



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**FERNANDA DE ALMEIDA FURTADO**

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA SEGURANÇA  
DE BARRAGENS: ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM BANABUIÚ**

**FORTALEZA**

**2024**

FERNANDA DE ALMEIDA FURTADO

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA SEGURANÇA DE  
BARRAGENS: ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM BANABUIÚ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientadora: Profa. Dra. Ticiania Marinho de Carvalho Studart.

Coorientadora: Profa. Dra. Vanda Tereza Costa Malveira.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

F987a Furtado, Fernanda de Almeida.  
Avaliação do impacto das mudanças climáticas na segurança de barragens : Estudo de caso da barragem Banabuiú / Fernanda de Almeida Furtado. – 2024.  
68 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2024.

Orientação: Profa. Dra. Ticiano Marinho de Carvalho Studart.

Coorientação: Profa. Dra. Vanda Tereza Costa Malveira.

1. segurança de barragens. 2. mudanças climáticas. 3. modelagem hidrológica. I. Título.

CDD 627

---

FERNANDA DE ALMEIDA FURTADO

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA SEGURANÇA DE  
BARRAGENS: ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM BANABUIÚ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em: 15/03/2024

BANCA EXAMINADORA

---

Profa. Dra. Ticianá Marinho de Carvalho Studart (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Vanda Tereza Costa Malveira (Coorientadora)  
Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA)

---

Prof. Dr. John Kenedy de Araújo  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dr. João Dehon de Araújo Pontes Filho  
Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME)

À minha querida mãe Maria das Dores,

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso minha profunda gratidão a Deus pelo dom da vida.

À minha querida mãe, Maria das Dores, pela educação exemplar que me proporcionou e pelo exemplo inspirador que representa em minha vida, e à minha irmã, Ana Beatriz, pelo apoio.

Às minhas queridas orientadoras, Professora Ticiane Studart e Professora Vanda Tereza, agradeço a paciência e disponibilidade ao longo deste trabalho

Às minhas queridas amigas e colegas de profissão Brenda e Thaiza, pelo apoio e incentivo nos momentos desafiadores.

Aos meus amigos Thiago, Jéssica, Barbara e Vanessa pela amizade e apoio.

À minha orientadora da Secretaria dos Recursos Hídricos, Lucrécia Nogueira, agradeço por todos esses anos de aprendizado e parceria.

Ao meu psicólogo, Edberto Júnior, reconheço sua importância e agradeço o apoio e acompanhamento nesta jornada.

Aos meus colegas de turma, Lívia, Renata, Bruna e Gean, expresso minha gratidão pelo apoio mútuo.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, manifesto minha gratidão pela significativa contribuição acadêmica e profissional ao longo do mestrado.

Aos membros da banca Professor John Kenedy e João Dehon, agradeço pela disponibilidade e pela colaboração valiosa, que enriqueceu significativamente este trabalho.

“E uma das condições necessárias a pensar certo é não estarmos demasiado certos de nossas certezas” (Paulo Freire, 1996).

## RESUMO

A segurança de barragens objetiva-se à redução da possibilidade de ocorrência de falhas que possam resultar em desastres, trazendo consequências à barragem em si e à população a jusante. A fim de garantir essa segurança, a avaliação de risco em barragens contempla a identificação de eventos críticos potenciais, incluindo alterações do regime hidrológico. O presente trabalho visa compreender os impactos das mudanças climáticas em eventos críticos de cheias, permitindo identificar os riscos associados à barragem considerando cenários futuros. O objeto de estudo foi a Barragem Arrojado Lisboa (Banabuiú), principal fonte hídrica do Sistema Adutor Banabuiú-Sertão Central, iniciativa implementada pelo Governo do Estado do Ceará. Foram utilizados Modelos Globais de Circulação (GCM) aplicados à modelagem hidrológica, aplicando-se quatro modelos climáticos do CMIP6, sendo estes: ACCESS-ESM11-5, BCC\_CSM2\_MR, CanESM5 e MIROC-ES2L. Os dados foram extraídos e interpolados de forma a gerar equações IDF projetadas para o futuro, aplicando-se o Método da Correspondência de Quantis Equidistantes para os cenários de emissões SSP 2 4.5 e SSP 5 8.5. Os resultados de precipitações obtidas dos modelos climáticos apresentaram valores próximos aos valores obtidos dos dados observados para a mesma região, conforme demonstrado nas curvas IDF atualizadas. Na etapa da modelagem hidrológica nos cenários de mudança climática, utilizando o HEC-HMS, para o tempo de retorno (TR) de 1.000 anos, foram observadas variações de vazões inferiores ao valor do cenário baseline. Para o tempo de retorno (TR) de 10.000 anos, foram obtidas vazões e elevações do nível de água acima dos valores do cenário baseline, resultando em cenários possíveis de galgamento da barragem Arrojado Lisboa (Banabuiú). A análise de probabilidade de excedência de cheia frente aos cenários de mudanças climáticas ressalta que, apesar das incertezas apresentadas pelos GCMs, a probabilidade de um evento extremo ser superado em cenários de mudanças climáticas é considerável. Dessa forma, conclui-se que, diante dos cenários críticos obtidos, torna-se fundamental a adoção de estratégias para garantir a segurança da barragem nos cenários de mudança climática projetados para o futuro, incluindo planos de operação do reservatório.

**Palavras-chave:** segurança de barragens; mudanças climáticas; modelagem hidrológica.

## ABSTRACT

Dam safety aims to reduce the possibility of failures that could result in disasters, with consequences for the dam itself and the population downstream. In order to guarantee this safety, dam risk assessment includes the identification of potential critical events, including changes in the hydrological regime. This work aims to understand the impacts of climate change on critical flood events, allowing the risks associated with the dam to be identified and future scenarios to be considered. The study object was the Arrojado Lisboa Dam (Banabuiú), the main source of water for the Banabuiú Adductor System, an initiative developed by the Ceará State Government. Global Circulation Models (GCM) applied to hydrological modeling were used, with four CMIP6 climate models being applied: ACCESS-ESMI1-5, BCC\_CSM2\_MR, CanESM5 and MIROC-ES2L. The data was extracted and interpolated in order to generate projected IDF equations for the future, applying the Equidistant Quantile Matching Method for the SSP 2 4.5 and SSP 5 8.5 emissions scenarios. The rainfall results obtained from the climate models showed values close to those obtained from the observed data for the same region, as shown in the updated IDF curves. At the hydrological modeling stage in the climate change scenarios using HEC-HMS, it was observed for the 10.000 average recurrence interval (ARI) there are more exceptional flood scenarios resulting in the possible overtopping of the Arrojado Lisboa dam (Banabuiú) compared to the 1.000 average recurrence interval (ARI) scenario. The analysis of the probability of flood exceedance under climate change scenarios highlights that, despite the uncertainties presented by the GCMs, the probability of an extreme event being exceeded under climate change scenarios is considerable. It is therefore concluded that, given the critical scenarios obtained, it is essential to adopt strategies to guarantee dam safety in the climate change scenarios projected for the future, including reservoir operation plans.

**Keywords:** dam safety; climate changes; hydrological modeling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Enquadramento de barragens perante a Lei nº 12.334.....	29
Figura 2- Açudes monitorados da bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú.....	32
Figura 3- Localização do açude Arrojado Lisboa (Banabuiú) .....	33
Figura 4 – Vista geral da barragem Arrojado Lisboa (Banabuiú) .....	34
Figura 5- Seção máxima da barragem Arrojado Lisboa (Banabuiú).....	34
Figura 6 - Fluxograma da metodologia aplicada no estudo.....	36
Figura 7- Localização dos postos pluviométricos existentes.....	37
Figura 8 - Postos pluviométricos selecionados.....	38
Figura 9 - Fluxograma metodológico Método EQM.....	41
Figura 10 - Divisão das sub-bacias selecionadas .....	43
Figura 11 - Curvas de precipitação atualizadas (TR = 1.000 anos) para todas as sub-bacias em oito cenários de mudanças climáticas.....	47

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Distribuição dos dados de precipitação máxima diária anual extraídos dos GCMs	45
Gráfico 2- Variação percentual da média das precipitações máximas diárias anuais extraídos dos GCMs.....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ficha técnica da barragem Banabuiú.....	35
Tabela 2 - Postos pluviométricos selecionados .....	38
Tabela 3 - Modelos climáticos aplicados ao estudo .....	39
Tabela 4 - Caracterização das sub-bacias do Açude Banabuiú .....	43
Tabela 5 – Comparação das vazões e elevação da lâmina d’água do cenário atual com cenário de projeto. ....	48
Tabela 6 - Vazões de pico e elevação da lâmina d’água para TR = 1.000 anos obtidos através dos modelos climáticos.....	49
Tabela 7 - Vazões de pico e elevação da lâmina d’água para TR = 10.000 anos.....	50
Tabela 8 - Tempos de recorrência calculados .....	50
Tabela 9 - Probabilidades de excedência calculadas .....	50

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Possíveis impactos das mudanças climáticas na segurança de barragens .....	20
Quadro 2 - Comparação de critérios dos diferentes métodos de <i>downscaling</i> .....	24

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Água e Saneamento Básico
CMIP	<i>Coupled Model Intercomparison Project</i>
COGERH	Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
EQM	Método de Correspondência dos Quantis Equidistantes
ESDF	<i>Earth System Grid Federation</i>
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GCM	<i>Global Climate Model</i>
GCMAOs	Modelos de Circulação Global com acoplamento Atmosfera-Oceano
GCMAs	Modelos de Circulação Global Atmosférica
GCMOs	Modelos de Circulação Global Oceânico
HEC-HMS	<i>Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System</i>
ICOLD	<i>International Commission on Large Dams</i>
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MG	Minas Gerais
MIPs	<i>Model Intercomparison Projects</i>
PAE	Plano de Ação de Emergência
PISF	Projeto de Integração do Rio São Francisco
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PSB	Plano de Segurança de Barragens
PSGH/CE	Projeto de Apoio à Melhoria da Segurança Hídrica e Fortalecimento da Inteligência na Gestão Pública do Estado do Ceará
RCP	<i>Representative Concentration Pathways</i>
RSB	Relatório de Segurança de Barragens
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
SSP	<i>Shared Socioeconomic Pathways</i>
USACE	Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

%	porcentagem
h	hora
H	altura
km	quilômetro
m	metro
m <sup>2</sup>	metro quadrado
m <sup>3</sup>	metro cúbico
min	minuto
° C	Graus Celsius
Qp	vazão de pico
s	segundo
TR	tempo de retorno
Δ	variação
N.A.	nível da água

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1 Objetivos .....	16
1.2 Escopo .....	16
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
2.1 Mudanças climáticas e seus impactos .....	18
2.2 Modelos de Circulação Global.....	22
2.3 Modelagem Hidrológica.....	25
2.4 Avaliação de risco em barragens.....	27
2.5 Segurança de Barragens no contexto brasileiro .....	29
<b>3 ÁREA DE ESTUDO</b> .....	32
3.1 Açude Arrojado Lisboa (Açude Banabuiú) .....	33
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	36
4.1 Dados pluviométricos.....	37
4.2 Downscaling estatístico e interpolação espacial dos dados .....	40
4.3 Modelagem hidrológica do reservatório em condições de mudança climática.....	42
4.4 Determinação da frequência de eventos extremos em cenários de mudança climática..	44
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	45
5.1 Análise das precipitações máximas provenientes dos modelos climáticos.....	45
5.2 Atualização das Curvas IDFs .....	47
5.3 Resultados da modelagem hidrológica do reservatório .....	48
5.4 Probabilidade de excedência de cheia nos cenários de mudanças climáticas.....	51
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	53
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	55
<b>APÊNDICE A – CURVAS IDF ATUALIZADAS PARA OS CENÁRIOS DE MUDANÇA CLIMÁTICA</b> .....	64

## 1 INTRODUÇÃO

A partir de 2010, com a promulgação da Lei Federal nº 12.334, implementou-se a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), direcionada a garantir o comprometimento dos empreendedores de barragens com o monitoramento e regulamentação das condições físicas para o funcionamento adequado das estruturas.

Um dos principais objetivos dos instrumentos de segurança de barragens está relacionado à redução da possibilidade de ocorrência de falhas que resultem em acidentes e/ou incidentes, trazendo consequências à barragem em si e às pessoas relacionadas direta ou indiretamente a ela (Peyras *et al.*, 2012; USACE, 2016; Malveira *et al.*, 2016).

A avaliação do risco associado à barragem deve ser feita sob o levantamento de anomalias que resultam em deteriorações na estrutura, assim como a exaustiva caracterização dos eventos críticos potenciais (Cantwell e Murley, 1988).

A caracterização dos eventos críticos pode ser relacionada às mudanças climáticas, uma vez que estas geram significativos impactos sobre o regime hidrológico de uma região, principalmente quanto aos períodos de secas e cheias (Kuo e Gan, 2015; Donat *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2019; Myhre *et al.*, 2019).

Numerosos estudos foram realizados para compreender os efeitos das alterações climáticas, particularmente nas alterações de precipitação e nos balanços hídricos regionais. Um destaque observado nestes estudos é a diminuição do intervalo de ocorrência de eventos extremos, como secas e inundações (Orlowsky & Seneviratne, 2012; Kunkel *et al.*, 2013; Tsegaw *et al.*, 2020).

As alterações no ciclo hidrológico têm o potencial de intensificar a ocorrência de eventos extremos de precipitação e, ocasionando picos de vazão que subestimem a capacidade atual dos vertedouros de barragens existentes. (Chen e Hossain, 2019; Herbozo *et al.*, 2022; Carneiro *et al.* 2022).

Além dos riscos associados aos eventos de cheias, uma combinação de aumento da erosão, flutuações hídricas e secas prolongadas pode agravar falhas existentes na estrutura principal da barragem, conseqüentemente comprometendo sua segurança (Wan Mohtar, *et al.*, 2020; Loza e Fidélis, 2021; Qin, *et al.*, 2022).

Dessa forma, os modelos quantitativos de risco relacionados à segurança de barragens devem levar em consideração a incerteza das condições climáticas futuras, possibilitando a identificação e avaliação do seu impacto em cada componente de risco da estrutura.

No entanto, as alterações climáticas representam um grande desafio na aplicação de técnicas de análise de risco, uma vez que as incertezas relacionadas com o clima se somam a outras fontes de incerteza afetando os resultados dos modelos e a sua eficácia (Chernet *et al.* 2014; USACE, 2016; Morales-Torres *et al.*, 2016).

Neste contexto, o impacto dessas variações no clima pode ser avaliado tanto por meio de análises de tendências de dados de vazão registrados nas últimas décadas, quanto por modelagem de chuva-escoamento aplicando-se projeções climáticas como dados de entrada (Quintero *et al.*, 2018).

As projeções climáticas referentes à precipitação e temperatura são produzidas por Modelos Climáticos Globais (GCM), aplicando-se uma variedade de cenários que consideram as emissões futuras de gases de efeito estufa, conhecidos como *Representative Concentration Pathways* (RCPs).

Apesar de serem amplamente aplicados no estudo das mudanças de clima e desenvolvimento de estratégias de mitigação e adaptação (Dore, 2005; Fernandes *et al.*, 2017; Collados-Lara *et al.*, 2022), os GCMs apresentam limitações e incertezas que precisam ser considerados na etapa de modelagem sendo necessária sua redução para modelar processos hidrológicos em escala regional.

Para avaliar adequadamente o impacto das alterações climáticas na segurança das barragens em cenários futuros, são necessários estudos à escala da bacia hidrográfica, aplicando-os como ferramenta para avaliar as probabilidades de galgamento em barragens à escala regional (Fluixá-Sanmartín *et al.*, 2019).

Alguns estudos realizados para a região Nordeste do Brasil verificaram a viabilidade da realização de previsões de extremos climáticos e possíveis impactos nos recursos hídricos aplicando-se os GCMs disponíveis (Marcos Júnior *et al.*, 2018; Magalhães *et al.*, 2018; Raulino, 2021; Porto, 2023), sendo alguns desses estudos aplicados à atualização das curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF) (Sabóia *et al.*, 2017; Fernandes, *et al.*, 2017; Carvalho *et al.*, 2020; Carneiro *et al.*, 2022) que são de grande importância para projetos, manutenção e operação de infraestruturas hídricas.

Nesse cenário, o presente estudo propõe a analisar o impacto das mudanças climáticas na barragem Arrojado Lisboa (Banabuiú). A barragem foi selecionada por ser a principal fonte hídrica do Projeto de Apoio à Melhoria da Segurança Hídrica e Fortalecimento da Inteligência na Gestão Pública do Estado do Ceará, implementado pelo Governo do Estado do Ceará (Ceará, 2023). Foram aplicando modelos climáticos na atualização na modelagem hidrológica do reservatório, utilizando-se de dados históricos e dados obtidos do 6° *Coupled Model*

*Intercomparasion Project* (CMIP6) do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC).

## 1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar os impactos decorrentes das mudanças climáticas, provocadas pelo aquecimento global, na segurança de barragens, aplicando-se Modelos de Circulação Global (GCMs). Foi selecionada a barragem Arrojado Lisboa (Banabuiú), localizada no estado do Ceará, Brasil, como estudo de caso.

Para este estudo, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Analisar a tendência da precipitação obtidas pelos Modelos de Circulação Global para a região de estudo;
- Avaliar o impacto das mudanças climáticas nas vazões e na elevação do nível de água na barragem em estudo;
- Analisar a contribuição das mudanças climáticas no risco de galgamento da barragem em estudo.

## 1.2 Escopo

Após a contextualização do presente trabalho neste capítulo introdutório, segue a estruturação dos demais capítulos componentes do estudo realizado:

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica e revisão de literatura de trabalhos correlacionados ao tema proposto a fim de promover a compreensão do estudo. São apresentados os impactos relacionados às mudanças climáticas, destacando-se aqueles relacionados à segurança de barragens. Também são apresentados os conceitos de Modelos de Circulação Global, bem como os processos aplicados na modelagem hidrológica. Por fim, o capítulo encerra apresentando o panorama da segurança de barragens no Brasil.

Introduzindo a área de estudo, o Capítulo 3 fornece informações relevantes e características sobre o objeto da pesquisa. São apresentadas a caracterização da região da Sub-bacia do Rio Banabuiú, bem como as características técnicas da barragem Arrojado Lisboa (Banabuiú), selecionada como estudo de caso.

