Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

TEMPERATURA DO AR EM CENÁRIOS FUTUROS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO ESTADO DO PARANÁ

Air temperature in future climate change scenarios in Paraná State

Temperatura del aire en futuros escenarios de cambio climático en el Estado de Paraná

Camila Bertoletti Carpenedo
NUVEM – Núcleo de Estudos sobre Variabilidade e Mudanças Climáticas,
Universidade Federal do Paraná (UFPR)
camila.carpenedo@ufpr.br

Guilherme Henrique Gobi
Universidade Federal do Paraná (UFPR)
guilhermegobi@gmail.com

Fabiana Tiemy Yamanouchi
Universidade Federal do Paraná (UFPR)
fabianayamanouchi@ufpr.br

Marco Aurélio de Mello Machado
NUVEM – Núcleo de Estudos sobre Variabilidade e Mudanças Climáticas,
Universidade Federal do Paraná (UFPR)
marcomello@ufpr.br

Resumo: O aumento nas concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa devido às atividades antropogênicas tem contribuído com diferentes impactos no sistema climático, como no aumento na intensidade, frequência e/ou duração de extremos quentes e ondas de calor. Assim, este estudo tem como objetivo detectar as possíveis mudanças na temperatura do ar em cenários futuros de mudanças climáticas no estado do Paraná. Foi utilizado a temperatura do ar a 2 m do ERA5 (ECMWF), das saídas da simulação histórica (1985-2014) e das projeções futuras (2020-2049 e 2050-2079) para os cenários SSP1-2.6 (otimista) e SSP5-8.5 (pessimista; *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* - CMIP6/IPCC). Os resultados mostram que, no geral, a temperatura do ar (ERA5) é superestimada pelos modelos do CMIP6 no período histórico, principalmente nas áreas de maior altitude no Paraná. As projeções futuras para o período de 2020-2049 (2050-2079) são de aquecimento em todo o estado, especialmente no inverno, com aumento de até +1,5°C (+1,8°C) no cenário SSP1-2.6 e +1,8°C (+3,3°C) no cenário SSP5-8.5 no centro-oeste (noroeste),

região climatologicamente mais quente do Paraná. Embora domine superestimativa da temperatura do ar no período histórico pelos modelos do CMIP6, as projeções de aumento da temperatura do ar ocorrem nas áreas com menor superestimação e/ou subestimação no noroeste do estado. Desta forma, os efeitos relacionados às altas temperaturas podem agravar ainda mais, tais como o desconforto térmico, doenças cardiopulmonares e mortalidade, redução na produtividade agrícola, problemas no abastecimento de água e energia, incêndios na vegetação, dentre outros.

Palavras-chave: CMIP6. Cenários climáticos. Aquecimento global.

Abstract: The increase in atmospheric concentrations of greenhouse gases due to anthropogenic activities has contributed to different impacts on the climate system, such as an increase in the intensity, frequency and/or duration of hot extremes and heat waves. Therefore, this study aims to detect possible changes in air temperature in future climate change scenarios in the Paraná state. We used 2m air temperature from ERA5 (ECMWF), historical simulation outputs (1985-2014) and future projections (2020-2049 and 2050-2079) for the SSP1-2.6 (optimistic) and SSP5-8.5 (pessimistic) scenarios (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 - CMIP6/IPCC). The results show that, in general, air temperature (ERA5) is overestimated by the CMIP6 models in the historical period, especially in the higher altitude areas of Paraná. Future projections for the period 2020-2049 (2050-2079) are for warming throughout the state, especially in winter, with an increase of up to +1.5°C (+1.8°C) in the SSP1-2.6 scenario and +1.8°C (+3.3°C) in the SSP5-8.5 scenario in the center-west (northwest), the climatologically warmest region of Paraná. Although the CMIP6 models overestimate the air temperature in the historical period, the projections of an increase in air temperature occur in the areas with the least overestimation and/or underestimation in the northwest of the state. In this way, the effects related to high temperatures can be further aggravated, such as thermal discomfort, cardiopulmonary diseases and mortality, reduced agricultural productivity, problems with water and energy supply, vegetation fires, among others.

Keywords: CMIP6. Climate scenarios. Global warming.

Resumen: El aumento de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero debido a las actividades antropogénicas ha contribuido a diferentes impactos en el sistema climático, como el aumento de la intensidad, frecuencia y/o duración de las temperaturas extremas y las olas de calor. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue detectar posibles cambios en la temperatura del aire en futuros escenarios de cambio climático en el estado de Paraná. Se utilizó la temperatura del aire a 2 m del ERA5 (ECMWF), salidas de simulaciones históricas (1985-2014) y proyecciones futuras (2020-2049 y 2050-2079) forzadas por SSP1-2.6 y SSP5-8.5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 - CMIP6/IPCC). Los resultados muestran que, en general, la temperatura del aire (ERA5) está sobreestimada por los modelos CMIP6 en el período histórico, especialmente en las zonas de mayor altitud de Paraná. Las proyecciones futuras para el período 2020-2049 (2050-2079) son de calentamiento en todo el estado, especialmente en invierno, con un aumento de hasta +1,5°C (+1,8°C) en el escenario SSP1-2.6 y de +1,8°C (+3,3°C) en el escenario SSP5-8.5 en el centro-oeste (noroeste), la región climatológicamente más cálida de Paraná. Aunque los modelos CMIP6 sobreestiman la temperatura del aire en el periodo histórico, las proyecciones de aumento de la temperatura del aire se dan en las zonas con menor sobreestimación y/o subestimación en el noroeste del estado. De esta forma, los efectos relacionados con las altas temperaturas pueden agravarse, como incomodidad térmica, enfermedades cardiopulmonares y mortalidad, reducción de la productividad agrícola, problemas de abastecimiento de agua y energía, incendios de vegetación, entre otros.

Palabras clave: Fase 6 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados. Escenarios climáticos. Calentamiento global.

Submetido em: 06/12/2024
Aceito para publicação em: 08/04/2024
Publicado em: 14/07/2024

1. INTRODUÇÃO

O aumento nas concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa, em especial do dióxido de carbono, metano e óxido nitroso, devido às atividades antropogênicas, tem contribuído com diferentes impactos no sistema climático, como por exemplo, nas mudanças do balanço de energia global, do regime de ventos e do ciclo hidrológico, no aquecimento da troposfera e dos oceanos, no aumento do nível médios dos oceanos, no derretimento da criosfera, no aumento na frequência e/ou intensidade dos eventos extremos, dentre outros (EYRING *et al.*, 2021).

