

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E  
RECURSOS HÍDRICOS**

**PROJEÇÕES CLIMÁTICAS DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS QUE  
INFLUENCIAM A EVAPOTRANSPIRAÇÃO NA AMÉRICA DO SUL:  
UMA AVALIAÇÃO MULTI-MODELOS**

**ANA FLÁVIA MARTINS MONTEIRO**

**ITAJUBÁ (MG), BRASIL  
2023**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E  
RECURSOS HÍDRICOS**

**ANA FLÁVIA MARTINS MONTEIRO**

**PROJEÇÕES CLIMÁTICAS DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS QUE  
INFLUENCIAM A EVAPOTRANSPIRAÇÃO NA AMÉRICA DO SUL:  
UMA AVALIAÇÃO MULTI-MODELOS**

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

**Área de concentração:**

Meio Ambiente e Recursos Hídricos

**Linha de pesquisa:**

Clima e Sustentabilidade

**Orientadora:**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Fabrina Bolzan Martins

**Coorientador:**

Prof. Dr. Roger Rodrigues Torres

**ITAJUBÁ (MG), BRASIL  
2023**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E  
RECURSOS HÍDRICOS**

**ANA FLÁVIA MARTINS MONTEIRO**

**PROJEÇÕES CLIMÁTICAS DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS QUE  
INFLUENCIAM A EVAPOTRANSPIRAÇÃO NA AMÉRICA DO SUL:  
UMA AVALIAÇÃO MULTI-MODELOS**

Tese aprovada pela banca examinadora em 16 de junho de 2023 conferindo a autora o título de **Doutora em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos**.

**Banca examinadora:**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Fabrina Bolzan Martins (Orientadora)  
Universidade Federal de Itajubá

Prof. Dr. Roger Rodrigues Torres (Coorientador)  
Universidade Federal de Itajubá

Prof. Dr. Marcel Carvalho Abreu  
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Gustavo Bastos Lyra  
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Sâmia Regina Garcia Calheiros  
Universidade Federal de Itajubá

Prof. Dr. Marcelo de Paula Corrêa  
Universidade Federal de Itajubá

**ITAJUBÁ (MG), BRASIL  
2023**

A todo meu círculo familiar, os de sangue e os que escolhi para trilharem o caminho da vida ao meu lado. A vocês: todo amor e gratidão que houver no mundo!

## **OFEREÇO**

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pela oportunidade de evolução durante essa existência.

À Universidade Federal de Itajubá, pelas experiências adquiridas, além dos trabalhadores nela inseridos; e, em especial, ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos pelo aprimoramento profissional.

À orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Fabrina, por todos os anos de ensinamento. Muito obrigada por me acompanhar durante todo esse ciclo acadêmico. Ao coorientador, Prof. Dr. Roger, pelo desenvolvimento dos trabalhos. Também aos demais professores que colaboraram para minha formação, sempre dispostos a auxiliar; e à banca examinadora pelo aceite em colaborar com essa pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro aos projetos APQ-01392-13 e APQ-01258-17, e pela concessão de bolsa (número do processo ID-13748 - 5.304/15).

*“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim.”*

Francisco Cândido Xavier

## RESUMO

MONTEIRO, Ana Flávia Martins. **Projeções climáticas das principais variáveis que influenciam a evapotranspiração na América do Sul: uma avaliação multi-modelos.** 2023. 92 p. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2023.

A mudança climática é um dos maiores desafios da humanidade, pois ameaça os sistemas naturais e sociais. Para que o planejamento de ações de adaptação aos cenários de mudanças climáticas seja efetivo, é necessário analisar os impactos nas variáveis climáticas, especialmente em regiões potencialmente vulneráveis, como a América do Sul. Adicionalmente, à medida que uma nova geração de modelos de circulação geral (GCMs) se torna disponível, é mandatório reavaliar o desempenho e confiabilidade desse novo conjunto em representar o comportamento do sistema climático. Assim, o presente estudo analisou e comparou as simulações e projeções de mudanças climáticas sobre a América do Sul utilizando dez GCMs da quinta e sexta fase do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP5 e CMIP6). As projeções (PF; 2081-2100) foram comparadas ao período presente (PP; 1986-2005), para quatro cenários de forçantes radiativas: RCP4.5 e RCP8.5 (*Representative Concentration Pathways*) e SSP2-4.5 e SSP5-8.5 (*Shared Socioeconomic Pathways*). Além disso, este estudo analisou as tendências espaço-temporais e a taxa de contribuição das variáveis climáticas que influenciam a evapotranspiração na América do Sul, considerando o PP e o cenário futuro SSP5-8.5 do CMIP6. Para isso foi utilizado um conjunto de dados diários de temperatura média do ar à 2 m da superfície ( $T_{med}$ ), umidade relativa do ar ( $UR$ ), radiação solar global ( $R_s$ ), umidade do solo a 10 cm da superfície ( $US$ ) e precipitação ( $P$ ) oriundos de dez GCMs de ambos os conjuntos do CMIP. Para obter a evapotranspiração diária ( $ET$ ) foi utilizado o método de Turc. Além disso, as variáveis supracitadas foram validadas com dados do *Climate Prediction Center* (CPC) e de reanálise do ERA5. Os GCMs do CMIP6 exibiram melhor desempenho comparado aos GCMs do CMIP5 na representação das variáveis climáticas analisadas sobre a América do Sul, especialmente para  $T_{med}$  e  $ET$ . Os GCMs projetaram tendência positiva na  $ET$ , que foi acompanhada de um efeito integrado de tendência positiva na  $T_{med}$  e  $R_s$ , e tendência negativa na  $UR$ ,  $US$  e  $P$ , que indicou condições climáticas mais secas para o final do século XXI principalmente na região Amazônica, norte da Bolívia e sul do Peru. Apesar da distribuição espacial da taxa de contribuição possuir diferenças nos padrões regionais, a variável climática dominante que contribuiu para a tendência positiva da  $ET$  foi a  $T_{med}$ , principalmente para o período futuro, o que indicou que essa contribuição não foi enfraquecida pela contribuição das demais variáveis climáticas. No geral, esses resultados auxiliam nas avaliações das variáveis que influenciam na mudança da  $ET$  na América do Sul.

**Palavras-chave:** Mudanças Climáticas. Modelos de Circulação Geral. Método de Turc. Umidade do Solo. Variável Dominante. Clima Seco.

## ABSTRACT

MONTEIRO, Ana Flávia Martins. **Climate projections of the main variables that influence evapotranspiration in South America: a multi-model assessment.** 2023. 92 p. Doctoral thesis (PhD in Environment and Water Resources) - Natural Resources Institute, Federal University of Itajubá, Itajubá, 2023.

Climate change is the greatest challenge due to threats in the natural and social systems. For adaptation actions planning to be effective, it is necessary to analyze the impacts on climate variables, especially in potentially vulnerable regions, such as South America. Additionally, as a new generation of general circulation models (GCMs) becomes available, it is mandatory to reevaluate the performance and reliability of this new set in representing the behavior of the climate system. Therefore, the present study analyzed and compared simulations and projections of climate change over South America using ten GCMs from Coupled Model Intercomparison Project, using fifth and sixth phases (CMIP5 and CMIP6). The projections (PF; 2081-2100) were compared to the present period (PP; 1986-2005), for four radiative forcing scenarios: RCP4.5 and RCP8.5 (Representative Concentration Pathways) and SSP2-4.5 and SSP5-8.5 (Shared Socioeconomic Pathways). Furthermore, this study analyzed space-time trends and the contribution rate of climate variables that influence evapotranspiration in South America, considering the PP and the SSP5-8.5 future scenario of CMIP6. For this, a set of daily data of mean air temperature at 2 m above the surface ( $T_{mean}$ ), relative air humidity ( $RH$ ), global solar radiation ( $R_s$ ), soil moisture at 10 cm from the surface ( $SM$ ) and precipitation ( $P$ ) was used of ten GCMs from both sets of CMIP. To obtain the daily evapotranspiration ( $ET$ ) the Turc method was used. In addition, the aforementioned variables were validated with data from the Climate Prediction Center (CPC) and ERA5 reanalysis. The CMIP6 GCMs exhibited better performance compared to the CMIP5 GCMs in representing the analyzed climate variables over South America, especially for  $T_{mean}$  and  $ET$ . The GCMs projected a positive trend in  $ET$ , which was accompanied by an integrated effect of a positive trend in  $T_{mean}$  and  $R_s$ , and a negative trend in  $RH$ ,  $SM$  and  $P$ , which indicated drier climate conditions for the end of the 21<sup>st</sup> century mainly in the Amazon region, north of Bolivia and southern Peru. Despite the spatial distribution of the contribution rate having differences in regional patterns, the dominant climate variable that contributed to the positive trend of  $ET$  was  $T_{mean}$ , mainly for the future period, indicating that this contribution was not weakened by the contribution of other climate variables. In general, these results help in evaluating the variables that influence the change in  $ET$  in South America.

