

**Avaliação do desempenho dos Modelos Climáticos Globais do projeto
CMIP6 em simular variáveis climáticas na região do Sistema Cantareira**

*Evaluation of the CMIP6 models in simulating climatic variables in the Cantareira Water
Production System*

*Evaluación de la capacidad de los Modelos Climáticos Globales del proyecto CMIP6 en
simular variables climáticas en la región del Sistema Cantareira*

Lucas Rickli de Oliveira

Mestrando, UTFPR, Brasil
Programa de Pós-Graduação de Stricto Sensu
lucasrickli@alunos.utfpr.edu.br

Cesar Augusto Medeiros Destro

Professor Doutor, UTFPR, Brasil.
cesardestro@utfpr.edu.br

Murilo Cesar Lucas

Professor Doutor, Unicamp, Brasil.
mlucas@unicamp.br

RESUMO

Tem sido mostrado que Sistema Cantareira é altamente suscetível aos efeitos da variabilidade e mudanças climáticas. Gestores de recursos hídricos necessitam de informações menos incertas sobre a projeção de mudanças climáticas para medidas adaptativas. Entender a capacidade dos modelos climáticos globais em simular as variáveis climáticas é essencial para obter previsões de confiança. Neste contexto, este trabalho busca avaliar e ranquear o desempenho de 10 modelos climáticos globais do recente Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) em simular as principais variáveis climáticas para a área do Sistema Cantareira. Para isso, foram utilizadas várias métricas estatísticas (r , RMSE, Pbias e KGE) a fim de avaliar o desempenho de cada modelo em relação ao período observado (2000-2013) e combinar os resultados para ranquear os desempenhos. Os resultados mostram que os modelos que tiveram o melhor e pior desempenho para dados de precipitação foram EC-EARTH3 e NorESM2-MM, respectivamente, para umidade relativa do ar, INM-CM4_8 e IPSL-CM6A-LR, para radiação solar, INM-CM5 e MIROC6, para temperatura máxima, ACCESS-ESM1-5 e MIROC6, para temperatura mínima, ACCESS-ESM1-5 e IPSL-CM6A-LR e para velocidade do vento, MRI-ESM2 e INM-CM4_8. No geral, o estudo evidencia a importância da avaliação individual dos modelos e da seleção adequada destes para a geração de informações confiáveis em estudos climáticos.

PALAVRAS-CHAVE: CMIP6. Modelos Climáticos Globais. Mudanças Climáticas.

SUMMARY

The Cantareira Water Production System is highly susceptible to the effects of climate changes. Extreme drought events affect reservoir levels and the water supply of millions of people. Therefore, water resource managers need reliable information about the of these events. Understanding the ability of global climate models to simulate climatic variables is essential to obtain reliable forecasts. In this context, this work evaluates the performance of 10 models from the recent Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) in simulating the main climatic variables for the Cantareira System area. For this, several statistical metrics (r , RMSE, Pbias and KGE) were used to evaluate the performance of each model in relation to the observed period (2000-2013) and combine the results to rank the top performances. The results show that the models with the best and worst performance for precipitation data were EC-EARTH3 and NorESM2-MM, respectively, for relative humidity, INM-CM4_8 and IPSL-CM6A-LR, for solar radiation, INM-CM5 and MIROC6, for maximum temperature, ACCESS-ESM1-5 and MIROC6, for minimum temperature, ACCESS-ESM1-5 and IPSL-CM6A-LR, and for wind speed, MRI-ESM2 and INM-CM4_8. Overall, the study highlights the importance of individual model assessment and appropriate selection for generating reliable information in climate studies.

KEYWORDS: CMIP6. Glocal Climate Models. Climate Change.

RESUMEN

El Sistema Cantareira es altamente susceptible a los efectos de la variabilidad y cambios climáticos. Eventos extremos de sequía afectan los niveles de los embalses, así como el suministro de agua a millones de personas. Por lo tanto, los gestores de recursos hídricos necesitan información confiable sobre la ocurrencia de estos eventos. Comprender la capacidad de los modelos climáticos globales para simular las variables climáticas es esencial para obtener predicciones fiables. En este contexto, este trabajo busca evaluar y clasificar el rendimiento de 10 modelos del reciente Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) en simular las principales variables climáticas para el área del Sistema Cantareira. Para ello, se utilizaron varias métricas estadísticas (r , RMSE, Pbias y KGE) con el fin de evaluar el desempeño de cada modelo en relación al período observado (2000-2013) y combinar los resultados para clasificar los rendimientos. Los resultados muestran que los modelos con el mejor y peor rendimiento para datos de precipitación fueron EC-EARTH3 y NorESM2-MM, respectivamente, para humedad relativa del aire, INM-CM4_8 e IPSL-CM6A-LR, para radiación solar, INM-CM5 y MIROC6, para temperatura máxima, ACCESS-ESM1-5 y MIROC6, para temperatura mínima, ACCESS-ESM1-5 e IPSL-CM6A-LR, y para velocidad del viento, MRI-ESM2 e INM-CM4_8. En general, el estudio resalta la importancia de la evaluación individual de los modelos y de la selección adecuada de estos para la generación de información confiable en estudios climáticos.

PALABRAS CLAVE: CMIP6. Modelos Climáticos Globales. Cambio Climático.

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas exercem um impacto significativo no sistema hidrológico das bacias. Existem fortes evidências que confirmam o papel destas na modificação das variáveis climáticas, como precipitação e temperatura, e dos regimes hidrológicos observados em reservatórios do mundo todo nas últimas décadas (GUDMUNDSSON et al., 2021).

De acordo com os últimos relatórios do Intergovernmental Panel on Climate Changes (IPCC) (IPCC, 2022), o clima global esquentou durante as últimas décadas em todas as regiões do mundo, a temperatura média da superfície global no início do século XXI já era 1.09°C maior do que a temperatura média do início do século anterior (XIX). Os aumentos registrados na concentração de gases de efeito estufa (GEE) desde 1750 são inequivocadamente causados por atividades humanas (DONG et al., 2016; DONG et al., 2017; KING et al., 2016).

Nos últimos anos, as mudanças climáticas têm causado uma série de impactos ambientais que se apresentam em condições adversas do clima, como o aumento na frequência e na intensidade de eventos extremos climáticos como secas e precipitações intensas (SIEBERS et al. 2019; GUDMUNDSSON et al., 2021).