No Brasil é observado um aumento na intensidade, frequência e duração de extremos quentes, principalmente nos anos mais recentes (CECCHERINI *et al.*, 2016; BITENCOURT *et al.*, 2020; REGOTO *et al.*, 2021), acompanhado por um aumento na intensidade e frequência das ondas de calor (BITENCOURT *et al.*, 2019; FERON *et al.*, 2019). Entre 1980 e 2018 as temperaturas mínimas e máximas apresentaram tendência de aquecimento de cerca de 0,5°C por década, além de um aumento superior a 30% por década no número de dias com temperatura máxima extrema em praticamente todo o país (BRASIL, 2021). Este aquecimento é mais pronunciado na região tropical e nos oceanos adjacentes (CARVALHO; JONES, 2013; BARROS SOARES *et al.*, 2017), o que pode alterar os gradientes de temperatura entre o continente e os oceanos e, assim, a circulação atmosférica regional e o transporte de umidade (CARVALHO; CAVALCANTI, 2016).

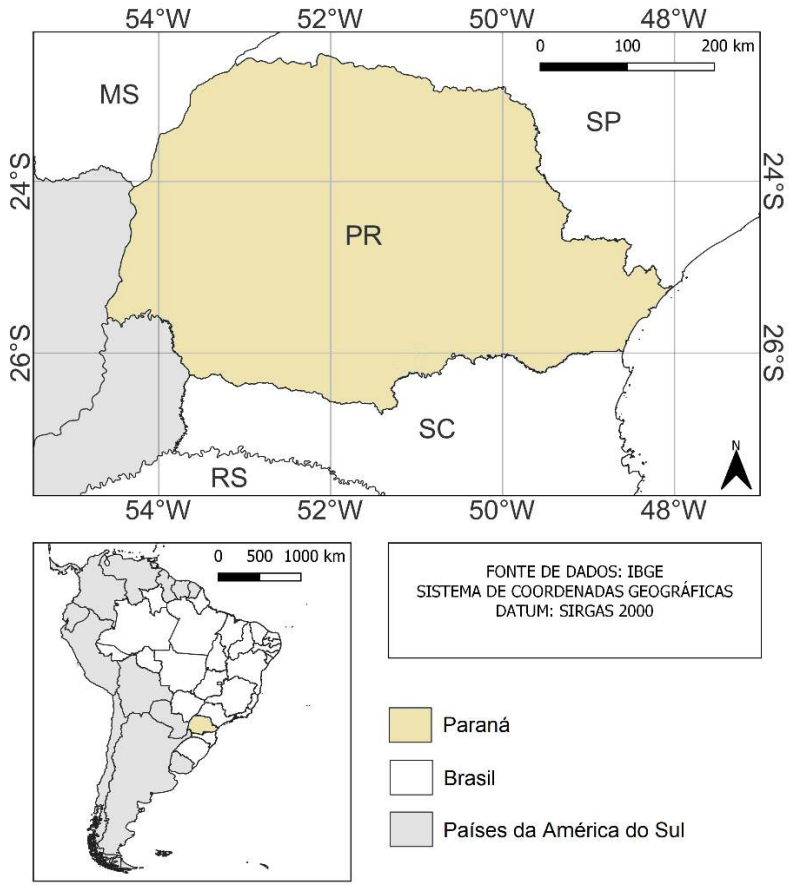
O estado do Paraná é o sexto mais populoso do Brasil, com 10.444.526 habitantes (IBGE, 2022). Grande parte do estado está inserido na bacia do Prata, a qual é a segunda maior bacia hidrográfica da América do Sul e a quinta maior do planeta, abrigando a usina hidrelétrica de Itaipu, que fornece 8,7% da energia consumida no país e 86,4% no Paraguai. O estado também se destaca nacionalmente na produção de cereais, leguminosas, oleaginosas, feijão, trigo, milho, aveia, soja, cana-de-açúcar, bem como no aporte de recursos destinados à agricultura familiar (IBGE, 2017). Neste sentido, o presente estudo tem como objeto detectar as possíveis mudanças na temperatura do ar em cenários futuros de mudanças climáticas no estado do Paraná.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo

O estado do Paraná está localizado na Região Sul do Brasil, entre 22°29’ e 26°43’ S e 48°05’ e 54°37’ W (Figura 1). Segundo a classificação climática de Köppen, o estado possui a maior parte do território (61,7%) definido como Cfa (subtropical úmido sem estação seca definida, geadas pouco frequentes e com verão quente), seguido por 37% como Cfb (subtropical úmido sem estação seca e com verão temperado; NITSCHE *et al.*, 2019). O relevo paranaense possui variações de 1000-1962 m na Serra do Mar, de 850-950 m no Primeiro Planalto, 1100-1200 m no Segundo Planalto e 1100-1250 m no Terceiro Planalto. Além disso, o estado possui importantes rios, como o Paraná e o Iguaçu. Este último, conhecido pelas Cataratas do Iguaçu, é vital para o estado em termos de recursos hídricos. A presença de represas, como a de Itaipu, confere ao Paraná uma relevância significativa na produção de energia hidrelétrica.

Figura 1 – Localização do estado do Paraná.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

2.2. Dados

A temperatura do ar a 2 m observada foi obtida do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) *reanálises v5* (ERA5; https://cds.climate.copernicus.eu/#!/search?text=ERA5&type=dataset). A assimilação de dados produz estimativas de variáveis atmosféricas e de superfície para todo o globo, em uma grade de 0,25° de latitudes x 0,25° de longitude. ERA5 é a quinta geração das reanálises atmosférica do ECMWF, produzida pelo *Copernicus Climate Change Service* (C3S). Para maiores detalhes sobre as configurações do ERA5, bem como uma avaliação das características e do desempenho, consultar Hersbach *et al.* (2020).

Foram utilizadas as saídas das simulações dos modelos climáticos globais, que compreendem o *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6; EYRING *et al.*, 2016) e serviram de base para o *Sixth Assessment Report* (AR6) do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Foram analisados dois experimentos distintos: (1) simulação histórica (1985-2014) e (2) projeção futura (2020-2049 e 2050-2079) para os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 (*Shared Socio-Economic Pathways* - SSP). O SSP1-2.6 é um cenário de emissão muito baixa de gases de efeito estufa, a qual decresce até alcançar emissão líquida zero em 2080, seguida de níveis variáveis de emissões líquidas negativas de CO_2, justamente por apresentar a premissa de implementação acelerada e eficaz da política climática; e o SSP5-8.5 é um cenário de emissão muito alta de gases de efeito estufa, que praticamente dobra a partir dos níveis atuais até 2050, sem políticas climáticas adicionais (CHEN *et al.*, 2021).