O Capítulo 4 consiste na descrição da metodologia utilizada no trabalho, detalhando os métodos escolhidos para alcançar os objetivos específicos previamente delineados. Neste Capítulo é apresentada a seleção de dados pluviométricos atuais e dados obtidos através dos Modelos de Circulação Global, explanando sobre as ferramentas de *downscaling* estatístico

aplicados no estudo e a modelagem hidrológica no contexto de mudança climática. Por fim, é apresentado a análise de probabilidade de cheia excedente associada aos cenários de mudanças climáticas.

A apresentação dos resultados obtidos está no Capítulo 5, onde também estão explanadas as principais discussões relacionadas aos dados obtidos através da metodologia estabelecida.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões derivadas do trabalho, consolidando os principais pontos e considerações do tema de estudo, bem como as recomendações para trabalhos futuros.

Ao final do trabalho, são listadas as referências bibliográficas citadas ao longo do estudo, juntamente a anexos que complementam a compreensão da pesquisa.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Mudanças climáticas e seus impactos

As mudanças climáticas podem ser atribuídas ao rápido desenvolvimento industrial e às altas emissões de gases de efeito estufa relacionadas às atividades antrópicas (Boulangé *et al.*, 2021). Consequentemente, esses fatores têm levado a um aumento nos desastres ambientais em todo o mundo, causando efeitos adversos tanto para os seres humanos quanto para os ecossistemas.

Embora variações climáticas ocorram naturalmente, nas últimas décadas tem sido observado um aumento significativo na taxa de incidência e intensidade dessas mudanças, sendo a atividade humana apontada como principal responsável (Dore, 2005; Collados-Lara *et al.*, 2022; Donat, *et al.*, 2016).

Segundo a World Meteorological Organization (WMO), em seu relatório anual “*Provisional State of the Global Climate*”, publicado em 2022, as concentrações dos três principais gases de efeito estufa: dióxido de carbono, metano e óxido nitroso, atingiram níveis recordes em 2021, o que ocasionou elevação da temperatura média global em  $1,15 \pm 0,13^{\circ}\text{C}$ .

Incontestavelmente, o efeito estufa é, em grande parte, responsável pelas mudanças de temperatura, umidade e precipitação, consequentemente afetando a disponibilidade de águas superficiais e subterrâneas.

A estimativa dos riscos dessas variações no clima depende da magnitude e nível de aquecimento, localização geográfica, níveis de desenvolvimento e vulnerabilidade, além da seleção e implementação de alternativas para adaptação e mitigação dos impactos (IPCC, 2022).

Conforme explica Bowers (2020), entende-se que há um risco potencial em áreas com menor desenvolvimento socioeconômico e altas taxas de pobreza que tendem a negligenciar ameaças relacionadas às mudanças climáticas.

De acordo com IPCC (2013), as avaliações dos riscos relacionados aos impactos causados pelas alterações climáticas dependem de fatores climáticos (tais como a temperatura e a umidade) e de fatores não climáticos (tais como alterações no crescimento populacional, no desenvolvimento econômico e na gestão dos recursos hídricos).

E, conforme explicam Orlowky e Seneviratne (2012), ainda que os eventos climáticos ou meteorológicos não sejam críticos num sentido estatístico, estes podem levar a condições ou impactos extremos, quer atravessando um limiar crítico num sistema social, ecológico ou físico, quer ocorrendo simultaneamente a outros eventos.

Ainda se discutindo as consequências das variações de temperatura e precipitação causadas pelas mudanças climáticas, as condições mais extremas também devem ser consideradas, destacando-se os impactos sobre o regime hidrológico de uma região, principalmente quanto à periodicidade de ocorrência de eventos de secas e cheias (Orlowsky & Seneviratne, 2012; Kunkel *et al.*, 2013; Kuo e Gan, 2015).

Os eventos críticos de secas e cheias, quando ampliados por mudanças climáticas, podem ocorrer com mais frequência, intensidade e em menores intervalos de tempo (Kuo e Gan, 2015). Sendo assim, pode-se afirmar que a hidrologia das bacias hidrográficas é um dos principais componentes afetados.

Conforme citado por Sabóia *et al.* (2020), em áreas localizadas em baixas latitudes, como no Nordeste do Brasil, observa-se uma tendência de diminuição de chuvas devido às mudanças climáticas, no entanto também existe uma tendência de episódios de chuvas mais intensos.

De maneira complementar, Fluixá-Sanmartin *et al.* (2021) afirmam que as incertezas relacionadas aos regimes de precipitação e de eventos naturais altamente dependentes da temperatura, como degelos e saturação do solo, influenciam na avaliação de ocorrência de inundações e na sua magnitude e frequência.

Ademais, o outro componente afetado por essas incertezas é da distribuição do armazenamento de água nos reservatórios, o qual determina as cargas as quais a estrutura de uma barragem está sujeita no momento da chegada das cheias (Kingston *et al.*, 2009).

Dessa forma, uma vez que há variabilidade na precipitação e evapotranspiração, decorrentes das incertezas dos cenários meteorológicos, é necessário avaliar os efeitos dessas implicações na segurança de barragens, principalmente no sistema barragem-reservatório e sua operação.

### **2.1.1 Impactos das mudanças climáticas na segurança de barragens**

A relação entre mudanças climáticas e barragens tem sido explorada em diversas abordagens (Palmer *et al.* 2008; Van Soesbergen, 2013; Zhai e Tao, 2017; Rugin *et al.* 2017; Samiotis *et al.* 2018). Uma das perspectivas consiste na análise da variabilidade de cenários futuros e suas implicações na avaliação dos impactos sobre as barragens, enquanto a outra abordagem envolve a avaliação das emissões de gases de efeito estufa associadas aos reservatórios e como estas emissões contribuem para intensificar as mudanças climáticas.

Para Fluixá-Sanmartín *et al.* (2018), o impacto geral das mudanças climáticas sobre a segurança de barragens pode ser avaliado em termos de quão sensíveis os componentes da estrutura são ao clima, principalmente quanto às variações dos níveis do reservatório. O Quadro 1 a seguir apresenta um resumo dos possíveis riscos associados às mudanças climáticas nos diferentes componentes de segurança de barragens.

Quadro 1- Possíveis impactos das mudanças climáticas na segurança de barragens

<b>Riscos em barragens</b>	<b>Vulnerabilidades</b>	<b>Riscos relacionados às mudanças climáticas</b>
<b>Cheias</b>	O volume afluente da barragem excede o armazenamento disponível e capacidade de descarga do vertedouro, o que resulta em galgamento e possíveis danos potenciais significativos à população a jusante.	Estima-se que mudança climática aumente o risco de inundação por alterar a distribuição, variabilidade e intensidade dos eventos de chuva. As inundações são associadas a chuvas intensas, processos de derretimento da neve, umidade do solo e limpeza da vegetação.
<b>Mudança no nível do reservatório</b>	É necessário considerar o nível de água do reservatório em uma análise de risco de barragem, pois este está associado ao volume de água liberado e, portanto, relacionado às inundações. Períodos secos relacionados ao aumento da temperatura também devem ser considerados, pois podem afetar a estrutura, operação e integridade das barragens.	Os níveis de água do reservatório podem ser alterados devido à variabilidade da precipitação e evapotranspiração relacionados às mudanças climáticas, também devido às mudanças nas demandas de água, contribuindo para a ocorrência de problemas na operação das barragens.
<b>Desempenho das comportas do vertedouro</b>	A falha ou operação incorreta das comportas do vertedouro pode causar inundações a jusante que podem variar de pequenas a catastróficas, como visto em múltiplos casos em todo o mundo. Os componentes estruturais devem ser observados regularmente quanto aos sinais de sobrecarga, corrosão, fissuras ou outros problemas.	As mudanças de temperatura relacionadas às mudanças climáticas podem causar tensão e deformação nas comportas do vertedouro. Além disso, eventos de precipitação extrema aumentam o teor de sedimentos, tornando as comportas dos vertedouros propensas a processos de abrasão.
<b>Operação da barragem</b>	O sedimento depositado reduz a capacidade de armazenamento do reservatório, o que contribui para a redução da funcionalidade e a vida útil da estrutura. A segunda causa do rompimento de grandes barragens é devido à erosão interna, responsável por 27% dos rompimentos.	O aumento da temperatura associado a um possível clima seco ou úmido pode causar tensões mecânicas adicionais na estrutura de barragens de concreto. Estes também são afetados por variações do nível da água e solos mais secos, o que pode causar problemas como erosão interna em barragens de terra.

Conforme exposto com Wentz (2015), as mudanças climáticas podem prejudicar o desempenho e a vida útil da barragem, aumentando sua vulnerabilidade a falhas, como também pode alterar o ambiente circundante e agravar a natureza e magnitude dos impactos ambientais gerados por ela.

Nesse contexto, Palmer *et al.* (2008) afirmam que o aumento do volume de água decorrente das mudanças climáticas pode resultar em uma maior sedimentação e erosão, e, conseqüentemente, ampliam o risco de inundações ou falhas na estrutura. E, ao mesmo tempo, a diminuição do fluxo de água pode resultar em um aumento da temperatura da água e na degradação da sua qualidade, conforme abordado por Van Soesbergen (2014).

Os perigos relacionados às alterações climáticas são bastante significativos, podendo acarretar danos consideráveis, incluindo a perda de vidas e outras conseqüências de longo prazo. Sendo assim, é crucial tomar medidas para minimizar tais efeitos.

E, apesar de vários estudos atribuírem o rompimento de barragens a eventos extremos relacionados às mudanças climáticas (Lee e You, 2013; Adamo *et al.*, 2020; Lin *et al.*, 2021), a incorporação dessa avaliação na operação de barragens e no projeto de novas estruturas não é uma prática regular.

Conforme discutido por Lompi *et al.* (2023), a alteração dos padrões climáticos influencia os riscos de rompimento de barragens e, portanto, a suposição de um cenário climático estacionário não é apropriada para análises a longo prazo, como também não deve ser adotada como suporte para tomada de decisão.

O aprimoramento das abordagens tradicionais de avaliação de segurança de barragens considerando os cenários de mudanças climáticas é necessário a fim de aperfeiçoar os parâmetros de projeto e, conseqüentemente, reduzir os riscos associados à estrutura.

É importante considerar que a avaliação dos impactos e os processos de implementação de novas barragens devem garantir que as estruturas possam lidar com os desafios de ocorrência de eventos extremos, devendo as ações serem discutidas junto às comunidades a jusante, uma vez que estas também estão vulneráveis às mudanças climáticas.

Em outros casos, estudos foram conduzidos na América Latina para avaliar os impactos das mudanças climáticas na segurança de barragens, como os trabalhos desenvolvidos por Herbozo *et al.* (2022), no Equador, e Carneiro *et al.* (2022) na região semiárida brasileira, ressaltando a necessidade de incorporar as mudanças climáticas ao analisar os riscos associados às barragens no contexto brasileiro.

## 2.2 Modelos de Circulação Global

A análise das mudanças climáticas é fundamental para compreender e prever seus impactos em escala global. Para tanto, a aplicação de modelos climáticos permite estimar uma resposta do sistema climático em diferentes cenários de emissões de gases do efeito estufa, considerando as previsões de desenvolvimento socioeconômico e tecnológico.

Em termos simplificados, pode-se descrever os Modelos de Circulação Global (GCMs) como uma grade de pontos que discretizam a superfície terrestre em regiões menores, estando estas interconectadas por meio de equações que simulam a movimentação de ar e de água entre regiões. Esses modelos climáticos podem apresentar uma malha horizontal com resolução de 2 a 5 graus de latitude e longitude, e uma divisão vertical em 15 a 40 camadas (Ramos, 2010).

De acordo com Becker (1997, *apud* Ramos, 2010, p.130), as variáveis de saída fornecidas pela modelagem climática desses modelos podem incluir temperatura do ar, velocidade do vento em várias direções, cobertura de nuvens e precipitação, como também umidade do solo, cobertura de neve, radiação solar, pressão e temperatura na superfície no mar.

Nesse contexto, existem diferentes tipos de projeções climáticas. Alguns modelos climáticos são mais simples, enquanto outros são mais complexos, dependendo dos processos físicos e requisitos computacionais envolvidos. Há muitos modelos cujos dados são fornecidos por vários centros de pesquisa ao redor do mundo e que podem variar em precisão, dependendo da resolução da grade espacial utilizada (Sabóia *et al.*, 2016).

Os modelos de circulação global podem ser divididos em: Modelos de Circulação Global Atmosférica (GCMAs); Modelos de Circulação Global Oceânico (GCMOs) e Modelos de Circulação Global com acoplamento Atmosfera-Oceano (GCMAOs). Dentre esses modelos, os GCMAOs são os mais completos, já que incluem componentes dinâmicos relacionados aos processos da atmosfera, oceanos, superfície terrestre e derretimento de gelo.

Com o desenvolvimento da tecnologia, os modelos passaram por uma evolução significativa, aprimorando a resolução espacial e temporal, o que permitiu simulações mais precisas e detalhadas. Outro aspecto importante dessa evolução envolveu a incorporação de dados observados e informações sobre mudanças climáticas passadas, o que colabora para a confiabilidade das previsões.

Além disso, os avanços na capacidade computacional têm permitido o uso de modelos mais sofisticados na análise do clima, com uma maior resolução espacial, contribuindo para a compreensão dos principais processos que controlam a sensibilidade climática, que dependem

de escalas espaciais de alta resolução para serem considerados, conforme citado por Ramos (2010).

Outra contribuição significativa para a evolução das simulações e projeções climáticas obtidas por meio de GCMs é a colaboração entre pesquisadores e instituições para compartilhar dados de modelos climáticos e simulações padronizadas por meio do projeto CMIP (*Coupled Model Intercomparison Project*), liderado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC).

De acordo com as explicações fornecidas por Porto (2023), os modelos que compõem o CMIP, atualmente em sua sexta fase, representam as principais ferramentas para compreender os processos climáticos e explorar as características de possíveis cenários climáticos futuros. Esse conjunto é composto por um total de 21 *Model Intercomparison Projects* (MIPs), dos quais 4 têm natureza diagnóstica e 17 têm natureza prognóstica.

Nesse contexto, a comunidade científica definiu um conjunto de diferentes cenários de emissões ao longo do século XXI, denominados *Representative Concentration Pathways* (RCPs), representando diferentes níveis de emissão de gases de efeito estufa e as concentrações atmosféricas de CO<sub>2</sub>.

De acordo com o 5º Relatório de Avaliação do IPCC (2013), estimam-se quatro cenários RCPs, que incluem: i) um cenário de mitigação que resulta em um nível de emissões baixo (RCP 2,6), ii) dois cenários de estabilização (RCP 4,5 e RCP 6) e iii) um cenário com emissões muito elevadas de gases de efeito estufa (RCP 8,5).

E, considerando o não cumprimento das medidas voltadas ao desenvolvimento sustentável, o cenário RCP 8,5 caracteriza-se como o de maior probabilidade de ocorrência, tendência que o cenário RCP 6 tende a seguir, afirma Vuuren *et al.* (2011).

Conforme apontado pelo CMIP6, os cenários *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP) devem substituir os cenários RCP para projeções futuras. Segundo O'Neill *et al.* (2016), os cenários SSP são empregados para estimar diferentes possibilidades de emissões, tendo em consideração potenciais mudanças sociais, econômicas e tecnológicas projetadas para o futuro que afetam ecossistemas, população, recursos e instituições.

Contudo, os resultados obtidos nas projeções climáticas podem conter incertezas devido à limitada qualidade da representação climática atual e divergências nos cenários futuros, especialmente na América do Sul (Buser *et al.*, 2010; Aloysius *et al.*, 2016; Zhuan *et al.*, 2019; Zhang e Chen, 2021).

Resumidamente, esses estudos indicam que os modelos são capazes de simular as principais características do ciclo de precipitação durante a estação chuvosa sobre a América

do Sul com base nos diferentes cenários de emissões (Vera *et al.*, 2006; Minvielle e Garreaud, 2011; Joetzjer *et al.*, 2013; Jones e Carvalho, 2013).

### 2.2.1 Desagregação espacial

A modelagem baseada em cenários de emissões tem ampla aplicação em projeções climáticas, contudo, é necessário considerar as incertezas relacionadas a esses modelos. Conforme discutido por Orsini (2023), essas incertezas podem ser divididas em três fatores principais: incertezas nas configurações dos modelos, incertezas devido à variabilidade interna do modelo e incertezas associadas à natureza estocástica das forçantes naturais futuras.

A fim de reduzir as implicações dessas incertezas, devem-se incluir na modelagem, técnicas de transferência de informações meteorológicas da escala global para escala regional ou local, por meio de técnicas de desagregação espacial ou *downscaling*.

Todavia, a aplicação da desagregação espacial ou regionalização pode contribuir para uma precisão das projeções climáticas regionais ou locais, como também pode introduzir novas fontes de incertezas, como erros nos dados de entrada, na escolha do modelo de desagregação e nas suposições feitas durante o processo (Vera *et al.*, 2006).

As ferramentas de desagregação espacial podem ser aplicadas por meio de métodos de *downscaling* dinâmico ou estatístico. O *downscaling* dinâmico baseia-se em modelos de área limitada cuja resolução elevada permite simulações locais, enquanto o estatístico é baseado em funções de transferência aplicadas para relacionar os modelos de circulação global com os dados do local de estudo (Srivastav; Schardong; Simonovic, 2015). O Quadro 2 apresenta a comparação de critérios dos diferentes métodos de *downscaling*.

Quadro 2 - Comparação de critérios dos diferentes métodos de *downscaling*

<b>Critério</b>	<b>Downscaling dinâmico</b>	<b>Downscaling estatístico</b>
Tempo computacional	Mais lento	Rápido
Experimentos	Realizações limitadas	Realizações múltiplas
Complexidade	Interações físicas complexas	Interações físicas sucintas
Exemplos	Modelos de Circulação Global	Regressão linear, rede neural

Fonte: Sabóia, 2016.

Ademais, os estudos que realizaram *downscaling* estatístico apresentaram detalhes regionais em uma escala de maior resolução em comparação aos obtidos com outro método,

demonstrando a influência de fatores como altitude e distância a costa. Conforme discutido por Wilby *et al.* (2004), os métodos de *downscaling* estatístico consistem no desenvolvimento de relações entre as variáveis atmosféricas de escala global e as variáveis locais, podendo serem classificados em três categorias: a) modelos de regressão, como regressão múltipla e redes neurais artificiais; b) modelos estocásticos e c) sistemas de classificação do tempo.