Recentemente, o estado de São Paulo sofreu duas secas prolongadas e severas. A primeira, no início dos anos 2000, foi responsável por uma grande crise energética. Na segunda, em 2013, a seca afetou gravemente o abastecimento de água de aproximadamente 9 milhões de pessoas na região metropolitana de São Paulo (RMSP) (MARENGO et al., 2010). Nesta época, o Sistema Cantareira teve uma queda em sua contribuição para o abastecimento na produção de água em 56%, de 33 m³/s no início da crise para 14 m³/s, em março de 2015 (CUSTÓDIO, 2015).

Os impactos hidrológicos das mudanças climáticas tendem a agravar os riscos existentes e futuros associados à gestão de recursos hídricos (TIWARI; MISHRA, 2022). Neste contexto, para que os governantes possam planejar políticas públicas integradas à adaptação ante a estes impactos, é importante que haja projeções climáticas futuras de confiança, a fim de que sejam elaboradas estratégias eficientes e evitados mais retrocessos no aspecto de mudanças climáticas (BERHANU et al., 2023).

Os Modelos Climáticos Globais (MCGs) e Regionais (RCMs) são uma ferramenta essencial para investigar os impactos das mudanças climáticas no regime hídrico de bacias, assim como a ocorrência futuras destes eventos extremos. Além das projeções, também são utilizados para estudar a climatologia histórica e atual (AGYEKUM et al., 2023).

No entanto, para o uso de GCMs (ou RCMs) em estudos sobre uma região específica em um determinado período, a sua capacidade de simular as condições climáticas observadas deve ser verificada. Geralmente, as avaliações das performances dos modelos são feitas para diversas variáveis climáticas, comparando períodos históricos observados com os dos modelos. Métricas que investigam os erros médios, o viés, a correlação entre os dados são exemplos de métodos estatísticos utilizados no processo de avaliação (AGYEKUM et al., 2022; AKINSANOLA; ONGOMA; KOOPERMAN, 2021; FAYE; AKINSANOLA, 2022). A avaliação pode ser feita para uma ou mais variáveis, em escala temporal ou espacial (ou ambas), isto reduzirá incertezas associadas aos modelos e erros nas análises, bem como fornecerá projeções confiáveis para o futuro, usando modelos apropriados escolhidos a partir da avaliação de performance (IPCC, 2014).

Vários grupos de pesquisadores por todo o mundo têm desenvolvido modelos climáticos. O Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (*Coupled Model Intercomparison Project*, CMIP) objetiva produzir e analisar os modelos climáticos globais e a melhor compreensão das mudanças climáticas passadas, presentes e futuras (EYRING et al., 2016). Os modelos produzidos no último ciclo de estudos do IPCC, o CMIP6, apresentam melhorias na resolução espacial e na representação dos processos físicos em comparação aos modelos prévios do CMIP5 (EYRING et al., 2016).

São relativamente poucos os estudos que avaliaram o desempenho dos modelos do CMIP5 no Brasil ou América do Sul (ALMAGRO et al., 2020; FALCO et al., 2019; LLOPART; SIMÕES REBOITA; PORFÍRIO DA ROCHA, 2020; SOLMAN; BLÁZQUEZ, 2019), os resultados mostram boa performance de conjuntos multimodelos em simular as variáveis climáticas, enquanto análises individuais apresentaram mais vieses, reforçando a necessidade de avaliação individual dos modelos.

Com relação a avaliação dos modelos do projeto CMIP6, a literatura é ainda mais escassa (CORREA et al., 2022; DIAS; REBOITA, 2021). Apesar da comprovada importância de avaliar a performance dos diferentes modelos do CMIP6, não existem estudos em nível nacional que realizem esta avaliação de forma relevante para estudos de impacto ante as mudanças climáticas, quanto mais para uma área importante em termos de abastecimento de água como o Sistema Cantareira, ou mesmo o estado de São Paulo. O presente trabalho busca preencher esta lacuna na literatura ao realizar uma avaliação do desempenho dos Modelos Climáticos Globais do CMIP6 em simular variáveis climáticas na região do Sistema Cantareira.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o desempenho dos Modelos Climáticos Globais do projeto CMIP6 em simular as médias mensais de precipitação, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade do vento e temperatura máxima e mínima para a área do Sistema Cantareira.

2 METODOLOGIA

Avaliação do desempenho dos modelos foi feita para as seguintes variáveis: precipitação, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade do vento e temperatura.

A metodologia de avaliação segue três etapas: Inicialmente, a obtenção de dados climáticos observados do período histórico de 2000-2013 e dados dos modelos climáticos do CMIP6 referente ao mesmo período. Na segunda etapa, a avaliação do desempenho individual dos modelos do CMIP6 para cada variável, com uso de análise estatística. Na terceira etapa, foi feito o ranqueamento do desempenho dos modelos climáticos combinando todas as métricas utilizadas.

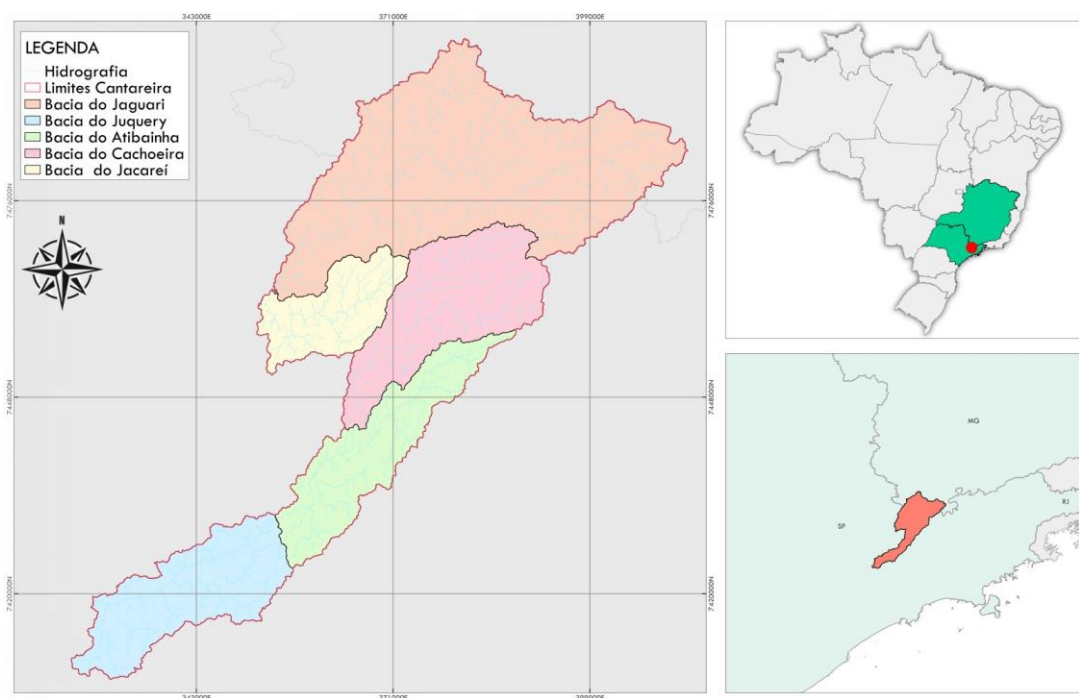
2.1 Área de estudo

O Sistema Cantareira (Figura 1) localiza-se ao norte da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), é um dos maiores sistemas de abastecimento público de do mundo, com uma

produção de água que chega atingir 33mil litros por segundo, sendo responsável por abastecer cerca de 8,8 milhões de pessoas (46% da população da RMSP) (WHATELY; CUNHA, 2006).