O *National Oceanic and Atmospheric Administration Physical Sciences Laboratory* (NOAA PSL) disponibiliza médias trimestrais para janeiro-março, abril-junho, julho-setembro e outubro-dezembro, de 1985 e 2014 (https://www.psl.noaa.gov/ipcc/cmip6/ccwp6.html), para 38 modelos de circulação geral oceano-atmosfera pertencentes ao CMIP6 (Quadro 1). Neste estudo, utilizamos a variável temperatura do ar a 2 m.

Quadro 1 – Modelos de circulação geral oceano-atmosfera e respectivas instituições pertencentes ao CMIP6 utilizados neste estudo.

Modelo	Instituição
BCC-CSM1.1 BCC-CSM1.1(m)	*Beijing Climate Center, China Meteorological Administration*
CanESM2	*Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis*
CMCC-CESM CMCC-CM	*Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici*
CNRM-CM5	*Centre National de Recherches Meteorologiques / Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique*
ACCESS1.0 ACCESS1.3	*CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia), and BOM (Bureau of Meteorology, Australia)*
CSIRO-Mk3.6.0	*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence*
EC-EARTH	*EC-EARTH consortium*
FIO-ESM	*The First Institute of Oceanography, SOA, China*
BNU-ESM	*College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University*
INM-CM4	*Institute for Numerical Mathematics*
IPSL-CM5A-LR IPSL-CM5A-MR IPSL-CM5B-LR	*Institut Pierre-Simon Laplace*
FGOALS-g2	*LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences; and CESS, Tsinghua University*
FGOALS-s2	*LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences*
MIROC5	*Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology*
MIROC-ESM MIROC-ESM-CHEM	*Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies*
HadGEM2-AO HadGEM2-CC HadGEM2-ES	*Met Office Hadley Centre (additional HadGEM2-ES realizations contributed by Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)*
MPI-ESM-LR MPI-ESM-MR	*Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)*
MRI-CGCM3	*Meteorological Research Institute*
GISS-E2-H GISS-E2-R	*NASA Goddard Institute for Space Studies*
CCSM4	*National Center for Atmospheric Research*
NorESM1-M NorESM1-ME	*Norwegian Climate Centre*
GFDL-CM3 GFDL-ESM2G GFDL-ESM2M	*Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*
CESM1(BGC) CESM1(CAM5)	*National Science Foundation, Department of Energy, National Center for Atmospheric Research*

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

2.3. Metodologia

As saídas de temperatura do ar a 2 m dos modelos foram interpoladas para o mesmo espaçamento horizontal das reanálises do ERA5 (0,25° x 0,25°) para a posterior comparação entre os conjuntos de dados. Para avaliar o potencial dos modelos climáticos em simular a

temperatura do ar no clima presente (1985-2014), primeiramente foram comparados o padrão espacial destas variáveis com os dados observados (ERA5) através de análises estatísticas espaciais (média e diferença). Posteriormente foram calculados os campos espaciais de diferença entre a temperatura do ar a 2 m nos cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 (2020-2049 e 2050-2079) e na simulação histórica (1985-2014).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

