20 | 280,42 | 140,21 |
| 240 | 144,49 | 36,12 | 254,82 | 63,70 | 301,59 | 75,40 |
| 360 | 163,14 | 27,19 | 257,86 | 42,98 | 303,73 | 50,62 |
| 720 | 199,42 | 16,62 | 249,17 | 20,76 | 290,53 | 24,21 |
| 1.080 | 223,74 | 12,43 | 280,68 | 15,59 | 328,84 | 18,27 |
| 1.440 | 242,61 | 10,11 | 284,05 | 11,84 | 332,73 | 13,86 |

Nas Figuras 20 e 21 nota-se que as maiores intensidades foram para o RCP 8.5, que quando comparada a curva de Souza et al. (2012), apresentou uma diferença de 132,81% para 60 minutos (TR 25) e 143,15% (TR 100), diminuindo,

chegando até 33,82% (TR 25) e -37,15% (TR 100) nos 1.440 minutos. O RCP 4.5 manteve-se com intensidades menores que o outro cenário, porém, elas mantiveram-se também acima da curva de Souza et al. (2012), com diferenças de 98,51% (60 min) até 15,93% (1.440 min). Já para o TR 25 as diferenças foram de 104,68% (60 min) até 17,08% (1.440 min) no TR 100.

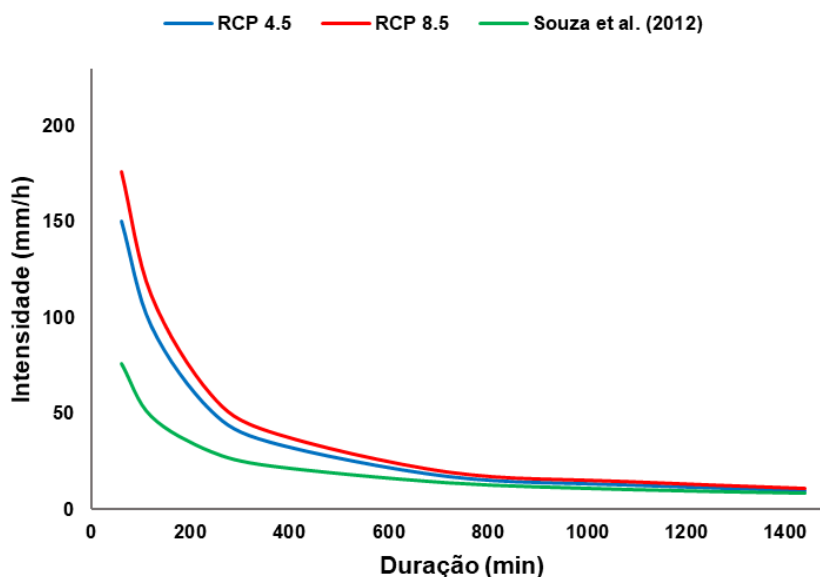


Figura 20 - Comparação entre as Curvas IDF projetadas para os RCP 4.5 e RCP 8.5 do modelo MIROC5 e a de Souza et al. (2012), para o T_r de 25 anos

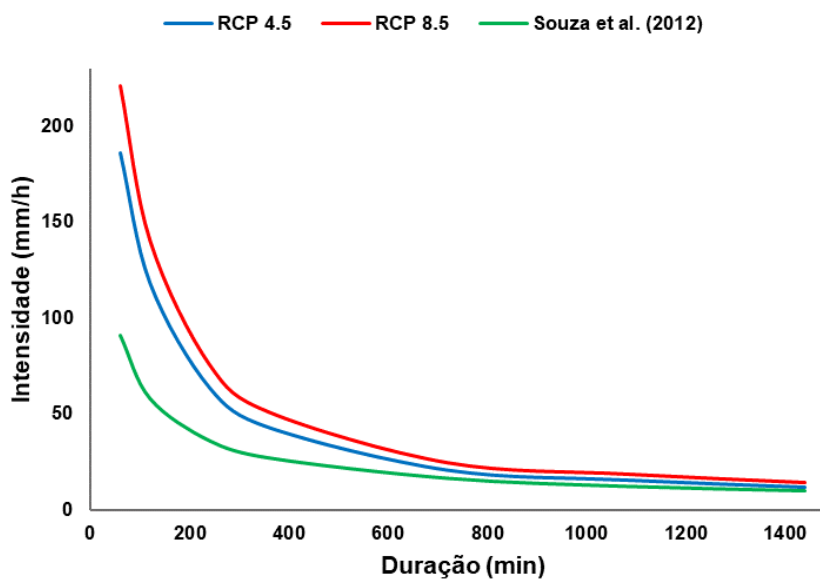


Figura 21 - Comparação entre as Curvas IDF projetadas para os RCP 4.5 e RCP 8.5 do modelo MIROC5 e a de Souza et al. (2012), para o T_r de 100 anos

Estes resultados contribuem para reafirmar a pesquisa de Alemseged e Tom (2015). Os autores realizaram uma análise de variáveis climáticas na Etiópia (área também sob influência da ZCIT), utilizando vários modelos, entre eles os mesmos usados neste trabalho, e concluíram que o MIROC5 é superior aos outros modelos com relação a captar anomalias de chuva. Watanabe et al. (2010) comentaram que o MIROC5 simula bem precipitação em campos atmosféricos médios zonais, nos campos subaquáticos do oceano equatorial, pois mesmo tendo uma resolução superior, a principal diferencial está em atualizar os esquemas de parametrização no clima do modelo, que o torna obviamente bem superior em alguns aspectos do seu modelo antigo (MIROC3.2).

4.2 CURVAS DE PERMANÊNCIA

4.2.1 Validação de dados do GHM

Na validação, a maioria dos resultados foi classificada como "Muito Bom", com apenas quatro pontos de dados (RSR: 0,54; NSE: 0,70; PBIAS: 11,57 e -11,58) na classe "Bom" para Historical + RCP 6.0 e um (PBIAS: 12,00) no Historical + RCP 8.5 para as validações do WaterGAP2-MIROC5 (Tabela 13). Para as validações de WaterGAP2-HadGEM2-ES (Tabela 14), houve três pontos de dados (NSE: 0,74; PBIAS: 11,46 e 13,75) na classe "Bom" para Historical + RCP 6.0 e apresentando mais divergência em Historical + RCP 8.5 com cinco pontos também nesta classe (RSR: 0,54; NSE: 0,70; PBIAS: 12,45 / 14,49 / 10,98). Essas pequenas divergências possivelmente ocorrem devido ao posicionamento em que as estações estão localizadas dentro da grade de simulação do GHM, o que, segundo Asadieh e Krakauer (2017), leva a diferenças quando comparadas aos dados observados. Os autores afirmam que devido às pequenas variações na malha da rede fluvial global utilizada, ou seja, as células, principalmente aquelas com pequenas variações médias, podem cair em diferentes quadrantes do corpo d'água estudado.

Tabela 13 - Resultados de desempenho WaterGAP2 (MIROC5)

| Estação | Historical + RCP 6.0 | | | Historical + RCP 8.5 | | |
|---------|----------------------|------|--------|----------------------|------|-------|
| | RSR | NSE | PBIAS | RSR | NSE | PBIAS |
| E1 | 0,10 | 0,98 | 1,14 | 0,12 | 0,98 | 2,58 |
| E2 | 0,11 | 0,98 | 1,25 | 0,15 | 0,98 | 2,64 |
| E3 | 0,38 | 0,85 | 9,71 | 0,41 | 0,83 | 9,93 |
| E4 | 0,29 | 0,91 | 3,04 | 0,28 | 0,92 | 3,69 |
| E5 | 0,41 | 0,83 | 11,57 | 0,41 | 0,83 | 12,00 |
| E6 | 0,28 | 0,92 | 7,54 | 0,27 | 0,93 | 7,77 |
| E7 | 0,54 | 0,70 | -11,58 | 0,45 | 0,80 | -9,96 |

Tabela 14 - Resultados de desempenho WaterGAP2 (HadGEM2-ES)

| Estação | Historical + RCP 6.0 | | | Historical + RCP 8.5 | | |
|---------|----------------------|------|-------|----------------------|------|-------|
| | RSR | NSE | PBIAS | RSR | NSE | PBIAS |
| E1 | 0,19 | 0,96 | 4,91 | 0,22 | 0,95 | 6,25 |
| E2 | 0,22 | 0,95 | 3,14 | 0,23 | 0,94 | 3,83 |
| E3 | 0,44 | 0,80 | 11,46 | 0,48 | 0,77 | 12,45 |
| E4 | 0,25 | 0,94 | 5,43 | 0,28 | 0,92 | 6,49 |
| E5 | 0,50 | 0,74 | 13,75 | 0,54 | 0,70 | 14,89 |
| E6 | 0,36 | 0,87 | 9,42 | 0,39 | 0,84 | 10,98 |
| E7 | 0,30 | 0,91 | -8,27 | 0,24 | 0,94 | -6,01 |

E1 apresentou os melhores valores de desempenho para as duas validações (Tabelas 13 e 14) e, conseqüentemente, possui as maiores vazões (Tabela 3), fato que pode favorecer a eficiência do GHM. Percebe-se que na maioria das estações com vazões maiores, para ambas as validações, os valores foram melhores (Apêndice A e B). É necessário reiterar que o posicionamento na grade de simulação tanto do GCM quanto do GHM é essencial para definir o desempenho em um determinado ponto. Por exemplo, E7 em WaterGAP2 (HadGEM2-ES) teve um desempenho muito melhor do que em WaterGAP2 (MIROC5). Porém, também se observa que nenhum dado foi insatisfatório, e os resultados demonstram um bom desempenho do modelo para representar as vazões das estações selecionadas. Outro fato que corrobora isso e demonstra uma maior evolução do WaterGAP2 ao longo do tempo é o resultado de Alcamo et al. (2003), em que foram validadas todas as 724 estações de calibração utilizadas na origem do modelo (de 1961 a 1990), e os valores encontrados para NSE foram menores para a Amazônia, entre 0,5 a 0,7.

Embora seja um modelo global e as simulações sejam para cenários futuros, o GHM apresentou eficiência semelhante quando comparado aos modelos

hidrológicos regionais (com resolução menor) e com simulações para determinados períodos. Por exemplo, o trabalho de Paiva et al. (2013), que utilizaram o MGB-IPH para simulações de escoamento (de 1999 a 2009) nas estações E1 e E3, obtiveram valores de NSE de 0,89 e 0,77, respectivamente. Huang et al. (2017) avaliaram a eficiência de nove modelos regionais para simulações de 1973 a 2001 em 12 estações ao redor do mundo, incluindo E6 neste estudo, e obtiveram valores de NSE variando de 0,2 a 0,95 e valores de PBIAS variando de -15 a 15.

4.2.2 Curvas de permanência e variabilidade de volume

Estação 1 - Óbidos

Na Figura 22, pode-se observar que as curvas apresentaram variabilidade semelhante e aproximada na maioria dos casos. Porém, em todos os períodos futuros, para ambos os cenários, as vazões máximas e mínimas diferem das observadas. No cenário RCP 6.0, a vazão máxima mais alta foi encontrada para o período de 2060-2079. Este é aproximadamente 18% superior ao máximo para o período base, enquanto a menor vazão mínima foi encontrada para o período 2080-2099, com uma diferença de 27% do valor observado. No RCP 8.5, a situação é ainda pior, visto que tanto o máximo como o mínimo eram para o final do século, com uma diferença de 37% (superior à observada) e 45% (inferior à observada), respectivamente.

Observando a Figura 23, nota-se que as simulações do WaterGAP2 (HadGEM2-ES) possuem projeções diferentes do WaterGAP2 (MIROC5) e com valores bem abaixo do período base. Os extremos foram diferentes quando comparados, com as curvas da Figura 22 apresentando maiores diferenças. Tanto para o cenário RCP 6.0 quanto para o cenário RCP 8.5 (Figura 23), os máximos foram para a curva do final do século (15% maiores do que aqueles do período base). Os mínimos foram encontrados para a curva 2060-2079 em ambos os cenários, com RCP 6.0 sendo 4% menor que a base e RCP 8.5 sendo 14% menor.

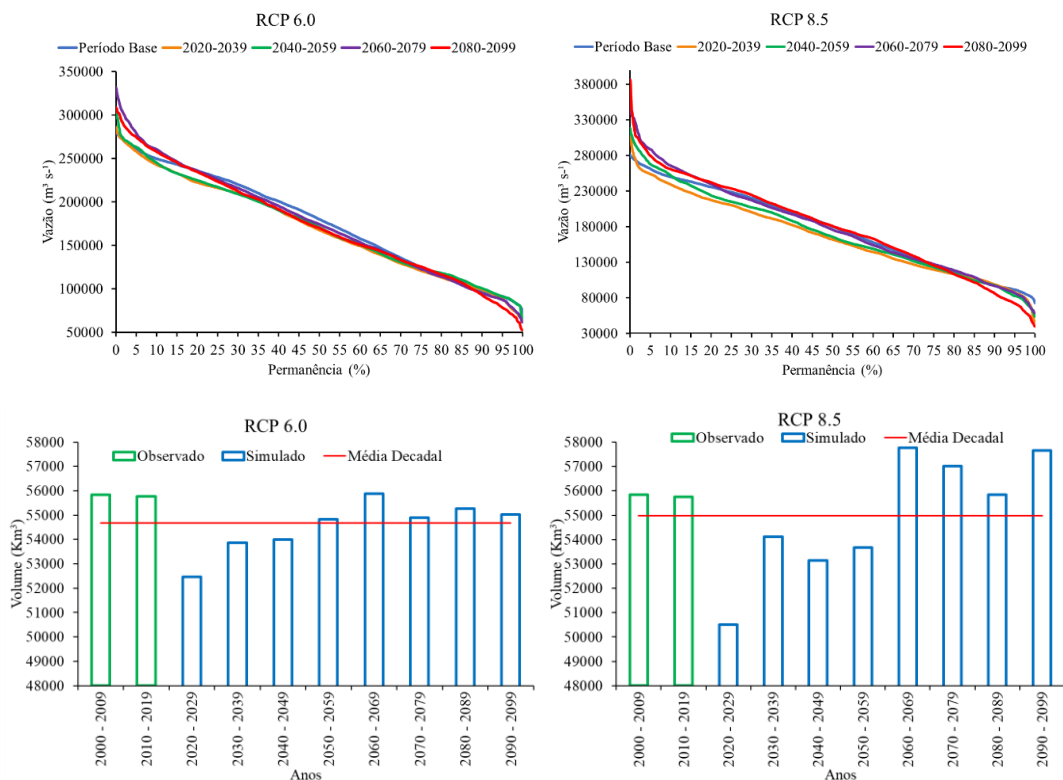


Figura 22 - Projeções WaterGAP2 (MIROC5) de curvas de permanência ($m^3 \cdot s^{-1}$) e volume (km^3) para a estação E1

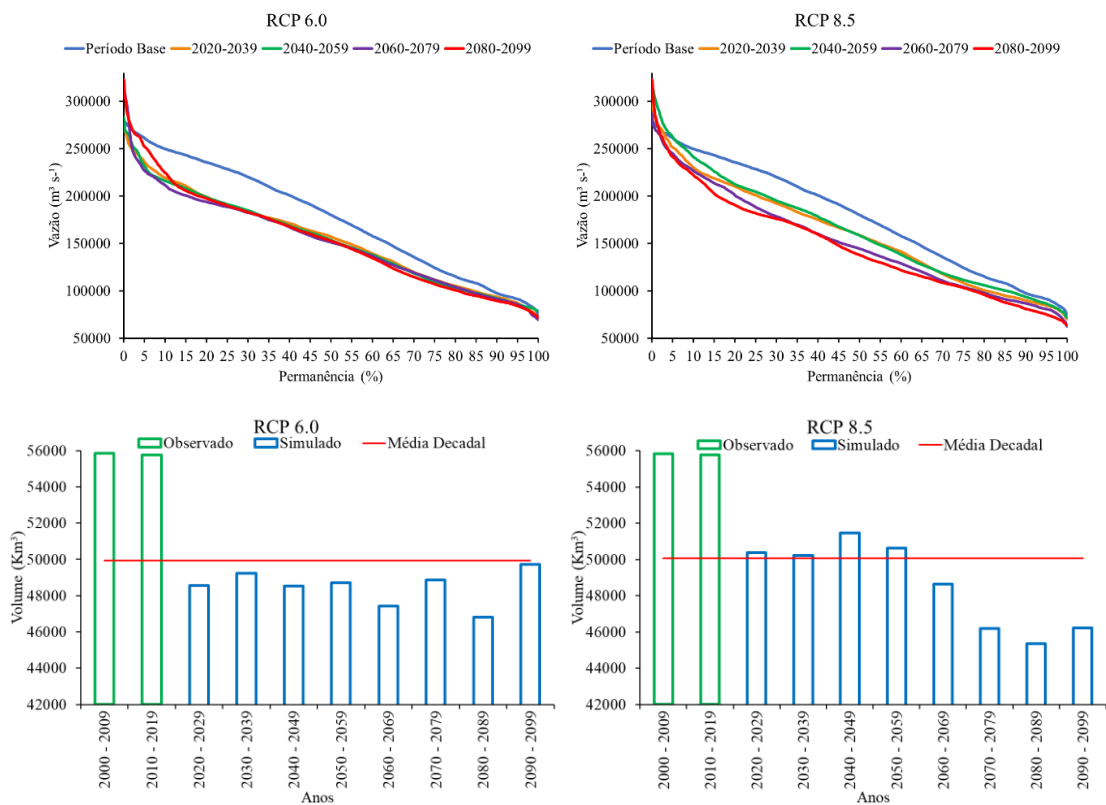


Figura 23 - Projeções WaterGAP2 (HadGEM2-ES) de curvas de permanência ($m^3 \cdot s^{-1}$) e volume (km^3) para a estação E1