O Sistema Cantareira é composto por: Cinco reservatórios (Jaguari, Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Juquery), túneis e canais de interligação entre uma represa e outra à jusante, uma estação elevatória de água (Águas Claras) e uma estação de tratamento de água (ETA Guaraú). A água produzida no sistema é proveniente das cinco bacias citadas anteriormente, sendo a maior delas a bacia do Jaguari-Jacareí (reservatórios interligados). (GESUALDO et al., 2019; WHATELY; CUNHA, 2006).

Figura 1 – Localização das bacias hidrográficas à montante dos reservatórios superficiais que compõem o Sistema Cantareira. Não está sendo considerada a transposição de águas da bacia do Rio Paraíba do Sul



2.2 Dados climáticos

2.2.1 Dados climáticos observados (período de 2000-2013)

Os dados climáticos observados de precipitação (pr), umidade relativa do ar (hur), radiação solar (rss), velocidade do vento (sfcwind) e temperatura (tmax e tmin) utilizados neste estudo foram obtidos de Xaxier et al. (2016), um dataset que contém dados diários abrangendo todo território brasileiro, em um grid com resolução espacial de 0.25° x 0.25° (latitude/longitude).

O dataset desenvolvido por Xavier et al. (2016), devido ao controle de qualidade e a extensa rede de estações pluviométricas (3625) e climáticas (735) utilizadas em seu desenvolvimento, fornece informações confiáveis e já foi utilizado e validado em várias aplicações em território brasileiro (DIAS; MARTINS; MARTINS, 2024; DOS SANTOS SILVA et al., 2023; FERREIRA et al., 2023; MARCHEZEPE et al., 2023).

2.2.2 Dados climáticos projetados pelos Modelos Climáticos Globais do CMIP6

Para obtenção de dados dos modelos climáticos do projeto CMIP6, foi utilizado o dataset CLIMBra (BALLARIN et al., 2023), que fornece dados com correção de viés de 10 modelos do CMIP6 (Quadro 1), também em um grid de resolução espacial de 0.25° x 0.25° (latitude/longitude), não só para projeções futuras, mas também para períodos históricos, como é o presente caso.

O dataset desenvolvido por Ballarin et al. (BALLARIN et al., 2023) é recente, porém também vem sendo utilizado e validado em estudos climáticos aplicados ao território brasileiro (BALLARIN et al., 2023a; FERREIRA et al., 2023; MONTEIRO; CABRAL, 2023; REBOITA et al., 2023).

Quadro 1 – Lista dos Modelos Climáticos Globais utilizados no trabalho

Modelo	Instituição	País
ACCESS_ESM1	Australian Community Climate and Earth System Simulator Climate Model Version 1	Austrália
CMCC_ESM2	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici	Itália
EC_EARTH3	EC Earth Consortium	Europa
INM_CM4_8	Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences	Rússia
INM_CM5	Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences	Rússia
IPSL_CM6A	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)	França
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
MPI_ESM1	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	Alemanha
MRI_ESM2	Meteorological Research Institute (MRI)	Japão
NorESM2	Norwegian Earth System Model	Noruega

2.3 Métodos de avaliação

2.3.1 Métricas estatísticas

Os modelos do CMIP6 foram avaliados pelo seu desempenho em simular a climatologia da área de estudo comparando-os com os dados observados de precipitação (*pr*), umidade relativa do ar (*hur*), radiação solar (*rss*), velocidade do vento (*sfcwind*) e temperatura (*tmax* e *tmin*). A análise foi feita com base nas médias mensais, algo comum em recentes estudos de dados e projeções climáticas (GESUALDO et al., 2019).

A performance individual dos modelos foi avaliada utilizando métodos estatísticos, as métricas utilizadas neste trabalho incluem o coeficiente de correlação (*r*), o erro quadrático médio (RMSE), o percentual de viés (*Pbias*) e os coeficientes de eficiência de Kling-Gupta (KGE). Estas métricas vêm sendo empregadas em estudos voltados à avaliação de modelos climáticos do CMIP6 em diversas regiões do planeta (AGYEKUM et al., 2022; AKINSANOLA; ONGOMA;

KOOPERMAN, 2021; BERHANU et al., 2023b; FAYE; AKINSANOLA, 2022; IGNACIO-REARDON; LUO, 2023; YAZDANDOOST et al., 2021).

Quadro 2 – Lista de métricas estatísticas utilizadas no trabalho

Métrica estatística	Equação	Amplitude	Melhor valor
Percentual de viés (Pbias)	$Pbias = \frac{\sum_{i=1}^n (Qobs - Qsim)^2}{\sum_{i=1}^n (Qobs)} \times 100$	$-\infty$ até $+\infty$	0
O Erro Quadrático Médio (RMSE)	$MSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Qobs - Qsim)^2}{n}}$	0 até ∞	0
Coefficiente de correlação de Pearson (r)	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Qobs - Qmobs)^2 \times (Qsim - Qmsim)^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Qobs - Qmobs)^2 \times \sum_{i=1}^n (Qsim - Qmsim)^2}}$	-1 até 1	1
Coefficientes de eficiência de Kling-Kupta (KGE)	$KGE: 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$	$-\infty$ até 1	1

2.3.2 Ranking dos Modelos Climáticos Globais

Os 10 modelos do CMIP6 foram ranqueados de acordo com sua performance referente a cada métrica estatística (r, RMSE, Pbias e KGE), sendo atribuído o *rank* 1 para o modelo com melhor valor para determinada variável e métrica. Da mesma forma, o modelo com o pior valor recebe o *rank* 10.