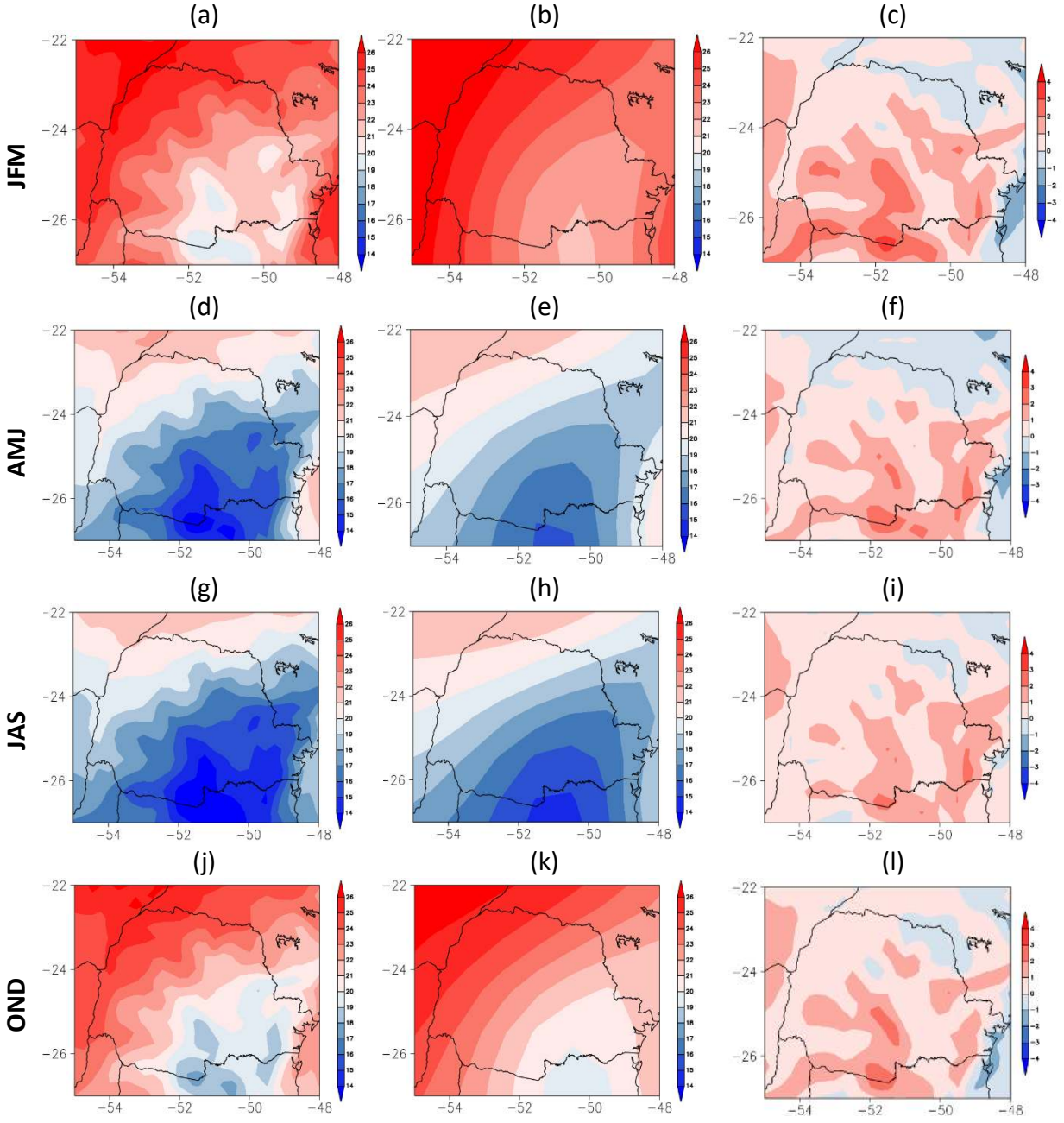
3.1 Avaliação dos modelos do CMIP6

A Figura 2 apresenta a temperatura do ar a 2 m trimestral das reanálises do ERA5 e da simulação histórica do CMIP6, bem como o campo de diferença entre os dados simulados (CMIP6) e observados (ERA5) no Paraná. As maiores temperaturas do ar são observadas no norte-noroeste do estado, enquanto as menores temperaturas ocorrem no sul-sudeste (Figuras 2a, 2d, 2g, 2j). Os modelos representam bem as áreas de menores (maiores) temperaturas no sul-sudeste (norte-noroeste) (Figuras 2b, 2e, 2h, 2k). No geral, os modelos superestimam a temperatura do ar em todos os trimestres (Figuras 2c, 2f, 2i, 2l), especialmente nas áreas de maior altitude, com picos superiores à 1200 m. Por outro lado, no extremo norte do estado há subestimação de até -1°C em todas as estações do ano, assim como em algumas áreas do litoral, com diferença de até -2°C.

No verão (Figura 2a) as temperaturas variam entre 19°C (sul-sudeste) e 26°C (norte-noroeste) no ERA5, enquanto nos modelos do CMIP6 variam entre 21°C e 26°C, com predomínio de superestimação, com máximo de +4°C no sul do Paraná (Figura 2c). No outono (Figura 2d) as temperaturas variam entre 14°C (extremo sul) e 22°C (noroeste); nos modelos do CMIP6 (Figura 2e) essa variação é de 15°C a 22°C, com o mesmo padrão espacial; a diferença entre o simulado e observado varia de -1°C a +3°C, ou seja, há subestimação da temperatura do ar no norte, parte do oeste e leste do Paraná e superestimação no restante do estado. No inverno (Figura 2g) a temperatura do ar varia entre 14°C (sul-sudeste) e 21°C (norte-noroeste), enquanto nos modelos do CMIP6 (Figura 2h) variam entre 15°C e 21°C, com máxima superestimação de +3°C no sul do estado (Figura 2i). Na primavera (Figura 2j) as temperaturas variam entre 18°C (sul) e 26°C (noroeste) no ERA5. Já nos modelos do CMIP6 (Figura 2k) a temperatura do ar varia de 20°C a 26°C, entre o sul e noroeste do Paraná. Desta

forma, o campo de diferença mostra o predomínio de superestimação dos dados observados (ERA5) pelos dados simulados (CMIP6), variando entre +1°C e +3°C (Figura 2l). Por outro lado, em parte do norte e leste do estado há subestimação de até -1°C.

Figura 2 – Média trimestral de temperatura do ar a 2 m (a, d, g, j) das reanálises do ERA5, (b, e, h, k) das simulações históricas do CMIP6 e (c, f, i, l) diferença entre a média trimestral de temperatura do ar a 2 m das simulações históricas do CMIP6 e do ERA5 para o trimestre de janeiro-março (JFM; primeira linha), abril a junho (AMJ; segunda linha), julho a setembro (JAS; terceira linha) e outubro a dezembro (OND; quarta linha), entre 1985 e 2014 para o estado do Paraná.