Além disso, os autores destacam a importância de avaliar meticulosamente os objetivos do estudo sobre os impactos das mudanças climáticas e o possível valor agregado associado a cenários climáticos de resolução mais elevada, bem como a necessidade de familiarização com as características, tanto positivas quanto negativas, do *downscaling* estatístico.

A utilização desses métodos possui vantagens, como a capacidade de fornecer variáveis climáticas em escala pontual, no entanto, também apresenta limitações, uma vez que fica restrita a uma região específica e às séries de dados utilizadas, além de demandar séries extensas de dados observados para fins de calibração e validação.

### **2.3 Modelagem Hidrológica**

A modelagem hidrológica envolve a utilização de modelos matemáticos para simular o comportamento de bacias hidrográficas, rios, lagos e aquíferos. Esses modelos permitem compreender os processos intrínsecos ao ciclo hidrológico e, portanto, indispensáveis para a gestão de recursos hídricos, planejamento de uso da terra e na prevenção de cenários críticos, como inundações e secas.

De acordo com Tucci (2005), um modelo hidrológico é uma ferramenta utilizada para representar os processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica e prever as consequências de diferentes eventos relacionados às observações. O propósito de um modelo hidrológico é identificar com eficiência os elementos do ciclo hidrológico, além de estimar o comportamento e a quantidade de água envolvida nestes processos.

Além disso, Lou (2010) elenca as principais aplicações da modelagem hidrológica como sendo a análise de consistência e preenchimento de falhas, a previsão de vazões, o dimensionamento e previsão de cenários de planejamento, de efeitos da modificação do uso do solo e de controle ambiental.

Os modelos hidrológicos podem ser classificados sob diferentes aspectos, conforme descrito por Moreira (2005), de acordo com: i) tipos de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), ii) formulação (empíricos ou conceituais), iii) representação dos dados (discretos ou contínuos), iv) variabilidade espacial dos parâmetros na bacia

hidrográfica (concentrados ou distribuídos) e v) dependência temporal (estacionários ou dinâmicos).

De acordo com a Organização Mundial de Meteorologia (WMO, 2022), a escolha do modelo a ser aplicado na modelagem hidrológica deve considerar, primeiramente, o objetivo do estudo, podendo ser a previsão do regime hidrológico, avaliação das mudanças climáticas, entre outros.

Seguidamente, é necessário definir a variável hidrológica a ser modelada (vazões diárias ou mensais, parâmetros de qualidade da água, entre outros). Ademais, devem ser consideradas as características climáticas e fisiográficas do sistema a ser modelado, bem como a disponibilidade e qualidade de dados requeridos para calibração, validação e operação do modelo.

É importante ressaltar que a validação é uma das etapas mais críticas na modelagem hidrológica, pois envolve a comparação dos resultados do modelo com dados observados para avaliação da precisão do modelo. Portanto, a etapa de calibração tem o objetivo de refinar os valores dos parâmetros de um modelo para um determinado conjunto de condições locais, reduzindo, assim, a incerteza da etapa de predição (Caldeira, *et al.*, 2018).

De maneira complementar, a combinação dos modelos possibilita uma análise abrangente de fatores complexos em diversos cenários de recursos hídricos, como por exemplo, na previsão de vazões.

A integração de modelos meteorológicos e modelos hidrológicos pode ser adotada para estimar a vazão de um determinado local, com antecedência, baseando-se na previsão de chuva, na chuva registrada na bacia e nas vazões que permitem atualizar o modelo (Mourão, 2022).

A previsão hidrológica pode ser realizada, principalmente, por meio de modelos de chuva-vazão, que visam transformar precipitação em escoamento superficial na tentativa de modelar, de forma mais verossímil, um fenômeno hidrológico.

A variabilidade de modelos, que vai desde modelos simples para estimar a vazão em pequenas bacias hidrográficas até modelos de entrada distribuída que lidam com a variabilidade espaço-temporal dos eventos de chuva, permitindo entender melhor o comportamento das bacias hidrográficas.

Para a realização da modelagem hidrológica podem ser aplicadas diversas ferramentas, incluindo o software HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System*), desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (USACE).

O software HEC-HMS é usado para prever o fluxo da bacia hidrográfica a partir de dados de precipitação, evapotranspiração e características físicas da bacia, como topografia, solos, vegetação e uso da terra (USACE, 2016). Isso permite entender melhor o comportamento das bacias hidrográficas e avaliar o impacto de mudanças no uso do solo ou na infraestrutura, como também na construção de barragens.

Conforme citado por Campos (2020), o programa pode ser adaptado ao sistema de interesse, podendo alterar os parâmetros, condições de contorno e condições iniciais de entrada. Além disso, o HEC-HMS possui uma função de calibração do modelo que permite aos usuários o ajuste dos parâmetros para aprimorar a precisão da previsão, podendo ser fornecidas ferramentas analíticas complementares para otimização do modelo.

Vários estudos indicam a utilização do software HEC-HMS para a avaliação do impacto das mudanças climáticas na vazão de corpos d'água, objetivando-se analisar a integração dos modelos de circulação global nas modelagens hidrológicas (Meenu *et al.*, 2013; De Silva, Weerakoon e Herath, 2014; Bai, Zhang, Zhao, 2019; Ghumman *et al.*, 2020; Azizi, *et al.* 2021).

## **2.4 Avaliação de risco em barragens**

O conceito de risco está intimamente ligado à possibilidade de algo não proceder como o esperado, devendo ser considerado como um parâmetro cotidiano em qualquer atividade. O risco é aplicado para representar as incertezas provenientes de anomalias não esperadas na concepção inicial da ideia de ocorrência de determinado evento.

A análise de risco consiste num processo sistemático aplicado para avaliar os riscos relacionados a uma determinada atividade ou processo, e, portanto, caracteriza-se como uma ferramenta fundamental para a priorização de medidas de mitigação.

Esse processo compreende a identificação das incertezas existentes, suas causas e formas de ocorrência, bem como a quantificação da probabilidade de ocorrência. Sendo assim, a abordagem de análise de risco é qualitativa e essencial para simular os cenários complexos que contém múltiplos componentes e que podem interagir ocasionando uma série de falhas (Peyras *et al.*, 2012).

No contexto da segurança de barragens, a análise de risco desempenha um papel crítico, pois trata-se de uma técnica amplamente aplicada pelos operadores de barragens (ICOLD, 2005; USACE, 2011), objetivando-se a implementação de medidas de redução de riscos.

O entendimento dos riscos e o como estes evoluem é crucial para garantir níveis adequados de segurança, uma vez que a falha pode ser atribuída a uma combinação de fatores,

como por exemplo, a idade da barragem, má manutenção, eventos de cheias, mudança no uso e cobertura do solo.

Estudos realizados por diversos autores (Viseu e Betâmio, *et al.* 2011; Fluixá-Sanmartín *et al.*, 2018; Lin *et al.*, 2021) explicam que a análise dos riscos associados às barragens se baseia, primeiramente, na identificação dos fatores de risco através da caracterização das ocorrências excepcionais que podem estar relacionadas à origem de anomalias nas barragens. Seguidamente, a avaliação deve contemplar a probabilidade de ocorrência dessas anomalias que possam ocasionar ruptura parcial ou total da estrutura.

No contexto de mudanças climáticas, as incertezas relacionadas ao clima impactam os resultados e a eficiência dos modelos de avaliação de risco de segurança das barragens (Morales-Torres *et al.*, 2016). Conforme explanado por Fluixá-Sanmartín *et al.* (2018), é necessário avaliar a vulnerabilidade de barragens às alterações climáticas a fim de definir estratégias de adaptação para novos cenários climáticos num contexto evolutivo como uma ferramenta de apoio à gestão da segurança de barragens.

De acordo com esta abordagem, os modelos de risco de barragens devem ser atualizados com base nos impactos das alterações climáticas em cada componente de risco, o que pode contribuir para o desenvolvimento de novas estratégias de adaptação.

A variedade potencial de efeitos das alterações climáticas em barragens pode ser extensa, mas por uma questão de simplicidade, comumente são analisados os modos de falha típicos: galgamento, deslizamento, erosão interna (*piping*) e falha do vertedouro (Liu *et al.*, 2018; Ghumman *et al.*, 2020; Loza e Fidélis, 2021; Herbozo *et al.*, 2022).

A probabilidade de falha hidrológica depende do componente de perigo do risco global (mudanças na frequência e magnitude das cheias) e não indica necessariamente falha física de uma barragem. Contudo, espera-se que a probabilidade de falha de uma infraestrutura hídrica aumente devido à exposição mais frequente a eventos extremos (Mallakpour; AghaKouchak e Sadegh, 2019).

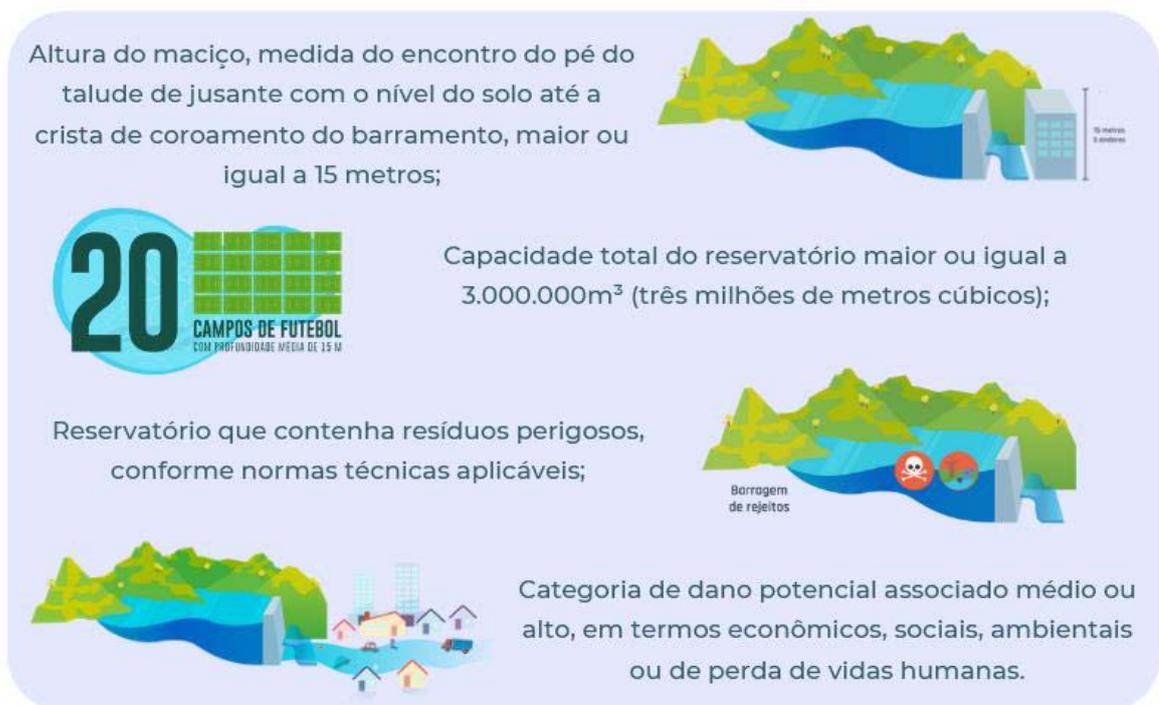
No entanto, a definição e quantificação de diferentes tipos de incertezas é particularmente crítica em análises que envolvem fenômenos com altas consequências, como é o caso das rupturas de barragens, devido à potencial sensibilidade pública para os possíveis resultados, explica Lima (2014).

## 2.5 Segurança de Barragens no contexto brasileiro

A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) foi instituída no Brasil através da publicação da Lei Federal nº 12.334 em 20 de setembro de 2010, definindo os princípios, diretrizes e as competências para a segurança de barragens no território brasileiro, visando garantir a integridade e monitoramento das estruturas (Brasil, 2010).

As diretrizes estabelecidas na PNSB são atribuídas às barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais que apresentem pelo menos uma das características apresentadas na Figura 1.

Figura 1 - Enquadramento de barragens perante a Lei nº 12.334



Fonte: Ceará, 2022.

Após os trágicos acidentes de barragens ocorridos em Mariana (MG) e Brumadinho (MG) nos anos de 2015 e 2019, respectivamente, a legislação brasileira passou por atualizações através da Lei Federal nº 14.066, publicada em 30 de setembro de 2020 (Brasil, 2020). O objetivo principal dessas alterações foi aprimorar os instrumentos aplicados na gestão de segurança e fortalecer a fiscalização efetiva das barragens.

No entanto, apesar da implementação de instrumentos normativos representar um avanço importante na cultura de segurança de barragem a âmbito nacional, constatou-se que a implementação da PNSB tem avançado de forma insuficiente.

Em seu estudo sobre a gestão de segurança de barragens desenvolvida no Brasil, Jesus (2021) afirma que, apesar do desenvolvimento de boas práticas e experiências exitosas, ainda há obstáculos culturais em relação à percepção de risco, bem como há deficiência dos empreendedores e dos órgãos de fiscalização quanto à implementação dos instrumentos estabelecidos na legislação vigente.

Conforme exposto no Relatório de Segurança de Barragens 2022 (RSB) a maior parte das barragens cadastradas no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) não possui informações suficientes para avaliação quanto ao enquadramento na PNSB, tampouco para avaliação das condições de segurança da estrutura (ANA, 2023).

No que se refere aos instrumentos da PNSB, o Plano de Segurança de Barragens (PSB) constitui todas as informações e dados técnicos sobre a barragem, incluindo panorama do estado de conservação atual até estratégias de segurança da estrutura. Um dos volumes mais importantes é o Plano de Ação de Emergência (PAE) que apresenta os procedimentos a serem adotados numa emergência, contemplando a identificação dos riscos, rotas de evacuação e coordenação de resposta.

A maioria das barragens que dispõem de PSB e têm PAE implementado são destinadas à produção de energia hidrelétrica, seguidas das barragens de rejeitos de mineração (ANA, 2023). Isso evidencia que diversas barragens, especialmente as de usos múltiplos, carecem de instrumentos de segurança elaborados.

Adicionalmente, é significativo destacar o registro de acidentes e incidentes ocorridos desde a implementação da legislação no ano de 2010, totalizando 389 eventos no período de 2011 a 2022. Os dados levantados na última década apontam que a maioria desses eventos estão atrelados à possibilidade ou à ocorrência de galgamento devido aos eventos de cheias (ANA, 2023).

Em relação à implementação da política no Estado do Ceará, pode-se observar que, nos últimos anos, houve um grande avanço na identificação e classificação de barragens. Atualmente, estão inseridas no SNISB 355 barragens de usos múltiplos de pequeno a grande porte, sendo 48% destas barragens de propriedade particular (Ceará, 2022).

Apesar do avanço no cadastramento e na fiscalização de segurança nos últimos anos, o entrave do avanço dos instrumentos da PNSB no Estado do Ceará está relacionado ao descumprimento dos empreendedores quanto à periodicidade de realização de inspeções regulares e na elaboração dos Planos de Segurança de Barragens (Ceará, 2022).

Com relação às ações para prevenção de acidentes e monitoramento de segurança, estas ainda precisam ser aprimoradas, bem como o aperfeiçoamento das políticas e fortalecimento

das instituições envolvidas com segurança de barragens. Além disso, há necessidade de fortalecer a implementação da PNSB e dos seus instrumentos constituintes, principalmente o PAE, visando à maior consciência da comunidade sobre a segurança das barragens e, ao mesmo tempo, reduzir os riscos associados a eventuais emergências.

### 3 ÁREA DE ESTUDO

A maior parte do território do estado do Ceará, aproximadamente 90%, está localizada na região semiárida brasileira, caracterizada pelos baixos índices de precipitação, elevada taxa de evaporação, solos superficiais e rios intermitentes. (Pontes Filho; Souza Filho; Studart, 2020).

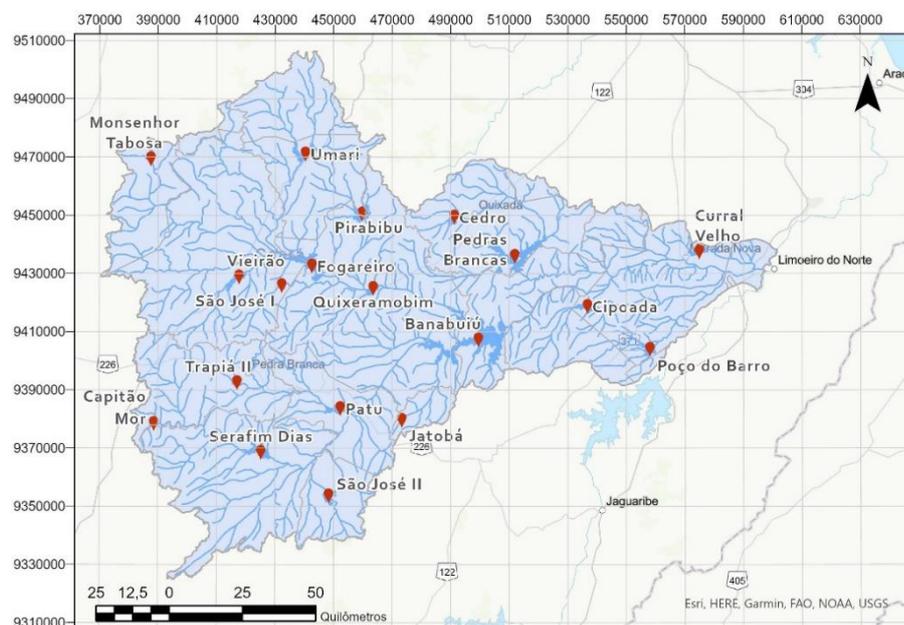
A Sub-Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú, integrante da Bacia do Rio Jaguaribe compreende os sertões centrais do Ceará, abrangendo uma extensão de drenagem de 19.647 km<sup>2</sup>, correspondendo a 13,37% do território cearense.

A região é caracterizada por um clima quente semiárido, com precipitações concentradas principalmente no primeiro semestre. Os déficits hídricos observados em todos os municípios da bacia são resultado das elevadas temperaturas e das altas taxas de evaporação, agravadas pela escassez de precipitações (Ceará, 2009).

No contexto geológico, a sub-bacia do Banabuiú apresenta um padrão geológico homogêneo, dominado por rochas de embasamento cristalino, representadas por diversos gnaisses e migmatitos, relacionados a rochas plutônicas e metaplutônicas, principalmente graníticas (Costa; Oliveira e Santos, 2019).