Quando volumes decadais são observados (Figura 22), nota-se queda a partir de 2020 em ambos os cenários, e para RCP 8.5, os volumes permanecem abaixo da média até 2059, quando se observa aumento de volume até 2099. No quadro das FDCs, verifica-se que os correspondentes de 2060-2079 e 2080-2099 permanecem na maior parte do tempo acima dos demais. Isso pode significar que, mesmo que os volumes sejam inferiores aos observados no período de 2020 a 2059, as vazões extremas para o futuro continuem divergindo; ou seja, ter um volume menor não significa necessariamente menos ocorrência de eventos extremos. Isso fica ainda mais claro na Figura 23, os volumes do WaterGAP2 (HadGEM2-ES) apresentaram comportamento diferente, com queda até o final do século, ficando ainda abaixo da média decadal esperada (RCP 6.0). Ainda assim, o período do final do século que apresentou as vazões máximas, apresenta volumes menores (quando comparado ao período de base) e por sua vez o período de 2060-2079 que possui volumes maiores que o final do século, apresentou as menores vazões.

Do ponto de vista hidrológico, é necessário ter cuidado ao analisar as alterações na estação de Óbidos, visto que esta difere da maioria das outras estações. A estação representa 80% do fluxo total de água na bacia amazônica e está localizada 900 km a montante da foz do rio (ABREU et al., 2020). Para Paiva et al. (2013), a onda de inundação neste ponto é subcrítica e difusiva, pois os efeitos do remanso na foz fazem com que a influência das marés no canal principal do rio seja percebida e acabem causando um “atraso” na resposta hidrológica quando comparado com os outros. Em seu trabalho, os autores conseguiram perceber um atraso de até 11 dias nas respostas aos eventos de secas (2005) e enchentes (2009), por exemplo.

Estação 2 - Jatuarana

Para E2, observa-se que as FDCs estavam muito próximas no cenário RCP 6.0 e um pouco afastados no cenário RCP 8.5 (Figura 24). Para o RCP 6.0, a vazão máxima foi aproximadamente 4% maior que o observado, e o mínimo foi menor que 15%, enquanto no RCP 8.5 a diferença foi 19% a mais para o máximo e 32% a menos para o mínimo. Em ambos os cenários, a maior vazão máxima e a menor vazão mínima ocorrem no período de 2080-2099, e especificamente para o cenário pessimista (RCP 8.5), percebe-se que a curva apresenta uma variabilidade diferente das observadas, com queda acentuada em valores de Q90%. Quanto às projeções

do WaterGAP2 (HadGEM2-ES), observa-se que todas as FDCs projetadas permaneceram na maior parte do tempo abaixo do período base. Na Figura 25, pode-se observar que no RCP 6.0 apenas nos extremos a curva do período base foi ultrapassada, com a vazão máxima tendo uma diferença de 3% (2080-2099). No RCP 8.5 (ainda na Figura 25), o máximo foi encontrado para o período 2040-2059 (4% maior que a base) e o mínimo para 2060-2079 (2% menor que a base).

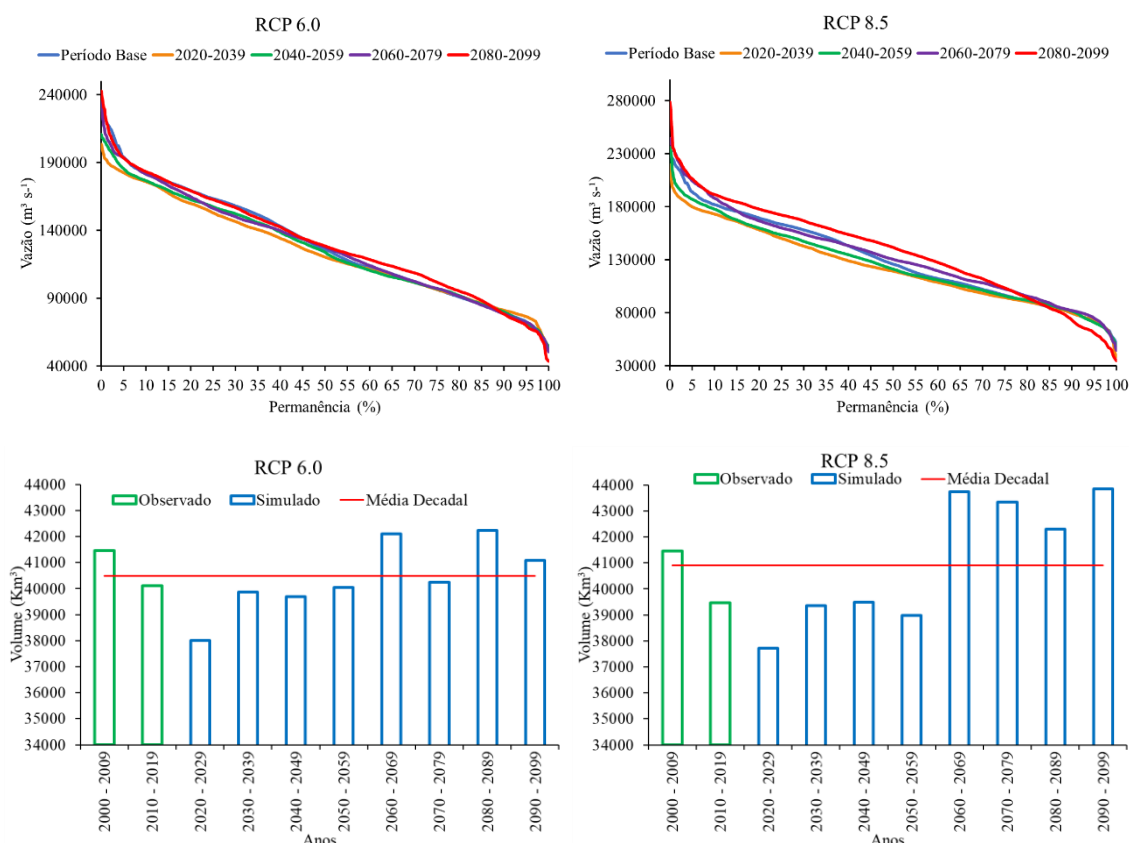
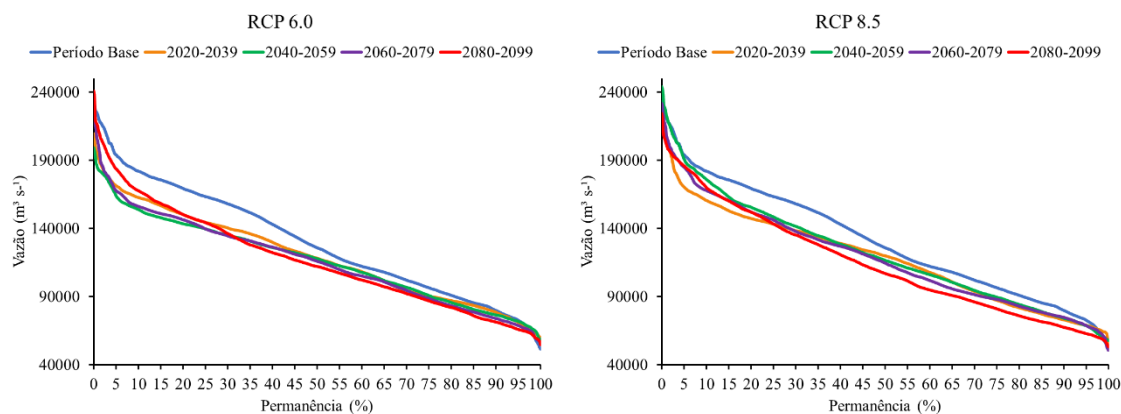


Figura 24 - Projeções WaterGAP2 (MIROC5) de curvas de permanência ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e volume (km^3) para a estação E2



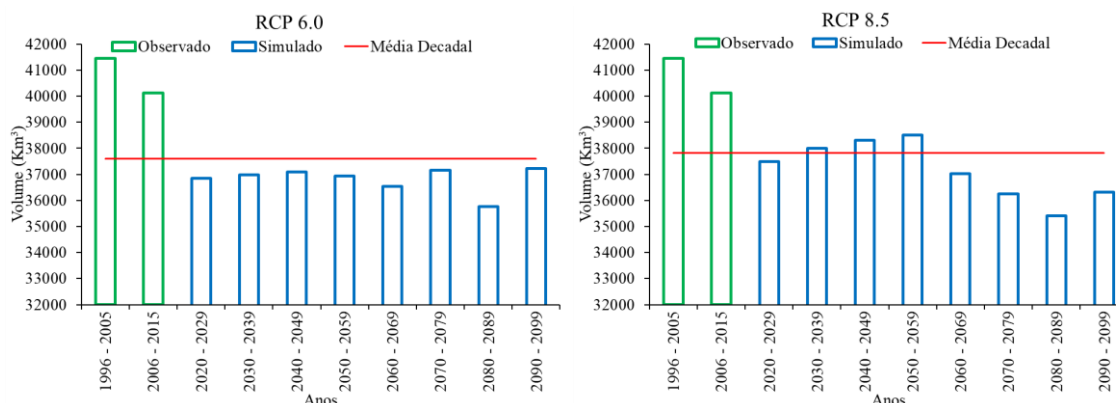


Figura 25 - Projeções WaterGAP2 (HadGEM2-ES) de curvas de permanência ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e volume (km^3) para a estação E2

Para os volumes do WaterGAP2 (MIROC5), em ambos os cenários, verifica-se que, a partir de 2010, permanecem abaixo da média projetada para o século, com crescimento a partir de 2060 (RCP 8.5). Os maiores volumes estão previstos para o final do século, mas os volumes ficarão abaixo da média por aproximadamente 50 anos. Novamente, os volumes para WaterGAP2 (HadGEM2-ES) se comportam de forma diferente entre as duas projeções GCM-GHM (mas semelhantes entre as estações E1 e E2), apresentando valores abaixo da média (RCP 6.0) e reduzindo até o final do século (RCP 8.5). Essa diferença no comportamento das projeções nas Figuras 24 e 25, possivelmente, deve-se ao fato de o HadGEM2-ES ser um modelo com acoplamento do Sistema Terrestre (ES), que inclui componentes biogeoquímicos que respondem mais fortemente aos fluxos de carbono entre os oceanos, a atmosfera e a biosfera terrestre, o que pode influenciar os dados de simulação, e neste caso, subestimar valores (LEE; WANG, 2014).

De qualquer forma, essa variação de volumes e as projeções de vazões da FDC são preocupantes para a região da estação Jatuarana, uma vez que a economia da região é fortemente influenciada pela atividade pesqueira. No início da década de 1990, Mérona e Gascuel (1993) realizaram um estudo na região para verificar a influência das vazões na pesca extrativa, concluindo que no regime de vazões, a variação periódica do nível ou vazão das águas é considerada um parâmetro essencial. E que as variações negativas da vazão têm um severo impacto econômico e ambiental. Para Jézéquel et al. (2020), é provável que isso seja uma consequência da recente expansão da infraestrutura da região e da intensificação das mudanças climáticas, o que poderia colocar em risco a ictiofauna da região em um futuro próximo.

Estação 3 - Manacapuru

Na Figura 26, pode-se observar que a FDC do período base está acima dos demais na maioria dos casos no RCP 6.0. No RCP 8.5, a curva do período base está mais próxima das FDCs dos períodos 2060-2079 e 2080-2099, e começam a se afastar de Q85%. Os máximos e mínimos são novamente a FDC 2080-2099, que possui uma vazão máxima para RCP 6.0, sendo 14% maior que a observada e uma vazão mínima, sendo 17% menor. Para o cenário RCP 8.5, a diferença entre os máximos é 37% e a diferença entre os mínimos é 39%. Quanto à Figura 27, para RCP 6.0 a curva do período base permanece acima das demais por praticamente toda a duração, com exceção da vazão máxima (2080-2099), que foi 16% maior, e neste cenário a mínima (2060 -2079) foi apenas 6% menor do que a base. No RCP 8.5, eles tiveram um comportamento semelhante ao cenário anterior, porém, os extremos tiveram uma diferença maior, com a vazão máxima (2080-2099), sendo 20% maior que a base, e a mínima (2060-2079), sendo 19% mais baixo.

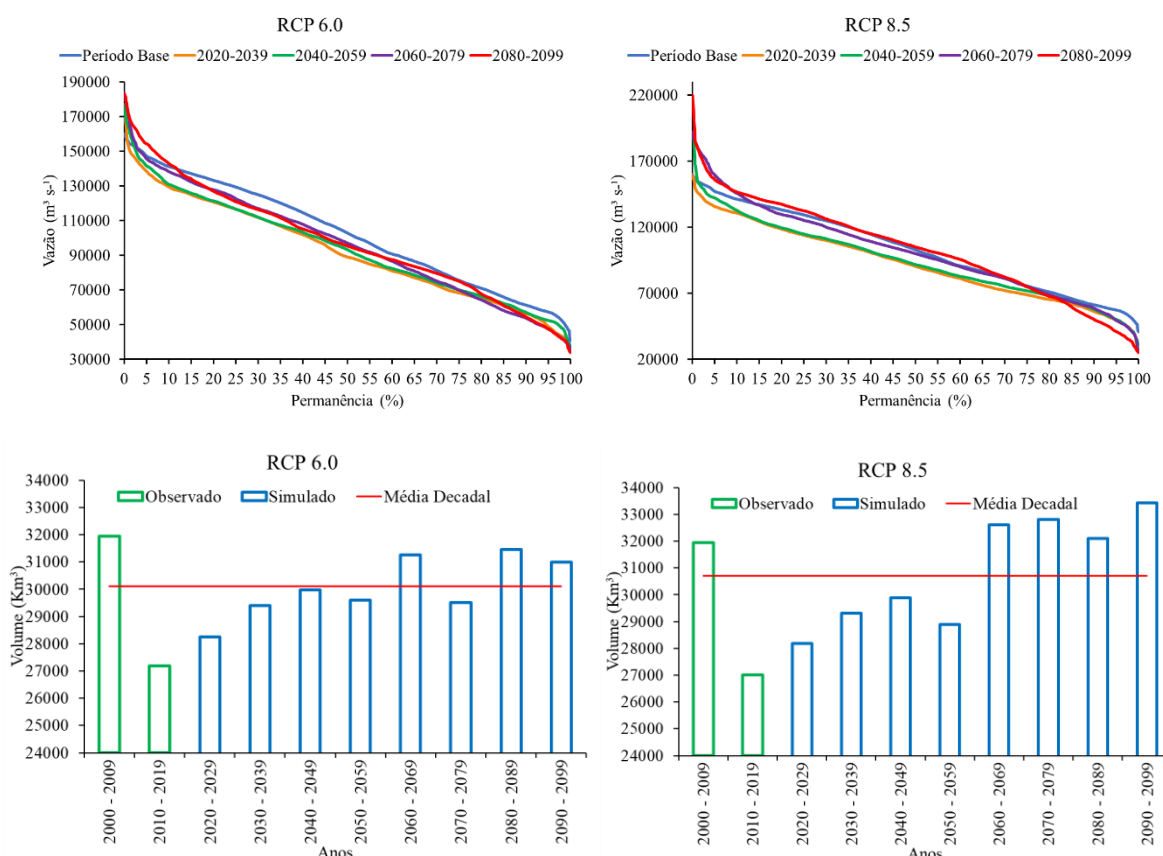


Figura 26 - Projeções WaterGAP2 (MIROC5) de curvas de permanência ($m^3.s^{-1}$) e volume (km^3) para a estação E3