O índice de classificação composto CRI (Composite Rating Index) foi utilizado para combinar os desempenhos dos modelos em cada variável, a fim de obter o ranking geral de performance dos modelos do CMIP6 na área de estudo. Um valor de CRI próximo a 1 indica um bom desempenho do modelo, enquanto valores próximos a 0 indicam mal desempenho. O ranking geral (CRI) dos Modelos Climáticos Globais (MCGs) foi calculado usando a seguinte equação:

$$CRI = 1 - \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n rank_i$$

Onde n e m representam o número de MCGs e de indicadores, respectivamente, e i representa o rank de desempenho do referido MCG para determinada variável e métrica. Esta abordagem de combinar e ranquear os modelos foi utilizada com sucesso em vários trabalhos (BERHANU et al., 2023; IQBAL et al., 2021; LI et al., 2022; SONG et al., 2023; TONG; ZHENG; FU, 2022).

3 RESULTADOS

3.1 Médias mensais de precipitação e temperatura

Ao analisar os dados de precipitação, temperatura máxima e mínima dos modelos climáticos do CMIP6 em comparação com o período histórico de 2000-2013 (Figuras 2-4), fica claro que, em geral, os modelos capturam as principais tendências sazonais. Percebe-se bem o contraste entre o período mais chuvoso (Figura 2) e quente (Figura 3 e 4), de outubro até abril, e o período mais seco e frio, entre os meses de maio e agosto, aproximadamente.

Para os padrões de precipitação, INM-CM4_8 foi o modelo que apresentou a maior discrepância, estimando os maiores valores de precipitação mensal, principalmente nos meses de dezembro (334,96mm) até fevereiro (344,56mm). No período compreendido entre os meses de abril até agosto (mais secos), a maioria dos modelos capturaram os valores observados com mais acurácia.

Para os dados de temperatura, tanto para valores máximos (Figura 3) quando para valores mínimos (Figura 4), os valores simulados pelos modelos apresentam pouca discrepância em comparação ao visto nos padrões de chuva. Para os dados de temperatura máxima ainda há certa variabilidade entre os valores simulados e observados, NorESM2-MM por exemplo chegou a uma discrepância de +1,2°C em fevereiro e -1,0°C em relação as médias observadas.

Para os valores de temperatura mínima é possível constatar que os modelos foram mais consistentes em sua performance, não apresentando, a priori, grandes vieses e erros médios na maioria dos meses do ano.

Figura 2 – Comparação entre médias mensais de precipitação do período histórico observado e os dados dos modelos do CMIP6

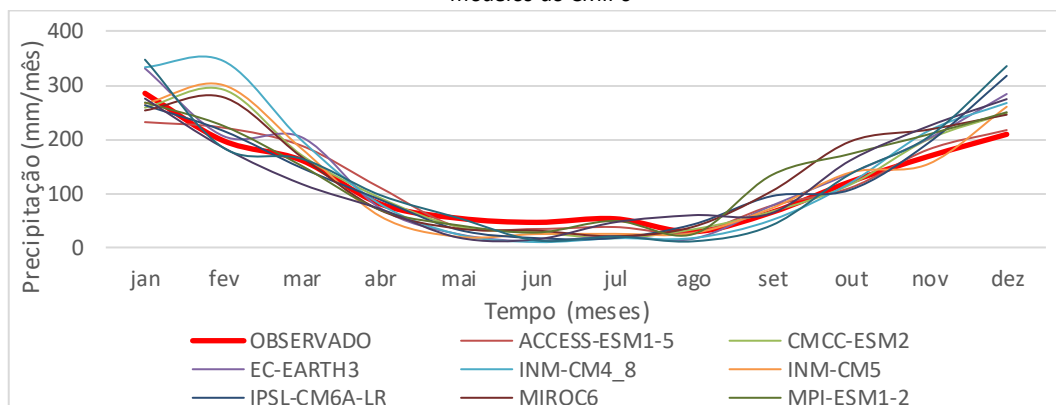


Figura 3 – Comparação entre médias mensais de temperatura máxima do período histórico observado e os dados dos modelos do CMIP6

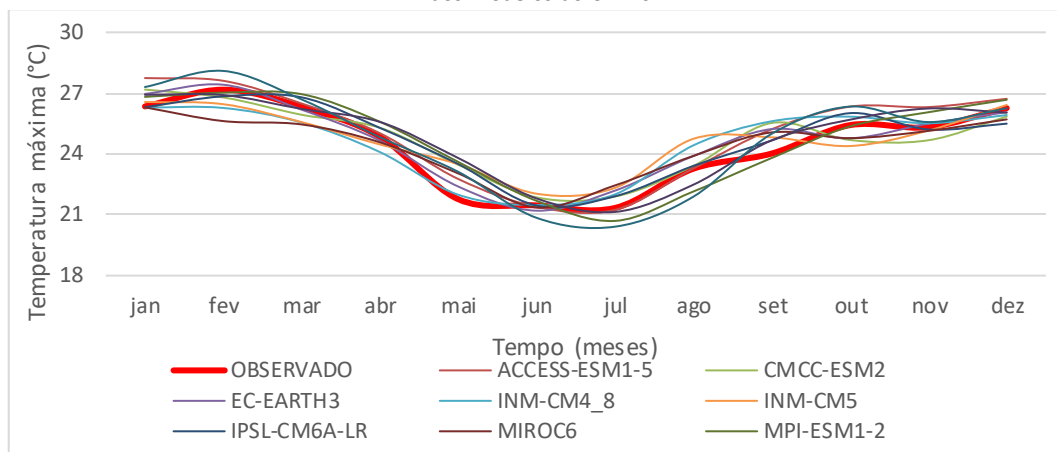
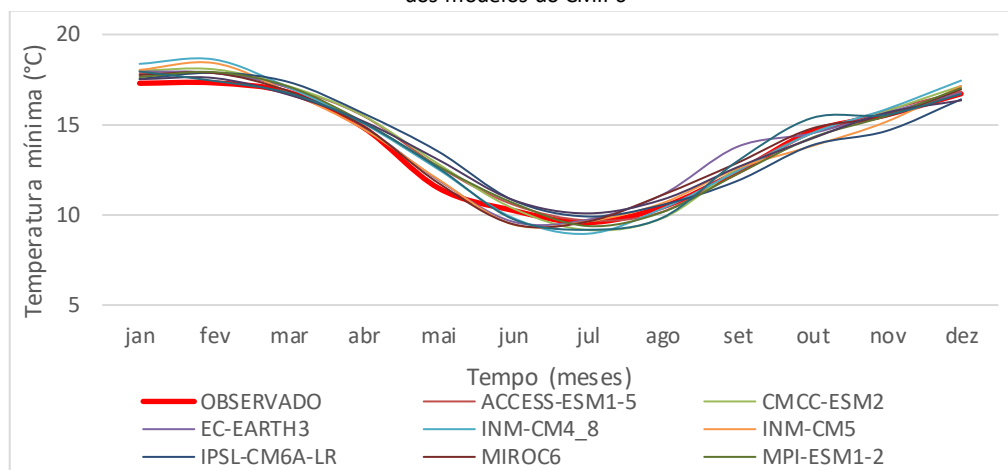