A sub-bacia é composta por 15 municípios e apresenta uma capacidade de acumulação de 2,76 bilhões de m<sup>3</sup>, contendo num total de 19 açudes públicos monitorados pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH), como exposto na Figura 2.

Figura 2- Açudes monitorados da bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Trata-se de uma bacia vasta que possui importantes afluentes que constituem uma série de feições ambientais geológicas no sertão central. Seus afluentes na margem esquerda incluem o Rio Patu, o Rio Quixeramobim e o Rio Sitiá, e na margem direita apenas o Rio Riacho Livramento.

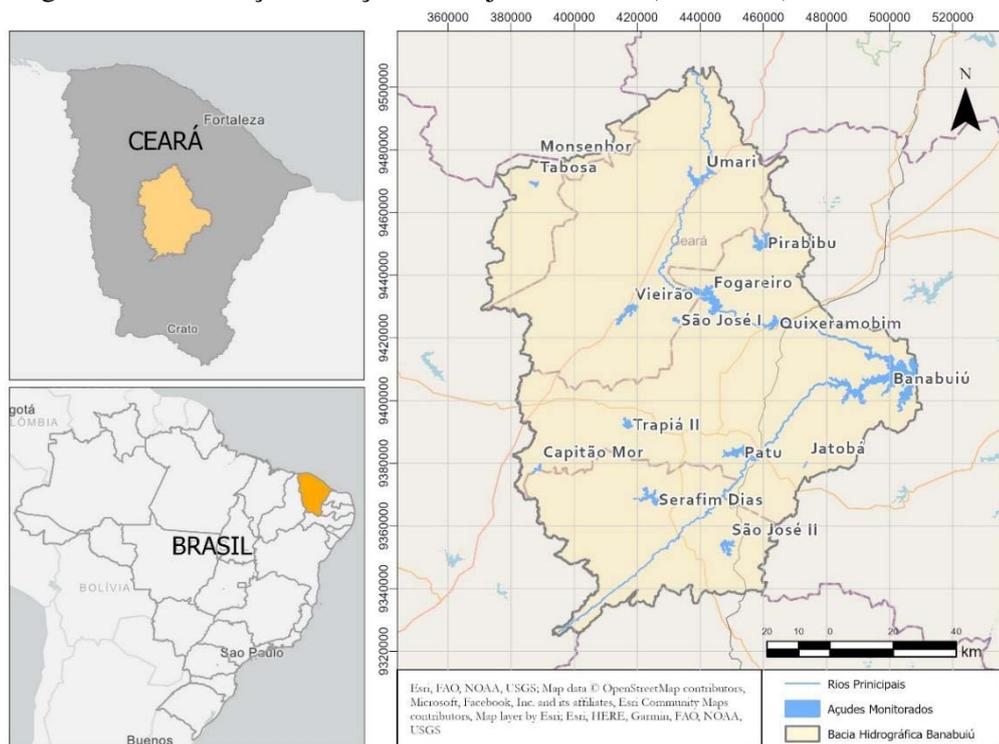
Dentre os reservatórios, destacam-se os açudes Arrojado Lisboa (Banabuiú), Pedras Brancas e Fogareiro, pela capacidade de acumulação de água, e o Açude Cedro por sua representatividade histórica.

### 3.1 Açude Arrojado Lisboa (Açude Banabuiú)

O foco deste estudo é o Açude Arrojado Lisboa, também conhecido como Banabuiú, localizado no município de Banabuiú, no estado do Ceará (Figura 3). Concluída no ano de 1966, pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), a barragem possui uma capacidade máxima de 1,6 bilhão de metros cúbicos, sendo o terceiro maior reservatório do Estado.

A finalidade do referido reservatório consiste no abastecimento de água para populações de cerca de nove municípios, atendendo às necessidades hídricas de animais, possibilitando a irrigação, controle inundações e promover a piscicultura.

Figura 3- Localização do açude Arrojado Lisboa (Banabuiú)



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Atualmente, a estrutura desempenha um papel fundamental como fonte hídrica principal do Sistema Adutor Banabuiú-Sertão Central, integrante do Projeto de Apoio à Melhoria da Segurança Hídrica e Fortalecimento da Inteligência na Gestão Pública do Estado do Ceará (PSGH/CE) (Figura 4), uma iniciativa desenvolvida pelo Governo do Estado do Ceará com financiamento do Banco Mundial (Ceará, 2022).

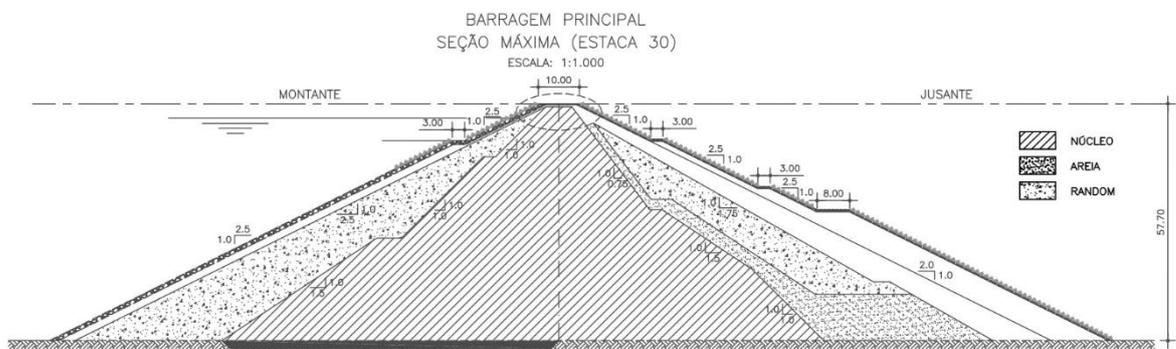
Figura 4 – Vista geral da barragem Arrojado Lisboa (Banabuiú)



Fonte: Autora, 2021.

A estrutura pode ser caracterizada, de acordo com o método construtivo e composição do seu maciço, como barragem de terra do tipo zoneada, composta por um maciço de 824,0 metros de extensão pelo coroamento e altura máxima de 57,70 metros (Figura 5). A barragem auxiliar também é do tipo zoneada, com núcleo impermeável, com altura máxima de 21,70 metros.

Figura 5- Seção máxima da barragem Arrojado Lisboa (Banabuiú)



Fonte: Brasil, 2016.

A estrutura do vertedouro localiza-se na ombreira esquerda da barragem, constituído de paramento em perfil Creager, com largura total de 102 metros, dividido em 6 vãos espaçados de 17,5 metros de eixo a eixo, terminando em salto esqui. As comportas setor no vertedouro foram instaladas no início da década de 1980, objetivando-se a elevação da capacidade de acumulação do reservatório e controle de enchentes.

A Tabela 1 a seguir apresentam um resumo da ficha técnica da barragem Banabuiú.

Tabela 1 - Ficha técnica da barragem Banabuiú

<b>Ficha Técnica Barragem Banabuiú</b>	
Tipo Barragem	Terra Zoneada
Largura do Coroamento (m)	12,00
Extensão do Coroamento (m)	824,00
Altura Máxima (m)	57,70
Cota do Coroamento (m)	146,00
Tipo Vertedouro	Perfil Creager com Salto de Esqui
Largura Vertedouro (m)	102,00
Cota do Vertedouro (m)	138,20
Área da Bacia Hidráulica (ha)	14,243
Lâmina Máxima Milenar (m)	5,80
Lâmina Máxima Decamilenar (m)	6,30

Fonte: Brasil, 2016

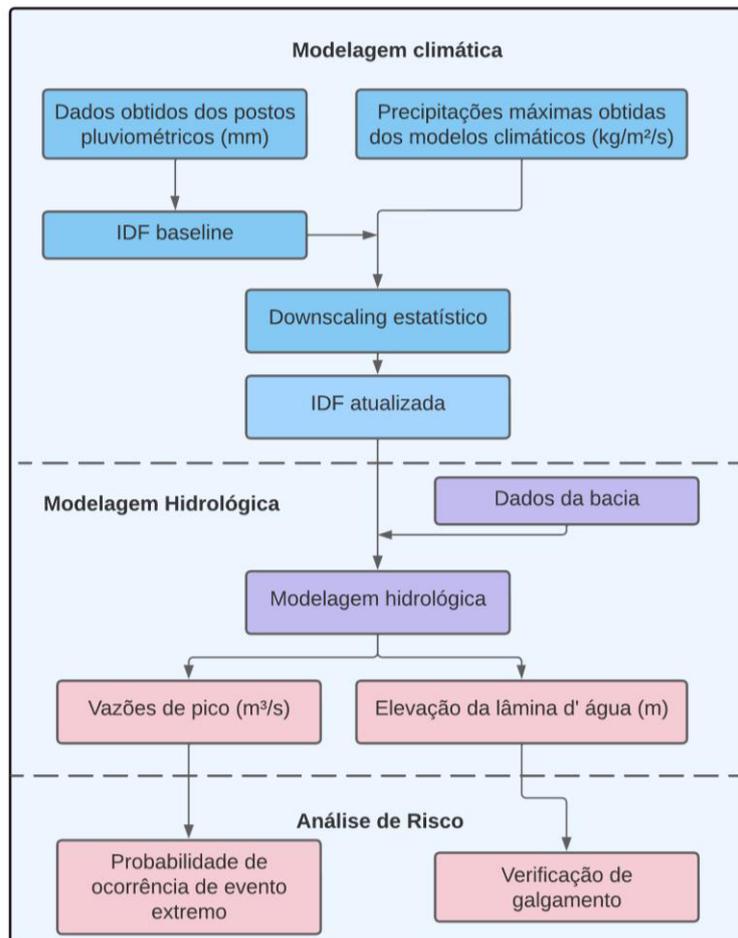
#### 4 METODOLOGIA

O fluxograma metodológico desse estudo está apresentado na Figura 6. A metodologia consiste, primeiramente, na extração das precipitações máximas diárias de cada ano da série histórica, para os dados dos postos pluviométricos existentes na região e para os modelos climáticos do CMIP 6.

Na etapa subsequente foi realizado o *downscaling* estatístico, através do Método de Correspondência dos *Quantis* Equidistantes (EQM). A partir dos dados obtidos, foram geradas as IDF's para o cenário climático atual (*baseline*) e atualizada as curvas IDF's para os dados dos modelos climáticos futuros.

O passo seguinte consistiu na modelagem hidrológica, por meio do modelo computacional HEC-HMS, para determinar o escoamento sobre as estruturas hidráulicas, com base nas IDF's atualizadas. Por fim, foram verificadas as possibilidades de colapso da estrutura, para cada cenário crítico analisado.

Figura 6 - Fluxograma da metodologia aplicada no estudo



Fonte: Adaptado de Carneiro *et al.* (2022)

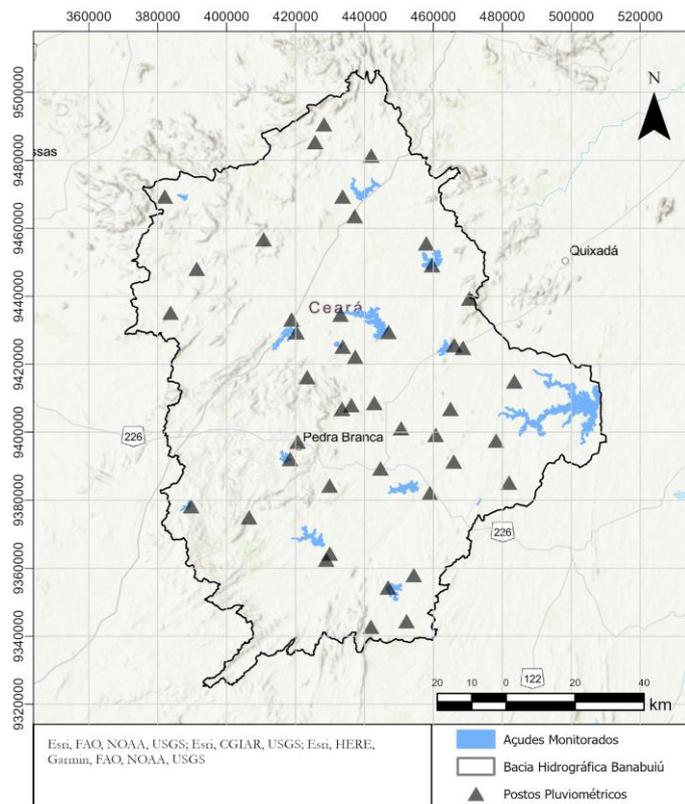
## 4.1 Dados pluviométricos

Nesta seção serão abordadas detalhadamente a obtenção e análise dos dados pluviométricos coletados e extraídos dos modelos climáticos.

### 4.1.1 Dados observados

A metodologia adotada consistiu, primeiramente, na determinação das precipitações máximas diárias de cada ano da série histórica, obtidas a partir dos dados de postos pluviométricos existentes, os quais são utilizados e distribuídos na bacia hidrográfica do Açude Banabuiú, disponibilizados na plataforma HIDROWEB da ANA, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7- Localização dos postos pluviométricos existentes



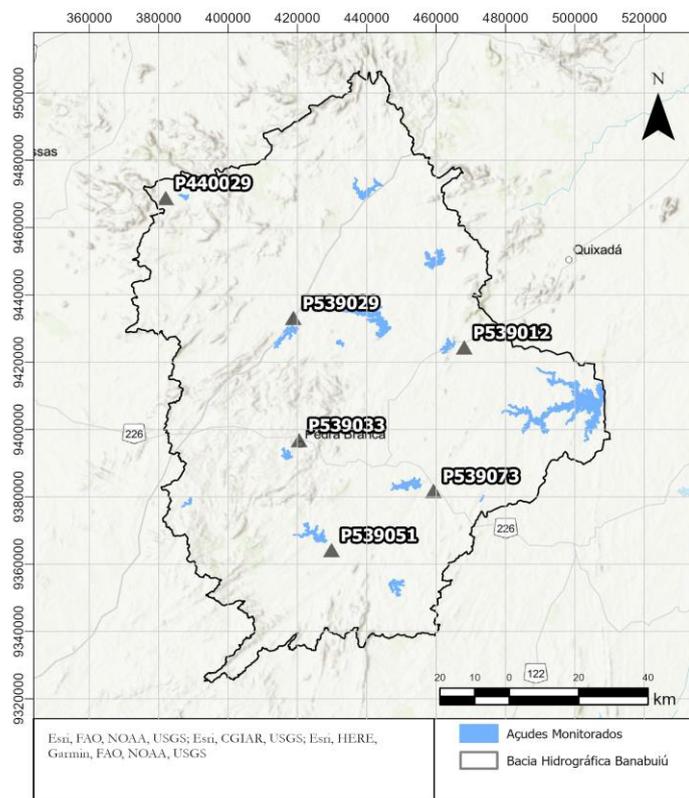
Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Embora exista a disponibilidade considerável de estações pluviométricas localizadas na bacia hidrográfica do Banabuiú, muitas dessas apresentam registros limitados e/ou algumas inconsistências nos dados.

A partir dessas observações, selecionaram-se as estações que apresentam um histórico de dados de precipitação distribuídos na bacia. A Figura 8 ilustra os postos pluviométricos

selecionados com base nos critérios mencionados. A identificação das estações está detalhada na Tabela 3.

Figura 8 - Postos pluviométricos selecionados



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Tabela 2 - Postos pluviométricos selecionados

Código	Nome	Latitude	Longitude	Operador	Início-Fim
P539029	BOA VIAGEM	-5.13	-39.7167	FUNCEME-CE	1974-2023
P539051	MOMBAÇA	-5.75	-39.6167	FUNCEME-CE	1974-2023
P440029	MONSENHOR TABOSA	-4.80	-40.0667	FUNCEME-CE	1974-2023
P539033	PEDRA BRANCA	-5.45	-39.7167	FUNCEME-CE	1974-2023
P539012	QUIXERAMOBIM	-5.20	-39.2833	FUNCEME-CE	1974-2023
P539073	SENADOR POMPEU	-5.58	-39.3667	FUNCEME-CE	1974-2023

Fonte: Elaborada pela autora.

Foi empregado o Método das Izozonas (Torrico, 1974) para desagregação da precipitação diária em chuvas de 24 horas e, subsequentemente, em chuvas de durações menores. Tal método consiste em relacionar dados das estações pluviométricas e pluviográficas para obtenção da relação entre a precipitação de 1h/6 min e 24h para áreas homólogas

(isozonas), que é constante para o mesmo intervalo médio de recorrência, independentemente do nível de precipitação. Dessa forma, cada isozona está associada a coeficientes de desagregação para diferentes intervalos de recorrência (Torrico, 1974).

Um ajuste probabilístico foi aplicado às séries de precipitações máximas anuais para cada duração de chuva, determinando-se os tempos de retorno correspondentes e, portanto, a IDF foi estabelecida para cada posto da bacia.

#### 4.1.2 Dados climáticos

Neste trabalho, foram utilizados os dados de precipitação oriundos dos Modelos GCM para o CMIP6. Foram selecionados quatro modelos que apresentassem dados de precipitações diárias para a região estudada, conforme apresentado na Tabela 3.

Dentre os modelos climáticos do CMIP-6, selecionou-se para este estudo os modelos que apresentassem dados de precipitações diárias para a região da Sub-bacia do Banabuiú e também aplicabilidade para a região semiárida brasileira.

Foram selecionados os modelos climáticos aplicados por Silveira *et al.* (2016), Sabóia *et al.* (2020), Carvalho *et al.* (2020) e Carneiro *et al.* (2022) em estudos relacionados às projeções de precipitações no nordeste brasileiro.

Tabela 3 - Modelos climáticos aplicados ao estudo

<b>Modelo CMIP6</b>	<b>Centro de Pesquisa</b>	<b>Resolução Espacial</b>	<b>Resolução Nominal</b>
ACCESS-ESMI1-5	Centre for Australian Weather and Climate Research - Austrália	1.9°x1.3°	250km
BCC_CSM2_MR	Beijing Climate Center - China	1.1°x1.1°	100 km
CanESM5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis - Canadá	2.8°x2.8°	500km
MIROC-ES2L	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology - Japão	2.8°x2.8°	500km

Fonte: Adaptado de Carneiro, *et al.* (2022)

Referente aos cenários de emissões, foram selecionados o SSP2 4.5 e SSP5 8.5 por sua equivalência às versões dos RCPs 4.5 e 8.5. No primeiro cenário, considera-se a estabilidade nas emissões de dióxido de carbono, enquanto no segundo, prevê-se um aumento significativo dessas emissões, conforme mencionado por Hausfather (2020).

