

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CÂMPUS PATO BRANCO

JEFFERSON GASEL

**SIMULAÇÃO DO IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOB ÀS VAZÕES
AFLUENTES DA UHE BENTO MUNHOZ DA ROCHA NETTO (FOZ DO AREIA)**

Pato Branco – PR

Agosto de 2022

JEFFERSON GRASEL

**SIMULAÇÃO DO IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOB ÀS VAZÕES
AFLUENTES DA UHE BENTO MUNHOZ DA ROCHA NETTO (FOZ DO AREIA)**

**Simulation of the impact of climate change under the affluent flows of the Bento Munhoz
da Rocha Netto HPP (foz do areia)**

Trabalho de Dissertação apresentado como requisito para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Murilo Cesar Lucas.

Pato Branco – PR

Agosto de 2022¹

1



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Pato Branco**



JEFFERSON GRASEL

**SIMULAÇÃO DO IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOB ÀS VAZÕES
AFLUENTES DA UHE BENTO MUNHOZ DA ROCHA NETTO (FOZ DO AREIA).**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Meio Ambiente.

Data de aprovação: 19 de Agosto de 2022

Dr. Murilo Cesar Lucas, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Ney Lyzandro Tabalipa, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Paulo Tarso Sanches De Oliveira, Doutorado - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (Ufms)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 19/08/2022.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a minha mãe Noeli, ao meu pai Jaime (in memorian) por me dar amparo e educação para que eu pudesse ir atrás de conhecimento e chegar até esse momento tão especial em minha carreira. Á minha noiva Janaina e a minha irmã Julia que me deram apoio, força e me incentivaram para conseguir concluir este trabalho. Lembrar também o meu avô Rudi (in memorian) que faleceu durante o período de realização deste trabalho. Espero honrar todos vocês.

Também quero agradecer ao meu orientador Prof. Dr. Murilo Cesar Lucas, pelo tempo dedicado e pelas importantes contribuições e estímulos transmitidos através das orientações para a realização deste trabalho. Agradeço também aos membros da banca examinadora que deixaram valiosas contribuições para o trabalho.

Ás pessoas que durante o processo de calibração e obtenção de dados para o meu trabalho me auxiliaram em todos os processos, especialmente aos profissionais engenheiro ambiental Dr. André Almagro, professor Dr Tirthankar Roy, professor Me André Tiago dos Santos e ao Técnico em hidrologia da hidroelétrica Foz do Areia Rafael Pereira, todos tiveram uma importante contribuição técnica ao trabalho.

Por fim agradeço a Deus por iluminar o meu caminho e me abençoar com muita saúde e sabedoria para a concretização deste trabalho e deste mestrado. Muito obrigado a todos.

RESUMO

A frequência de ocorrência de eventos climáticos extremos, como as secas meteorológicas, tem aumentado em diversas regiões do planeta. Diversos estudos têm atribuído esse aumento às mudanças climáticas (i.e., alterações de precipitação e temperatura do ar). A quantificação do impacto das mudanças climáticas sob o setor energético brasileiro é vital, porque sua matriz energética é constituída majoritariamente por usinas hidrelétricas. No Brasil, há poucos estudos sobre a quantificação do efeito das mudanças climáticas sob a geração de energia elétrica usando modelos climáticos globais atualizados, principalmente no Estado do Paraná. Com base nesse contexto o objetivo principal desse estudo foi a simulação do impacto das mudanças climáticas sob as vazões afluentes da UHE Bento Munhoz Da Rocha Netto (Foz do Areia). A bacia Foz do Areia é uma sub-bacia do Rio Iguaçu, localizada no Estado do Paraná, Sul do Brasil. Foi utilizada uma série histórica de 10 anos (1999-2008) de vazão diária para calibrar e uma série de 11 anos (2009 – 2019) para validar o modelo hidrológico concentrado tipo chuva-vazão. A simulação foi realizada usando o modelo hidrológico HYMOD 2, através da calibração automática com (SCE-UA) obteve-se um KGE superior a 0,83 em ambos os períodos, de calibração e validação. Os dados de precipitação e evapotranspiração diários foram obtidos em repositórios de agências brasileiras e de universidades. Em seguida, foram simulados três cenários futuros de vazão (2021-2040, 2041-2070 e 2071-2095), a partir de projeções futuras de precipitação e temperatura. Dois níveis de projeção de anomalia de temperatura do CMIP6 do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) foram adotados (SSP2-4.5 e o SSP5-8.5). Os cenários foram usados para avaliar as tendências de alterações das vazões afluentes, \overline{Qm} mensal, Q_{95} e Q_{90} , da usina Foz do. Os resultados encontrados, indicam uma variação grande nos regimes de chuva da bacia, projetando meses do ano com acumulados maiores de volumes de chuva e outros meses com um volume bem menor. Nas médias anuais de uma forma geral os resultados indicaram uma diminuição de mais de 50 % das vazões de referência Q_{95} e Q_{90} em ambos os cenários analisados. Os resultados do teste de Mann-Kendall também indicaram uma forte tendência para diminuição da \overline{Qm} mensal, indicando que os volumes de água dentro da bacia serão menores para os próximos 80 anos, principalmente nos meses menos chuvosos (março até agosto). Com esses resultados estima-se que haverá uma diminuição nos volumes de água e conseqüentemente diminuição na capacidade de geração de energia elétrica da usina Foz do Areia.

Palavras-chave: Análise de vazões; HYMOD 2; Hidrelétrica; Mudanças climáticas; Usina Foz do Areia.

ABSTRACT

The frequency of occurrence of extreme weather events, such as droughts, has increased in several meteorological regions of the planet. These studies increase the variation and temperature of the air. The quantification of vital climate changes under the Brazilian energy sector, because its energy matrix is mainly constituted by plants. In Brazil, there are few studies on the quantification of climate effects under the quantification of climate effects and electricity using global climate models over the State of Paraná, mainly in the State of Paraná. Based on this context, the main objective of this study was to simulate the impact of climate change on the tributary flows of HPP Bento Munhoz Da Rocha Neto (Foz do Areia). The Foz do Areia basin is a sub-basin of the Iguaçu River, located in the State of Paraná, southern Brazil. A 10-year historical series (1999-2008) of the daily series was used for calibration and an 11-year series (2009 - 2019) was used to validate the concentrate-vapour hydrological model. The simulation was performed using the hydrological model HY 2, through the automatic configuration with (S-UA) a K greater than 0 was obtained, performed in both configuration8 and validation periods. Journal and administration data were provided in transfers from Brazilian agencies and universities. Next, there were two future scenarios of simulated future deliveries (2021-2040, were 202041-2070 and 071-209), based on future projections and temperature. Two design levels of the IP6 design of the Climate Change CM Temperature Panel (IPCC) were adopted by Intergoverns (SSP2-4.5 and SSP5-8.5). Scenarios were used to assess changing trends in inflows, $(Q)^{-}$ monthly, Q95 and Q90, from the Fo plant. , from the Foz do plant. The results found indicate a large variation in the basin's rainfall regimes, projecting months of the year with greater accumulated rainfall and other months with a much smaller volume. In the annual averages, in general, the results indicated a decrease of more than 50% of the reference flows Q95 and Q90 in both scenarios analyzed. The results of the Mann-Kendall test also indicated a strong trend towards a decrease in the monthly $(Qm)^{-}$, indicating that the volumes of water within the basin will be lower for the next 80 years, especially in the less rainy months (March to August). With these results it is estimated that there will be a decrease in water volumes and consequently a decrease in the power generation capacity of the Foz do Areia plant.

Keywords: Flow analysis; HYMOD 2; Hydroelectric; Climate changes; Foz do Areia Power Plant.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DAS USINAS GERADORAS DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL.....	20
FIGURA 2 - ETAPAS NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM USINAS HIDRELÉTRICAS	22
FIGURA 3 - NÍVEIS E VOLUMES CARACTERÍSTICOS DE UM RESERVATÓRIO DE UMA USINA HIDROELÉTRICA.	23
FIGURA 4 - SÉRIE TEMPORAL (1999 – 2019) DE MÉDIAS ANUAIS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NA USINA FOZ DO AREIA.	26
FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO DO AUMENTO DE TEMPERATURA MÉDIA NO PLANETA TERRA ATÉ O ANO DE 2100.	27
FIGURA 6 - SEQUÊNCIA TEMPORAL DAS SECAS	29
FIGURA 7 - SEQUÊNCIA TEMPORAL DAS SECAS	33
FIGURA 8 - DESCRIÇÃO ESQUEMÁTICA HYMOD	36
FIGURA 9 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.	40
FIGURA 10 - PERFIL LONGITUDINAL DO RIO IGUAÇU.	41
FIGURA 11 - MAPA DE SOLOS DA BACIA DE DRENAGEM DA UHE FOZ DO AREIA.	42
FIGURA 12 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS E METEOROLÓGICAS.	43
FIGURA 13 - MÉDIA DIÁRIA DE PRECIPITAÇÃO NA SÉRIE HISTÓRICA (1999-2019).....	57
FIGURA 14 - MÉDIA DIÁRIA HISTÓRICA (1999-2019) DE ETo	58
FIGURA 15 - CURVA DE PERMANÊNCIA DE FOZ DO AREIA ENTRE 1999 E 2019.	59
FIGURA 16 - VAZÃO MÉDIA MENSAL (Q), EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL DE REFERÊNCIA (ETo) E PRECIPITAÇÃO (P) ENTRE OS ANOS DE 1999 E 2019 NA UHE FOZ DO AREIA.	56
FIGURA 17 - VAZÕES DIÁRIAS OBSERVADAS E SIMULADAS DURANTE O PERÍODO DE CALIBRAÇÃO DO MODELO (1999–2008).....	59
FIGURA 18 - VAZÕES DIÁRIAS OBSERVADAS E SIMULADAS DURANTE O PERÍODO DE VALIDAÇÃO DO MODELO (2009–2019).....	60
FIGURA 19 - PROJEÇÕES DE PRECIPITAÇÃO DOS MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS NOS PRÓXIMOS 80 ANOS (2020 – 2100).....	62
FIGURA 20 - PROJEÇÕES DE PRECIPITAÇÃO DOS MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS NOS PRÓXIMOS 80 ANOS (2020 – 2100).....	64
FIGURA 21 - PROJEÇÕES FUTURAS DOS MCGs, DAS TEMPERATURAS MÁXIMAS ANUAIS MÉDIAS POR ANO NO PERÍODO DE 2020 ATÉ 2100.....	66
FIGURA 22 -: PROJEÇÕES FUTURAS DOS MCGs, DAS TEMPERATURAS MÍNIMAS DIÁRIAS MÉDIAS POR ANO NO PERÍODO DE 2020 ATÉ 2100.....	68
FIGURA 23 - CÁLCULO DE ETo COM AS PROJEÇÕES FUTURAS DE TEMPERATURAS DO MCG UKESM1 NO PERÍODO DE 2020 ATÉ 2100.....	70

FIGURA 24 - CÁLCULO DE ETo COM AS PROJEÇÕES FUTURAS DE TEMPERATURAS DO MCG EC_EARTH3, NO PERÍODO DE 2020 ATÉ 2100	72
FIGURA 25 - CÁLCULO DE ETo COM AS PROJEÇÕES FUTURAS DE TEMPERATURAS DO MCG INM_CM5 PARA O CENÁRIO RCP 8.5, NO PERÍODO DE 2020 ATÉ 2100	73
FIGURA 26 - PROJEÇÕES DE VAZÕES AFLUENTE PARA A UHE FOZ DO AREIA CONSIDERANDO OS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS PROJETADOS PELO MCG IPSL_CM6A, NO PERÍODO DE 2020 ATÉ 2100	76
FIGURA 27- PROJEÇÕES DE VAZÕES AFLUENTE PARA A UHE FOZ DO AREIA CONSIDERANDO OS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS PROJETADOS PELO MCG MIROC6, NO PERÍODO DE 2020 ATÉ 2100	77
FIGURA 28 - PROJEÇÕES DE VAZÕES AFLUENTE PARA A UHE FOZ DO AREIA CONSIDERANDO OS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS PROJETADOS PELO MCG EC_EARTH, NO PERÍODO DE 2020 ATÉ 2100	78
FIGURA 29 – CURVA DE PERMANÊNCIA PARA AS PROJEÇÕES DE VAZÃO DE FOZ DO AREIA ENTRE 2020 E 2100.....	81
FIGURA 30 - PROJEÇÕES DE VAZÕES AFLUENTE MÉDIAS DE TODOS MCG`S PARA OS PERÍODOS ANALISADOS DA USINA FOZ DO AREIA ENTRE 2020 E 2100	83

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - AS 12 MAIORES USINAS HIDRELÉTRICAS, EM POTÊNCIA INSTALADA DO BRASIL.	25
QUADRO 2 - DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO HIDROLÓGICO HYMOD2.	48
QUADRO 3: CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS	53
QUADRO 4 - RESULTADO DOS PARÂMETROS CALIBRADOS DO HYMOD2.	58

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PREVISÃO DAS UNIDADES GERADORAS DE ENERGIA ELÉTRICA LIBERADAS COMERCIALMENTE PARA OS PRÓXIMOS 7 ANOS (MW).	21
TABELA 2 – VAZÕES DE REFERÊNCIA Q90 E Q95 EM M ³ /S, PARA CADA UMA DAS PROJEÇÕES DOS MCG’S, PARA OS SENÁRIOS SSP2-4.5 E SSP5-8.5, NO PERÍODO DE 2020 ATÉ 2100	82
TABELA 3 – RESULTADOS TESTE DE MANN KENDALL PARA AS VAZÕES MÉDIAS ANUAIS PROJETADAS PARA O PERÍODO DE 2020 - 2100.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN –	Balanço Energético Nacional
CLARIS/LPB	A Europe-South America Network for Climate Change
CMIP5 -	Coupled Model Intercomparison Project Phase
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
Cfb	Clima temperado (tipos climáticos de Köppen)
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CGU	Central Geradora Undi-elétrica
CO ₂	Gás carbônico
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
EAR	Capacidade de Energia Armazenada
ENA	Energia Natural Afluente
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EOL	Usina Eólica
ET _o	Evapotranspiração potencial de referência
IAM	Modelo avaliação integrada
IDW	Ponderação do inverso da distância
GCM	General Circulation Model
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GN	Gás Natural
Gw	gigawatts -
HYMOD 2	software utilizado no estudo
IAPAR	Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Changes
Kg/m ³	quilograma por metro cúbico
km ²	quilômetros quadrados
kW	Quilowatt
m/s ²	metro por segundo ao quadrado
m ³ /s	Metro cúbico por segundo
MLT	Média de Longo Termo
mm	milímetros
MME	Ministério de Minas e Energia
MSE	Erro Quadrático Médio
MW	megawatts
NA	Nível de Água
NSE	coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe
ONS	Operador Nacional do Sistema
Patm	Pressão Atmosférica
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PMO	Programa Mensal de Operação
PBE	Erro de polarização de porcentagem.
r	Coeficiente de correlação de Pearson
RCP	Representative Concentration Pathways
RS	Radiação Solar Incidente
SIGA	Sistema de Geração de Informação
SIN	Sistema Interligado Nacional
Tmáx	Temperatura máxima
Tmín	Temperatura Mínima
TS	Temperatura do Bulbo Seco
UG	Unidade Geradora

UFV	Central Geradora Fotovoltaica
UHE	Usina Hidrelétrica
UR	Umidade Relativa do Ar
UTE	Central Geradora Termelétrica
UTN	Usina Termonuclear
WMO	World Meteorological Organization
W/m ²	Watt por metro quadrado
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	18
2.1.	Objetivo Geral.....	18
2.2.	Objetivos Específicos.....	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	Sistema nacional de geração de energia elétrica.....	19
3.2	Geração de energia hidroelétrica no Brasil.....	21
3.3	Mudanças climáticas	26
3.4	Seca meteorológica e hidrológica	29
3.5	Modelagem tipo chuva-vazão	34
3.5.1	O modelo HYMOD2	36
4	MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1	Área de estudo.....	39
4.2	Fonte de dados hidrológicos e meteorológicos da área de estudos.....	43
4.3.	Modelagem hidrológica	47
4.3.1	Métricas de desempenho do modelo hidrológico	50
4.4	Influência das mudanças climáticas.....	52
4.5	Análise das tendências para variação nas vazões da bacia da hidroelétrica Governador Bento M. R. Netto	55
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
5.1	Dados hidrológicos e meteorológicos	57
5.2	Modelagem hidrológica.....	57
5.2.1	Período de Calibração.....	57
5.2.2	Período de Validação.....	59
5.3	Impacto das mudanças climáticas sob ás vazões	61
4.3.2	Análise das projeções de temperatura e evapotranspiração potencial	65
4.3.3	Análise das projeções de vazões.....	74
6	CONCLUSÃO.....	87
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
	APÊNDICE A - Localização Estações pluviométricas e meteorológicas.....	97
	APÊNDICE B - Correlação dos métodos de cálculo para ET_o no período de dados observado da série histórica (2011 – 2019).....	100

APÊNDICE C - Cálculo de ETo com as projeções futuras de Temperaturas dos MCGs, no período de 2020 até 2100, para o cenário SSP2-4.5	102
APÊNDICE D - Cálculo de ETo com as projeções futuras de Temperaturas dos MCGs, no período de 2020 até 2100, para o cenário SSP5-8.5.	106
APÊNDICE E - Projeções futuras das vazões afluentes na UHE Foz do Areia, no período de 2020 até 2100, para o cenário SSP2-4.5	110
APÊNDICE F - Projeções futuras das vazões afluentes na UHE Foz do Areia, no período de 2020 até 2100, para o cenário SSP5-8.5.	114

1 INTRODUÇÃO

Recentemente a ONU lançou o Relatório de Desenvolvimento Mundial da Água, o *World Water Development Report - WWDR (2021)* o qual demonstrou que o consumo de água doce no último século aumentou 6 vezes e continua a avançar a uma taxa de 1% ao ano, em função do crescimento populacional, do desenvolvimento econômico e das alterações nos padrões de consumo. Segundo o mesmo relatório já são 2 bilhões de habitantes no mundo que sofrem com algum problema inerente a falta de água. Além disso se o cenário atual já é preocupante Rockström; Steffen; Noone, (2009) concluíram que a humanidade pode em breve estar se aproximando dos limites do uso global de água doce.

Além do aumento da população e do consumo de água, atualmente o Brasil enfrenta um período de escassez hídrica, onde a falta de chuvas está afetando diretamente a produção de energia elétrica no país. Conforme o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico – CMSE (2010) entre setembro de 2020 e março de 2021, registrou-se a pior afluência no rio Iguaçu nos 91 anos de registros históricos. A energia hidroelétrica é proveniente de uma fonte renovável e não gera emissões significativas dos gases responsáveis pelo efeito estufa na atmosfera. Por exemplo, na China a expansão de obras de hidroeletricidade são um caminho importante para a redução das emissões de gases estufa (CHANG; LIO; ZHOU, 2010). Além disso, a hidroeletricidade é uma das fontes renováveis com maior capacidade instalada para a geração de energia elétrica (SHRESTHA; PAHLOW; COCHRANE, 2020). De acordo com Associação Internacional de Hidroeletricidade, a hidroeletricidade representou 16% de toda a energia na segurança energética, sendo um desafio para os vários países que dependem da hidroeletricidade (OLIVEIRA SERRAO *et al.* 2020). No Brasil, o Sistema Nacional Interligado (SIN) de energia elétrica também possui uma grande dependência pela hidroeletricidade. O Balanço Energético Nacional aponta que 64,9% da geração de energia elétrica no Brasil é proveniente das Usinas Hidroelétricas (UHE) (EPE, 2020). Por isso, se torna fundamental a realização de estudos sobre as vazões de rios e sob a geração de energia hidroelétrica no território brasileiro.

Nesse contexto, os modelos hidrológicos computacionais são uma ferramenta muito útil para a avaliação da capacidade de geração de hidroeletricidade (AL-JUBOORI E GUVEN, 2016; OLIVEIRA SERRAO *et al.* 2020). Esses modelos podem ser usados para simular a influência de mudanças climáticas e/ou de uso e ocupação do solo sob as vazões afluentes às

UHE. Os modelos hidrológicos imitam, de maneira simplificada, os processos hidrológicos de sistemas reais, o sistema pode ser a bacia hidrográfica. Em geral, os modelos podem ser classificados como concentrados e distribuídos. Os modelos concentrados admitem a hipótese de que os parâmetros e as variáveis de entrada e saída são valores médios representativos do sistema (MEIRA NETO, 2013). Os modelos distribuídos consideram que os parâmetros e as variáveis de entrada e de saída podem variar no espaço dentro do sistema.

Alguns estudos têm utilizado o modelo (semi) distribuído *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) (Arnold *et al.* 1998) em aplicações de geração de hidroeletricidade especificamente no Brasil (Oliveira *et al.* 2017; Oliveira Serrão *et al.* 2020) e no mundo (Piman; Cochran; Arias, 2016; Chhuon; Herrera; Nadaoka 2016; Trung *et al.* 2016). Os modelos tipo chuva-vazão (semi) distribuídos, geralmente, possuem muitos parâmetros que não são possíveis de se obter, por causa da falta (ou ausência) de dados de campo. Por isso, Tiezzi *et al.* (2018) usaram o modelo hidrológico concentrado *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP) (Lopes; Braga; Conejo, 1982) para avaliar o impacto das mudanças climáticas sob a geração de hidroeletricidade no Brasil. O modelo hidrológico HYMOD2 (Roy *et al.* 2017) é do tipo chuva-vazão, classificado como concentrado. O HYMOD2 é uma versão atualizada do HYMOD (BOYLE; GUPTA; SOROOSHIAN, 2000). Uma das vantagens do HYMOD2 é a baixa quantidade de parâmetros (9) e variáveis de entrada (2).

No Brasil, faltam estudos sobre modelos hidrológicos calibrados que possam ser usados para previsão de cenários futuros de segurança hidroelétrica. Além disso, deve ser verificada a possibilidade de se utilizar novos modelos concentrados que possuem baixo número de parâmetros e podem facilitar o estudo dos comportamentos hidrológicos de uma bacia.

Juntamente com os métodos inovadores de modelagem hidrológica é essencial que os cenários futuros sejam previstos e que os impactos das mudanças climáticas sejam considerados. Ainda existem poucos estudos que consideram as alterações hidrológicas futuras com a segurança hídrica, a nível de Brasil conforme apontado por Gesualdo *et al.* (2019), Tiezzi (2015) e Fisch; Santos; Silva (2017). Os 3 estudos supracitados concluíram em suas pesquisas que os impactos das mudanças climáticas resultarão em situações futuras de estresse nas bacias estudadas, ou seja, causarão impactos negativos na geração de energia elétrica e na disponibilidade de água para consumo humano.

Com base nesta tendência, de impactos negativos sobre as bacias hidrográficas, registradas nos estudos citados anteriormente, este trabalho tem como objetivo simular os

impactos causados pelas mudanças climáticas que poderão modificar a vazão afluente da UHE Bento Munhoz da Rocha Netto (Foz do Areia). Usina que está instalada sobre o Rio Iguaçu, sendo atualmente a 12ª maior usina do Brasil em potência instalada representando 1,53% de toda a potência instalada em usinas hidroelétricas que fazem parte do SIN.

Trata-se de um estudo inédito nesta bacia de drenagem, onde foram aplicadas metodologias pouco utilizadas nos trabalhos nacionais. Por meio da técnica de extração de dados em arquivos em formato NETCDF4, com auxílio de *software*, utilizando 10 Modelos Climáticos Globais (MCG's) do AR6 *Intergovernmental Panel on Climate Changes* (IPCC) 2021 e dos dois cenários de emissões de gases que provocam o efeito estufa, o SSP2-4.5 e o SSP5-8.5, foram obtidas séries históricas futuras de precipitação e de outras variáveis meteorológicas.

Esses dados foram integrados com o modelo HYMOD 2 para que pudesse ser gerada uma previsão das vazões afluentes na usina Foz do Areia até 2095. A partir destas vazões foram aplicados os testes de Mann-Kendall para analisar as tendências ou as variações das vazões características da bacia a Q_{95} e Q_{90} utilizada para o cálculo da energia assegurada e a \overline{Qm} que é a vazão média anual projetada para os próximos anos. Os resultados obtidos ao final do trabalho fornecem uma visão geral dos impactos das mudanças climáticas na geração de energia elétrica da usina, onde todos eles indicam uma diminuição das vazões características ao longo do tempo, projetando uma diminuição na capacidade geradora de energia elétrica da bacia. Além disso, essa abordagem nos permite indicar as variações a cada período de 30 anos para o futuro, informações que podem ser úteis para orientar os planos de manutenção ou ampliação de Foz do Areia.

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo principal desse estudo é simular o impacto das mudanças climáticas sob à vazão afluente à UHE Bento Munhoz Da Rocha Netto (Foz do Areia).

2.2. Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral foram listados os seguintes objetivos específicos:

- a) Interpolar os dados de altura de precipitação e de evapotranspiração diários na área de estudo;
- b) Modelar, calibrar e validar o modelo hidrológico concentrado do tipo chuva-vazão (HYMOD 2);
- c) Projetar cenários de mudanças climáticas, isto é, mudanças de altura de precipitação e temperatura atmosférica;
- d) Avaliar estatisticamente as tendências de alterações nas vazões mínimas Q_{95} , Q_{90} e \overline{Qm} para cenários futuros.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

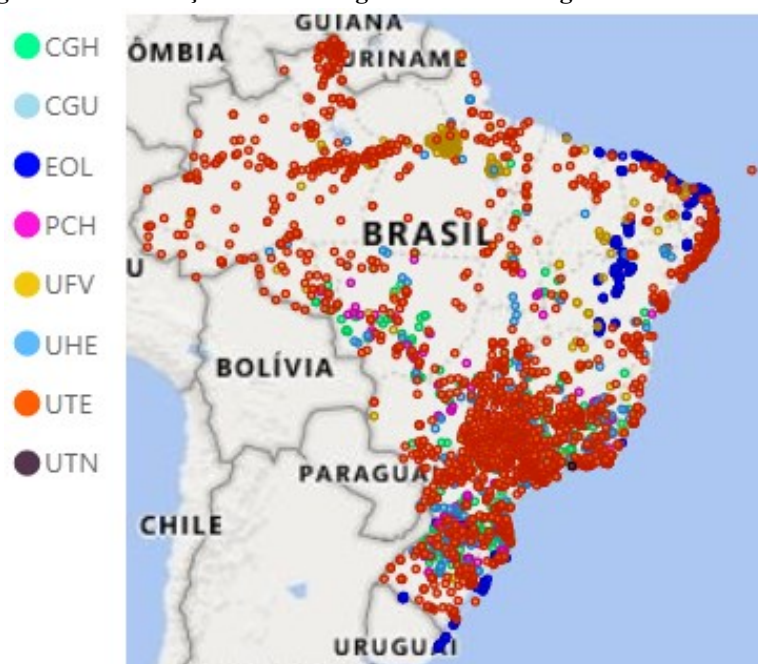
3.1 Sistema nacional de geração de energia elétrica

De acordo com órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de Energia elétrica do Sistema Interligado Nacional - SIN, o Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS (2021) o sistema brasileiro de geração de energia é hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas, onde todos estes sistemas são interligados em uma única rede transmissora denominada SIN. Ainda conforme a entidade as usinas que utilizam fontes de energias renováveis, principalmente as hídricas são responsáveis pela maior parte da produção de energia elétrica sendo que as usinas térmicas, que são instaladas próximos dos grandes centros consumidores de energia, tem um papel estratégico importante, pois garantem a gestão dos estoques de água armazenada nos reservatórios das usinas hidrelétricas, para assegurar atendimento futuro.

De acordo com EPE (2021) as fontes geradoras de energia elétrica no Brasil podem ser divididas em renováveis e não renováveis, onde as renováveis são as principais e se enquadram as fontes hidráulicas, eólicas, solares fotovoltaicos e marítima. As não renováveis são chamadas termelétricas onde a energia elétrica é produzida por meio da combustão de diferentes combustíveis: gás natural, biomassa, carvão mineral, nuclear, óleo combustível entre outros.

Segundo o relatório do Programa Mensal de Operação – PMO emitido pela ONS (2021) as usinas brasileiras geradoras de energia elétrica em 2021 tiveram uma capacidade instalada para produzir 170.175 MW, somando todas as fontes energéticas. As usinas hidrelétricas possuem uma capacidade de produção de 108.650 MW, o que representa 63,9% da capacidade total, as usinas eólicas 18.482 MW (10,9%), solar 3.958 (2,3%), biomassa 14.066 (8,3%), termelétricas movidas a Gás Liquefeito de Petróleo - GLP e Gás Natural – GN 15.079 MW (8,9%), termelétrica movida a óleos 4.273 MW (2,5%) termelétrica movida a carvão 3.017 (1,8%), nuclear 1.990 MW (1,2%) e outras fontes de energia possuem uma capacidade de 640 MW (0,4%). As usinas geradoras de energia elétrica no território brasileiro estão apresentadas na Figura 1.

Figura 1 - Localização das usinas geradoras de energia elétrica no Brasil.



Fonte: ANEEL (2021).

Sendo, CGH (Central Geradora Hidrelétrica), CGU (Central Geradora Undi-elétrica), EOL (Usina Eólica), PCH (Pequena Central Hidrelétrica), UFV (Central Geradora Fotovoltaica), UHE (Usina Hidrelétrica), UTE (Central Geradora Termelétrica) e UTN (Usina Termonuclear).

De acordo com a Figura 1, é possível verificar que na região sul, sudeste e centro oeste do Brasil existe uma concentração maior de usinas geradoras de energia sendo utilizadas todas as variedades de fonte energética, justamente as regiões mais populosas e mais consumidoras de energia elétrica. Já na região nordeste também vale destacar a quantidade de usinas eólicas instaladas sendo a fonte energética principal daquela região já a região norte apesar de não possuir grandes quantidades de usinas geradoras de energia elétrica possui alguns dos maiores empreendimentos hidrelétricos do país.

As regiões que mais produz energia elétrica são as regiões centro-oeste e sudeste, onde juntas no ano de 2020 produziram 37.905 MW de energia elétrica, a região nordeste produziu 11.918 MW, a região norte 9.775 MW e a região Sul 6.934 MW, esse montante utilizando todas as fontes energéticas (ONS, 2021).

Apesar de ser a principal fonte de energia elétrica no Brasil, as hidrelétricas são as que menos tiveram ampliação em seu parque produtivo de energia no ano de 2020, superada pelas

fontes eólicas, solar, biomassa e combustível fóssil (ANEEL, 2021). Essa é uma tendência que provavelmente deverá ser mantida para os próximos anos, conforme a Tabela 1 nos apresenta, a previsão de aumento no parque gerador de energia através da fonte hidráulica é a segunda menor para os próximos 6 anos, sendo superior apenas a energia nuclear.

Tabela 1 - Previsão das unidades geradoras de energia elétrica liberadas comercialmente para os próximos 7 anos (MW).

Origem de Combustível	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2028	Sem previsão	Total
Biomassa	309,80	980,88	320,80	185,02	115,00	374,00		343,77	2629,27
Eólica	1624,96	2121,80	3555,07	221,50	2442,11	1530,15		765,20	12260,79
Fóssil	1538,18	382,75	909,22	2058,35	734,14		157,10	63,18	5842,92
Hidráulica	66,73	348,95	237,53	253,26	227,40	214,29	7,48	767,05	2122,69
Nuclear								1350,00	1350,00
Solar	1304,46	3612,75	6590,10	3197,30	1121,50	8041,00			23867,11
TOTAL	4844,13	7447,13	11612,72	5915,43	4640,15	10159,44	164,58	3289,20	48072,78

Fonte: ANEEL 2021.

Conforme a Tabela 1 para os próximos 7 anos, de 2021 até 2028 a matriz energética brasileira tem previsão de ampliação de 48.072,75 MW, representando um aumento de 30 % na capacidade instalada de geração de energia elétrica. Entre os anos de 2023 e 2026 estão previstas a conclusão de uma quantidade maior de usinas, sendo a maioria delas movidas por combustíveis renováveis, principalmente eólicas e solares.

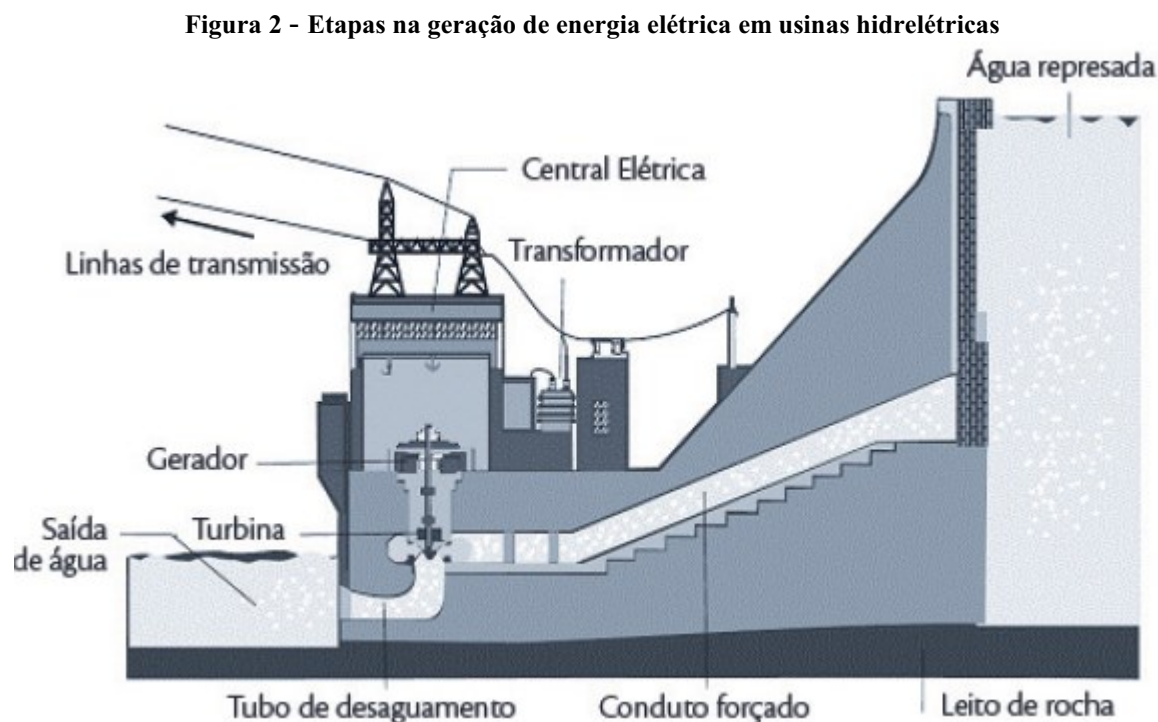
Dentre todas as fontes energéticas destacam-se as previsões de instalação e operação de usinas eólicas que nos próximos anos tendem a dobrar a potência instalada e assumir junto com as usinas hidrelétricas o papel das fontes principais na geração de eletricidade no Brasil.

3.2 Geração de energia hidroelétrica no Brasil

Conforme demonstrado e citado anteriormente a fonte hidráulica é responsável pela maior parte da geração de energia elétrica da matriz energética brasileira. Conforme a Resolução Normativa n. 875, ANEEL (2020) os aproveitamentos hidrelétricos podem ser classificados em 3 diferentes tipos, Central Geradora de Energia (CGE), Pequena Central Hidrelétrica (PCH) e Usina Hidrelétrica (UHE), a primeira CGE, possui capacidade Instalada reduzida, são aqueles

cuja potência seja igual ou inferior a 5.000 kW, a segunda (PCH) possui potência instalada superior a 5.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW e área de reservatório de até 13 km² (treze quilômetros quadrados) e o terceiro tipo de aproveitamento hidroelétrico, classificado como UHE, deve produzir mais do que 5.000 kW.

De acordo com Colnago (2011), o funcionamento de uma usina hidrelétrica é simples aonde a barragem da usina forma um reservatório artificial, a quantidade de água represada é escoada (sob aceleração da gravidade) por meio de tubulações em condutos forçados em direção às turbinas da UHE, os geradores são acionados com o fluxo de água em contato com as turbinas e geram energia elétrica transferida para os transformadores e por fim inseridas no SIN através das linhas de energia, a Figura 2 apresenta um esquema ilustrativo desse processo. A água que é utilizada para movimentar as turbinas é devolvida novamente para o leito do rio a montante da barragem.



Fonte: Colnago, (2011)

Ainda segundo Colnago (2011) a energia potencial da água está relacionada à altura de queda, é a diferença entre o nível do reservatório e o nível do rio a jusante representado pelo canal de fuga, passível de variação conforme as vazões afluentes e defluentes da usina. De

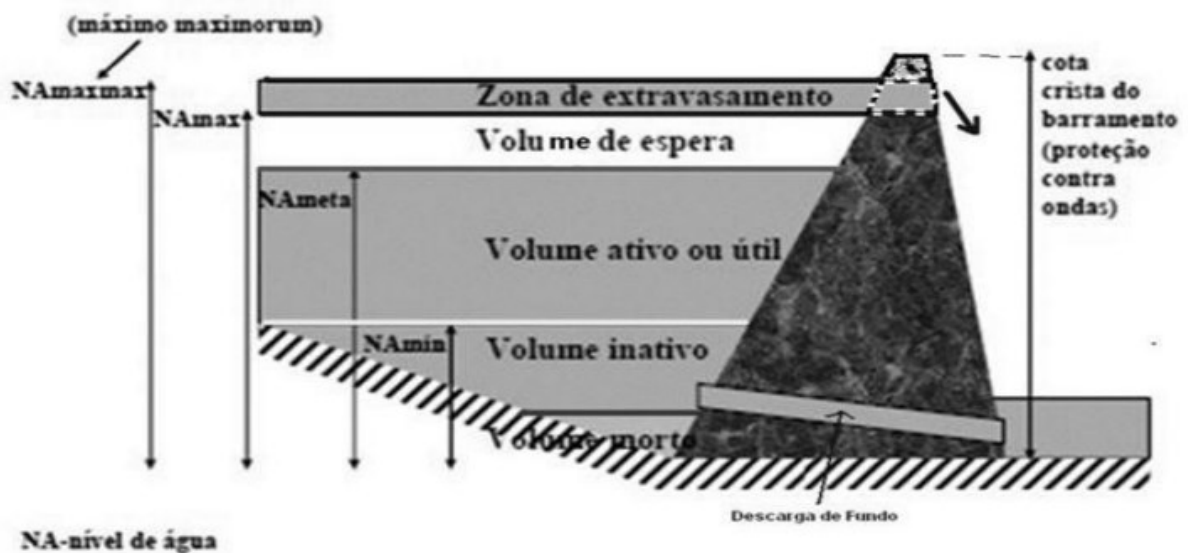
acordo com Abreu (2015) a quantidade de energia elétrica produzida por cada turbina depende dos fatores altura de queda e vazão turbinada, sendo que a potência gerada por uma Unidade Geradora - UG pode ser expressa pela Equação 1.

$$Pot = H_b \cdot Q_t \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \rho \cdot g \quad (1)$$

Sendo, Pot a potência elétrica gerada por uma UG (kW), g a aceleração da gravidade (m/s^2), ρ a massa específica da água (kg/m^3), η_t rendimento da turbina (ad), η_g rendimento do gerador (ad), H_b a queda bruta da UHE (m), Q_t a vazão turbinada (m^3/s). As eficiências apresentadas na equação variam entre 0 e 100% e representam a perda de trabalho durante a transformação da energia potencial e cinética da água em trabalho mecânico de rotação do eixo ao passar pela turbina.

Conforme Uehara (2002) os reservatórios formados pelas barragens no meio do curso natural do rio têm a função de regular a vazão dos rios, onde deve armazenar os excessos de chuvas em períodos chuvosos e compensar as deficiências nos períodos de estiagem, além de formar o volume de água necessário para a geração de energia. A Figura 3 apresenta um esquemático com as cotas importantes de um reservatório.

Figura 3 - Níveis e volumes característicos de um reservatório de uma usina hidroelétrica.



Fonte: Silva e Andrade (2014)

Na Figura 3 são apresentados 5 volumes e 5 níveis característicos do reservatório. Onde o volume morto representa a parte do reservatório inativo ou indisponível para captação de água, delimitado pelo início da tomada d'água ou N_{Amin} . O volume útil, geralmente localizado entre os níveis o início da tomada d'água (N_{Amin}) e o nível máximo do reservatório (N_{Ameta}), é o volume destinado para a geração de energia elétrica. E o volume de espera é utilizado para controlar e regular os períodos chuvosos e de estiagem, fica localizado entre os níveis máximos (N_{Ameta}) e nível mínimo para geração de energia (N_{Amax}). O volume entre os níveis N_{Amax} e $N_{Amaxmax}$ ou maximorum é o nível até onde poderia chegar se o reservatório estivesse na cota máxima e houvesse uma cheia histórica com tempo de recorrência variado, podendo chegar aos 10.000 anos. A cota FB ou bordo livre, localizado entre o nível $N_{Amaxmax}$ e crista da barragem, é destinada a impedir que eventuais ondas formadas pelo vento não ultrapassem a crista da barragem.