**Keywords:** Climate Changes. General Circulation Models. Turc Method. Soil Moisture. Dominant Variable. Dry Weather.

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

- Figura 1.1.** Topografia e localização geográfica dos países pertencentes à América do Sul. 30
- Figura 1.2.** Fluxograma da metodologia aplicada. .... 33
- Figura 1.3.** Distribuição espacial das estatísticas do desempenho (VM, RQME e índice  $c$ ) dos modelos de circulação geral (média) provenientes do CMIP5 e CMIP6 para as variáveis diárias de umidade relativa do ar ( $UR$ ; %), umidade do solo a 10 cm da superfície ( $US$ ; mm), precipitação ( $P$ ; mm), radiação solar global ( $R_s$ ; MJ m<sup>-2</sup>), temperatura média do ar a 2 m da superfície ( $T_{med}$ ; °C) e evapotranspiração ( $ET$ ; mm) considerando o período presente (PP; 1986-2005). .... 35
- Figura 1.4.** Distribuição espacial da mudança climática (PF - PP) para as variáveis umidade relativa do ar ( $UR$ ; %), umidade do solo a 10 cm da superfície ( $US$ ; mm), precipitação ( $P$ ; mm), radiação solar global ( $R_s$ ; MJ m<sup>-2</sup>), temperatura média do ar a 2 m da superfície ( $T_{med}$ ; °C) e evapotranspiração ( $ET$ ; mm) provenientes da média dos dez modelos de circulação geral do CMIP5 (RCPs 4.5 e 8.5) e CMIP6 (SSPs 2-4.5 e 5-8.5). O pontilhado representa áreas em que a magnitude da mudança é maior que dois desvios-padrão para  $ET$  e  $T_{med}$ ; e um desvio-padrão para  $UR$ ,  $R_s$ ,  $US$  e  $P$ . .... 40
- Figura 1.5.** Padrão sazonal de mudanças climáticas para a evapotranspiração ( $ET$ ; mm) provenientes da média dos dez modelos de circulação geral do CMIP5 (RCPs 4.5 e 8.5) e CMIP6 (SSPs 2-4.5 e 5-8.5). .... 42

### CAPÍTULO II

- Figura 2.1.** Etapas metodológicas para a análise de tendência. .... 56
- Figura 2.2.** Etapas metodológicas para a avaliação da contribuição relativa de cada variável ( $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $R_s$ ,  $US$  e  $P$ ) na evapotranspiração. .... 58
- Figura 2.3.** Distribuição espacial (em escala sazonal e anual) do viés médio entre a média dos dez modelos de circulação geral do CMIP6 e os dados provenientes do ERA5 para a tendência das variáveis diárias de umidade relativa do ar ( $UR$ ; %), umidade do solo a 10 cm da superfície ( $US$ ; mm), precipitação ( $P$ ; mm), radiação solar global ( $R_s$ ; MJ m<sup>-2</sup>), temperatura média do ar a 2 m da superfície ( $T_{med}$ ; °C) e evapotranspiração ( $ET$ ; mm) considerando o período presente (PP; 1986-2005). .... 60
- Figura 2.4.** Distribuição espacial (em escala sazonal e anual) da tendência das variáveis diárias de umidade relativa do ar ( $UR$ ; %), umidade do solo a 10 cm da superfície ( $US$ ; mm), precipitação ( $P$ ; mm), radiação solar global ( $R_s$ ; MJ m<sup>-2</sup>), temperatura média do ar a 2 m da superfície ( $T_{med}$ ; °C) e evapotranspiração ( $ET$ ; mm), considerando a média dos dez modelos de circulação geral do CMIP6 para o período presente (PP; 1986-2005) e futuro (PF; 2081-2100). Os pontilhados representam áreas de tendência significativa pelo teste de Mann-Kendall ( $p = 0,05$ ). .... 64
- Figura 2.5.** Distribuição espacial (em escala sazonal e anual) da diferença (PF - PP) da tendência das variáveis diárias de umidade relativa do ar ( $UR$ ; %), umidade do solo a 10 cm da superfície ( $US$ ; mm), precipitação ( $P$ ; mm), radiação solar global ( $R_s$ ; MJ m<sup>-2</sup>), temperatura média do ar a 2 m da superfície ( $T_{med}$ ; °C) e evapotranspiração ( $ET$ ; mm), considerando a média dos dez modelos de circulação geral do CMIP6. .... 72

**Figura 2.6.** Distribuição espacial (em escala sazonal e anual) do viés médio entre a média dos dez modelos de circulação geral do CMIP6 e os dados provenientes do ERA5 para a contribuição relativa ( $\text{mm ano}^{-1}$ ) das variáveis diárias de umidade relativa do ar ( $UR$ ), umidade do solo a 10 cm da superfície ( $US$ ), precipitação ( $P$ ), radiação solar global ( $R_s$ ) e temperatura média do ar a 2 m da superfície ( $T_{med}$ ) na evapotranspiração ( $ET$ ) considerando o período presente (PP; 1986-2005). ..... 75

**Figura 2.7.** Distribuição espacial (em escala sazonal e anual) da contribuição relativa ( $\text{mm ano}^{-1}$ ) das variáveis diárias de umidade relativa do ar ( $UR$ ), umidade do solo a 10 cm da superfície ( $US$ ), precipitação ( $P$ ), radiação solar global ( $R_s$ ) e temperatura média do ar a 2 m da superfície ( $T_{med}$ ) na evapotranspiração ( $ET$ ), considerando a média dos dez modelos de circulação geral do CMIP6 para o período presente (PP; 1986-2005) e futuro (PF; 2081-2100). ..... 77

**Figura 2.8.** Distribuição espacial (em escala sazonal e anual) da diferença (PF - PP) da contribuição relativa ( $\text{mm ano}^{-1}$ ) das variáveis diárias de umidade relativa do ar ( $UR$ ), umidade do solo a 10 cm da superfície ( $US$ ), precipitação ( $P$ ), radiação solar global ( $R_s$ ) e temperatura média do ar a 2 m da superfície ( $T_{med}$ ) na evapotranspiração ( $ET$ ), considerando a média dos dez modelos de circulação geral do CMIP6. .... 80

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

### CAPÍTULO I

**Tabela 1.1.** Lista dos modelos CMIP5 e CMIP6 utilizados neste estudo, com resoluções horizontais aproximadas (graus de latitude x longitude).....29

### CAPÍTULO II

**Quadro 2.1.** Tendências significativas das variáveis diárias de umidade relativa do ar (*UR*; %), umidade do solo a 10 cm da superfície (*US*; mm), precipitação (*P*; mm), radiação solar global (*R<sub>s</sub>*; MJ m<sup>-2</sup>), temperatura média do ar a 2 m da superfície (*T<sub>med</sub>*; °C) e evapotranspiração (*ET*; mm) na América do Sul, em escala sazonal..... 66

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AR6: sexto relatório de avaliação

$C(x_i)$ : contribuição relativa de cada variável climática ( $x_i$ ) na  $ET$  ( $\text{mm ano}^{-1}$ )

CMIP: *Coupled Model Intercomparison Project*

CPC: *Climate Prediction Center - Unified Precipitation Project*

DJF: verão Austral (dezembro-janeiro-fevereiro)

$\bar{E}$ : média dos dados diários dos GCMs do CMIP

$E_i$ : dados diários de  $ET$ ,  $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $R_s$ ,  $US$  e  $P$  dos GCMs do CMIP

ECMWF: *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*

ESGF: *Earth System Grid Federation*

$ET$ : evapotranspiração (mm)

FAO: Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação

GCMs: modelos de circulação geral

IPCC: *Intergovernmental Panel on Climate Change*

JJA: inverno Austral (junho-julho-agosto)

MAM: outono Austral (março-abril-maio)

$n$ ;  $nd$ : número de dias da série temporal

NOAA: *National Oceanic and Atmospheric Administration*

$\bar{O}$ : média dos dados fornecidos pelo ERA5 e CPC

$O_i$ : dados diários fornecidos pelo ERA5 e CPC

$P$ : precipitação (mm)

PF: período futuro (2081-2100)

PM: Penman-Monteith

PP: período presente (1986-2005)

RCsPs: *Representative Concentration Pathways*

RQME: raiz do quadrado médio do erro

$R_s$ : radiação solar global ( $\text{MJ m}^{-2}$ )

SON: primavera Austral (setembro-outubro-novembro)

SSPs: *Shared Socioeconomic Pathways*

$T_{med}$ : temperatura média do ar a 2 m da superfície ( $^{\circ}\text{C}$ )

$UR$ : umidade relativa do ar (%)

$US$ : umidade do solo à 10 cm da superfície (mm)

VM: viés médio

WCRP: *World Climate Research Program*

ZCAS: Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT: Zona de Convergência Intertropical

$x_i$ ;  $x_j$ : valores sequenciais das séries temporais

$\beta$ : magnitude da tendência ou a inclinação (variação por unidade de tempo)

$\frac{\partial ET}{\partial x_i}$ : coeficiente angular da regressão linear entre a  $ET$  e  $x_i$  ( $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $R_s$ ,  $US$  e  $P$ )

$\frac{dx_i}{dt}$ : coeficiente angular da regressão linear entre  $x_i$  ( $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $R_s$ ,  $US$  e  $P$ ) no tempo