É possível afirmar que o cenário SSP2 4.5 se configura como o cenário mais desejado, sendo um cenário hipotético onde a maioria dos países conseguiria controlar seus níveis de emissões e assim, estabilizando a concentração de gases do efeito estufa. Entretanto, o cenário SSP5 8.5 é o que tem maior probabilidade de ocorrer devido ao aumento das emissões (Srivastav; Schardong; Simonovic, 2015).

Os dados foram extraídos do site do Earth System Grid Federation (ESGF), para o CMIP6, disponível em <<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6>>, filtrando os dados históricos para o período de 1975-2020 e as projeções para os anos de 2020-2100. Os dados de precipitação obtidos foram convertidos de kg/m<sup>2</sup>/s para mm/dia.

#### 4.2 Downscaling estatístico e interpolação espacial dos dados

A aplicação de um método de diminuição da escala espacial de um modelo caracteriza o processo de *downscaling* estatístico, consistindo na interpolação de variáveis em escala espacial para uma escala pontual. Esta técnica foi desenvolvida pela necessidade de se ter uma informação mais detalhada no tempo e no espaço dos produtos de previsões numéricas de tempo e clima (Hewinton e Crane, 1996; Wilby e Wigley, 1997; Hall *et al.*, 1999).

Conforme exposto por Sabóia *et al.* (2016), o *downscaling* estatístico é baseado em funções de transferência, estabelecendo-se uma relação matemática entre os dados gerados por esses modelos e os dados de precipitação observados na área de estudo.

Dessa forma, aplicou-se o Método de Correspondência dos *Quantis* Equidistantes (EQM) na etapa de *downscaling* estatístico para obtenção das curvas IDF para os cenários estipulados.

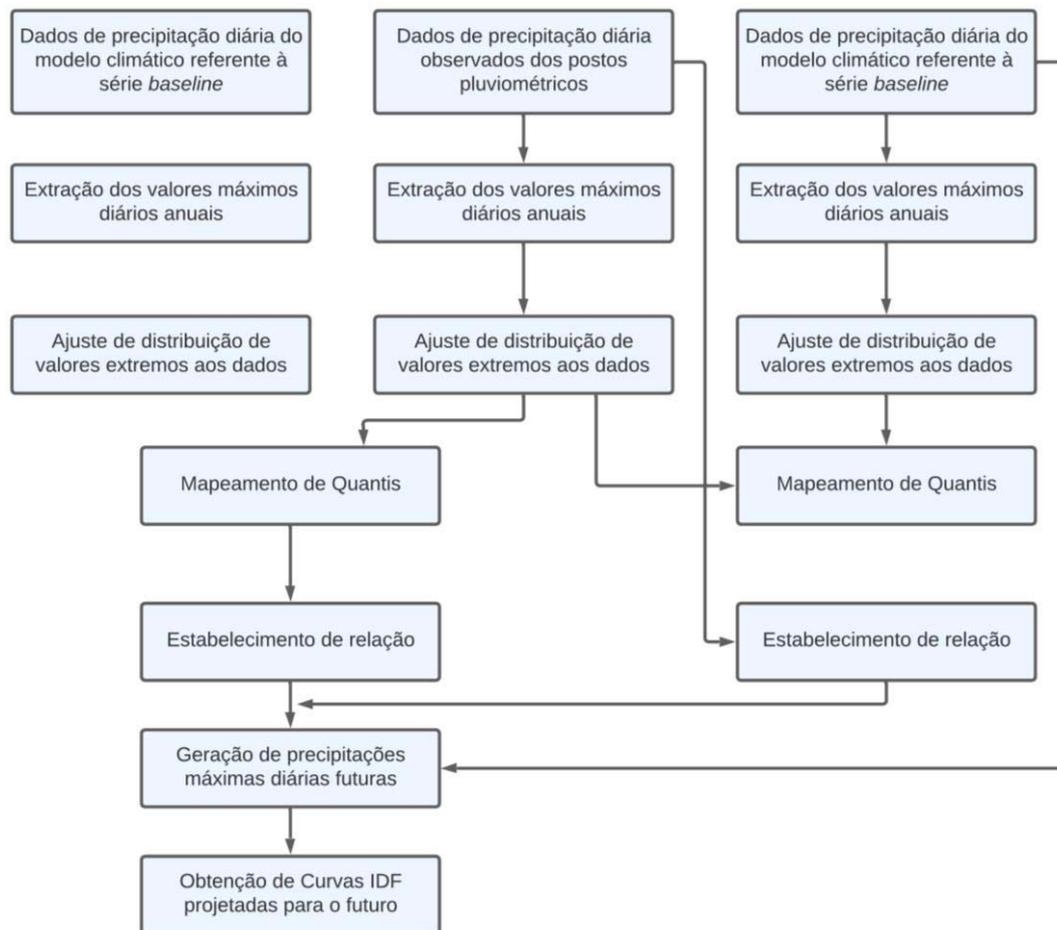
O método EQM refere-se à técnica de *downscaling* estatístico atendendo às seguintes etapas: i) *downscaling* espacial, relacionando os dados correspondentes às chuvas máximas pelos GCMs e às chuvas máximas extraídas dos dados observados para um período (correção de viés); ii) *downscaling* temporal relacionando as chuvas máximas diárias pelos GCMs e as chuvas máximas diárias às projeções futuras dos SSP, estimando-se as alterações para os possíveis cenários futuros selecionados (Srivastav; Schardong; Simonovic, 2015).

A metodologia aplicada ao método EQM é apresentada no Fluxograma metodológico (Figura 8) e, de forma resumida, pode ser explicada através dos seguintes passos:

- 1) Extração das precipitações máximas diárias dos dados observados e dos dados obtidos pelos modelos GCM;

- 2) Estabelecimento de relação estatística entre os valores máximos anuais dos dados observados e dados dos modelos GCMs para um mesmo período.
- 3) Estabelecimento de relação estatística entre os valores máximos anuais dos dados dos modelos GCMs referente ao período base e o período futuro a ser analisado.
- 4) Atualização das curvas IDF para o futuro através de relação estatística entre os passos 2 e 3.

Figura 9 - Fluxograma metodológico Método EQM



Fonte: Adaptado de Sabóia (2016).

Referente aos ajustes de probabilidades entre as previsões e os dados observados aplicou-se a distribuição estatística de Valor Extremo I (Distribuição de Gumbel), de forma a obter as precipitações máximas para períodos de retorno de 100, 1.000 e 10.000 anos, uma vez que são amplamente aplicadas na análise de eventos hidrológicos.

Devido às resoluções dos modelos climáticos, foi realizada interpolação espacial dos GCMs para as coordenadas dos postos pluviométricos selecionados, adotando-se o método da ponderação do inverso da distância ao quadrado, empregado pela ferramenta IDF\_CC

(Schardon, Srivastav e Simonovic, 2015), implementada em linguagem R (Disponível em <http://www.r-project.org/>). O resultado desta etapa são as IDFs atualizadas para os cenários SSP 4.5 e SSP 8.5.

### **4.3 Modelagem hidrológica do reservatório em condições de mudança climática**

Foi realizada modelagem hidrológica no software HEC-HMS a fim de determinar os dados de escoamento para os cenários estipulados, uma vez que o objetivo do programa é estimar o escoamento superficial para bacias hidrográficas com determinada quantidade de precipitação a partir de uma representação da bacia hidrográfica como um sistema de componentes hidrológicos e hidráulicos interligados (USACE, 2016).

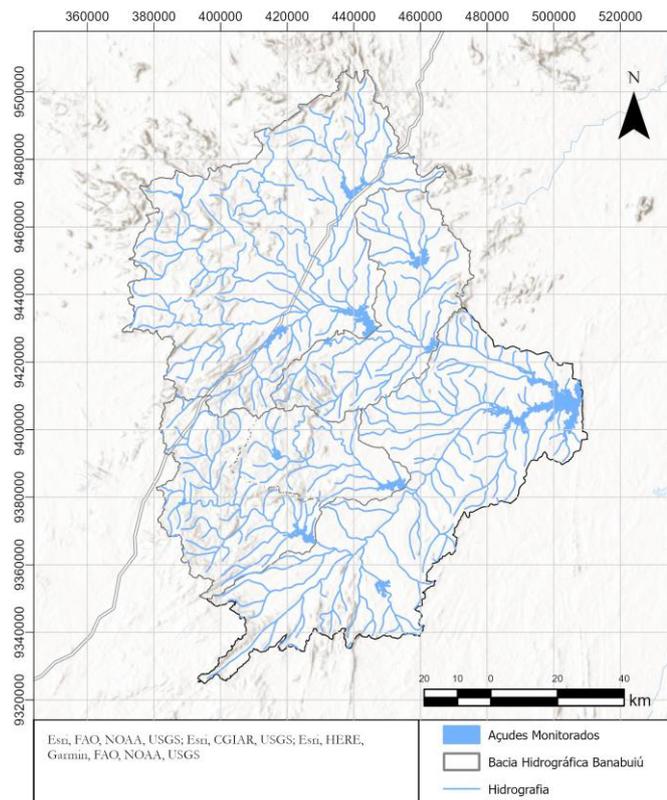
Neste trabalho, foram simulados cenários correspondentes às séries de precipitação observadas e outros 8 cenários correspondentes às séries de precipitação obtidas através dos modelos GCMs. Para entrada de dados no software, foram inseridos os histogramas correspondentes às sub-bacias, construídos com base nas curvas IDFs atualizadas. Os tempos de retorno adotados foram de 1.000 anos e 10.000 anos, comumente adotados em dimensionamento de vertedouros de barragens (Chow *et al.*, 1988).

Foi adotado o método CN do *Soil Conservation Service* (SCS) na formulação do modelo e determinação das vazões de pico, objetivando-se refletir as condições de cobertura e solo do local, podendo assumir valores que refletem uma cobertura muito impermeável até uma cobertura completamente impermeável (USDA, 1986).

Neste trabalho, a partir da observação do uso atual do solo na bacia, os valores de CN para a bacia do Açude Banabuiú foram estimados, selecionando o grupo e características do solo C e o uso do solo como campos permanentes normais e, portanto, resultando em CN equivalente a 71 para todas as sub-bacias, conforme metodologia desenvolvida por Luna (2000). Foram adotados os mesmos valores de CN para todas as sub-bacias com o intuito de individualizar os impactos provenientes apenas das mudanças climáticas.

Quanto ao tempo de concentração ( $T_c$ ), aplicou-se o método de Kirpich para determinação do tempo e, seguidamente, o tempo de duração da precipitação na simulação. A Figura 10 e a Tabela 4 apresentam as características das sub-bacias do Açude Banabuiú aplicados à modelagem hidrológica.

Figura 10 - Divisão das sub-bacias selecionadas



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Tabela 4 - Caracterização das sub-bacias do Açude Banabuiú

Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Comprimento do rio (km)
Boa Viagem	3.570,99	119,50
Quixeramobim	1.201,34	23,20
Senador Pompeu	4.050,67	39,00
Pedra Branca	2.644,94	202,00

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Ainda referente à modelagem do reservatório, foram utilizados os dados disponíveis no documento “Elaboração de estudos e projetos técnicos no âmbito das ações para recuperação e atualização dos açudes existentes inseridos no sistema do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as bacias hidrográficas do Nordeste Setentrional – PISF” do Ministério do Desenvolvimento Regional (Brasil, 2016).

#### 4.4 Determinação da frequência de eventos extremos em cenários de mudança climática

Análises estatísticas demonstram que o galgamento (*overtopping*) da crista da barragem é um dos principais fatores de risco que contribuem para o rompimento da estrutura (Lee e You *et al.*, 2013), principalmente devido a capacidade insuficiente do vertedouro após uma inundação ou cheia.

A análise do risco hidrológico de galgamento é importante na determinação da elevação da crista e das dimensões dos vertedouros, e fornece informações valiosas para a operação do reservatório e gestão da segurança da barragem.

Nesse contexto, a definição simples de risco foi adotada para identificar os cenários nos quais as condições atuais são superadas e que ocorra um possível risco de colapso da estrutura. O risco de uma cheia superar o esperado com base no clima atual (C) pode ser determinado pela probabilidade de excedência (P). Isso pode ocorrer quando a vazão modelada para cenários futuros ( $Q_i$ ) excede a vazão observada para o clima atual ( $Q_{obs}$ ), conforme mostrado na equação abaixo.

$$C = P [Q_i > Q_{obs}] \quad (4.1)$$

A fim de avaliar se os cenários de mudanças climáticas impactam na possibilidade de ruptura da barragem, foi determinado a probabilidade de excedência para cada cenário crítico, onde a elevação da lâmina vertente supera a cota do coroamento do barramento, ocasionando um possível galgamento da estrutura.

Após simular o evento de chuvas aplicando a modelagem hidrológica, foi determinado tempos de recorrência de cheia para cada cenário crítico. Esta abordagem evoca o conceito de "redução de recorrência" utilizado em estudos sobre avaliação de risco de inundação (Vogel *et al.*, 2011; De Silva *et al.*, 2014; Ghuman *et al.*, 2020).

Conforme explicado por Vogel *et al.* (2011), a redução de recorrência é a redução no intervalo médio de recorrência das inundações futuras associadas a uma inundação de referência. Ainda que o tempo de recorrência real das inundações de referência não seja necessariamente o mesmo que o das cheias projetadas, usamos os novos intervalos como agente de risco de inundação associados às mudanças na precipitação.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, os resultados obtidos a partir da metodologia serão apresentados em seções para facilitar a compreensão e análise. Inicialmente, foi realizada uma análise das precipitações máximas obtidas dos modelos climáticos selecionados neste estudo, explanando as variações percentuais que devem ocorrer em relação às precipitações máximas anuais e às máximas diárias relativas aos cenários SSP2 4.5 (245) e SSP5 8.5 (585).

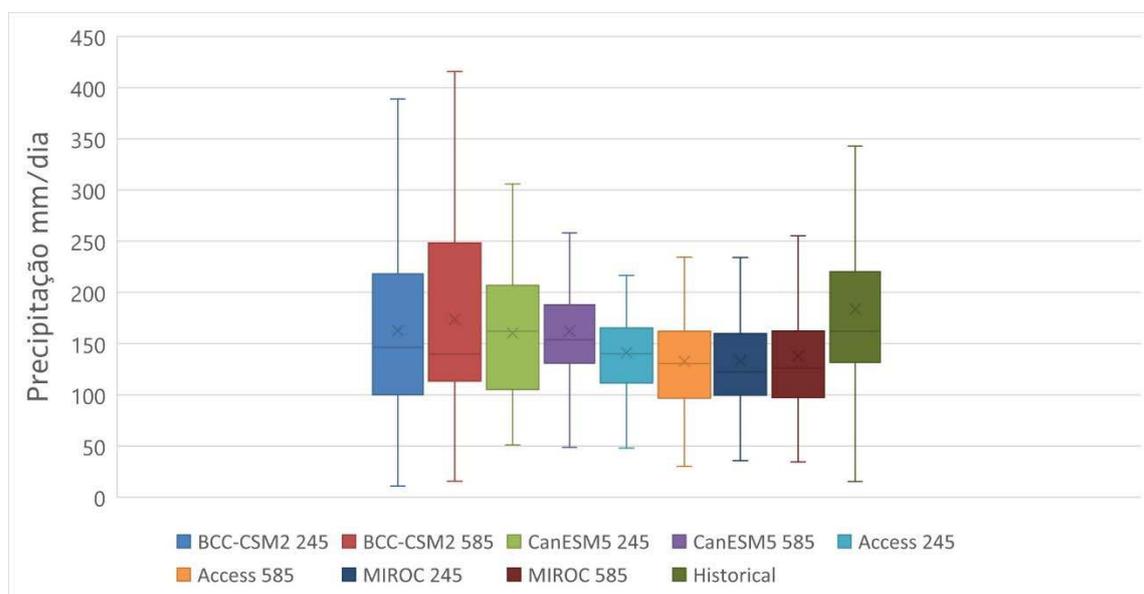
Seguidamente, serão apresentadas as equações IDF's atualizadas com os dados obtidos dos modelos climáticos, comparando-os aos valores da série histórica, discutindo a variação percentual do aumento ou diminuição das variáveis em estudo.

Os resultados obtidos foram devidamente analisados e discutidos, com o intuito de avaliar a probabilidade de falha hidrológica da barragem Banabuiú, considerando os cenários de mudanças climáticas.

### 5.1 Análise das precipitações máximas provenientes dos modelos climáticos

Foram analisados os dados de precipitações máximas anuais e as máximas diárias obtidas dos modelos GCMs estudados, comparando-se os valores da série de dados *baseline* (1975-2020) e dados gerados pelos cenários SSP2 4.5 (245) e SSP5 8.5 (585), referente ao período de 2020 a 2100. A distribuição dos dados de precipitações máximas diárias anual para cada modelo climático é apresentada no Gráfico 1.

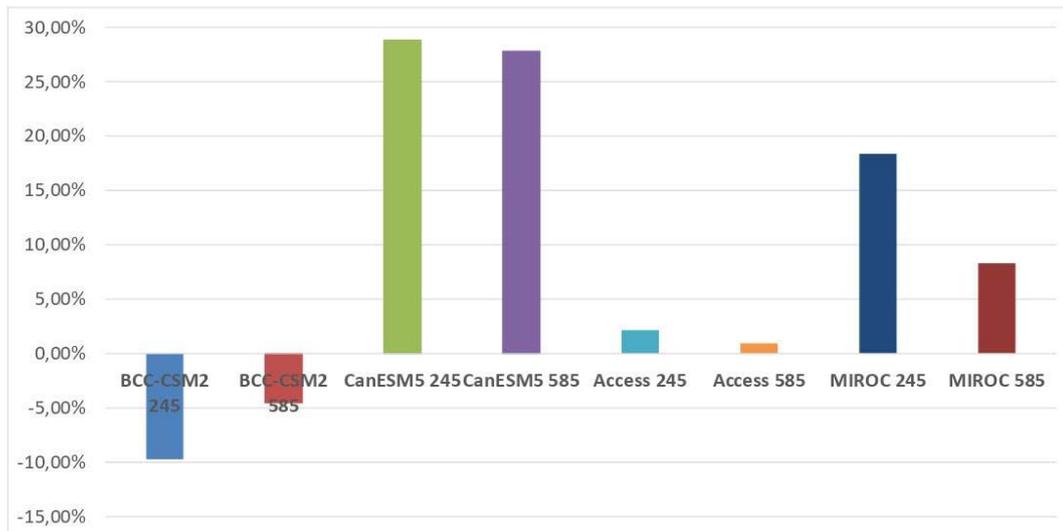
Gráfico 1- Distribuição dos dados de precipitação máxima diária extraídos dos GCMs



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Os resultados das variações médias das precipitações máximas são apresentados na Gráfico 2 a seguir.