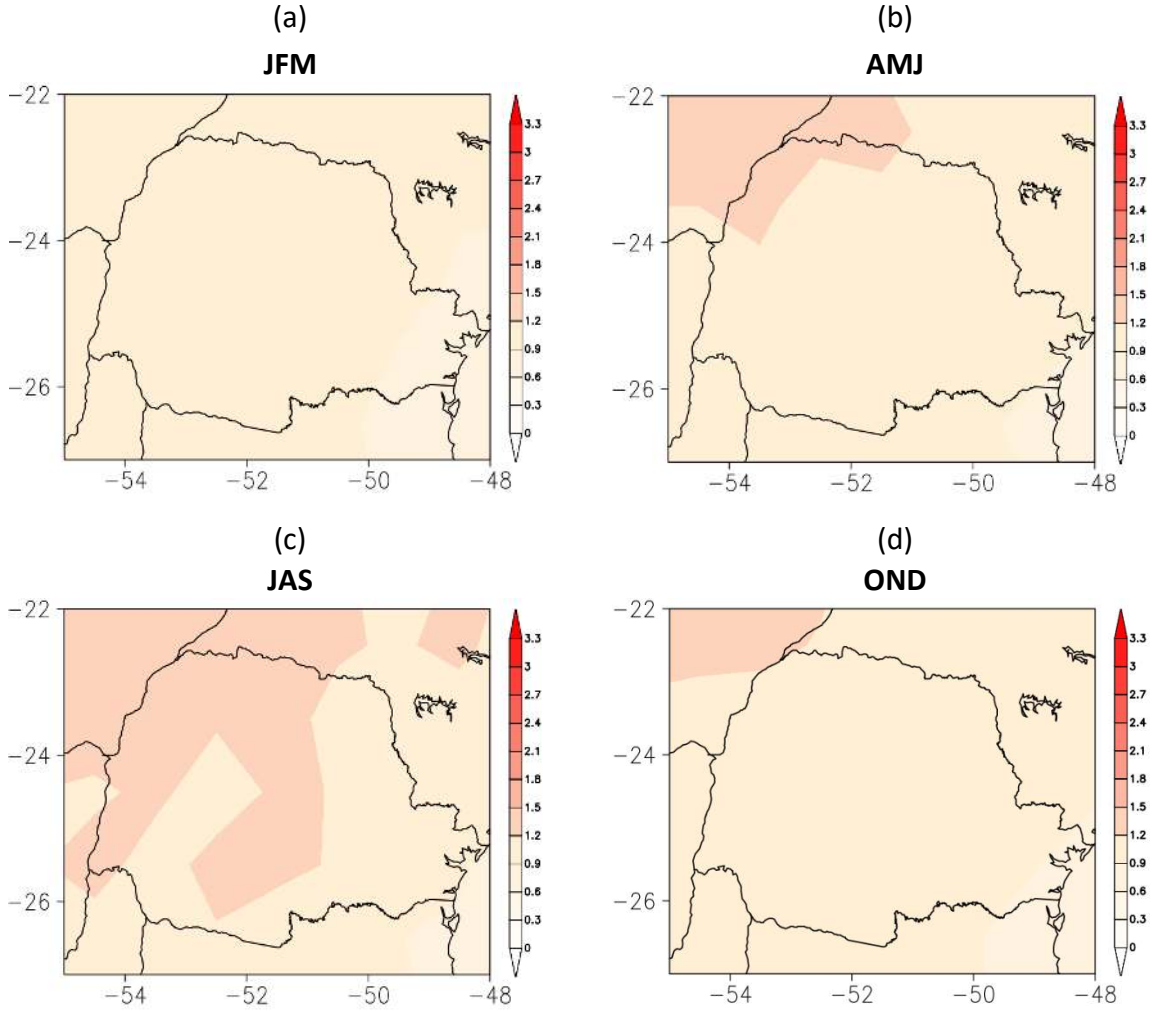


Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

3.2 Cenários futuros de mudanças climáticas

A Figura 3 apresenta o campo de diferença entre a temperatura do ar da projeção futura forçada por SSP1-2.6 e da simulação histórica do CMIP6, para o período de 2020 a 2049. Nos trimestres de outubro-dezembro (Figura 3d) e janeiro-março (Figura 3a) a projeção é de aquecimento no Paraná, variando entre +0,9°C no leste a +1,2°C no restante do estado. No trimestre de abril-junho (Figura 3b) a projeção é de aquecimento de +1,2°C em grande parte do estado, chegando a +1,5°C no noroeste. No trimestre de julho-setembro existe uma expansão da área de aquecimento de +1,5°C, abrangendo parte do centro, oeste e norte do Paraná.

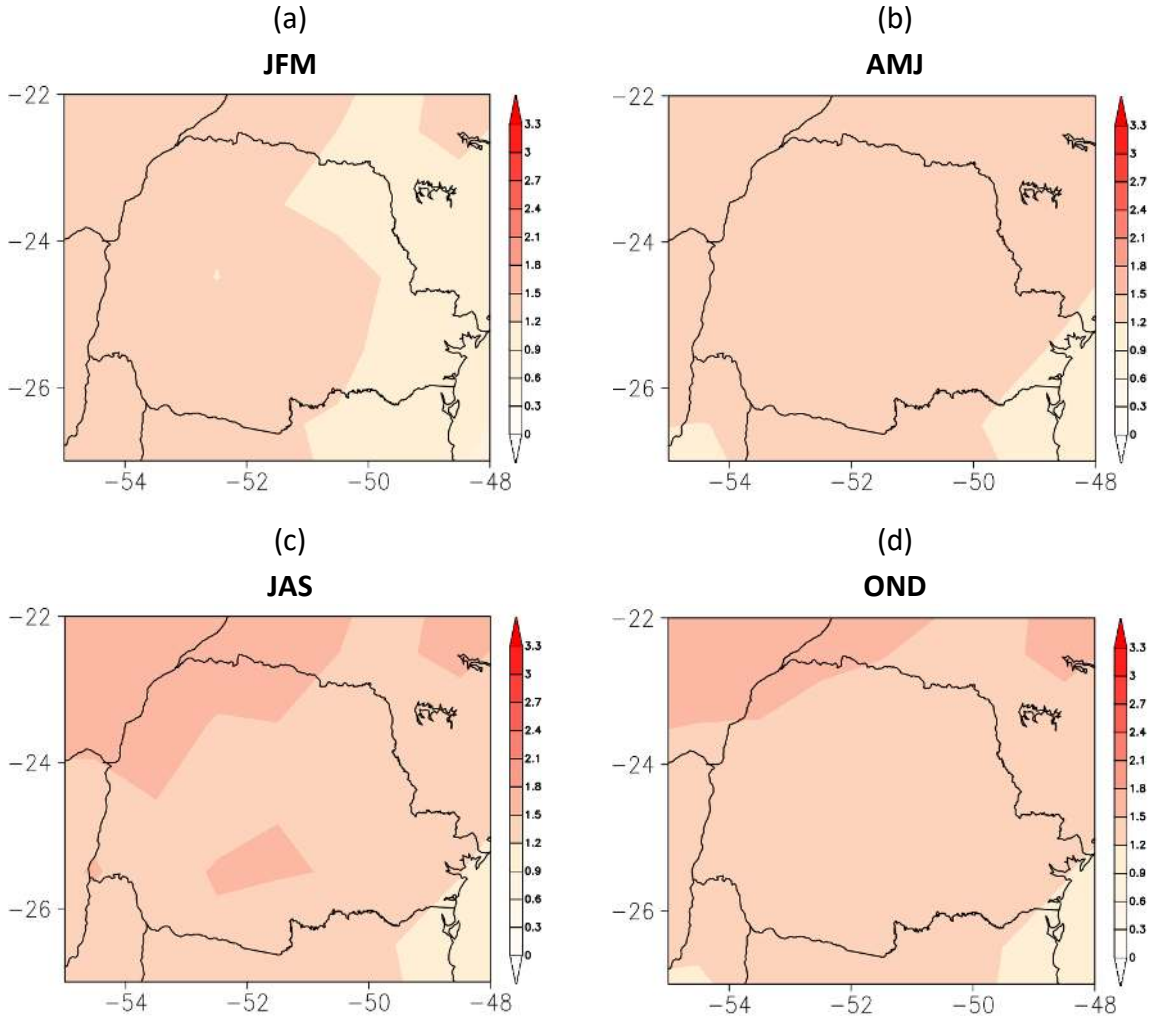
Figura 3 – Diferença entre a média trimestral de temperatura do ar a 2 m da projeção futura (2020-2049) forçada por SSP1-2.6 e da simulação histórica (1985-2014) do CMIP6 para o trimestre de (a) janeiro-março (JFM), (b) abril a junho (AMJ), (c) julho a setembro (JAS) e (d) outubro a dezembro (OND) para o estado do Paraná.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Na projeção para o período de 2050 a 2079, forçada por SSP1-2.6, existe um predomínio de aquecimento de +1,5°C no Paraná em todos os trimestres do ano em relação ao período histórico (Figura 4). O menor aquecimento projetado é no trimestre de janeiro-março, com grande parte do leste e centro-norte do estado com aquecimento de +1,2°C (Figura 4a). No trimestre de abril-junho há aquecimento de +1,2°C no leste do Paraná (Figura 4b). O trimestre de julho-setembro apresenta o maior aquecimento do ano, chegando a +1,8°C no noroeste e centro-sul do estado (Figura 4c). Da mesma forma, o trimestre de outubro-dezembro apresenta aquecimento de +1,8°C no noroeste (Figura 4d), abrangendo uma área menor do que no trimestre de julho-setembro.