Dados do Sistema de Geração de Informação (SIGA) da ANEEL (2021) indicam que atualmente o Brasil possui 1376 empreendimentos geradores de energia elétrica através de fontes hidráulicas em funcionamento sendo destes 733 CGH, 724 PCH e 219 UHE que possuem uma potência outorgada e instalada de 109.325.510,16 kW, ainda assim existem mais 27 empreendimentos em construção e mais 100 em fase de estudos e licenças entre os 3 tipos de usinas. Ainda segundo SIGA (2021) na região sul do país estão instalados 510 empreendimentos hidrelétricos com capacidade instalada de 24.400.263,37 MW 22,32 % do total de energia hidroelétrica produzida no Brasil e no estado do Paraná 117 empreendimentos com capacidade para 15.410.183,71 MW que representam 14,10 % do total produzido. Lembrando que a partir de dezembro/2019 deixou de ser contabilizado o montante referente às compras de Itaipu da energia de 50 Hz do Paraguai, compatível com a publicação do Plano da Operação Energética 2020/2024 - PEN (2020), ou seja como produção brasileira são compatibilizados apenas 7.000 MW de potência instalada, a metade da capacidade de ITAIPU.

Do total de 1369 empreendimentos hidrelétricos instalados no Brasil, foram listados no Quadro 1, as 12 hidrelétricas com maior potência instalada e que segundo os dados da ONS (2021) representam aproximadamente 50 % de toda potência instalada utilizando fontes hídricas.

Quadro 1 - As 12 maiores usinas hidrelétricas, em potência instalada do Brasil.

Nome	Rio	Estado	Potência Instalada (MW)	Ano de operação
Belo Monte	Xingu	Pará	11.233	2016
Tucuruí	Tocantins	Pará	8.535	1984
Itaipu	Paraná	Paraná	7.000	1984
Jirau	Madeira	Rondônia	3750	2013
Santo Antônio	Madeira	Rondônia	3568	2012
Ilha Solteira	Paraná	São Paulo / Minas Gerais	3.444	1973
Xingo	São Francisco	Alagoas / Sergipe	3.162	1994
Paulo Afonso IV	São Francisco	Bahia	2.462	1979
Itumbiara	Paranaíba	Goiás / Minas Gerais	2.082	1980
Teles Pires	Teles Pires	Pará / Mato Grosso	1.919,8	2015
São Simão	Paranaíba	Goiás / Minas Gerais	1.710	1978
Foz do Areia (Gov. Bento Munhoz)	Iguaçu	Paraná	1.676	1980

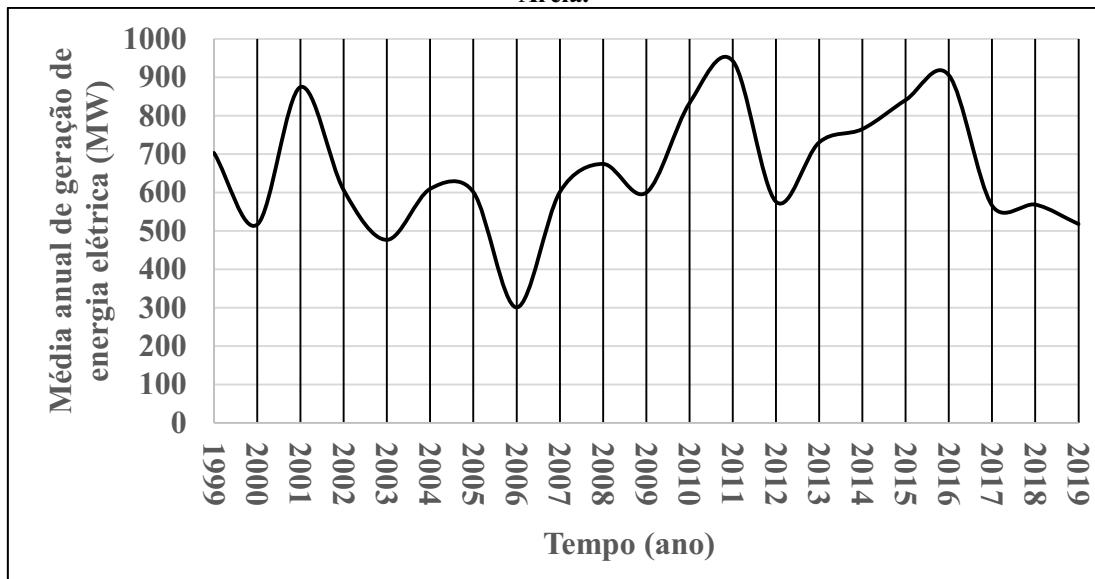
Fonte: Adaptado de ONS (2021).

Apesar de possuírem valores bem representativos através das potências instaladas, poucas vezes a produção diária das hidrelétricas atinge a potência máxima, oscilando diariamente, conforme a vazão afluente que chega até a usina. Quando são analisadas as médias mensais ou até mesmo anuais de produção diária das usinas estas diferenças se afastam ainda mais da potência máxima instalada. Um exemplo disto é o gráfico representado na Figura 4 a qual apresenta as médias anuais, dos últimos 21 anos, de geração de energia elétrica na usina Foz do Areia.

A Figura 4 apresenta as médias de geração de energia elétrica, nos últimos 20 anos, bastante variadas. Talvez por depender do regime de chuvas da bacia ou então por influência do funcionamento e da necessidade de todas as Unidades Geradoras da usina. Nos anos em que houveram médias anuais de aproximadamente 900 MW, a usina produziu 53,89% de sua capacidade de produção diária, é o que se observa nos anos 2001, 2010, 2011, 2015 e 2016. O histórico foi menos favorável ainda nos anos de 2006 e 2020, chegando a valores menores do

que 300 MW médio por ano, o que representa apenas 17,96 % da capacidade total de produção ONS (2021).

Figura 4 - Série temporal (1999 – 2019) de médias anuais de geração de energia elétrica na usina Foz do Areia.



Fonte: Adaptado ONS (2021).

3.3 Mudanças climáticas

De acordo com Angelo e Marengo (2021), o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) foi criado em dezembro de 1988 pela Organização Meteorológica Mundial e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. Trata-se de um comitê composto de centenas de cientistas do mundo inteiro escolhidos pelos governos com a missão de avaliar periodicamente o estado da arte do conhecimento científico sobre as mudanças do clima. Essas avaliações são publicadas periodicamente, na forma dos chamados Relatórios de Avaliação. Os cientistas e os relatórios se distribuem em três grupos de trabalho: o Grupo 1 (WG1), que trata da base física (as causas) das mudanças do clima, o Grupo 2 (WG2), que trata de impactos, vulnerabilidades (as consequências) e adaptação, e o Grupo 3 (WG3), que lida com a mitigação (as soluções).

Em seus 32 anos de existência o IPCC já publicou cinco grandes Relatórios de Avaliação: o FAR em 1990, o SAR em 1995, o TAR em 2001, o AR4 em 2007 e o AR5 entre 2013 e 2014, além de uma série de relatórios especiais e outros documentos.

Segundo o IPCC (2021) o sexto relatório, o AR6 começou a ser publicado em 2021. O objetivo principal do IPCC é informar políticas públicas para combater a mudança do clima, cada relatório de avaliação tem um sumário executivo para tomadores de decisão, conhecidos pela sigla SPM (“*Summary for Policymakers*”). Os sumários são documentos dirigidos para políticos e tomadores de decisões, que resumem as principais conclusões técnicas dos relatórios. Até o momento o único documento lançado é o SPM do Grupo 1 do AR6. Os sumários dos demais grupos serão publicados ainda este ano.

O IPCC-AR6 de 2021 apresenta uma nova série de cenários de emissões, o CMIP6 (sigla em inglês para “Projeto de Inter comparação de Modelos Climáticos Versão 6) projeta cinco cenários possíveis até o ano de 2100, dois de baixas emissões (SSP1-1.9 e SSP1-2.6), um de médias emissões (SSP2-4.5) e dois de altas emissões (SSP3-7 e SSP5-8.5). A Figura 5 resume as projeções de aumento de temperatura dos 5 cenários ao longo dos próximos 80 anos.

Figura 5 - Representação do aumento de temperatura média no planeta terra até o ano de 2100.

Cenário	Curto prazo (2021-2040)		Médio prazo (2041-2060)		Longo prazo (2081-2100)	
	Estimativa central	Variação muito provável	Estimativa central	Variação muito provável	Estimativa central	Variação muito provável
SSP1-1.9	1,5	1,2 a 1,7	1,6	1,2 a 2	1,4	1 a 1,8
SSP1-2.6	1,5	1,2 a 1,8	1,7	1,3 a 2,2	1,8	1,3 a 2,4
SSP2-4.5	1,5	1,2 a 1,8	2	1,6 a 2,5	2,7	2,1 a 3,5
SSP3-7	1,5	1,2 a 1,8	2,1	1,7 a 2,6	3,6	2,8 a 4,6
SSP5-8.5	1,6	1,3 a 1,9	2,4	1,9 a 3	4,4	3,3 a 5,7

Fonte: Angelo e Marengo (2021).

Na Figura 5, nota-se que a temperatura global em 2081-2100 provavelmente será 1 °C a 1,8 °C mais alta do que entre 1850 e 1900 no melhor cenário de emissões e de 3,3 °C a 5,7 °C mais alta no pior cenário. Até mesmo o cenário mais otimista (SSP1-1.9) apresenta uma elevação de temperatura em aproximadamente 1,5°C até o fim do ano de 2040, o que segundo Angelo e Marengo (2021) seria o limite mais ambicioso de elevação de temperatura até o ano de 2100, firmado pelos países no acordo de Paris. O IPCC (2021) alerta que as consequências para esses aumentos de temperaturas, são o aumento da frequência de desastres naturais, como terremotos, tufões, furacões e eventos climáticos de seca e de chuvas intensas.

Por se tratar de uma publicação recente, existem poucos trabalhos publicados considerando os valores do AR6, a maioria dos trabalhos científicos publicados até o momento

utilizam como referência os dados obtidos no AR5, no qual apresentava a classificação dos cenários futuros através da sigla RCPs.

Os RCPs foram desenvolvidos a partir de modelos de avaliação integrada (IAM). As projeções dos RCPs fazem parte do conjunto de simulações do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 - CMIP5*. Para cada cenário criou-se um conjunto de dados de síntese a partir de estudos representativos, desta forma cada RCP prevê uns conjuntos de dados por meio de suas características específicas, sendo elas mudanças no uso da terra e de emissões de poluentes do ar, as concentrações anuais de gases de efeito estufa e as emissões antropogênicas até o ano 2100 (TAYLOR; STOUFFER; MEEHL, 2012; BURKETT, 2014).

Amorin; Souza; Chaffe (2019) fizeram uma revisão bibliográfica de estudos realizados no Brasil envolvendo a variabilidade climática e suas consequências. Segundo esses autores, estudos envolvendo os impactos das mudanças climáticas estão aumentando consideravelmente no Brasil, segundo os mesmos autores até 2018 existiam apenas 42 artigos publicados em periódicos que consideravam os impactos climáticos e nestes artigos os setores mais pesquisados são os de energia elétrica e abastecimento de água, sendo que, do total de artigos encontrados, 28 foram realizados dentro da bacia de drenagem do rio Paraná. Apesar de ser a região mais pesquisada ainda assim é pequena a quantidade de estudos comparados com a grande importância do assunto, pois além da pouca quantidade de artigos, as metodologias aplicadas são variadas e ainda assim alguns destes estudos não utilizam modelagem hidrológica, ou modelos de Circulação Geral (*General Circulation Models - GCMs*) fornecidos pelo IPCC.

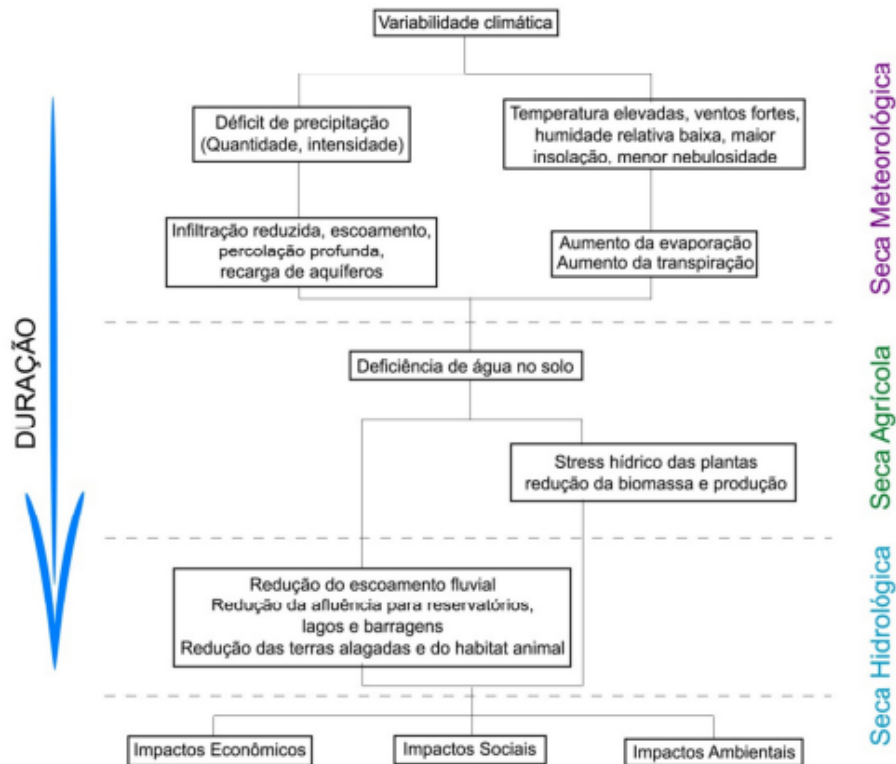
Após o ano 2018 outros trabalhos utilizando os relatórios do IPCC foram publicados, Gesualdo *et al.* (2019) verificaram a influência das mudanças climáticas sob o sistema de abastecimento público de água potável de São Paulo. Nesse estudo foram utilizados 17 Modelos Climáticos Globais (MCG's) forçados por dois níveis de emissões (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) e fazendo a modelagem hidrológica usando o modelo HYMOD (BOYLE; GUPTA; SOROOSHIAN, 2000). Os resultados indicaram que futuramente os períodos de seca tendem a se estender por mais meses no ano, aumentando o período crítico no abastecimento de São Paulo (GESUALDO *et al.* 2019). Jong *et al.* (2018) verificaram em seu estudo que o aquecimento global e as mudanças climáticas irão diminuir, na próxima década de 25 a 50 %, dependendo do cenário de emissão de CO₂, a precipitação média anual na bacia do Rio São Francisco no nordeste brasileiro. Tiezzi (2015) concluiu que as mudanças climáticas irão causar uma redução de aproximadamente 15 % na Energia Natural Afluente (ENA) das hidrelétricas brasileiras.

3.4 Seca meteorológica e hidrológica

De acordo com Wilhite e Glantz (1985), existem 4 tipos de secas: meteorológica, agrícola, hidrológica e socioeconômica. Segundo esses autores, a seca meteorológica é definida como sendo um período de dias com precipitação inferior a uma quantidade mínima necessária para o ser humano. A seca agrícola é afetada pelas alterações oriundas da seca meteorológica, por exemplo a falta de chuvas pode diminuir a umidade do solo e prejudicar os cultivos da agricultura. A seca hidrológica é caracterizada pela falta de escoamento superficial nos rios e diminuição do nível de águas subterrâneas. A seca socioeconômica acontece quando a demanda de algum determinado produto é afetado pela falta de produção, ocasionada pela seca agrícola ou hidrológica.

A Figura 6 resume a definição dos quatro tipos de secas existentes, aonde com o passar do tempo os transtornos causados pela seca meteorológica, como por exemplo, falta de chuva ou aumento das temperaturas vai desencadeando as secas agrícolas e hidrológicas onde pôr fim afetam a população final através de impactos socioeconômicos.

Figura 6 - Sequência temporal das secas



Fonte: adaptado *National Drought Mitigation Center – NDMC (2021)*

Melo e Sousa (2016) quantificaram as ligações entre secas meteorológicas e hidrológicas com base em dados de sensoriamento remoto, modelagem e monitoramento usando a bacia do rio Paraná no sudeste do Brasil como um estudo de caso, em seu estudo foi constatado que a região sofreu duas grandes secas meteorológicas em 2000 e 2014, onde as precipitações estavam em até 50% abaixo das médias de longo prazo, durante o período das secas meteorológicas a umidade do solo também diminuiu gerando seca agrícola e dificultando o escoamento para os reservatórios, gerando as secas hidrológicas que também foram bastante presentes, obtendo uma diminuição de até 30 % em relação a sua capacidade média de produção de energia elétrica.

Jesus et al. (2020) também perceberam que a seca meteorológica possui influência sobre a hidrológica em escala anual e sazonal, exceto no inverno, em que a baixa pluviosidade na bacia do rio doce não influenciou a vazão. Junqueira (2019) afirmou ser possível verificar uma forte influência da seca meteorológica sobre a hidrológica, tanto em escala anual como na trimestral, a correlação de Pearson realizada entre as duas secas no período de primavera, outono e verão apresentou valores representativos acima com r acima de 0,6 a única estação do ano que não teve uma correlação foi o inverno.

Além das secas meteorológicas enfrentadas no ano de 2000 e 2014 conforme citado por Melo e Sousa (2016), a bacia do rio Paraná, atualmente enfrenta a pior seca meteorológica dos últimos 111 anos, segundo Brasil (2021) pela primeira vez na história cogita-se a possibilidade de emitir um alerta hídrico para os estados de São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Paraná. Segundo COPEL (2021) o Rio Iguaçu que é um dos afluentes do rio Paraná está “doente” e nunca esteve tão vulnerável as variações pluviométricas, é o segundo ano seguido em que se registram os piores índices nível de água no rio Iguaçu, o motivo seria a falta de chuvas e a retenção água das hidrelétricas na bacia para garantir alguma reserva para conseguir gerar energia elétrica nos próximos meses.

No ano de 2021 o estado do Paraná sofreu vários impactos sociais e econômicos, apresentando problemas no abastecimento de água e principalmente na geração de energia, estando no último nível apresentado na Figura 6. A ANEEL aprovou em julho de 2021 um aumento de 52 % na tarifa da bandeira vermelha (horário crítico na produção de energia elétrica) e de mais de 100 % na tarifa da bandeira amarela. Esse aumento acontece justamente em um momento em que as pessoas ficam mais tempo em casa (COVID -19), gastam mais energia elétrica e o motivo do aumento é o acionamento das usinas termoeletricas para garantir o fornecimento de energia ANEEL (2021).

3.4.1 Os efeitos dos fenômenos El Niño e La Niña no regime de chuvas do sul do Brasil e sua relação com as mudanças climáticas

As mudanças climáticas e a oscilação dos eventos extremos (inferior e superior) têm apresentado efeitos adversos no Brasil durante os últimos anos. Na região Sul do Brasil, Marengo *et al.* (2009) identificaram aumento com certa sistematicidade das precipitações desde os anos de 1950 e, no Sudeste verificaram que as frequências dos eventos pluviais extremos têm aumentado. Entretanto, nos últimos anos (2018 a 2022), as condições adversas se invertem, ocasionando estiagens severas nessas regiões citadas. Em grande parte desses eventos extremos, estão associadas as anomalias de temperatura superficial das águas do Oceano Pacífico.

Os fenômenos climáticos El Niño e La Niña são processo naturais que ocorrem nas águas do Oceano Pacífico e que exercem grande influência nos países sul-americanos e em especial no Brasil. Deve se observar que embora estes processos ocorram naturalmente, os mesmos podem sofrer interferência das atividades humanas (atividades econômicas). O El Niño Oscilação Sul (ENOS), é um processo vinculado às anomalias nos ventos alísios e nas temperaturas da superfície oceano pacífico (GRIMM; FERAZ; GOMES, 1998). O fenômeno ENOS tem duas fases: fase quente (positiva) e a fase fria (negativa).

Avaliando a região de ocorrência desse fenômeno, observa-se que entre a Austrália e a América do Sul com temperatura do mar apresentando valores entre 3°C e 8°C mais próximo à Austrália. Este gradiente de temperatura promove um gradiente de pressão atmosférica (diferença de pressão) que provoca um deslocamento das massas de ar (ventos) de leste que acabam transportando as águas superficiais do oceano pacífico no sentido do território australiano. Há também um intenso movimento de correntes de convecção sobre as regiões de águas aquecidas e em decorrência disso, um aumento das chuvas localizadas. As águas próximas à América do Sul - com temperaturas menores - não são capazes de produzir correntes de convecção significativa e isso acarreta nos longos períodos sem chuvas expressivas.

Quando ocorre um aquecimento das águas superficiais do oceano pacífico, denomina-se fase quente (positiva) e/ou El Niño e sempre vem acompanhado de uma diminuição da pressão atmosférica na região leste do Pacífico. Entretanto, um resfriamento pode ocorrer nas águas superficiais e caso ocorra o fenômeno é denominado de fase fria (negativa) La Niña. E a fase fria ou negativa é chamada de La Niña. Em termos práticos, esses fenômenos produzirão efeitos

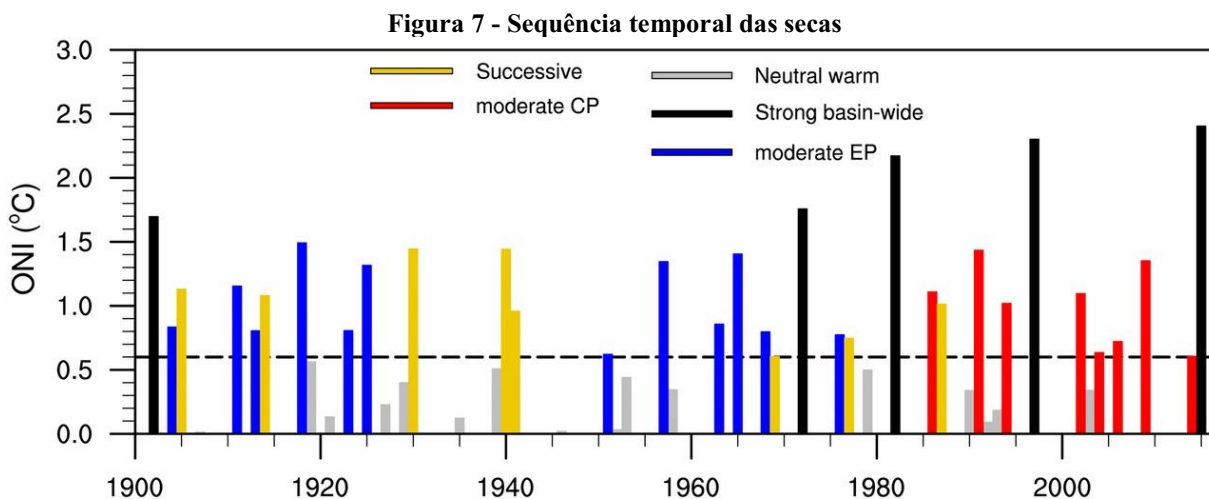
opostos quando das suas ocorrências e dependendo da sua localidade. Em geral no sul do Brasil, o El Niño traz chuvas acima da média e La Niña chuvas abaixo da média histórica registrada.

Em um estudo realizado sobre índice de precipitação padronizada na região norte do estado do Paraná, Terassi et. al. (2018) relataram que os eventos mais intensos de El Niño e La Niña influenciaram a variabilidade anual das chuvas. Os eventos de El Niño de 1976, 1982, 1983, 1987, 1992, 1997, 1998, 2009 influenciaram para determinar anos de chuva superior à normal climatológica, enquanto os eventos de La Niña de 1985 e 1988 coincidiram com a redução das chuvas. Para os mesmos autores, uma verificação dos dados em anos de ocorrência de El Niño e La Niña não correspondem necessariamente em anomalias positivas ou negativas de chuva na região de estudo.

De acordo com Santos; Filho; Brito, (2010), a ocorrência de um evento tanto de El Niño quanto de La Niña tem um comportamento de se alternar a cada 3 a 7 anos, com potencialidade de haver um intervalo de 10 anos e também intercalar períodos com condições normais (temperaturas das águas superficiais igual a média histórica), ou seja, de estabilidade oceânica, não ocorrendo anomalias em função do aquecimento e resfriamento das águas superficiais da região.

No caso de La Niña, os eventos da mesma forma podem apresentar frequências de 2 a 7 anos, no entanto com menor ocorrência e períodos de aproximadamente 9 a 12 meses e somente alguns episódios persistem por mais que 2 anos (SANTOS; FILHO; BRITO, 2010).

Na Figura 7 são apresentados os resultados de um estudo realizado por Wang. *et al.* (2019) onde foram examinados detalhadamente 33 eventos de fenômeno El Niño entre os anos de 1901 a 2017 e analisado para cada evento o local de início do aquecimento, sua evolução e sua força máxima. Algumas características foram percebidas e agrupadas em qualidades comuns dos eventos, permitindo identificar quatro padrões de El Niño, cada um com tipos diferentes de início e fortalecimento.



Fonte: Wang. *et al.* (2019).

A partir da série histórica, Wang. *et al.* (2019) descobriu uma alteração de comportamento a partir do final da década de 1970, onde praticamente todos os eventos tiveram início na região mais a leste do oceano antes desse período. Após o fim da década de 1970 todos os eventos tiveram início na porção centro-oeste do mesmo oceano, corroborando com a ideia de que as alterações dos padrões climáticos globais têm modificado também o local de formação do fenômeno El Niño.

Nas simulações geradas a partir de modelos matemáticos climatológicos a nível global, evidenciam que as mudanças nos padrões climáticos são influenciadas por condições antrópicas antropogênicas e os padrões futuros desses eventos extremos como El Niño serão mais frequentes e trarão consequências sérias para as atividades sociais e econômicas (WANG. *et al.* 2019).

Os intensos fenômenos de El Niño promoveram estiagens muito severas em algumas ilhas do oceano Pacífico na sua porção mais oeste e também na Austrália, promovendo como consequências vários incêndios em regiões florestais e comprometimento das produções agrícolas, causando fome em locais menos assistidos socioeconomicamente, e enchentes, inundações e alagamentos causados por chuvas intensas em algumas localidades da América do Sul. Em relação ao aumento das temperaturas das águas do Pacífico causaram também efeitos adversos nas atividades pesqueiras e deterioração ambiental em recifes de corais em vários locais do planeta (WANG. *et al.* 2019).

3.5 Modelagem tipo chuva-vazão

Nas últimas décadas surgiram vários modelos hidrológicos conceituais que representam os complexos processos hidrológicos. Estes modelos são cada vez mais utilizados devido a sua praticidade e relativa simplicidade de implementação em bacias hidrográficas, sendo uma complementação ao processo de monitoramento das variáveis hidrológicas (SINGH e BÁRDOSSY, 2015).

Os modelos matemáticos são simplificações da realidade e para representar bem um processo físico, como chuva e a vazão, necessitam dados de entrada, ou seja, valores já observados no local que servem como base para o processamento da modelagem.

Conforme Rennó, (2004) um modelo hidrológico pode ser definido como uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície e/ou subsuperfície terrestre. Tucci (1998) estabelece que modelo hidrológico é uma ferramenta utilizada para representar os processos que ocorrem na bacia hidrográfica prevendo as consequências geradas com as alterações das variáveis hidro climáticas, Precipitação, Vazão e Evapotranspiração e também físicas do local de estudo, como por exemplo, uso do solo, declividades e infiltração.

Para Santos (2009), no estudo da modelagem hidrológica se faz necessário um estudo aprofundado sobre todos os processos físicos que acontecem durante um evento de precipitação em uma bacia hidrográfica, ou seja, se faz necessário entender o funcionamento do fluxo hidrológico de uma bacia, sabendo precisar a quantidade de entrada e saídas de água, bem como os deslocamentos dentro da bacia através do escoamentos superficial ou de base até chegar ao leito do rio e se transformar na vazão de saída das bacias, todos esses processos são representados através de métodos matemáticos.

São vários os modelos hidrológicos utilizados para simular os comportamentos das bacias hidrográficas, por isso para que um modelo seja utilizado da forma correta é de fundamental importância o conhecimento da estrutura deste modelo e de suas limitações. Os modelos hidrológicos são ferramentas computacionais que utilizam métodos matemáticos e que dependem de uma série de parâmetros relacionados as características da bacia. Por este motivo muitos deles necessitam de calibrações das variáveis da bacia para que possam representar o mais fidedignamente possível os fenômenos envolvidos na transformação da chuva em vazão na área de estudos (SANTOS, 2009).

De acordo com Meira Neto (2013) os modelos hidrológicos podem ser classificados em três conceitos diferentes, estocástico ou determinístico, concentrado ou distribuído, contínuo ou baseado em evento. Tucci (1987) define que o modelo é estocástico quando a chance de ocorrência das variáveis for levada em consideração com a introdução do conceito de probabilidade na formulação do modelo. Quando para uma mesma entrada, o modelo produz uma mesma saída (com condições iniciais iguais) o modelo é classificado como determinístico, ou seja, não levam em consideração a aleatoriedade das respostas.

Meira Neto (2013) classifica que os modelos baseados em eventos produzem saídas para períodos de tempo pré-definido, enquanto modelos contínuos simulam de forma contínua os fenômenos que ocorrem na bacia. Os modelos concentrados admitem a hipótese de que os parâmetros e as variáveis de entrada e saída são valores médios representativos do sistema e os modelos distribuídos consideram que os parâmetros e as variáveis de entrada e de saída podem alternar no espaço dentro do sistema (MEIRA NETO, 2013).

Uma etapa fundamental na aplicação desses modelos é a necessidade de estimar alguns parâmetros, utilizando de dados observados em campo para calibração/validação do modelo para futura utilização para fins práticos (previsão de cenários futuros e/ou pregressos) (SINGH e BÁRDOSSY, 2015).

Singh e Bárdossy (2015) comentam que uma das maneiras de se estimar esses parâmetros é o ajustamento dos mesmos a partir de meios numéricos, de tal forma que os valores de resposta se aproximem o máximo possível dos valores observados em campo e consequentemente representando os processos físicos que ocorrem na bacia hidrográfica.

Geralmente são utilizados dois tipos de calibração para os modelos: calibração manual ou calibração automática. A calibração manual depende exclusivamente do conhecimento profundo do pesquisador, normalmente trabalhosa e difícil de executar para situações complexas de calibração. O grau de dificuldade está vinculado às extensas séries temporais que geram um grande volume de dados o que torna o processo inviável para a maioria dos modelos hidrológicos. Já a calibração automática, utiliza-se da habilidade e da capacidade de adoção de processos programados sistematicamente (velocidade e capacidade do computador), sendo adotado em situações mais complexas de calibração dos modelos (SINGH e BÁRDOSSY, 2015).

Diversos modelos hidrológicos têm sido desenvolvidos na forma concentrada, (semi) distribuída e distribuída, e aplicados na simulação em diversas bacias hidrográficas com as mais

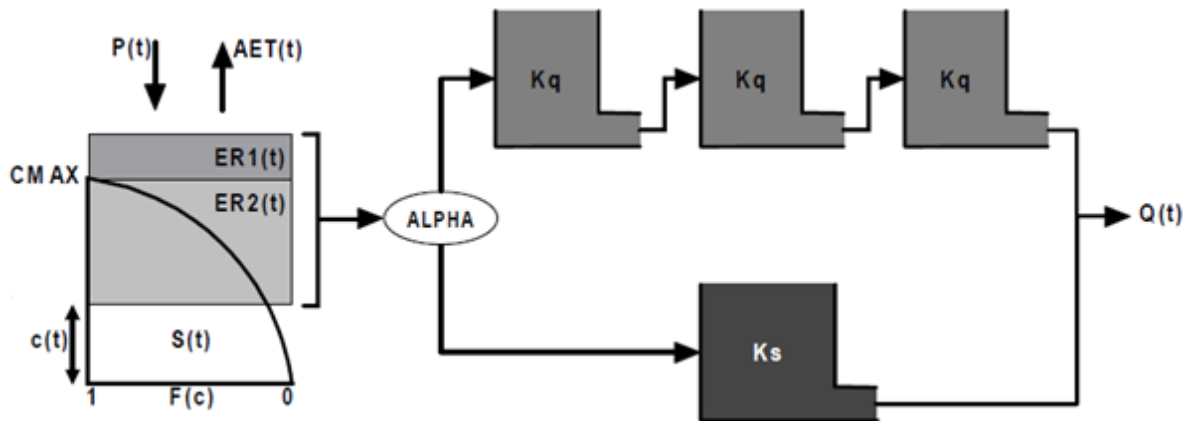
variadas finalidades. O modelo (semi) distribuído *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) (Arnold *et al.* 1998) por exemplo, tem aplicações de geração de hidroeletricidade especificamente no Brasil (Oliveira *et al.* 2017; Oliveira Serrão, 2020) e no mundo (Piman; Cochran; Arias, 2016; Chhuon; Herrera; Nadaoka, 2016; Trung *et al.* 2016). Os modelos tipo chuva-vazão (semi) distribuídos, geralmente, possuem muitos parâmetros que não são possíveis de se obter, por causa da falta (ou ausência) de dados de campo. Por isso, Tiezzi *et al.* (2018) usaram o modelo hidrológico concentrado *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP) (Lopes; Braga; Conejo, 1982) para avaliar o impacto das mudanças climáticas sob a geração de hidroeletricidade no Brasil.

Também caracterizado como modelo hidrológico concentrado, o HYMOD2 (Roy *et al.* 2017) é do tipo chuva-vazão, trata-se de uma versão recente e ainda pouco aplicado em estudos de bacias hidrográficas e apresenta uma baixa quantidade de parâmetros (9) e variáveis de entrada (2) o HYMOD2 será utilizado para modelar a bacia de estudo neste trabalho.

3.5.1 O modelo HYMOD2

O HYMOD2 (Roy *et al.* 2017) é uma versão atualizada do HYMOD (Boyle; Gupta; Sorooshian, 2000), os dois modelos hidrológicos são concentrados e simulam a vazão em escala diária, usando um baixo número de parâmetros e dados de entrada. São modeladores hidrológicos escritos em linguagem Matlab®. O processo de geração de escoamento é descrito por um modelo simples de excesso de chuva baseado no princípio de distribuição de probabilidade (Moore, 1985). A Figura 8 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra o esquema de funcionamento do HYMOD.

Figura 8 - Descrição esquemática HYMOD



Fonte: Wagener *et al.* (2001)

O HYMOD é um modelo de “precipitação excedente” aplicado ao sistema (e.g. a bacia hidrográfica), cujos dados de entrada são a precipitação, representada por $P(t)$ e a ET_o definida na como $AET(t)$.

Nesse modelo, o volume de água que atinge a superfície do solo é particionado em precipitação efetiva representado por $ER1(t)$ e $ER2(t)$, distribuição de capacidade de armazenamento do solo o $F(c)$ e ET_o . Essa partição de componentes hidrológicas é feita usando a concepção de reservatório (não linear).

Uma parte do volume de precipitação pode estar disponível na forma de umidade do solo $C(t)$ e infiltrado dentro do primeiro tanque, o qual representa a capacidade de absorção do solo “*storage capacity*”, enquanto o “excedente de precipitação” ($ER1(t)$ e $ER2(t)$) pode ser direcionado para outros dois reservatórios. A divisão do excedente de chuvas para os próximos dois reservatórios é realizada através do parâmetro α (alpha) o qual representa a porcentagem de água destinada a cada um dos reservatórios. O reservatório (de escoamento rápido) é caracterizado pelo escoamento superficial e recebe a porcentagem igual ao parâmetro α e o reservatório do escoamento lento que representa o valor do escoamento de base recebe a porcentagem de $1-\alpha$. O reservatório do escoamento lento é do tipo linear.

Dentro dos tanques de escoamento rápido e do tanque de escoamento de base os parâmetros Kq e Ks representam o tempo de residência em cada um dos tanques respectivamente. A propagação do escoamento superficial é feita usando uma sequência de reservatórios em séries (Cascata de Nash). A variável $Q(t)$ representa o fluxo resultante em função do tempo t . (WAGENER *et al.* 2001)

O HYMOD foi utilizado recentemente em estudos internacionais, Wagener *et al.* (2001) onde aplicaram o modelador hidrológico em um estudo global, Gharari *et al.* (2013) em

Luxemburgo, Gong *et al.* (2013) nos Estados Unidos e China e Parra; Fuentes-Aguilera; Muñoz (2018) na região centro sul do Chile, todos os trabalhos tiveram bons resultados e conseguiram calibrar as bacias hidrográficas estudadas. Recentemente, no Brasil com o foco em avaliar a segurança hídrica do Sistema Cantareira, na Região Metropolitana de São Paulo.

Gesualdo *et al.* (2019) também utilizaram o HYMOD para modelar a bacia do Rio Jaguari, principal bacia que abastece o Sistema Cantareira. Após calibração do modelo e considerando os impactos que as mudanças climáticas podem causar na região, concluíram que existe a possibilidade de um aumento dos riscos de inundações e secas na região estudada para os próximos 80 anos.

A versão criada por Roy *et al.* (2017), HYMOD2, até o momento foi pouco aplicada, porém, segue os mesmos conceitos do HYMOD. Em seu trabalho Roy *et al.* (2017) investigaram o uso de dados, oriundos do satélite *Global Land Evaporation Amsterdam Model* (GLEAM), para melhorar o desempenho do HYMOD e gerar simulações de fluxo mais precisas para uma bacia na África.

De acordo com Martens *et al.* (2015) o GLEAM possui uma resolução de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ e estima a evapotranspiração real terrestre com base em observações diárias de satélite de variáveis meteorológicas, características da vegetação e umidade do solo.

Roy *et al.* (2017) testaram 4 casos diferentes, alterando os valores de saída da ET_0 no HYMOD, essas alterações foram denominadas de função K que atua como uma resistência ao fluxo de ET_0 do modelo. Os resultados dos 4 casos foram comparados com os valores da evapotranspiração real obtida através do satélite GLEAM e ao final do estudo o caso que mais se aproximou dos valores do satélite foi implementado ao HYMOD. Essa alteração estrutural implicou na criação do HYMOD 2.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse estudo foi dividido em três etapas: primeiramente, através de dados hidro meteorológicos históricos realizou-se a simulação hidrológica tipo chuva-vazão no ponto de jusante (usina Foz do Areia). Este modelo foi calibrado e avaliado com base em dados hidro meteorológicos históricos diários de 1999 a 2019 na Bacia de drenagem da usina Foz do Areia dentro Rio Iguaçu. No segundo módulo, a simulação hidrológica foi realizada para três períodos até o final do século XXI (2011-2040; 2041-2070; 2071-2100) usando um conjunto de 10 MCGs forçados por dois níveis de emissões (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) retirados do relatório AR 6 do IPCC (2021).

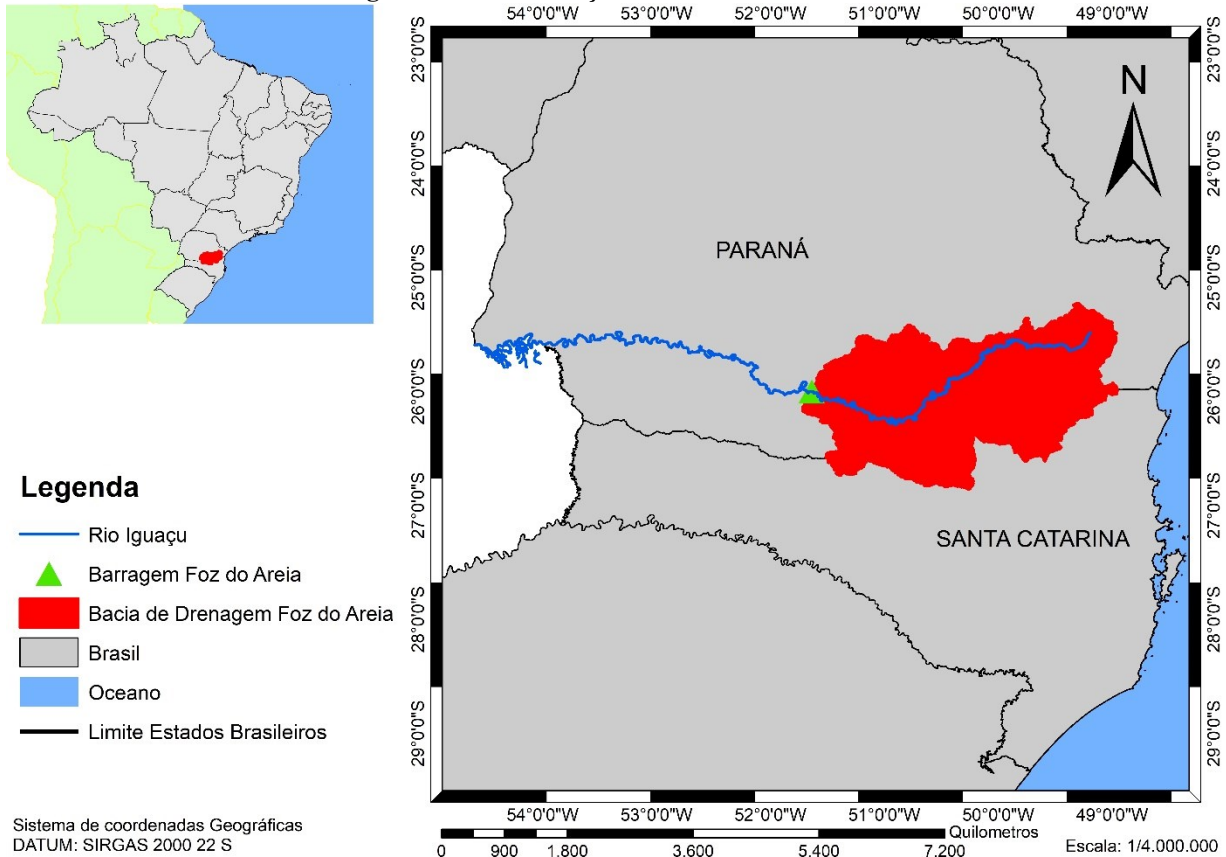
Na terceira etapa realizou-se avaliação dos impactos causados nas projeções de algumas vazões importantes para a geração de energia elétrica da usina, Q_{90} , Q_{95} e \overline{Qm} , levando em conta as mudanças futuras de precipitação e evapotranspiração. E por fim através do teste Mann-Kendall foi possível estimar qual a tendência de alteração das vazões afluentes futuras da UHE Foz do Areia.