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>15</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS .....</b>	<b>19</b>
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>25</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>25</b>
<b>1.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>25</b>
<b>1.2. DADOS E METODOLOGIA .....</b>	<b>28</b>
1.2.1. DADOS E MODELOS CLIMÁTICOS .....	28
1.2.2. SIMULAÇÕES E PROJEÇÕES CLIMÁTICAS.....	30
1.2.2.1. SIMULAÇÕES CLIMÁTICAS.....	30
1.2.2.2. PROJEÇÕES DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS .....	32
<b>1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>34</b>
1.3.1. DESEMPENHO DAS SIMULAÇÕES DOS GCMs (1986-2005).....	34
1.3.2. AVALIAÇÃO DAS PROJEÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA AMÉRICA DO SUL: CMIP5 vs. CMIP6 .....	38
<b>1.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>43</b>
<b>1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>43</b>
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>51</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>51</b>
<b>2.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>51</b>
<b>2.2. DADOS E METODOLOGIA .....</b>	<b>53</b>
2.2.1. SIMULAÇÕES E PROJEÇÕES CLIMÁTICAS.....	53
2.2.2. ANÁLISE DE TENDÊNCIA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS NO PERÍODO PRESENTE E FUTURO .....	54
2.2.3. AVALIAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO NO PERÍODO PRESENTE E FUTURO .....	56
<b>2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>58</b>
2.3.1. TENDÊNCIA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS: PERÍODO PRESENTE E FUTURO .....	58
2.3.2. CONTRIBUIÇÃO DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS NA EVAPOTRANSPIRAÇÃO: PERÍODO PRESENTE E FUTURO .....	73
<b>2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>81</b>
<b>2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>82</b>
<b>MATERIAL SUPLEMENTAR .....</b>	<b>89</b>

## INTRODUÇÃO GERAL

Os modelos de circulação geral (GCMs) são ferramentas muito utilizadas para simular e projetar os impactos do aumento das emissões antropogênicas no clima (Arias et al. 2021; Baker et al. 2021; Ortega et al. 2021). Nesse sentido, o *World Climate Research Program* (WCRP) criou o *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP) em 1995, com o intuito de compilar as análises geradas pelos GCMs (Dias; Reboita 2021; Li et al. 2022). O CMIP padroniza os resultados dos GCMs de modo a torná-los publicamente disponíveis pela *Earth System Grid Federation* (ESGF) para a comunidade científica, tornando-se referência internacional na avaliação do sistema climático (Tian; Dong 2020; Reboita et al. 2022). Com o desenvolvimento científico, o CMIP evoluiu por diversas fases: Fase 1 (CMIP1), Fase 2 (CMIP2), Fase 3 (CMIP3) e Fase 5 (CMIP5) até a mais recente, Fase 6 (CMIP6) (Tian; Dong 2020; Li et al. 2022). Cada nova fase do CMIP é baseada na condição de que as novas gerações de GCMs melhoram em termos de resolução espacial, parametrização física, representação de processos físicos e eficiência computacional (Wang et al. 2020; Almazroui et al. 2021; Baker et al. 2021; Song et al. 2022). Portanto, é fundamental reavaliar os resultados dos modelos à medida que novos conjuntos de dados se tornem disponíveis (Cook et al. 2020; Wang et al. 2020).

Na última Fase do CMIP (CMIP6), os GCMs utilizam um novo conjunto de cenários, que são uma combinação de *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs) e *Representative Concentration Pathways* (RCPs), para compreender melhor as respostas do sistema terrestre em relação aos forçamentos antropogênicos (Van Vuuren et al. 2011; Riahi et al. 2017; Almazroui et al. 2021). Ou seja, essa nova estrutura de cenário integra a adaptação, mitigação e vulnerabilidade às forçantes radiativas (Liu et al. 2020; Li et al. 2022), tornando os SSPs mais realistas em comparação com os cenários anteriores (Song et al. 2022). Os mais recentes resultados dos GCMs do CMIP6 forneceram suporte ao sexto relatório de avaliação (AR6) do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC; 2022), com o objetivo de analisar as respostas às mudanças climáticas (Cook et al. 2020; Zeng et al. 2022).

O termo mudanças climáticas é definido como qualquer alteração no sistema climático que persiste por várias décadas ou mais, devido a causas naturais e/ou antropogênicas (IPCC 2022). A análise de séries históricas de dados observados tem comprovado mudanças na composição atmosférica e seus impactos no aquecimento do planeta (Reboita et al. 2021), além

de mudanças nos padrões de precipitação e erosividade da chuva (Santos et al. 2022; Costa et al. 2023). Os impactos das mudanças climáticas são frequentemente contrastantes com as respostas políticas na crise climática (Hagen et al. 2022), limitando a capacidade de adaptação do sistema terrestre (Li et al. 2022; Zeng et al. 2022), com consequências como extremos de temperatura (Ávila-Diaz et al. 2020), aumento de episódios de secas (Garreaud et al. 2020), aumento na frequência de chuvas extremas (Zeng et al. 2022), inundações (Hang et al. 2022), deterioração do solo (Vieira et al. 2021), incêndios florestais (Almazroui et al. 2021), derretimento de geleiras (Arias et al. 2021), redução dos recursos hídricos para as necessidades humanas (Ng et al. 2022), diminuição da geração de energia hidrelétrica (Silveira et al. 2017), elevação do nível do mar (Duarte et al. 2020), erosão costeira (Hagen et al. 2022), deslizamentos de terras (Hirabayashi et al. 2021), branqueamento dos recifes de corais (Hagen et al. 2022), modificação de paisagens (Ritchie et al. 2022), alterações na disponibilidade hídrica pronunciadas no setor agrícola (Martins et al. 2022), propagação de epidemias, em particular doenças transmitidas por vetores (Hagen et al. 2022), além de outros impactos socioeconômicos (Brêda et al. 2020). Portanto, é necessário planejar ações efetivas e sustentáveis de adaptação aos impactos de mudanças climáticas (Lin et al. 2018; Cook et al. 2020; Song et al. 2022), especialmente em regiões de grande biodiversidade e potencialmente ameaçadas, como a América do Sul (Ortega et al. 2021; Reboita et al. 2022).

A América do Sul localiza-se entre as latitudes 12 °N e 55 °S, abrangendo diferentes zonas climáticas e ecológicas (Llopart et al. 2019; Marrafon; Reboita 2020). A diversidade climática do continente Sul-Americano se deve à sua grande extensão latitudinal, heterogeneidade topográfica e influência dos oceanos Atlântico e Pacífico circundantes, que proporcionam a atuação e desenvolvimento de diferentes sistemas atmosféricos (Reboita et al. 2010; Llopart et al. 2019). De modo geral, as porções norte e central do continente apresentam clima tropical, a borda oeste apresenta clima de deserto árido e estepe, o sudeste é relativamente temperado, enquanto a borda sudoeste tem um clima de tundra polar (Beck et al. 2018; Almazroui et al. 2021).

A geografia da América do Sul é diversificada com a presença da Cordilheira dos Andes, região montanhosa que se estende de norte a sul na costa oeste do continente, que abriga 99% das geleiras tropicais restantes do mundo (Veettil; Kamp 2019; Almazroui et al. 2021) e apresenta clima seco (Llopart et al. 2019). A floresta Amazônica, maior floresta tropical do

mundo, abrange mais de 35% do continente e influencia o clima da Terra devido seu papel nos balanços globais de carbono, energia e umidade (Parsons 2020). Os sistemas atmosféricos atuantes mais relevantes nessa região são os ventos alísios, Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Complexos Convectivos de Mesoescala tropical, linhas de instabilidade tropicais, Alta da Bolívia e Jatos em Baixos Níveis a leste dos Andes (Reboita et al. 2010). A variedade de características climáticas na América do Sul também é evidente pelo fato de que a região equatorial da Colômbia é uma das áreas mais úmidas do planeta (Espinoza et al. 2019; Mejía et al. 2021), enquanto o deserto do Atacama, localizado no norte do Chile, é uma das áreas mais áridas do planeta (Ritter et al. 2019; Schween et al. 2020), sendo esse influenciado pelos sistemas Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul, frentes, ciclones e Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis subtropicais (Reboita et al. 2010). A segunda região mais seca do continente é o Nordeste semiárido do Brasil (Almazroui et al. 2021), em que os sistemas atmosféricos atuantes são o ramo descendente da circulação zonal propiciada pela atividade convectiva na Amazônia, Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul e ZCIT (Reboita et al. 2010). Além disso, a América do Sul apresenta grande disponibilidade de água doce, sendo as bacias hidrográficas mais importantes a do Amazonas, que abrange áreas do Brasil, Peru, Bolívia, Equador, Colômbia e Venezuela, e de La Plata, cobrindo áreas do Brasil, Argentina, Paraguai, Bolívia e Uruguai (Llopart et al. 2019).

Uma vez que a América do Sul apresenta-se vulnerável às mudanças climáticas (Monteiro et al. 2021; Ortega et al. 2021; Reboita et al. 2022), estudos sobre impactos dessas mudanças são visados em diversos setores socioeconômicos (Lyra et al. 2017; Lin et al. 2018; Ritchie et al. 2022), principalmente no setor agrícola, devido a intensificação dos impactos negativos nas variáveis climáticas que compõem o balanço hídrico (Porfirio et al. 2018; Florêncio et al. 2022; Martins et al. 2022), especialmente a evapotranspiração.