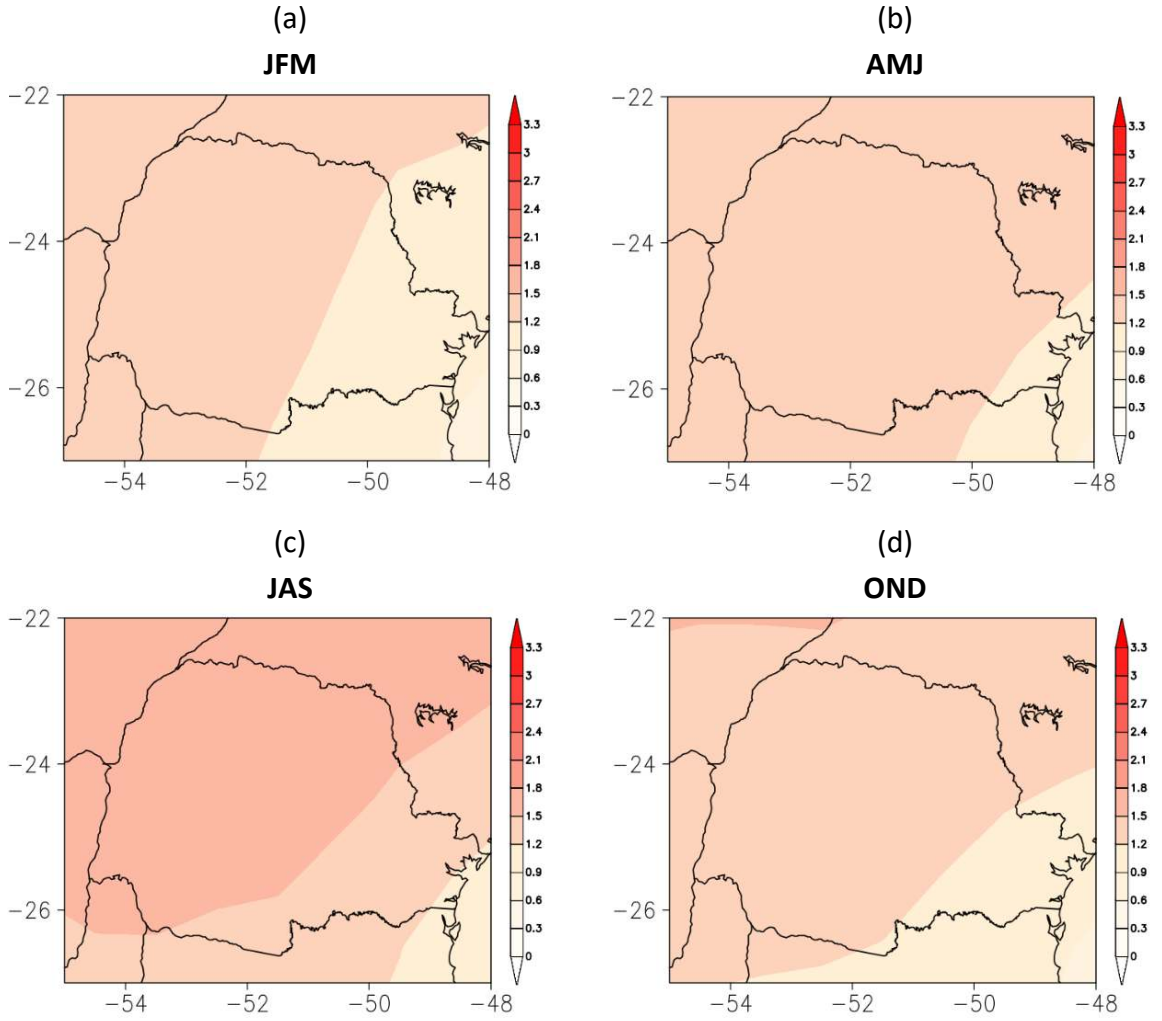
Figura 4 – Diferença entre a média trimestral de temperatura do ar a 2 m da projeção futura (2050-2079) forçada por SSP1-2.6 e da simulação histórica (1985-2014) do CMIP6 para o trimestre de (a) janeiro-março (JFM), (b) abril a junho (AMJ), (c) julho a setembro (JAS) e (d) outubro a dezembro (OND) para o estado do Paraná.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

A distribuição espacial da diferença de temperatura do ar entre a projeção futura (2020-2049) forçada por SSP5-8.5 e a simulação histórica (1985-2014) do CMIP6 pode ser observada na Figura 5. Nos trimestres de janeiro-março, abril-junho e outubro-dezembro (Figuras 5a, 5b e 5d) há projeção de aumento da temperatura do ar no Paraná variando entre +1,2°C (leste) e +1,5°C (restante do estado). O inverno é o trimestre que apresenta projeção de maior aquecimento (Figura 5c), variando entre +1,2°C (extremo leste) e +1,8°C (centro-oeste).