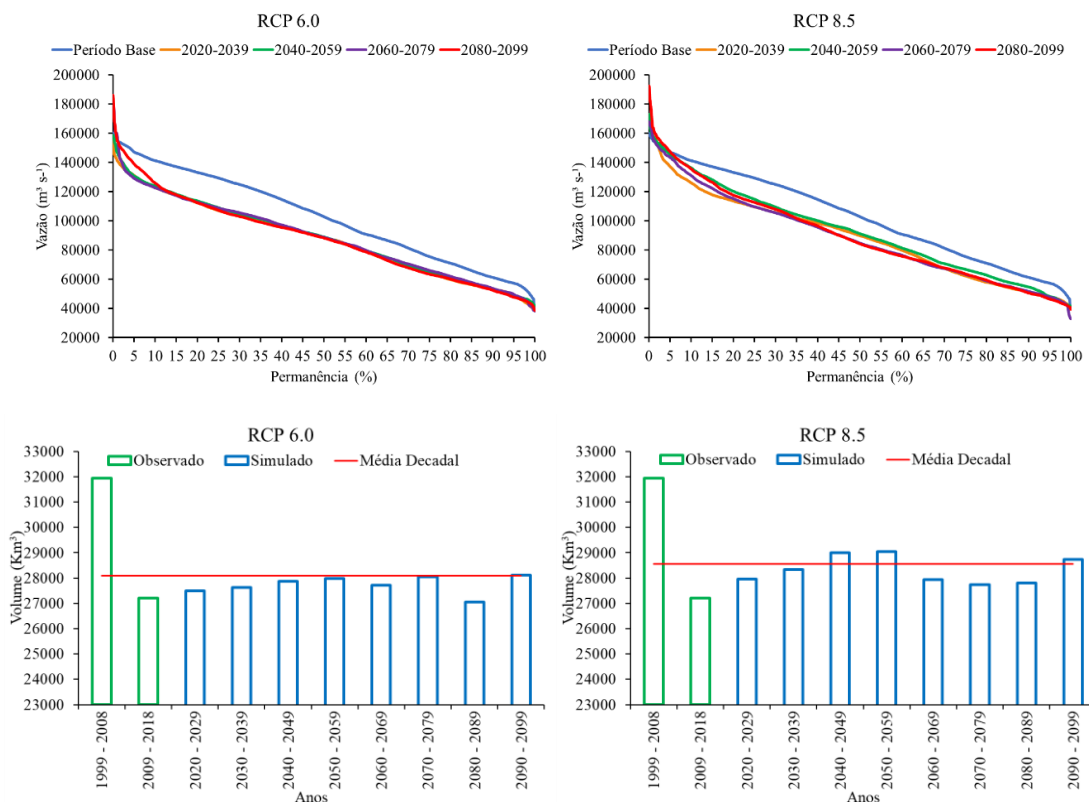


Figura 27 - Projeções WaterGAP2 (HadGEM2-ES) de curvas de permanência ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e volume (km^3) para a estação E3

Para WaterGAP2 (MIROC5), o volume tem uma redução significativa da primeira para a segunda década, permanecendo abaixo da média até 2060 para ambos os cenários, ou seja, 50 anos de volumes abaixo da média, aumentando novamente até o final do século. Esse comportamento é um tanto semelhante ao do WaterGAP2 (HadGEM2-ES). Porém, no RCP 6.0, permanece abaixo da média decadal e seus volumes tendem a diminuir até o final do século. Apesar disso, há um aumento gradativo dos volumes até 2049, para todas as projeções, em todos os cenários avaliados. Essa queda, possivelmente, deve-se à recente urbanização da área, uma vez que a E3 está localizada na região metropolitana de Manaus, uma das regiões mais populosas da Amazônia. Sharma et al. (2016) comentam que diminuições como essas podem ser consequências de impactos antrópicos, principalmente, devido a uma grande captação de água para uso industrial, irrigação ou abastecimento, o que pode ameaçar os recursos hídricos da região no futuro, considerando-se as projeções do WaterGAP2 (HadGEM2-ES), que mostram quedas nos volumes no futuro. Fica claro, então, que essas mudanças urbanas na localidade, juntamente com as mudanças climáticas globais, abrem uma

oportunidade para intensificar as ações de adaptação aos riscos climáticos futuros (CARTER et al., 2018).

De um certo ponto de vista, isso é algo de “bom” que as mudanças climáticas podem trazer para a sociedade em geral, pois a gestão e a adaptação são cada vez mais importantes com o crescimento das populações urbanas, incentivando não só a criação de novas tecnologias e estruturas, mas também a colaboração mútua de pessoas. Estudos recentes têm destacado isso. Por exemplo, Wicaksono (2020) concluiu que movimentos comunitários voltados para a adaptação climática de cidades próximas aos rios conscientizaram a população, resultando em melhor planejamento da cidade. Isso reduziu a vulnerabilidade dos mais pobres e contribuiu para a estratégia de resiliência urbana na região.

Estação 4 - Itapéua

Pode-se observar na Figura 28, que a curva para o período 2080-2099, em ambos os cenários, permanece acima das demais curvas por 85% do tempo, com uma queda sinuosa posteriormente. Mais uma vez, observa-se que as vazões máximas e mínimas ocorrem no final do século, e quando comparadas com as observadas, a diferença é de 34% para vazão máxima e 11% para vazão mínima, considerando-se RCP 6.0; e de 60% para a vazão máxima e 34% para vazão mínima, considerando-se RCP 8.5. A curva projetada para o último período do século na maioria das estações superou as demais; no entanto, mostrou uma queda acentuada, o que levou a extremos de vazões menores. Na Figura 29, para WaterGAP2 (HadGEM2-ES), a curva 2080-2099 apenas permanece acima da curva de base nas vazões mais altas, de 5 a 10% de permanência para RCP 6.0 e 5 a 20% para RCP 8.5. Os máximos para essas projeções foram 28% (RCP 6.0) e 32% (RCP 8.5) acima da base, ambos também para a FDC do final do século. Os mínimos eram para as FDCs de 2060-2079 (0,13% menos do que a base) para RCP 6.0 e 2060-2079 (13%) para RCP 8.5.

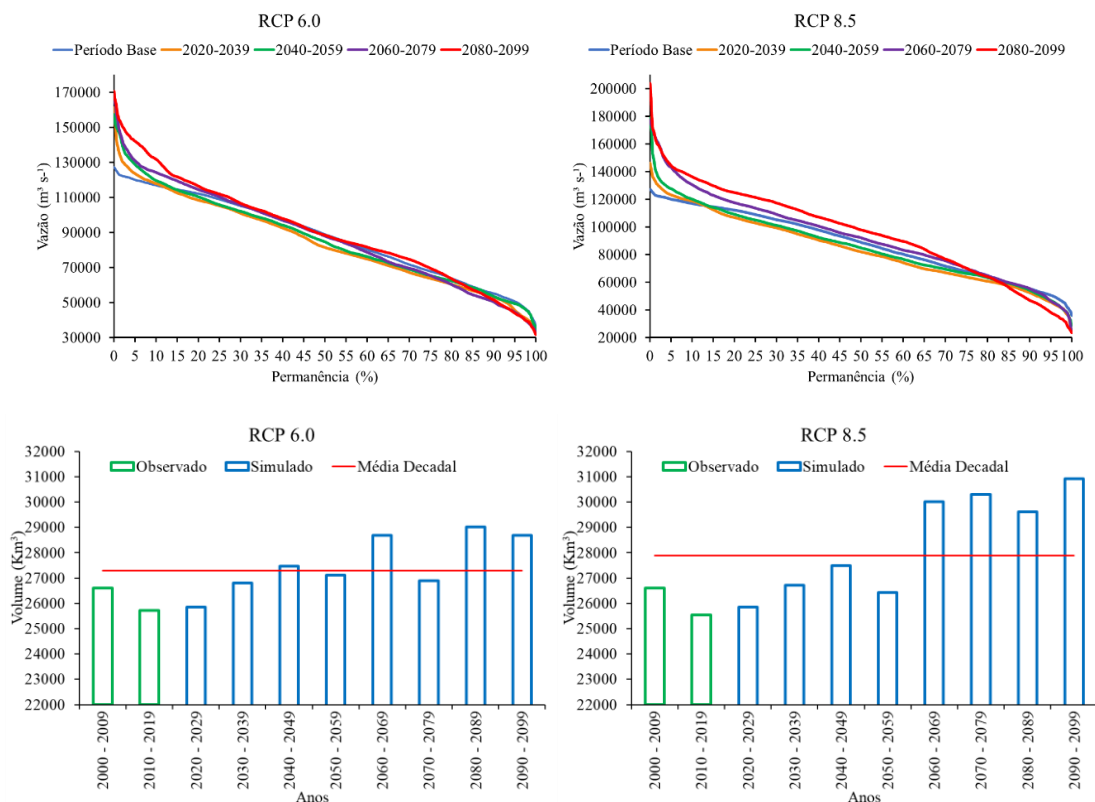


Figura 28 - Projeções WaterGAP2 (MIROC5) de curvas de permanência ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e volume (km^3) para a estação E4

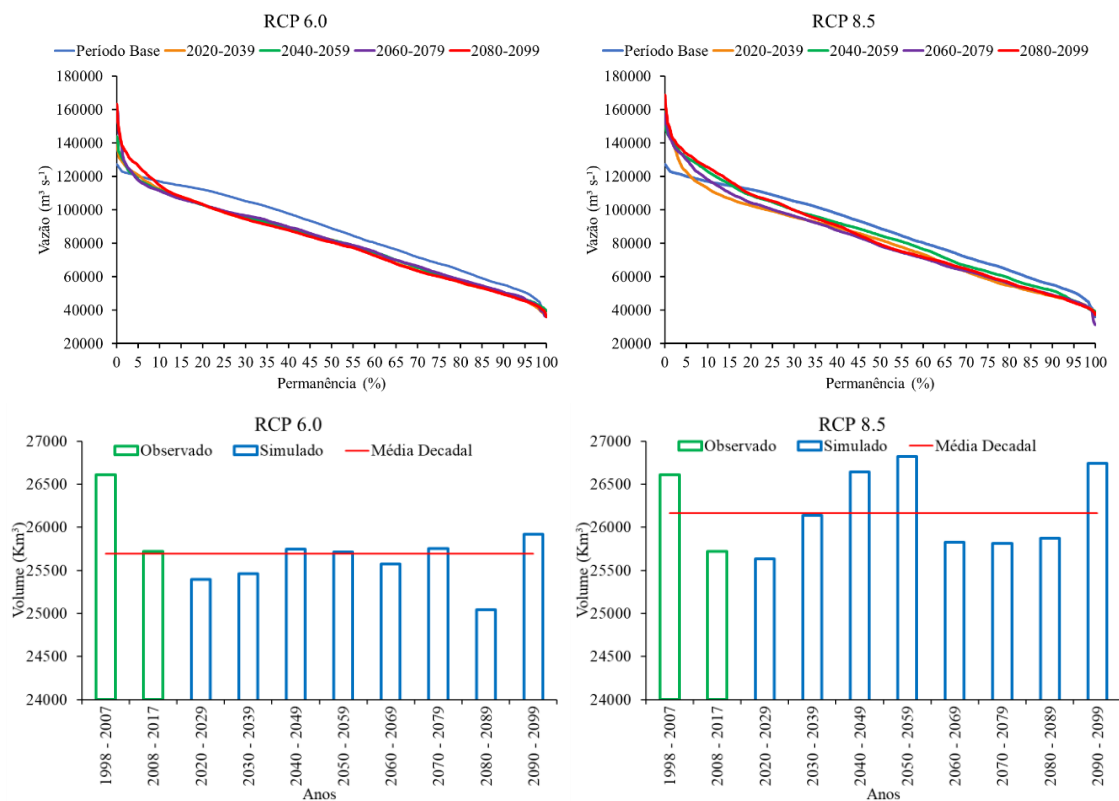


Figura 29 - Projeções WaterGAP2 (HadGEM2-ES) de curvas de permanência ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e volume (km^3) para a estação E4

Em relação aos volumes analisados para o WaterGAP2 (MIROC5), pode-se observar na Figura 28 que os dados observados já estão abaixo da média decadal esperada em ambos os cenários. Para o cenário RCP 8.5, a situação é ainda pior, pois serão 60 anos de volumes abaixo da média (2000 a 2059). Observando-se a Figura 29, os dados do WaterGAP2 (HadGEM2-ES) permanecem próximos da média e, ao contrário das estações anteriores, os volumes aumentaram em meados e no final do século. No entanto, esses valores não atingem a média de 27.880 km³ das projeções no WaterGAP2 (MIROC5), ou seja, os volumes continuarão baixos em todos os cenários de RCP para todas as projeções. Outro fato importante a se observar é que, embora os volumes sejam baixos, os dados futuros da E4 têm um aumento considerável de valores quando comparados aos da estação E5, quase 10.000 km³. Isso porque o maior trecho de várzea do Brasil é adjacente ao rio Amazonas, em Itapéua. Em seu trabalho, Meade et al. (1991) observaram um aumento da suavidade do hidrograma de Itapéua em relação ao hidrograma de Santo Antônio do Içá (E5), o que reflete o armazenamento sazonal de grandes quantidades de água que escoam para a planície de inundação intermediária durante as fases a montante do Amazonas. Chen et al. (2020) comentam que esse armazenamento bidirecional do volume pode chegar a até 40% na região de Itapéua.

Estação 5 - Santo Antônio do Içá

As FDCs do WaterGAP2 (MIROC5) comportaram-se de forma muito diferente quando comparadas a FDC do período base, uma vez que as vazões observadas permaneceram superiores às projetadas 60% do tempo (Figura 30). A vazão máxima para RCP 6.0 foi novamente para o período de 2080-2099 (22% maior do que o observado). Porém, ao contrário de outras estações, a menor vazão mínima pertence à curva do período base, que ocorreu em 2010, fato que também ocorreu para os RCPs 6.0 e 8.5 no WaterGAP2 (HadGEM2-ES). Isso é preocupante, pois leva a supor que essa região seja vulnerável a secas, como a que ocorreu no mesmo ano de 2010, o que corrobora o trabalho de Panisset et al. (2018), que afirma que a área onde se localiza a estação foi uma das mais afetadas durante tal seca. Para WaterGAP2 (MIROC5) RCP 8.5, tanto a vazão máxima (20% maior que a observada) e a vazão mínima (apenas 2% menor) ocorreram para a curva do

período 2080-2099, o que indica que neste período, uma seca ainda mais severa pode ocorrer do que a seca observada em 2010.