Figura 3 – Comparação entre médias mensais de temperatura mínima do período histórico observado e os dados dos modelos do CMIP6



3.2 Análise estatística dos Modelos Climáticos Globais

Para a precipitação (pr), percebe-se boa correlação entre os padrões observados e simulados, com 9 dos modelos (90%) apresentando r acima de 0,65. Em contrapartida, alguns modelos apresentaram grandes vieses nos valores do Pbias, três (30%) dos modelos (INM-CM4_8, MPI-ESM1-2 e MPI-ESM2) com valores de Pbias acima de 10%. O RMSE apontou magnitude considerável em relação aos valores médios dos dados observados, o maior valor de RMSE é de 3,19 para o modelo INM-CM4_8, o que condiz com a visualização gráfica dos extremos de precipitação (Figura 2). O KGE apresentou valores inferiores em relação ao coeficiente de correlação, apenas dois (20%) modelos (MIROC6 e MPI-ESM1-2) apresentaram KGE acima de 0,60; isto deve-se ao fato de que o KGE não leva em consideração apenas correlação linear, que teve bons valores, mas também a variabilidade e viés dos dados, e foram constatadas grandes discrepâncias nestes dois quesitos anteriormente.

Os valores de umidade relativa do ar (hur) e velocidade do vento (sfcwind) foram os quais os modelos tiveram maior dificuldade em simular os padrões observados. Percebe-se isto

claramente nas métricas de correlação e nos erros quadráticos médios. Nenhum modelo atingiu valores de r e KGE maior que 0,60 e em ambas as variáveis e todos os modelos tiveram erros médios da alta magnitude em relação as médias observadas.

Para os valores de radiação solar (rss) os modelos, em geral, desempenharam bem. Oito (80%) dos modelos apresentaram valores de r maiores que 0,65 e KGE maiores que 0,6. Vieses e erros quadráticos médios relativamente pequenos em relação as médias observadas. Os únicos que tiveram desempenho discrepante considerando a maioria das métricas foram MIROC6 e CMCC-ESM2.

Os valores de temperatura máxima tiveram desempenho razoável, porém consistentes, não havendo nenhum modelo discrepante em relação aos demais. A maioria dos modelos apresentou valores de r e KGE próximos a 0,6 e baixos valores de viés e erros médios. A temperatura mínima foi a variável a qual os modelos do CMIP6 tiveram o melhor desempenho, considerando todas as métricas e todas as variáveis. Todos (100%) os modelos apresentaram valores de r e KGE acima de 0,8; constatando assim alta correlação entre os dados, considerando também a variabilidade, viés e magnitude dos erros. Destaque para os modelos CMCC-ESM2, INM-CM4_8, INM-CM5 e NorESM2-NM; com altíssimos valores de correlação (0,88; 0,89; 0,89 e 0,87 respectivamente) e de KGE (0,86; 0,86; 0,88 e 0,86; respectivamente), este desempenho já foi constatado graficamente (Figura 4) nas seções anteriores.

Tabela 1 – Análise estatística dos dados dos modelos do CMIP6

Variável	Métrica	ACCE SS- ESM 1-5	CMCC -ESM2	EC- EART H3	INM- CM4_ 8	INM- CM5	IPSL- CM6A -LR	MIRO C6	MPI- ESM1- 2	MRI- ESM2	NorES M2- MM
pr	r	0,57	0,68	0,73	0,73	0,70	0,66	0,71	0,68	0,66	0,66
	Pbias	0,25	6,11	7,86	14,06	3,90	4,46	12,58	10,26	2,72	9,32
	KGE	0,55	0,56	0,53	0,40	0,56	0,56	0,61	0,61	0,59	0,40
	RMSE	2,99	2,91	2,82	3,19	2,83	2,91	2,67	2,74	2,82	3,37
hur	r	0,56	0,49	0,54	0,54	0,50	0,44	0,37	0,39	0,44	0,29
	Pbias	1,06	1,31	0,30	0,68	0,35	1,31	0,76	0,77	0,70	0,91
	KGE	0,38	0,28	0,25	0,30	0,20	0,15	0,19	0,31	0,27	0,21
	RMSE	4,84	5,40	5,34	5,15	5,65	6,01	5,83	5,22	5,42	5,69
rss	r	0,66	0,54	0,75	0,74	0,75	0,65	0,48	0,65	0,75	0,70
	Pbias	-0,82	-3,50	-2,30	-3,25	-1,97	-2,85	-3,82	-2,28	-2,50	-1,98
	KGE	0,63	0,50	0,74	0,73	0,74	0,65	0,38	0,64	0,73	0,69
	RMSE	2,30	2,33	1,92	1,98	1,88	2,16	2,38	2,12	1,80	2,08
sfcwind	r	0,57	0,42	0,31	-0,03	-0,07	0,41	0,55	0,37	0,55	0,44
	Pbias	-1,33	-2,36	-2,41	-4,49	-3,06	-0,96	-0,40	-0,25	-3,14	-2,56
	KGE	0,56	0,41	0,30	-0,06	-0,08	0,41	0,54	0,33	0,42	0,44
	RMSE	0,17	0,20	0,23	0,31	0,29	0,20	0,19	0,19	0,22	0,20
tasmax	r	0,64	0,66	0,55	0,55	0,61	0,59	0,57	0,64	0,69	0,75
	Pbias	2,24	1,03	0,99	0,49	0,99	1,14	-0,05	0,97	1,35	0,96
	KGE	0,61	0,64	0,55	0,54	0,58	0,58	0,53	0,63	0,69	0,71
	RMSE	2,25	1,89	2,32	2,16	1,99	2,11	2,03	2,12	1,86	1,84
tasmin	r	0,87	0,88	0,81	0,89	0,89	0,82	0,86	0,85	0,86	0,87
	Pbias	2,29	1,96	2,17	2,26	0,71	1,64	1,33	1,50	2,03	1,16

KGE	0,87	0,86	0,81	0,86	0,88	0,81	0,86	0,84	0,84	0,86
RMSE	1,59	1,59	1,92	1,56	1,49	1,82	1,63	1,72	1,58	1,61

3.3 Ranking dos Modelos Climáticos Globais

O ranking geral dos MCGs para cada variável foi calculado com base índice de classificação composto CRI para ranquear a performance dos modelos. Para dados de precipitação (pr) o modelo melhor ranqueado foi o EC-EARTH3, seguido pelos modelos MIROC6 e INM-CM5. Os modelos INM-CM4_8, ACCESS-ESM1-5 e EC-EARTH tiveram, nesta ordem, o melhor desempenho para os valores de umidade relativa do ar (hur). O modelo INM-CM5 foi o melhor ranqueado para os dados de radiação solar (rss), seguido pelos modelos EC-EARTH3 e MRI-ESM2.