Gráfico 2 - Variação percentual da média das precipitações máximas diárias anuais extraídos dos GCMs



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Os resultados obtidos do modelo BCC-CSM2 para os cenários de SSP2 4.5 e SSP5 8.5 apontam em diminuição na média de precipitações máximas de 9,7% e 4,5%, respectivamente. O modelo BCC-CMS2, reconhecido por sua superioridade em resolução espacial, apresentou variações negativas nas médias das precipitações máximas, em contraste com os demais modelos avaliados.

Em relação aos valores das máximas diárias geradas pelo modelo CanESM5, os dados obtidos apontam para um acréscimo em ambos os cenários adotados, sendo o aumento de 28,8% no cenário SSP2 4.5 e um aumento de 27,8 % no cenário SSP5 8.5.

De acordo com os dados do modelo ACCESS, as precipitações médias se manterão quase inalteradas, apresentando um aumento de apenas 2,2% no cenário SSP2 4.5 e um aumento de 0,9% no cenário SSP5 8.5.

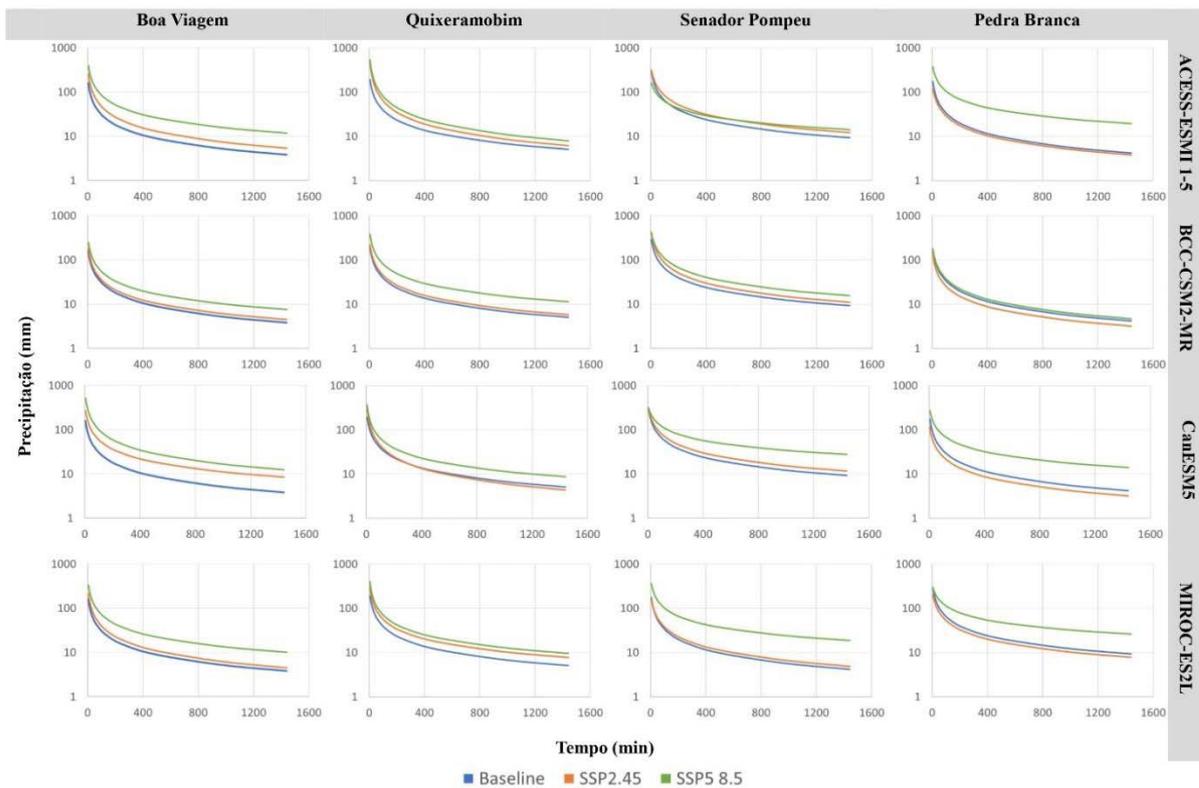
Os resultados obtidos do modelo MIROC apresentaram um aumento substancial de cerca de 18,4% nas médias de chuva. Ademais, no cenário de impacto climático máximo (SSP5 8.5), ocorreu um acréscimo de 8,3%.

Em termos gerais, os dados indicam maiores variações das médias de precipitações máximas associadas ao cenário SSP2 4.5 em comparação ao cenário de maior impacto climático, designado como SSP5 8.5. Ademais, destaca-se que o modelo CanESM2 apresentou as variações mais significativas neste contexto.

## 5.2 Atualização das Curvas IDFs

Neste estudo, foram atualizadas as curvas IDF, conforme os cenários de mudança climática estipulados, para cada uma das quatro sub-bacias correspondentes aos postos pluviométricos selecionados, obtendo assim 16 curvas IDF, apresentadas na Figura 11 a seguir.

Figura 11 - Curvas de precipitação atualizadas (TR = 1.000 anos) para todas as sub-bacias em cenários de mudanças climáticas.



Avaliando-se as curvas IDF atualizadas para os cenários climáticos, no modelo ACCESS-ESM1 1-5, o cenário SSP2 4.5 apresentou valores muito próximos aos valores da *baseline*. No entanto, para o cenário SSP5 8.5, os valores obtidos foram superiores aos cenários *baseline* e SSP2 4.5, sendo cerca de 53% mais elevados na sub-bacia Pedra Branca.

Referente ao modelo BCC-CSM2-MR, é notável que, para ambos os cenários SSP2 4.5 e SSP5 8.5, os valores apresentaram-se próximos aos valores da *baseline* para todas as sub-bacias, apresentando variações inferiores a 25%.

Para os modelos CanESM5 e MIROC-ES2L, foram observados que as precipitações para o cenário de emissões SSP2 4.5 se aproximaram dos valores da *baseline*, enquanto para o cenário de missão mais crítico (SSP 5 8.5) apresentaram precipitações até 57% superiores aos valores da *baseline*.

A aproximação de valores observados para os modelos ACCESS-ESMI 1-5 e BCC-CSM2-MR pode ser justificada pela melhor resolução dos modelos espaciais em relação aos demais analisados.

Outros estudos comprovaram os efeitos das alterações climáticas sobre eventos extremos de cheias, Lee e You (2013) ao realizar a atualização da IDF's para uma pequena bacia na Coreia do Sul, verificaram que a probabilidade de chuvas extremas aumentará aproximadamente 10% em comparação ao cenário atual.

Já Simonovic *et al.* (2016) ao atualizar as IDF's para todo o território do Canadá, utilizando dados de 567 estações meteorológicas, observou que as intensidades de chuva aumentavam conforme o agravamento de emissões de gases para os cenários RCP estipulados.

Para o Nordeste do Brasil, Sabóia *et al.* (2020), Carvalho *et al.* (2020) e Carneiro *et al.* (2022) realizaram a atualização das IDF's, baseando-se em diferentes modelos climáticos globais. As previsões de precipitações apresentaram espalhamento de dados, com ocorrência de cheias superiores e inferiores ao período de base, além de variação entre os cenários representativos de emissões utilizados.

### 5.3 Resultados da modelagem hidrológica do reservatório

A partir da modelagem hidrológica realizada no HEC-HMS foi possível obter os valores de vazão de pico ( $Q_p$ ) correspondentes a cada cenário estipulado e a elevação da lâmina d'água ( $H$ ) para os valores de TR de 1.000 e 10.000 anos.

Com base nos dados obtidos, procedeu-se a análise do comportamento da vazão de cheia e elevação da lâmina d'água para o cenário *baseline* comparando-a com os dados apresentados no projeto da barragem elaborado pelo DNOCS.

Tabela 5 – Comparação das vazões e elevação da lâmina d'água do cenário atual com cenário de projeto.

Cenários	Q (m <sup>3</sup> /s)	N.A. (m)	Revanche (m)
Projeto DNOCS	5.200,00	132,80	13,20
<i>Baseline</i>	5.711,02	136,24	9,76

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Comparando-se a vazão calculada atual (*baseline*) com os dados do projeto de construção da barragem, foi estimado um aumento de 9,82%, correspondendo à uma elevação de 3,44 m no nível da água e, conseqüentemente, reduzindo-se a borda livre da crista.

A redução da borda livre pode ter impactos significativos na segurança da estrutura e nas áreas a jusante e, portanto, sendo necessária uma reavaliação das condições hidrológicas, incluindo eventos extremos (Fluixá-Sanmartín *et al.*, 2018).

Seguidamente, foram analisadas as vazões de pico referente a cada cenário para o TR = 1.000 anos e suas respectivas lâminas d'água, comparando-as com as condições do cenário *baseline*, conforme exposto na Tabela 6.

Tabela 6 - Vazões de pico e elevação da lâmina d'água para TR = 1.000 anos obtidos através dos modelos climáticos

Modelo	Cenários	Qp (m <sup>3</sup> /s)	N.A. (m)	ΔQ (m <sup>3</sup> /s)	ΔN.A. (m)
<i>Baseline</i>	-	5.711,02	136,24	-	-
ACCESS-ESMI 1-5	SSP2 4.5	5.397,34	129,98	-5,49%	-4,59%
	SSP5 8.5	5.766,77	140,35	+0,98%	+3,02%
BCC-CSM2-MR	SSP2 4.5	5.503,05	132,84	-3,64%	-2,50%
	SSP5 8.5	5.801,03	143,87	+1,58%	+5,60%
CanESM5	SSP2 4.5	5.355,55	129,47	-6,22%	-4,97%
	SSP5 8.5	5.738,90	139,64	+0,49%	+2,50%
MIROC-ES2L	SSP2 4.5	5.357,63	127,87	-6,19%	-6,14%
	SSP5 8.5	5.715,91	138,56	+0,09%	+1,70%

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Analisando os resultados da modelagem, é notável que as vazões de pico para TR 1.000 anos foram inferiores aos valores da *baseline* para todos os cenários SSP2 4.5, sendo cerca de -6,22% inferior para o modelo CanESM5.

Contudo, para os cenários SSP5 8.5, caracterizados pela configuração climática com repercussões mais significativas, os valores obtidos em todos os modelos estipulados superaram os valores da *baseline*, apresentando ampliações de +0,09% (MIROC-ES2L) até 1,58% (BCC-CSM2-MR).

Referente às elevações da lâmina d'água, observa-se que, apesar dos cenários SSP5 8.5 superem os valores da *baseline*, numa faixa de variações percentuais de +1,70% (MIROC-ES2L) a +5,60% (BCC-CSM2-MR), nenhum dos cenários apresentaram lâmina superior a cota do coroamento da barragem (146,0 m). Dessa forma, para o TR 1.000 anos, não há indícios de ocorrência de galgamento da barragem Banabuiú.

Em linhas gerais, analisando os resultados das vazões e níveis de água dos modelos utilizados neste estudo, notam-se comportamentos divergentes nos valores para o modelo

ACCESS-ESMI 1-5 no período de retorno de 1.000 anos, em que esse modelo revelou valores consideravelmente superiores aos demais modelos nos estudos conduzidos por Sabóia *et al.*, (2020), Carvalho *et al.* (2020), Carneiro *et al.* (2022) e Porto (2023).

No entanto, o modelo climático CanESM5, um dos que possuem a menor resolução espacial, apresentou os menores valores de vazão entre os modelos selecionados, apresentando comportamento similar ao estudo desenvolvido por Carneiro *et al.* (2022).

A fim de aprimorar a análise, foi conduzida a modelagem para o período de retorno de 10.000 anos, com os resultados de vazões e níveis de água sendo expostos na Tabela 7.

Tabela 7 - Vazões de pico e elevação da lâmina d'água para TR = 10.000 anos

Modelo	Cenários	Qp (m <sup>3</sup> /s)	N.A. (m)	$\Delta Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta N.A.$ (m)
<i>Baseline</i>	-	6.603,61	141,82	-	-
ACCESS-ESMI 1-5	SSP2 4.5	6.874,64	145,44	+4,10%	+2,55%
	SSP5 8.5	6.908,95	147,28	+4,62%	+3,85%
BCC-CSM2-MR	SSP2 4.5	6.897,92	145,56	+4,46%	+2,64%
	SSP5 8.5	6.928,69	148,32	+4,92%	+4,58%
CanESM5	SSP2 4.5	6.758,76	142,25	+2,35%	+0,30%
	SSP5 8.5	6.672,33	142,60	+1,03%	+0,56%
MIROC-ES2L	SSP2 4.5	6.945,63	143,56	+5,18%	+1,23%
	SSP5 8.5	6.829,13	146,28	+3,42%	+3,14%

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Analisando os resultados para TR 10.000 anos nota-se que, para todos os cenários estipulados, os picos de vazões superaram a vazão do cenário *baseline*, representando um acréscimo de até +5,18% para o modelo MIROC-ES2L no cenário SSP2 4.5 e +4,92% para o modelo BCC-CSM2-MR no cenário SSP5 8.5.

Referente às elevações da lâmina d'água, observa-se que o cenário SSP5 8.5 para os modelos ACCESS-ESMI 1-5, BCC-CSM2-MR e MIROC-ES2L apresentaram lâmina superior a cota do coroamento da barragem (146,0 m), apontando a possibilidade de ocorrência de galgamento da estrutura nestes cenários.

Observa-se que, nos cenários de emissões críticas SSP5 8.5, os valores obtidos pelos modelos ACCESS-ESMI 1-5 e BCC-CSM2-MR indicaram valores críticos, convergindo com resultados de estudos análogos dentro do escopo deste trabalho (Carneiro, *et al.*, 2022).

Por sua vez, o modelo CanESM5 apresentou variações mais modestas nas vazões de pico e elevações da lâmina d'água em comparação com os demais modelos analisados. Os

resultados associados a esse modelo indicam uma tendência de redução nas vazões máximas em todos os estudos nos quais foi empregado (Carneiro *et al.*, 2022; Sabóia *et al.*, 2020).

Outros estudos comprovaram os efeitos das mudanças climáticas sobre as vazões obtidas em modelagem de cenários futuros. Com base nas projeções climáticas para 421 locais em toda a área de estudo, Maurer *et al.* (2018) estimaram um aumento nas vazões de pico de até 43% nas vazões modeladas até o final do século, considerando o cenário mais crítico de emissões de gases.

No estudo de Carneiro *et al.* (2022), as vazões foram superadas em 50% dos cenários, superando em até 10 vezes a probabilidade de ocorrência de um colapso da estrutura, sendo este um grande indicativo do risco das mudanças climáticas à segurança de barragens.

#### 5.4 Probabilidade de excedência de cheia nos cenários de mudanças climáticas

A fim de analisar a contribuição das mudanças climáticas na probabilidade de excedência de cheia frente aos cenários de mudanças climáticas na barragem analisada, foram considerados os modelos climáticos em que a elevação da água (N.A.) apresentou elevação acima da cota do coroamento da Barragem Arrojado Lisboa (146,0 m).

A partir desses dados, foram determinados os tempos de recorrência para as precipitações máximas de cada modelo climático crítico. Os resultados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Tempos de recorrência calculados

<b>Modelo</b>	<b>Tempo de recorrência (anos)</b>
ACCESS-ESMI 1-5 SSP5 8.5	95
BCC-CSM2-MR SSP5 8.5	102
MIROC-ES2L SSP5 8.5	97

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A partir da obtenção dos tempos de recorrências para os cenários selecionados, determinaram-se as probabilidades de excedência da cheia, apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Probabilidades de excedência calculadas

<b>Modelo selecionado</b>	<b>Probabilidade de excedência da cheia (%)</b>
ACCESS-ESMI 1-5 SSP5 8.5	41%
BCC-CSM2-MR SSP5 8.5	39%
MIROC-ES2L SSP5 8.5	40%

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

As probabilidades obtidas para os modelos climáticos críticos apresentaram-se semelhantes entre si, sendo o cenário ACCESS-ESMI 1-5 SSP5 8.5 caracterizado com a maior probabilidade de excedência da cheia.

Em outros estudos que aplicaram modelos climáticos às barragens no semiárido brasileiro, verificou-se que a probabilidade de excedência da cheia frente aos cenários de mudanças climáticas analisados é de até 75%, destacando as incertezas apresentadas pelos GCMs (Carneiro *et al.*, 2022).

A partir dos dados obtidos, de forma bastante simplificada, pode-se considerar que a probabilidade de evento extremo associado aos cenários de mudança pode impactar a segurança da barragem e, portanto, deve ser considerada durante a operação da estrutura.

## 6 CONCLUSÃO

A aplicação de modelos climáticos viabilizou a modelagem hidrológica em cenários de alterações climáticas, possibilitando a avaliação dos parâmetros diretamente relacionados à segurança da Barragem Arrojado Lisboa (Banabuiú).

O estudo evidenciou a capacidade de mudanças climáticas afetarem nas precipitações do semiárido brasileiro, bem como a vazão e volume do reservatório, podendo assim causar picos de vazões acima das cheias de projeto, implicando diretamente na operação do reservatório e no risco de galgamento da estrutura. No entanto, os resultados demonstram que os impactos dependem altamente do modelo aplicado para as projeções climáticas.

Analisando-se os comportamentos das curvas IDF nos cenários de mudança climática, verificou-se que os modelos climáticos analisados, bem como os cenários de emissões, apresentaram valores de precipitações próximos aos valores obtidos dos dados observados para a mesma região. No entanto, as diferentes tendências entre os modelos climáticos e entre os dois cenários de emissões analisados representam uma grande incerteza dos modelos de previsões climáticas globais.

Quanto à modelagem hidrológica, concluiu-se que as mudanças climáticas contribuem para aumentos moderados até significativos nas vazões de pico e elevações da lâmina d'água, dependendo das condições climáticas projetadas, podendo apresentar valores acima da cota de coroamento da barragem, resultando em galgamento da estrutura.

Conforme esperado, para o TR de 10.000 anos, há mais cenários de cheias que resultem no galgamento da barragem Banabuiú em comparação ao cenário para TR de 1.000 anos, justificando que as magnitudes dos picos de vazões aumentam para um tempo de retorno mais raro, comprovando o maior dano causado por eventos mais intensos.