4.1 Área de estudo

A área de estudo possui 29.880,00 km² e é denominada como a bacia de drenagem da usina Hidroelétrica - UHE Bento Munhoz da Rocha Netto (Foz do Areia), a usina foi considerada o exutório da bacia. A área de estudo está localizada no município de Pinhão – Paraná, entre as coordenadas de Latitude -26,00° e Longitude -51,66°, a uma altitude de 742 metros, distante aproximadamente 240 km da capital do estado do Paraná, Curitiba (Figura 9). A área total de drenagem abrange a região sudeste do Paraná e também a região nordeste do estado de Santa Catarina.

A área de estudo pertence a sub-bacia do Rio Iguaçu, mais precisamente na região do Alto Iguaçu, desde a sua nascente até o barramento de Foz do Areia, o qual é um importante afluente do Rio Paraná, na região Sul do Brasil. Ao todo a sub-bacia do Rio Iguaçu possui 11 usinas hidrelétricas instaladas, sendo seis delas instaladas no curso do próprio rio e outras cinco instaladas em seus afluentes. A UHE Foz do Areia está localizada a montante do Rio Iguaçu, sendo a primeira UHE no mesmo, em termos de localização e por este motivo não sofre influência no nível de água no reservatório com o fechamento e abertura de outras usinas.

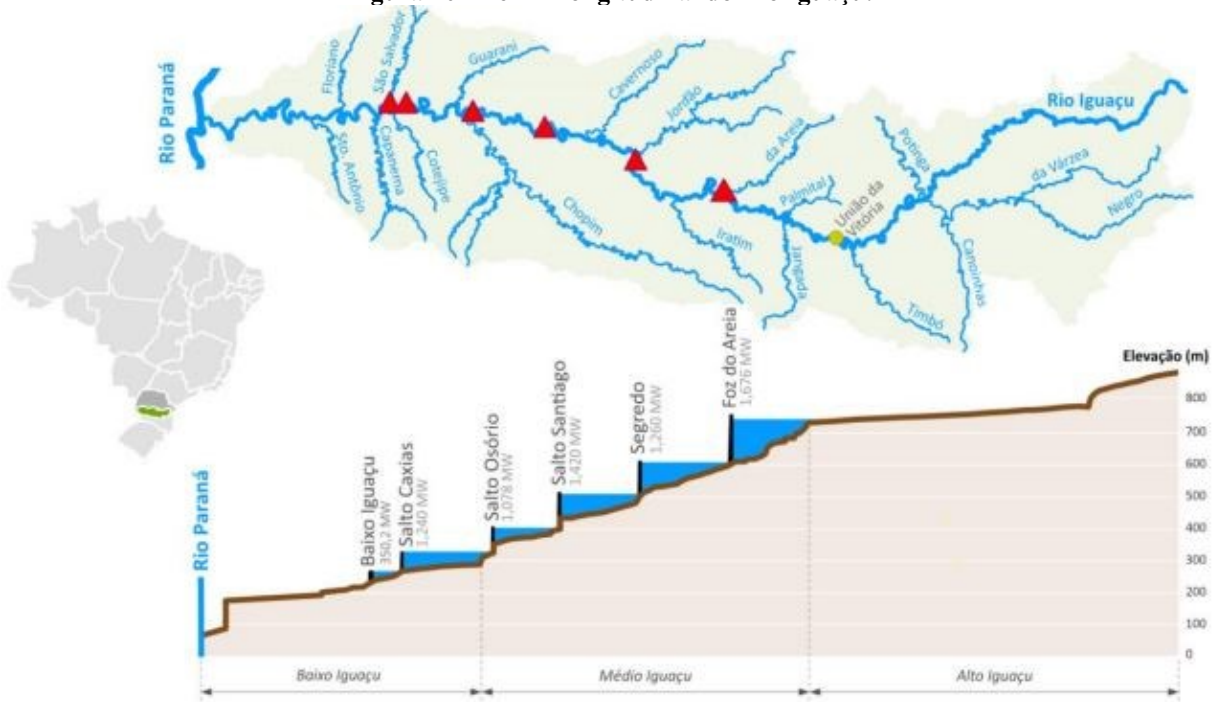
Figura 9 - Localização da área de estudo.



Fonte: O autor (2021).

Além de ser o primeiro barramento sobre o Rio Iguaçu (Figura 10) também é a que possui a maior capacidade de geração de energia instalada dentro da bacia do Rio Iguaçu, com uma capacidade de geração de energia de 1.676 MW de potência, tornando-a 12^a maior usina em potência instalada do Brasil representando 1,53% de toda a potência instalada em usinas que fazem parte do Sistema Interligado Nacional (SIN). Atualmente, a responsável pelo funcionamento da usina é a Companhia Paranaense de Energia - COPEL. Sua estrutura é de enrocamento compactado com face de concreto. Foi um marco na época de sua construção sendo a primeira a ser construída no Brasil e a maior do mundo no gênero na época, com 160 m de altura e 828 m de comprimento. A construção da barragem foi iniciada em fevereiro de 1977, sendo concluída em dezembro de 1979 (COPEL, 2020).

Figura 10 - Perfil Longitudinal do Rio Iguçu.



Fonte: ARAUJO *et al.* (2013).

O perfil longitudinal mostra que a usina Foz do Areia encontra-se na divisa entre o Alto Iguçu e o Médio Iguçu onde no ponto do barramento apresenta um relevo com grandes declividades, tornando-o atraente para aproveitamentos hidrelétrico, pois gera um desnível grande o lago e a tomada de força da usina. Já a montante do barramento encontra-se a presença de vales amplos e de baixa declividade, proporcionando boas possibilidades de armazenamento (TUCCI, 2002).

Toda a área de estudo está situada sobre o primeiro (alto Iguçu) e segundo (médio Iguçu) planalto do estado do Paraná, o primeiro planalto, também conhecido como planalto Curitiba é composto pelas mesmas unidades encontradas na Serra do Mar, rochas Ígneas e Metamórficas, que correspondem ao escudo cristalino paranaense. Já o segundo planalto, também conhecido como planalto ponta grossa, é um compartimento de rochas sedimentares como por exemplo os arenitos que estão depositados sob as camadas de rochas Ígneas (IAT, 2021).

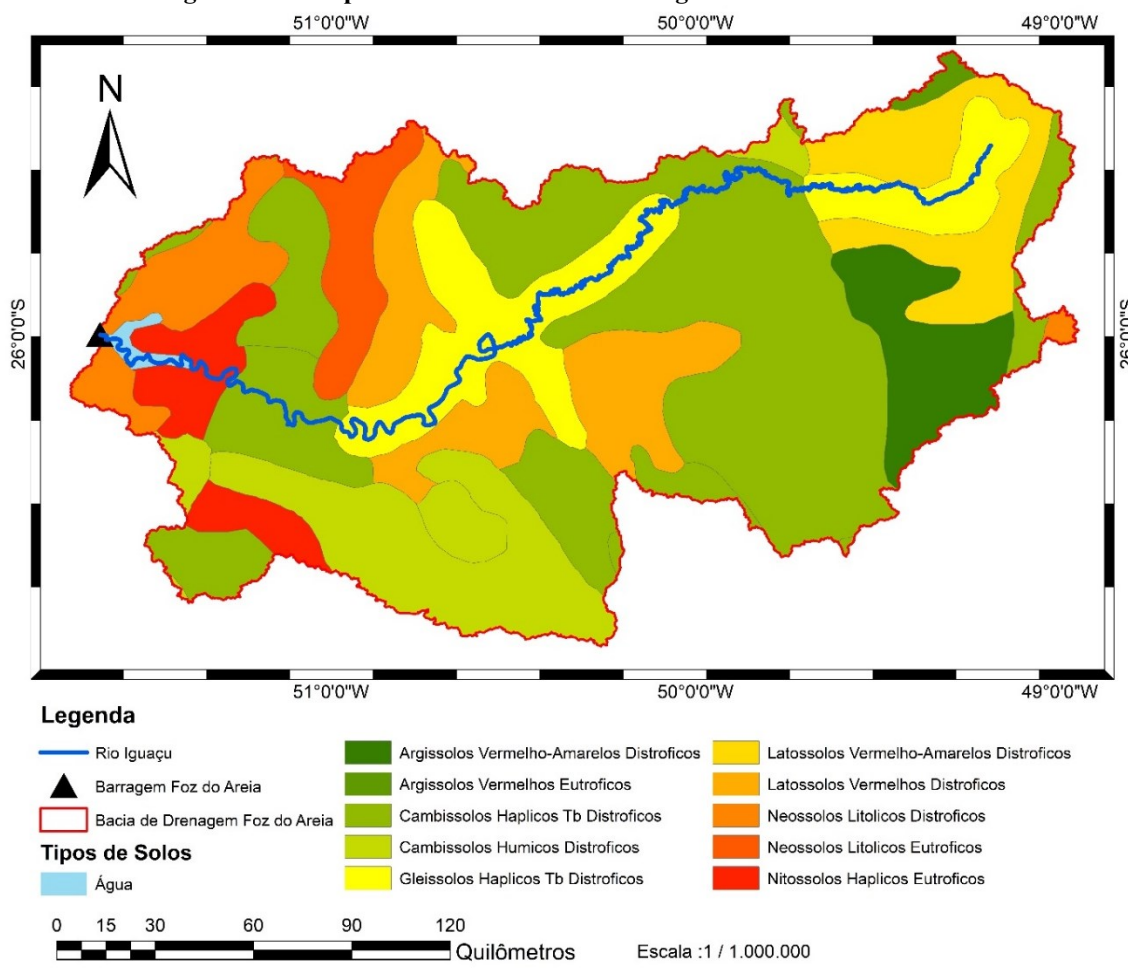
O clima na região segundo a classificação de Koppen é do tipo Cfb - Clima temperado, com verão ameno (IAPAR, 2019). A média anual de precipitação na região, entre os anos de

1999 e 2019, é de 1627,24 mm / ano e a média anual de ET_o , também para o mesmo período é igual 988,42 mm / ano.

Segundo o MapBiomas (2021), plataforma que monitora o uso do solo no Brasil, entre os anos de 1985 e 2019, a região da bacia do rio Iguaçu perdeu 21,3% de sua vegetação nativa, que é formada principalmente pela Mata Atlântica. Analisando mais afundo, na sub-bacia que compõe as cabeceiras do rio, área pertencente a bacia de coleta de águas da usina Foz do Areia, nos arredores de Curitiba, resta hoje apenas 7,2% da vegetação original.

De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) o solo da bacia de drenagem da UHE Foz do Areia é bem diversificado e apresenta em sua maioria características de solo Cambissolo, Latossolo e Argissolo, conforme apresentado no Mapa de ocupação do solo (EMBRAPA, 2021) (Figura 11).

Figura 11 - Mapa de solos da bacia de drenagem da UHE Foz do Areia.



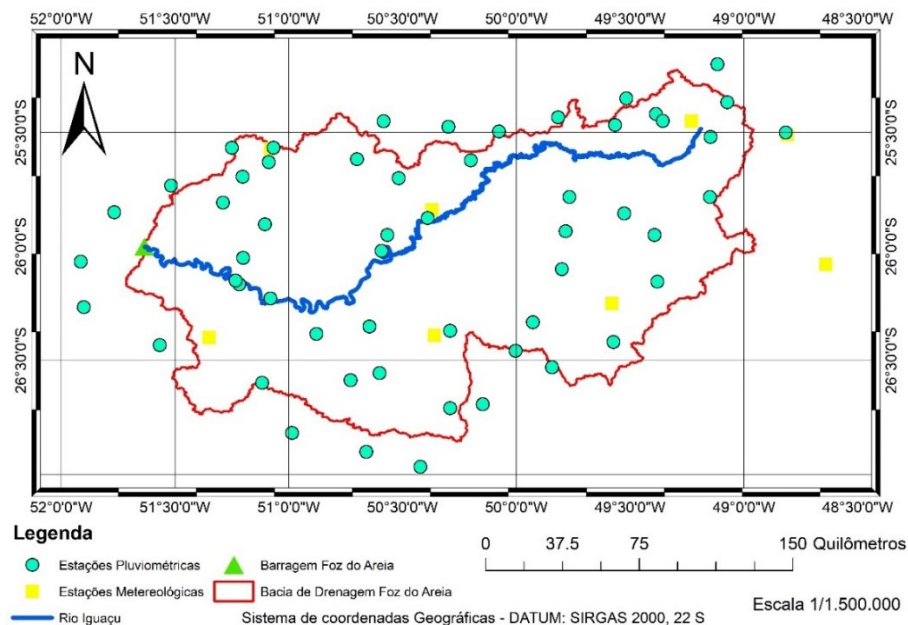
Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2021).

4.2 Fonte de dados hidrológicos e meteorológicos da área de estudos

Para a modelagem hidrológica tipo chuva-vazão foram utilizados dados históricos diários (entre 1999 e 2019) de precipitação, P (mm), de evapotranspiração potencial de referência, ET_0 (mm), e de vazão, Q (m^3/s). A média diária dos valores de P e ET_0 foi utilizada como dado de entrada na modelagem hidrológica. Os dados de precipitação foram adquiridos a partir do banco de dados HidroWeb da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/>). Assim, foram selecionadas as estações que possuem no mínimo 15 anos de dados consistidos dentro do período de estudo. O processamento dos dados foi realizado usando o *software* Super Manejo de Dados, versão 2.1 (COELHO e FAN, 2016).

Desse modo, 55 estações pluviométricas (pluviômetros convencionais) foram selecionadas dentro e próximo da área de estudo (Figura 12). Algumas estações não disponibilizavam dados consistidos então realizou-se uma consistência manual e visual em todas as estações pluviométrica, onde os valores maiores a 250 mm/dia foram descartados, também se excluiu os valores que eram apresentados de forma negativa. Desta maneira, ao final da apuração dos dados de precipitação obteve-se uma porcentagem de 14,44% de dados faltantes ou desconsiderados por apresentarem falhas. As coordenadas geográficas e os códigos identificadores de todas as estações pluviométricas estão disponibilizados no APÊNDICE A.

Figura 12 - Localização das estações pluviométricas e meteorológicas.



Fonte: O autor (2021).

Cada estação pluviométrica abrange, em média, uma área de aproximadamente 543 km². A densidade de estações pluviométricas está dentro do valor utilizado como referência pela *World Meteorological Organization*, que considera uma estação pluviométrica a cada 575 km² (WMO, 2008). Os dados de precipitação foram espacializados usando o método dos polígonos de Thiessen por meio do *software* ArcGIS®, versão 10.5 da ESRI.

Os dados diários de ET_o foram obtidos a partir de duas fontes de dados diferentes. Primeiro, foram usados 11 anos os dados interpolados de ET_o (entre 1999 e 2010) da grade de valores (resolução de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$) de Xavier; King; Scanlon, (2015). Esses valores foram calculados usando a equação de Penman-Monteith (FAO-56), publicada no boletim nº 56 da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO-56) (ALLEN *et al.* 1998). A ET_o foi calculada usando variáveis meteorológicas medidas em superfície ao longo do território brasileiro (725 estações meteorológicas) entre os anos de 1980 e 2013.

Os valores de ET_o (entre 2011 e 2019) foram calculados usando a equação de Penman-Monteith (FAO-56) (ALLEN *et al.* 1998) (Equação 2) a partir de dados meteorológicos dentro da área de estudo e adquiridos no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (<https://bdmep.inmet.gov.br/>). Do total de 7670 dias de dados analisados em apenas duas datas específicas os dados das 8 estações falharam e não foi possível obter valores meteorológicos médios para a bacia, nas datas de 29/08/2012 e 28/03/2013, desta maneira, com ajuda de um *software* de geoprocessamento retirou-se os valores médios diários de ET_o , para esses períodos, do trabalho de Althoff *et al.* (2019) no qual produziram um conjunto de dados diários de evapotranspiração de referência em grade para o Brasil (2000-2018).

$$ET_o = \frac{\left(0,408\Delta(R_n - G) + \gamma\left(\frac{900}{T_s + 273}\right)u_2(e_s - e_a)\right)}{(\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2))} \quad (2)$$

Sendo, ET_o expresso em (mm/dia), R_n o saldo de radiação sobre superfície da cultura (MJ/m²dia), G a densidade do fluxo de calor do solo (MJ/m²dia) sendo considerado nulo para períodos diários conforme recomendação do boletim da FAO-56, T_s é a temperatura do bulbo seco, em (°C), U_2 a velocidade de vento a 2 m de altura (m/s), e_s a pressão de vapor de saturação (kPa), e_a a pressão parcial de vapor (kPa), Δ a declividade da curva de pressão de vapor de saturação (kPa/°C), γ o coeficiente psicrométrico (kPa/°C).

Para o cálculo da ET_o , a sequência de cálculo foi baseada na metodologia de Cabrera (2011) onde, primeiramente calculou-se a declividade da curva de pressão de vapor de saturação através da Equação 03.

$$\Delta = \frac{4098 \cdot (0,6108 e_s^{\frac{17,27 T_s}{T_s + 237,3}})}{(T_s + 237,3)^2} \quad (3)$$

Sendo T_s a temperatura do bulbo seco, em ($^{\circ}C$), valor obtido na estação meteorológica. Já o parâmetro e_s que representa a pressão do vapor de saturação em kPa foi obtido através da Equação 04.

$$e_s = 0,6108 e^{\frac{17,27 T_s}{T_s + 237,3}} \quad (4)$$

Sendo T_s a temperatura do bulbo seco, em ($^{\circ}C$), valor obtido na estação meteorológica. O parâmetro e_a que representa a pressão parcial do vapor de água em kPa foi obtido através da Equação 05.

$$e_a = e_s \frac{UR}{100} \quad (5)$$

Sendo, UR a umidade relativa do ar, em %, valores médios diários obtidos da estação meteorológica. O coeficiente psicrométrico foi estimado através da Equação 6.

$$\gamma = 6,647 \times 10^{-4} \cdot Patm \quad (6)$$

Sendo, $6,647 \times 10^{-4}$ o valor da multiplicação entre o calor específico à pressão constante ($1,013 \times 10^{-3}$ MJ/Kg. $^{\circ}C$), a relação entre o peso molecular do vapor d'água e do ar seco (0,622) e o calor latente de evaporação da água (2,45 MJ/Kg) e Patm, em Kpa retirado da série de dados da estação meteorológica.

O saldo de radiação solar (R_n) foi obtido através da Equação 07 e com o auxílio das Equações 08 e 09.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (7)$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (8)$$

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{(T_{max} + 273,6)^4 + (T_{min} + 273,6)^4}{2} \right] \cdot (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \cdot (1,35 \frac{R_s}{R_{s0}} - 0,35) \quad (9)$$

Sendo, R_{ns} o saldo de radiação de ondas curtas, (MJ/m².dia) e o R_{nl} saldo de radiação de ondas longas (MJ/m².dia), α o albedo da cultura hipotética = 0,23, R_s a Radiação solar retirada da estação meteorológica, em (MJ/m².dia), σ é a constante de Stefan-Boltzmann com o valor de $4,903 \times 10^{-9}$ (MJ/K⁴.m².dia), T_{max} e T_{min} valores retirados das estações meteorológicas em °C e R_{s0} é a radiação solar, quando n/N é igual a 1,0 e foi calculada através das equações 10 e 11.

$$R_{s0} = (a_s + a_b) \cdot R_a \quad (\text{Com Céu Limpo}) \quad (10)$$

$$R_{s0} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} Z) \cdot R_a \quad (\text{Com Céu Limpo sem a e b calibrado}) \quad (11)$$

Sendo Z = altitude do local, corresponde a 733 m, R_a a radiação solar no topo da atmosfera em MJ/m².d, $a_s = 0,25$ e $a_b = 0,5$ coeficientes de transmutância atmosférica.

O valor de R_a foi calculado através da Equação 12.

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} G_{sc} \text{ dr } [\omega_s \cdot \text{sen}(\varphi) \cdot \text{sen}(\delta) + \text{cos}(\varphi) \cdot \text{cos}(\delta) \cdot \text{sen}(\omega_s)] \quad (12)$$

Sendo, G_{sc} a constante solar igual a 0,0820 MJ/m².min, $\pi = 3,1415$, d_r é a distância relativa do sol a Terra em radianos, cuja expressão é dada pela equação 13, ω_s é o ângulo horário do pôr do sol, em radianos, estimado pela equação 14, φ é a latitude do local em radianos e δ a declinação solar também em radianos, obtida através da equação 15.

$$d_r = (1 + 0,033 \cdot \text{cos}(\frac{2\pi}{365} \cdot J)) \quad (13)$$

$$\omega_s = \text{arccos}[-\text{tg}(\varphi) \cdot \text{tg}(\delta)] \quad (14)$$

$$\delta = 0,4093 \cdot \text{sen} \left(\frac{2\pi}{365} \cdot J - 1,405 \right) \quad (15)$$

Sendo, J a ordem dos dias no ano.

Os dados meteorológicos adquiridos a partir de 8 (oito) estações do INMET, localizadas dentro e próximas da área de estudo, foram: pressão atmosférica, P_{atm} (kPa), umidade relativa do ar, UR (%), temperatura do bulbo seco, T_s (°C), temperatura máxima, T_{max} (°C), temperatura mínima, T_{min} (°C), radiação solar incidente (MJ/m²dia) e Velocidade do Vento a 2 metros de altura, U_2 (m/s), todos os valores utilizados foram retirados das estações climatológicas do INMET, apenas foram corrigidas as unidades de medida. Os valores calculados de ET_0 foram interpoladas dentro da área de estudo usando o método ponderado pelo inverso da distância ao quadrado.

Os dados de vazão afluente à UHE Foz do Areia foram extraídos da Operadora Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (<http://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao>). A vazão afluente foi utilizada, pois só depende das condições hidrológicas naturais da bacia hidrográfica e dos aproveitamentos existentes a montante, já a vazão defluente sofre influência direta do barramento da própria hidrelétrica uma vez que a abertura ou fechamento das comportas muda as vazões.

4.3. Modelagem hidrológica

O HYMOD 2 é um script computacional que necessita de um *software* para ler e processar o script (Roy *et al.* 2017). Nesta ocasião o *software* utilizado foi MATLAB 2020a, produto comercial da MathWorks®.

Os dados de entrada foram separados em dois períodos, o primeiro período de 1999–2008 foi usado para a calibração, enquanto o período 2009–2019 foi usado para a validação do modelo.

O HYMOD2 é a versão atualizada do modelo hidrológico HYMOD (Boyle; Gupta; Sorooshian, 2000) ainda pouco utilizada em estudos científicos. Esta versão atualizada necessita de nove parâmetros sensíveis e calibráveis para a simulação hidrológica do tipo chuva-vazão (Quadro 2).

Quadro 2 - Descrição dos parâmetros do modelo hidrológico HYMOD2.

Parâmetro	Descrição
Huz	A altura máxima do reservatório (não linear) inicial.
B	Grau de variabilidade espacial da capacidade de umidade do solo dentro do reservatório inicial.
α	Separa a precipitação excedente a partir do reservatório inicial em duas partes: escoamento de base e escoamento superficial.
Nq	Número de reservatórios para a propagação do escoamento superficial.
Kq	Tempo de residência de cada reservatório de escoamento superficial.
Ks	Tempo de residência do reservatório de escoamento de base.
Parâmetros adicionais do HYMOD2	
K_{max}	Limite superior do parâmetro de resistência ao fluxo de evapotranspiração real (ET).
G	Redutor de assimetria e heterocedasticidade do limite inferior do parâmetro de resistência ao fluxo de ET.
CE	Coefficiente de potência na relação entre as capacidades reais e máximas de armazenamento do solo.

Fonte: o Autor (2021).

Especificamente essa alteração ocorreu, pois, a equação para estimativa da ET do HYMOD foi multiplicada por uma função K (Equação 16), tal que $0 \leq K \leq 1$. Esta função atua como uma resistência ao fluxo de evapotranspiração do modelo obtendo valores mais próximos da evapotranspiração real.

$$K = G \cdot K_{max} + (K_{max} - G \cdot K_{max}) \cdot \left(\frac{C}{C_{max}} \right)^{CE} \quad (16)$$

Sendo, K a constante de resistência ao fluxo de ET, K_{max} o Limite superior do parâmetro de resistência ao fluxo de ET, G o Redutor de assimetria e heterocedasticidade, C o armazenamento de umidade do solo real, C_{max} o armazenamento de umidade do solo máximo e CE o coeficiente de potência.

Dos nove parâmetros possíveis de ajustes, dois possuem uma limitação máxima e mínima, o parâmetro B e o CE só podem receber valores maiores do 0 e menores do que 2, caso contrário a mensagem de erro informada. Os demais parâmetros variam de 0 até $+\infty$, ou seja, positivos.

O processo de calibração do modelo foi automático. O algoritmo de otimização SCE-UA foi utilizado para minimizar a função objetivo representada pela métrica KGE, dessa forma, o algoritmo SCE-UA obteve os valores otimizados dos nove parâmetros.

Através das respostas foi possível definir se o modelo realmente representa a transformação da precipitação em vazão e definir se o modelo está ou não calibrado. As tentativas foram realizadas até se obterem métricas estatísticas aceitáveis, a cada simulação realizada, alterou-se apenas um parâmetro para verificar qual a influência do mesmo nas respostas do *software*.

O HYMOD 2 é um modelo de precipitação excedente. Nesse modelo, o volume de água que atinge a superfície do solo é particionado em precipitação efetiva, umidade armazenada do solo e evapotranspiração real (ET). Essa partição de componentes hidrológicas foi feita usando a concepção de que a umidade armazenada no solo (C) e altura de armazenamento no solo (H) formam uma relação de reservatório não linear. A correlação entre estas variáveis foi dada através das equações 17, 18 e 19.

$$C(t) = C_{\max} \left(1 - \left(1 - \left(\frac{H(t)}{H_{huz}} \right)^{1+b} \right) \right) \quad (17)$$

$$C_{\max} = \frac{H_{huz}}{1+b} \quad (18)$$

$$b = \frac{\log\left(1 - \frac{B}{2}\right)}{\log(0,5)} \quad (19)$$

Sendo C_{\max} a capacidade máxima de armazenamento, H_{huz} (parâmetro de entrada) a máxima altura do indicador, b o coeficiente de potência e B (parâmetro de entrada) o grau de variabilidade espacial da capacidade de umidade do solo.

O fluxo excedente, resultante da decomposição da precipitação em evapotranspiração e infiltração no solo conforme a variabilidade da umidade do mesmo, foi dividido pelo parâmetro α em escoamento superficial e escoamento de base. A multiplicação do volume excedente por α

foi destinado para o escoamento superficial e o restante do excedente foi destinado para o escoamento de base. Os dois escoamentos passam pelos seus respectivos tanques, sendo influenciados pelos parâmetros de tempo de residência de cada reservatório (K_q e K_s). O escoamento superficial também foi modificado pela quantidade de tanques posicionados em sequência, definido pelo parâmetro N_q .

Ao final os fluxos de saída do escoamento superficial e do escoamento de base foram somados resultando na variável de saída denominada vazão simulada.

4.3.1 Métricas de desempenho do modelo hidrológico

A avaliação do desempenho do modelo hidrológico foi feita por meio da comparação entre a vazão observada (Q_{obs}) e a vazão simulada (Q_{sim}) usando métricas de erro e de concordância. O Erro Quadrático Médio (*Mean Square Error*, MSE) foi adotado como métrica para avaliar o erro médio do modelo em relação à vazão observada. O MSE foi definido pela Equação 20.

$$MSE = \sum_{i=1}^n \frac{(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{N} \quad (20)$$

A avaliação de superestimativa ou subestimativa da vazão simulada em relação à vazão observada foi feita usando a métrica de porcentagem de viés (Pbias) (Equação 21).

$$Pbias = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs})} \times 100 \quad (21)$$

O coeficiente de correlação de Pearson (r) e o coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) (Nash e Sutcliffe, 1970) foram adotados para avaliar a concordância, ou seja, comparar o erro quadrático médio com a variância dos dados observados. O coeficiente r foi definido pela Equação 22.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \times (\overline{Q_{sim}} - Q_{sim})^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \times \sum_{i=1}^n (\overline{Q_{sim}} - Q_{sim})^2}} \quad (22)$$

O coeficiente Nash-Sutcliffe foi obtido através da Equação 23.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (23)$$

Sendo: Q_{sim} = Vazão Simulada, Q_{obs} = Vazão observada, $\overline{Q_{sim}}$ = média das vazões simuladas, $\overline{Q_{obs}}$ = média das vazões observadas e N= número de observações.

A Eficiência Kling-Gupta (KGE, Eq. (24), Gupta et al. 2009)

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (24)$$

Sendo r é a correlação linear entre observações e simulações, α uma medida do erro de variabilidade do fluxo e β um viés. Resumindo o valor de KGE é obtido conforme Eq (25)

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\alpha_{sim}}{\alpha_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2} \quad (25)$$

Sendo α_{obs} o desvio padrão nas observações, α_{sim} o desvio padrão nas simulações, μ_{sim} a média da simulação e μ_{obs} a média de observação.

De acordo com Moriasi *et al.* (2008), os melhores métodos de avaliação do desempenho de modelos hidrológico são o Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) (NASH e SUTCLIFFE, 1970) e a Tendência Percentual (Pbias). O NSE é uma medida normalizada que varia entre $-\infty$ e 1, sendo que quanto mais próximo de 1 o valor de NSE, maior é a concordância entre os valores simulados e os valores observados. Já (Pbias) é um índice que quantifica a tendência média dos dados simulados em serem maiores ou menores que os valores observados, com valores negativos indicando uma superestimação e valores positivos indicando uma subestimação. Moriasi *et al.* (2008) concluíram que simulações satisfatórias com o modelo possuem valores de NSE maiores que 0,5 e valores entre -25% e 25% para o Pbias.

Já o Erro quadrático médio MSE de acordo com Hallak e Pereira Filho (2011) é uma medida frequentemente usada na verificação da acurácia de modelos numéricos e sensível aos

grandes erros, por elevar as diferenças individuais ao quadrado. MSE é sempre positivo. MSE = 0 indica simulação perfeita.

Por fim o quarto parâmetro utilizado pelo HYMOD na análise estatística de seus resultados é o coeficiente de correlação de Pearson (r). Figueiredo Filho e Da silva Junior (2011) definiram que o (r) correlaciona linearmente os valores observados com os valores simulados, o resultado varia de -1 até +1. Os dois extremos indicam a correlação perfeita, já uma correlação de valor zero indica que não há relação linear entre as variáveis. Dificilmente os valores de r se igualam a zero ou um desta maneira os autores indicam que para r variando entre 0,70 até 1 as variáveis possuem uma correlação forte e aceitável.

4.4 Influência das mudanças climáticas

Para avaliar os impactos das mudanças climáticas nas vazões do Rio Iguaçu e consequentemente a produção de energia na usina Foz do Areia foram utilizados 10 modelos de clima global (MCG's). Os MCG's fornecidos pelo IPCC AR6 descreveram o clima usando uma grade tridimensional sobre o globo, normalmente tendo uma resolução horizontal entre 50 e 600 km, sendo uma resolução muito grande para trabalhos com bacias regionais, além disso os MCG's possuem de 10 a 20 camadas verticais na atmosfera e às vezes até 30 camadas nos oceanos.

De acordo com o IPCC (2014), os MCG's representam processos físicos na atmosfera, oceano, criosfera e superfície terrestre e são as ferramentas mais avançadas atualmente disponíveis para simular a resposta do sistema climático global ao aumento das concentrações de gases de efeito estufa. Embora modelos mais simples também tenham sido usados para fornecer estimativas de média global ou regional da resposta climática, apenas MCG's, possivelmente em conjunto com modelos regionais alinhados, têm o potencial de fornecer estimativas geográficas e fisicamente consistentes de mudanças climáticas regionais que são necessárias em análise de impacto.

Foram utilizados 10 MCG's existentes, retirados do CMIP6 AR-6, estes modelos apresentavam as projeções futuras de Temperaturas máximas, temperaturas mínimas e de precipitação, valores necessários para o cálculo das projeções de ET_o. Os MCG's escolhidos foram o ACCESS_CM2, CMCC_ESM2, EC_EARTH3, INM_CM4_8, INM_CM5, IPSL_CM6A, MIROC6, MPI_ESM1, MRI_ESM2 e UKESM1. Para as previsões futuras de precipitação e de

evapotranspiração foram simulados dois cenários apresentados pelo IPCC (2021), um intermediário SSP2-4.5 e outro extremo SSP5-8.5 e com base em cada cenário foi previsto o impacto causado por esses níveis de aquecimento global nos parâmetros naturais hidro meteorológicos e conseqüentemente na vazão afluente da usina que é utilizada para geração de energia elétrica na Hidroelétrica Governador Bento Munhoz da Rocha Netto.

Os modelos climáticos globais são desenvolvidos por grupos de estudos espalhados pelo mundo todo, cada um possui suas características específicas para gerar seus dados de projeções futuras dos parâmetros climáticos, o Quadro 3 apresenta as principais características de todos os MCG's utilizados neste estudo.

Quadro 3: Características dos Modelos Climáticos Globais

Modelo	Instituição	País	Resolução na atmosfera (atmos de 100 km)	
			Latitude	Longitude
ACCESS_CM2	Australian Community Climate and Earth System Simulator Climate Model Version 2	Austrália	144	192
CMCC_ESM2	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici	Itália	192	288
EC_EARTH3	EC Earth Consortium	Europa	256	512
INM_CM4_8	Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences, Russia	Rússia	120	180
INM_CM5	Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences, Russia	Rússia	120	180
IPSL_CM6A	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)	França	256	256
MIROC6	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine Earth Science and Technology (MIROC)	Japão	128	256
MPI_ESM1	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	Alemanha	192	384
MRI_ESM2	Meteorological Research Institute (MRI)	Japão	160	320
UKESM1	U.K. Earth System Model	Reino Unido	144	192

Fonte: WCRP (2022)

Destes 10 MCG's foram extraídas as séries temporais de projeção de precipitação e temperatura dentro das coordenadas da bacia hidrográfica. Para a extração dos dados que são disponibilizados em formato .NETCDF4 utilizou-se um script no *software* MATLAB®.

4.4.1 Processamento dos dados obtidos junto aos modelos climáticos globais (MCG's).

O HYMOD 2, modelo hidrológico utilizado no estudo necessita das variáveis de entrada de precipitação e de ET_o . A projeção de precipitação é obtida de forma direta, na qual são projetados valores de precipitação diária para os próximos 80 anos, Já as previsões de ET_o foram calculadas através do método Hargreaves e Samani (1985), conforme Equação (26).

$$ET_o = 0,00135 K_T (T + 17,78)(T_{max} - T_{min})^{0,5} R_a \quad (26)$$

Sendo R_a é a radiação extraterreste em $mm \text{ dia}^{-1}$, obtida através da equação (12) (Allen et al. 1998). Os valores de T_{max} e T_{min} são as projeções de temperaturas máximas e mínimas obtidas através dos modelos climáticos globais. Como normalmente K_T assume o valor de 0,17, muitas vezes substitui-se a parcela $0.0135 K_T$ por 0.0023. Adicionalmente, a equação pode ser utilizada com R_a em $MJm^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$, bastando para isso multiplicar a parcela direita da equação por 0,408.

Os valores de ET_o (entre 1999 e 2010) foram retirados de Xavier; King; Scanlon, (2015). Para o período de 2011 até 2019 os valores de ET_o foram calculados com os resultados obtidos das estações meteorológicas, ambos calculados utilizando a equação de Penman-Monteith (FAO-56) (ALLEN et al. 1998) (Equação 2) que apresenta uma metodologia mais complexa e com a necessidade de muitos dados de entrada.

Por este motivo as projeções futuras de ET_o foram obtidas através de outra metodologia de cálculo, a de Hargreaves e Samani (1985). A escolha deste método para o cálculo das projeções de ET_o futuras se dá pelo fato de ser uma metodologia mais simplificada na qual utiliza-se somente as variáveis de temperaturas máximas e mínimas, em °C (Celsius), que são fornecidas pelos MCGs e a radiação solar no topo da atmosfera em $MJ/m^2 \cdot d$ calculada através da latitude e longitude do local de estudo. Outros métodos de cálculo da ET_o demandam de variáveis que não são encontradas na maioria dos MCGs.

4.5 Análise das tendências para variação nas vazões da bacia da hidroelétrica Governador Bento M. R. Netto

Por fim para determinar se as mudanças climáticas realmente causam impactos nas vazões do rio e conseqüentemente na geração de energia hidrelétrica bem como nas questões ambientais do rio foram analisadas três vazões características a Q_{90} , Q_{95} e \overline{Q}_m . A análise das tendências de alteração foi executada através do teste de Mann-Kendall (MK) (27), (28), (29) e (30), usando um nível de significância de 0,05 somente para \overline{Q}_m , anualmente durante 2020–2100. Uma tendência a análise dos fluxos de água foi realizada para avaliar sua influência potencial nas tendências de \overline{Q}_m .

Ferrari (2012) descreve que, para um conjunto de dados $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, desde que $n > 4$, o teste de Mann-Kendall S utiliza as seguintes fórmulas:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \quad (27)$$

A função sign é definida por:

$$\text{sign} = \begin{cases} 1, & \text{se } x_j - x_k > 0 \\ 0, & \text{se } x_j - x_k = 0 \\ -1, & \text{se } x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad (28)$$

Por sua vez, a variância de S, representada por VAR(S), é definida pela fórmula:

$$\text{VAR}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (29)$$

Portanto, S e VAR(S) são utilizados para o cálculo da estatística Z:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (30)$$

O teste não paramétrico MK é amplamente utilizado para descrever tendências crescentes ou decrescentes em séries de tempo hidrológicas (GAO e WANG, 2017). O teste é vantajoso porque não requer nenhuma suposições sobre a distribuição dos dados e não é muito

sensível a falhas (HAMED, 2008). Os testes de tendência não paramétricos geralmente requerem séries temporais sem auto correlação (Bürger, 2017), isso é, os valores do fluxo devem ser independentes uns dos outros. Com relação à vazão do rio, correlação serial geralmente está presente, especialmente em uma base diária e mensal (DIBIKE e SOLOMATINE, 2001). O teste MK indica se as mudanças ao longo do tempo são significativas ou não. Para estimar a magnitude da tendência, ou seja, o quanto a variável muda por unidade de tempo (DRÁPELA e DRAPELOVÁ, 2011), utilizou-se o estimador de inclinação não paramétrico de (THEIL, 1949) e (SEN, 1968).

A verificação da vazão \overline{Q}_m , tem por objetivo estabelecer se as médias das vazões futuras estarão aumentando ou diminuindo, ou ainda se existirá mais ou menos demanda de água para gerar energia elétrica. Já as vazões Q_{90} e Q_{95} foram analisadas com mais detalhes, pois, são as vazões mais utilizadas para calcular a potência assegurada das usinas hidrelétricas e de acordo com a ANEEL (2005) a potência assegurada da usina Foz do Areia é de 576 MW médio, descontando os dias em que a usina esteja parada para manutenção ou reforma das turbinas.