A evapotranspiração é o processo de transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera e ocorre principalmente através da relação entre as condições atmosféricas e a vegetação (Lin et al. 2018; Liu et al. 2020; Wang et al. 2020). De modo geral, é uma variável influenciada pela temperatura do ar e radiação solar, que impulsionam/aumentam a taxa de evapotranspiração a medida em que aumentam seus valores; e pela umidade do ar e precipitação, que tendem a reduzir a taxa de evapotranspiração à medida que apresentam maiores concentrações (Gomes et al. 2021; Monteiro et al. 2021). Além disso, a evapotranspiração é

influenciada pelas condições de superfície, como a umidade do solo (Ruosteenoja et al. 2018; Ruscica et al. 2021; Basu; Sauchyn 2022; Jiang et al. 2022). Portanto, quaisquer alterações nessas variáveis, devido às mudanças climáticas, afetarão a evapotranspiração (Lin et al. 2018).

A evapotranspiração de referência, mencionada nesse estudo apenas como *evapotranspiração*, originalmente introduzida sob o termo evapotranspiração potencial, é o principal parâmetro agrometeorológico utilizado no dimensionamento, planejamento e manejo de irrigação (Lin et al. 2018; Martins et al. 2022), gerenciamento de recursos hídricos por meio da eficiência do uso da água (Ng et al. 2022; Song et al. 2022) e análise dos impactos provenientes das mudanças climáticas (Monteiro et al. 2021). A evapotranspiração de referência é definida como a evapotranspiração de uma superfície com vegetação gramada em crescimento ativo (~ 0,12 m), cobrindo totalmente a superfície sem restrição hídrica, apresentando resistência ao transporte de vapor d'água constante (~ 70,0 s m<sup>-1</sup>) e albedo (0,23) (Allen et al. 1998).

A evapotranspiração é obtida diretamente por meio de lisímetros, que requerem o uso de sensores específicos, com alto custo de instalação e manutenção (Lyra et al. 2016; Tfwala et al. 2018), o que os tornam ferramentas inviáveis de serem empregadas para medições em grandes territórios (Valipour et al. 2017; Monteiro et al. 2021; Ng et al. 2022). Portanto, para solucionar a ausência de dados é necessário estimar a evapotranspiração por meio de diferentes métodos, os quais foram desenvolvidos e testados para várias condições climáticas, resultando em valores precisos e representativos (Gharbia et al. 2018; Sorensson; Ruscica 2018). A diversidade de métodos se dá em função dos tipos e resoluções das variáveis de entrada, relações funcionais e aplicabilidade de uso (Tegos et al. 2015; Dewes et al. 2017). O método proposto por Penman-Monteith (PM) é o recomendado pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (do acrônimo em inglês, FAO) por sua capacidade de representar melhor os processos físicos e aerodinâmicos que influenciam na evapotranspiração (Allen et al. 1998). No entanto, é considerado um método complexo, pois requer a inclusão de algumas variáveis meteorológicas como dado de entrada que muitas vezes não estão disponíveis nas estações meteorológicas, nem estão presentes nos modelos de projeções climáticas (Guo et al. 2017; Almorox et al. 2018). A dificuldade de obtenção de dados de entrada reduz a funcionalidade deste método, o que pode levar a inaplicabilidade de estudos em cenários de mudanças climáticas (Valipour et al. 2017; Gong et al. 2021). Portanto, torna-se necessário optar por métodos que sejam ao mesmo tempo precisos e exijam dados de entrada facilmente disponíveis

(Ng et al. 2022). Assim, a comparação do desempenho de vinte e nove métodos de estimativa da evapotranspiração foi realizada para as condições atuais utilizando dados em grade proposto por Xavier et al. (2016), derivados de estações meteorológicas, e futuras (CMIP5) para todo o território brasileiro (Monteiro et al. 2021). Neste estudo, Monteiro et al. (2021) definiram o método de Turc, que utiliza as variáveis temperatura do ar, radiação solar e umidade do ar, como o que apresentou melhor desempenho. O método de Turc também obteve bom desempenho em trabalho realizado na China, especialmente em regiões subtropicais de monções, regiões temperadas continentais de monção e regiões temperadas continentais (Yang et al. 2021), em clima úmido e subtropical da Índia (Vishwakarma et al. 2022) e na Turquia (Gharehbaghi; Kaya 2022).

Assim, o objetivo geral desta tese foi analisar as variáveis que influenciam a evapotranspiração na América do Sul utilizando multi-modelos do CMIP, considerando cenários climáticos distintos: presente e futuro. Para atender este objetivo, esta tese foi dividida em dois capítulos. O capítulo I teve como objetivo específico analisar e comparar o comportamento das variáveis climáticas evapotranspiração, temperatura do ar, umidade do ar, radiação solar, umidade do solo e precipitação na América do Sul no período presente e futuro, utilizando duas gerações de GCMs do CMIP5 e CMIP6, assim como mensurar suas incertezas. O capítulo II teve como objetivo específico analisar as tendências e determinar a taxa de contribuição das variáveis climáticas temperatura do ar, umidade do ar, radiação solar, umidade do solo e precipitação na evapotranspiração na América do Sul no período presente e futuro utilizando GCMs do CMIP6.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS

Allen RG, Pereira LS, Raes D *et al.* (1998) Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Almazroui M, Ashfaq M, Islam MN *et al.* (2021) Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America. *Earth Sys Environ* 5:155-183. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6>

Almorox J, Senatore A, Quej VH *et al.* (2018) Worldwide assessment of the Penman-Monteith temperature approach for the estimation of monthly reference evapotranspiration. *Theor Appl Climatol* 131:693-703. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1996-2>

Arias PA, Ortega G, Villegas LD *et al.* (2021) Colombian climatology in CMIP5/CMIP6 models: persistent biases and improvements. *Rev Fac Ing* 100:75-96. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20210525>

- Ávila-Díaz A, Abrahão G, Justino F *et al.* (2020) Extreme climate indices in Brazil: evaluation of downscaled earth system models at high horizontal resolution. *Clim Dyn* 54:5065-5088. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05272-9>
- Baker JCA, Souza DC, Kubota PY *et al.* (2021) An assessment of land-atmosphere interactions over South America using satellites, reanalysis, and two global climate models. *Am Meteorol Soc* 22:905-922. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0132.1>
- Basu S, Sauchyn DJ (2022) Future changes in the surface water balance over western Canada using CanESM5 (CMIP6) ensemble for the Shared Socioeconomic Pathways 5 scenario. *Water* 14:1-14. <https://doi.org/10.3390/w14050691>
- Beck H, Zimmermann N, McVicar T *et al.* (2018) Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Sci Data* 5:180214. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Brêda JPLF, Paiva RCD, Collischon W *et al.* (2020) Climate change impacts on South America water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. *Clim Change* 159:503-522. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02667-9>
- Cook BI, Mankin JS, Marvel K *et al.* (2020) Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. *Earth's Future* 1-20. <https://doi.org/10.1029/2019EF001461>
- Costa LM, Mendonça GC, Santos GAA, Moraes JRSC, Colombo R, Panosso AR, Scala NL (2023) High spatial resolution solar-induced chlorophyll fluorescence and its relation to rainfall precipitation across Brazilian ecosystems. *Environ Res* 218:114991. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114991>
- Dewes CF, Rangwala I, Barsugli JJ *et al.* (2017) Drought risk assessment under climate change is sensitive to methodological choices for the estimation of evaporative demand. *Plos One* 12:e0174045. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174045>
- Dias CS, Reboita MS (2021) Assessment of CMIP6 simulations over Tropical South America. *Braz J Phys Geogr* 14:1282-1295. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1282-1295>
- Duarte GAS, Villela HDM, Deocleciano M *et al.* (2020) Heat waves are a major threat to turbid coral reefs in Brazil. *Front Mar Sci* 7:179. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00179>
- Espinoza JC, Ronchail J, Marengo JA *et al.* (2019) Contrasting North-South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981-2017). *Clim Dyn* 52:5413-5430. <https://doi.org/10.1007/s00982-018-4462-2>
- Florêncio GWL, Martins FB, Fagundes FFA (2022) Climate change on Eucalyptus plantations and adaptive measures for sustainable forestry development across Brazil. *Ind Crops Prod* 115538:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115538>
- Garreaud RD, Boisier JP, Rondanelli R *et al.* (2020) The Central Chile mega drought (2010-2018): a climate dynamics perspective. *Int J Climatol* 40:421-439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Gharbia SS, Smullen T, Gill L *et al.* (2018) Spatially distributed potential evapotranspiration modelling and climate projections. *Sci Total Environ* 633:571-592. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.208>