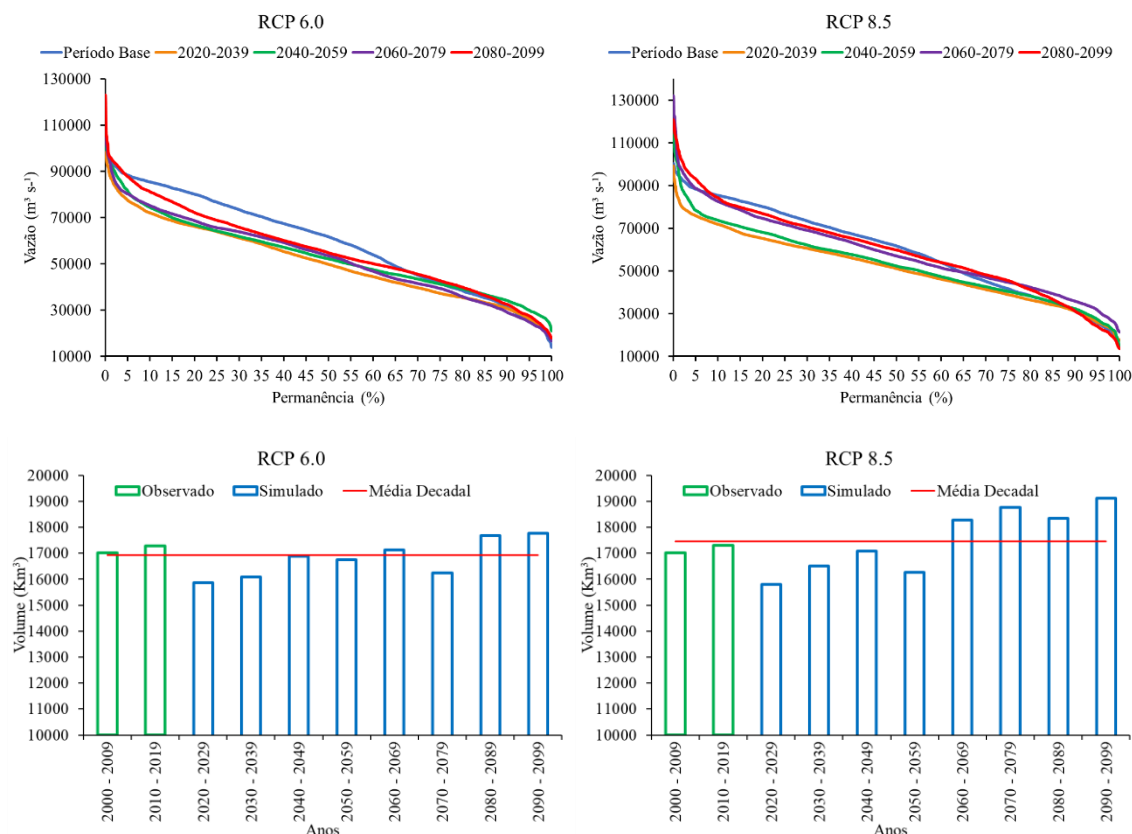
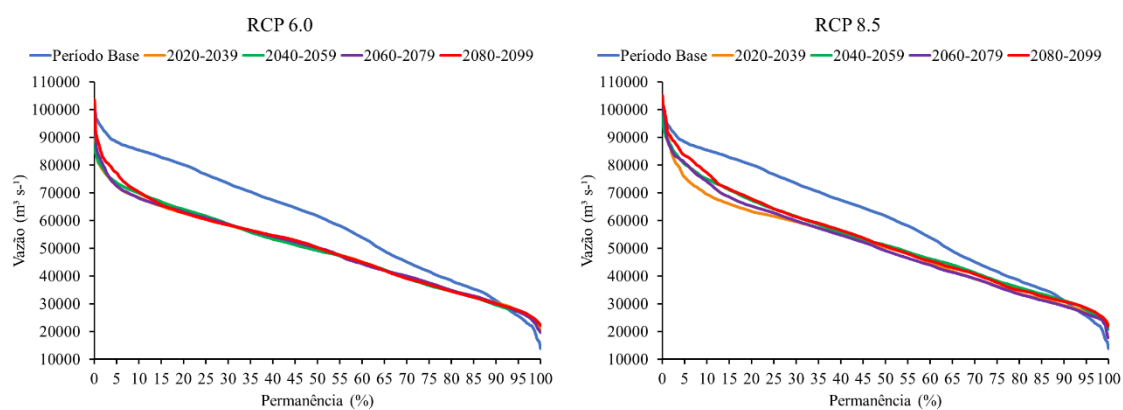


Figura 30 - Projeções WaterGAP2 (MIROC5) de curvas de permanência ($m^3 \cdot s^{-1}$) e volume (km^3) para a estação E5



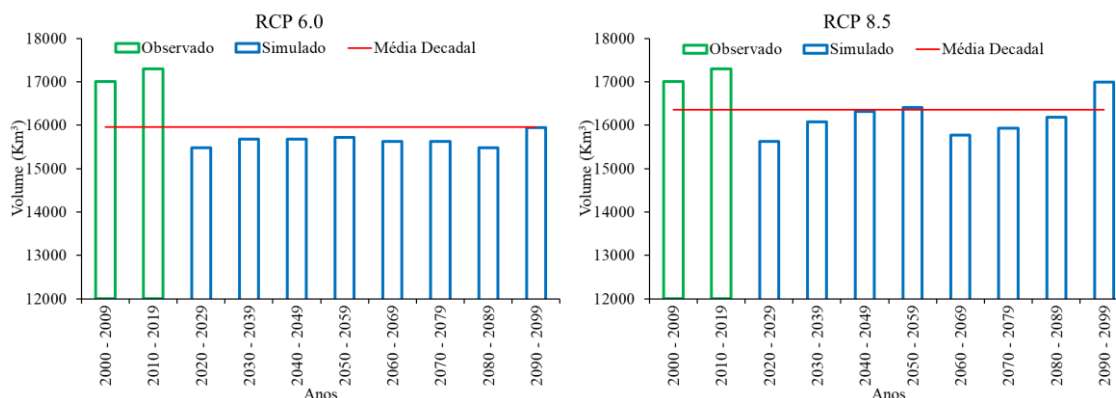


Figura 31 - Projeções WaterGAP2 (HadGEM2-ES) de curvas de permanência ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e volume (km^3) para a estação E5

No WaterGAP2 (HadGEM2-ES) RCP 6.0 e 8.5 os máximos foram para a FDC de 2080-2099 (3% e 5% respectivamente), no entanto, um fato interessante é que os máximos da FDC do período base foram maiores do que todos os outros, pela primeira vez dentro dessas análises. Analisando os volumes, mesmo com diferença nas médias (ambas nas Figuras 30 e 31), eles parecem se comportar de forma semelhante, sem muitas oscilações. Mesmo no final do século, mesmo com volumes abaixo da média, os valores do WaterGAP2 (HadGEM2-ES) têm crescido gradativamente como o do WaterGAP2 (MIROC5).

Estação 6 - São Paulo de Olivença

Para WaterGAP2 (MIROC5), observa-se que as curvas não diferiram muito do período base, apresentando uma variabilidade semelhante (Figura 32). No cenário RCP 6.0, a vazão máxima foi observada no final do século, com uma vazão 43% maior do que a vazão máxima da curva observada. A vazão mínima para este mesmo cenário foi para a curva do período 2060-2079, que apresentou uma diferença 10% menor em relação à curva observada. Para RCP 8.5, as vazões extremas foram simuladas no período entre 2080-2099, tendo a vazão máxima uma diferença de 39% em relação a vazão observada; e a vazão mínima tendo 21% de diferença em relação a vazão observada. No WaterGAP2 (HadGEM2-ES), nota-se que a curva do período base permanece acima das demais na maior parte do tempo, como na maioria das anteriores. As vazões máximas foram simuladas para o período de 2080-2099, e quando comparadas com as observadas, as vazões simuladas, considerando-se RCP 6.0, apresentaram valor 10% superior, e se considerando RCP 8.5, teve valor 14% superior. Os mínimos nos dois RCPs foram

para a curva do período base, vazão ocorrida em 1998, e que possivelmente pode ter sido influenciado pelo forte *El Niño* ocorrido no mesmo ano, já que no trabalho de Jiménez-Muñoz et al. (2016), pode-se observar que a área onde está localizada a E6, sofreu os efeitos desse fenômeno.

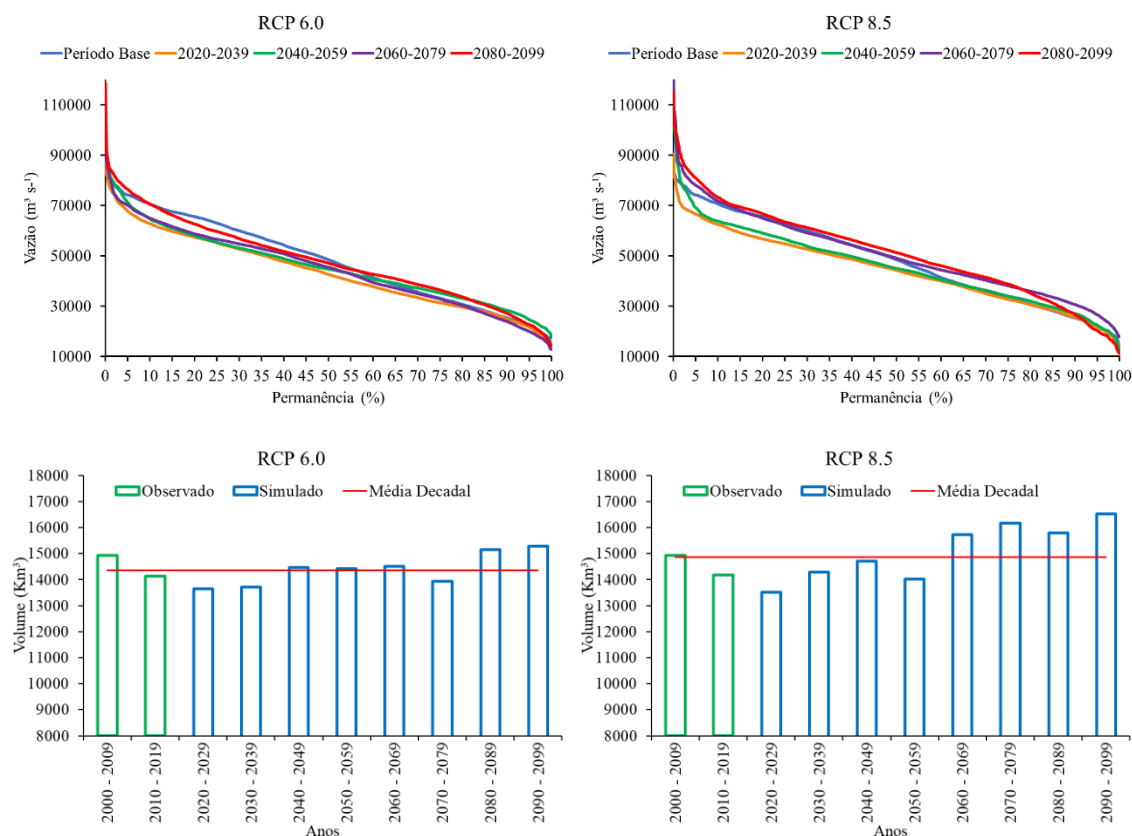
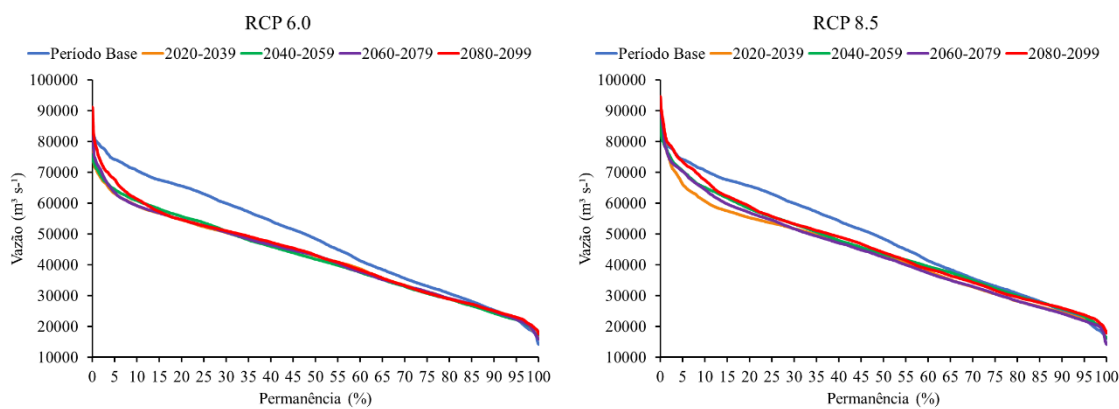


Figura 32 - Projeções WaterGAP2 (MIROC5) de curvas de permanência ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e volume (km^3) para a estação E6



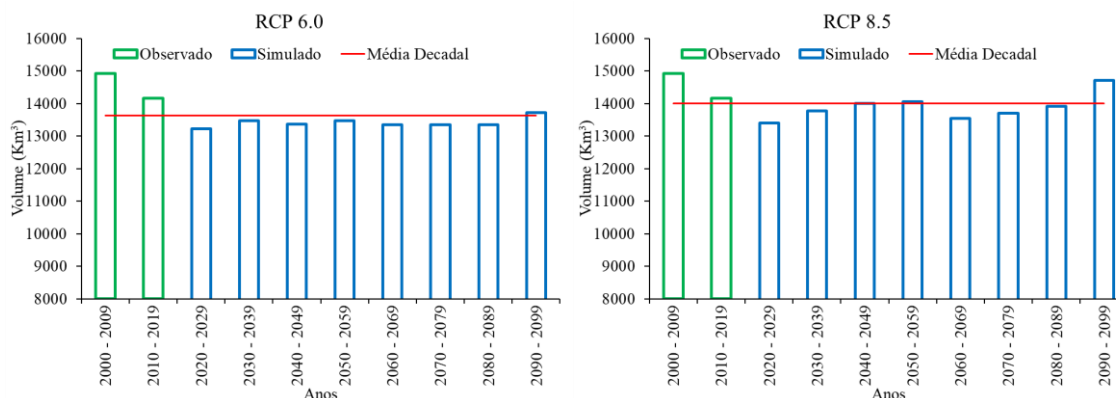


Figura 33 - Projeções WaterGAP2 (HadGEM2-ES) de curvas de permanência ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e volume (km^3) para a estação E6

Em relação aos volumes da E6, a maioria dos resultados está próxima da média decadal (Figuras 32 e 33), com diferença apenas para o cenário RCP 8.5 de WaterGAP2 (MIROC5). Essa baixa flutuação de valores pode ser devida ao fato de essas estações apresentarem vazões menores e estarem mais distantes dos principais afluentes do rio Amazonas, o que as torna menos instáveis em relação ao volume (FAN et al., 2013).

Estação 7 - Tabatinga

A estação Tabatinga apresentou comportamento semelhante para as duas projeções, sendo a maior diferença entre as FDCs para o RCP 8.5. É possível observar nas Figuras 34 e 35 um maior espaçamento entre elas nas FDCs, e pela primeira vez, todas as curvas para o futuro permaneceram acima da curva do período base no WaterGAP2 (HadGEM2-ES), mostrando que as vazões serão muito mais alta no final do século (também para WaterGAP2-MIROC5). Essas características podem estar relacionadas às vazões menores na proximidade dessa estação com a Cordilheira dos Andes, o que pode torná-la mais suscetível à variabilidade climática. Sorribas et al. (2016) obtiveram resultados que também concluem que a região da E7 (Alto Amazonas) é fortemente influenciada pelas vazões da região noroeste dos Andes, intensificando tanto as inundações quanto as secas. As vazões máximas são destacadas, pois todas são para a curva do período 2080-2099, que apresentou uma diferença no WaterGAP2 (MIROC5) de 108% (RCP 6.0) e 110% (RCP 8.5) e no WaterGAP2 (HadGEM2 -ES) de 50% (RCP 6.0) e 54% (RCP 8.5) em relação ao período base. Todas as vazões mínimas estiveram no

período base, também para todas as projeções em ambos os cenários, mas muito próximos em relação aos períodos futuros.