Para o cálculo das vazões Q_{90} e Q_{95} utilizou-se a metodologia apresentada por Collischonn e Dornelles (2013), a partir da curva de permanência. A curva de permanência foi elaborada por meio de planilhas eletrônicas, usando a função PERCENTIL para encontrar os valores dos quantis de 1 a 99%. O percentil 5% corresponde à vazão Q_{95} , ou seja, a vazão que foi igualada ou superada 95% do tempo. O percentil 10% corresponde à vazão Q_{90} , ou seja, a vazão que foi igualada ou superada 90% do tempo.

Para o cálculo da Q_m os dados das projeções foram separados nos três períodos, futuro próximo (2020 – 2049), futuro médio (2050 – 2079) e futuro distante (2080 - 2100).

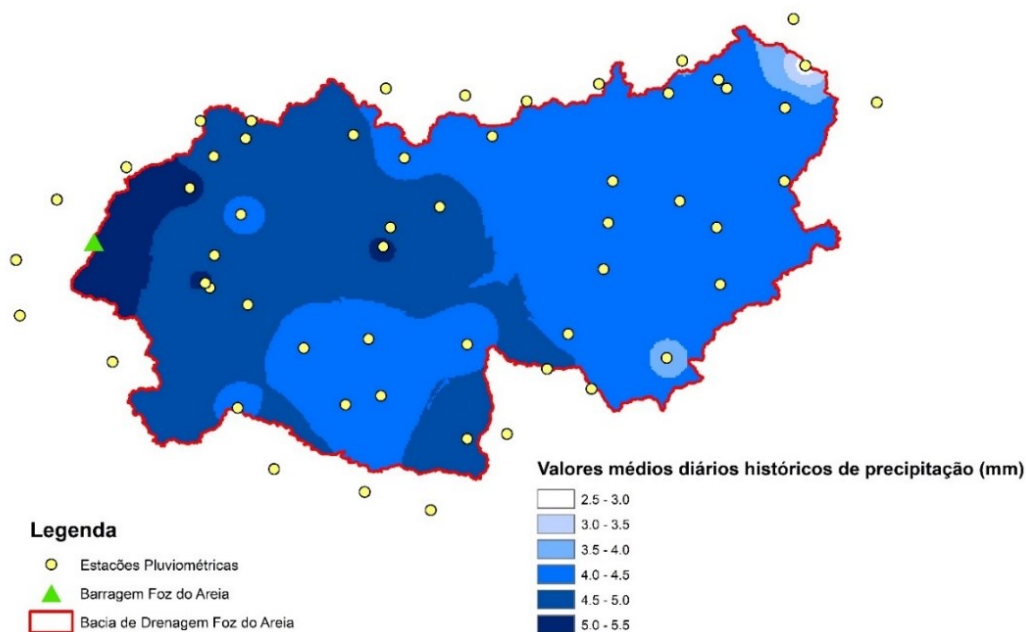
Sendo assim, o presente trabalho adotou a metodologia descrita até o momento para verificar se os impactos causados pelas mudanças climáticas, são capazes de influenciar de maneira positiva ou negativa na geração de energia na usina Foz do Areia.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Dados hidrológicos e meteorológicos

Primeiramente os dados hidrológicos e meteorológicos obtidos para esta bacia foram especializados, aplicando a metodologia do polígono de Thiessen os dados diários de Precipitação e a metodologia do inverso da distância ao quadrado para ET_0 . A Figura 13 e Figura 14 apresentam as médias diárias de precipitação e evapotranspiração respectivamente especializadas sobre a bacia para o período de 1999 até 2019.

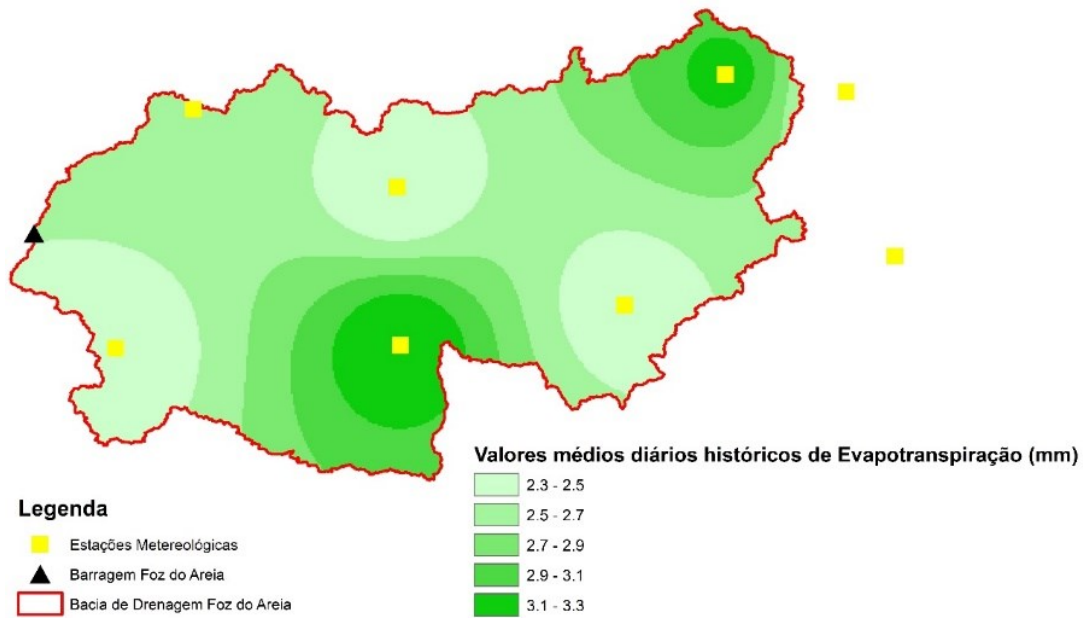
Figura 13 - Média diária de precipitação na série histórica (1999-2019).



Fonte: o Autor (2021).

Mesmo sendo uma região que possui uma média diária de precipitação elevada comparando com outras regiões brasileiras, observou-se que internamente a bacia existe uma variação considerável, onde as médias podem variar em até 50 % para mais ou menos. A região nordeste da bacia de estudo (região de Curitiba) apresenta os menores índices de precipitação, variando de 2,5 mm/dia até 3,5 mm/dia, em quanto que a região oeste da bacia apresenta os maiores índices variando entre 4,5 mm/dia e 5,5 mm/dia, resultando em uma média ponderada geral histórica de 4,57 mm de chuva por dia.

Figura 14 - Média diária histórica (1999-2019) de ET_o



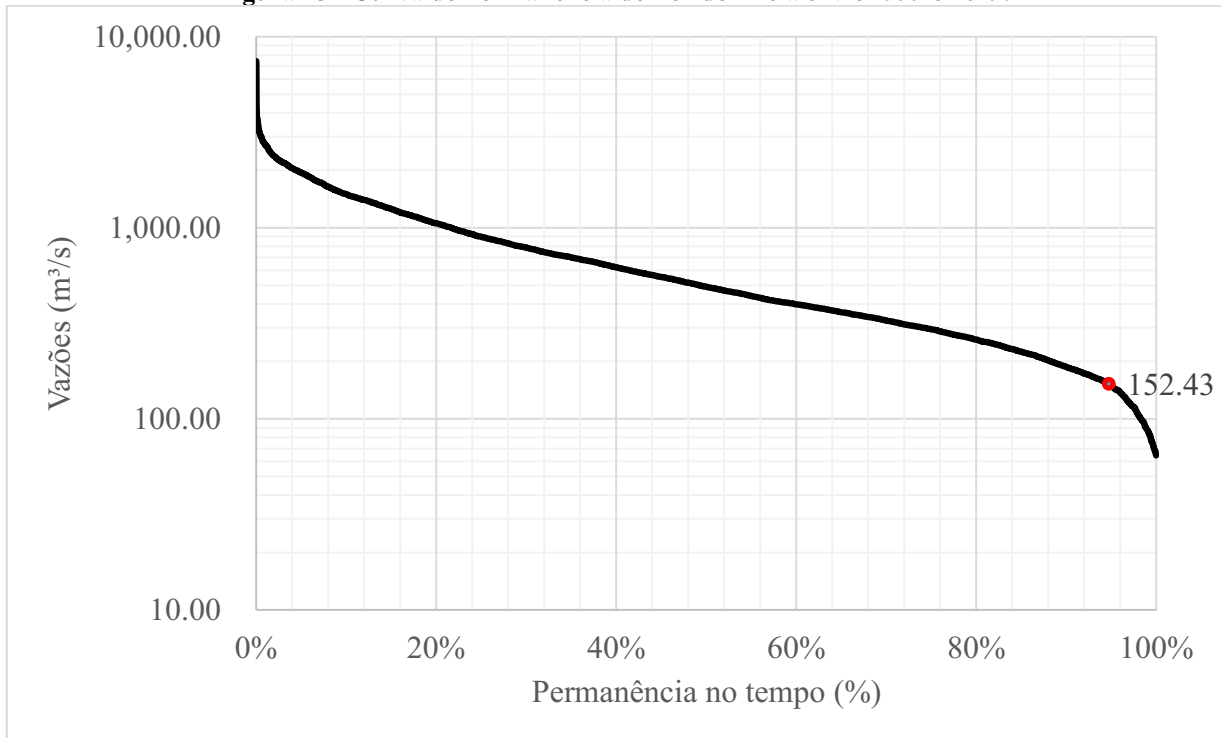
Fonte: o Autor (2021).

A Figura 14 mostra uma variação de aproximadamente 30 % entre o maior e menor valor, os valores de ET_o , os valores são maiores na região nordeste e sul da bacia, onde variam entre 2,9 mm/dia e 3,3 mm/dia e são menores na região oeste, sudeste e norte onde podem obter uma média de 2,3 mm/dia. Analisando todos os valores diários de ET_o a bacia possui uma média ponderada histórica de 2,65 mm de ET_o para cada dia do ano.

Comparando os dados da Figura 13 com a Figura 14 percebe-se que as regiões que apresentam as menores incidências de precipitação num geral são as que possuem a maior evapotranspiração, sendo que o contrário também foi observado.

Com os dados fornecidos pela ONS das vazões afluentes da usina Foz do Areia, do período de 01/01/1999 até 31/12/2019 e aplicando o método da curva de permanência através da probabilidade de Weibull pode – se calcular a Vazão Q_{95} %, que conforme a Figura 15 é igual a 152,43 m^3/s , ou seja essa foi a vazão afluente que pode ser igualada ou superada em 95% dos dias ao longo da série histórica.

Figura 15 - Curva de Permanência de Foz do Areia entre 1999 e 2019.

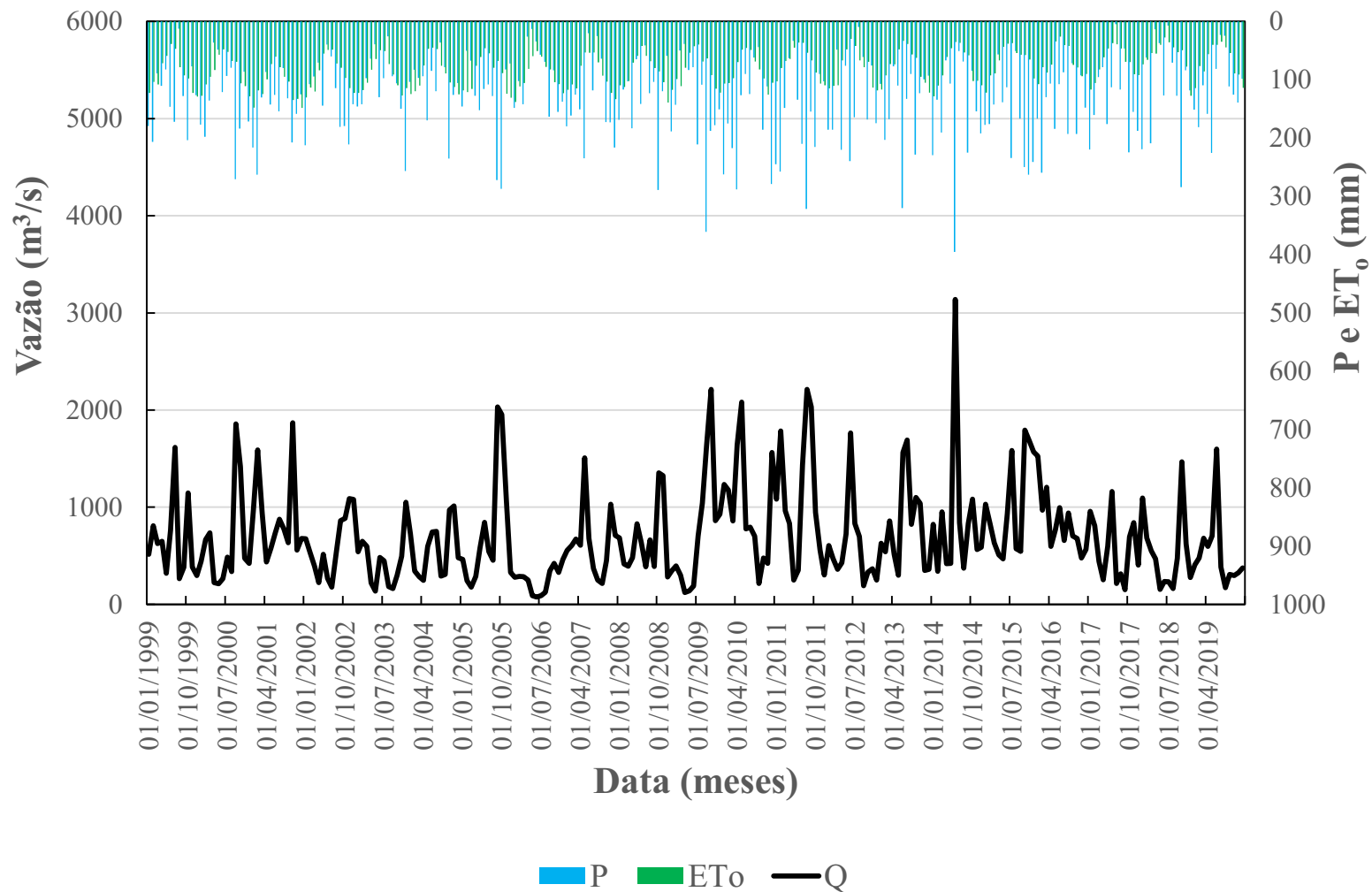


Fonte: o Autor (2021).

No gráfico anterior o eixo Y que representa as vazões foi colocado na escala logarítmica para facilitar a interpretação dos valores mínimos de vazões, além do mais a indicação da $Q_{90} = 190,64 \text{ m}^3/\text{s}$ e $Q_{95} = 152,43 \text{ m}^3/\text{s}$ estão representadas na Figura 15.

A série histórica mensal de P , ET_0 e Q é apresentada na Figura 16. Em geral, é possível observar que quando a precipitação é superior à ET_0 , há um aumento da vazão na área de estudo. O aumento da vazão ocorre, principalmente, por causa do escoamento superficial, isto é, a transformação da precipitação em vazão. As menores vazões médias mensais ocorreram nos meses de abril ($475,9 \text{ m}^3/\text{s}$) e agosto ($565,3 \text{ m}^3/\text{s}$), enquanto as maiores ocorreram em outubro ($1037,5 \text{ m}^3/\text{s}$) e junho ($866,3 \text{ m}^3/\text{s}$) durante o período de estudo (1999–2019). O maior saldo do balanço $P - ET_0$ ocorreu nos meses de outubro e junho. A média anual \pm desvio-padrão de P e ET_0 considerando todo o período de estudo foi igual a $1701,2 \pm 390,38 \text{ mm}$ e $1040,1 \pm 287,6 \text{ mm}$, respectivamente.

Figura 16 - Vazão média mensal (Q), evapotranspiração potencial de referência (ET_o) e precipitação (P) entre os anos de 1999 e 2019 na UHE Foz do Areia.



Fonte: o Autor (2021).

No ano de 2006 nota-se os valores mais baixos de vazão mensal (Figura 16). A vazão média \pm desvio-padrão em 2006 foi de $253,2 \pm 132,1$ m³/s, enquanto a vazão média durante o período de estudo (1999–2019) foi de $695,2 \pm 201,5$ m³/s. A baixa vazão em 2006 é próxima da vazão mínima com permanência de 95% (Q_{95}), $Q_{95} = 152,4$ m³/s, considerando todo o período de estudo. Ainda, o valor de P e ET_o em 2006 foi igual a 1132,5 mm e 1102,9 mm, respectivamente. A produção média de energia elétrica na UHE Foz do Areia em 2006 (300 MW/dia) foi a menor durante o período de estudo, de acordo com os dados do ONS (2020), por causa da baixa precipitação e, conseqüentemente, baixa vazão do rio. Além disso, foi observado uma queda abrupta e contínua da vazão média entre os anos de 2015 (1012,8 m³/s) e 2019 (526,3 m³/s). As maiores vazões médias ocorreram em 2011 (1062,8 m³/s) e 2015 (1012,8 m³/s), sendo o saldo do balanço $P - ET_o$ foi igual a 1118,1 mm/ano em 2011. Conseqüentemente, de acordo com a (ONS) (<http://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao>), neste ano houve a maior geração média de energia elétrica, gerando aproximadamente 943 MW/dia, a maior média registrada no período de estudo.

5.2 Modelagem hidrológica

A modelagem hidrológica da bacia foi realizada através do *software* HYMOD2. Inicialmente separou-se os dados observados em dois períodos, o período de calibração, de 1999 até 2008, e o período de validação de 2009 até 2019 utilizado para analisar se os valores calibrados mantinham um bom desempenho utilizando valores já conhecidos de Precipitação, ET_o e Vazão.

5.2.1 Período de Calibração

As nove variáveis de entrada do programa foram calibradas de forma automática utilizando o método *Shuffled Complex Evolution* desenvolvida na Universidade do Arizona (SCE-UA). A simulação foi repetida até que a função objetivo apresentasse o melhor conjunto de parâmetros, atendendo aos critérios de convergência.

Neste processo de calibração foram testadas 3 funções objetivos NSE, MSE e KGE, todas obtiveram convergência dos parâmetros. Porém a função que apresentou as melhores

métricas estatísticas foi a função KGE. Os resultados dos parâmetros, após a calibração automática, estão apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 - Resultado dos parâmetros calibrados do HYMOD2.

Parâmetros	H _{uz}	B	α	N _q	K _s	K _q	K _{max}	G	CE
Valor	371,7771	1,1495	0,4924	3,3739	0,1773	0,2113	1,0422	0,6640	1,6040

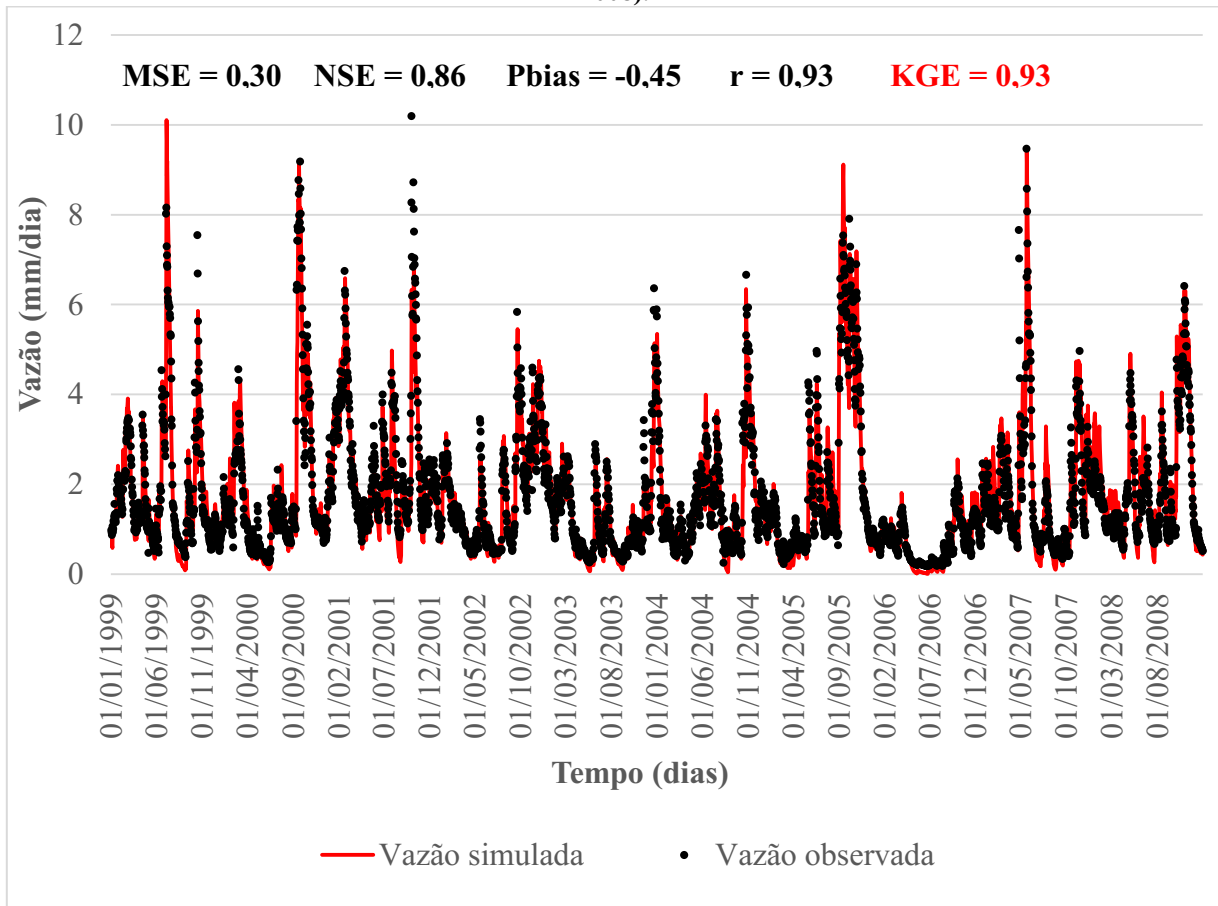
Fonte: o Autor (2021).

Apesar de não ter sido realizada a análise de sensibilidade dos parâmetros (Quadro 4), foi possível perceber que alguns parâmetros são mais sensíveis e, por isso, alteram mais os resultados da simulação. Por exemplo, pequenas alterações nos valores de K_s, K_q, B e α alteram significativamente a vazão simulada. Gesualdo *et al.* (2019) utilizaram o HYMOD para uma aplicação de segurança hídrica no sistema abastecedor de água (Sistema Cantareira) da Região Metropolitana de São Paulo. Esses autores obtiveram valores de H_{uz} = 174,1237, B = 0,75374, α = 0,357, N_q = 1,0, K_s = 0,007341, K_q = 0,37942 e também relataram que os três primeiros parâmetros B, α e H_{uz} são os que provocam maiores alterações nas simulações quando editados.

Parra; Fuentes-Aguilera; Muñoz (2018) analisaram a sensibilidade dos parâmetros do HYMOD em escala diária e mensal, em duas bacias diferentes, no Chile, concluíram que o parâmetro α , que faz a separação do escoamento rápido e lento é o que exibe maior sensibilidade, em segundo o K_s, associado ao escoamento lento e na sequência o K_q influenciando o escoamento superficial. Os valores encontrados por Parra Parra; Fuentes-Aguilera; Muñoz (2018) foram: H_{uz} = 248, B = 0,988, α = 0,515, N_q = 3,0, K_s = 0,274 e K_q = 0,748.

A Figura 17 apresenta as vazões simuladas e observadas (em unidade de mm/dia) para o período de calibração do modelo. Observa-se que o modelo consegue representar o comportamento da vazão ao longo do tempo porque simulada corretamente os períodos de ascensão, pico e recessão. A métrica P_{bias} = -0,45% indica que em média o modelo hidrológico subestima os valores de vazão, enquanto o MSE = 0,30 indica que o modelo possui baixo erro médio. Os valores das métricas, r = 0,93 e NSE = 0,86, sugerem que o HYMOD2 possui boa concordância com os dados observados no período de calibração, por fim o valor de KGE = 0,93 indica uma ótima correlação entre os dados simulados e observados.

Figura 17 - Vazões diárias observadas e simuladas durante o período de calibração do modelo (1999–2008).



Fonte: o Autor (2021).

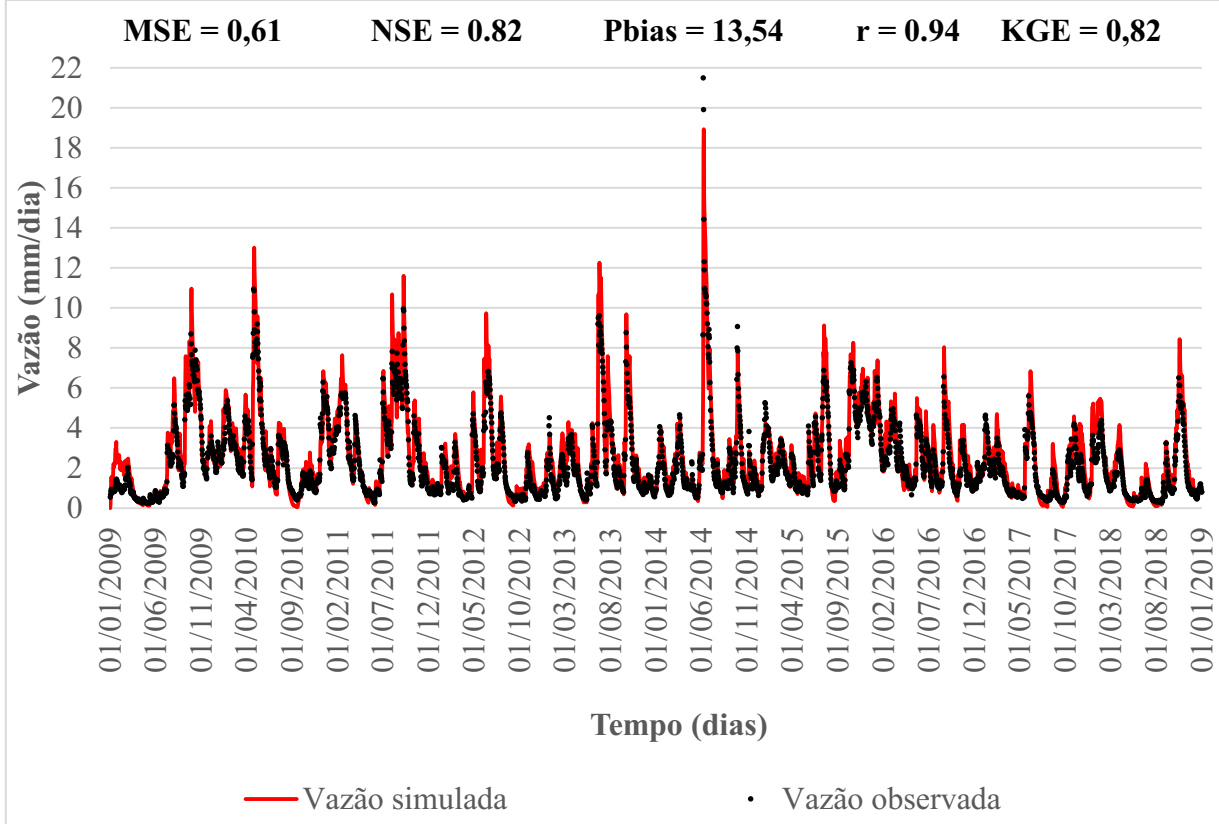
Através da Figura 17 fica claro que o modelo representa de forma muito clara os períodos de vazões máximas e mínimas bem como os períodos de ascensão e recessão. Em alguns períodos onde são apresentados os registros máximos de chuva, os valores observados e simulados se destoam um pouco, porém, de forma geral, os valores das métricas estatísticas obtidas na maior parte dos períodos são bem próximos, aumentando ainda mais a confiabilidade do modelo hidrológico.

5.2.2 Período de Validação

Na Figura 18 são apresentados os valores de vazão simulada para o período de validação, foram mantidos os mesmos valores de entrada, das variáveis, obtidos no período de calibração e processado os dados para este novo período. Os valores das métricas obtidas foram, $r = 0,94$ e $NSE = 0,82$, sugerem uma boa concordância com os dados observados no período de

validação, muito próximo aos valores do período de calibração. O Pbias = 13,53% indica que o modelo em média superestima as vazões, enquanto o MSE ficou igual a 0,61 e o KGE = 0,82.

Figura 18 - Vazões diárias observadas e simuladas durante o período de validação do modelo (2009–2019).



Fonte: o Autor (2021).

Assim como no período de calibração (Figura 17) o período de validação (Figura 18) apresentou ótimos resultados, visualmente observa-se que as vazões simuladas ficaram muito próximas das vazões observadas. Porém em alguns pontos específicos nota-se que houveram algumas variações entre as vazões, como por exemplo nos primeiros meses do mês de 2009 em que o gráfico da vazão simulada destoou um pouco da vazão observada. Esse fato pode ser explicado pelo período de aquecimento do modelo hidrológico, que necessita de alguns dados iniciais para iniciar as iterações e começar o processamento das fórmulas.

Nos pontos de picos de vazões também indicam algumas variações nas vazões e de forma geral as vazões simuladas não atingem exatamente o valor das vazões observadas. Essas alterações geraram algumas diferenças nas métricas do período de validação comparadas com o período de calibração.

Os valores de Pbias, MSE, KGE e sofreram maiores oscilações, quando comparados os períodos de calibração e validação. O Pbias variou 13,98%, indicando que na validação o modelo de forma geral passou a superestimar as vazões, enquanto o MSE variou 0,31 diminuindo a acurácia das vazões simuladas e apresentando maior sensibilidade aos grandes erros e o KGE variou negativamente, diminuindo 0,11 resultando em um aumento leve nos erros, na correlação linear, viés e variabilidade no período de validação.

As métricas NSE e r em ambos os períodos se mantiveram parecidas, 0,86 e 0,93 respectivamente na calibração e 0,82, 0,94 na validação ambos os resultados sugerem uma concordância forte entre os resultados observados e simulados, pois, segundo Filho e Junior (2009) valores de r acima de 0,7 são considerados valores fortes e ainda quanto mais próximo de 1 chegar, maior a correlação entre os valores. De acordo com o critério de Moriasi *et al.* (2007), quando $NSE > 0,50$, o modelo pode ser considerado aceitável.

Em geral, o aumento MSE é fortemente influenciado pela diferença entre os picos de vazão observada e simulada, por exemplo, os eventos que apresentaram $Q = 10,2$ mm/dia em 01/10/2001 (Figura 17) $Q = 21,5$ mm/dia em 08/06/2014 (Figura 18). Mesmo assim, no período de validação, o HYMOD2 simulou satisfatoriamente os picos de vazão. Por outro lado, o modelo capturou satisfatoriamente o comportamento e a magnitude das vazões de base, principalmente no período de validação (Figura 18).

5.3 Impacto das mudanças climáticas sob às vazões

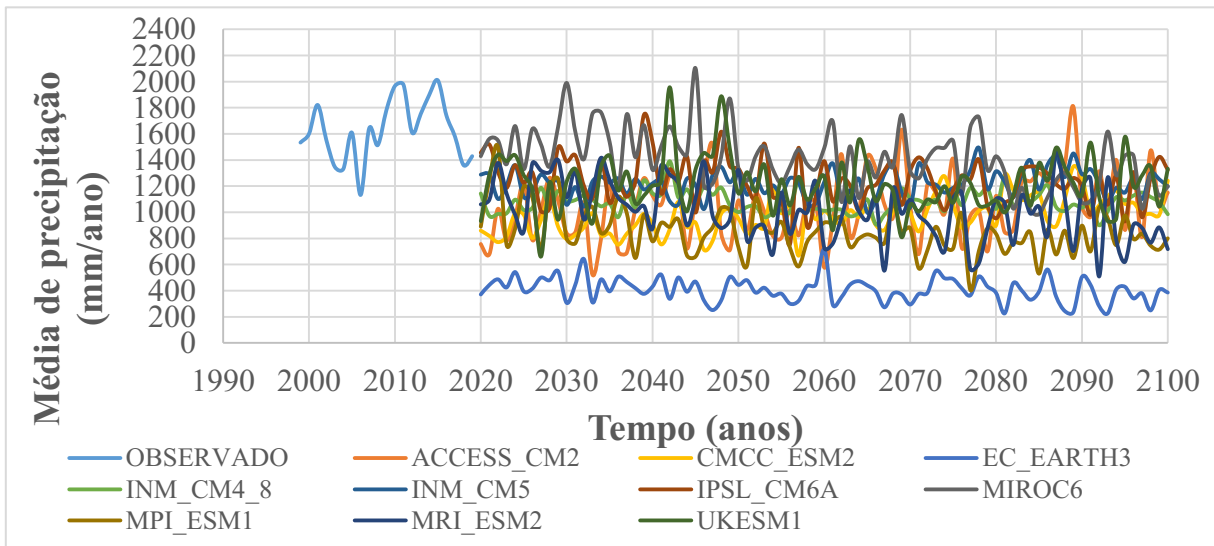
Após a calibração do modelo hidrológico, buscou-se os resultados, de previsões futuras de precipitação, temperaturas máximas, mínimas e médias, do sexto relatório e avaliação (AR6) do (IPCC 2021).

Foram utilizados 10 modelos climáticos globais, os quais possuem as previsões de precipitação e temperaturas, máximas, mínimas e médias diárias até o ano de 2100. Para todos os 10 modelos foram utilizadas as projeções futuras para dois cenários, o SSP2 - 4.5 que é uma projeção média de emissões e o SSP5 - 8.5 que é o cenário mais pessimista, com altas emissões de CO₂ no meio ambiente.

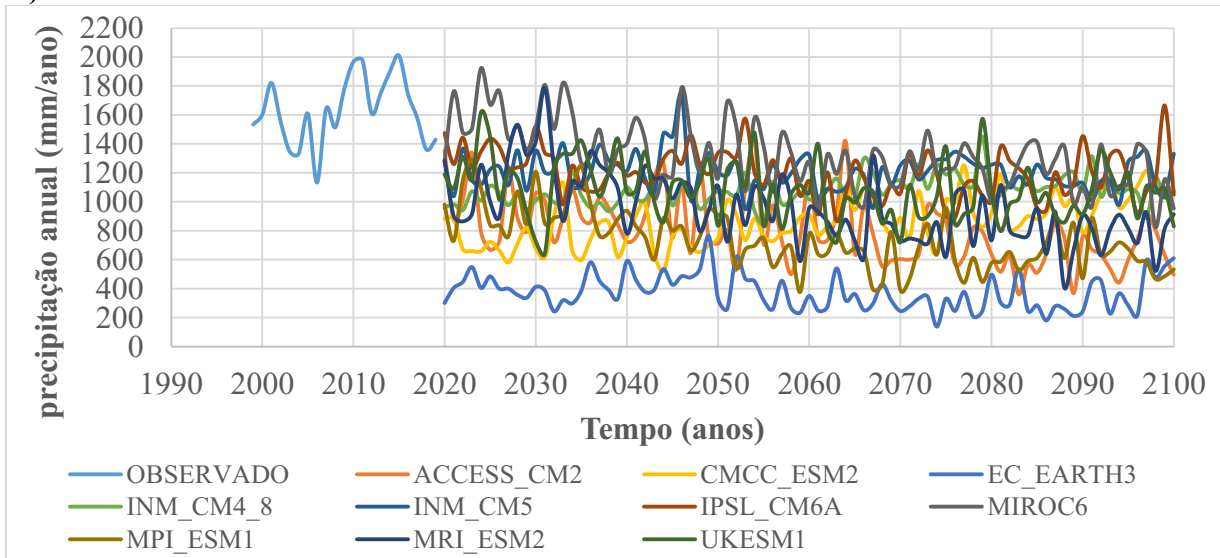
5.3.1 Análise das projeções de precipitação

A Figura 19 a e b apresentam as projeções de acumulados anuais de precipitação dos 10 modelos climáticos globais para o cenário SSP2-4.5 e SSP5 -8.5, até o ano de 2100. Os primeiros 21 anos (1999 – 2019) apresentam os acumulados anuais observados na bacia. Na sequência de 2020 – 2100 aparecem as projeções de todos os modelos climáticos, pode-se observar que existem alguns modelos mais otimistas e outros bem pessimistas com relação à quantidade de chuva projetada para os próximos anos.

Figura 19 - Projeções de precipitação dos modelos climáticos globais nos próximos 80 anos (2020 – 2100)
a) Cenário SSP2-4.5



b) Cenário SSP5-8.5



Fonte: o Autor (2021).

Através da Figura 19 percebe-se que todos os modelos climáticos tendem a projetar médias anuais de precipitação menores das quais a bacia registrou até o momento, ou então que já foram observadas na bacia de estuda, ou seja todos os modelos climáticos globais, independentemente do cenário projetado, indicam que poderá existir uma diminuição do volume de chuvas nos próximos anos.

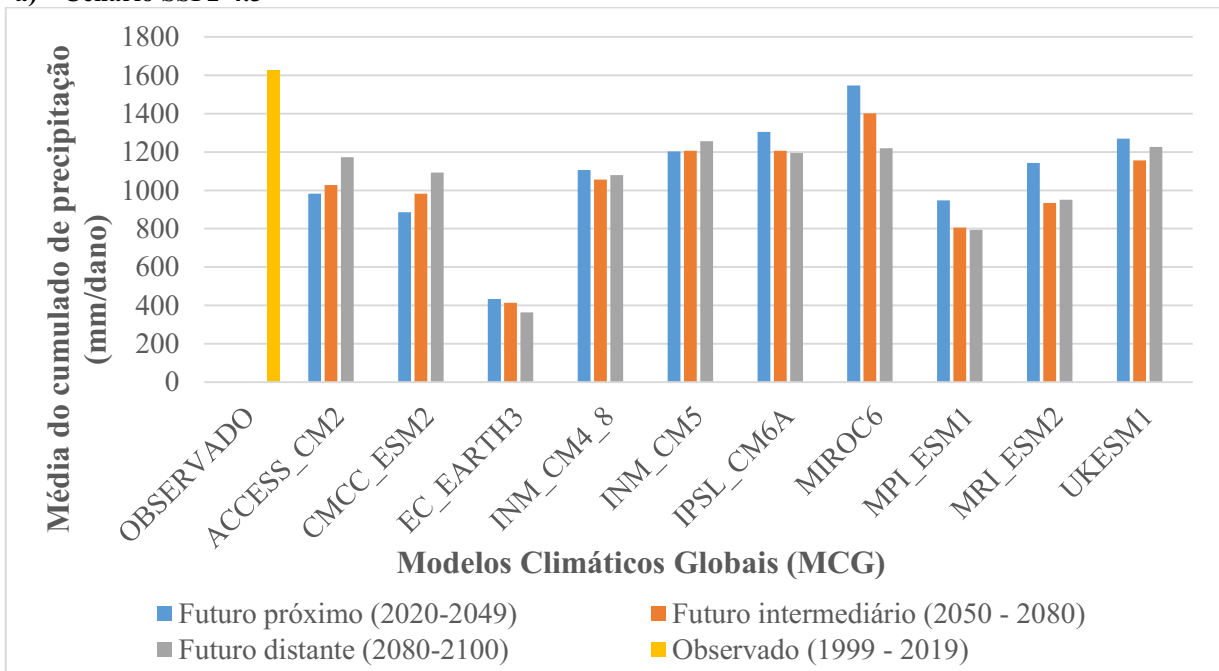
Fazendo a comparação entre os dois cenários, percebe-se que o cenário mais extremo o SSP5-8.5 indica uma acumulo de precipitações ainda menor que o cenário SSP2-4.5, através do gráfico da Figura 19 b é possível notar que existe uma tendência para diminuir os acumulados de chuva com o passar dos anos em todos os modelos climáticos globais.

Alguns modelos indicam um cenário mais pessimista, como por exemplo, o modelo climático EC_EARTH3 Figura 19b, o qual prevê uma variação de 137,14 mm/ano no ano de 2018 até 760,82 mm/ano no ano de 2049. Valores muito abaixo dos observados até o momento, uma vez que a média anual de precipitação nunca ficou abaixo de 1100 mm/ano e na maioria dos anos sempre superou os 1500 mm/ano de precipitação. Outros modelos também não apresentam previsões muito favoráveis como por exemplo o MPI_ESM1 e o modelo ACCESS_CM2.