Para a análise de temperatura máxima e mínima, o modelo com melhor performance foi o INM-CM5, CMCC-ESM2 também teve ótimo desempenho para ambas as variáveis (rank 2 e 3, respectivamente).

Tabela 2 – Ranking dos Modelos Climáticos Globais do CMIP6

Variável	Rank MCGs	r	Pbias	KGE	RMSE	Rank CRI
pr	EC-EARTH3	1	6	3	3	0,675
	MIROC6	2	9	1	1	0,675
	INM-CM5	4	2	4	4	0,650
	MPI-ESM1-2	5	8	2	2	0,575
	MRI-ESM2	8	1	5	5	0,525
	CMCC-ESM2	6	5	6	6	0,425
	IPSL-CM6A-LR	9	4	7	7	0,325
	ACCESS-ESM1-5	10	3	8	8	0,275
	INM-CM4_8	3	10	10	9	0,200
	NorESM2-MM	7	7	9	10	0,175
hur	INM-CM4_8	2	3	3	2	0,750
	ACCESS-ESM1-5	1	8	1	1	0,725
	EC-EARTH3	3	1	6	4	0,650
	MPI-ESM1-2	8	6	2	3	0,525
	INM-CM5	4	2	8	7	0,475
	MRI-ESM2	7	4	5	6	0,450
	CMCC-ESM2	5	10	4	5	0,400
	MIROC6	9	5	9	9	0,200
	NorESM2-MM	10	7	7	8	0,200
	IPSL-CM6A-LR	6	9	10	10	0,125
rss	INM-CM5	1	2	1	2	0,850
	EC-EARTH3	2	5	2	3	0,700
	MRI-ESM2	3	6	3	1	0,675
	NorESM2-MM	5	3	5	5	0,550
	INM-CM4_8	4	8	4	4	0,500
	ACCESS-ESM1-5	6	1	8	8	0,425
	MPI-ESM1-2	8	4	7	6	0,375

	IPSL-CM6A-LR	7	7	6	7	0,325
	CMCC-ESM2	9	9	9	9	0,100
	MIROC6	10	10	10	10	0,000
tasmax	ACCESS-ESM1-5	4	1	5	2	0,700
	MRI-ESM2	2	2	2	9	0,625
	CMCC-ESM2	3	4	3	8	0,550
	NorESM2-MM	1	8	1	10	0,500
	MPI-ESM1-2	5	7	4	4	0,500
	IPSL-CM6A-LR	7	3	6	5	0,475
	EC-EARTH3	10	5	8	1	0,400
	INM-CM5	6	6	7	7	0,350
	INM-CM4_8	9	9	9	3	0,250
	MIROC6	8	10	10	6	0,150
tasmin	ACCESS-ESM1-5	4	1	2	7	0,650
	CMCC-ESM2	3	5	3	6	0,575
	INM-CM4_8	1	2	6	9	0,550
	NorESM2-MM	5	9	4	5	0,425
	INM-CM5	2	10	1	10	0,425
	EC-EARTH3	10	3	10	1	0,400
	MIROC6	7	8	5	4	0,400
	MPI-ESM1-2	8	7	7	3	0,375
	MRI-ESM2	6	4	8	8	0,350
	IPSL-CM6A-LR	9	6	9	2	0,350
sfcwind	MRI-ESM2	1	4	1	1	0,825
	ACCESS-ESM1-5	2	2	2	2	0,800
	IPSL-CM6A-LR	7	1	7	3	0,550
	INM-CM5	5	5	5	4	0,525
	MIROC6	4	7	3	5	0,525
	MPI-ESM1-2	6	3	6	6	0,475
	CMCC-ESM2	3	9	4	7	0,425
	EC-EARTH3	8	6	8	8	0,250
	NorESM2-MM	10	8	10	9	0,075
	INM-CM4_8	9	10	9	10	0,050

4 CONCLUSÕES

O foco deste trabalho foi avaliar o desempenho dos modelos climáticos do CMIP6 em simular as médias mensais de precipitação, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade do vento e temperatura máxima e mínima para a área do Sistema Cantareira, a fim de servir de apoio para estratégias de adaptação e mitigação de impactos decorrentes das mudanças climáticas. Além disso, realizar uma seleção dos melhores modelos do CMIP6 a serem utilizados em previsões climáticas confiáveis para a área de estudo.

Em geral, os modelos capturaram as principais tendências sazonais de chuva e temperatura. Os resultados também demonstraram uma ampla variação da performance dos modelos em sua capacidade de simular diferentes variáveis climáticas ao serem avaliados por diferentes métricas estatísticas.

Para a precipitação, o melhor modelo foi o EC-EARTH e o pior o NorESM2-MM. Para umidade relativa do ar, o melhor modelo foi o INM-CM4_8, o pior o IPSL-CM6A-LR. O INM-CM5 apresentou melhor performance para simulação de dados de radiação solar e ACCESS-ESM1-5 a melhor para temperatura máxima, MIROC6 teve o pior desempenho para ambas. ACCESS-ESM1-5 também foi o mais bem avaliado para temperatura mínima, enquanto IPSL-CM6A-LR o pior. Os modelos MRI-ESM2 e INM-CM4_8 tiveram o melhor e pior desempenho para simulação de velocidade do vento, respectivamente.

Os modelos, em sua maioria, tiveram dificuldades em simular os valores de umidade relativa do ar e velocidade do vento, com mal desempenho em ambas as variáveis e em todas as métricas estatísticas. Para os dados de temperatura mínima, em contrapartida, todos os modelos apresentaram ótima performance, simulando com acurácia os valores observados, com boa correlação, pouco viés e baixa magnitude dos erros.

As variáveis de precipitação e temperatura podem ser consideradas as mais importantes, e são objeto de estudo de boa parte dos trabalhos que utilizam modelos climáticos do CMIP6. Neste trabalho, os modelos climáticos mais bem ranqueados apresentaram boa performance na simulação destas variáveis, principalmente as temperaturas mínimas.