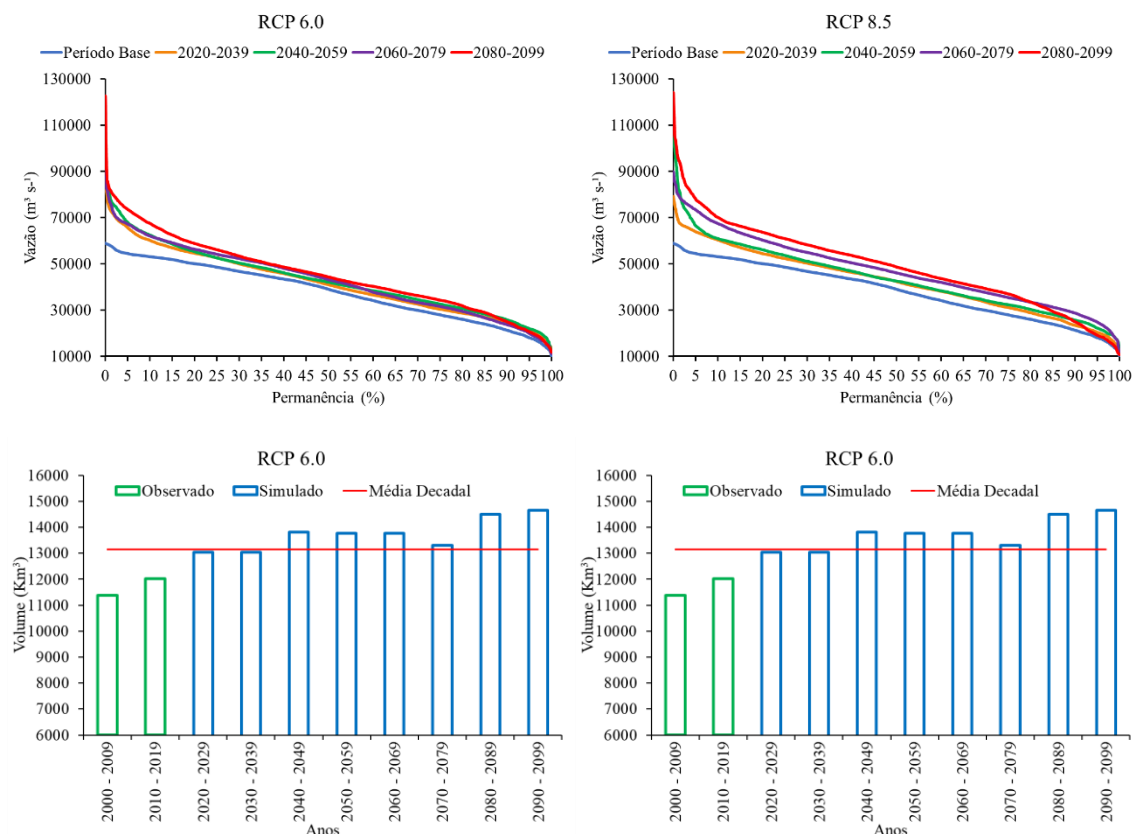
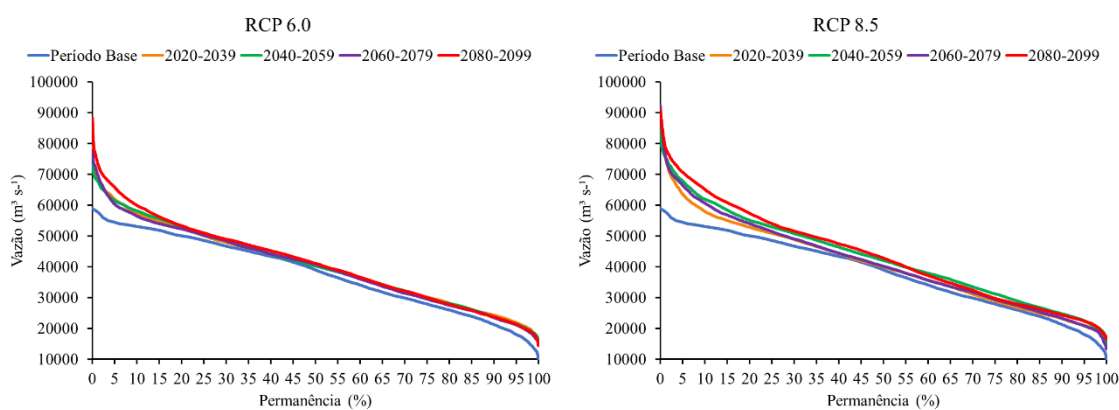


Figura 34 - Projeções WaterGAP2 (MIROC5) de curvas de permanência ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e volume (km^3) para a estação E7



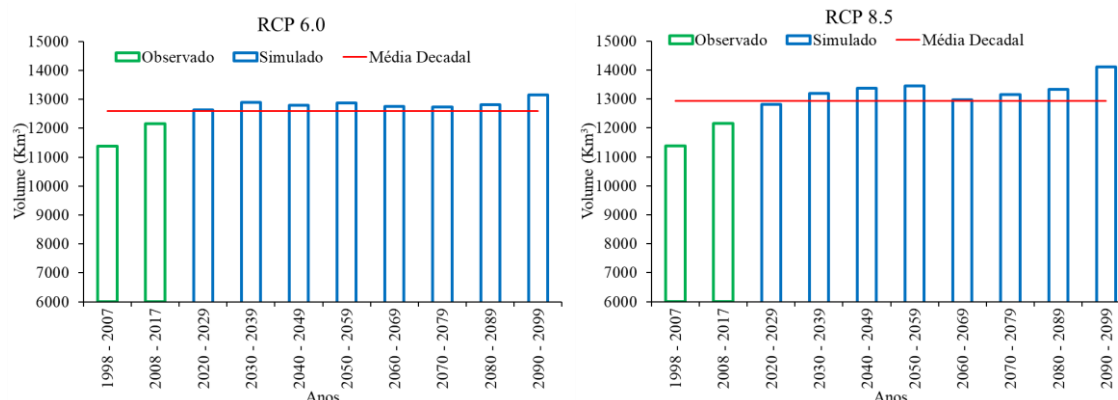


Figura 35 - Projeções WaterGAP2 (HadGEM2-ES) de curvas de permanência ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e volume (km^3) para a estação E7

Em termos de volumes, nota-se que a partir de 2020 estarão acima ou muito próximos da média decadal, com pequenos aumentos. Isso, possivelmente, deve-se à forte influência das mudanças climáticas no degelo dos Andes, que leva ao aumento da vazão de alguns rios próximos à região. Esse fato está de acordo com o estudo de Rocha et al. (2019), que analisou os Andes Tropicais ao longo de um período de 30 anos (1985-2014) e percebeu que, para a mesma área da E7, as variações mostraram níveis elevados de água, mesmo quando as chuvas permaneceram baixas, devido à forte influência de derretimento nos Andes. Essas variações foram ainda mais intensas quando ocorreram em anos de operação dos modos de variabilidade climática, que causam o aquecimento da região andina (ENOS e Oscilação Decadal do Pacífico - PDO) - (ALMEIDA et al., 2016; HAGHTALAB et al., 2020).

5 CONCLUSÃO

A variabilidade nas projeções de GCMs até 2100 mostrou, principalmente, uma diminuição na precipitação anual nos modelos CanESM2 e HadGEM2-ES, e um aumento no modelo MIROC5. As variações preveem um aumento nas intensidades máximas diárias de chuva para os modelos MIROC5 e HadGEM2-ES e diminuição para o modelo CanESM2. As equações de precipitação geradas para os cenários climáticos apresentaram coeficientes de ajuste satisfatórios (todos acima de 0,99), demonstrando que são ferramentas eficazes para o projeto de obras hídricas e gestão de riscos futuros.

O *Equidistant Quantile Matching Method* mostrou-se eficaz e pode ser facilmente aplicado com poucos recursos computacionais. As curvas IDF simuladas apresentaram diferenças quando relacionadas à curva já existente para o ponto de estudo, o que pode indicar que o método realmente incorpora mudanças explícitas na variabilidade climática futura. Isso reafirma a hipótese de maior eficiência de um método que leva em consideração a não-estacionariedade das variáveis climáticas.

Mesmo com os GCMs tendo uma grade "mais grosseira", o *Downscaling* estatístico foi capaz de distinguir as mudanças nas intensidades entre os períodos de tempo. Porém, as resoluções espaciais de cada modelo influenciaram fortemente suas curvas IDF, o que levou as curvas do CanESM2 a não apresentarem resultados satisfatórios com relação às curvas criadas a partir do trabalho de Souza et al. (2012), ao contrário das curvas MIROC5, que representaram as melhores diferenças possíveis na precipitação futura.

O desempenho do modelo WaterGAP2 (forçado pelo MIROC5 e HadGEM2-ES) para simulação das vazões do rio Amazonas é eficiente, segundo indicadores estatísticos, para a maioria das estações e está próximo da eficiência de modelos regionais usados anteriormente em outros estudos para a mesma região. As curvas de permanência de vazões simuladas para o cenário RCP 8.5, foram as que mais se distanciaram da curva de permanência do período base, representando uma maior variação das vazões para o futuro. A maioria das vazões extremas (máximas e mínimas) foram para a curva de permanência relativa ao período de 2080-2099, as principais diferenças entre as FDCs foram para o cenário RCP 8.5, com vazão máxima 110% maior que a de período de base na E7, e vazão mínima 45% menor que a FDC do período base para E1, ambas para o WaterGAP2 (MIROC5).

Na projeção WaterGAP2 (MIROC5), a maioria dos volumes simulados estava de 2020 a 2059 abaixo da média decadal esperada para o século, subindo novamente de 2060 a 2099. Já para as projeções WaterGAP2 (HadGEM2-ES) os volumes geralmente estão próximos ou abaixo da decadal média, com uma diminuição de 2060 (geralmente para RCP 8.5).

Vale ressaltar que embora várias características sejam semelhantes, cada estação possui sua particularidade devido à região em que está inserida. Os resultados também comprovam que o projeto ISIMIP é de fato uma importante ferramenta para o gerenciamento de riscos climáticos futuros e pode auxiliar nos processos de adaptação, uma vez que a área de estudo é bastante vulnerável à variabilidade hidrometeorológica.

De maneira geral, o GCM mais indicado para estudos de projeções climáticas na Amazônia é o MIROC5, pois a análise da influência das mudanças climáticas projetadas por esse modelo, demonstraram resultados mais próximos da realidade e também mais coerentes com os cenários futuros, principalmente para o RCP 8.5. Espera-se que os dados e informações deste estudo possam subsidiar projetos e dimensionamentos de obras, evitando gastos extras e possíveis desastres, contribuindo com a política de adaptação e mitigação. Isso dará suporte aos gestores públicos, técnicos e tomadores de decisão da região, além de incentivar outros estudos semelhantes na Amazônia e no Brasil.

6 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

As conclusões baseadas nas curvas IDF sugerem que, no futuro, essa metodologia poderá ser reaplicada com modelos mais refinados ou modelos climáticos regionais, pois estes possuem melhores resoluções espaciais e temporais. Uma outra pesquisa futura, com um aparato computacional mais robusto, seria realizar parametrizações nos modelos, dentro da variável precipitação, verificando qual realmente se adapta às condições climáticas da região Amazônica.

Mesmo o WaterGAP2, possuindo uma grade menor quando comparado a outros modelos, é considerado um modelo global de grades robustas, causando interferência em uso para diferentes locais na rede fluvial global. Isso incentiva o teste deste GHM em afluentes do Rio Amazonas para verificar sua eficiência em outras localidades da Amazônia e até mesmo em outras bacias hidrográficas do Brasil.

Outro trabalho que pode ser realizado é testar um GHM diferente, ou mesmo outra combinação GCM-GHM, comparando até mesmo com a saída de modelos hidrológicos calibrados para cada localidade. Isso irá aumentar as alternativas de dados que podem ser usadas no futuro gerenciamento de recursos hídricos na região, e assim os resultados podem ajudar a diminuir os impactos futuros causados por possíveis eventos extremos na Amazônia devido às mudanças climáticas globais.

Sugere-se, por fim, realizar também a análise de como as mudanças climáticas irão influenciar futuramente em outras variáveis utilizadas em projetos de engenharia de recursos hídricos, como erosividade da chuva, vazões de projeto, curva-chaves de rios, níveis d'água para navegação etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, C. H. M.; BARROS; M. D. L. C.; BRITO, D. C.; TEIXEIRA, M. R.; CUNHA, A. C. D. Hydrodynamic modeling and simulation of water residence time in the Estuary of the Lower Amazon River. **Water**, v. 12, n. 3, p. 660, 2020.

AGILAN, V.; UMAMAHESH, N. V. Is the covariate based non-stationary rainfall IDF curve capable of encompassing future rainfall changes?. **Journal of Hydrology**, v. 541, p. 1441-1455, 2016.

ALCAMO, J.; DÖLL, P.; HENRICHS, T.; KASPAR, F.; LEHNER, B.; RÖSCH, T.; SIEBERT, S. Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability. **Hydrological Sciences Journal**, v. 48, n. 3, p. 317-337, 2003.

ALEMAN, J. C.; BLARQUEZ, O.; GOURLET-FLEURY, S.; BREMOND, L.; FAVIER, C. Tree cover in Central Africa: determinants and sensitivity under contrasted scenarios of global change. **Scientific Reports**, v. 7, p. 41393, 2017.

ALEMSEGED, T. H.; TOM, R. Evaluation of regional climate model simulations of rainfall over the Upper Blue Nile basin. **Atmospheric Research**, v. 161, p. 57-64, 2015.

ALMAGRO, A.; OLIVEIRA, P. T. S.; NEARING, M. A.; HAGEMANN, S. Projected climate change impacts in rainfall erosivity over Brazil. **Scientific reports**, v. 7, n. 1, p. 1-12, 2017.

AMARAL, D. D.; CORDEIRO, L. A. M.; GALERANI, P. R. Plano Setorial de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas para Consolidação da Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura – PLANO ABC. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 6, p. 1266-1274, 2011.

ALMEIDA, C. T.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; DELGADO, R. C.; CUBO, P.; RAMOS, M. C. Spatiotemporal rainfall and temperature trends throughout the Brazilian Legal Amazon, 1973–2013. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 4, p. 2013-2026, 2016.

AMUNDSEN, H.; BERGLUND, F.; WESTSKOG, H. Overcoming barriers to climate change adaptation - a question of multilevel governance?. **Environment and Planning C: Government and Policy**, v. 28, n. 2, p. 276-289, 2010.

ANA - Agência Nacional de Águas. Portal HidroWeb - Rede Hidrometeorológica Nacional. <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb>>. Acessado em 1 de fevereiro de 2020

ANDERSON, T. R.; HAWKINS, E.; JONES, P. D. CO₂, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models. **Endeavour**, v. 40, n. 3, p. 178-187, 2016.

ARAGÃO, R.; SANTANA, G. R.; COSTA, C. E.; CRUZ, M. A.; FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. S. Chuvas intensas para o estado de Sergipe com base em dados desagregados de chuva diária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e**

Ambiental-AGRIAMBI, v. 17, n. 3, 2013.

ASADIEH, B.; KRAKAUER, N. Y. Global change in streamflow extremes under climate change over the 21st century. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 11, p. 5863, 2017.

AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. Rio de Janeiro; 17 eds. Bertrand Brasil, 2013.

AZEVEDO, T. R.; ANGELO, C. **Análise das emissões de GEE Brasil (1970-2016) e suas implicações para políticas públicas e a contribuição brasileira para o acordo de Paris (Documento síntese)**. Observatório do clima-SEEG, p. 51, 2018.

BALAJI, V. Climate Computing: The State of Play. **Computing in Science & Engineering**, v. 17, n. 6, p. 9-13, 2015.

BETTS, R. A.; GOLDING, N.; GONZALEZ, P.; GORNALL, J.; KAHANA, R.; KAY, G.; WILTSHIRE, A. Climate and land use change impacts on global terrestrial ecosystems and river flows in the HadGEM2-ES Earth system model using the representative concentration pathways. **Biogeosciences**, v. 12, n. 5, p. 1317, 2015.

BOOKER, D. J.; SNELDER, T. H. Comparing methods for estimating flow duration curves at ungauged sites. **Journal of Hydrology**, v. 434, p. 78-94, 2012.

BIERWAGEN, B. G.; THEOBALD, D. M.; PYKE, C. R.; CHOATE, A.; GROTH, P.; THOMAS, J. V.; MOREFIELD, P. National housing and impervious surface scenarios for integrated climate impact assessments. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, n. 49, p. 20887-20892, 2010.

BLANCO, C. J. C.; SANTOS, S. S. M.; QUINTAS, M. C.; VINAGRE, M. V. A.; MESQUITA, A. L. A. Contribution to hydrological modelling of small Amazonian catchments: application of rainfall-runoff models to simulate flow duration curves. **Hydrological Sciences Journal**, v. 58, n. 7, 2013.

BORMA, L. S.; NOBRE, C. A. **Secas na Amazônia: causas e consequências**. Oficina de Textos, 2016.

BRASIL – MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Modelagem Climática e Vulnerabilidades Setoriais à Mudança do Clima no Brasil**. Brasília, p. 590, 2016.

BURKHART, H. E.; BROOKS, E. B.; DINON-ALDRIDGE, H.; SABATIA, C. O.; GYAWALI, N.; WYNNE, R. H.; THOMAS, V. A. Regional Simulations of Loblolly Pine Productivity with CO₂ Enrichment and Changing Climate Scenarios. **Forest Science**, v. 64, n. 4, p. 349-357, 2018.

CARTER, J. G.; HANDLEY, J.; BUTLIN, T.; GILL, S. Adapting cities to climate change—exploring the flood risk management role of green infrastructure landscapes. **Journal of Environmental Planning and Management**, v. 61, n. 9, p. 1535-1552, 2018.