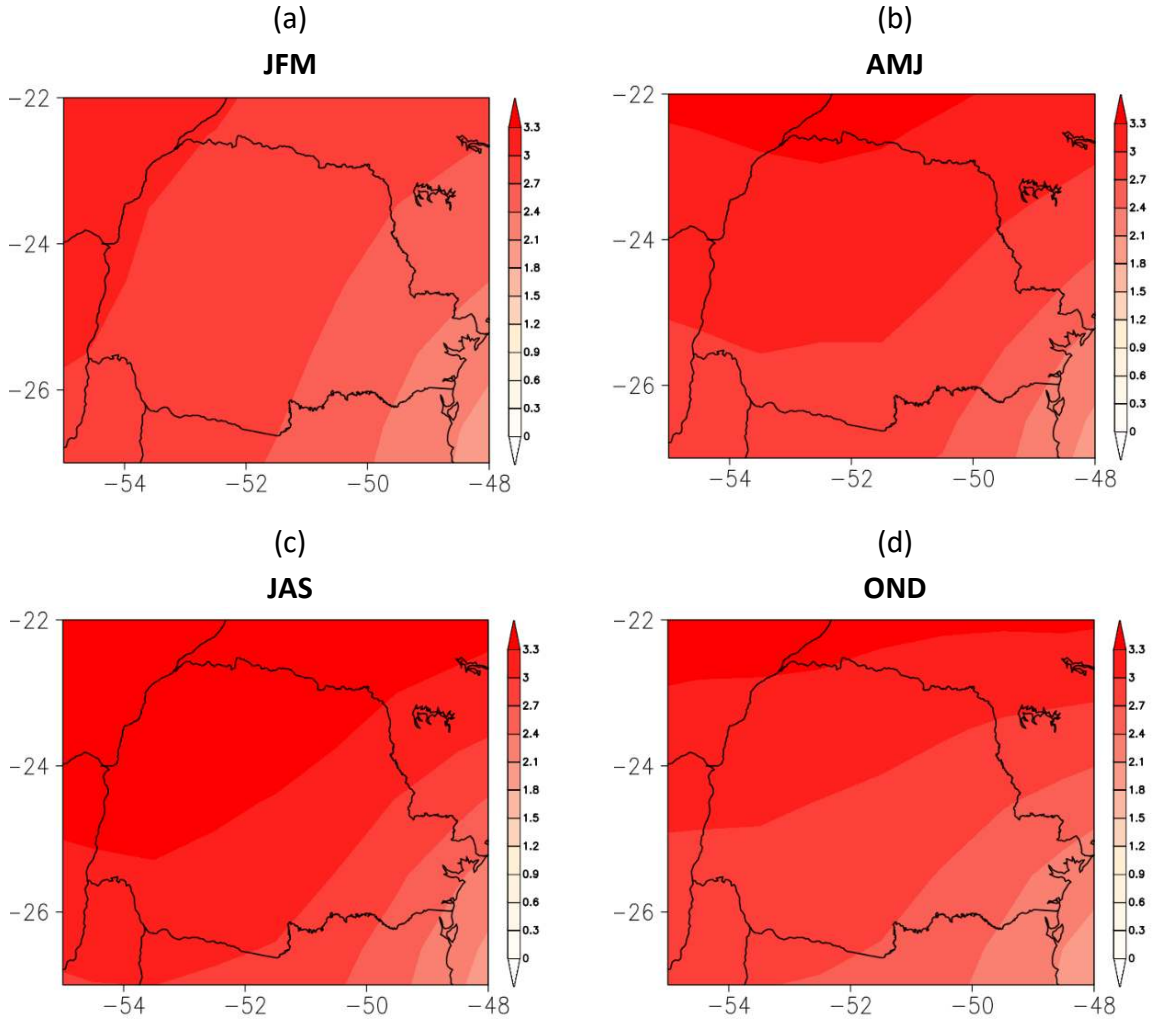
Figura 5 – Diferença entre a média trimestral de temperatura do ar a 2 m da projeção futura (2020-2049) forçada por SSP5-8.5 e da simulação histórica (1985-2014) do CMIP6 para o trimestre de (a) janeiro-março (JFM), (b) abril a junho (AMJ), (c) julho a setembro (JAS) e (d) outubro a dezembro (OND) para o estado do Paraná.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Em relação ao campo de diferença entre a temperatura do ar entre a projeção futura (2050-2079) forçada por SSP5-8.5 e a simulação histórica (1985-2014) do CMIP6, existe uma projeção de aquecimento variando entre +2,1°C (litoral) e +3°C nos de janeiro-março, abril-junho e outubro-dezembro (Figuras 6a, 6b e 6d). O maior aquecimento é observado no trimestre de inverno (Figura 6c), variando entre +2,4°C no leste e +3,3°C no noroeste do Paraná.

Figura 6 – Diferença entre a média trimestral de temperatura do ar a 2 m da projeção futura (2050-2079) forçada por SSP5-8.5 e da simulação histórica (1985-2014) do CMIP6 para o trimestre de (a) janeiro-março (JFM), (b) abril a junho (AMJ), (c) julho a setembro (JAS) e (d) outubro a dezembro (OND) para o estado do Paraná.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Apesar do predomínio de superestimação da temperatura do ar no período histórico pelos modelos do CMIP6 (*cf.* Figura 2), as projeções futuras de aumento da temperatura do ar

ocorrem justamente nas áreas com menor superestimação (até +1°C) e/ou subestimação (até -1°C) no noroeste do Paraná. Tal fato demonstra que o aquecimento no estado do Paraná, conforme as projeções futuras (SSP1-2.6 e SSP5-8.5) do CMIP6, está de acordo com as tendências de aquecimento observadas nas últimas décadas através do aumento no percentual de dias quentes, principalmente no noroeste do estado, bem como no valor máximo anual da temperatura máxima diária (AVILA-DIAZ *et al.*, 2020). Além disso, existe um aumento na frequência e intensidade de ondas de calor no Paraná, entre 1961 e 2016, especialmente no centro-leste do estado (BITENCOURT *et al.*, 2020). As mudanças observadas nos extremos quentes possuem alta confiança de haver a contribuição humana (ARIAS *et al.*, 2021).

4. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou as possíveis mudanças na temperatura do ar em cenários futuros de mudanças climáticas no Paraná. Os resultados mostram que as saídas dos modelos do CMIP6, no geral, superestimam a temperatura do ar em relação aos dados observados (ERA5) no período histórico (1985-2014), especialmente nas áreas de maior altitude no estado. As projeções futuras para o período de 2020-2049 (2050-2079) demonstram aquecimento em todo o estado, com destaque para o inverno, com aumento de até +1,5°C (+1,8°C) no cenário SSP1-2.6 e de até +1,8°C (+3,3°C) no cenário SSP5-8.5 no centro-oeste (noroeste) do Paraná, região climatologicamente mais quente. As projeções de aumento da temperatura do ar entre 2020-2049 e 2050-2079 ocorrem nas áreas com menor superestimação (até +1°C) e/ou com subestimação (até -1°C) no noroeste do Paraná, apesar de dominar superestimativa da temperatura do ar no período histórico pelos modelos do CMIP6.