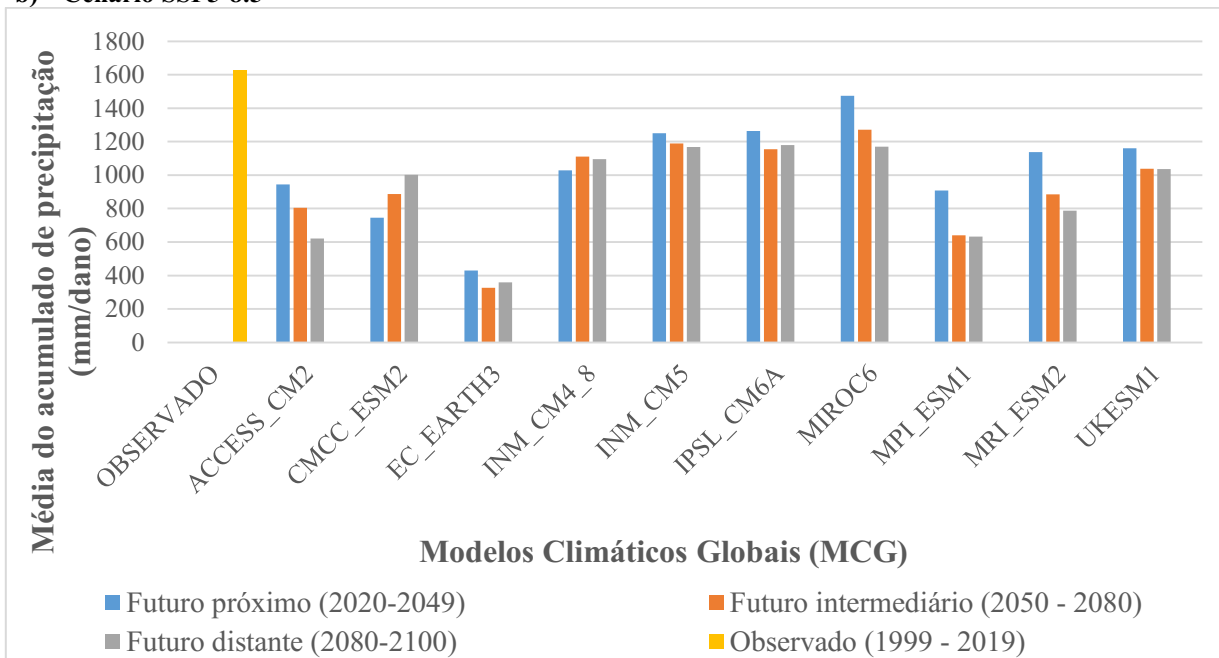
Já outros modelos apresentam previsões pluviométricas mais conservadoras, casos dos modelos CMCC_ESM2, INM_CM4_8, MRI_ESM2, UKESM. Os demais modelos, MIROC6, IPSL_CM6A e INM_CM5 apresentaram resultados mais otimistas, onde apesar de haver diminuição das médias anuais de precipitação, não houve uma disparidade tão grande entre as médias observadas, destaca-se o modelo MIROC o qual apresentou as maiores médias anuais de precipitação, chegando a projeção de 1923,05 mm/ano para o ano de 2024.

A Figura 20 a e b apresenta de uma forma mais resumida os volumes acumulados médios, que cada modelo climático projeta para cada um dos períodos futuros analisados, evidenciando ainda mais as mudanças projetadas para os regimes de chuvas da bacia.

Figura 20 - Projeções de precipitação dos modelos climáticos globais nos próximos 80 anos (2020 – 2100)
a) Cenário SSP2-4.5



b) Cenário SSP5-8.5



Fonte: o Autor (2021).

Através da Figura 20 a e b podemos perceber que as projeções futuras de todos os modelos climáticos indicam redução da quantidade média de precipitação na bacia. Destaca-se também que o modelo MIROC 6 é o que indica pouca variação nos acumulados médios, porém o modelo ECEARTH_3 indica uma grande diminuição nas precipitações diminuindo

aproximadamente 4 vezes os volumes médios de chuva quando comparado com o período observado.

Fazendo a comparação entre os dois cenários nota-se que as projeções de precipitação variam semelhantemente para cada futuro, porém as projeções do cenário SSP5-8.5 indicam volumes médios sempre menores do que os do cenário SSP2-4.5, demonstrando que quanto maior for o impacto ambiental no planeta terra, menor o volume de chuva projetado para os próximos anos.

Na Figura 20b, com exceção dos modelos CMCC_ESM2 e INM_CM4_8, todos os outros apresentam uma diminuição gradativa no volume de precipitação conforme for o futuro mais distante, com isso a média de precipitação anual nos próximos 30 anos, apresenta valores maiores do que nos futuros intermediários e distantes. Isso mostra que a maioria dos MCG's estão estimando menos volume de chuva conforme o passar do tempo, o que gera uma preocupação muito grande, pois se atualmente já existem períodos de escassez hídrica que geraram grandes problemas sociais, no futuro esses eventos podem ser ainda mais constantes, caso se confirmem as previsões de diminuição dos volumes de precipitação.

5.3.2 Análise das projeções de temperatura e evapotranspiração potencial

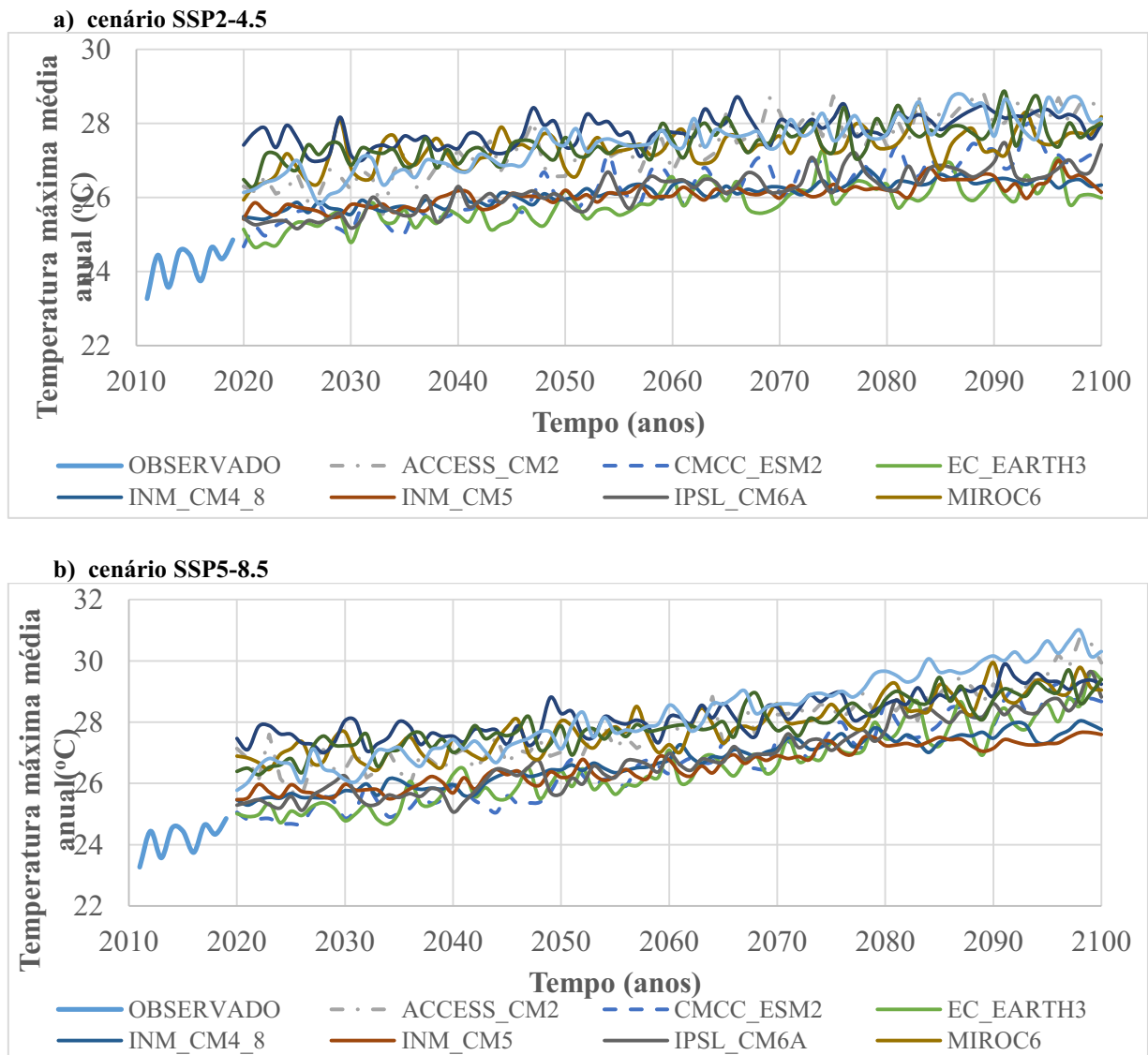
Para o cálculo da ET_o foi utilizada a metodologia de Hargreaves e Samani (1985) (26). Para determinar que essa metodologia de cálculo apresenta boa correlação com a equação de Penman-Monteith (FAO-56) (ALLEN *et al.* 1998), foram comparados os valores obtidos de ET_o para ambas as metodologias. O APÊNDICE B apresenta os valores obtidos no período de 2011 até 2019, bem como o coeficiente de determinação $R^2 = 0,881$ expressando que o modelo linear explica 88,10% da variância da variável.

De maneira geral o cálculo de ET_o pela equação de Hargreaves-Samani (1985) superestima um pouco os valores de ET_o , comparado com os valores da equação de Penman-Monteith. De maneira geral os resultados são muito expressivos uma vez que o valor de $R^2 = 0,881$ ficou muito próximo de 1 e explica 88,1% da variância dos valores ET_o no comparativo entre os dois métodos. Pode-se perceber que a linha de tendência dos valores de ET_o é praticamente paralela à linha laranja 1:1, linha da correlação perfeita, apenas deslocada para os valores de ET_o calculados por Hargreave-Samani. Isso nos mostra que os valores tendem

para um mesmo caminho, porém na maioria dos valores definidos por Hargreaves-Samani são superiores do que os definidos por Penman-Monteith, mas com pouca variação, possibilitando a utilização de ambas as equações.

Sendo assim para o cálculo dos valores de ET_0 utilizou-se as projeções futuras de temperatura máxima e mínima diárias de cada um dos Modelos Climáticos Globais (MCGs), que estão apresentadas na Figura 21 a e b e Figura 22 a e b respectivamente. O valor da radiação solar no topo da atmosfera foi calculado para cada dia juliano do ano, conforme a equação número 12, apresentada no item 4.2.

Figura 21 - Projeções futuras dos MCGs, das temperaturas máximas anuais médias por ano no período de 2020 até 2100



Fonte: o Autor (2021).

Todos os MCGs apresentam um aumento das temperaturas médias máximas anuais e tendem a seguir o aumento que também é observado nas temperaturas máximas médias observadas no período de 1999 até 2019, ou seja sabe-se que nos últimos anos houve aumento de temperaturas e que esse aumento seguirá nas projeções futuras dos modelos climáticos. O aumento das temperaturas de uma certa maneira piora os cenários de acumulo de água nos reservatórios uma vez que os aumentos de temperatura aumentam os valores de evapotranspiração da água, aumentando os fluxos de saída do balanço hidráulico da bacia.

Além do mais a alta das temperaturas médias impacta no derretimento das geleiras e aumento do nível do mar, outro parâmetro analisado pelos órgãos governamentais quando o assunto é as mudanças climáticas.

Nesse contexto no cenário mais pessimista alguns MCGs projetam cenários mais preocupantes para os próximos 80 anos, casos do modelo UKESM1, MPI_SM1 e ACCESS_CM2 do cenário SSP5-8.5. Em especial o primeiro modelo citado anteriormente que apresenta um aumento de aproximadamente 2 graus centígrados médios a cada período analisado, começando com a média de 24 °C no período dos dados observados, passando para 26 no futuro próximo, 28 °C no futuro intermediário e uma média de 30 °C no período futuro próximo, representando um aumento de 6 °C na média das temperaturas máximas dentro dos próximos 80 anos. Sendo um aumento muito grande, 4 vezes maior do que os limites extremos estabelecidos nas convenções sobre o clima que é realizada pelos principais países do mundo.

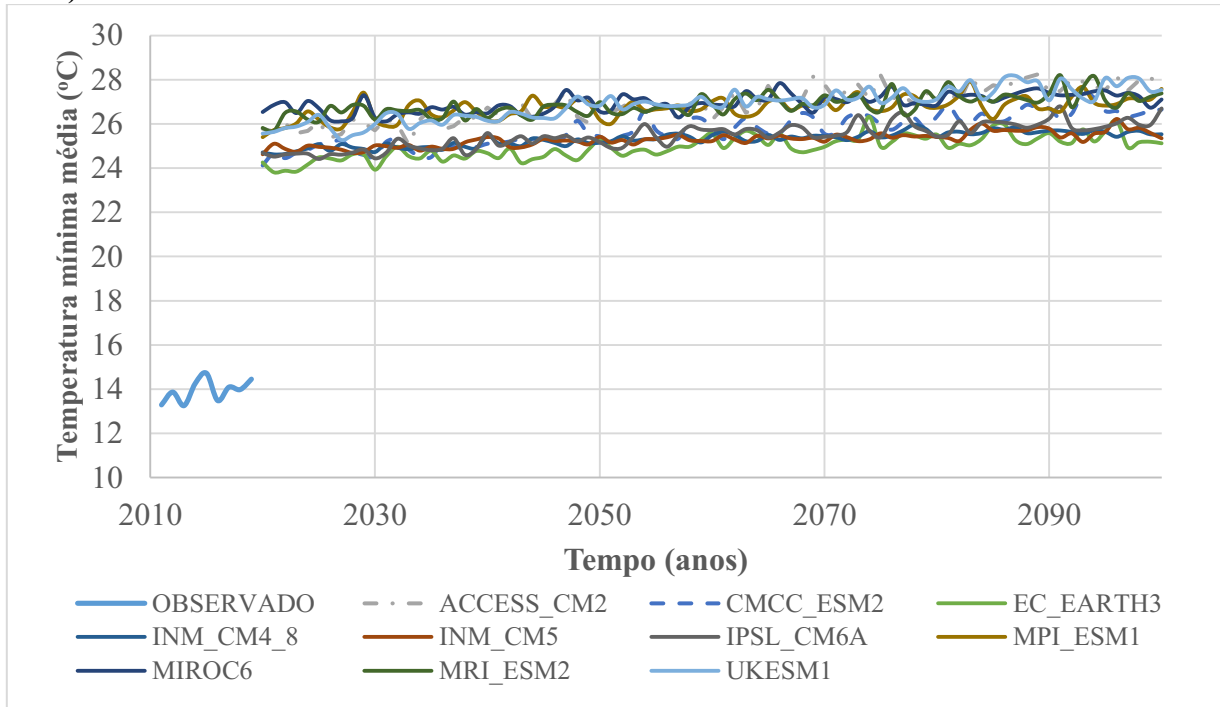
Dentre todos os modelos aquele que apresenta a menor projeção de aumento de temperaturas máximas é o INM_CM5 que projeta uma variação média de 2 graus centígrados dentro dos próximos 80 anos, que também ultrapassa os limites mencionados de temperaturas acordado entre os países.

As Figura 21 a e b apresentam a mesma tendência de elevação da média das temperaturas máximas anuais, porém, para o cenário de emissão SSP2-4.5 temos um aumento menor na temperatura para os próximos anos, variando entre 4 °C e 1,5 °C para o modelo mais pessimista e para o modelo mais otimista respectivamente.

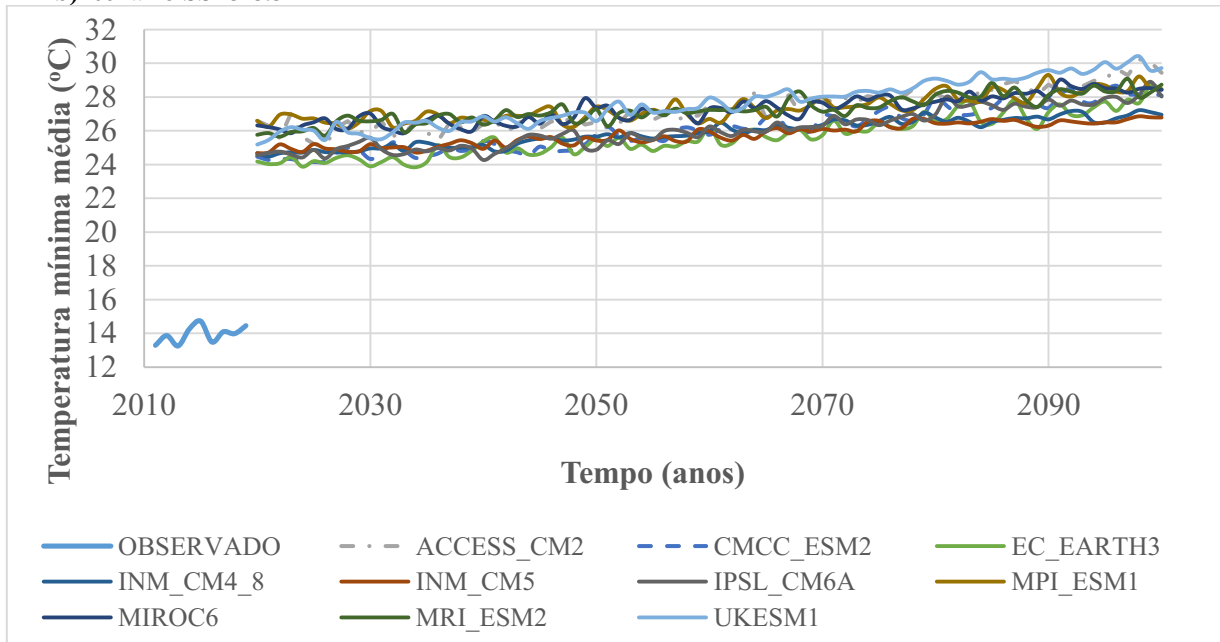
As temperaturas mínimas seguem as mesmas projeções de aumento das temperaturas máximas e podem ser observadas na Figura 22.

Figura 22 -: Projeções futuras dos MCGs, das temperaturas mínimas diárias médias por ano no período de 2020 até 2100

a) cenário SSP2-4.5



b) cenário SSP5-8.5



Fonte: o Autor (2021).

Analisando o gráfico da Figura 22 é possível notar que existe uma grande diferença entre os valores de temperaturas mínimas encontradas no período observado com a faixa de valores

que os MCGs projetam para esta região. Enquanto no período observado observam-se valores médios em torno dos 14 °C nos períodos de projeções esses valores variam de 24 até 30 °C.

Num geral todos os MCGs simulam um aumento também das temperaturas mínimas e cada modelo em específico segue a mesma tendência das temperaturas máximas, obtendo pouca diferença nos valores diários entre as temperaturas máximas e mínimas. Os modelos que mais se destacam também são os mesmos das temperaturas máximas, aonde o UKESM1 apresenta o pior cenário e o INM_CM5 o cenário com menos aumento de temperatura.

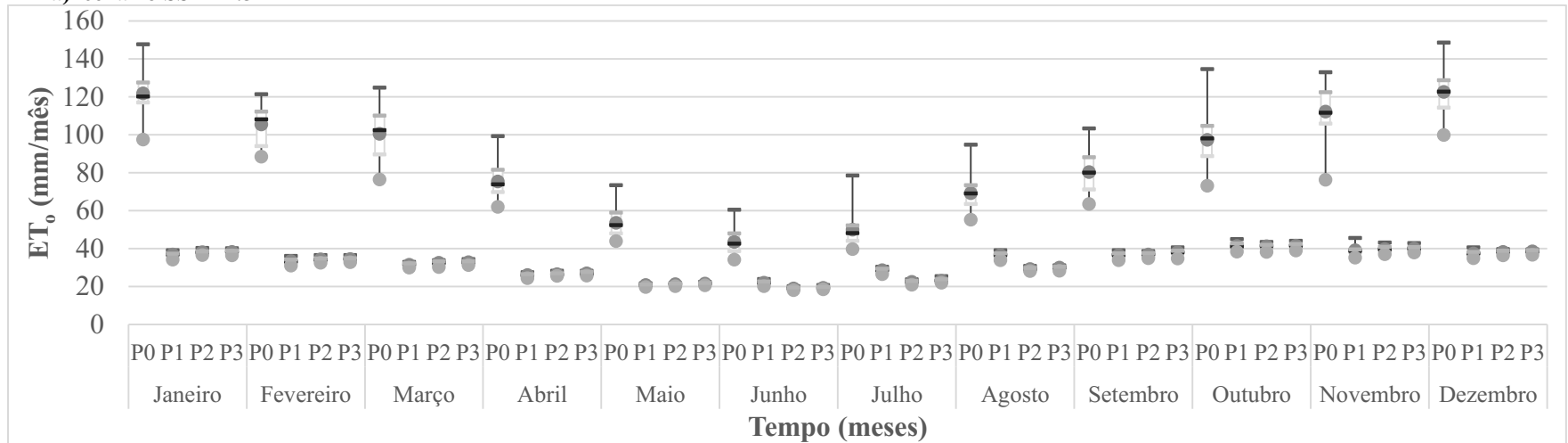
Pelo fato de obtermos pouca variação entre as temperaturas máximas e mínimas projetadas pelos MCGs, os cálculos de ET_o , utilizando a metodologia de Hargreaves e Samani, apresentam valores baixos comparado com os valores encontrados com os dados observados. Enquanto que no período de 1999 até 2019, são encontrados valores de ET_o diárias variando entre valores de 0,5 até 6 mm/dia, nos períodos de projeções futuras esses valores variam de 0,01 até no máximo 2,2 mm/dia. Essa diferença pode ser observada nas Figura 23 e Figura 25.

A ET_o foi calculada para todos os MCG's, porém para facilitar a apresentação e discussão dos resultados serão apresentados apenas os valores de MCGs, um com projeções pessimistas com grandes aumentos de temperaturas máximas e mínimas (Figura 23), um MCG com projeções intermediárias (Figura 24) e um com projeções menos pessimistas, com poucas variações de temperaturas (Figura 25). Os valores de ET_o dos outros MCGs serão disponibilizados no APÊNDICE C para o cenário SSP2-4.5 e no APÊNDICE D para o cenário SSP5-8.5.

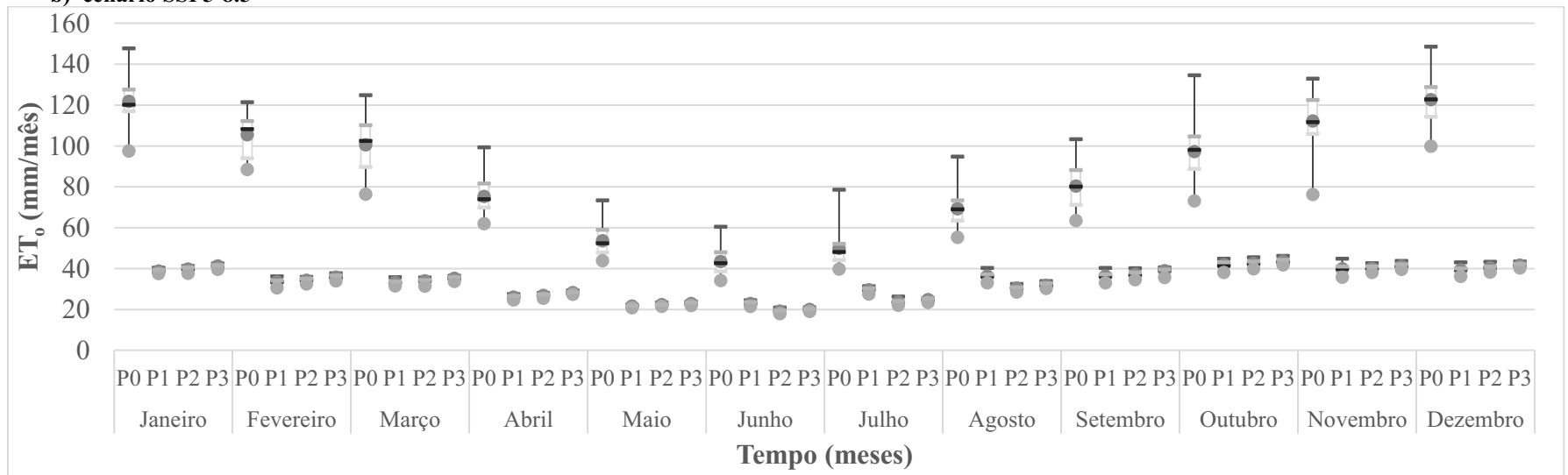
O MCG que apresenta o cenário mais pessimista é o UKESM1, como já relatado anteriormente os valores projetados para ET_o desse modelo estão apresentados na Figura 24, aonde os valores de ET_o são apresentados separados por mês do ano e pelo período analisado. No P0 são apresentados os valores da soma mensal de ET_o , em mm/dia, para o período observado (1999 – 2019), P1 é a representação dos valores projetados para os acumulados mensais de ET_o no período do futuro próximo (2020 – 2049), P2 é o futuro intermediário (2050 – 2079) e P3 é o futuro distante (2080 – 2100).

Figura 23 - Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas do MCG UKESM1 no período de 2020 até 2100

a) cenário SSP2-4.5



b) cenário SSP5-8.5



Fonte: o Autor (2021).

Através do gráfico *boxplot* apresentado na Figura 23 nota-se que em todos os meses do ano o período P0 apresenta uma variação bem maior dos valores encontrados, tanto dentro quartil médio que representa o intervalo com 75 % de todos os valores encontrados para o respectivo mês, quanto nos valores máximos, mínimos e nas medianas. Já nos períodos de projeção P1, P2 e P3 a soma de ET_o mensal não apresenta grandes variações e os valores ficam mais concentrados.

Tanto o período P0 quanto os períodos projetados para o futuro, se comportam de forma semelhante, onde nos meses mais quentes do ano, (outubro até março) são estimados os maiores valores de ET_o e nos meses mais frios (abril até setembro) os períodos com os valores menores de ET_o , isso acontece pelo fato de termos maiores e menores amplitudes térmicas para esses períodos respectivamente, ocasionados pelas características sazonais de temperatura presentes na região

Desta maneira percebe-se que mesmo o MCG mais pessimista, que prevê o maior aumento de temperaturas mínimas e máximas, não gera valores de ET_o muito elevado pois não existe uma grande variação de temperatura entre os valores de temperatura máxima e mínima, a variação em ambas as temperaturas é proporcional, permanecendo sempre uma variação de 0,2 até 2 graus centígrados.

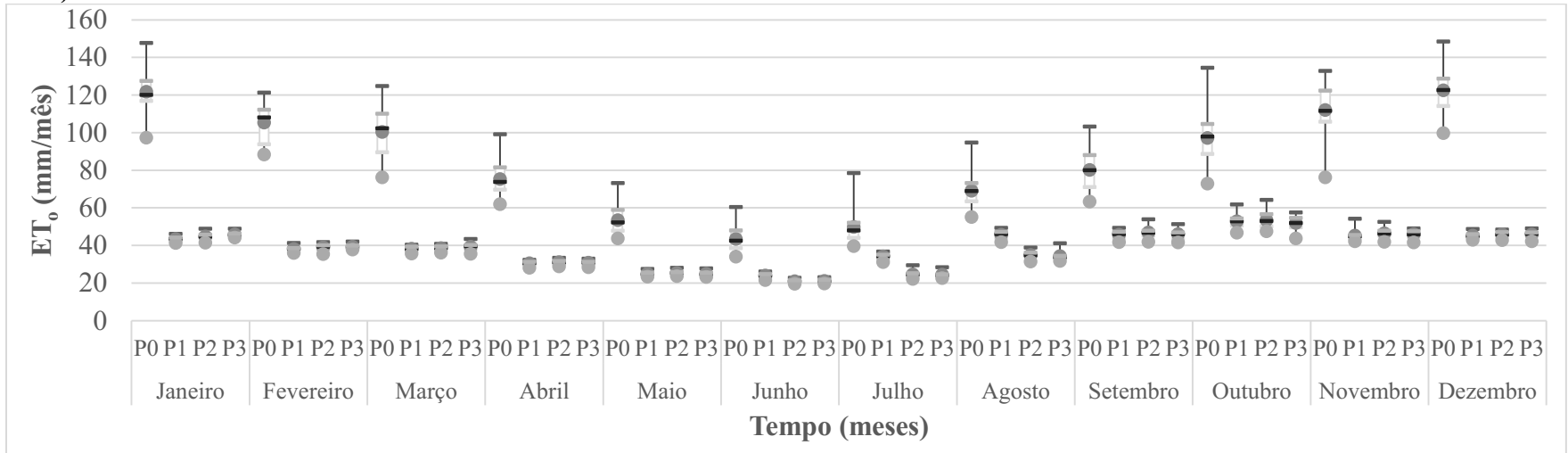
A Figura 24 apresenta os resultados obtidos utilizando os valores projetados para um MCG intermediário, o EC_EARTH3, modelo que indica uma variação mensal mediana das temperaturas máximas e mínimas. Mesmo assim esse modelo apresentou valores mensais de ET_o superiores ao MCG anterior que apresentava o cenário mais pessimista, isso acontece pois nesse modelo existe uma amplitude maior entre a temperatura máxima diária e a mínima diária, aumentando os valores de ET_o .

E a Figura 25 apresenta os resultados do MCG que obteve as menores variações, tanto de temperatura máxima quanto de temperatura mínima e também apresenta valores mensais estimados de ET_o bem abaixo do que já foi observado na bacia.

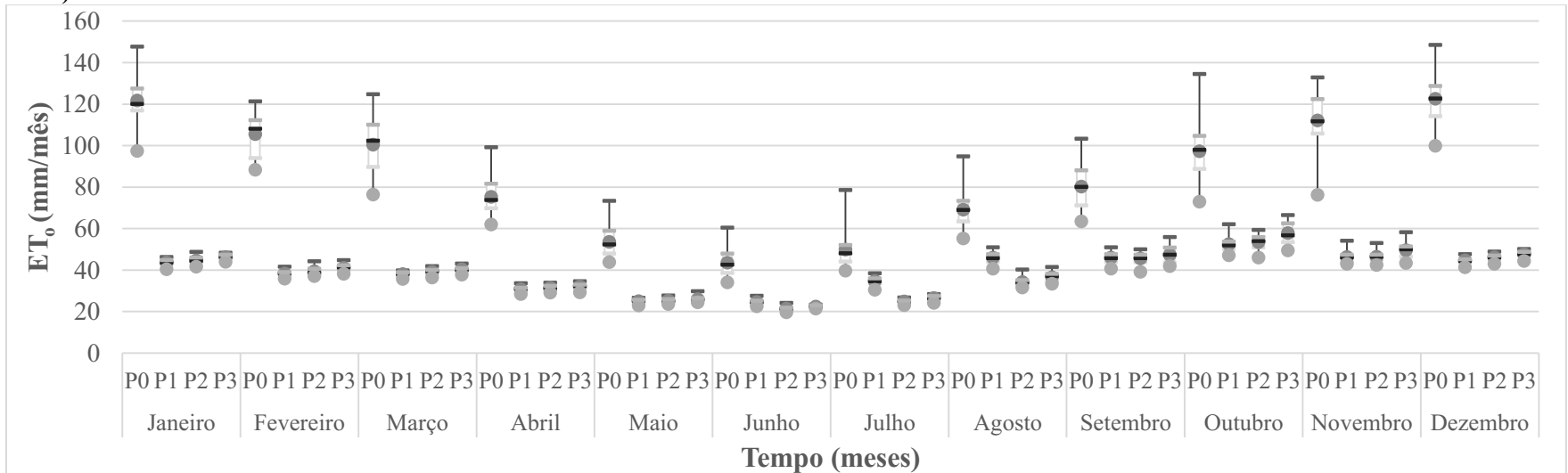
Analisando os MCG é possível concluir que todos eles simulam valores de ET_o com o mesmo período cíclico, onde no mês de outubro apresentam o maior acumulado de evapotranspiração e no mês de junho o menor acumulado. Percebe-se também que todos eles estão simulando valores de evapotranspiração diária muito abaixo normal já registrado.

Figura 24 - Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas do MCG EC_EARTH3, no período de 2020 até 2100

a) Cenário SSP2-4.5



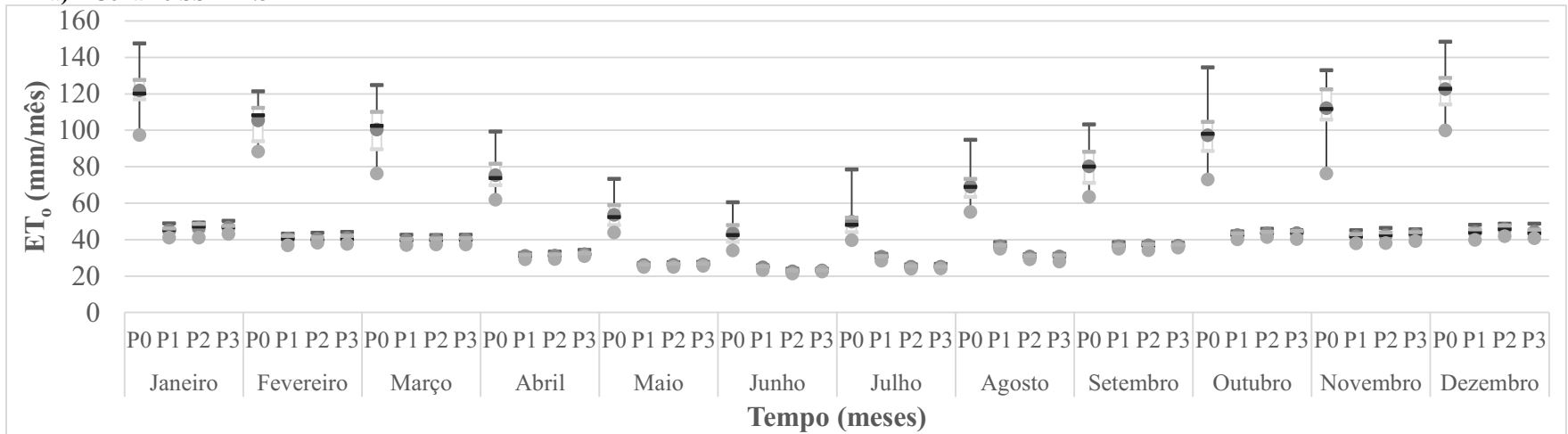
b) cenário SSP5-8.5



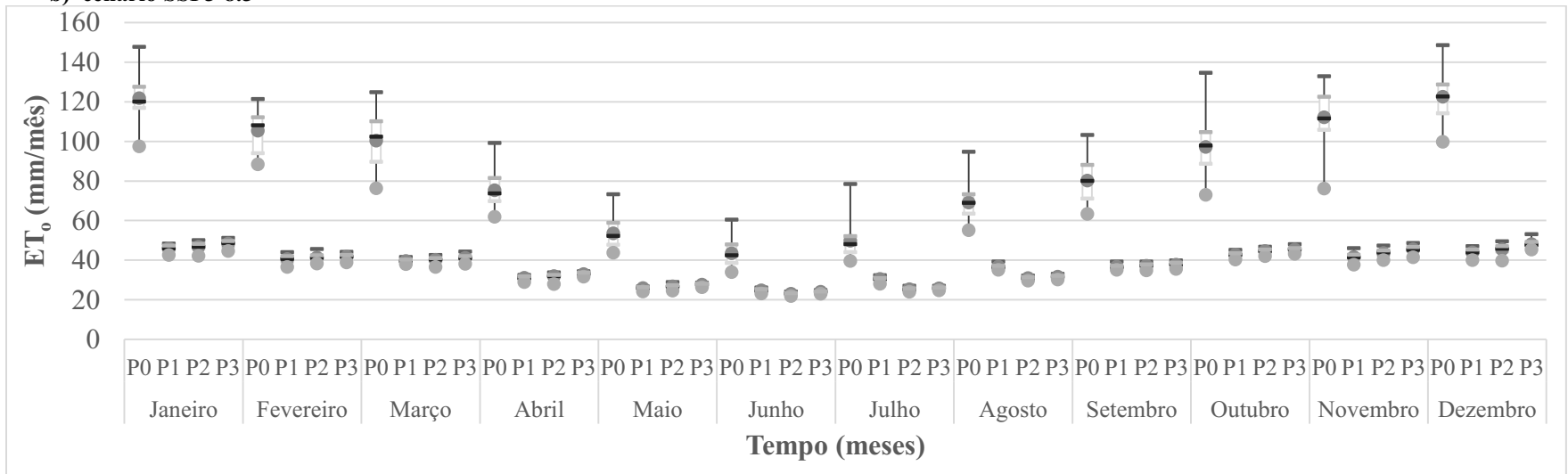
Fonte: o Autor (2021).

Figura 25 - Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas do MCG INM_CM5 para o cenário RCP 8.5, no período de 2020 até 2100

a) Cenário SSP2-4.5



b) cenário SSP5-8.5



Fonte: o Autor (2021).

Considerando os impactos causados no balanço hídrico da bacia, quanto menor for os valores de ET_o simulados, mais vazão afluyente estará chegando na usina, pois, a evapotranspiração é uma forma de saída de água da bacia, através da transpiração das plantas e da evaporação dos rios, lagos e reservatórios de água. Desta maneira as mudanças climáticas estariam favorecendo o aumento da vazão na bacia em função dos valores de ET_o , baixos, projetados na bacia.

5.3.3 Análise das projeções de vazões

Com os dados da calibração do modelo hidrológico e com os valores projetados das variáveis de entrada do modelo, a precipitação e ET_o , foram simuladas as projeções de vazões de cada MCG no HYMOD 2.

Nas análises anteriores de cada variável de entrada definimos que as projeções de precipitação indicam uma diminuição nos volumes de chuvas para os próximos anos, o que diminui o volume de vazão. Na análise da ET_o observa-se também que as projeções tendem a diminuir os acumulados dessa variável, o que diminui as saídas de água da bacia e favorece o aumento das vazões.

Após compilação desses pontos positivos e negativos, como resposta do HYMOD 2, projeta-se a vazão afluyentes chegando na UHE Foz do Areia, ou seja, transformam-se as chuvas e evapotranspiração futuras em vazão para esta bacia de estudo.

As vazões afluyentes projetadas pelos MCG indicam que haverá mudanças nos padrões de volumes observados até o momento, em todas as projeções, foram observados aumento nos períodos de duração com baixa vazão (inverno), com acumulados mensais menores. Também houve a diminuição do período de duração chuvoso (outono/verão), porém com acumulados mensais na maioria dos casos maiores, comparados com os dados que foram observados até o momento.

Ou seja, as vazões afluyentes da usina tendem a diminuir nos períodos em que também não são registrados grandes acumulados de chuvas e tendem a ser mais intensas e volumosas no período em que são registradas as maiores intensidades pluviométricas.

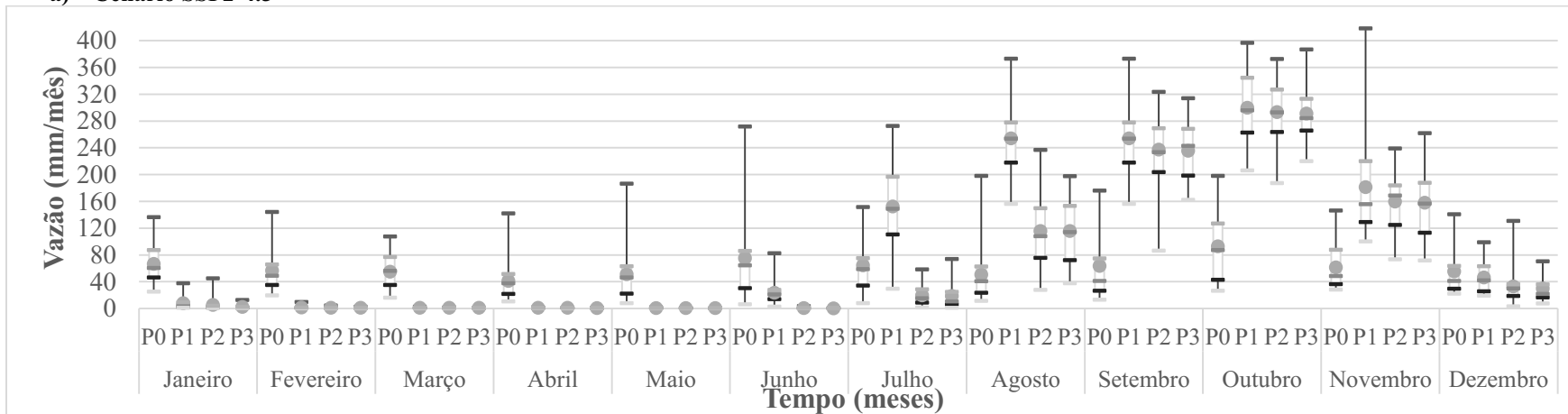
As vazões foram projetadas para todos os MCG,s, porém para facilitar a apresentação e discussão dos resultados serão apresentados apenas os gráficos de três MCGs, um com projeções pessimistas, com a diminuição de vazões afluyentes na usina em todos os períodos do ano (Figura

26), um MCG com projeções intermediárias (Figura 27) e outro MCG com projeções menos pessimistas, com aumento das vazões projetadas, quando comparado com o período observado (Figura 28). Os valores de vazão projetadas dos outros MCGs serão disponibilizados no APÊNDICE E e APÊNDICE F.