CASTELLARIN, A.; CAMORANI, G.; BRATH, A. Predicting annual and long-term flowduration curves in ungauged basins. **Advances in Water Resources**. v. 30, p. 937- 953, 2007.

CEPED - Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2010**. Florianópolis: UFSC, p. 105, 2012.

CHEN, X.; CHEN, L.; STONE, M. C.; ACHARYA, K. Assessing connectivity between the river channel and floodplains during high flows using hydrodynamic modeling and particle tracking analysis. **Journal of Hydrology**, v. 583, p. 124609, 2020.

CHENG, L.; AGHAKOUCHAK, A. Nonstationary precipitation intensity-duration-frequency curves for infrastructure design in a changing climate. **Scientific Reports**, v. 4, p. 7093, 2014.

CHOU, S. C.; ARRUDA L. A., CHAGAS, D.; DEREZYNSKI, C.; SONDERMANN, M.; REGOTO, P.; TAVARES, P. Climatic extreme indices over South America: validation and projections from the Eta RCM. **EGUGA**, p. 18075, 2017.

CORRÊA, J. A. J.; COSTA, A. C. L.; PEREIRA, I. C. N. Evaluation of logistic regression and neural network models for probabilistic forecasts of flooding in Curitiba-PR. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 7, p. 2264-2276, 2016.

COSTA, C. E. A. S.; BLANCO, C. J. C.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. IDF curves for future climate scenarios in a locality of the Tapajós Basin, Amazon, Brazil. **Journal of Water and Climate Change**, v. 11, n. 3, p. 760-770, 2020.

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

DASTAGIR, M. R. Modeling recent climate change induced extreme events in Bangladesh: a review. **Weather and Climate Extremes**, v. 7, p. 49-60, 2015.

DEREZYNSKI, C.; CHOU, S. C.; LYRA, A.; SONDERMANN, M.; REGOTO, P. et al. Downscaling of climate extremes over South America–Part I: Model evaluation in the reference climate. **Weather and Climate Extremes**, v. 29, p. 100273, 2020.

DE PAOLA, F.; GIUGNI, M.; TOPA, M. E.; BUCCHIGNANI, E. Intensity-Duration-Frequency (IDF) rainfall curves, for data series and climate projection in African cities. **SpringerPlus**, v. 3, n. 1, p. 133, 2014.

DÖLL, P.; KASPAR, F.; LEHNER, B. A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. **Journal of Hydrology**, v. 270, n. 1-2, p. 105-134, 2003.

DÖLL, P.; SCHMIED, H. M. How is the impact of climate change on river flow regimes related to the impact on mean annual runoff? A global-scale analysis. **Environmental Research Letters**, v. 7, n. 1, p. 014037, 2012.

DÖLL, P.; TRAUTMANN, T.; GÖLLNER, M.; SCHMIED, H. M. A global-scale analysis of water storage dynamics of inland wetlands: Quantifying the impacts of human water use and man-made reservoirs as well as the unavoidable and avoidable impacts of climate change. **Ecohydrology**, v. 13, n. 1, p. e2175, 2020.

DOVIE, D. B. K.; LWASA, S. Correlating negotiation hotspot issues, Paris climate agreement and the international climate policy regime. **Environmental Science & Policy**, v. 77, p. 1-8, 2017.

DOW, K.; DOWNING, T. E. **The atlas of climate change: mapping the world's greatest challenge**. Earthscan, London, 2016.

DROUET, L.; BOSETTI, V.; TAVONI, M. Selection of climate policies under the uncertainties in the Fifth Assessment Report of the IPCC. **Nature Climate Change**, v. 5, n. 10, p. 937, 2015.

ELETROBRAS – Centrais Elétricas Brasileiras. **Diretrizes para estudos e projetos de pequenas centrais hidrelétricas**. Brasília, p. 458, 2000.

ESGF - Earth System Grid Federation. **Brazilian Earth System Model (BESM) output**. Disponíveis em: <<https://dm2.cptec.inpe.br/projects/esgf-inpe/>>. Acesso em 19 de julho de 2018.

ESPINOZA, J. C.; RONCHAIL, J.; FRAPPART, F.; LAVADO, W.; SANTINI, W.; GUYOT, J. L. The major floods in the Amazonas River and tributaries (western Amazon basin) during the 1970–2012 period: A focus on the 2012 flood. **Journal of Hydrometeorology**, v. 14, n. 3, p. 1000-1008, 2013.

ESPINOZA-VILLAR, R.; MARTINEZ, J. M.; ARMIJOS, E.; ESPINOZA, J. C.; FILIZOLA, N. et al. Spatio-temporal monitoring of suspended sediments in the Solimões River (2000–2014). **Comptes Rendus Geoscience**, v. 350, n. 1-2, p. 4-12, 2018.

FAN, Y.; CHEN, Y.; LIU, Y.; LI, W. Variation of baseflows in the headstreams of the Tarim River Basin during 1960–2007. **Journal of Hydrology**, v. 487, p. 98-108, 2013.

FEARNSIDE, P. M. Amazon dams and waterways: Brazil's Tapajós Basin plans. **Ambio**, v. 44, n. 5, p. 426-439, 2015.

FEARNSIDE, P. M. Environmental and social impacts of hydroelectric dams in Brazilian Amazonia: Implications for the aluminum industry. **World Development**, v. 77, p. 48-65, 2016.

FERRET. **Data Visualization and Analysis**. Disponível em: <<http://ferret.pmel.noaa.gov/Ferret/>>. Acesso em: 28 de maio de 2019.

FERREIRA, L. C.; BARBI, F. The challenge of global environmental change in the anthropocene: An analysis of Brazil and China. **Chinese Political Science Review**, v. 1, n. 4, p. 685-697, 2016.

FIGUEIREDO, N. M.; BLANCO, C. J. C. Water level forecasting and navigability conditions of the Tapajós River-Amazon-Brazil. **La Houille Blanche**, n. 3, p. 53-64, 2016.

FOLEY, S. F.; GRONENBORN, D.; ANDREAE, M. O.; KADEREIT, J. W.; ESPER, J.; SCHOLZ, D.; VÖTT, A. The Palaeoanthropocene—The beginnings of anthropogenic environmental change. **Anthropocene**, v. 3, p. 83-88, 2013.

FRIELER, K.; LANGE, S.; PIONTEK, F.; REYER, C. P.; SCHEWE, J. et al. Assessing the impacts of 1.5 C global warming—simulation protocol of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP2b). **Geoscientific Model Development**, 2017.

GILLETT, N. P.; ARORA, V. K.; FLATO, G. M.; SCINOCCHA, J. F.; SALZEN, K. V. Improved constraints on 21st-century warming derived using 160 years of temperature observations. **Geophysical Research Letters**, v. 39, n. 1, 2012.

GLEDITSCH, N. P. Lewis Fry Richardson—A Pioneer Not Forgotten. In: **Lewis Fry Richardson: His Intellectual Legacy and Influence in the Social Sciences**. Springer, Cham, 2020. p. 1-12, 2020.

GRAMELSBERGER, G. Conceiving processes in atmospheric models—general equations, subscale parameterizations, and ‘superparameterizations’. **Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 41, p. 233–241, 2010.

GRAMELSBERGER, G. What do numerical (climate) models really represent?. **Studies in History and Philosophy of Science**, v. 42, n. 2, p. 296-302, 2011.

GRANZIERA, M. L. M.; REI, F. **O Futuro do Regime Internacional das Mudanças Climáticas—Aspectos Jurídicos e Institucionais**. Santos: SBDIMA, 2015.

GRILLAKIS, M. G. Increase in severe and extreme soil moisture droughts for Europe under climate change. **Science of The Total Environment**, v. 660, p. 1245-1255, 2019.

GUDMUNDSSON, L.; TALLAKSEN, L. M.; STAHL, K.; CLARK, D. B.; DUMONT, E.; HAGEMANN, S.; VOSS, F. Comparing large-scale hydrological model simulations to observed runoff percentiles in Europe. **Journal of Hydrometeorology**, v. 13, n. 2, p. 604-620, 2012.

GUPTA, J. A history of international climate change policy. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 1, n. 5, p. 636-653, 2010.

HADDELAND, I.; HEINKE, J.; BIEMANS, H.; EISNER, S.; FLÖRKE, M.; HANASAKI, N.; MARKUS, K.; FULCO L.; YOSHIMITSU M.; JACOB S.; STACKE, T.; ZACHARY D.; TESSLERH, Y. W.; DOMINIK w. Global water resources affected by human interventions and climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 9, p. 3251-3256, 2013.

HAGHTALAB, N.; MOORE, N.; HEERSPINK, B. P.; HYNDMAN, D. W. Evaluating spatial patterns in precipitation trends across the Amazon basin driven by land cover and global scale forcings. **Theoretical and Applied Climatology**, p. 1-17, 2020.

HOFFMAN, P. F.; SCHRAG, D. P. The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change. **Terra Nova**, v. 14, n. 3, p. 129-155, 2002.

HOWARD-GRENVILLE, J.; BUCKLE, S. J.; HOSKINS, B. J.; GEORGE, G. Climate change and management. **Academy of Management Journal**, v. 57, p. 615-623, 2014.

HUANG, S.; KUMAR, R.; FLÖRKE, M.; YANG, T.; HUNDECHA, Y. et al. Evaluation of an ensemble of regional hydrological models in 12 large-scale river basins worldwide. **Climatic Change**, v. 141, n. 3, p. 381-397, 2017.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Information about Sixth Assessment Report (AR6)**. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/activities/activities.shtml>>. Acesso em 16 de julho de 2018.

ISLAM, M. S.; OKI, T.; KANAE, S.; HANASAKI, N.; AGATA, Y.; YOSHIMURA, K. A grid-based assessment of global water scarcity including virtual water trading. **Water Resources Management**, v. 21, n. 1, p. 19, 2007.

ISIMIP - Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project. **Mission & Implementation**. Disponível em: <<https://www.isimip.org/about/#mission>>. Acesso em: 28 de maio de 2018.

JÉZÉQUEL, C., TEDESCO, P. A., BIGORNE, R., MALDONADO-OCAMPO, J. A., ORTEGA, H. et al. A database of freshwater fish species of the Amazon Basin. **Scientific data**, v. 7, n. 1, p. 1-9, 2020.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; MATTAR, C.; BARICHIVICH, J.; SANTAMARÍA-ARTIGAS, A.; TAKAHASHI, K. et al. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. **Scientific reports**, v. 6, p. 33130, 2016.

JOHNSON, J. **From Kyoto to Paris: Global Climate Accords**. Cavendish Square Publishing, LLC, 2017.

KURAHASHI-NAKAMURA, T.; ABE-OUCHI, A.; YAMANAKA, Y. Effects of physical changes in the ocean on the atmospheric pCO₂: glacial-interglacial cycles. **Climate Dynamics**, v. 35, n. 4, p. 713-719, 2010.

LEE, J.; WANG, B. Future change of global monsoon in the CMIP5. **Climate Dynamics**, v. 42, n. 1-2, p. 101-119, 2014.

LEES, A. C.; PERES, C. A.; FEARNSIDE, P. M.; SCHNEIDER, M.; ZUANON, J. A. Hydropower and the future of Amazonian biodiversity. **Biodiversity and Conservation**, v. 25, n. 3, p. 451-466, 2016.

LEGGETT, J.; PEPPER, W. J.; SWART, R. J. **Emissions scenarios for IPCC: an update. In: Climate Change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment.** Cambridge University Press, Cambridge, UK, p. 71-95, 1992.

LEITE, J. C. Controversies in climatology: IPCC and the anthropogenic global warming. **Scientiae Studia**, v. 13, n. 3, p. 643-677, 2015.

LI, H.; SHEFFIELD, J.; WOOD, E. F. Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 115, n. D10, 2010.

LIEW, S. C.; RAGHAVAN, S. V.; LIONG, S. How to construct future IDF curves, under changing climate, for sites with scarce rainfall records?. **Hydrological Processes**, v. 28, n. 8, p. 3276-3287, 2014.

LYNCH, P. The Emergence of Numerical Weather Prediction: Richardson's Dream. **Cambridge University Press**, p. 279, 2006.

MARENGO, J. A.; SCHAEFFER, R.; ZEE, D.; PINTO, H. S. **Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil.** FBDS, Rio de Janeiro, 2009.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; CHOU, S. C.; TOMASELLA, J.; SAMPAIO, G.; ALVES L. M.; OBREGÓN, G. O.; SOARES, W. R.; BETTS, R.; KAY, G. **Riscos das Mudanças Climáticas no Brasil: análise sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na Amazônia.** Brasil-Reino Unido, p. 55, 2011.

MARENGO, J. A. O futuro clima do Brasil. **Revista USP**, n. 103, p. 25-32, 2014.

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 3, p. 1033-1050, 2016.

MASSON-DELMOTTE, V.; SCHULZ, M.; ABE-OUCHI, A.; BEER, J.; GANOPOLSKI, A.; GONZÁLEZ R. J. F.; OSBORN, T. Information from paleoclimate archives. **Climate Change**, v. 383464, p. 2013, 2013.

MAURER, E. P.; KAYSER, G.; DOYLE, L.; WOOD, A. W. Adjusting Flood Peak Frequency Changes to Account for Climate Change Impacts in the Western United States. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 144, n. 3, p. 05017025, 2017.

MCINNES, K. L.; WHITE, C. J.; HAIGH, I. D.; HEMER, M. A.; HOEKE, R. K.; HOLBROOK, N. J.; WESTRA, S. Natural hazards in Australia: sea level and coastal extremes. **Climatic change**, v. 139, n. 1, p. 69-83, 2016.

MCWILLIAMS, J. C. A perspective on the legacy of Edward Lorenz. **Earth and Space Science**, v. 6, n. 3, p. 336-350, 2019.

MEADE, R. H.; RAYOL, J. M.; CONCEIÇÃO, S. C.; NATIVIDADE, J. R. Backwater

effects in the Amazon River basin of Brazil. **Environmental Geology and Water Sciences**, v. 18, n. 2, p. 105-114, 1991.

MELO, A. C. S.; VIEIRA, A. T. S.; CORDEIRO, B. A. F. Diagnosis of the Potential for Soybeans Outflow Through Ports in the State of Pará: A Bibliographical and Documentary Analysis. **InterSciencePlace**, v. 12, n. 3, 2017.

MELSEN, L.; TEULING, A.; TORFS, P.; ZAPPA, M.; MIZUKAMI, N.; CLARK, M.; UIJLENHOET, R. Representation of spatial and temporal variability in large-domain hydrological models: case study for a mesoscale pre-Alpine basin. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 20, n. 6, p. 2207-2226, 2016.

MÉRONA, B.; GASCUEL, D. The effects of flood regime and fishing effort on the overall abundance of an exploited fish community in the Amazon floodplain. **Aquatic Living Resources**, v. 6, n. 2, p. 97-108, 1993.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

MOTTA, R. S.; HARGRAVE, J.; LUEDEMANN, G.; GUTIERREZ, M. B. S. **Mudança do Clima no Brasil**, p. 441, 2011.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, p. 552, 2007.

NAKICENOVIC, N.; ALCAMO, J.; GRUBLER, A.; RIAHI, K.; ROEHRL, R. A.; ROGNER, H. H.; VICTOR, N. **Special report on emissions scenarios (SRES), a special report of Working Group III of the intergovernmental panel on climate change**. Cambridge University Press, 2000.

NOBRE, C. A. **Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima**. Cadernos Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. Mudança do Clima. Brasília, v. 1, p. 250, 2005.

NOBRE, P.; SIQUEIRA, L. S.; ALMEIDA, R. A.; MALAGUTTI, M.; GIAROLLA, E.; CASTELÃO, G. P.; BAPTISTA JUNIOR, M. Climate simulation and change in the Brazilian Climate Model. **Journal of Climate**, v. 26, n. 17, p. 6716-6732, 2013.

OHUNAKIN, O. S.; ADARAMOLA, M. S.; OYEWOLA, O. M.; MATTHEW, O. J.; FAGBENLE, R. O. The effect of climate change on solar radiation in Nigeria. **Solar Energy**, v. 116, p. 272-286, 2015.

OLIVEIRA, J. A. P. The implementation of climate change related policies at the subnational level: an analysis of three countries. **Habitat international**, v. 33, n. 3, p. 253-259, 2009.

OLIVEIRA, V. A.; MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; SRINIVASAN, R. Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil. **International Journal of**

Climatology, v. 37, n. 15, p. 5005-5023, 2017.