Desta forma, os efeitos relacionados às altas temperaturas, como eventos de ondas de calor, podem agravar ainda mais, tais como o desconforto térmico, doenças cardiopulmonares e mortalidade (BELL *et al.*, 2008; SON *et al.*, 2016; GEIRINHAS *et al.*, 2019), redução na produtividade agrícola, problemas no abastecimento de água e energia (GARCÍA-HERRERA *et al.*, 2010), incêndios na vegetação (PEREIRA *et al.*, 2005; SILVA *et al.*, 2016). De acordo com o último relatório do IPCC (2021), a frequência e intensidade de eventos extremos deverá

aumentar ainda mais devido ao aquecimento médio da atmosfera, particularmente as ondas de calor e secas (MARENGO *et al.*, 2022).

REFERÊNCIAS

ARIAS, P. A. *et al.* Technical Summary. In **Climate Change 2021**: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 33-144, 2021.

AVILA-DIAZ, A.; BENEZOLI, V.; JUSTINO, F.; TORRES, R.; WILSON, A. Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. **Climate Dynamics**, v. 55, p. 1403-1426, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s00382-020-05333-z

BARROS SOARES, D.; LEE, H.; LOIKITH, P. C.; BARKHORDARIAN, A.; MECHOSO, C. R. Can significant trends be detected in surface air temperature and precipitation over South America in recent decades? **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 3, p. 1483-1493, 2017. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.4792

BELL, M. L.; O'NEILL, M. S.; RANJIT, N.; BORJA-ABURTO, V. H.; CIFUENTES, L. A.; GOUVEIA, N. C. Vulnerability to heat-related mortality in Latin America: a case-crossover study in Sao Paulo, Brazil, Santiago, Chile and Mexico City, Mexico. **International Journal of Epidemiology**, v. 37, p. 796-804, 2008. DOI: https://doi.org/10.1093/ije/dyn094

BITENCOURT, D. P.; FUENTES, M. V.; FRANKE, A. E.; SILVEIRA, R. B.; ALVES, M. P. A. The climatology of cold and heat waves in Brazil from 1961 to 2016. **International Journal of Climatology**, v. 40, n. 4, p. 2464-2478, 2020. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.6345

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. **Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 620 p., 2021. ISBN: 978-65-87432-18-2

CARVALHO, L. M.; JONES, C. CMIP5 simulations of low-level tropospheric temperature and moisture over the tropical Americas. **Journal of Climate**, v. 26, n. 17, p. 6257-6286, 2013. DOI: https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00532.1

CARVALHO, L. M. V.; CAVALCANTI, I. F. A. 2016. **The South American Monsoon System (SAMS)**. In: Charles Jones; Leila V. Carvalho. (Org.). Springer Climate. 1ed.Suica: Springer International Publishing, p. 121-148. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-21650-8_6

CECCHERINI, G.; RUSSO, S.; AMEZTOY, I.; ROMERO, C. P.; CARMONA-MORENO, C. Magnitude and frequency of heat and cold waves in recent decades: the case of South America. **Natural**

Hazards and Earth System Sciences, v. 16, p. 821-831, 2016. DOI: https://doi.org/10.5194/nhess-16-821-2016

CHEN, D. *et al.* **Framing, Context, and Methods**. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V. *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 147-286, 2021. DOI: https://doi.org/10.1017/9781009157896.003

EYRING, V. *et al.* **Human Influence on the Climate System**. In: Masson-Delmotte V *et al.* (eds.). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 423-552, 2021. DOI: https://doi.org/10.1017/9781009157896.005

EYRING, V.; BONY, S.; MEEHL, G. A.; SENIOR, C. A.; STEVENS, B.; STOUFFER, R. J.; TAYLOR K. E. Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, v. 9, p. 1937-1958, 2016. DOI: https://doi.org/10.5194/gmdd-8-10539-2015

FERON, S. *et al.* Observations and Projections of Heat Waves in South America. **Scientific Reports**, v. 9, p. 8173, 2019. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-019-44614-4

GARCÍA-HERRERA, R.; DÍAZ, J.; TRIGO, R. M.; LUTERBACHER, J.; FISCHER, E. M. A review of the European summer heat wave of 2003. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 40, p. 267-306, 2010. DOI: https://doi.org/10.1080/10643380802238137

GEIRINHAS, J. L.; TRIGO, R. M.; LIBONATI, R.; CASTRO, L. C. O.; SOUSA, P. M.; COELHO, C. A. S.; PERES, L. F.; MAGALHÃES, M. A. F. M. Characterizing the atmospheric conditions during the 2010 heatwave in Rio de Janeiro marked by excessive mortality rates. **Science of the Total Environment**, v. 650, p. 796-808, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.060

HERSBACH, H. *et al.* The ERA5 Global Reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.146, p.1999-2049, 2020. DOI: https://doi.org/10.1002/qj.3803

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Estimativas da População**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=downloads. Acesso em: 15 de mar. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Brasília-DF: IBGE, 2017.

MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; BARRETO, N.; CUNHA, A. P.; RAMOS, A. M.; SKANSI, M.; MOLINA CARPIO, J.; SALINAS, R. The heat wave of October 2020 in central South America. **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 4, p. 1-18, 2022. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.7365

NITSCHE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. S.; PINTO, L. F. D. **Atlas Climático do Estado do Paraná**. Londrina, PR: IAPAR, 2019. Disponível em: https://www.idrparana.pr.gov.br/system/files/publico/agrometeorologia/atlas-climatico/atlas-climatico-do-parana-2019.pdf. Acesso em: 10 de mar. 2023.

PEREIRA, M. G.; TRIGO, R. M.; DA CAMARA, C. C.; PEREIRA, J. M. C. C.; LEITE, S. M. Synoptic patterns associated with large summer forest fires in Portugal. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 129, p. 11-25, 2005. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.12.007

REGOTO, P.; DERECZYNSKI, C.; CHOU, S. C.; BAZZANELA, A. C. Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 11, p. 5125-5142, 2021. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.7119

SON, J-Y.; GOUVEIA, N.; BRAVO, M. A.; DE FREITAS, C. U.; BELL, M. L. The impact of temperature on mortality in a subtropical city: effects of cold, heat, and heat waves in São Paulo, Brazil. **International Journal of Biometeorology**, v. 60, p. 113-121, 2016. DOI: https://doi.org/10.1007/s00484-015-1009-7