Nota-se que na maioria dos casos, os modelos piores ranqueados tiveram péssimo desempenho ante as métricas estatísticas, com pouca correlação com os dados observados e alta magnitude de erros e viés (principalmente em valores extremos). O uso de qualquer destes modelos poderá trazer um acúmulo desnecessário de incertezas ao trabalho.

Por mais que o uso de conjunto multimodelos ou *ensembles* seja uma prática comum na literatura, visto que o uso de mais modelos tende a reduzir e compensar as incertezas individuais. Percebe-se a importância da seleção adequada dos modelos a serem utilizados, em acordo com as particularidades do trabalho. O uso em conjunto de modelos que passaram por prévia avaliação de performance tende a tornar as estimativas mais precisas e confiáveis.

Os resultados deste trabalho fornecem importantes informações para os usuários e desenvolvedores de dados climáticos e *datasets* (como é o caso do CLIMBra e Xavier). Para os desenvolvedores, fica claro que ainda são necessários mais estudos e pesquisa para melhoria nas performances dos modelos climáticos em diversas situações. Para os usuários finais, é essencial a prévia avaliação e seleção adequada dos modelos climáticos para estudos com projeções climáticas futuras.

5 REFERENCIAL TEÓRICO

AGYEKUM, Jacob; ANNOR, Thompson; QUANSAH, Emmanuel; LAMPTEY, Benjamin; AMEKUDZI, Leonard Kofitse; NYARKO, Benjamin Kofi. Extreme temperature indices over the Volta Basin: CMIP6 model evaluation. **Climate Dynamics**, [S. l.], v. 61, n. 1–2, p. 203–228, 2023. DOI: 10.1007/s00382-022-06503-x.

AGYEKUM, Jacob; ANNOR, Thompson; QUANSAH, Emmanuel; LAMPTEY, Benjamin; OKAFOR, Gloria. Extreme precipitation indices over the Volta Basin: CMIP6 model evaluation. **Scientific African**, [S. l.], v. 16, 2022. DOI: 10.1016/j.sciaf.2022.e01181.

AKINSANOLA, Akintomide Afolayan; ONGOMA, Victor; KOOPERMAN, Gabriel J. Evaluation of CMIP6 models in simulating the statistics of extreme precipitation over Eastern Africa. **Atmospheric Research**, [S. l.], v. 254, 2021. DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105509.

ALMAGRO, André; OLIVEIRA, Paulo Tarso S.; ROSOLEM, Rafael; HAGEMANN, Stefan; NOBRE, Carlos A. Performance evaluation of Eta/HadGEM2-ES and Eta/MIROC5 precipitation simulations over Brazil. **Atmospheric Research**, [S. l.], v. 244, n. May, p. 105053, 2020. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105053.

BALLARIN, André S. et al. Brazilian Water Security Threatened by Climate Change and Human Behavior. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 59, n. 7, 2023. a. DOI: 10.1029/2023WR034914.

BALLARIN, André Simões; SONE, Jullian Souza; GESUALDO, Gabriela Chiquito; SCHWAMBACK, Dimaghi; REIS, Alan; ALMAGRO, André; WENDLAND, Edson Cezar. CLIMBra - Climate Change Dataset for Brazil. **Scientific Data**, [S. l.], v. 10, n. 1, 2023. b. DOI: 10.1038/s41597-023-01956-z.

BERHANU, Daniel; ALAMIREW, Tena; TAYE, Meron Teferi; TIBEBE, Degefie; GEBREHIWOT, Solomon; ZELEKE, Gete. Evaluation of CMIP6 models in reproducing observed rainfall over Ethiopia. **Journal of Water and Climate Change**, [S. l.], v. 14, n. 8, p. 2583–2605, 2023. a. DOI: 10.2166/wcc.2023.502.

BERHANU, Daniel; ALAMIREW, Tena; TAYE, Meron Teferi; TIBEBE, Degefie; GEBREHIWOT, Solomon; ZELEKE, Gete. Evaluation of CMIP6 models in reproducing observed rainfall over Ethiopia. **Journal of Water and Climate Change**, [S. l.], v. 14, n. 8, p. 2583–2605, 2023. b. DOI: 10.2166/wcc.2023.502.

COOK, Benjamin I.; MANKIN, Justin S.; ANCHUKAITIS, Kevin J. Climate change and drought: From past to future. **Current Climate Change Reports**, v. 4, p. 164-179, 2018.

CORREA, Wesley de Souza Campos; SOARES, Wagner Rodrigues; AYLAS, Georgynio Yossimar Rosales; REIS JUNIOR, Neyval Costa; MARENGO, José Antonio; CHOU, Sin Chan; NOBRE, Carlos. Avaliação das simulações de temperatura e precipitação de um subconjunto de modelos do CMIP6 para o Brasil. **Derbyana**, [S. l.], v. 43, p. e774, 2022. DOI: 10.14295/derb.v43.774.

DIAS, Cássia Gabriele; MARTINS, Fabrina Bolzan; MARTINS, Minella Alves. Climate risks and vulnerabilities of the Arabica coffee in Brazil under current and future climates considering new CMIP6 models. **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 907, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167753.

DIAS, Cássia Gabriele; REBOITA, Michelle Simões. Assessment of cmip6 simulations over tropical south america. **Revista Brasileira de Geografia Fisica**, [S. l.], v. 14, n. 3, p. 1282–1295, 2021. DOI: 10.26848/rbgf.v14.3.p1282-1295.

DONG, Buwen et al. Abrupt summer warming and changes in temperature extremes over Northeast Asia since the mid-1990s: Drivers and physical processes. **Advances in Atmospheric Sciences**, v. 33, p. 1005-1023, 2016.

DONG, Buwen; SUTTON, Rowan T.; SHAFFREY, Len. Understanding the rapid summer warming and changes in temperature extremes since the mid-1990s over Western Europe. **Climate Dynamics**, v. 48, p. 1537-1554, 2017.

DOS SANTOS SILVA, Fabrício Daniel et al. Intercomparison of Different Sources of Precipitation Data in the Brazilian Legal Amazon. **Climate**, [S. l.], v. 11, n. 12, 2023. DOI: 10.3390/cli11120241.

EYRING, Veronika; BONY, Sandrine; MEEHL, Gerald A.; SENIOR, Catherine A.; STEVENS, Bjorn; STOUFFER, Ronald J.; TAYLOR, Karl E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, [S. l.], v. 9, n. 5, p. 1937–1958, 2016. DOI: 10.5194/gmd-9-1937-2016.