OVERNEY, O. D.; CONSUEGRA, A.; MUSY, P.; LAZARO, J.; BOILLAT, R. S. **Influence des changements climatiques sur les régimes hydrologique et hydraulique des cours d'eau**. Rapport final PNR 31. vdf Hochschulverlag AG, ETH Zürich, 1997.

PACHAURI, R. K.; MEYER, L. A. **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**. IPCC, 2014.

PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M. P.; FRAPPART, F. et al. Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. **Water Resources Research**, v. 49, n. 3, p. 1226-1243, 2013.

PANISSET, J. S.; LIBONATI, R.; GOUVEIA, C. M. P.; MACHADO, F. S.; FRANÇA, D. A.; FRANÇA, J. R. A.; PERES, L. F. Contrasting patterns of the extreme drought episodes of 2005, 2010 and 2015 in the Amazon Basin. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 2, p. 1096-1104, 2018.

PBMC - Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Base Científica das Mudanças Climáticas – 1º Relatório de Avaliação Nacional**. Rio de Janeiro, v. 1, p. 28, 2014.

PETERS, G. P.; ANDREW, R. M.; BODEN, T.; CANADELL, J. G.; CIAIS, P.; LE QUÉRE, C.; WILSON, C. The challenge to keep global warming below 2 C. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 1, p. 4, 2012.

PETIT, J. R.; JOUZEL, J.; RAYNAUD, D.; BARKOV, N. I.; BARNOLA, J. M.; BASILE, I. et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. **Nature**, v. 399, n. 6735, p.429-436, 1999.

PHILLIPS, N. A. The General Circulation of the Atmosphere: a Numerical Experiment. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 82, p. 123-64, 1956.

PINHEIRO, J. U.; NEVES, J. A.; CHAVES, R. R.; MENDES, D.; BARRETO, N. C. Avaliação de Modelos do CMIP5 que Melhor Expressam a Atuação dos Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCANS) no Nordeste Brasileiro (NEB). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 5, p. 891-904, 2015.

PIVETTA, Marcos. **Extremos do clima**. Pesquisa FAPESP, v. 210, p. 16-20, 2013.

PORTER, J. J.; DEMERITT, D.; DESSAI, S. The right stuff? Informing adaptation to climate change in British local government. **Global Environmental Change**, v. 35, p. 411-422, 2015.

PRUDHOMME, C.; PARRY, S.; HANNAFORD, J.; CLARK, D. B.; HAGEMANN, S.; VOSS, F. How well do large-scale models reproduce regional hydrological extremes in Europe?. **Journal of Hydrometeorology**, v. 12, n. 6, p. 1181-1204, 2011.

PUMO, D.; CARACCILO, D.; VIOLA, F.; NOTO, L. V. Climate change effects on the hydrological regime of small non-perennial river basins. **Science of the Total Environment**, v. 542, p. 76-92, 2016.

ROBSON, J.; ORTEGA, P.; SUTTON, R. A reversal of climatic trends in the North Atlantic since 2005. **Nature Geoscience**, v. 9, n. 7, p. 513, 2016.

RODRÍGUEZ, R.; NAVARRO, X.; CASAS, M. C.; RIBALAYGUA, J.; RUSSO, B.; POUGET, L.; REDAÑO, A. Influence of climate change on IDF curves for the metropolitan area of Barcelona (Spain). **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 3, p. 643-654, 2014.

RODRIGUES FILHO, S.; LINDOSO, D. P.; BURSZTYN, M.; NASCIMENTO, C. G. Climate in Trance: Mitigation and Adaptation Policies in Brazil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 19, p. 74-90, 2016.

ROGELJ, J.; DEN ELZEN, M.; HÖHNE, N.; FRANSEN, T.; FEKETE, H.; WINKLER, H.; MEINSHAUSEN, M. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 C. **Nature**, v. 534, n. 7609, p. 631, 2016.

ROHLING, E. J.; FOSTER, G. L.; GRANT, K. M.; MARINO, G.; ROBERTS, A. P.; TAMISIEA, M. E.; WILLIAMS, F. Sea-level and deep-sea-temperature variability over the past 5.3 million years. **Nature**, v. 508, n. 7497, p. 477, 2014.

ROST, S.; GERTEN, D.; HEYDER, U. Human alterations of the terrestrial water cycle through land management. **Advances in Geosciences**, v. 18, p. 43-50, 2008.

SABÓIA, Marcos Abílio Medeiros. Estratégia Robusta para a Gestão de Drenagem Urbana em Cenário de Mudança do Clima. **Tese de Doutorado**. Universidade Federal do Ceará, 2016.

SABÓIA, M. A. M. D.; SOUZA FILHO, F. A.; ARAÚJO JÚNIOR, L. M. D.; SILVEIRA, C. S. Climate changes impact estimation on urban drainage system located in low latitudes districts: a study case in Fortaleza-CE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, 2017.

SACHINDRA, D. A.; HUANG, F.; BARTON, A.; PERERA, B. J. C. Statistical downscaling of general circulation model outputs to catchment scale hydroclimatic variables: issues, challenges and possible solutions. **Journal of Water and Climate Change**, v. 5, n. 4, p. 496-525, 2014.

SAEED, F.; BETHKE, I.; LANGE, S.; LIERHAMMER, L.; SHIOGAMA, H. et al. Bias correction of multi-ensemble simulations from the HAPPI model intercomparison project. **Geoscientific Model Development Discussions**, p. 1-23, 2018.

SAMIMI, A.; ZARINABADI, S. Reduction of greenhouse gases emission and effect on environment. **Journal of American Science**, v. 8, n. 8, p. 1011-1015, 2012.

SAMPAIO, G.; DIAS, P. L. S. Evolução dos Modelos Climáticos e de Previsão de Tempo e Clima. **Revista USP**, n. 103, p. 41-54, 2014.

SATYAMURTY, P.; COSTA, C. P. W.; MANZI, A. O. Moisture source for the Amazon Basin: a study of contrasting years. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 111, n. 1-2, p. 195-209, 2013.

SCHARDONG, A.; SIMONOVIC, S. P.; GARCIA, J. I. B. O possível efeito de mudanças climáticas e suas incertezas sobre afluências em sistemas de recursos hídricos. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 11, n. 2, p. 53-65, 2014a.

SCHARDONG, A.; SRIVASTAV, R. K.; SIMONOVIC, S. P. Atualização da equação intensidade-duração-frequência para a cidade de São Paulo sob efeito de mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 4, p. 176-185, 2014b.

SCHARDONG, A.; GAUR, A.; SIMONOVIC, S. P.; SANDINK, D. **Computerized tool for the development of intensity-duration-frequency curves under a changing climate. Technical Manual**, v. 3, 2018.

SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. **Infográficos da quantidade de emissões brutas por área**. Disponível em: <<http://seeg.eco.br/setores/>>. Acesso em 17 de julho de 2018.

SHARMA, S.; SHRESTHA, A.; MCLEAN, C. E. Impact of global climate change on stream low flows in a hydraulic fracking affected watershed. **Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering**, v. 5, n. 1, 2016.

SHARMA, U. How do farmers perceive climate change? A systematic review. **Climatic Change**, p. 1-20, 2020.

SHERMAN, C. W. Frequency and intensity of excessive rainfalls at Boston, Massachusetts. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, v. 95, n. 1, p. 951-960, 1931.

SILVA, C. V. F.; SCHARDONG, A.; GARCIA, J. I. B.; OLIVEIRA, C. P. M. Climate Change Impacts and Flood Control Measures for Highly Developed Urban Watersheds. **Water**, v. 10, n.7, p. 829, 2018.

SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. A.; COSTA, A. A.; CABRAL, S. L. Avaliação de desempenho dos modelos do CMIP5 quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no século XX sobre a região Nordeste do Brasil, Amazônia e Bacia da Prata e análise das projeções para o cenário RCP8.5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, 2013.

SIMONOVIC, S. P.; SCHARDONG, A.; SANDINK, D. Mapping extreme rainfall statistics for Canada under climate change using updated intensity-duration-frequency curves. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 3, p. 04016078, 2017.

SIMONOVIC, S. P.; SCHARDONG, A.; SANDINK, D.; SRIVASTAV, R. A web-based tool for the development of intensity duration frequency curves under changing

climate. **Environmental Modelling & Software**, v. 81, p. 136-153, 2016.

SINGH, R.; ARYA, D. S.; TAXAK, A. K.; VOJINOVIC, Z. Potential impact of climate change on rainfall intensity-duration-frequency curves in Roorkee, India. **Water resources management**, v. 30, n. 13, p. 4603-4616, 2016.

SMITH, Katie A. Investigating uncertainty in global hydrology modelling. **Ph.D. Thesis**. University of Nottingham, 2016.

SOITO, J. L. S; FREITAS, M. A. V. Amazon and the expansion of hydropower in Brazil: Vulnerability, impacts and possibilities for adaptation to global climate change. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 6, p. 3165-3177, 2011.

SOOD, A.; SMAKHTIN, V. Global hydrological models: a review. **Hydrological Sciences Journal**, v. 60, n. 4, p. 549-565, 2015.

SORRIBAS, M. V.; PAIVA, R. C.; MELACK, J. M.; BRAVO, J. M.; JONES, C.; CARVALHO, L. et al. Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin. **Climatic Change**, v. 136, n. 3-4, p. 555-570, 2016.

SOUZA, R. O. D. M.; SCARAMUSSA, P. H.; AMARAL, M. A.; PEREIRA NETO, J. A.; PANTOJA, A. V.; SADECK, L. W. Equações de chuvas intensas para o Estado do Pará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 9, p. 999-1005, 2012.

SPINONI, J.; NAUMANN, G.; CARRAO, H.; BARBOSA, P.; VOGT, J. World drought frequency, duration, and severity for 1951–2010. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 8, p. 2792-2804, 2014.

SRIVASTAV, R. K.; SCHARDONG, A.; SIMONOVIC, S. P. Equidistance quantile matching method for updating IDF Curves under climate change. **Water Resources Management**, v. 28, n. 9, p. 2539-2562, 2014a.

SRIVASTAV, R. K.; SCHARDONG, A.; SIMONOVIC, S. P. **Computerized tool for the development of intensity-duration-frequency curves under a changing climate. Technical Manual**, v. 1, 2014b.

STOCKER, T. F.; QIN, G. K.; PLATTNER, M.; TIGNOR, S. K.; ALLEN, J.; BOSCHUNG, A.; NAUELS, Y.; XIA, V.; BEX, P.M.; MIDGLEY, P. M. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, p. 1535, 2013.

STRAYER, D. L.; COLE, J. J.; FINDLAY, S. E.; FISCHER, D. T.; GEPHART, J. A. et al. Decadal-scale change in a large-river ecosystem. **BioScience**, v. 64, n. 6, p. 496-510, 2014.

TOST, H. Chemistry-climate interactions of aerosol nitrate from lightning. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 17, n. 2, p. 1125, 2017.

VAN HUIJGEVOORT, M. H. J.; VAN LANEN, H. A. J.; TEULING, A. J.; UIJLENHOET, R. Identification of changes in hydrological drought characteristics from a multi-GCM driven ensemble constrained by observed discharge. **Journal of Hydrology**, v. 512, p. 421-434, 2014.

VAN HUIJGEVOORT, M. H. J. **Hydrological drought: characterisation and representation in large-scale models**. Wageningen University, 2014.

VAN VUUREN, D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; MASUI, T. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, v. 109, n. 1-2, p. 5, 2011.

VERMA, R. K.; MURTHY, S.; VERMA, S.; MISHRA, S. K. Design flow duration curves for environmental flows estimation in Damodar River Basin, India. **Applied Water Science**, v. 7, n. 3, p. 1283-1293, 2017.

VICTOR, D. Embed the social sciences in climate policy. **Nature**, v. 520, n. April, p. 27-29, 2015.

VIOLA, F.; NOTO, L. V.; CANNAROZZO, M.; LA LOGGIA, G. Regional flow duration curves for ungauged sites in Sicily. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 1, p. 323, 2011.

VILLAMAYOR, J.; AMBRIZZI, T.; MOHINO, E. Influence of decadal sea surface temperature variability on northern Brazil rainfall in CMIP5 simulations. **Climate dynamics**, v. 51, n. 1-2, p. 563-579, 2018.

VOGEL, R. M.; FENNESSEY, N. M. Regional flow-duration curves for ungauged sites in Massachusetts. **Journal Water Resour Plann Manage**, v. 116, n. 4, p. 531, 1990.

VOGEL, R. M.; FENNESSEY, N. M. Flow duration curves II: a review of applications in water resources planning 1. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 31, n. 6, p. 1029-1039, 1995.

VÖRÖSMARTY, C. J.; MOORE, B.; GRACE, A. L.; GILDEA, M. P.; MELILLO, J. M.; PETERSON, B. J.; STEUDLER, P. A. Continental scale models of water balance and fluvial transport: an application to South America. **Global biogeochemical cycles**, v. 3, n. 3, p. 241-265, 1989.

WANDERS, N.; VAN LANEN, H. A. J. Future discharge drought across climate regions around the world modelled with a synthetic hydrological modelling approach forced by three general circulation models. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 15, n. 3, p. 487-504, 2015.

WANDERS, N.; WADA, Y. Human and climate impacts on the 21st century hydrological drought. **Journal of Hydrology**, v. 526, p. 208-220, 2015.

WANG, L.; RANASINGHE, R. W. M. R. J.; MASKEY, S.; VAN GELDER, P. H. A. J.;

VRIJLING, J. K. Comparison of empirical statistical methods for downscaling daily climate projections from CMIP5 GCMs: a case study of the Huai River Basin, China. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 1, p. 145-164, 2016.

WALKER, R.; SIMMONS, C. Endangered Amazon: An Indigenous Tribe Fights Back Against Hydropower Development in the Tapajós Valley. **Environment: Science and Policy for Sustainable Development**, v. 60, n. 2, p. 4-15, 2018.

WARREN, R. The role of interactions in a world implementing adaptation and mitigation solutions to climate change. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 369, n. 1934, p. 217-241, 2011.

WARSAWSKI, L.; FRIELER, K.; HUBER, V.; PIONTEK, F.; SERDECZNY, O.; SCHEWE, J. The inter-sectoral impact model intercomparison project (ISI-MIP): project framework. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 9, p. 3228-3232, 2014.

WATANABE, M.; SUZUKI, T.; O'ISHI, R.; KOMURO, Y.; WATANABE, S.; EMORI, S.; TAKATA, K. Improved climate simulation by MIROC5: mean states, variability, and climate sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, n. 23, p. 6312-6335, 2010.

WATANABE, M.; SHIOGAMA, H.; TATEBE, H.; HAYASHI, M.; ISHII, M.; KIMOTO, M. Contribution of natural decadal variability to global warming acceleration and hiatus. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 10, p. 893, 2014.

WEART, S. The development of general circulation models of climate. **Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 41, n. 3, p. 208-217, 2010.