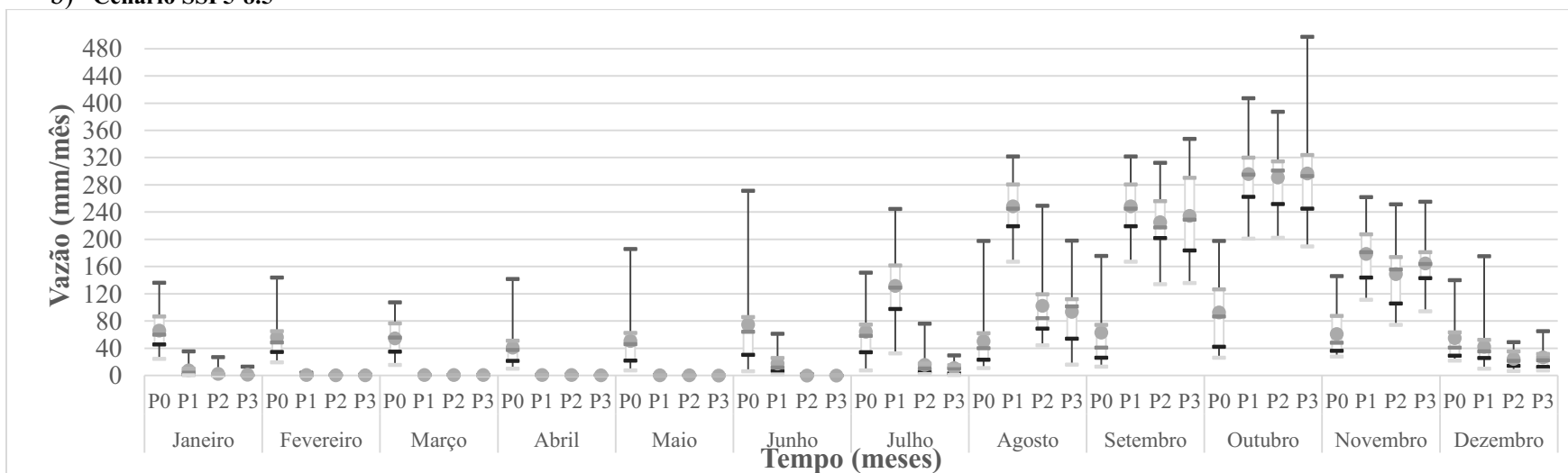
A Figura 26 a e b apresenta as projeções dos acumulados mensais de vazão, separados pelos períodos P0 (observado), P1 (futuro próximo), P2 (futuro intermediário) e P3 (futuro distante) para o MCG IPSL_CM6A considerando um cenário SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Dentre os 10 modelos esse é o que apresenta maiores variações nos acumulados mensais, ou seja, é o que projeta as menores vazões no período dos meses de abril, maio e junho e também o que projeta as maiores vazões no período dos meses de setembro, outubro e novembro.

Figura 26 - Projeções de vazões afluentes para a UHE Foz do Areia considerando os impactos das mudanças climáticas projetados pelo MCG IPSL_CM6A, no período de 2020 até 2100

a) Cenário SSP2-4.5



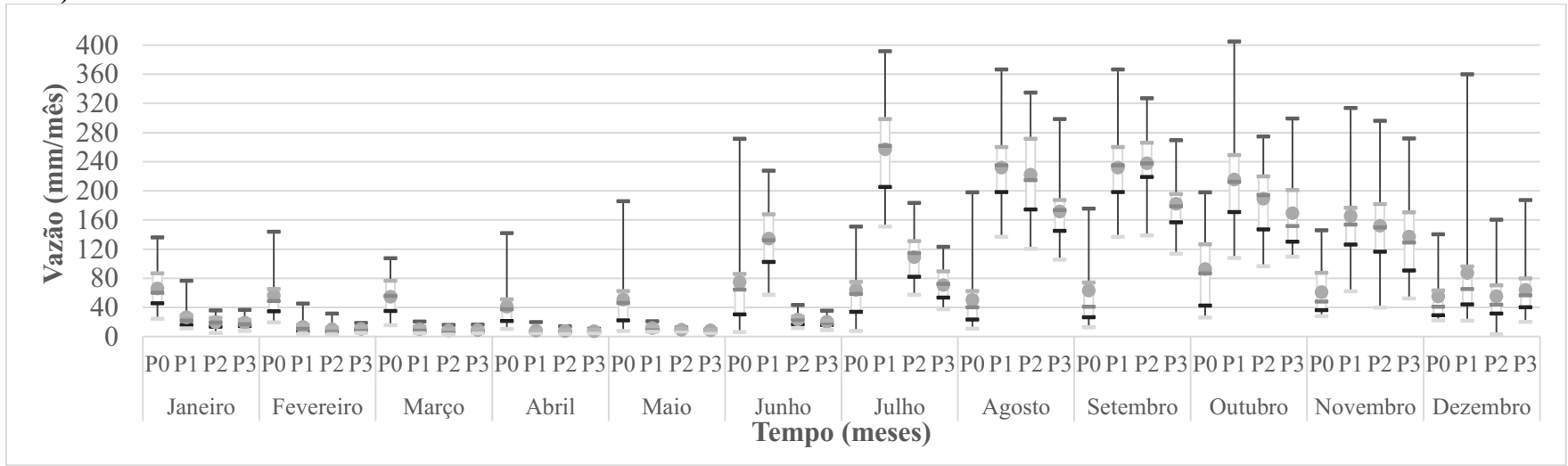
b) Cenário SSP5-8.5



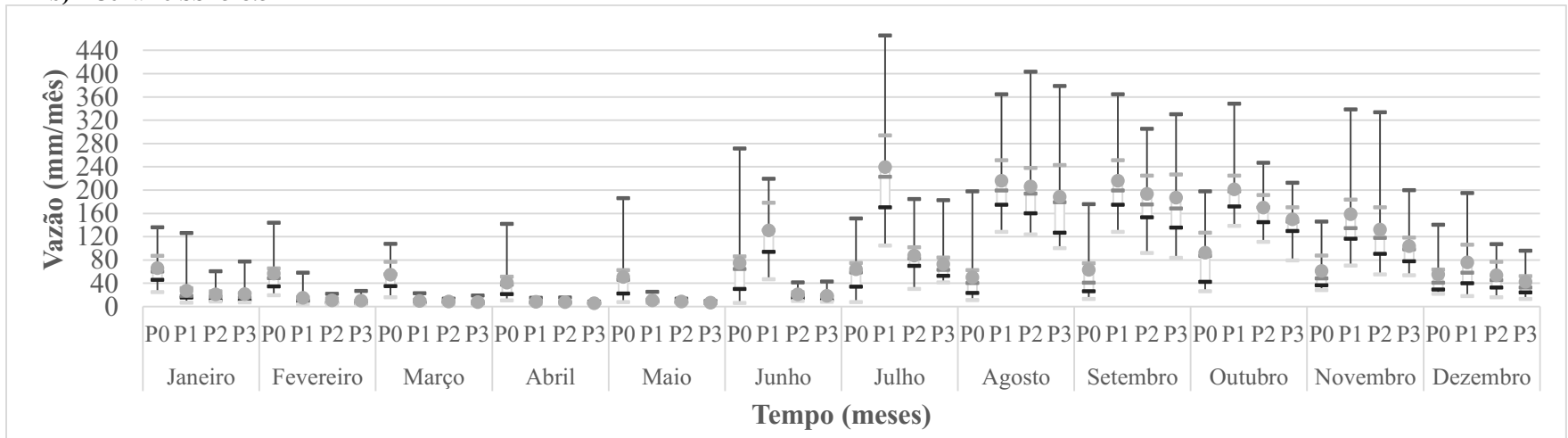
Fonte: o Autor (2021).

Figura 27- Projeções de vazões afluente para a UHE Foz do Areia considerando os impactos das mudanças climáticas projetados pelo MCG MIROC6, no período de 2020 até 2100

a) Cenário SSP2-4.5



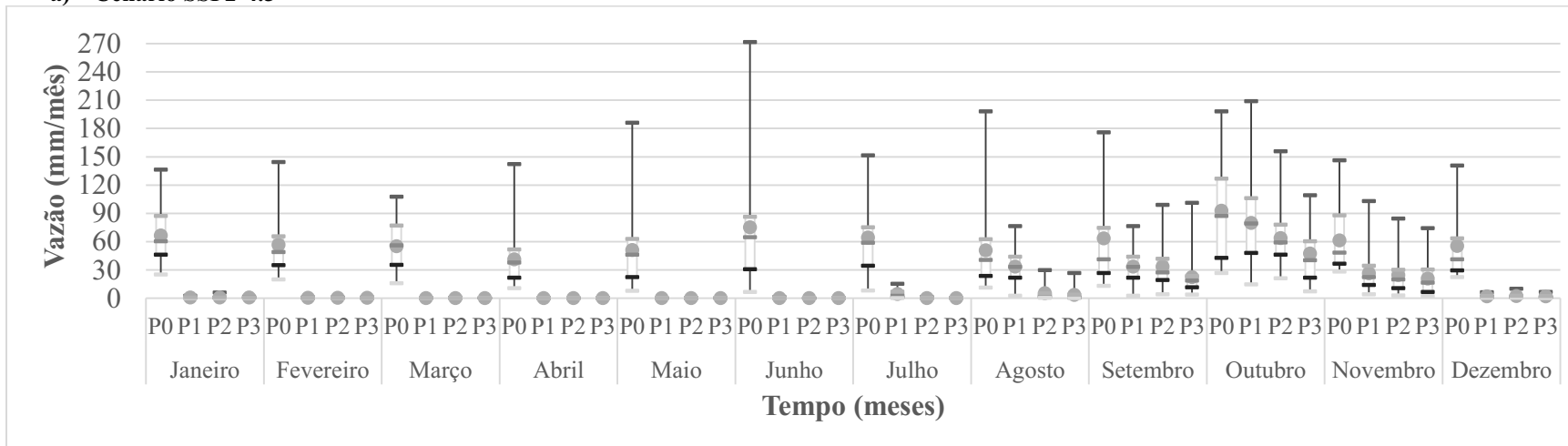
b) Cenário SSP5-8.5



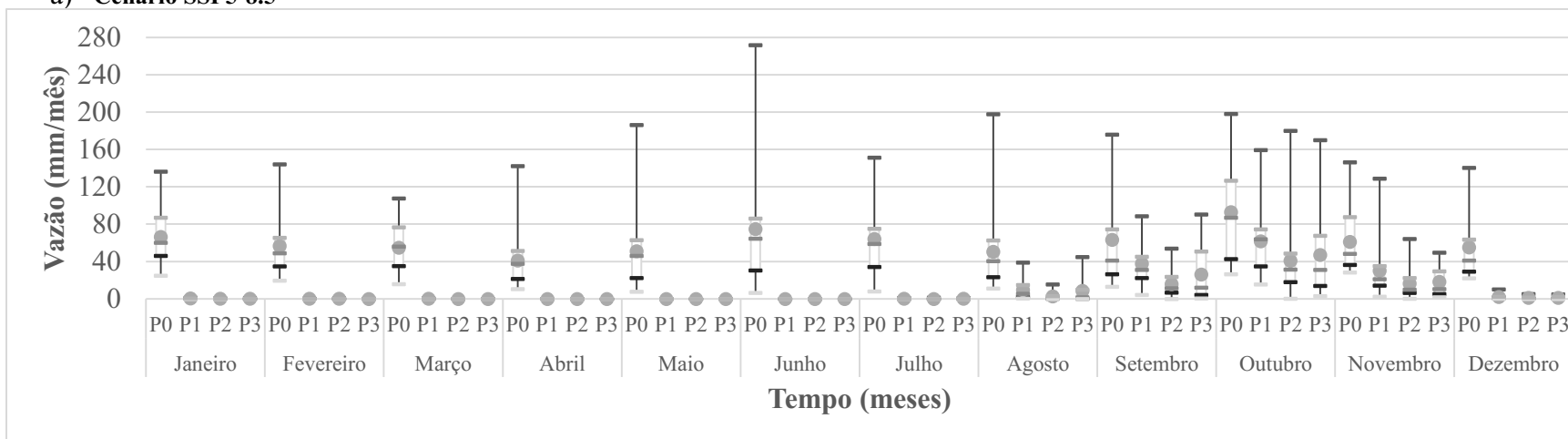
Fonte: o Autor (2021).

Figura 28 - Projeções de vazões afluentes para a UHE Foz do Areia considerando os impactos das mudanças climáticas projetados pelo MCG EC_EARTH, no período de 2020 até 2100

a) Cenário SSP2-4.5



a) Cenário SSP5-8.5



Fonte: o Autor (2021).

Analisando os gráficos *boxplot* de vazões gerados, nota-se que não existem grandes diferenças entre os dois cenários analisados, o comportamento para ambos os cenários é semelhante nos três modelos climáticos globais, todos os modelos indicam os mesmos meses com vazões altas e vazões baixas, assim como no P0 que nos mostra os valores do período observado.

Quando comparamos os dois cenários de emissão de poluentes em cada MCG, observa-se que o cenário SSP5-8.5 na maioria das vezes apresenta menores valores de vazão para o mesmo período projetado, por exemplo na Figura 26b, no mês de outubro e no P2 temos um valor médio de 290,92 mm/dia enquanto que na Figura 26a, no mesmo mês e também no P2 temos um valor de 292,97 mm/dia. O mesmo acontece nos meses com projeções baixas de vazões, como pode ser visto na Figura 28a e b, no mês de maio, no P3, os valores de vazão são iguais a 0,0093 mm/dia e 0,0055 mm/dia respectivamente.

Um resultado bastante preocupante obtido e observado em todos os MCG são os baixos volumes de vazão afluente nos meses de janeiro até julho, em todos os casos as médias de vazões projetadas nestes meses são bem menores comparadas ao P0. Em alguns modelos esses períodos se prolongam até agosto e setembro. Isso acontece principalmente por influência das projeções de precipitação para este local, conforme já discutido anteriormente esses meses tenderão a receber acumulados bem menores de chuva o que impactará diretamente nas vazões deste período.

Por outro lado, para os meses de setembro, outubro, novembro e dezembro os resultados apresentam divergências em cada modelo. Na Figura 28a e b, por exemplo, as projeções indicam vazões médias menores do que o P0. Já nas Figura 26 e Figura 27, bem como na maioria dos outros modelos, que apresentam seus resultados no APÊNDICE E e APÊNDICE F, apresentam acumulados maiores de vazão nesses meses comparado ao P0, alguns modelos demonstram quase o dobro de chuvas nestes períodos já outros apresentam uma pequena diferença.

Outro resultado que também parece ser padronizado em todas as projeções é a diminuição dos volumes de vazão com o passar do tempo, ou seja, quando analisamos cada um dos meses separadamente podemos notar que o P1, (futuro próximo) apresenta um acúmulo de vazão maior que o P2 (futuro médio) que por sua vez apresenta volumes maiores que o P3 (futuro distante). Demonstrando assim que independentemente do MCG ou do SSP, quanto mais anos se passarem menores vazões são projetadas em todos os meses do ano. Um resultado que

pode trazer um alerta para a eficiência de geração de energia elétrica do reservatório da usina Foz do Areia.

De maneira geral os resultados obtidos de precipitação, evapotranspiração de referência e de vazão demonstram que as projeções futuras apontam para grandes variações de precipitação ao longo do ano, pouca variação de evapotranspiração e também grandes variações nas vazões afluentes. Como já comentado anteriormente essas variações aumentam a quantidade de meses com pouca precipitação, conseqüentemente pouca vazão e diminuem a quantidade de meses com grandes volumes de precipitação e conseqüentemente de vazão.

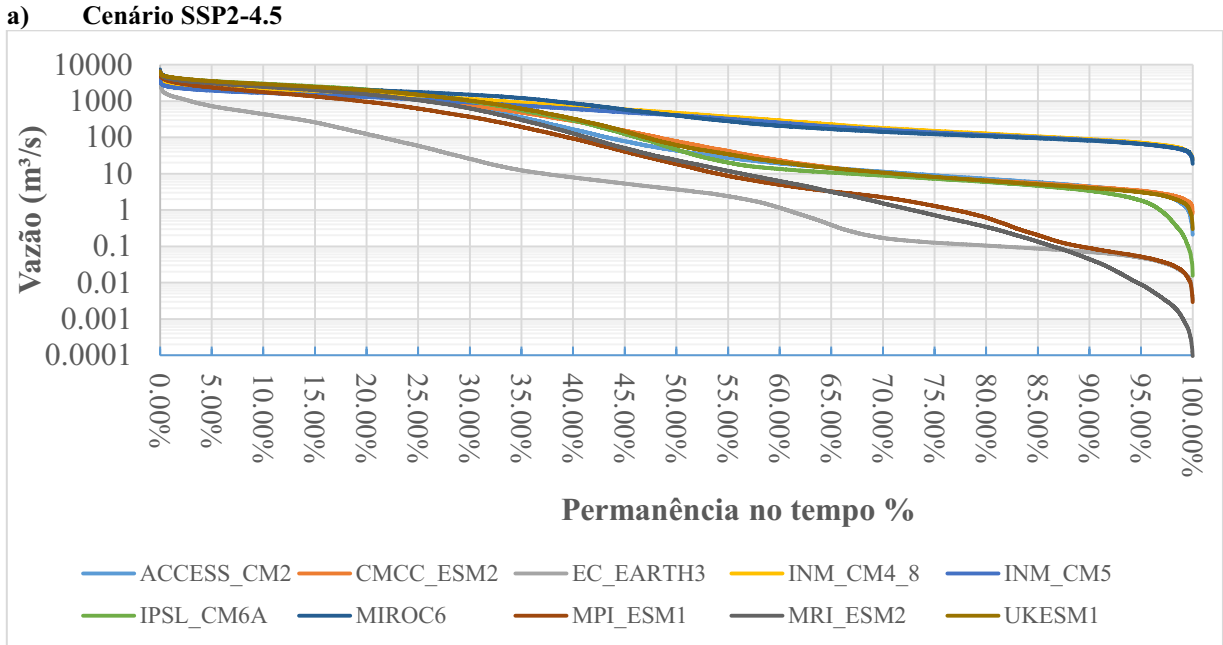
Apesar de os resultados apontarem poucos meses com grandes quantidades de precipitação, apresentam também mais meses com pouca precipitação e quando analisamos as médias anuais de precipitação, todos os modelos e cenários apontam para a diminuição das médias históricas de chuva. Impactando de forma negativa também diretamente nas vazões afluentes médias da usina.

Por fim, com base nas projeções geradas para a precipitação, evapotranspiração de referência e vazão, podemos perceber que quanto maior for o Cenário de poluição (SSP) maior também será o impacto negativo causado, principalmente nos regimes de precipitação e vazão afluente.

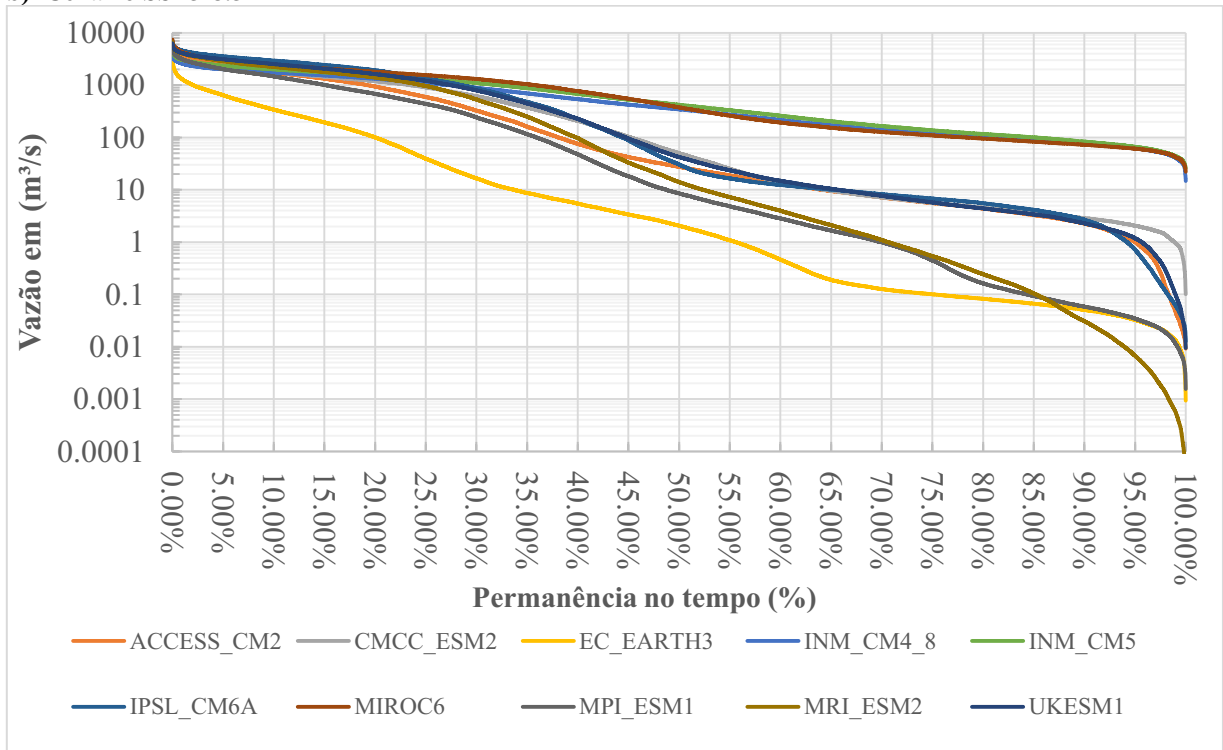
5.4 Vazões afluentes na usina Foz do Areia

Para demonstrar ainda mais os impactos causados pelas mudanças climáticas nas vazões afluentes da usina Foz do Areia, foram calculadas as vazões de referência Q_{90} e Q_{95} para as projeções dos modelos climáticos globais, esses valores foram obtidos aplicando o método da curva de permanência através da probabilidade de Weibull. Essas vazões têm papéis fundamentais no dimensionamento de uma usina hidroelétrica e também servem como base para planejamentos futuros de geração de energia da usina. Ambas as vazões são apresentadas na Figura 29 a e b, bem como as variações das mesmas conforme o cenário de projeção futura SSP2-4.5 e SSP5-8.5 respectivamente.

**Figura 29 – Curva de Permanência para as projeções de vazão de Foz do Areia entre 2020 e 2100
Cenário SSP2-4.5**



b) **Cenário SSP5-8.5**



Fonte: o Autor (2021).

Os valores obtidos na Figura 29 apresentam valores menores, em todos os modelos climáticos globais, do que $Q_{90} = 190,64 \text{ m}^3/\text{s}$ e $Q_{95} = 152,43 \text{ m}^3/\text{s}$, obtidos na Figura 15, que

representam as vazões afluentes já registradas na usina entre 1999 e 2019. Os valores das vazões de referência projetadas para os anos de 2020 até 2100 estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Vazões de referência Q90 e Q95 em m³/s, para cada uma das projeções dos MCG's, para os senários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, no período de 2020 até 2100

		ACCES S_CM2	CMCC _ESM2	EC_EA RTH3	INM_C M4_8	INM_ CM5	IPSL_C M6A	MIRO C6	MPI_ ESM1	MRI_ ESM2	UKES M1
SSP2- 4.5	Q90 (m ³ /s)	4,43	4,36	0,07	88,77	84,05	3,40	80,96	0,09	0,04	4,08
	Q95 (m ³ /s)	3,18	3,40	0,05	71,03	65,92	1,82	65,84	0,05	0,01	3,08
SSP5- 8.5	Q90 (m ³ /s)	2,26	2,88	0,05	74,98	83,61	2,68	72,68	0,06	0,03	2,29
	Q95 (m ³ /s)	1,01	2,06	0,03	61,56	66,31	0,72	61,29	0,03	0,01	1,18

Fonte: O Autor (2021).

Com base na Tabela 2 podemos identificar que as vazões de referência Q₉₀ e Q₉₅ diminuem de um cenário para outro e quanto mais extremo for o cenário menores são as vazões projetadas por todos os modelos climáticos globais. Ainda analisando a Tabela 2 nota-se que três cenários INM_CM4_8, INM_CM5 e MIROC6 apresentam vazões de referência mais altas e mais próximas da Q₉₅ e Q₉₀ do período observado. Os demais modelos indicam vazões muito baixas como vazão de referência.

Mesmo apresentando valores aceitáveis para as vazões de referência, os três cenários INM_CM4_8, INM_CM5 e MIROC6 ainda indicam uma grande diminuição nas vazões futuras. Comparando a Q₉₀ do modelo INM_CM4_8 (88,77m³/s para SSP2-4.5 e 74,98 m³/s para o SSP5-8.5) com a Q₉₀ definida para os anos entre 1999 e 2019 igual a 190,64 m³/s têm – se uma diminuição de 53,44 % e 60,67 % respectivamente na Q₉₀. Nos demais modelos essa porcentagem é ainda maior.

Já para a comparação da vazão Q₉₅ do modelo INM_CM4_8 (71,03 m³/s para SSP2-4.5 e 61,56 m³/s para o SSP5-8.5) com a Q₉₅ definida para os anos entre 1999 e 2019 igual a 152,43 m³/s têm – se uma diminuição de 53,40 % e 59,62 % respectivamente na Q₉₅. Ou seja considerando o melhor cenário de todas as projeções podemos ter uma diminuição das vazões de referência pela metade ou por frações ainda menores, nos próximos 80 anos, valores que podem despertar um alerta para quem para as políticas de operação da usina Foz do Areia.

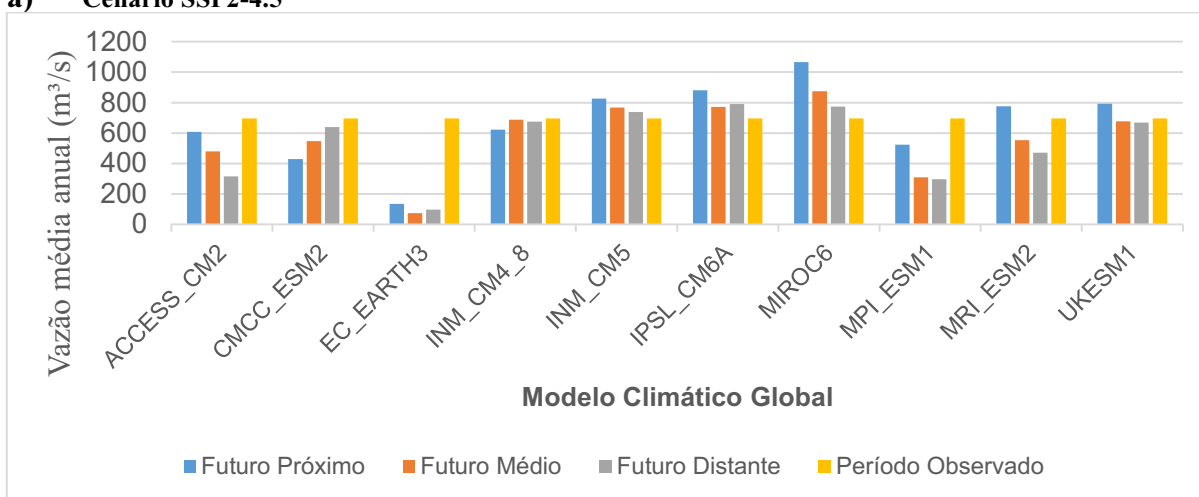
Essa diminuição das vazões também já foi observada por outros trabalhos. Genz. *et al.* (2011) obtiveram resultados de reduções da vazão média anual em 94%, 73% e 44%,

respectivamente para os rios Pojuca, Paraguaçu e Grande na Bahia, já Gesualdo *et al.* (2019) também concluíram que possivelmente teremos diminuição entre 50 e 35 % de vazões na bacia do rio Jaguari, ambos os trabalhos projetaram essas mudanças para o ano de 2100.

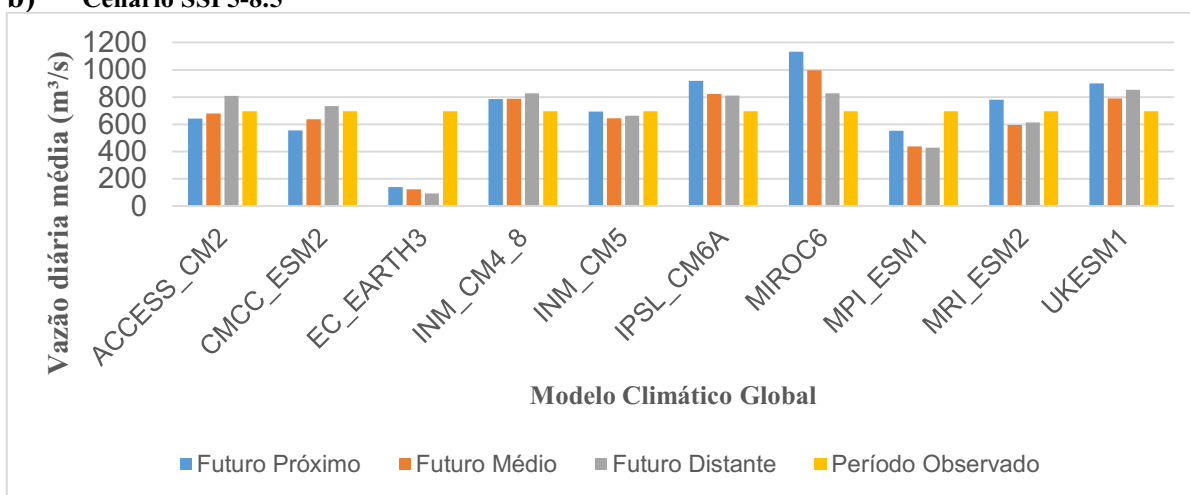
Para finalizar as análises de vazões afluentes da usina Foz do Areia a Figura 30 a e b foi desenvolvida para demonstrar o comportamento das vazões médias (\overline{Q}_m) ao longo dos períodos futuros analisados. Através destes valores que foram calculados os testes de MK descritos na metodologia deste trabalho, mais especificamente no item 4.5.

Figura 30 - Projeções de vazões afluente médias de todos MCG's para os períodos analisados da usina Foz do Areia entre 2020 e 2100

a) Cenário SSP2-4.5



b) Cenário SSP5-8.5



Fonte: O Autor (2021).

Para os valores das médias anuais de cada período e de cada modelo climático global realizou-se o teste de MK, os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados teste de Mann Kendall para as vazões médias anuais projetadas para o período de 2020 - 2100

Cenário SSP5 - 8.5			Cenário SSP2 - 4.5		
Modelo Climático Global	Período	Z_{MK} – Mann-Kendall	Modelo Climático Global	Período	Z_{MK} - Mann-Kendall
ACCESS_CM2	P1	-29,98	ACCESS_CM2	P1	90,98
	P2	-39,98		P2	6,98
	P3	-191		P3	-11,97
CMCC_ESM2	P1	-10,98	CMCC_ESM2	P1	20,98
	P2	80,98		P2	78,98
	P3	-18,97		P3	-93,97
EC_EARTH3	P1	112,98	EC_EARTH3	P1	-62,98
	P2	-113		P2	46,98
	P3	-209		P3	-210
INM_CM4_8	P1	39,98	INM_CM4_8	P1	-38,98
	P2	173,02		P2	54,98
	P3	-40		P3	-7,97
INM_CM5	P1	66,98	INM_CM5	P1	134,98
	P2	116,98		P2	134,98
	P3	13,97		P3	-166
IPSL_CM6A	P1	-105	IPSL_CM6A	P1	14,98
	P2	-143		P2	22,98
	P3	51,97		P3	1,97
MIROC6	P1	-131	MIROC6	P1	-14,98
	P2	-50,98		P2	66,98
	P3	19,97		P3	-1,97
MPI_ESM1	P1	-115	MPI_ESM1	P1	-92,98
	P2	-86,98		P2	-42,98
	P3	-202		P3	-204
MRI_ESM2	P1	-69,98	MRI_ESM2	P1	-90,98
	P2	-105		P2	-48,98
	P3	-140		P3	-146
UKESM1	P1	-54,98	UKESM1	P1	84,98
	P2	-50,98		P2	-76,98
	P3	-11,97		P3	31,97

Fonte: O Autor (2021).

Através do teste MK obteve-se o valor da estatística Z_{MK} de todos os modelos climáticos globais, no cenário de poluição mais extremo SSP5 – 8.5 e no intermediário SSP2 – 4.5, bem

como para os períodos P1 (2020 – 2049), P2 (2050 – 2079) e P3 (2080 – 2100). Os valores de Z_{MK} foram comparados com a estatística Z da distribuição normal, para um nível de significância de 0,05 $Z = \pm 1,96$, sendo assim quando $-1,96 > Z_{MK} > 1,96$ rejeitamos a hipótese nula de que os valores das \overline{Q}_m anuais são iguais e definimos que existe variação significativa ao longo das projeções futuras.

Conforme a Tabela 3 todos os valores obtidos no teste MK rejeitam a hipótese inicial e indicam que existem alterações nas vazões médias anuais projetadas para futuro. Quando $Z_{MK} < -1,96$ existe uma tendência para a diminuição das vazões ao longo do período analisado e quando $Z_{MK} > 1,96$ existe uma tendência para que as vazões médias anuais aumentem no período analisado.

Para o cenário SSP5 – 8.5, dos 30 períodos analisados 20 deles indicam que existe uma tendência para que as vazões médias anuais diminuam, os outros 10 indicam uma tendência de aumento de vazão ao longo do período analisado. Caso os níveis de poluição atmosférica atinjam os níveis estabelecidos para o cenário SSP5 – 8.5, provavelmente ocorrerá a diminuição das vazões médias afluentes da bacia a cada período analisado, situação que pode gerar problemas para a geração de energia da usina.

Já para o cenário SSP2 – 4.5 dos 30 períodos analisados 15 indicam uma diminuição das vazões na metade das projeções e um aumento na outra metade das projeções. As diminuições de vazões médias acontecem principalmente no P3, futuro distante, entre os anos de 2080 -2100, isso mostra que, em função do SSP2 – 4.5 ser um cenário intermediário de emissão de poluentes as tendências para alterações de vazão são projetadas para um futuro mais distante. Já o cenário mais extremo de poluição tende a antecipar as alterações nas vazões, ou seja, provavelmente nos próximos 30 anos podem ocorrer eventos mais frequentes e vazões abaixo dos níveis normais.

Essas alterações, projetadas para as vazões afluentes da usina Foz do Areia podem impactar diretamente na produção de energia elétrica da mesma. As reduções em mais de 50 %, previstas tanto para a Q_{95} quanto para Q_{90} interferem diretamente nos valores de potência instalada da usina, pois são vazões características que indicam o volume provável que será gerado em mais de 90 % dos dias do ano.

Conforme apresenta a equação 01 a proporção de redução entre a vazão e a potência instalada é direta, logo a diminuição de 50 % destas vazões implica também na diminuição de 50 % da potência instalada projetada para os próximos anos na usina.

O regime de precipitações também sofrerá impactos significativos, conforme observado existe a tendência de se intensificar os períodos chuvosos e os períodos de seca. O tempo do período chuvoso (setembro a dezembro) tende a encurtar, porém, os acumulados mensais tenderão a aumentar, aumentando a frequência de abertura das suas comportas, o que representa um desperdício de potencial de energia elétrica.

Por outro lado, nos períodos menos chuvosos (fevereiro até julho) existe a projeção para prolongar o período com menor precipitação e também de diminuir consideravelmente os volumes acumulados neste período, aumentando a frequência de ocorrência de secas hidrológicas e de crises energéticas, tais como a que aconteceu recentemente, mais precisamente no ano de 2021.

Por fim a tendência apresentada pelo teste de MK também apresentou um cenário não favorável para a produção de energia elétrica da usina, pois, analisando a $\overline{Q_m}$ (vazão média anual) de forma geral, considerando o excesso de chuvas em um período e a escassez em outro, os volumes anuais de água tenderão a diminuir e conseqüentemente a quantidade de energia gerada também diminuirá proporcionalmente.

Todos esses impactos causados pelas mudanças climáticas nas vazões da usina estão previstos para ocorrerem nos próximos 80 anos. A frequência, bem como, a intensidade destes acontecimentos será proporcional ao cenário de emissões de poluentes que o mundo alcançara, tendo como pior cenário o SSP5 – 8.5 no qual as alterações são previstas para que ocorram intensamente nos próximos 30 anos.

6 CONCLUSÃO

É notório que atualmente já acontecem eventos climatológicos com magnitudes diferentes das que aconteciam a anos atrás e essa frequência de eventos extremos parece aumentar ano após ano, por isso as pesquisas e estudos acerca das causas e dos transtornos destes fenômenos se tornam de fundamental importância para a adoção de políticas públicas que mitigam esses impactos.

Conforme apresentado os relatórios do IPCC (2021) dividem as projeções futuras em cinco níveis de emissão de gases e poluição, dois níveis otimistas, outros dois intermediários e também um cenário com poluição extrema. Para os próximos 30 anos todos os cenários preveem as mesmas consequências em aumento de temperatura, aumento do nível do mar entre outras consequências causadas pelo efeito estufa, devido aos altos índices de emissão de gases e poluentes que os países emitem até o presente momento. Muito provável que essa poluição gerada nos últimos anos fará com que se aumente os eventos extremos de excesso e de escassez de água no mundo.

As projeções para os futuros próximos são preocupantes, porém, as projeções podem piorar ainda mais para o futuro intermediário e o futuro distante, caso não sejam tomadas decisões para amenizar os níveis de poluição e mitigar as consequências daqui a 80 anos.

O presente trabalho buscou estudar os impactos causados em uma parte pequena do mundo, a bacia da UHE Foz do Areia. Mesmo essa área sendo pequena comparada ao mundo, ela apresenta grande importância para a matriz energética brasileira pois está entre as 12 maiores usinas hidroelétricas do país. O fato de que aproximadamente 70 % da energia elétrica consumida no Brasil é oriunda da geração hidráulica enaltece ainda mais a importância desta área de estudo.

No processo de implantação foram utilizados métodos computacionais que fossem capazes de simular a transformação de precipitações e evapotranspiração de referência em vazão de um determinado ponto de exutório, a usina Foz do Areia. O *script* do HYMOD 2, juntamente com o *script* de calibração automática SCE-UA apresentaram simulações com valores estatísticos muito boas ($KGE = 0,93$), além do mais, esses programas apresentaram uma certa facilidade para gerar os resultados, pois, os parâmetros calibráveis não necessitam de nenhum ensaio *in loco*.

Outro fator importante utilizado nesta pesquisa foi a utilização de projeções climáticas recentes fornecidas pelo relatório parcial AR6 do IPCC (2021). Juntando os dois fatores, calibração e projeção, foi possível obter resultados importantes e que podem alertar e ajudar os órgãos competentes responsáveis pelo funcionamento da usina a adotar medidas para diminuir os impactos causados nas vazões afluentes desta usina.

Dentro das duas projeções de emissões utilizadas no estudo SSP2 - 4.5 e SSP5 – 8.5, do IPCC (2021), os resultados mostram que as médias diárias de temperatura máxima e mínima irão aumentar, que as precipitações irão apresentar períodos mais definidos de chuvas intensas e de escassez hídrica, prevendo um inverno com menos volumes de chuva e final do outono, início do verão com meses de mais intensidade de chuvas.

Essas alterações projetadas para as precipitações e para temperatura terão influência direta nas vazões afluentes, podendo ter uma diminuição de aproximadamente 50 % no valor da Q_{90} e da Q_{95} para os próximos anos, além de apresentar uma forte tendência para a diminuição do acumulado de chuvas médias nos próximos anos. Todos os resultados não são favoráveis para a geração de energia elétrica da usina Foz da Areia, na qual poderá ter uma redução na capacidade de produção média de energia elétrica por falta ou excesso de chuvas em cada período do ano.