Ademais, em decorrência da probabilidade de um evento extremo ser superado, ainda que as incertezas apresentadas pelos modelos climáticos sejam significativas, é necessário que haja a adaptação de projetos de infraestrutura, verificando a adequação da estrutura vertente ou elevação do coroamento da estrutura.

No que se refere às competências estabelecidas na legislação de segurança de barragens, é necessário um maior detalhamento nas regras de operação das comportas do vertedouro nos Planos de Operação e Manutenção do reservatório, considerando os cenários de mudança climática. Além disso, é necessário considerar as cheias excepcionais no Plano de Ação de Emergência (PAE) nos cenários de ruptura de barragens, de forma a englobar os riscos associados.

Este trabalho se limitou a avaliar o impacto das mudanças climáticas nas variáveis de vazão e risco de galgamento da Barragem Arrojado Lisboa (Açude Banabuiú), localizado em clima semiárido. Logo, são recomendadas para trabalhos futuros a análise da complexidade do comportamento hidrológico nos diferentes tipos de modelagem climática e a avaliação das incertezas dos modelos climáticos associadas às análises de riscos mais robustas. Também é recomendável analisar o impacto associado às mudanças climáticas nos demais reservatórios estratégicos de abastecimento de água do Estado do Ceará.

## REFERÊNCIAS

ADAMO, N.; AL-ANSARI, N.; SISSAKIAN, V.; LAUE, J.; KNUTSSON, S. Dam Safety and Overtopping. **Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering**, v. 10, n. 6, p. 41–78, 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Relatório de Segurança de Barragens 2023**. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Brasília: ANA, 2023. 90p.

ALOYSIUS, N. R.; SHEFFIELD, J.; SAIERS, J. E.; LI, H.; WOOD, E. F. Evaluation of historical and future simulations of precipitation and temperature in central Africa from CMIP5 climate models. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 121, n. 1, p. 130–152, 2016. DOI 10.1002/2015jd023656. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/2015jd023656>.

AZIZI, S.; ILDEROMI, A. R.; NOORI, H. Investigating the effects of land use change on flood hydrograph using HEC-HMS hydrologic model (case study: Ekbatan Dam). **Natural hazards (Dordrecht, Netherlands)**, v. 109, n. 1, p. 145–160, 2021. DOI 10.1007/s11069-021-04830-6. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-021-04830-6>.

BAI, Y.; ZHANG, Z.; ZHAO, W. Assessing the impact of climate change on flood events using HEC-HMS and CMIP5. **Water, air, and soil pollution**, v. 230, n. 6, 2019. DOI 10.1007/s11270-019-4159-0. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-019-4159-0>.

BOULANGE, J.; HANASAKI, N.; YAMAZAKI, D.; POKHREL, Y. Role of dams in reducing global flood exposure under climate change. **Nature communications**, v. 12, n. 1, 2021. DOI 10.1038/s41467-020-20704-0. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-020-20704-0>.

BOWERS, W. S. The Vulnerability of Dams: A Rising Threat to Life & Property. 2020. Disponível em: <https://jsheld.com/insights/articles/the-vulnerability-of-dams-a-rising-threat-to-life-property>. Acesso em: 24 jan. 2022.

BRASIL. **Lei nº 12.334**, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm). Acesso em: 9 de março de 2023.

BRASIL. **Lei nº 14.066**, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967. Brasília, DF: Presidência da República, 2020. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm). Acesso em: 9 de março de 2023.

BRASIL. Ministério da Integração. **Elaboração de estudos e projetos técnicos no âmbito das ações para existentes inseridos no sistema do projeto de integração do Rio São Francisco com as bacias hidrográficas do nordeste setentrional – PISF**. Fortaleza, 2016.

BUSER, C. M.; KÜNSCH, H. R.; WEBER, A. Biases and Uncertainty in Climate Projections: Uncertainty in climate projections. **Scandinavian journal of statistics, theory and applications**, v. 37, n. 2, p. 179–199, 2010. DOI 10.1111/j.1467-9469.2009.00686.x. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-9469.2009.00686.x>.

CALDEIRA, T. L., OLIVEIRA, V. A.; STEINMETZ, A. A.; VIOLA, M. R.; BESKOW, S. Modelagem Hidrológica Determinística Chuva-Vazão em Bacias Hidrográficas: Uma Abordagem Introdutória. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 5, p. 22–32, jul. 2018.

CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. de C.; SOUZA FILHO, F. de A. de; PORTO, V. C. On the rainfall intensity–duration–frequency curves, partial-area effect and the Rational Method: Theory and the engineering practice. **Water**, v. 12, n. 10, p. 2730, 2020. DOI 10.3390/w12102730. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/w12102730>.

CANTWELL, B.L.; MURLEY, K.A. **Design flood guidelines**, Australia. Proceedings of the 16th ICOLD Congress, San Francisco, Vol. IV, Q. 63, R. 15. Coimbra, 1988.

CARNEIRO, B. L. D. S.; SOUZA FILHO, F. de A. de; CARVALHO, T. M. N.; RAULINO, J. B. S. Hydrological risk of dam failure under climate change. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 27, 2022. DOI 10.1590/2318-0331.272220220017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.272220220017>.

CARVALHO, T.M.N.; SOUZA FILHO, F.de A.; SABOIA, M.A.M. **Performance of rainwater tanks for runoff reduction under climate change scenarios: a case study in Brazil**. Urban Water Journal, v. 17, n. 10, p. 912–922, 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/1573062X.2020.1846063>>.

CEARÁ. Assembleia Legislativa. Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos. **Caderno da sub-bacia hidrográfica do rio Banabuiú**: informações sobre saneamento básico. Fortaleza. INESP, 2009.

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos. **Relatório Estadual de Segurança de Barragens**. SRH, 2023.

CHEN, X.; HOSSAIN, F. Understanding future safety of dams in a changing climate. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 100, n. 8, p. 1395–1404, 2019. DOI 10.1175/bams-d-17-0150.1. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1175/bams-d-17-0150.1>.

CHERNET, H. H.; ALFREDSEN, K.; MIDTTØMME, G. H. Safety of hydropower dams in a changing climate. **Journal of hydrologic engineering**, v. 19, n. 3, p. 569–582, 2014. DOI 10.1061/(asce)he.1943-5584.0000836.

Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0000836](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000836).

COLLADOS-LARA, A.-J.; GÓMEZ-GÓMEZ, J.-D.; PULIDO-VELAZQUEZ, D.; PARDO-IGÚZQUIZA, E. An approach to identify the best climate models for the assessment of

climate change impacts on meteorological and hydrological droughts. **Natural hazards and earth system sciences**, v. 22, n. 2, p. 599–616, 2022. DOI 10.5194/nhess-22-599-2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-22-599-2022>.

DE SILVA, M. M. G. T.; WEERAKOON, S. B.; HERATH, S. Modeling of event and continuous flow hydrographs with HEC–HMS: Case study in the Kelani river basin, Sri Lanka. **Journal of hydrologic engineering**, v. 19, n. 4, p. 800–806, 2014. DOI 10.1061/(asce)he.1943-5584.0000846. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000846](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000846).

DONAT, M. G.; LOWRY, A. L.; ALEXANDER, L. V.; O’GORMAN, P. A.; MAHER, N. More extreme precipitation in the world’s dry and wet regions. **Nature climate change**, v. 6, n. 5, p. 508–513, 2016. DOI 10.1038/nclimate2941. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2941>.

DORE, M. H. I. Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know? **Environment international**, v. 31, n. 8, p. 1167–1181, 2005. DOI 10.1016/j.envint.2005.03.004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2005.03.004>.

FERNANDES, R. de O.; SILVEIRA, C. da S.; STUDART, T. M. de C.; SOUZA FILHO, F. de A. de. Reservoir yield intercomparison of large dams in Jaguaribe Basin-CE in climate change scenarios. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, n. 0, 2017. DOI 10.1590/2318-0331.011716033. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011716033>.

FLUIXÁ-SANMARTÍN, J.; ALTAREJOS-GARCÍA, L.; MORALES-TORRES, A.; ESCUDER-BUENO, I. Review article: Climate change impacts on dam safety. **Natural hazards and earth system sciences**, v. 18, n. 9, p. 2471–2488, 2018. DOI 10.5194/nhess-18-2471-2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-18-2471-2018>.

FLUIXÁ-SANMARTÍN, J.; ESCUDER-BUENO, I.; MORALES-TORRES, A.; CASTILLO-RODRÍGUEZ, J. T. Accounting for climate change uncertainty in long-term dam risk management. **Journal of water resources planning and management**, v. 147, n. 4, 2021. DOI 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001355. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001355](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001355).

FLUIXÁ-SANMARTÍN, J.; MORALES-TORRES, A.; ESCUDER-BUENO, I.; PAREDES-ARQUIOLA, J. Quantification of climate change impact on dam failure risk under hydrological scenarios: a case study from a Spanish dam. **Natural hazards and earth system sciences**, v. 19, n. 10, p. 2117–2139, 2019. DOI 10.5194/nhess-19-2117-2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-19-2117-2019>.

GHUMMAN, A. R.; ATEEQ-UR-RAUF; ALODAH, A.; HAIDER, H.; SHAFIQUZZAMAN, M. Evaluating the impact of climate change on stream flow: integrating GCM, hydraulic modelling and functional data analysis. **Arabian journal of geosciences**, v. 13, n. 17, 2020. DOI 10.1007/s12517-020-05881-y. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-020-05881-y>.

HERBOZO, J. E.; MUÑOZ, L. E.; GUERRA, M. J.; MINAYA, V.; HARO, P.; CARRILLO, V.; MANCIATI, C.; CAMPOZANO, L. Non-stationary hydrological regimes due to climate

change: The impact of future precipitation in the spillway design of a reservoir, case study: Sube y Baja dam, in Ecuador. **Atmosphere**, v. 13, n. 5, p. 828, 2022. DOI 10.3390/atmos13050828. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/atmos13050828>.

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

IPCC. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp.

JESUS, M.B. **Aspectos de gestão frente à Política Nacional de Segurança de Barragens**. 2021. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

JOETZJER, E.; DOUVILLE, H.; DELIRE, C.; CIAIS, P. Present-day and future Amazonian precipitation in global climate models: CMIP5 versus CMIP3. **Climate dynamics**, v. 41, n. 11–12, p. 2921–2936, 2013. DOI 10.1007/s00382-012-1644-1. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-012-1644-1>.

JONES, C.; CARVALHO, L. M. V. Climate change in the South American monsoon system: Present climate and CMIP5 projections. **Journal of climate**, v. 26, n. 17, p. 6660–6678, 2013. DOI 10.1175/jcli-d-12-00412.1. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1175/jcli-d-12-00412.1>.

KINGSTON, D. G.; TODD, M. C.; TAYLOR, R. G.; THOMPSON, J. R.; ARNELL, N. W. Uncertainty in the estimation of potential evapotranspiration under climate change. **Geophysical research letters**, v. 36, n. 20, 2009. DOI 10.1029/2009gl040267. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1029/2009gl040267>.

KUNKEL, K. E.; KARL, T. R.; EASTERLING, D. R.; REDMOND, K.; YOUNG, J.; YIN, X.; HENNON, P. Probable maximum precipitation and climate change. **Geophysical research letters**, v. 40, n. 7, p. 1402–1408, 2013. DOI 10.1002/grl.50334. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/grl.50334>.

KUO, C. C.; GAN, T. Y. Risk of exceeding extreme design storm events under possible impact of climate change. **Journal of hydrologic engineering**, v. 20, n. 12, 2015. DOI 10.1061/(asce)he.1943-5584.0001228. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0001228](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0001228).

LEE, B.-S.; YOU, G. J.-Y. An assessment of long-term overtopping risk and optimal termination time of dam under climate change. **Journal of environmental management**, v. 121, p. 57–71, 2013. DOI 10.1016/j.jenvman.2013.02.025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.02.025>.

LI, C.; ZWIERS, F.; ZHANG, X.; CHEN, G.; LU, J.; LI, G.; NORRIS, J.; TAN, Y.; SUN, Y.; LIU, M. Larger increases in more extreme local precipitation events as climate warms.

**Geophysical research letters**, v. 46, n. 12, p. 6885–6891, 2019. DOI 10.1029/2019gl082908. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1029/2019gl082908>.

LIMA, F.N. **Avaliação das probabilidades de falhas em barragens associadas a eventos de naturezas hidráulicas e hidrológicas: estudo de caso da PCH Cajuru**. 2014.

Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

LIN, X.; HUANG, G.; PIWOWAR, J. M.; ZHOU, X.; ZHAI, Y. Risk of hydrological failure under the compound effects of instant flow and precipitation peaks under climate change: A case study of Mountain Island Dam, North Carolina. **Journal of cleaner production**, v. 284, n. 125305, p. 125305, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125305>.

LIU, Z.; XU, X.; CHENG, J.; WEN, T.; NIU, J. Hydrological risk analysis of dam overtopping using bivariate statistical approach: a case study from Geheyan Reservoir, China. **Stochastic environmental research and risk assessment: research journal**, v. 32, n. 9, p. 2515–2525, 2018. DOI 10.1007/s00477-018-1550-0. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00477-018-1550-0>.

LOMPI, M.; MEDIERO, L.; SORIANO, E.; CAPORALI, E. Climate change and hydrological dam safety: a stochastic methodology based on climate projections. **Journal des sciences hydrologiques [Hydrological sciences journal]**, v. 68, n. 6, p. 745–763, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2023.2192873>

LOU, R. F. **Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do Rio Piabanha/RJ**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

LOZA, A. R. A.; FIDÉLIS, T. ‘Literature review on the analysis of climate change risks in the environmental impact assessment of dams’. **Impact assessment and project appraisal**, v. 39, n. 4, p. 277–289, 2021. DOI 10.1080/14615517.2021.1893928. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/14615517.2021.1893928>.

MAGALHÃES, J. H. F.; ROCHA, M. J. D.; LIMA NETO, I. E.; SILVEIRA, C. S. Avaliação dos impactos das mudanças climáticas na temperatura em Juazeiro do Norte segundo modelos globais do IPCC. **XV SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE**, 2018.

MALLAKPOUR, I.; AGHAKOUCHAK, A.; SADEGH, M. **Climate-induced changes in the risk of hydrological failure of major dams in California**. *Geophysical research letters*, v. 46, n. 4, p. 2130–2139, 2019. DOI 10.1029/2018gl081888. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1029/2018gl081888>.

MALVEIRA, V.T.C.; GOMES, F. H. S. ; FURTADO, F. A. . Avaliação quantitativa de risco em barragens do semiárido utilizando a distribuição de Weibull. *Revista Fundações e Obras Geotécnicas*, v. 65, p. 58-67, 2016.

MARCOS JUNIOR, A. D.; SILVEIRA, C. S.; VASCONCELOS JÚNIOR, F. C.; GUIMARÃES, S. O.; DA COSTA, J. M. F. Classificação Climática de Thornthwaite para o Brasil com Base em Cenários de Mudanças Climáticas do IPCC-AR5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 4, p. 647–664, 2018. DOI 10.1590/0102-7786334007. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786334007>.

MAURER, Edwin P. **Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California, under two emissions scenarios**. *Climatic change*, v. 82, n. 3–4, p. 309–325, 2007. ISSN: 0165-0009. DOI: 10.1007/s10584-006-9180-9. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-006-9180-9>.

MEENU, R.; REHANA, S.; MUJUMDAR, P. P. Assessment of hydrologic impacts of climate change in Tunga–Bhadra river basin, India with HEC-HMS and SDSM. **Hydrological processes**, v. 27, n. 11, p. 1572–1589, 2013. DOI 10.1002/hyp.9220. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.9220>.

MINVIELLE, M.; GARREAUD, R. D. Projecting rainfall changes over the South American Altiplano. **Journal of climate**, v. 24, n. 17, p. 4577–4583, 2011. DOI 10.1175/jcli-d-11-00051.1. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1175/jcli-d-11-00051.1>.

MORALES-TORRES, A.; SERRANO-LOMBILLO, A.; ESCUDER-BUENO, I.; **The suitability of risk reduction indicators to inform dam safety management**. *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*, p. 1–12, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2015.1136830>.

MOREIRA, I. A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MOURÃO, A.K.P. **Modelagem Hidrológica usando o Módulo SMA do HEC-HMS na Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2022.

MYHRE, G.; ALTERSKJAR, K.; STJERN, C. W.; HODNEBROG, Ø.; MARELLE, L.; SAMSET, B. H.; SILLMANN, J.; SCHALLER, N.; FISCHER, E.; SCHULZ, M.; STOHL, A. Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming. **Scientific reports**, v. 9, n. 1, 2019. DOI 10.1038/s41598-019-52277-4. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-019-52277-4>.

O’NEILL, B. C.; TEBALDI, C.; VAN VUUREN, D. P.; EYRING, V.; FRIEDLINGSTEIN, P.; HURTT, G.; KNUTTI, R.; KRIEGLER, E.; LAMARQUE, J.-F.; LOWE, J.; MEEHL, G. A.; **The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6**. *Geoscientific model development*, v. 9, n. 9, p. 3461–3482, 2016. DOI 10.5194/gmd-9-3461-2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>.

ORLOWSKY, B.; SENEVIRATNE, S. I. Global changes in extreme events: regional and seasonal dimension. **Climatic change**, v. 110, n. 3–4, p. 669–696, 2012. DOI 10.1007/s10584-011-0122-9. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-011-0122-9>.

ORSINI, J.A.M; FISCH, G.F. Amazonian Geopolitics of Climate Change. **Brazil in the Geopolitics of Amazonia and Antarctica**. Lexington Books, 2023. 260 p.

PALMER, M. A.; REIDY LIERMANN, C. A.; NILSSON, C.; FLÖRKE, M.; ALCAMO, J.; LAKE, P. S.; BOND, N. Climate change and the world’s river basins: anticipating

management options. **Frontiers in ecology and the environment**, v. 6, n. 2, p. 81–89, 2008. DOI 10.1890/060148. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1890/060148>.

PEYRAS, L.; CARVAJAL, C.; FELIX, H.; BACCONNET, C.; ROYET, P.; BECUE, J.-P.; BOISSIER, D. Probability-based assessment of dam safety using combined risk analysis and reliability methods – application to hazards studies. **European journal of environmental and civil engineering**, v. 16, n. 7, p. 795–817, 2012. DOI 10.1080/19648189.2012.672200. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2012.672200>.