- Gharehbaghi A, Kaya B (2022) Calibration and evaluation of six popular evapotranspiration formula based on the Penman-Monteith model for continental climate in Turkey. *Phys Chem Earth* 127:103190. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103190>
- Gomes WWE, Leite-Filho AT, Soares-Filho BS (2021) Simulation of the impacts of global climate change on reference evapotranspiration in the Brazilian Amazon basin. *Rev Bras Meteorol* 28:450-470. <http://dx.doi.org/10.5380/rbclima.v28i0.74046>
- Gong D, Hao W, Gao L *et al.* (2021) Extreme learning machine for reference crop evapotranspiration estimation: model optimization and spatiotemporal assessment across different climates in China. *Comput Electron Agric* 187:106294. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106294>
- Guo D, Westra S, Maier HR (2017) Sensitivity of potential evapotranspiration to changes in climate variables for different Australian climatic zones. *Hydrol Earth Syst Sci* 21:2107-2126. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2107-2017>
- Hagen I, Huggel C, Ramajo L *et al.* (2022) Climate change-related risks and adaptation potential in Central and South America during the 21<sup>st</sup> century. *Environ Res Lett* 17:033002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5271>
- Hirabayashi T, Tanoue M, Sasaki O *et al.* (2021) Global exposure to flooding from the new CMIP6 climate model projections. *Sci Rep* 11:3740. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83279-w>
- IPCC. Portner HO, Roberts DC, Tignor M *et al.* (eds.) (2022) *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 University Press. In Press.
- Jiang Y, Yang M, Liu W *et al.* (2022) Eco-hydrological responses to recent droughts in tropical South America. *Environ Res Lett* 17:024037. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac507a>
- Li Y, Qin Y, Rong P (2022) Evolution of potential evapotranspiration and its sensitivity to climate change based on the Thornthwaite, Hargreaves, and Penman-Monteith equation in environmental sensitive areas of China. *Atmos Res* 273:106178. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106178>
- Lin P, He Z, Du J *et al.* (2018) Impacts of climate change on reference evapotranspiration in the Qilian Mountains of China: historical trends and projected changes. *Int J Climatol* 38:2980-2993. <https://doi.org/10.1002/joc.5477>
- Liu X, Li C, Zhao T *et al.* (2020) Future changes of global potential evapotranspiration simulated from CMIP5 to CMIP6 models. *Atmos Ocean Sci Lett* 13:568-275. <https://doi.org/10.1080/16742834.2020.1824983>
- Llopart M, Reboita MS, Rocha RP (2019) Assessment of multi-model climate projections of water resources over South America CORDEX domain. *Clim Dyn* 54:99-116. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04990-z>
- Lyra A, Tavares P, Chou SC *et al.* (2017) Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. *Theor Appl Climatol* 132:663-682. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2067-z>

- Lyra GB, Souza JL, Silva ED *et al.* (2016) Soil water stress co-efficient for estimating actual evapotranspiration of maize in northeastern Brazil. *Meteorol Appl* 23:26-34. <https://doi.org/10.1002/met.1516>
- Marrafon VH, Reboita MS (2020) Precipitation features in South America shown by climate indices. *Rev Bras Climatol* 26:663-676. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v26i0.72181>
- Martins FB, Benassi RB, Torres RR *et al.* (2022) Impacts of 1.5°C and 2°C global warming on Eucalyptus plantations in South America. *Sci Total Environ* 825:153820. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153820>
- Mejía JF, Yepes J, Henao JJ *et al.* (2021) Towards a mechanistic understanding of precipitation over the far eastern tropical Pacific and western Colombia, one of the rainiest spots on Earth. *J Geophys Res Atmos* 126:e2020JD033415. <https://doi.org/10.1029/2020JD033415>
- Monteiro AFM, Martins FB, Torres RR *et al.* (2021) Intercomparison and uncertainty assessment of methods for estimating evapotranspiration using a high-resolution gridded weather dataset over Brazil. *Theor Appl Climatol* 146:583-597. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03747-1>
- Ng JL, Huang YF, Yong SLS *et al.* (2022) Comparative assessment of reference crop evapotranspiration models and its sensitivity to meteorological variables in Peninsular Malaysia. *Stoch Environ Res Risk Assess* 36:3557-3575. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02209-y>
- Ortega G, Arias PA, Villegas JC *et al.* (2021) Present-day and future climate over Central and South America according to CMIP5/CMIP6 models. *Int J Climatol* 41:6713-6735. <https://doi.org/10.1002/joc.7221>
- Parsons LA (2020) Implications of CMIP6 projected drying trends for 21st century Amazonian drought risk. *Earth's Future* 8:1-13. <https://doi.org/10.1029/2020EF001608>
- Porfirio LL, Newth D, Finnigan JJ *et al.* (2018) Economic shifts in agricultural production and trade due to climate change. *Palgrave Commun* 4:111. <https://doi.org/10.1057/s41599-018-0164-y>
- Reboita MS, Rocha RSP da, Souza CA de *et al.* (2022) Future projections of extreme precipitation climate indices over South America based on CORDEX-CORE multimodel ensemble. *Atmos* 13:1463. <https://doi.org/10.3390/atmos13091463>
- Reboita MS, Kuki CAC, Marrafon VH *et al.* (2021) South America climate change revealed through climate indices projected by GCMs and Eta-RCM ensembles. *Clim Dyn* 58:459-485. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05918-2>
- Reboita MS, Gan MA, Rocha RP da *et al.* (2010) Precipitation regimes in South America: a bibliography review. *Rev Bras Meteorol* 25:185-204. <http://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>
- Riahi K, Van Vuuren DP, Kriegler E *et al.* (2017) The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environ Change* 42:153-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Ritchie PD, Parry I, Clarke JJ *et al.* (2022) Increases in the temperature seasonal cycle indicate long-term drying trends in Amazonia. *Commun Earth Environ.* 3:1-8. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00528-0>

- Ritter B, Wennrich V, Medialdea A *et al.* (2019) Climatic fluctuations in the hyperarid core of the Atacama Desert during the past 215 ka. *Sci Rep* 9:1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41743-8>
- Ruscica RC, Sorensson AA, Diaz LB *et al.* (2021) Evapotranspiration trends and variability in southeastern South America: the roles of land-cover change and precipitation variability. *Int J Climatol* 2021:1-20. <https://doi.org/10.1002/joc.7350>
- Ruosteenoja K, Markkanen T, Venalainen A *et al.* (2018) Seasonal soil moisture and drought occurrence in Europe in CMIP5 projections for the 21<sup>st</sup> century. *Clim Dyn* 50:1177-1192. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3671-4>
- Santos WP, Avanzi JC, Viola MR, Chou SC, Acuña-Guzman SF, Pontes LM, Curi N (2022) Projections of rainfall erosivity in climate change scenarios for the largest watershed within Brazilian territory. *Catena* 213:106225. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106225>
- Schween JH, Hoffmeister D, Lohnert U (2020) Filling the observation gap in the Atacama Desert with a new network of climate stations. *Glob Planet Change* 184:103034. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103034>
- Silveira CS, Souza-Filho FA, Vasconcelos-Júnior FC (2017) Streamflow projections for the Brazilian hydropower sector from RCP scenarios. *J Water Clim Chang* 8:114-126. <https://doi.org/10.2166/wcc.2016.052>
- Song YH, Chung ES, Shahid S (2022) Uncertainties in evapotranspiration projections associated with estimation methods and CMIP6 GCMs for South Korea. *Sci Total Environ* 825:153953. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153953>
- Sorensson AA, Ruscica RC (2018) Intercomparison and uncertainty assessment of nine evapotranspiration estimates over South America. *Water Resour Res* 54:2891-2908. <https://doi.org/10.1002/2017WR021682>
- Tegos A, Efstratiadis A, Malamos N *et al.* (2015) Evaluation of a parametric approach for estimating potential evapotranspiration across different climates. *Agriculture Agric Sci Procedia* 4:2-9. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.03.002>
- Tfwala CM, Van Rensburg LD, Bello ZA *et al.* (2018) Calibration of compensation heat pulse velocity technique for measuring transpiration of selected indigenous trees using weighing lysimeters. *Agric Water Manag* 200:27-33. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.005>
- Tian B, Dong X (2020) The double - ITCZ bias in CMIP3, CMIP5 and CMIP6 models based on annual mean precipitation. *Geophys Res Lett* 47:e2020GL087232. <https://doi.org/10.1029/2020GL087232>
- Valipour M, Sefidkouhi MAG, Raeini-Sarjaz M (2017) Selecting the best model to estimate potential evapotranspiration with respect to climate change and magnitudes of extreme events. *Agric Water Manag* 180:50-60. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.025>
- Van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M *et al.* (2011) The representative concentration pathways: an overview. *Clim Change* 109:5-31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Veetil BK, Kamp U (2019) Global disappearance of tropical mountain glaciers: observations, causes, and challenges. *Geosciences* 9:196. <https://doi.org/10.3390/geosciences9050196>