Por fim espera-se que os resultados obtidos nesta pesquisa sirvam para alertar e planejar algumas medidas paliativas que possam ser tomadas para resolver um possível problema futuro da usina. Além do mais que sirva como alerta também para a população mundial em geral para que sejam repensadas algumas atitudes que contribuam ainda mais com as poluições ambientais e que busquem diminuir esses níveis, principalmente de emissão de CO_2 para não piorar algo que já apresenta problemas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, T.M. **Proposta de metodologia para definição de quantidade de grupos geradores de pequenas centrais hidrelétricas**. 2015 Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) - Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais. 2015.
- AL JUBOORI, M; GUVEN, A. Hydropower Plant Site Assessment by Integrated Hydrological Modeling, Gene Expression Programming and Visual Basic Programming. **Water Resource Manage** v. 30, pp. 2517–2530. 2016.
- ALLEN, R.G. *et al.* Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage. **Food and Agriculture Organization**, Rome, 1998.
- AMORIN, P.B.; SOUZA K.I.S.; CHAFFE, P.L.B. Ferramenta para visualização de síntese de estudos dos impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos do Brasil. XXIII simpósio brasileiro de recursos hídricos (issn 2318-0358). **Anais de congresso**. Foz do Iguaçu. 2019.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas**. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: 26 mar. 2020.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Vazão utilizada para calcular a potência assegurada das usinas hidrelétricas**. 2005. Disponível em www.aneel.gov.br. Acesso em: 03 Mar. 2021.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Aproveitamentos hidrelétricos**. 2020. Disponível em www.aneel.gov.br. Acesso em: 03 Mar. 2021.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Banco de Informações de Geração**. 2021. Disponível em www.aneel.gov.br. Acesso em: 03 Mar. 2021.
- ANGELO, C; MARENGO J.A. IPCC AR6, WG1: resumo comentado. **Observatório do clima** (2021) Disponível em: https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2021/08/OC-IPCC-AR6-FACTSHEET_FINAL.pdf
- ALTHOFF, D. *et al.* Evapotranspiration for irrigated agriculture using orbital satellites. **Bioscience Journal**, v. 35 (3). 2019.
- ARAÚJO, A. N. *et al.* OPERAÇÃO HIDRÁULICA DOS RESERVATÓRIOS DA CASCATA DO RIO IGUAÇU. XXIII simpósio brasileiro de recursos hídricos (issn 2318-0358). **Anais de congresso**. Foz do Iguaçu. 2019.
- ARNOLD, J.G. *et al.* Large area hydrologic modeling and assessment - Part 1: Model development. **Journal of the American Water Resources Association**. v. 34 (1), pp. 73-89. 1998.

BRASIL. Ministério de energia. **Nota de emergência hídrica para o período de junho a setembro em cinco Estados brasileiros**. Brasília. 2021

BOYLE, D. P; GUPTA, H.V; SOROOSHIAN, S. Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods, **Water Resources Research**, 200036, 3663– 3674. 2000.

BÜRGER, G. On trend detection. **Hydrol. Process.** 31, 4039–4042. 2017

BURKETT, V.R. Point of departure. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: **Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the IPCC**. Cambridge: Cambridge University Press. pp. 169-194. 2014.

COELHO R.V; FAN M. F. **Manual do programa super manejo de dados**, Porto Alegre 2016.

CHANG, X; LIU, X; ZHOU, W. Hydropower in China at present and its further development. **Energy**. V. 35 (11) pp, 4400-4406. 2010.

CHHUON, K.; HERRERA, E.; NADAOKA, K. Application of integrated hydrologic and river basin management modeling for the optimal development of a multi-purpose reservoir project. **Water Resource Manage.** v.30. pp, 3143–3157. 2016.

COPEL - Companhia Paranaense de Energia. **Reservatórios de hidrelétricas**. Paraná. 2020. Disponível em: <https://www.copel.com/hpcweb/>

COPEL - Companhia Paranaense de Energia. **Reservatórios de hidrelétricas na bacia têm retido água para garantir alguma reserva para os próximos meses**. Paraná. 2021. Disponível em: <https://www.copel.com/hpcweb/>

COLNAGO, G.R. **Contribuição para a Otimização de Turbinas em Usinas Hidrelétricas: Especificação e Operação**. Tese apresentada ao Curso de Doutorado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas. 2011.

CABRERA, M.C.M. **Quantificação da alteração no balanço hídrico devido a cavas de mineração utilizando lisímetros e tanques de evaporação**. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011.

CMSE. Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico. **Ministério de minas de energia**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/>

DIBIKE, Y.B; SOLOMATINE, D.P. River flow forecasting using artificial neural networks. *Phys. Chem. Earth Part B Hydrol. Ocean. Atmos.* v. 26. pp 1–7. 2001.

DRÁPELA, K; DRÁPELOVÁ, I. Application of Mann-Kendall Test and the Sen's Slope Estimates for Trend Detection in Deposition data From Bílý Kríž (Beskydy Mts. the Czech Republic 1997–2010); **Beskydy**: Brno, Czech Republic, 2011.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Mapa de solos do Brasil**. 2021. Disponível em: http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Abrasil_solos_5m_20201104. Acesso em: 26 mar. 2021.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional – BEM 2020**: Ano base 2019. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>. Acesso em: 15 fev. 2021.

FIGUEIREDO FILHO, D.B.; SILVA JÚNIOR, J.A. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**. v.18(1). 2011.

FISCH, G; SANTOS, T, A; SILVA, R, C. Water security in the Vale do Paraíba's basin: future scenarios. **Ambiente & Água**. Taubaté v. 12 (6). Dez. 2017.

GAO, T; WANG, H. Trends in precipitation extremes over the Yellow River basin in North China: Changing properties and causes. **Hydrol. Process**. v.31, pp 2412–2428. 2017.

GENZ, F; TANAJURA, C. A. S.; ARAÚJO, H. A. Impacto das Mudanças Climáticas nas Vazões do Rio Pojuca sob o Cenário A2 do IPCC - 2070 a 2100. In: CONGRESSO BAIANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1., 2010, Salvador. **Trabalhos apresentados...** Salvador, 2010.

GESUALDO C. G *et al.* Assessing water security in sao paulo metropolitan region through different climate scenarios, **Hydrology and Earth System Sciences**. volume 23 (11), 4955–4968. 2019.

GHARARI, S; *et al.* Uma abordagem para identificar parâmetros de modelo consistentes com o tempo: calibração de subperíodo. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.17, pp, 149-161. 2013.

GONG, W. *et al.* Estimating epistemic and aleatory uncertainties during hydrologic modeling: An information theoretic approach. **Water Resources Research**, 49(4), 2253–2273. 2013.

GRIMM, A; FERAZ, S. E. T.; GOMES, J. Precipitation Anomalies in southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. **Journal of Climate**, Boston, v.11, pp 2863-2880, 1998.

GUPTA, H. V. *et al.* Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling, **J. Hydrol.**, 377(1-2), 80–91, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.003, 2009.

HAMED, K.H. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. **J. Hydrol.** v.349, pp 350–363. 2008.

HALLAK, A; PEREIRA FILHO, A. J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia.** v.26 (4), pp 591 - 608, 2011.

HARGREAVES, G.H; SAMANI, Z.A. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. Applied Engineering in **Agriculture**, 1, 96-99. disponível em: <http://dx.doi.org/10.13031/2013.26773>

IAPAR – Instituto Agrônômico do Paraná. **Atlas Climático do Estado do Paraná.** Londrina, PR. 2019.

IAT – Instituto da Água e da Terra. **Mapas e dados espaciais** Disponível em: <https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Mapas-e-Dados-Espaciais>. 2021. Acesso em 05 jul. 2021.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2014 Synthesis Report Summary for Policymakers.** Genebra, Suíça, 151 pp. 2014. disponível em: https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf . Acesso em: 03 Mar. 2021.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Mudança do Clima 2021 A Base Científica: Sumário para formuladores de política.** Genebra, Suíça 2021. disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/IPCC_mudanca2.pdf

JESUS, E.T. *et al.* Seca meteorológica e hidrológica de 1987 a 2017 na bacia hidrográfica do rio Doce, Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos.** Versão On-line ISSN 2318-0331 RBRH, Porto Alegre, v. 25 (29). 2020.

JUNQUEIRA, R. **Índices de severidade de seca para a bacia hidrográfica do rio tocantins.** 2019Dissertação de mestrado na área de concentração em Hidrologia. UFLA – Universidade Federal de Lavras. Lavras – MG. 2019.

JONG, P. *et al.* A produção hidrelétrica do Rio São Francisco, no Brasil, pode cessar devido às mudanças climáticas e à variabilidade interanual. **Ciência do Meio Ambiente.** V. 634, pp 1540-1553. 2018.

LOPES, J. E., BRAGA B.F.F., CONEJO, J.L., 1982, A Simplified Hydrologic Model in Applied Modeling in Catchment Hydrology, **Water Resources** Publication.

MAPBIOMAS. **Plataforma de mapas e dados.** 2021. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>

MARENGO, J. A. *et al.* **Mudanças climáticas, condições meteorológicas extremas e eventos climáticos no Brasil.** In: Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável

(org.). Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil. 2009. Disponível em:
http://www.fbds.org.br/cop15/FBDS_MudancasClimaticas.pdf

MARTENS, B. *et al.* GLEAM versão 3: Modelos e conjuntos de dados de evaporação global de terras. **União Geofísica Americana**. 2015. Disponível em:
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015AGUFM.H31J..02M/abstract>

MEIRA NETO, A.A. **Ponderação bayesiana de modelos utilizando diferentes séries de precipitação aplicada à simulação chuva-vazão na Bacia do Ribeirão da Onça**. 2013. Dissertação de mestrado da USP. São Carlos – SP. 2013.

MELO, V.S; SOUSA, F.A.S. Análise de frequência de secas utilizando técnica de agrupamento e distribuições de probabilidades. **Eng Sanitária Ambiental**. V.26 (1). pp 53-60. 2016.

MOORE, R.J. The probability-distributed principle and runoff production at point and basin scales, **Hydrol. Sci. J.** v.30, pp 273- 297. 1985.

MORIASI, D.N. *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v.50(3), pp 885-900. 2007

NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. **J. Hydrology**. v. 10(3). pp, 282-290. 1970.

NDMC - National Drought Mitigation Center. **Annual Reports 2021**. Disponível em:
<https://drought.unl.edu/Publications/AnnualReports.aspx>. Acesso em 05 jul. 2021.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro. **Histórico de operações**. disponível em: http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/energia_afluente_bacia.aspx. Acesso em: 01 Mar. 2021.

OLIVEIRA SERRAO, E.A. *et al.* Large-Scale hydrological modelling of flow and hydropower production, in a Brazilian watershed. **Ecohydrology e Hydrobiology**. v.21(1), pp. 23-35. 2020

OLIVEIRA, V.A *et al.* Avaliação dos impactos das mudanças climáticas na vazão e no potencial hidrelétrico na região das cabeceiras da bacia do rio Grande, sudeste do Brasil. **International Journal of Climatology**, Lavras, v. 37 (15). pp, 5005-5023. 2017.

PARRA, V.; FUENTES-AGUILERA, P.; MUÑOZ, E. Identifying advantages and drawbacks of two hydrological models based on a sensitivity analysis: a study in two Chilean watersheds. **Hydrological Sciences Journal**, v. 63(12), pp 1831–1843. 2018.

PEN - Plano da Operação Energética. **Operação nacional do Sistema elétrico**. 2020. Disponível em:
[http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/ONS_PEN2020_24_final%20\(6\).pdf](http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/ONS_PEN2020_24_final%20(6).pdf). Acesso em 05 jul. 2021.

PIMAN, T.; COCHRANE, T.A.; ARIAS, M.E. Effect of proposed large dams on water flows and hydropower production in the sekong, sesan and srepek rivers of the mekong basin. **River Research and Applications**, v. 32. pp, 2095–2108. 2016.

RENNÓ, C.D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas**. Tese de Doutorado do Curso da Pós-Graduação e Sensoriamento Remoto. INPE. São José dos Campos. 2004.

ROCKSTRÖM, J. STEFFEN, W. NOONE, K. Um espaço operacional seguro para a humanidade. **Nature**. v. 461, pp 472-475. 2009. <https://doi.org/10.1038/461472a>.

ROY, T. *et al.* Using Satellite-Based Evapotranspiration Estimates to Improve the Structure of a Simple Conceptual Rainfall-Runoff Model, **Hydrology and Earth System Sciences**. v. 21(2), pp 879–896. 2017. doi:10.5194/hess-21-879-2017.

SANTOS, E. P.; FILHO, I. M. C.; BRITO, J. I. B. Influência do Índice de Oscilação Sul (IOS) e Anomalia do Niños sobre as chuvas no Nordeste Brasileiro. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 16, 2010, Belém. **Anais**. Belém: SBMET, 2010.

SANTOS, L.L. Modelos hidráulicos-hidrológicos: Conceitos e Aplicações. RBGF- **Revista Brasileira de Geografia Física**. Recife-PE, v.2 (3), pp 1-19. dez, 2009.

SEN, P.K. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. **J. Am. Stat. Assoc.** v.63, pp 1379–1389. 1968

SHRESTHA, J.P.; PAHLOW, M.; COCHRANE, T.A. Development of a SWAT Hydropower Operation Routine and Its Application to Assessing Hydrological Alterations in the Mekong. **Water**, v.12 (8), pp 2193. 2020.

SILVA R. M. A; ANDRADE P.R.G.S. Simulação da operação de reservatório na bacia do rio pardo-BA: avaliação da segurança hídrica para o abastecimento público. In: Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2014, **Anais do XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, pp 2359-1900.

SINGH, S; BÁRDOSSY, A. Hydrological Model Calibration by Sequential Replacement of Weak Parameter Sets Using Depth Function. **Hydrology**. V.2. pp 69-92. 2015.

TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An overview of CMIP5 and the experiment design. **Bulletin of the American Meteorological Society**. v. 93(4), pp 485-498. 2012.

TERASSI, P.M.B. *et al.* Variabilidade do Índice de Precipitação Padronizada na Região Norte do Estado do Paraná Associada aos Eventos de El Niño-Oscilação Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.33 (1). 2018.

THEIL, H. Rank-invariant Method of Linear and Polynomial Regression Analysis, 1-2; Confidence Regions for the Parameters of Linear Regression Equations in Two, Three and More Variables: (proceedings Know, _5_3(1950), Nr 3/4, Indagationes Mathematicae, _1_2(1950); **Stichting Mathematisch Centrum**, Statistische Afdeling: Amsterdam, The Netherlands, 1949.

TIEZZI, DE O. R, **Variabilidade Hidroclimatológica e seus Efeitos no Suprimento de Energia Elétrica do Sistema Interligado Nacional**, Tese doutorado UNICAMP, Campinas. 2015.

TIEZZI, R.O. *et al.* Tendências da vazão sob mudanças climáticas para 26 bacias brasileiras. **Water Policy**. v.21 (1), pp, 206–220. 2018.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**, 1 Ed., Porto Alegre, Editora Universidade. FRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos 668p. 1998.

TUCCI, C. E. M. **Modelos determinísticos**. In: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Modelos para gerenciamento de recursos hídricos, Nobel/.ABRH, p. 211-324. 1987.

TUCCI C. E. M. **Impactos da variabilidade climática e do uso do solo nos recursos hídricos**. Estudo preparado como contribuição da ANA – Agência Nacional de Águas para a 118 Câmara Temática sobre Recursos Hídricos do Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas. Maio de 2002.

TRUNG, L.D. *et al.* Assessing cumulative impacts of the proposed Lower Mekong Basin hydropower cascade on the Mekong River floodplains and Delta—Overview of integrated modeling methods and results. **Journal of Hydrology**. v.581. 2016.

UEHARA, K. **Capacidade de reservatórios**. Departamento de Energia Hidráulica e Sanitária. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2002. Disponível em: <http://www.leb.esalq.usp.br/disciplinas/Fernando/leb1440/Aula%206/Capacidade%20de%20Reservatorios.pdf>

XAVIER, AC; KING, C.W.; SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International journal of climatology** Int. J. Climatol. (2015) Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/joc.4518. Acesso em: 13 Mar. 2021.

WAGENER, T. *et al.* A framework for development and application of hydrological models. **Hydrology and Earth System Sciences**, volume 5 (1). 2001.

WANG, B. *et al.* Historical change of El Niño properties sheds light on future changes of extreme El Niño. **PNAS**. v.116 (45), pp 22512 – 22517. 2019.

WCRP - World Climate research Programme. **CMIP6**. 2022. Disponível em: https://wcrp-cmip.github.io/CMIP6_CVs/docs/CMIP6_source_id.html

WILHITE, D. A; GLANTZ, M. H. Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. **Water International**, v. 10(3), pp 111-120. 1985.

WMO - World Meteorological Organization. Methods of observation. In: **Guide to Hydrological Practices**: hydrology from measurement to hydrological information. 6. ed. Geneva, Switzerland , 2008. v. 1, cap. 2, p. 24-27. (WMO - n. 168). Disponível em: http://www.whycos.org/chy/guide/168_Vol_I_en.pdf. Acesso em: 4 jun. 2020

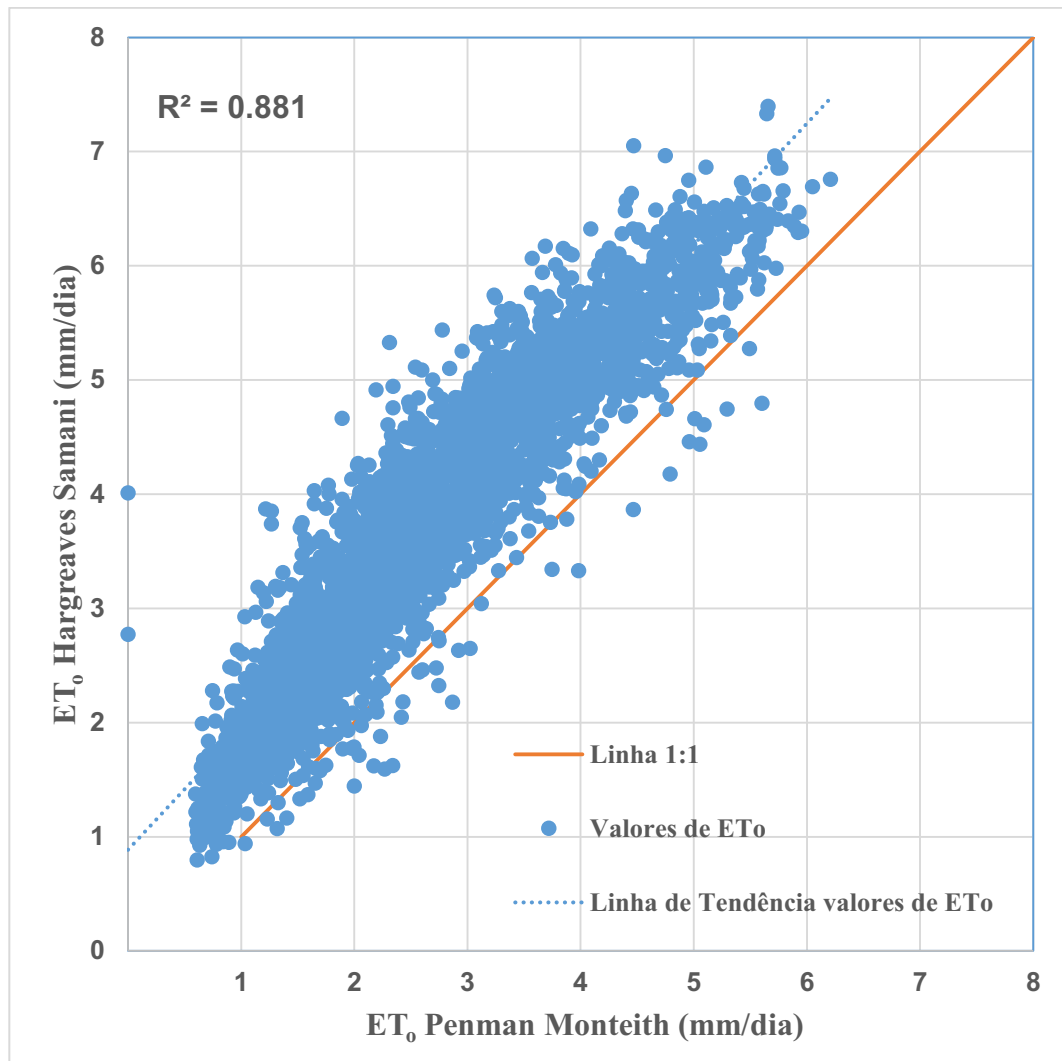
WWDR - World Water Development Report. **The United Nations World Water Development Report** 2015, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Paris, France, 2021.

APÊNDICE A - Localização Estações pluviométricas e meteorológicas

Estação	Código	Fonte	Latitude	Longitude	Altitude	Órgão Operador
Pluviométrica	2548038	ANA	-25.5000	- 48.8167	59	IAPAR
Pluviométrica	2549000	ANA	-25.9333	- 49.7833	750	Copel
Pluviométrica	2549003	ANA	-25.9500	- 49.3931	810	Águas Paraná
Pluviométrica	2549017	ANA	-25.5192	- 49.1467	910	Águas Paraná
Pluviométrica	2549019	ANA	-25.4667	- 49.5667	901	Águas Paraná
Pluviométrica	2549042	ANA	-25.3669	- 49.0736	936	Águas Paraná
Pluviométrica	2549045	ANA	-25.3500	- 49.5167	890	Águas Paraná
Pluviométrica	2549051	ANA	-25.2000	- 49.1167	980	Águas Paraná
Pluviométrica	2549061	ANA	-25.8550	- 49.5258	820	Águas Paraná
Pluviométrica	2549063	ANA	-25.7833	- 49.1500	913	Águas Paraná
Pluviométrica	2549065	ANA	-25.4333	- 49.8167	950	Águas Paraná
Pluviométrica	2549080	ANA	-25.4181	- 49.3869	895	Águas Paraná
Pluviométrica	2549091	ANA	-25.7833	- 49.7667	910	IAPAR
Pluviométrica	2549126	ANA	-25.4494	- 49.3564	930	Águas Paraná
Pluviométrica	2550001	ANA	-25.8756	- 50.3894	760	Águas Paraná
Pluviométrica	2550017	ANA	-25.9500	- 50.5667	770	Águas Paraná
Pluviométrica	2550025	ANA	-25.4500	- 50.5833	893	IAPAR
Pluviométrica	2550035	ANA	-25.7000	- 50.5167	790	Águas Paraná
Pluviométrica	2550037	ANA	-25.6219	- 50.2003	856	Águas Paraná
Pluviométrica	2550038	ANA	-25.6167	- 50.7000	825	Águas Paraná
Pluviométrica	2550041	ANA	-25.4750	- 50.2981	892	Águas Paraná
Pluviométrica	2550042	ANA	-25.4953	- 50.0764	950	Águas Paraná
Pluviométrica	2551001	ANA	-25.6942	- 51.2025	960	Águas Paraná
Pluviométrica	2551011	ANA	-25.6297	- 51.0878	1,150	Águas Paraná
Pluviométrica	2551014	ANA	-25.5667	- 51.0667	1,268	Águas Paraná
Pluviométrica	2551018	ANA	-25.9031	- 51.1044	1,114	Águas Paraná
Pluviométrica	2551019	ANA	-25.8500	- 51.7667	1,245	Águas Paraná
Pluviométrica	2551022	ANA	-25.8075	- 51.2886	872	Águas Paraná
Pluviométrica	2551025	ANA	-25.7331	- 51.5167	1,446	Águas Paraná
Pluviométrica	2551026	ANA	-25.5667	- 51.2500	1,108	Águas Paraná
Pluviométrica	2649006	ANA	-26.1000	- 49.8000	770	Águas Paraná
Pluviométrica	2649018	ANA	-26.1547	- 49.3806	790	Águas Paraná
Pluviométrica	2649054	ANA	-26.5306	- 49.8436	950	Águas Paraná
Pluviométrica	2649055	ANA	-26.4194	- 49.5731	750	Águas Paraná
Pluviométrica	2649056	ANA	-26.3328	- 49.9272	990	Águas Paraná
Pluviométrica	2650000	ANA	-26.3706	- 50.2908	765	Águas Paraná
Pluviométrica	2650006	ANA	-26.0192	- 50.5925	770	Águas Paraná
Pluviométrica	2650008	ANA	-26.3839	- 50.8783	746	Águas Paraná

Pluviométrica	2650015	ANA	-26.7103	-	50.2908	790	Águas Paraná
Pluviométrica	2650016	ANA	-26.5558	-	50.6011	900	Águas Paraná
Pluviométrica	2650018	ANA	-26.3514	-	50.6456	780	Águas Paraná
Pluviométrica	2650019	ANA	-26.9017	-	50.6592	1,000	CPRM
Pluviométrica	2650022	ANA	-26.4586	-	50.0031	1,000	EPAGRI
Pluviométrica	2650023	ANA	-26.6931	-	50.1478	800	EPAGRI
Pluviométrica	2650024	ANA	-26.5875	-	50.7283	895	Águas Paraná
Pluviométrica	2650032	ANA	-26.9675	-	50.4217	1,000	CPRM
Pluviométrica	2650035	ANA	-26.8192	-	50.9856	960	CONS ITÁ
Pluviométrica	2651000	ANA	-26.2281	-	51.0803	736	Águas Paraná
Pluviométrica	2651004	ANA	-26.1667	-	51.2167	790	Águas Paraná
Pluviométrica	2651016	ANA	-26.0500	-	51.2000	800	Águas Paraná
Pluviométrica	2651029	ANA	-26.4333	-	51.5667	1,150	Águas Paraná
Pluviométrica	2651031	ANA	-26.2667	-	51.9000	1,180	Águas Paraná
Pluviométrica	2651044	ANA	-26.5989	-	51.1167	1,200	Águas Paraná
Pluviométrica	2651049	ANA	-26.1500	-	51.2333	745	Águas Paraná
Pluviométrica	2651051	ANA	-26.0667	-	51.9136		Águas Paraná
Meteorológica	A874	INMET	-25.8356	-	50.3690	780.21	
Meteorológica	A823	INMET	-25.5678	-	51.0779	1208.85	
Meteorológica	A862	INMET	-26.2484	-	49.5806	856.89	
Meteorológica	A864	INMET	-26.3936	-	50.3633	799.58	
Meteorológica	A873	INMET	-25.5089	-	48.8087	50.31	
Meteorológica	A875	INMET	-26.3985	-	51.3537	1009.01	
Meteorológica	A807	INMET	-25.4487	-	49.2306	922.91	
Meteorológica	A851	INMET	-26.0813	-	48.6418	6.18	

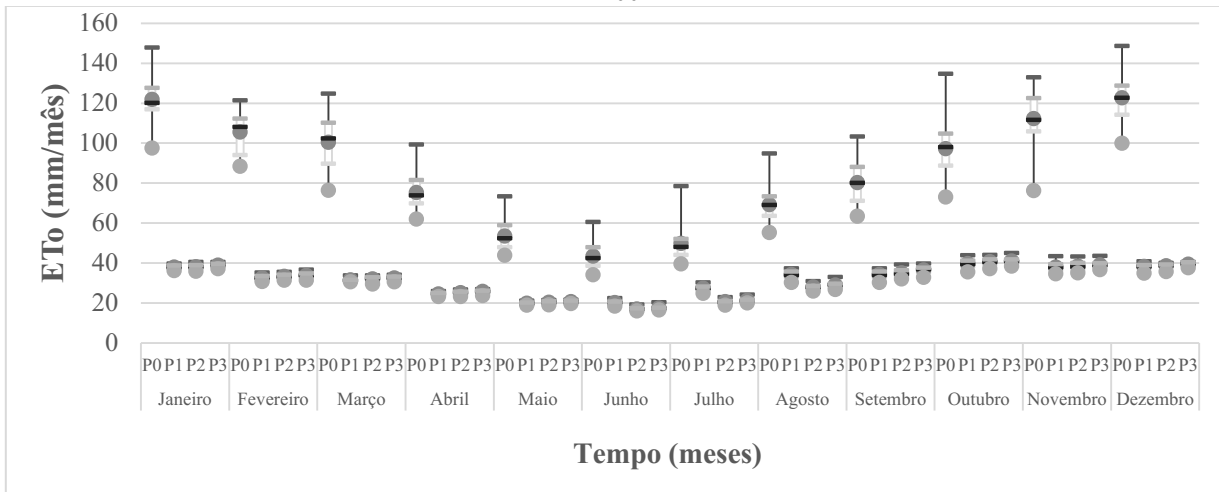
APÊNDICE B - Correlação dos métodos de cálculo para ET_o no período de dados observado da série histórica (2011 – 2019)



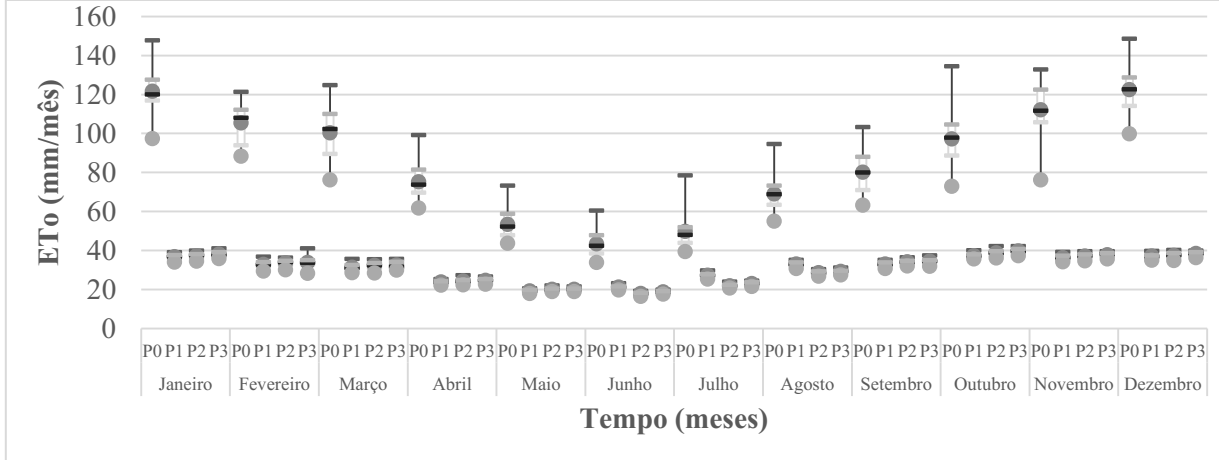
Fonte: o Autor (2021).

APÊNDICE C - Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas dos MCGs, no período de 2020 até 2100, para o cenário SSP2-4.5

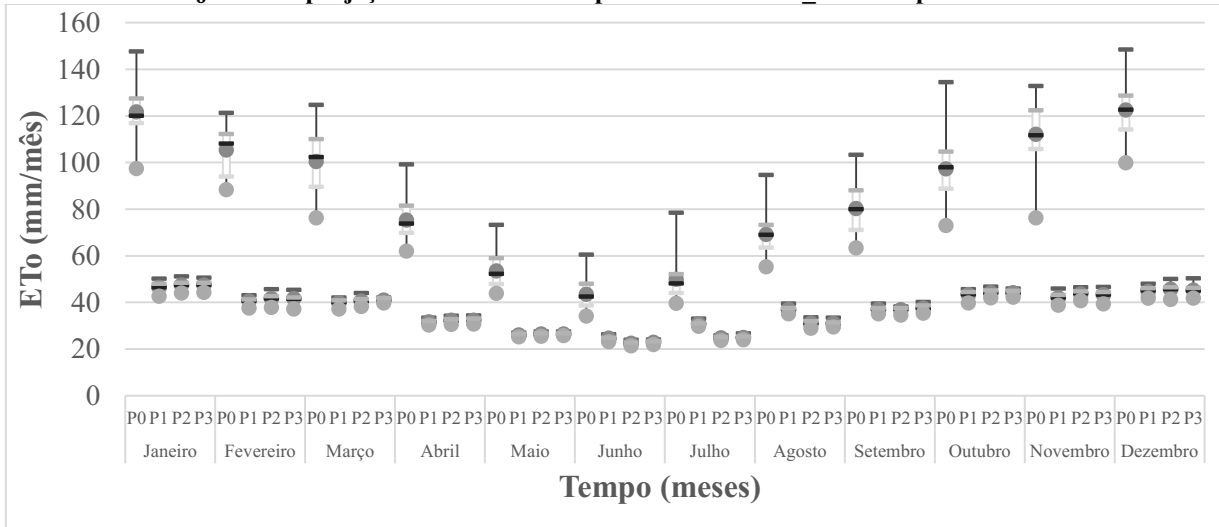
Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas do ACCESS_CM2 no período de 2020 até 2100



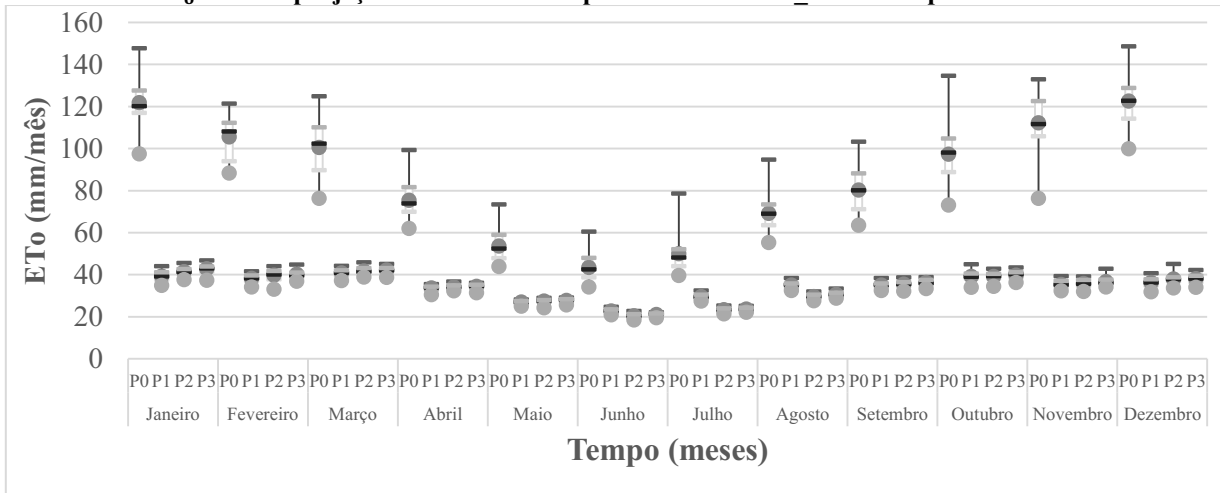
Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas do CMCC_ESM2 no período de 2020 até 2100



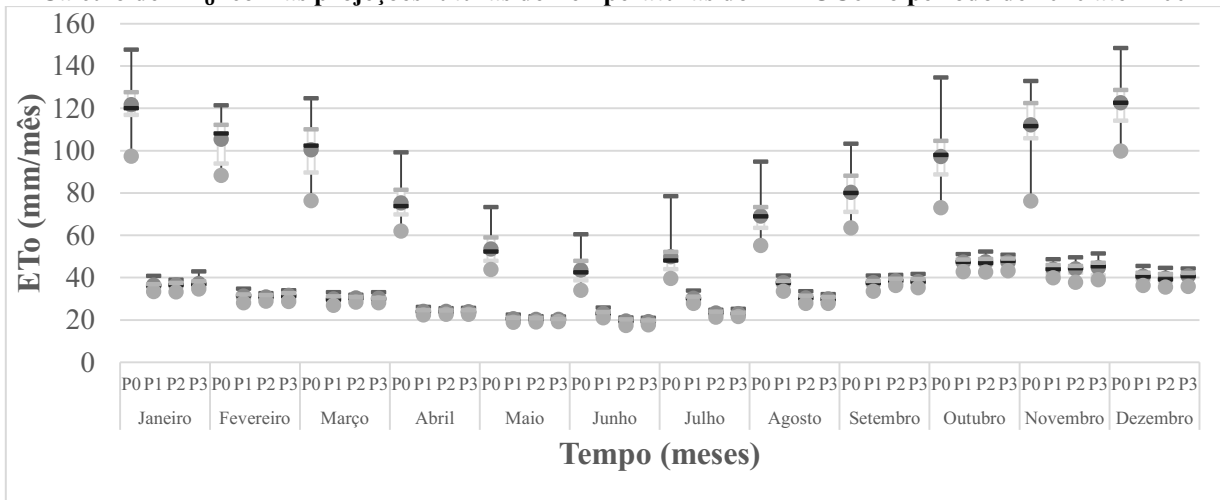
Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas do INM_CM4 no período de 2020 até 2100



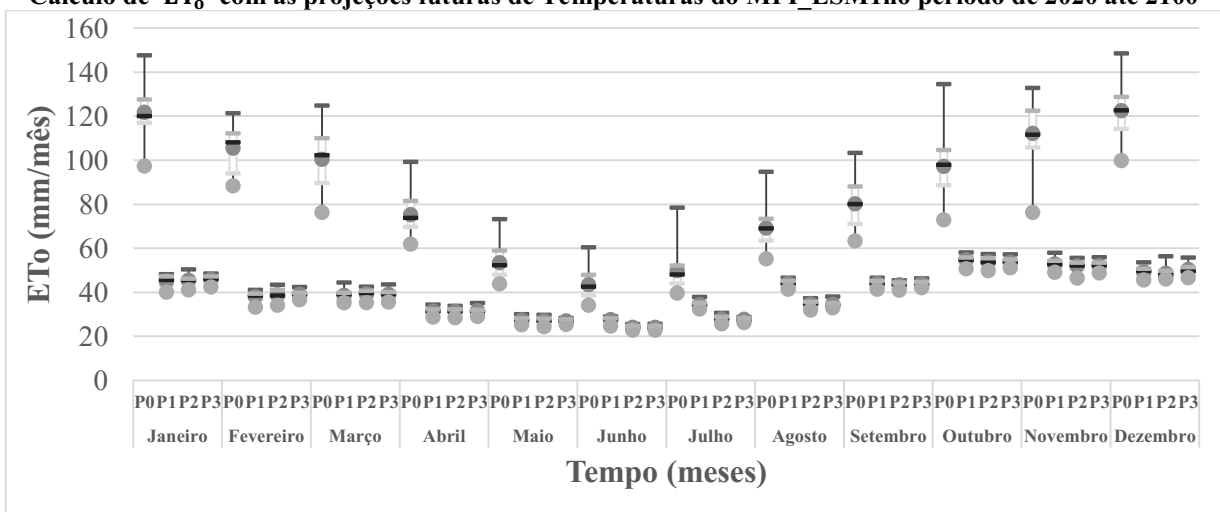
Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas do IPSL_CM6A no período de 2020 até 2100



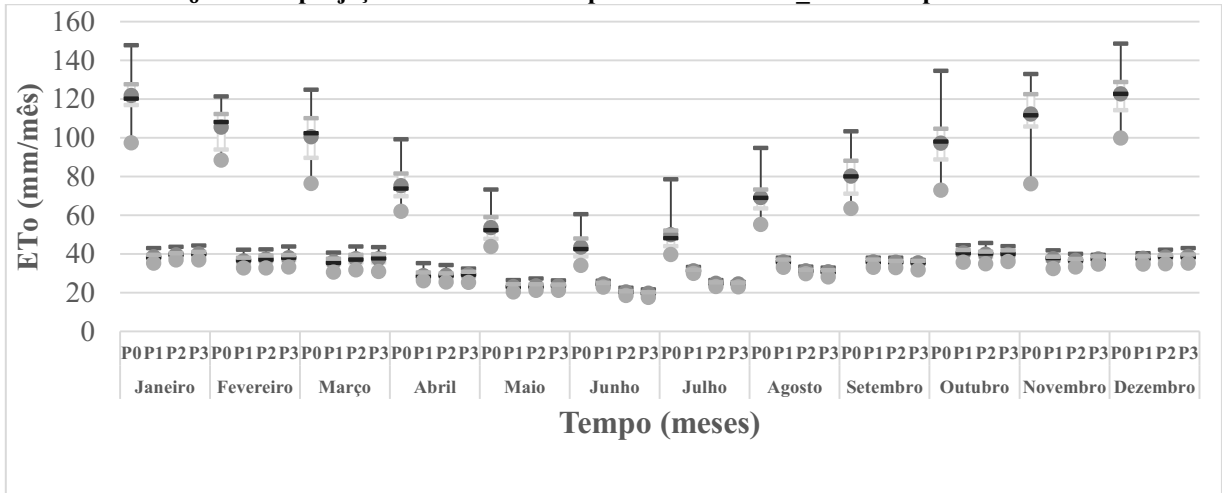
Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas do MIROC6 no período de 2020 até 2100



Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas do MPI_ESM1no período de 2020 até 2100

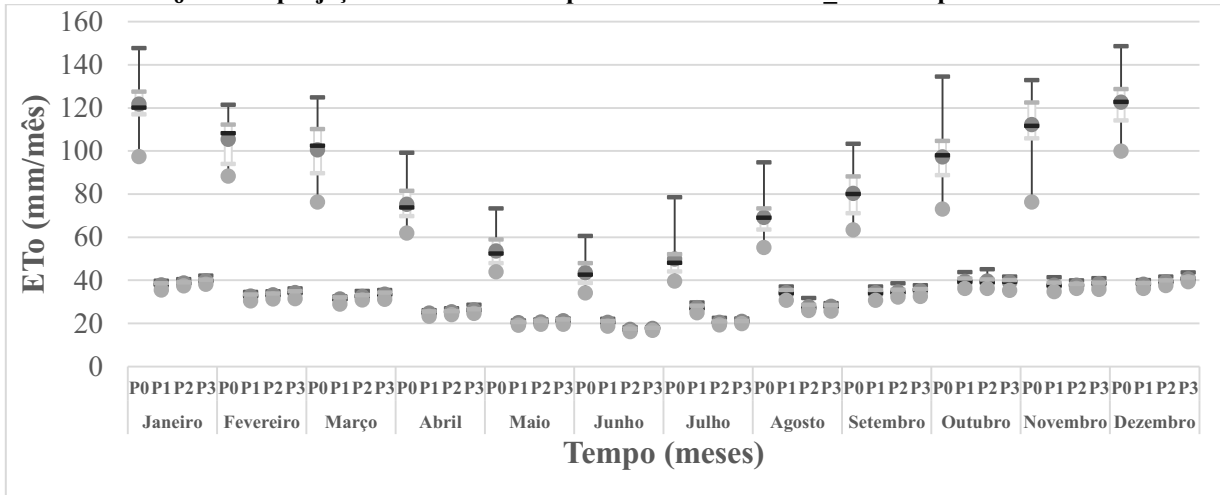


Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas do MRI_ESM2 no período de 2020 até 2100

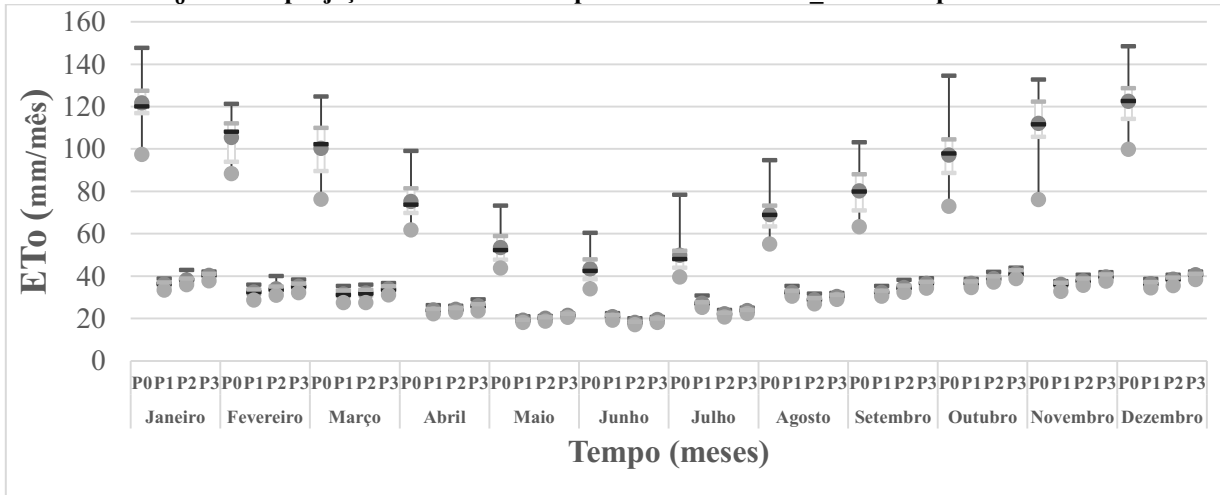


APÊNDICE D - Cálculo de ET_o com as projeções futuras de Temperaturas dos MCGs, no período de 2020 até 2100, para o cenário SSP5-8.5.