FALCO, Magdalena; CARRIL, Andrea F.; MENÉNDEZ, Claudio G.; ZANINELLI, Pablo G.; LI, Laurent Z. X. Assessment of CORDEX simulations over South America: added value on seasonal climatology and resolution considerations. **Climate Dynamics**, [S. l.], v. 52, n. 7–8, p. 4771–4786, 2019. DOI: 10.1007/s00382-018-4412-z.

FAYE, Aissatou; AKINSANOLA, Akintomide Afolayan. Evaluation of extreme precipitation indices over West Africa in CMIP6 models. **Climate Dynamics**, [S. l.], v. 58, n. 3–4, p. 925–939, 2022. DOI: 10.1007/s00382-021-05942-2.

FERREIRA, Glauber Willian de Souza; REBOITA, Michelle Simões; RIBEIRO, João Gabriel Martins; DE SOUZA, Christie André. Assessment of Precipitation and Hydrological Droughts in South America through Statistically Downscaled CMIP6 Projections. **Climate**, [S. l.], v. 11, n. 8, 2023. DOI: 10.3390/cli11080166.

GESUALDO, Gabriela Chiquito; OLIVEIRA, Paulo Tarso; RODRIGUES, Dulce Buchala Bicca; GUPTA, Hoshin Vijai. Assessing water security in the São Paulo metropolitan region under projected climate change. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 23, n. 12, p. 4955–4968, 2019. DOI: 10.5194/hess-23-4955-2019.

GUDMUNDSSON, Lukas et al. Globally observed trends in mean and extreme river flow attributed to climate change. **Science**, v. 371, n. 6534, p. 1159-1162, 2021.

IGNACIO-REARDON, Shelly Jo Iguara; LUO, Jing Jia. Evaluation of the Performance of CMIP6 Climate Models in Simulating Rainfall over the Philippines. **Atmosphere**, [S. l.], v. 14, n. 9, 2023. DOI: 10.3390/atmos14091459.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]**. Geneva, Switzerland.

IQBAL, Zafar; SHAHID, Shamsuddin; AHMED, Kamal; ISMAIL, Tarmizi; ZIARH, Ghaith Falah; CHUNG, Eun Sung; WANG, Xiaojun. Evaluation of CMIP6 GCM rainfall in mainland Southeast Asia. **Atmospheric Research**, [S. l.], v. 254, 2021. DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105525.

IPCC. **Summary for policy makers. In: Climate Change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

LI, Zhengyang; LIU, Tie; HUANG, Yue; PENG, Jiabin; LING, Yunan. Evaluation of the CMIP6 Precipitation Simulations Over Global Land. **Earth's Future**, [S. l.], v. 10, n. 8, 2022. DOI: 10.1029/2021EF002500.

LLOPART, Marta; SIMÕES REBOITA, Michelle; PORFÍRIO DA ROCHA, Rosmeri. Assessment of multi-model climate projections of water resources over South America CORDEX domain. **Climate Dynamics**, [S. l.], v. 54, n. 1–2, p. 99–116, 2020. DOI: 10.1007/s00382-019-04990-z.

KING, Andrew D. et al. Emergence of heat extremes attributable to anthropogenic influences. **Geophysical Research Letters**, v. 43, n. 7, p. 3438-3443, 2016.

MARCHEZEPE, Bruno K.; ALMAGRO, André; BALLARIN, André S.; OLIVEIRA, Paulo Tarso S. Streamflow prediction in ungauged catchments by using the Grunsky method. **International Soil and Water Conservation Research**, [S. l.], v. 11, n. 4, p. 700–712, 2023. DOI: 10.1016/j.iswcr.2023.06.004.

MARENGO, Jose A. et al. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, v. 35, p. 1073-1097, 2010.

MONTEIRO, Pedro Benjamin; CABRAL, Jaime Joaquim da Silva Pereira. Groundwater management in the state of Piauí (Brazil) on the climate change context. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, [S. l.], v. 58, n. 1, p. 45–58, 2023. DOI: 10.5327/z2176-94781485.

REBOITA, Michelle Simões; FERREIRA, Glauber Willian de Souza; RIBEIRO, João Gabriel Martins; DA ROCHA, Rosmeri Porfírio; RAO, Vadlamudi Brahmananda. South American Monsoon Lifecycle Projected by Statistical Downscaling with CMIP6-GCMs. **Atmosphere**, [S. l.], v. 14, n. 9, 2023. DOI: 10.3390/atmos14091380.

SIEBERS, Andre R.; PAILLEX, Amael; ROBINSON, Christopher T. Flow intermittency influences the trophic base, but not the overall diversity of alpine stream food webs. **Ecography**, v. 42, n. 9, p. 1523-1535, 2019.

SOLMAN, Silvina A.; BLÁZQUEZ, Josefina. Multiscale precipitation variability over South America: Analysis of the added value of CORDEX RCM simulations. **Climate Dynamics**, [S. l.], v. 53, n. 3–4, p. 1547–1565, 2019. DOI: 10.1007/s00382-019-04689-1.

SONG, Shuaifeng; ZHANG, Xuezhen; GAO, Zhibo; YAN, Xiaodong. Evaluation of atmospheric circulations for dynamic downscaling in CMIP6 models over East Asia. **Climate Dynamics**, [S. l.], v. 60, n. 7–8, p. 2437–2458, 2023. DOI: 10.1007/s00382-022-06465-0.

TIWARI, Amar Deep; MISHRA, Vimal. Sub-Seasonal Prediction of Drought and Streamflow Anomalies for Water Management in India. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 127, n. 3, p. e2021JD035737, 2022.

TONG, Mingjun; ZHENG, Zhihai; FU, Qiang. Evaluation of East Asian Meiyu from CMIP6/AMIP simulations. **Climate Dynamics**, [S. l.], v. 59, n. 7–8, p. 2429–2444, 2022. DOI: 10.1007/s00382-022-06218-z.

WHATELY, Marussia; CUNHA, Pilar. **Cantareira 2006: Um olhar sobre o maior manancial de água da Região Metropolitana de São Paulo**. São Paulo.

XAVIER, Alexandre C.; KING, Carey W.; SCANLON, Bridget R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, [S. l.], v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016. DOI: 10.1002/joc.4518.

YAZDANDOOST, Farhad; MORADIAN, Sogol; IZADI, Ardalan; AGHAKOUCHAK, Amir. Evaluation of CMIP6 precipitation simulations across different climatic zones: Uncertainty and model intercomparison. **Atmospheric Research**, [S. l.], v. 250, 2021. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105369.