- Vieira RMDSP, Tomasella J, Barbosa AA *et al.* (2021) Desertification risk assessment in Northeast Brazil: current trends and future scenarios. *Land Degr Devel* 32:224-240. <https://doi.org/10.1002/ldr.3681>
- Vishwakarma DK, Pandey K, Kaur A, Kushwaha NL, Kumar R, Ali R, Elbeltagi A, Kuriqi A (2022) Methods to estimate evapotranspiration in humid and subtropical climate conditions. *Agric Water Manag* 261:107378. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107378>
- Wang Z, Zhang C, Ning L *et al.* (2020) Evaluation of global terrestrial evapotranspiration in CMIP6 models. *Theor Appl Climatol* 143:521-531. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03437-4>
- Xavier AC, King CW, Scanlon BR (2016) Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). *Int J Climatol* 36:2644-2659. <https://doi.org/10.1002/joc.4518>
- Yang Y, Chen R, Han C, Liu Z (2021) Evaluation of 18 models for calculating potential evapotranspiration in different climatic zones of China. *Agric Water Manag* 244:106545. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106545>
- Zeng J, Li J, Lu X *et al.* (2022) Assessment of global meteorological, hydrological and agricultural drought under future warming based on CMIP6. *Atmos Ocean Sci Lett* 15:100143. <https://doi.org/10.1016/j.aosl.2021.100143>

## CAPÍTULO I

### SIMULAÇÕES E PROJEÇÕES CLIMÁTICAS E DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NA AMÉRICA DO SUL: UMA ABORDAGEM COMPARATIVA DA PERFORMANCE DOS MODELOS CMIP5 vs. CMIP6

#### RESUMO

Para que o planejamento de ações de mitigação e adaptação aos cenários de mudanças climáticas seja efetivo, é necessário analisar os impactos decorrentes das mesmas, especialmente em regiões potencialmente vulneráveis, tais como a América do Sul. À medida que uma nova geração de modelos climáticos se torna disponível, é mandatório reavaliar o desempenho e confiabilidade desse novo conjunto em representar o comportamento do sistema climático passado e futuro. Este estudo analisou e comparou as simulações e projeções de mudanças climáticas sobre a América do Sul utilizando dez modelos de circulação geral (GCMs) da quinta e sexta fase do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP5 e CMIP6, respectivamente). As projeções (2081-2100) foram comparadas ao período presente (1986-2005) para quatro cenários de forçantes radiativas: RCP4.5 e RCP8.5 (CMIP5) e SSP2-4.5 e SSP5-8.5 (CMIP6). Mudanças diárias nas variáveis evapotranspiração ( $ET$ ), temperatura média do ar a 2 m da superfície ( $T_{med}$ ), umidade relativa do ar ( $UR$ ), radiação solar global ( $R_s$ ), umidade do solo a 10 cm da superfície ( $US$ ) e precipitação ( $P$ ) foram quantificadas em ambos os GCMs. Além disso, as variáveis supracitadas foram validadas com dados do *Climate Prediction Center* (CPC) e de reanálise do ERA5. Os GCMs do CMIP6 exibiram melhor desempenho comparado aos GCMs do CMIP5 na representação das variáveis climáticas analisadas sobre a América do Sul, especialmente para  $T_{med}$  e  $ET$ . Para ambos CMIPs, os GCMs projetaram aumento da  $ET$  em quase todo o continente Sul-Americano, principalmente na região tropical, acompanhado de aumento da  $T_{med}$  e  $R_s$ , e da redução da  $UR$  e  $US$ . Essas projeções apresentaram concordância entre os GCMs, aumentando a confiabilidade desses resultados. Enquanto para a projeção da  $P$ , os GCMs não apresentaram concordância, o que indica baixa confiabilidade. No geral, esses resultados podem ser úteis para avaliações das mudanças climáticas na América do Sul.

#### 1.1. INTRODUÇÃO

Os modelos de circulação geral (GCMs) que compõem o *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP) são amplamente utilizados na comunidade científica como a principal ferramenta para a simulação do sistema terrestre e consequente análise das respostas desse sistema às forçantes naturais e antropogênicas (Brêda et al. 2020; Ortega et al. 2021). Essas respostas são sintetizadas e divulgadas principalmente pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) com o objetivo de auxiliar o desenvolvimento de medidas de mitigação, assim como análises de impacto, adaptação e vulnerabilidade (Cook et al. 2020; Wang et al. 2020;

Torres et al. 2021; Reboita, Ambrizzi 2022). No entanto, para planejar ações efetivas de adaptação aos cenários de mudanças climáticas, é mandatório analisar os impactos decorrentes das projeções, especialmente em regiões potencialmente ameaçadas (Ávila-Diaz et al. 2020a; Almazroui et al. 2021; IPCC 2022).

A América do Sul abrange diferentes zonas climáticas e ecológicas, e é considerada uma região vulnerável às mudanças climáticas (Torres; Marengo 2014; Darela Filho et al. 2016; Barkhordarian et al. 2019; Llopart et al. 2019; Marrafon; Reboita 2020). Diversos estudos demonstram projeções de aquecimento no continente Sul-Americano, com maior magnitude nas regiões tropicais em comparação com as latitudes médias; e comportamento heterogêneo na precipitação, com aumento no Sul do Brasil, Uruguai, norte da Argentina, sul do Paraguai, Peru, Equador e Colômbia, e diminuição no Norte e Nordeste do Brasil, Venezuela, Suriname, Guianas, sul do Chile e da Argentina (Thaler et al. 2021; Florêncio et al. 2022; IPCC 2022; Reboita; Ambrizzi 2022). Essas mudanças podem influenciar a ocorrência de eventos hidrometeorológicos, tais como extremos de temperatura (Ávila-Diaz et al. 2020a,b; Arias et al. 2021), inundações e secas (Feron et al. 2019; Debortoli et al. 2020; Zubieta et al. 2021) e em fenômenos como desertificação (Vieira et al. 2021), diminuição da geração de energia hidrelétrica (Silveira et al. 2017) e abastecimento de água (Vuille et al. 2018), além de outros impactos socioeconômicos (Zaninelli et al. 2018; Brêda et al. 2020). Os impactos podem ser mais pronunciados no setor agrícola, devido às alterações na disponibilidade hídrica (Basu; Sauchyn 2022; Florêncio et al. 2022; Martins et al. 2022; Song et al. 2022), que por sua vez são quantificadas pelo balanço hídrico.

As interações entre superfície e atmosfera são particularmente importantes para o balanço hídrico (Zaninelli et al. 2018; Alves et al. 2020; Baker et al. 2021). Nesse sentido, a evapotranspiração é a principal forma de transporte de água da superfície para a atmosfera (Allen et al. 1998; Lyra et al. 2016; Wang et al. 2020; Monteiro et al. 2021), sendo vital para o manejo dos recursos hídricos (Liu et al. 2020b; Gomes et al. 2021; Martins et al. 2022). A evapotranspiração expressa a demanda evaporativa da atmosfera, sendo afetada principalmente por variáveis climáticas (Jerszurki et al. 2019; Nóia Júnior et al. 2019; Song et al. 2022), influenciada diretamente pela radiação solar e temperatura do ar (Jerszurki et al. 2019; Lin et al. 2018; Wang et al. 2020), e indiretamente pela umidade do ar e precipitação (Sehler et al. 2019; Monteiro et al. 2021). Ou seja, mudanças espaço-temporais na evapotranspiração estão

intrinsecamente relacionadas com mudanças na temperatura do ar, radiação solar, precipitação e umidade do ar (Parsons 2020; Baker et al. 2021; Ruscica et al. 2021).

Adicionalmente, estudos indicam que a evapotranspiração pode ser limitada pelas condições de superfície, principalmente pela umidade do solo (Ruosteenoja et al. 2018; Cook et al. 2020; Baker et al. 2021; Ruscica et al. 2021). De maneira simplificada, o aumento da temperatura do ar e radiação solar contribuem para a redução da umidade do ar e aumento do déficit de pressão de vapor, os quais devem contribuir conjuntamente para o aumento da evapotranspiração (Jerszurki et al. 2019; Liu et al. 2020a; Gomes et al. 2021; Monteiro et al. 2021). À medida que mais água é transferida para a atmosfera pelo processo de evapotranspiração, maior a redução do teor de umidade do solo (Basu, Sauchyn 2022), principalmente nas camadas superficiais, que possuem maior proximidade e interação com a atmosfera. Caso a saída de água pela evapotranspiração não seja contrabalanceada pela precipitação, menor será o teor de umidade do solo. Em contrapartida, a baixa umidade do solo reduz a evapotranspiração e atua no aumento do fluxo de calor sensível, o que favorece a ocorrência de altas temperaturas do ar, que, por sua vez, aumenta o déficit de pressão de vapor e a demanda evaporativa (Ruosteenoja et al. 2018; Baker et al. 2021; Ruscica et al. 2021).

Uma das restrições apresentadas pelos GCMs consiste na dificuldade em representar satisfatoriamente as interações mencionadas acima, o que conduz a aumento das incertezas nas projeções (Duveiller et al. 2018; Sehler et al. 2019; Boysen et al. 2020; Baker et al. 2021). Uma das formas para reduzir as incertezas das projeções é a utilização de um conjunto de modelos climáticos com diferentes parametrizações físicas e condições iniciais e de contorno (Llopart et al. 2019; Torres et al. 2021; Reboita, Ambrizzi 2022). A análise de um amplo conjunto de GCMs auxilia na redução dessas incertezas (Brêda et al. 2020; Cook et al. 2020). Portanto, é fundamental reavaliar os resultados dos modelos à medida que novos conjuntos de dados se tornem disponíveis (Wang et al. 2020). Isso oferece uma oportunidade para analisar as respostas e confianças das projeções às mudanças climáticas (Cook et al. 2020).