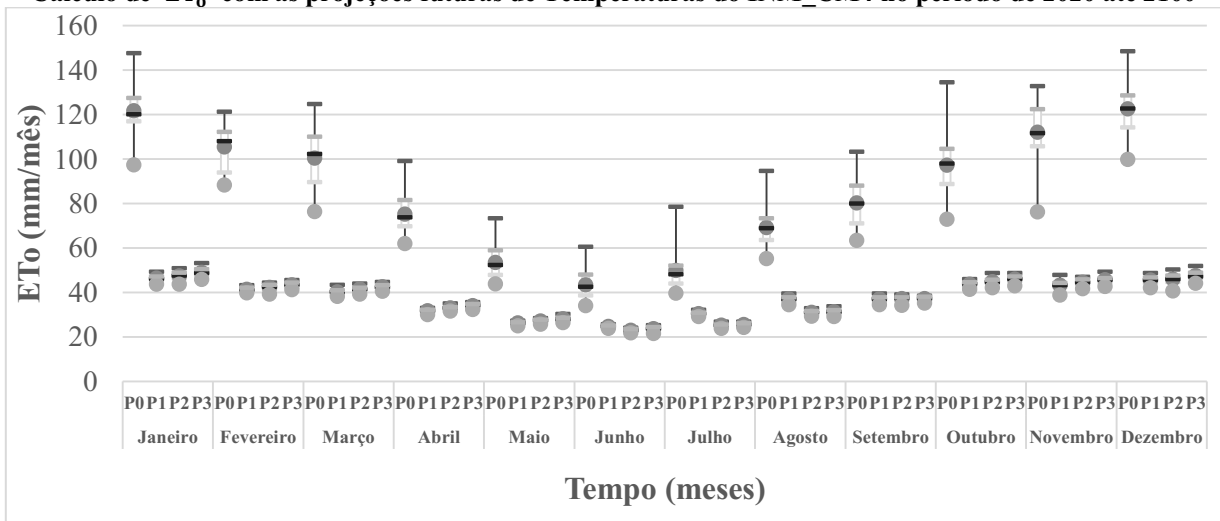
Cálculo de ET_o com as projeções futuras de Temperaturas do ACCESS_CM2 no período de 2020 até 2100



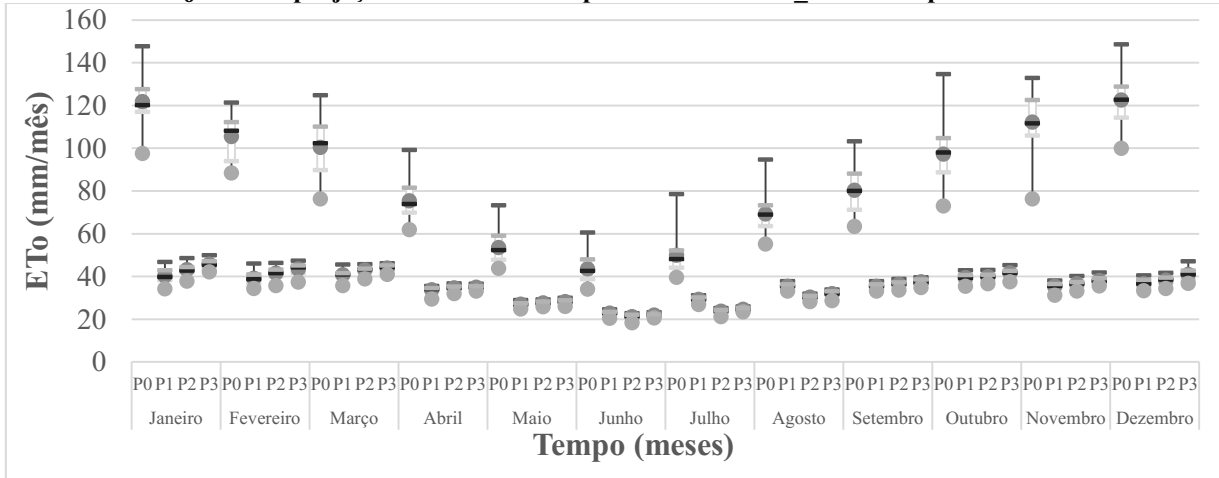
Cálculo de ET_o com as projeções futuras de Temperaturas do CMCC_ESM2 no período de 2020 até 2100



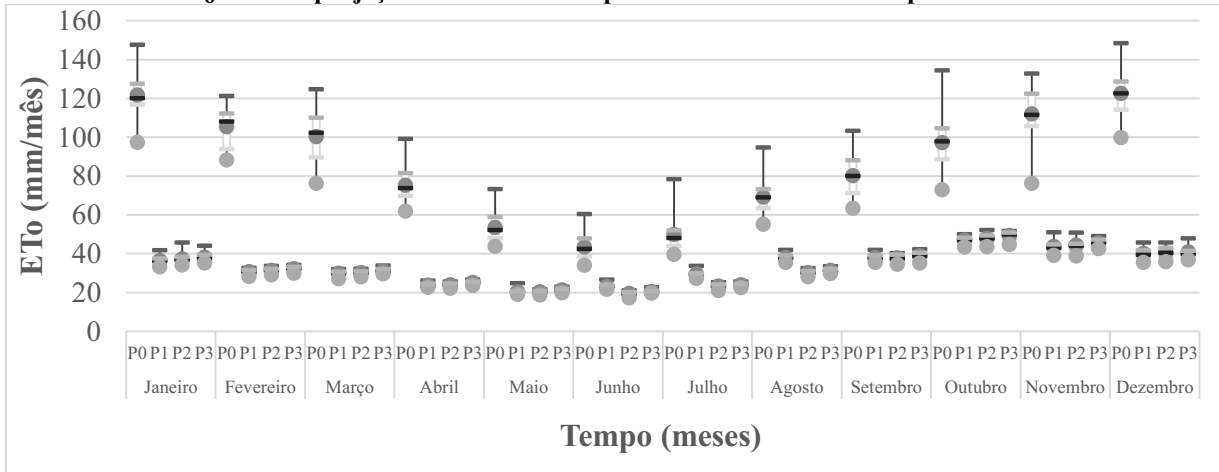
Cálculo de ET_o com as projeções futuras de Temperaturas do INM_CM4 no período de 2020 até 2100



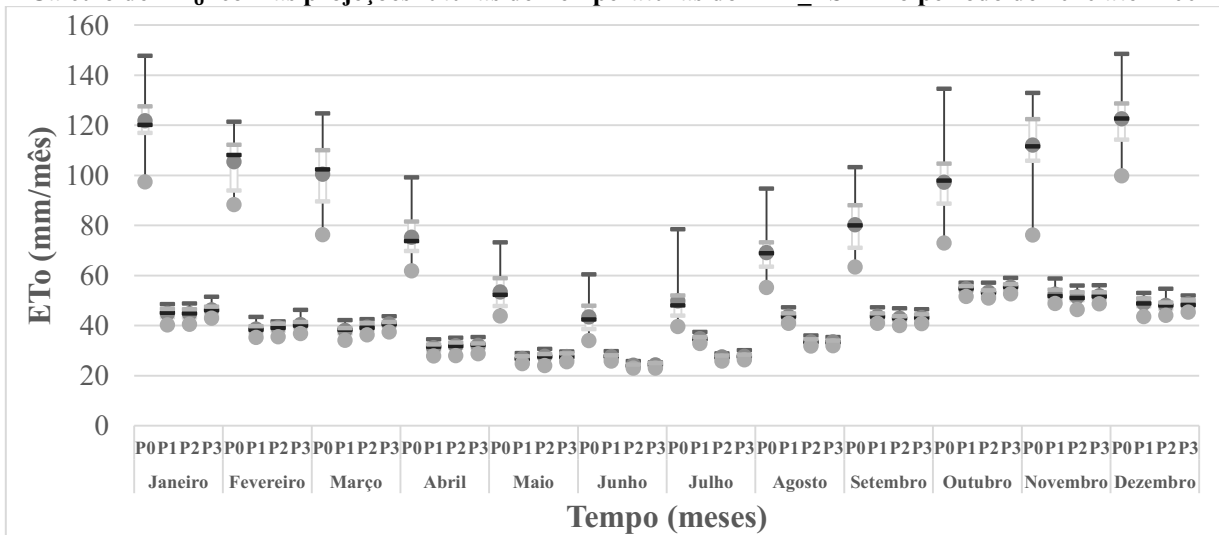
Cálculo de ET_o com as projeções futuras de Temperaturas do IPSL_CM6A no período de 2020 até 2100



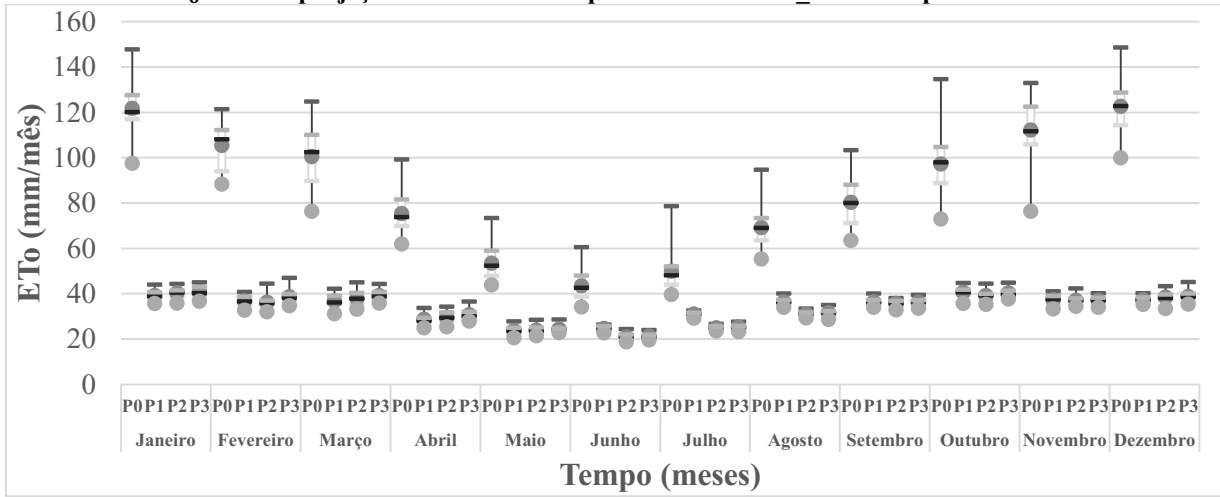
Cálculo de ET_o com as projeções futuras de Temperaturas do MIROC6 no período de 2020 até 2100



Cálculo de ET_o com as projeções futuras de Temperaturas do MPI_ESM1 no período de 2020 até 2100

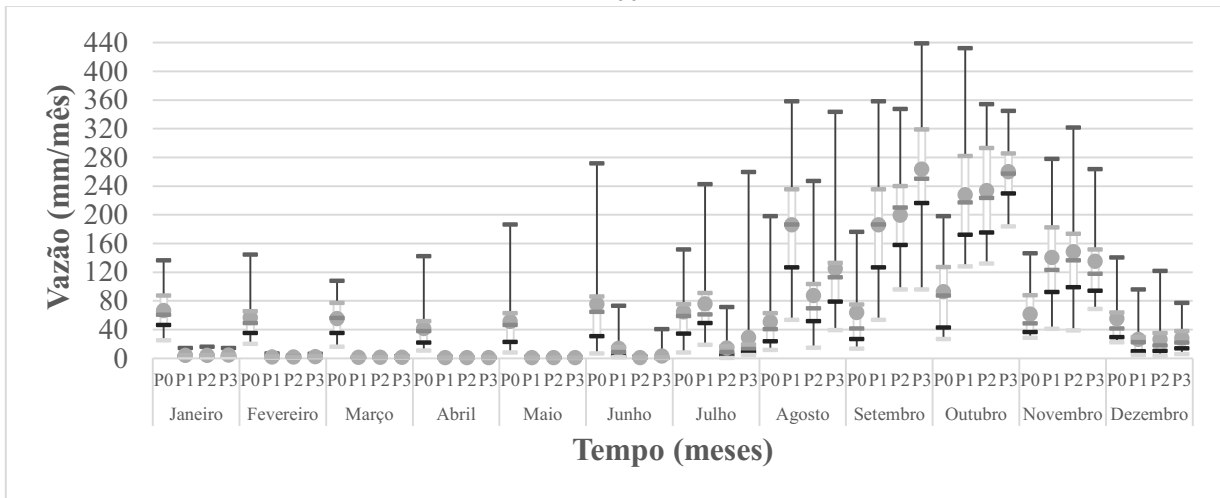


Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas do MRI_ESM2 no período de 2020 até 2100

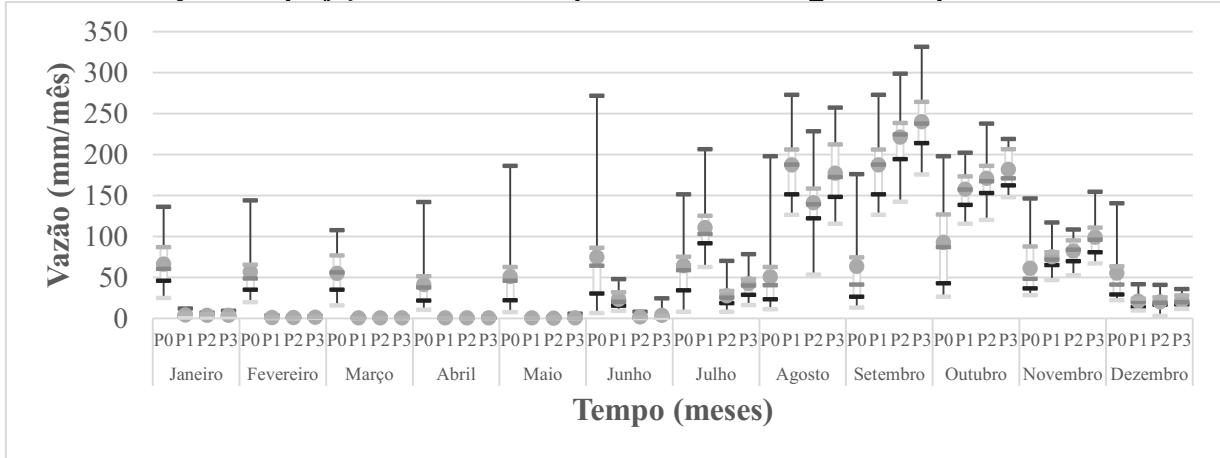


APÊNDICE E - Projeções futuras das vazões afluentes na UHE Foz do Areia, no período de 2020 até 2100, para o cenário SSP2-4.5

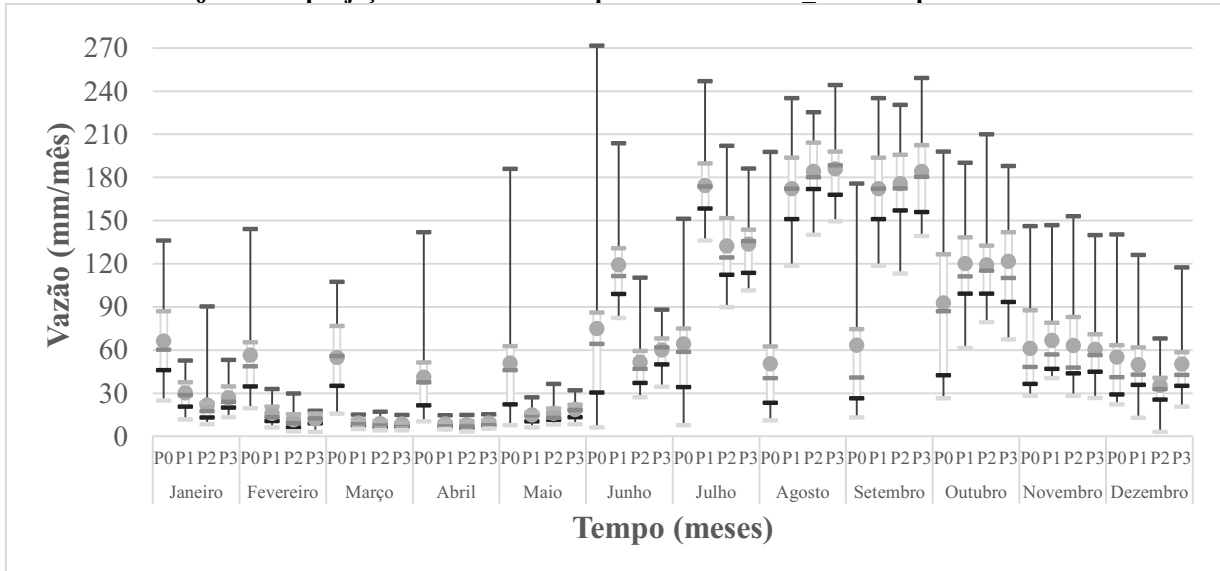
Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas do ACCESS_CM2 no período de 2020 até 2100



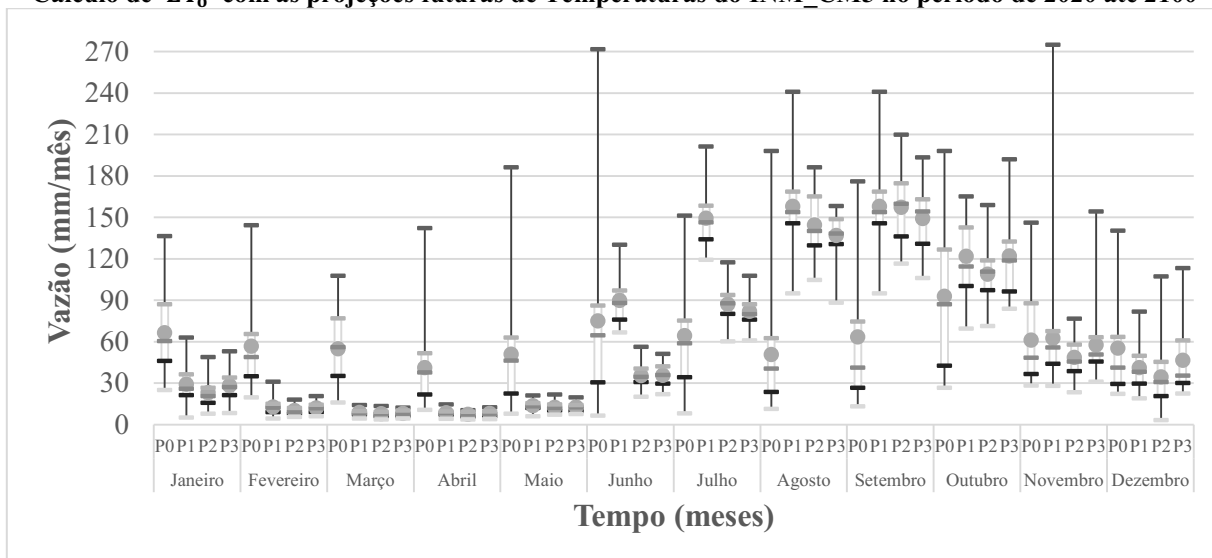
Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas do CMCC_ESM2 no período de 2020 até 2100



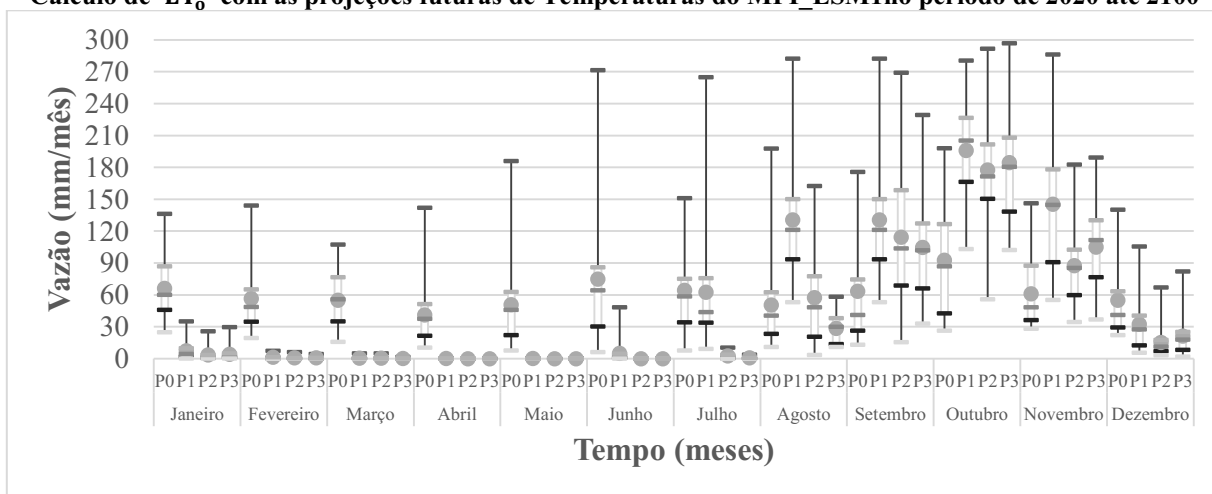
Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas do INM_CM4 no período de 2020 até 2100



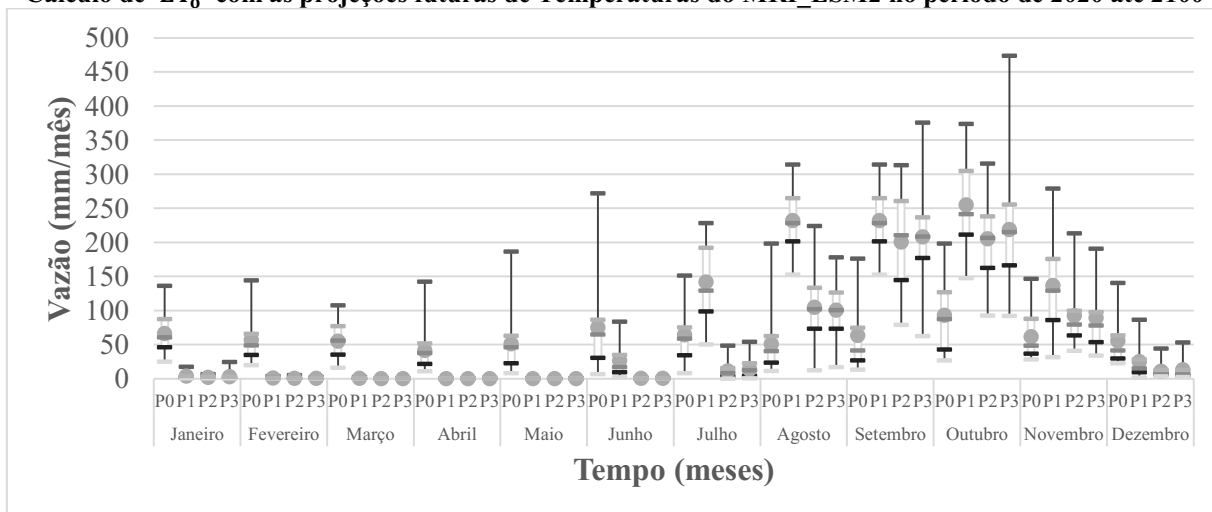
Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas do INM_CM5 no período de 2020 até 2100



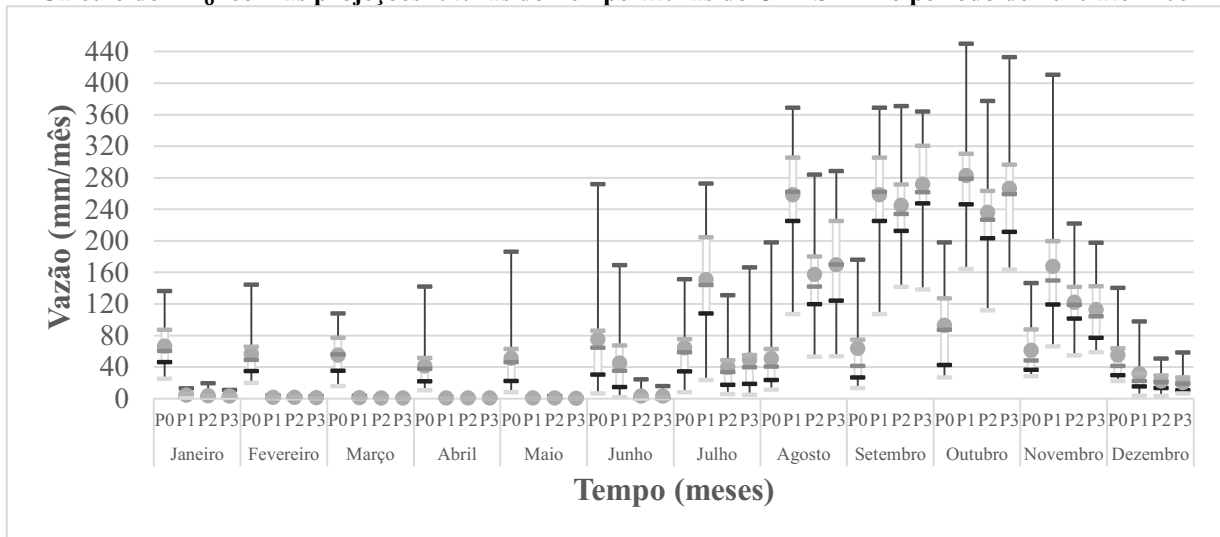
Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas do MPI_ESM1 no período de 2020 até 2100



Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas do MRI_ESM2 no período de 2020 até 2100

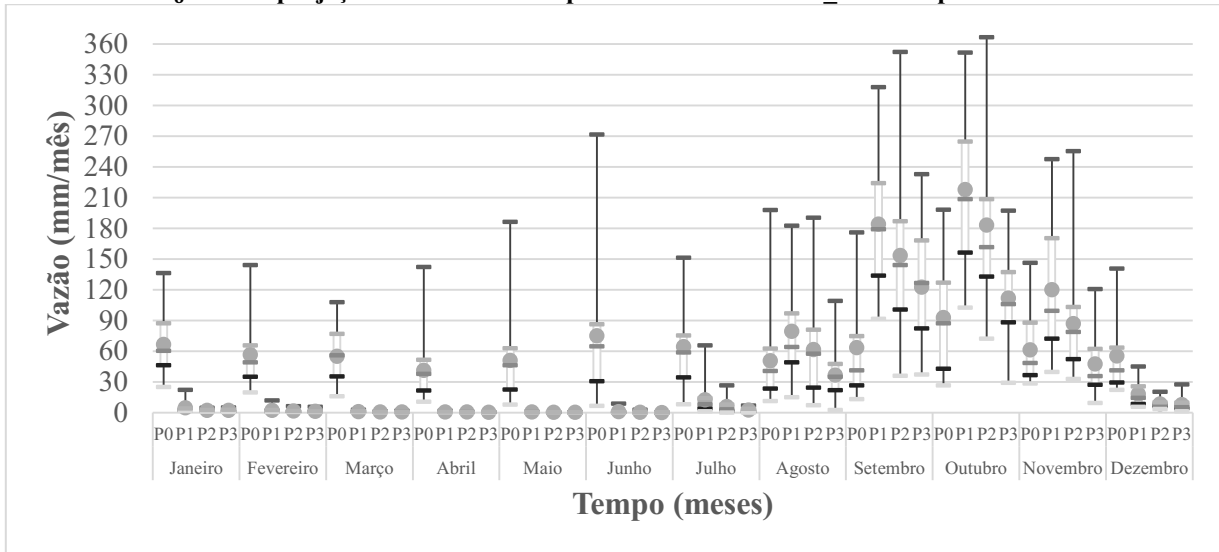


Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas do UKESM1 no período de 2020 até 2100

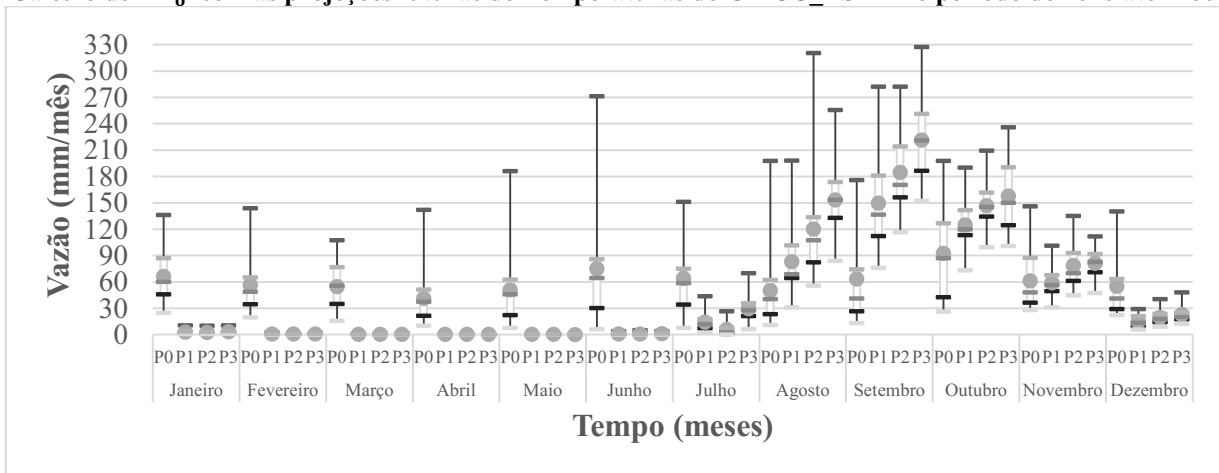


APÊNDICE F - Projeções futuras das vazões afluentes na UHE Foz do Areia, no período de 2020 até 2100, para o cenário SSP5-8.5.

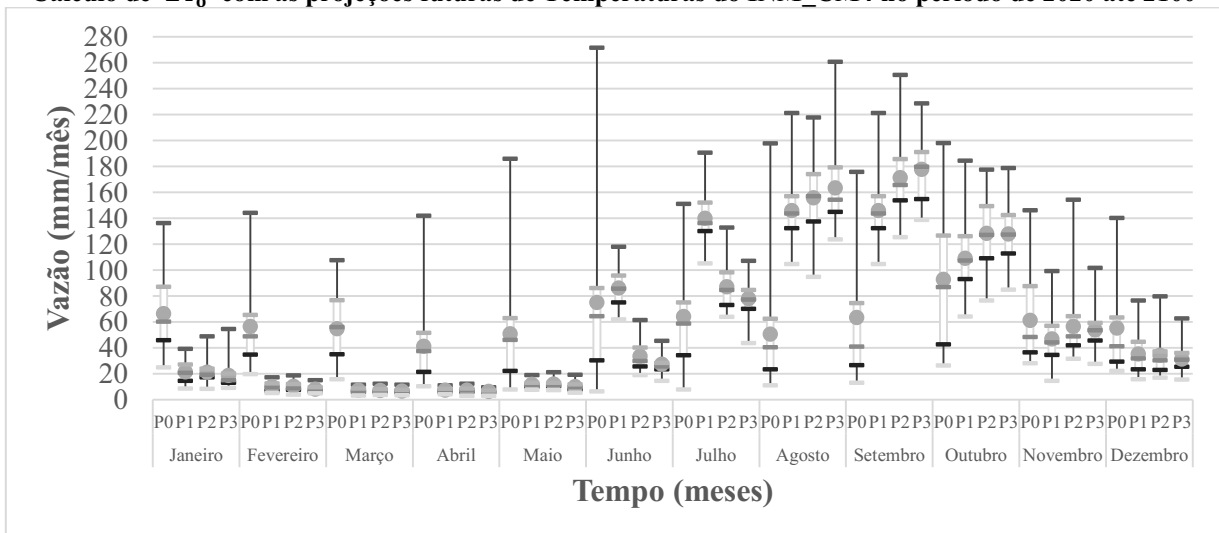
Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas do ACCESS_CM2 no período de 2020 até 2100



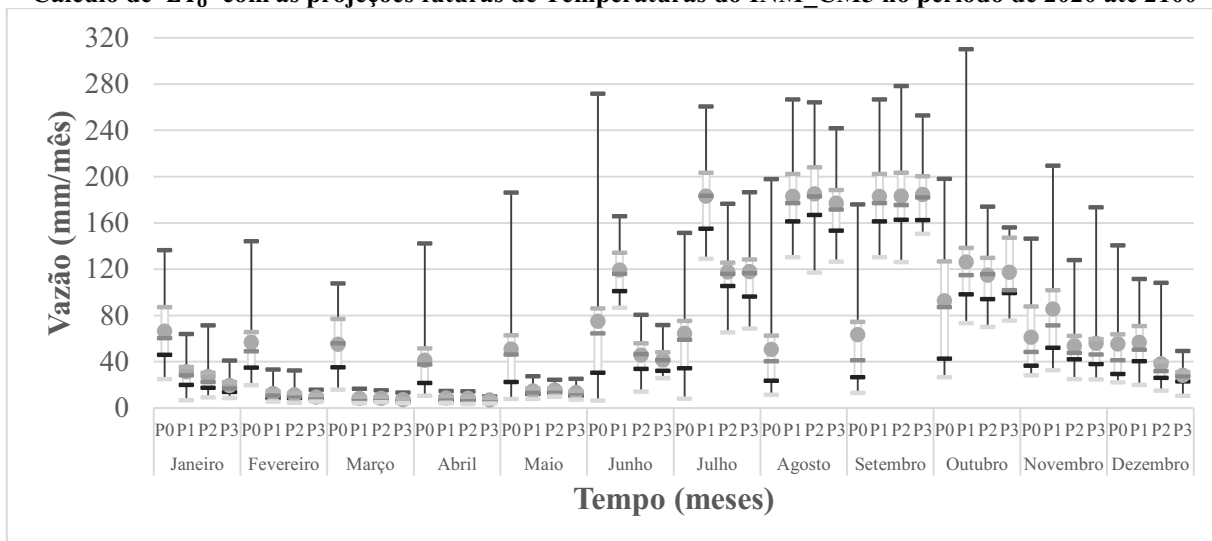
Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas do CMCC_ESM2 no período de 2020 até 2100



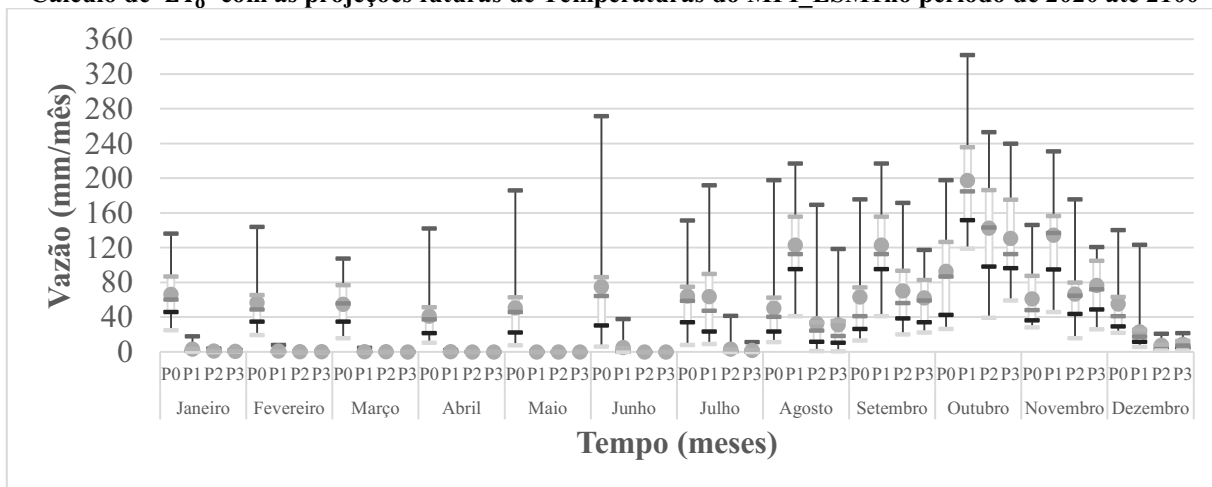
Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas do INM_CM4 no período de 2020 até 2100



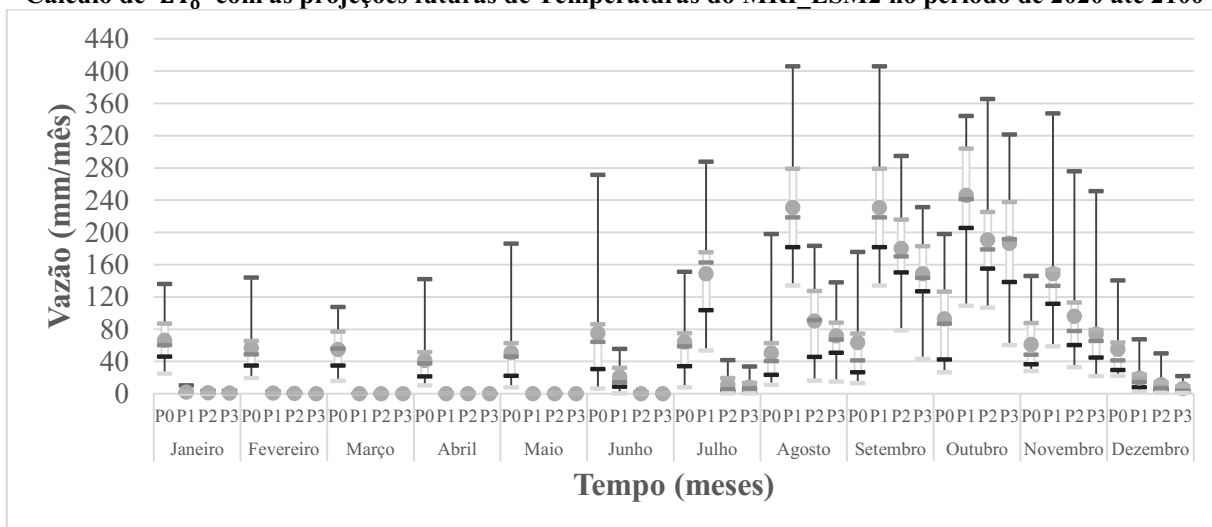
Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas do INM_CM5 no período de 2020 até 2100



Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas do MPI_ESM1 no período de 2020 até 2100



Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas do MRI_ESM2 no período de 2020 até 2100



Cálculo de ET_0 com as projeções futuras de Temperaturas do UKESM1 no período de 2020 até 2100