PONTES FILHO, J. D.; SOUZA FILHO, F. de A.; MARTINS, E. S. P. R.; STUDART, T. M. de C. Copula-based multivariate frequency analysis of the 2012–2018 drought in Northeast Brazil. **Water**, v. 12, n. 3, p. 834, 2020. DOI 10.3390/w12030834. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/w12030834>.

PORTO, B.C. **O impacto das mudanças climáticas na modelagem do Fósforo no Reservatório Óros, Ceará (Brasil)**. 2023. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

QIN, P.; XU, H.; LIU, M.; LIU, L.; XIAO, C.; MALLAKPOUR, I.; NAEINI, M. R.; HSU, K.; SOROOSHIAN, S. Projected impacts of climate change on major dams in the Upper Yangtze River Basin. **Climatic change**, v. 170, n. 1–2, 2022. DOI 10.1007/s10584-021-03303-w. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-021-03303-w>.

QUINTERO, F.; MANTILLA, R.; ANDERSON, C.; CLAMAN, D.; KRAJEWSKI, W. Assessment of changes in flood frequency due to the effects of climate change: Implications for engineering design. **Hydrology**, v. 5, n. 1, p. 19, 2018. DOI 10.3390/hydrology5010019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/hydrology5010019>.

RAMOS, A. M. **Influência das mudanças climáticas devido ao efeito estufa na drenagem urbana de uma grande cidade**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

RAULINO, J.B.S. **Avaliação dos impactos das mudanças climáticas sobre a qualidade da água de reservatório do semiárido brasileiro**. 2021. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

RICARDO FERNANDES DA COSTA, L. R. C.; OLIVEIRA, V. P. V.; SANTOS, J. O. Contexto Geoambiental em Sítio Urbano na Sub-Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú - CE. **Revista Verde Grande: Geografia e Interdisciplinaridade**, v. 1, n. 01, p. 23–33, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.46551/rvg26752395201912333>.

SABÓIA, M.A.M. **Estratégia robusta para a gestão de drenagem urbana em cenário de mudança do clima**. 2016. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

SABOIA, M. A. M.; DE SOUZA FILHO, F. de A.; HELFER, F.; ROLIM, L. Z. R. Robust strategy for assessing the costs of urban drainage system designs under climate change scenarios. **Journal of water resources planning and management**, v. 146, n. 11, 2020.

Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001281](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001281).

SAMIOTIS, G.; PEKRIDIS, G.; KAKLIDIS, N.; TRIKOILIDOU, E.; TAOUSANIDIS, N.; AMANATIDOU, E. Greenhouse gas emissions from two hydroelectric reservoirs in Mediterranean region. **Environmental monitoring and assessment**, v. 190, n. 6, 2018. DOI 10.1007/s10661-018-6721-4. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-018-6721-4>.

SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. A.; MARTINS, E. S. P. R.; OLIVEIRA, J. L.; COSTA, A. C.; NOBREGA, M. T.; SOUZA, S. A.; SILVA, R. F. V.; **Mudanças climáticas na bacia do rio São Francisco: Uma análise para precipitação e temperatura**. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 2016, volume 21, n.2, pp. 416-428.

SCHARDONG, A.; SRIVASTAV, R.; SIMONOVIC, S. P. **Computerized Tool for the Development of Intensity-Duration-Frequency Curves under a Changing Climate Users Manual v.1.1**. London, Ontario, Canada: The University of Western Ontario, 2015.

SENEVIRATNE, S. I.; NICHOLLS, N.; EASTERLING, D.; GOODESS, C. M.; KANAE, S.; KOSSIN, J.; LUO, Y.; MARENGO, J.; MCINNES, K.; RAHIMI, M.; REICHSTEIN, M.; SORTEBERG, A.; VERA, C.; ZHANG, X.; RUSTICUCCI, M.; SEMENOV, V.; ALEXANDER, L. V.; ALLEN, S.; BENITO, G.; ... ZWIERS, F. W. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation**. [S. l.]: Cambridge University Press, 2012. p. 109–230.

SRIVASTAV, R. K.; SCHARDONG, A.; SIMONOVIC, S. P. **Computerized Tool for the Development of Intensity-Duration-Frequency Curves under a Changing Climate**. Technical Manual. London, Ontario, Canada: Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Western Ontario, 2011. Water Resources Research. 2015. P. 89.

TORRICO, J.J.T. **Práticas hidrológicas**. Rio de Janeiro: Transcon, 1974. 120p.

TSEGAW, A. T.; PONTOPPIDAN, M.; KRISTVIK, E.; ALFREDSSEN, K.; MUTHANNA, T. M. Hydrological impacts of climate change on small ungauged catchments – results from a global climate model–regional climate model–hydrologic model chain. **Natural hazards and earth system sciences**, v. 20, n. 8, p. 2133–2155, 2020. DOI 10.5194/nhess-20-2133-2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-20-2133-2020>.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos distribuídos**. Rhama, Porto Alegre, 2005.

USACE. 2016. Guidance for incorporating climate change impacts to inland hydrology in civil works studies, designs, and projects. Washington, DC: USACE.

USDA, SCS. Urban hydrology for small watersheds. Technical release, v.55, 1986.

VAN SOESBERGEN, A. J. J.; MULLIGAN, M. Modelling multiple threats to water security in the Peruvian Amazon using the WaterWorld policy support system. **Earth system dynamics**, v. 5, n. 1, p. 55–65, 2014. DOI 10.5194/esd-5-55-2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5194/esd-5-55-2014>.

VERA, C.; SILVESTRI, G.; LIEBMANN, B.; GONZÁLEZ, P. Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models. **Geophysical research letters**, v. 33, n. 13, 2006. DOI 10.1029/2006gl025759. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1029/2006gl025759>.

WISEU, T.; BETÂMIO, A. **Gestão do risco nos vales a jusante de barragens**. Territorium Revista Portuguesa de riscos prevenção e segurança, n. 18, p. 33–42, 2011. DOI 10.14195/1647-7723\_18\_3. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.14195/1647-7723\\_18\\_3](http://dx.doi.org/10.14195/1647-7723_18_3).

VOGEL, R. M.; YAINDL, C.; WALTER, M. **Nonstationarity: Flood magnification and recurrence reduction factors in the United States**. Journal of the American Water Resources Association, v. 47, n. 3, p. 464–474, 2011.

VUUREN, D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; ROSE, S. K. **The representative concentration pathways: an overview**. Climatic Change, v. 109, n. 1-2, p. 5–31, 2011.

WAN MOHTAR, W. H. M.; SHARIL, S.; SAMION, M. K. H.; MOHAMAD, M. F.; HAMZAH, S. B.; MOHD RAZALI, S. F.; MUHAMMAD, N. S.; MD DESA, S. Assessment of dam appurtenant structures under multiple flow discharge scenarios. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 11, n. 4, p. 913–922, 2020. DOI 10.1016/j.asej.2020.03.009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2020.03.009>.

WENTZ, J. A. **Assessing the Impacts of Climate Change on the Built Environment under NEPA and State EIA Laws: A Survey of Current Practices and Recommendations for Model Protocols**. Sabin Center for Climate Change Law, Columbia Law School. 2015. 65p.

WILBY, R. L.; CHARLES, S. P.; ZORITA, E.; TIMBAL, B.; WHETTON, P.; MEARN, L. O. **Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods**. Zenodo, 2004. DOI: 10.5281/ZENODO.1438319. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5281/ZENODO.1438319>.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Provisional State of the Global Climate**. 7 nov. 2022. Disponível em: <https://reliefweb.int/report/world/wmo-provisional-state-global-climate-2022>.

ZHAI, R.; TAO, F. Contributions of climate change and human activities to runoff change in seven typical catchments across China. **The Science of the total environment**, v. 605–606, p. 219–229, 2017. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.06.210. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.210>.

ZHANG, S.; CHEN, J. Uncertainty in projection of climate extremes: A comparison of CMIP5 and CMIP6. **Journal of meteorological research**, v. 35, n. 4, p. 646–662, 2021. DOI 10.1007/s13351-021-1012-3. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s13351-021-1012-3>.

ZHUAN, M.; CHEN, J.; XU, C.-Y.; ZHAO, C.; XIONG, L.; LIU, P. A method for investigating the relative importance of three components in overall uncertainty of climate projections. **International journal of climatology: a journal of the Royal Meteorological Society**, v. 39, n. 4, p. 1853–1871, 2019. DOI 10.1002/joc.5920. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.5920>.

## APÊNDICE A – CURVAS IDF ATUALIZADAS PARA OS CENÁRIOS DE MUDANÇA CLIMÁTICA

Figura 1 – Curvas IDF obtidas para o modelo climático ACCESS-ESMI 1-5

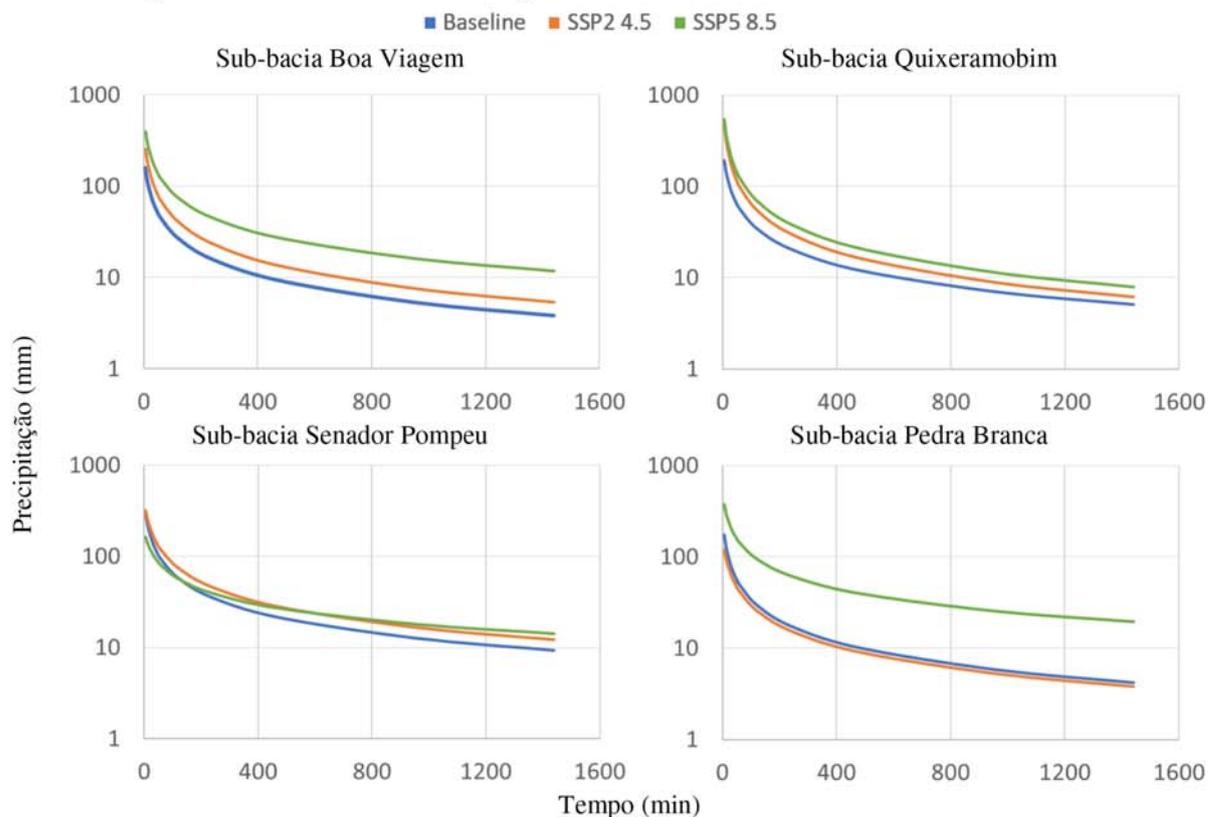


Figura 2 – Curvas IDF obtidas para o modelo climático BCC-CSM2-MR

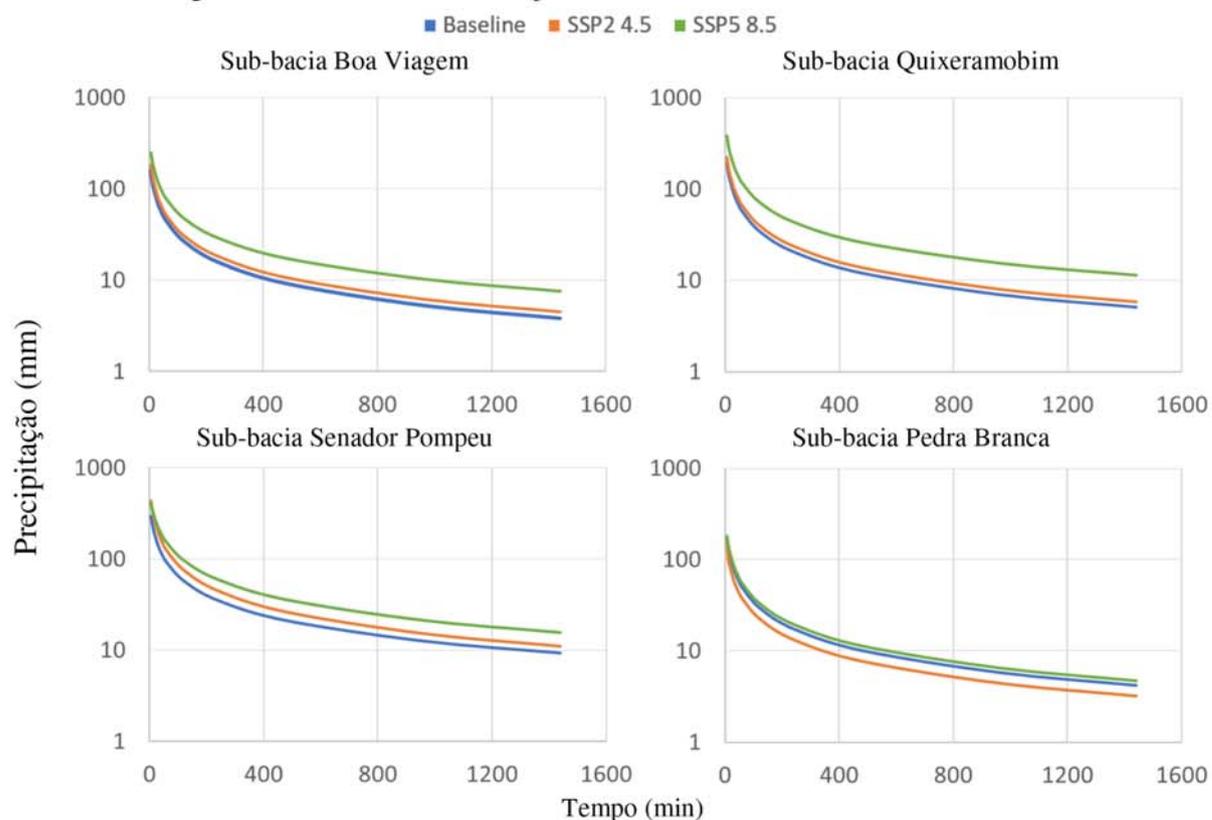


Figura 3 – Curvas IDF obtidas para o modelo climático CanESM5

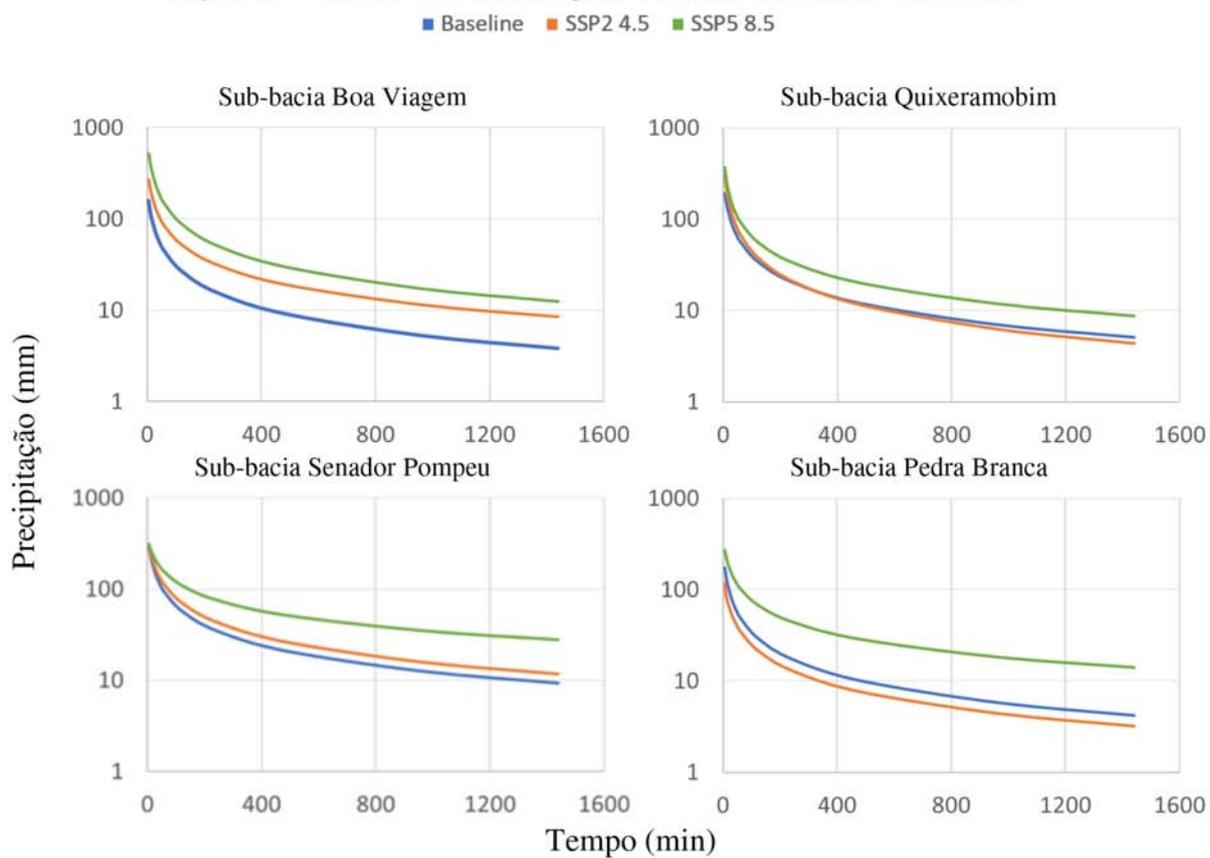


Figura 4 – Curvas IDF obtidas para o modelo climático MIROC-ES2L