Recentemente, o CMIP disponibilizou a sexta geração de modelos (CMIP6), cujos resultados foram utilizados no sexto relatório de avaliação do IPCC (IPCC AR6). O CMIP6 utiliza cenários mais abrangentes que as gerações anteriores, denominados *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs), que combinam cenários de emissão utilizados no CMIP5, os *Representative Concentration Pathways* (RCPs). Além disso, o CMIP6 apresenta aprimoramento

na resolução e representação de processos físicos em relação aos modelos anteriores (CMIP3 e CMIP5) (Almazroui et al. 2021; Deng et al. 2021), tais como a representação da precipitação sazonal na América do Sul, embora vieses sistemáticos de grande escala, como a Zona de Convergência Intertropical, ainda persista (Tian; Dong 2020; Arias et al. 2021; Dias; Reboita 2021; Ortega et al. 2021). Os estudos que comparam essa nova geração de modelos com a anterior (CMIP5) se concentram, principalmente, na análise da temperatura do ar e precipitação para diversas regiões do globo (Deng et al. 2021; Hamed et al. 2021; Lun et al. 2021; Song et al. 2021; Hamed et al. 2022). De acordo com esses estudos, ambas as gerações de CMIPs reproduzem padrões espaço-temporais da temperatura do ar e precipitação semelhantes entre si, com melhor desempenho nas simulações da temperatura do ar. No entanto, os GCMs do CMIP6 apresentaram menores vieses em relação à geração anterior (Deng et al. 2021; Hamed et al. 2021, 2022; Lun et al. 2021). Especificamente para América do Sul, os estudos existentes também são restritos à temperatura do ar e precipitação (Almazroui et al. 2021; Ortega et al. 2021) e quando analisam um conjunto maior de variáveis climáticas, se limitam às simulações para o período presente (1979-2014) (Baker et al. 2021).

Assim, o objetivo do capítulo I desta tese é analisar e comparar o comportamento das variáveis climáticas evapotranspiração, temperatura do ar, umidade do ar, radiação solar, umidade do solo e precipitação na América do Sul no período presente (PP; 1986-2005) e futuro (PF; 2081-2100), utilizando duas gerações de GCMs (CMIP5 e CMIP6) e cenários forçantes (RCPs e SSPs). Além disso, o capítulo I desta tese quantifica as incertezas quanto ao uso de diferentes gerações de GCMs e cenários de emissões, a fim de indicar as regiões da América do Sul cujas projeções de mudanças apresentem maior ou menor confiabilidade.

## **1.2. DADOS E METODOLOGIA**

### **1.2.1. Dados e modelos climáticos**

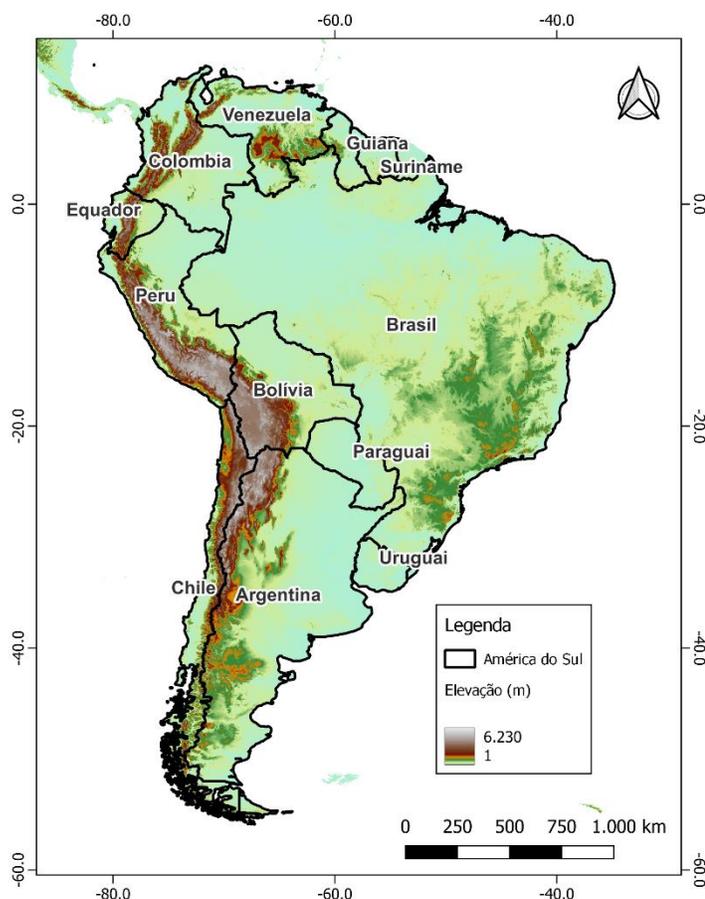
Nessa abordagem, utilizaram-se dados diários de temperatura média do ar média a 2 m da superfície ( $T_{med}$ ; °C), umidade relativa do ar ( $UR$ ; %), radiação solar global ( $R_s$ ; MJ m<sup>-2</sup>), umidade do solo a 10 cm da superfície ( $US$ ; mm) e precipitação ( $P$ ; mm) simulados para o período presente (PP; 1986-2005) e projetados para o período futuro (PF; 2081-2100) de dez GCMs pertencentes ao CMIP5 e CMIP6 (Tabela 1.1), disponibilizados no portal de dados *Earth System Grid Federation* (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/esgf-llnl/>), abrangendo todo domínio

continental da América do Sul (Figura 1.1). A escolha do PP de 1986-2005 foi utilizada por representar um período mais recente e comum ao CMIP5 e CMIP6, e o PF de 2081-2100 teve como base o intervalo adotado pelo IPCC (IPCC 2022).

**Tabela 1.1.** Lista dos modelos CMIP5 e CMIP6 utilizados neste estudo, com resoluções horizontais aproximadas (graus de latitude x longitude).

CMIP5		CMIP6	
Modelo	Resolução	Modelo	Resolução
CanESM2	2,8° x 2,8°	ACCESS-CM2	1,2° x 1,9°
CNRM-CM5	1,4° x 1,4°	INM-CM4-8	1,5° x 2,0°
CSIRO-Mk3-6-0	1,9° x 1,8°	INM-CM5-0	1,5° x 2,0°
HadGEM2-CC	1,9° x 1,2°	IPSL-CM6A-LR	1,3° x 2,5°
HadGEM2-ES	1,9° x 1,2°	MIROC6	1,4° x 1,4°
MIROC5	1,4° x 1,4°	MPI-ESM1-2-HR	0,9° x 0,9°
MIROC-ESM	2,8° x 2,8°	MPI-ESM1-2-LR	1,9° x 1,9°
MIROC-ESM-CHEM	2,8° x 2,8°	MRI-ESM2-0	1,1° x 1,1°
MRI-CGCM3	1,1° x 1,1°	NorESM2-LM	1,9° x 2,5°
NorESM1-M	2,5° x 1,9°	NorESM2-MM	0,9° x 1,2°

O subconjunto de modelos do CMIP5 e CMIP6 (Tabela 1.1) foi escolhido devido à disponibilidade simultânea de dados diários para todas as variáveis e cenários analisados. Para fins de intercomparação e análise do desempenho, os GCMs foram interpolados para uma grade regular comum de 0,25° de latitude x longitude, usando o método de interpolação bilinear (Schowengerdt 2007; Li et al. 2019). Essa técnica é comumente utilizada pois tem o benefício de manter o sinal das variáveis (Mishra et al. 2020; Das et al. 2022; Reboita et al. 2022).



**Figura 1.1.** Topografia e localização geográfica dos países pertencentes à América do Sul.

Os GCMs do CMIP5 e CMIP6 não disponibilizam dados diários de evapotranspiração ( $ET$ ; mm). Por esse motivo, foi utilizado o método de Turc para estimar a  $ET$  (Equação 1), devido ao excelente desempenho para o período presente em grande parte da região de estudo (Figura 1.1), conforme avaliado por Monteiro et al. (2021).

$$ET = (0.3107 R_s + 0.65) \frac{T_{med} a_t}{T_{med} + 15} \quad (1)$$

em que  $a_t = 1$  quando a umidade relativa do ar ( $UR$ )  $\geq 50\%$  ou  $a_t = 1 + \frac{50 - UR}{70}$  quando  $UR < 50\%$ .

## 1.2.2. Simulações e projeções climáticas

### 1.2.2.1. Simulações climáticas

O desempenho dos GCMs (Tabela 1.1) em simular as variáveis  $ET$ ,  $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $R_s$  e  $US$  para o PP (1986-2005) foi realizado pela comparação com dados diários de reanálise fornecido pelo ERA5 e disponibilizados no portal *Climate Data Store* (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset>). O ERA5 é o banco de dados de reanálise mais recente produzido pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) e fornece uma descrição completa das condições atmosféricas, combinando dados observados e sensoriamento remoto em uma grade regular com resolução horizontal de  $0,25^\circ$  em latitude x longitude (Hersbach et al. 2020; Zhu et al. 2021c). As regiões de relevo complexo, como a Cordilheira dos Andes, ou aquelas com número reduzido de estações meteorológicas, como a região Amazônica, apresentam incertezas no conjunto de dados de reanálise (Cao et al. 2020; Hu; Yuan 2021; Xin et al. 2022). Apesar dessas incertezas, o ERA5 é considerado a representação mais próxima da realidade (Condom et al. 2020; Jiang et al. 2022; Ritchie et al. 2022), sendo utilizado no presente estudo como dado de referência.