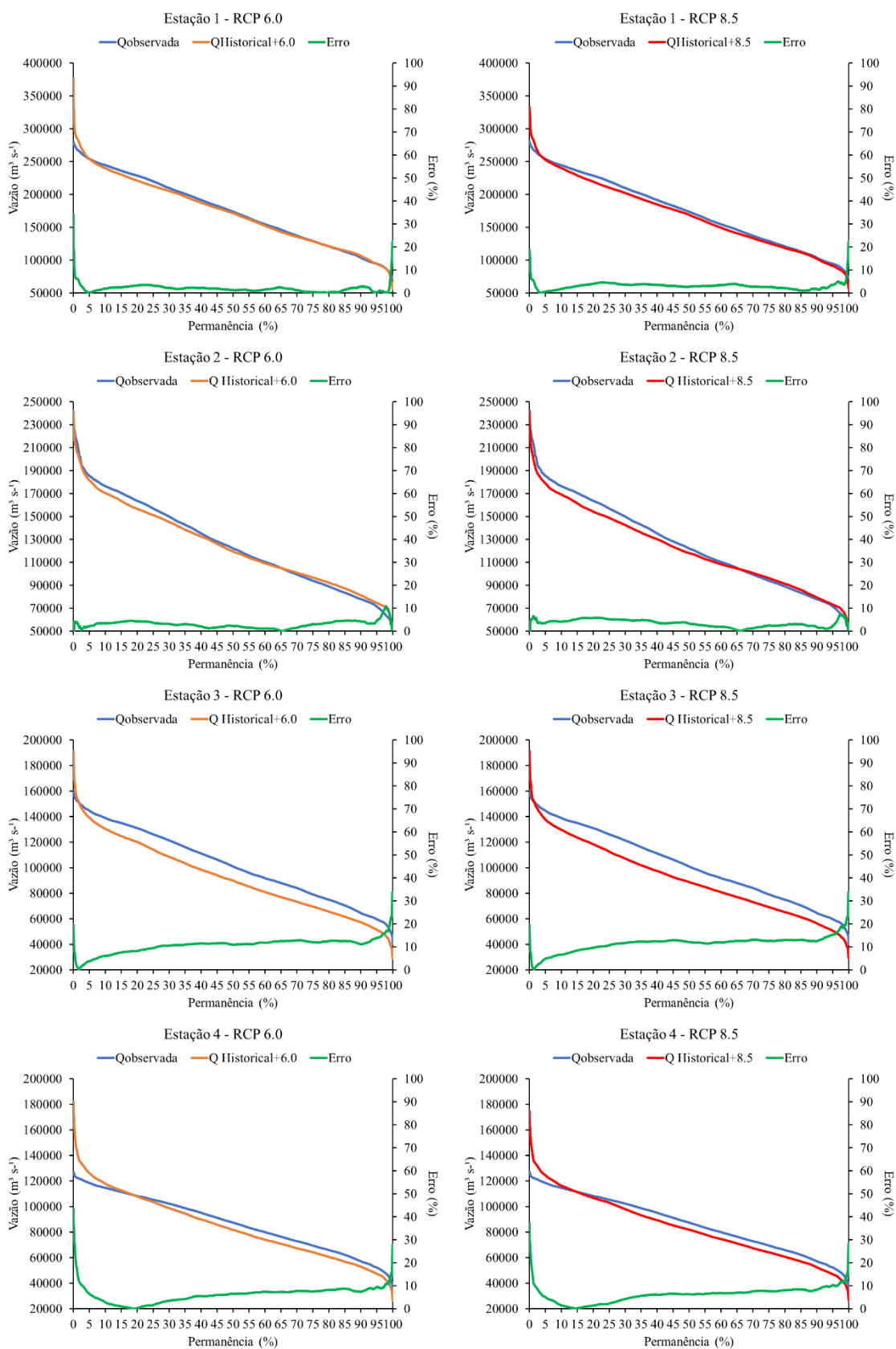
WENG, F. Advances in radiative transfer modeling in support of satellite data assimilation. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 64, n. 11, p. 3799-3807, 2007.

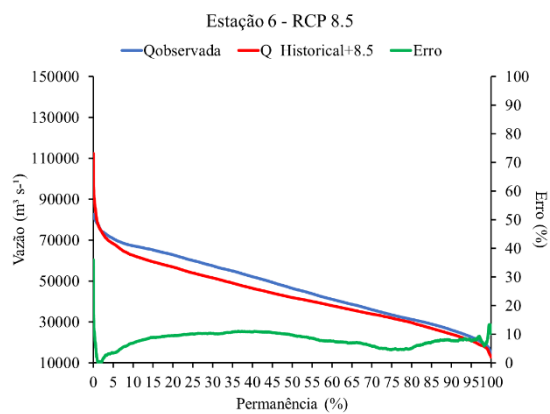
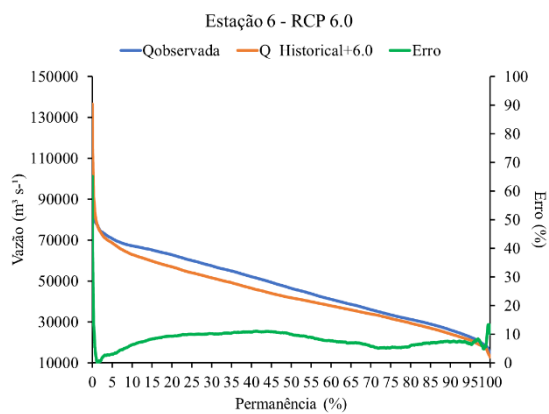
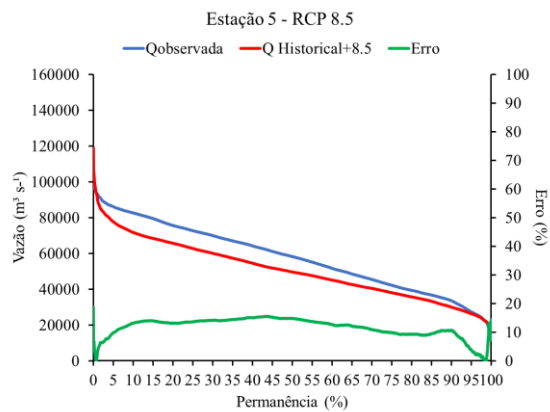
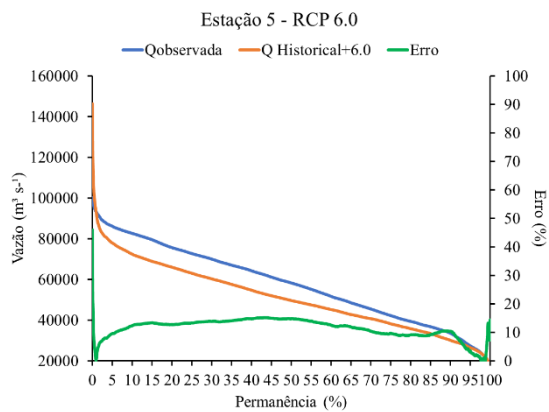
WICAKSONO, A. A. **Urban river governance through community movement to increase the adaptive capacity to climate change of the poor: a case study of Yogyakarta**. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020. p. 012003, 2020.

ZAHERPOUR, J.; MOUNT, N.; GOSLING, S. N.; DANKERS, R.; EISNER, S.; GERTEN, D. et al. Exploring the value of machine learning for weighted multi-model combination of an ensemble of global hydrological models. **Environmental modelling & software**, v. 114, p. 112-128, 2019.

ZHOU, Q.; LENG, G.; HUANG, M. Impacts of future climate change on urban flood volumes in Hohhot in northern China: benefits of climate change mitigation and adaptations. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, n. 1, p. 305-316, 2018.

APÊNDICE A – VALIDAÇÃO DOS DADOS WaterGAP2 (MIROC5)



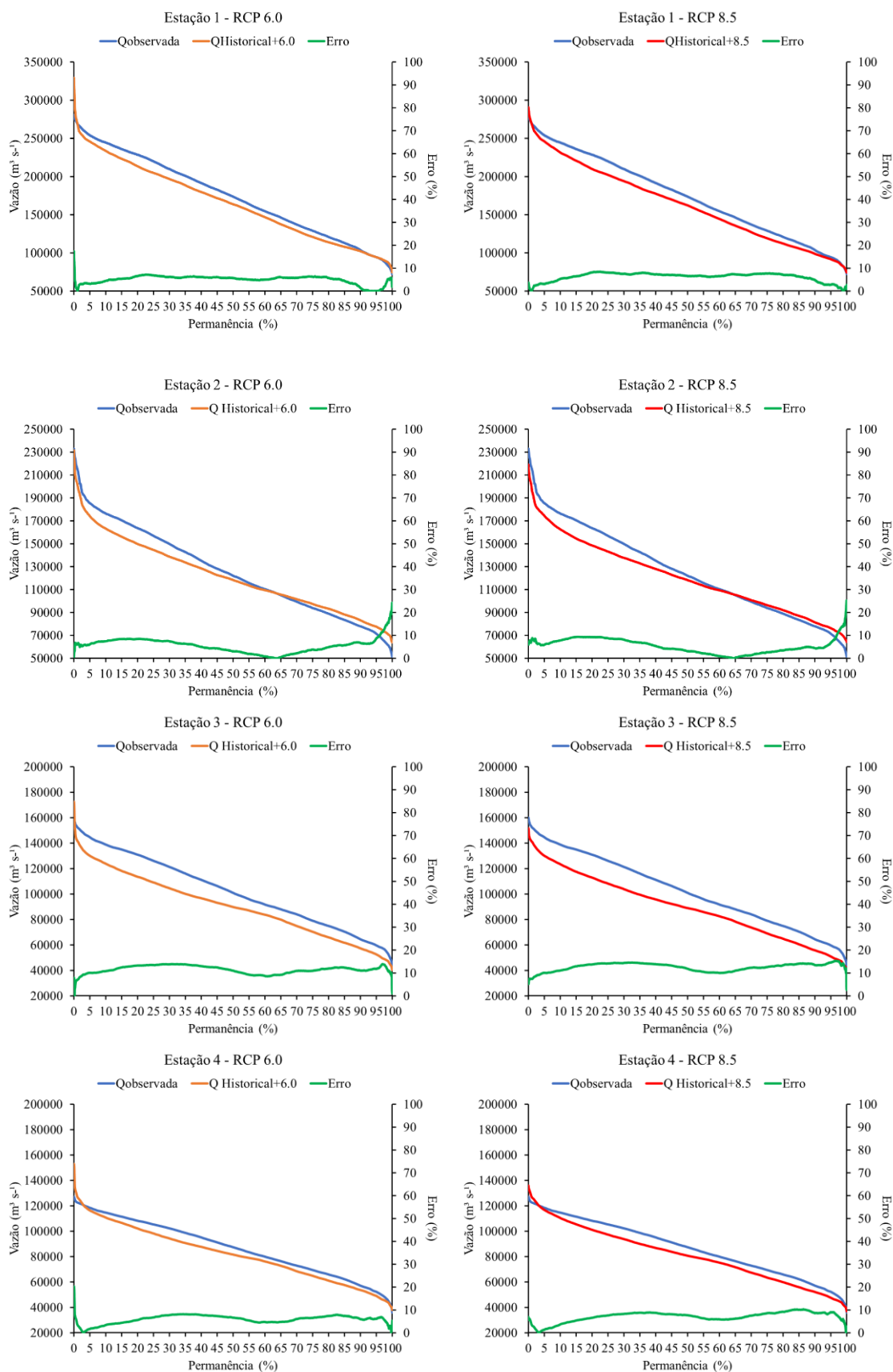


Estação 7 - RCP 6.0

Estação 7 - RCP 8.5



APÊNDICE B – VALIDAÇÃO DOS DADOS WaterGAP2 (HadGEM2-ES)



APÊNDICE C – PRIMEIRO ARTIGO PRODUZIDO APROVADO NO JOURNAL OF WATER AND CLIMATE CHANGE (ISSN: 2040-2244)



760

© IWA Publishing 2020 Journal of Water and Climate Change | 11.3 | 2020

IDF curves for future climate scenarios in a locality of the Tapajós Basin, Amazon, Brazil

Carlos Eduardo Aguiar de Souza Costa, Claudio José Cavalcante Blanco and José Francisco de Oliveira-Júnior

ABSTRACT

Changes in the global climate are attributed to the levels of greenhouse gases. Thus, future scenarios (Representative Concentration Pathways – RCPs) have been developed to explore the impact of different climate policies on the world. The RCPs are essential tools for General Circulation Models (GCMs) to simulate future climate changes. Curves that associate Intensity, Duration and Frequency (IDF) are used in forecasts and are fundamental for the design of hydraulic projects and risk management. The objective of this study was to design IDF curves for the RCP 4.5 and 8.5, using data from the HadGEM2-ES, CanESM2 and MIROC5 models. The Equidistance Quantile Matching Method was used to design the IDF curves. The simulated curves presented differences when related to the existing curve. The largest differences were for the MIROC5 (146% in RCP 8.5) and the smallest differences were for the CanESM2 (–20.83% for RCP 8.5). This result demonstrates that the method incorporates changes in future climate variability. The spatial resolutions of each model influenced their IDF curves, which led the CanESM2 curves to not present satisfactory results that are different from the MIROC5 curves, which were the ones that best represented the possible future differences.

Key words | climate change, hydraulic projects, risk management

Carlos Eduardo Aguiar de Souza Costa
Claudio José Cavalcante Blanco (corresponding author)
Graduate Program in Civil Engineering (PPGEC),
Federal University of Pará (UFPA),
66075-110, Belém, Pará,
Brazil
E-mail: marco@ufpa.br

José Francisco de Oliveira-Júnior
Institute of Atmospheric Sciences (ICAT),
Federal University of Alagoas (UFAL),
57072-260, Maceió, Alagoas,
Brazil

INTRODUCTION

With the understanding that climate change is unavoidable, global climate policy has shifted its focus on mitigation to preparedness and adaptation to future impacts (Porter *et al.* 2015). Faced with these concerns, the World Meteorological Organization (WMO) and the United Nations Environment Program (UNEP) have created the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). This body regularly brings together several climate research centers around the world to update climate models, prepare technical reports and other products on possible scenarios of greenhouse gas emissions and the impacts on the different climate scopes (Pachauri & Meyer 2014).

The fifth IPCC report (AR5), adopted in 2014, indicates that temperature rise is especially attributable to greenhouse gas levels. Most of the time, the greenhouse effect is linked

to development. From this, there was interest from governments in scenarios that better explore the impact of different climate policies, analyzing the 'cost-benefit' of long-term climate objectives. In response, the IPCC asked the scientific communities to develop a set of scenarios that would replace the old ones (called Special Report Emission Scenarios – SRES) created during the fourth report and facilitate the assessment of future situations. The RCPs (Representative Concentration Pathways) scenarios were proposed, and those most used for the future simulations (2006–2100) are the RCP 2.6, RCP 4.5 and RCP 8.5. The RCP 2.6 scenario is the least likely scenario to occur, while RCP 4.5 is the desired scenario, wherein countries can control emission levels and the level of CO₂ in the atmosphere stabilizes soon after 2100. However, the RCP

doi: 10.2166/wcc.2019.202

**APÊNDICE D – SEGUNDO ARTIGO SUBMETIDO À REVISTA CLIMATIC
CHANGE (ISSN: 1573-1480)**

Climatic Change
IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON FLOW REGIMES IN THE AMAZON RIVER
--Manuscript Draft--

| | | |
|--|--|---|
| Manuscript Number: | | |
| Full Title: | IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON FLOW REGIMES IN THE AMAZON RIVER | |
| Article Type: | Research Article | |
| Corresponding Author: | Claudio Blanco, Ph.D. Universidade Federal do Para BRAZIL | |
| Corresponding Author Secondary Information: | | |
| Corresponding Author's Institution: | Universidade Federal do Para | |
| Corresponding Author's Secondary Institution: | | |
| First Author: | Carlos Eduardo Aguiar de Souza Costa, PhD Student | |
| First Author Secondary Information: | | |
| Order of Authors: | Carlos Eduardo Aguiar de Souza Costa, PhD Student Claudio Blanco, Ph.D. José Francisco de Oliveira-Júnior, PhD | |
| Order of Authors Secondary Information: | | |
| Funding Information: | CAPES - Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel - Brazil (001) | Master Carlos Eduardo Aguiar de Souza Costa |
| | CNPq - National Council for Scientific and Technological Development (303542/2018-7) | Prof. Claudio Blanco |
| | CNPq - National Council for Scientific and Technological Development (309681/2019-7) | Prof. José Francisco de Oliveira-Júnior |
| Abstract: | Impacts on global water resources may be more intense due to climate change, making access to water more difficult and consequently the maintenance of life. In the Amazon, the effect may be even worse, as it is one of the regions most vulnerable to these changes. Thus, the objective is to analyze future variations in volumes and flow duration curves of the Amazon River to verify the hydrological response to climate change. The observed daily streamflows were from the database of the National Water Agency of Brazil. Future streamflow data were generated for the Representative Concentration Pathways (RCPs) 6.0 and 8.5 scenarios from the Global Hydrological Model WaterGAP2, obtained from the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP) platform. The flow duration curves of the base periods were created from the last 20 years of observed data for each streamflow gauge station to compare with the curves of future scenarios (from 2020). For a more punctual analysis, decadal volumes were also analyzed. WaterGAP2 was efficient, presenting the classification "Very Good" for most of the analyzed stations according to the statistical indicators adopted. The observed data showed better results when compared to the .5 scenario, which is probably already occurring. Most of the extreme streamflows were observed in the period from 2080 to 2099. For the years 2020 to 2059, volumes were below the expected decadal average for the century at most stations, increasing again from 2060. | |
| Suggested Reviewers: | Francisco Sousa Universidade Federal de Campina Grande fsouza2011@gmail.com Professor Sousa is an expert in the area of the paper subject. | |