Para a variável  $P$  foram utilizados os dados diários do *Climate Prediction Center - Unified Precipitation Project* (CPC) fornecido pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpc.globalprecip.html>). Os dados do CPC apresentam resolução horizontal de  $0,5^\circ$  em latitude x longitude e são submetidos a um controle de qualidade pela comparação com registros históricos, medições de estações, estimativas de radar, satélite e previsões de modelos numéricos (Olmo; Bettolli 2021). O CPC é considerado um conjunto de dados com bom desempenho na simulação da precipitação em relação a outros bancos de dados (Zaninelli et al. 2018; Feron et al. 2019; Llopart et al. 2019; Pan et al. 2019; Ruscica et al. 2021).

Na avaliação do desempenho das variáveis do CMIP5 e CMIP6, todos os dados diários foram interpolados para uma grade regular comum ( $0,25^\circ$  em latitude x longitude) usando o método de interpolação bilinear. O desempenho foi analisado para o PP (1986-2005) pelas estatísticas viés médio (VM), raiz do quadrado médio do erro (RQME) e índice  $c$  (Monteiro; Martins 2019; Monteiro et al. 2021), conforme:

$$VM = \frac{\sum_{i=1}^{nd} (E_i - O_i)}{nd} \quad (2)$$

$$RQME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nd} (E_i - O_i)^2}{nd}} \quad (3)$$

$$c = \left[ \frac{\sum(E_i - \bar{E})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum(E_i - \bar{E})^2 \sum(O_i - \bar{O})^2}} \right] \cdot \left[ 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^{nd} (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{nd} (|E_i - \bar{E}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right) \right] \quad (4)$$

em que  $E_i$  = dados diários de  $ET$ ,  $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $R_s$ ,  $US$  e  $P$  dos dez GCMs do CMIP5 e CMIP6;  $O_i$  = dados diários fornecidos pelo ERA5 ( $ET$ ,  $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $R_s$  e  $US$ ) e CPC ( $P$ );  $nd$  o número de dias da série temporal;  $\bar{E}$  = média dos dados diários dos dez GCMs do CMIP5 e CMIP6; e  $\bar{O}$  = média dos dados diários fornecidos pelo ERA5 e CPC. O critério utilizado para interpretação do índice  $c$  é dado por (Camargo, Sentelhas 1997):  $> 0,85$ : ótimo;  $0,76$  a  $0,85$ : muito bom;  $0,66$  a  $0,75$ : bom;  $0,61$  a  $0,65$ : moderado;  $0,51$  a  $0,60$ : fraco;  $0,41$  a  $0,50$ : muito fraco e  $\leq 0,40$ : péssimo.

### 1.2.2.2. Projeções das mudanças climáticas

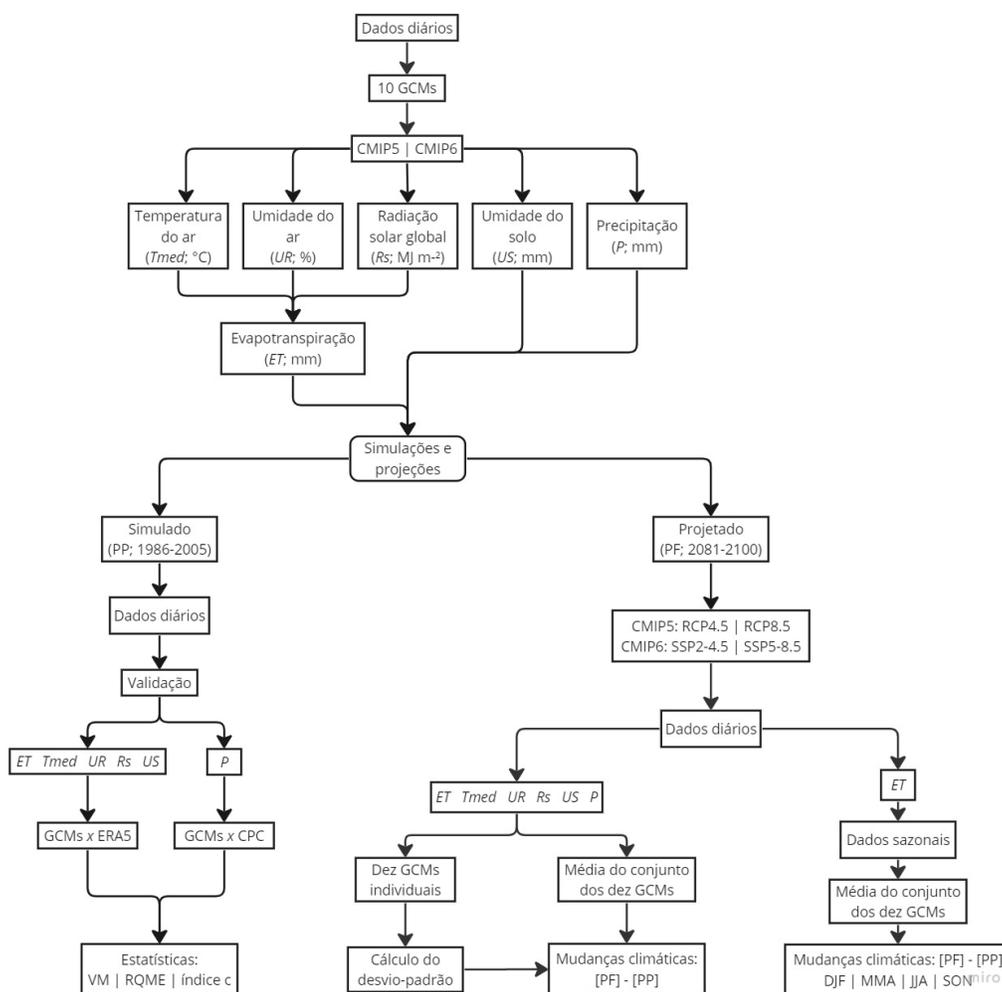
As projeções dos GCMs do CMIP5 para o PF (2081-2100) utilizam cenários de emissão denominados *Representative Concentration Pathways* (RCPs). Neste estudo, foram utilizados os RCPs 4.5 e 8.5, que correspondem às forçantes radiativas no final do século XXI de  $4,5 \text{ W m}^{-2}$  ( $\text{CO}_2$  equivalente  $\approx 650 \text{ ppm}$ ) e  $8,5 \text{ W m}^{-2}$  ( $\text{CO}_2$  equivalente  $\approx 1370 \text{ ppm}$ ), respectivamente, relativo às condições pré-industriais (Moss et al. 2010; Van Vuuren et al. 2011). As projeções dos GCMs do CMIP6 utilizam um novo conjunto de cenários que consistem na combinação de *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs) e RCPs. Ou seja, essa nova estrutura de cenário integra a adaptação, mitigação e vulnerabilidade às forçantes radiativas (Riahi et al. 2017; Almazroui et al. 2021). Neste estudo, foram utilizados os SSPs 2-4.5 e 5-8.5, representando trajetórias de forçamento radiativo intermediário e mais intenso, respectivamente. Estes cenários, apesar de serem distintos, são intercomparáveis com os do CMIP5 por possuírem as mesmas forçantes radiativas no final do século XXI:  $4,5 \text{ W m}^{-2}$  para RCP4.5 e SSP2-4.5, e  $8,5 \text{ W m}^{-2}$  para RCP8.5 e SSP5-8.5 (Riahi et al. 2017; Hagen et al. 2022).

As projeções climáticas das variáveis  $ET$ ,  $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $R_s$ ,  $US$  e  $P$  dos GCMs nos cenários do CMIP5 e CMIP6 foram analisadas com dados diários. Para cada uma dessas variáveis e cenários foram calculadas as mudanças climáticas, obtida pela diferença entre a média climatológica do conjunto dos dez GCMs projetada para o PF e a respectiva média do conjunto dos dez GCMs simulada para o PP, em que os valores positivos representam projeção de aumento no PF e valores negativos representam projeção de redução. A média foi utilizada para minimizar as incertezas nas projeções climáticas (Basu, Sauchyn 2022). Além disso, foi

calculado o desvio-padrão entre as projeções de mudanças pelos dez GCMs (Tabela 1.1) e cenários (RCPs e SSPs), com a finalidade de obter uma medida de confiabilidade com relação a variabilidade modelo a modelo (O'Reilly et al. 2021), e de identificar os pontos de grade onde o sinal da mudança foi semelhante em pelo menos 95 % dos GCMs (dois desvios-padrão) para  $ET$  e  $T_{med}$ , e 66 % dos GCMs (um desvio-padrão) para  $UR$ ,  $R_s$ ,  $US$  e  $P$  (Almazroui et al. 2021).

Os dados diários de  $ET$  dos GCMs nos cenários do CMIP5 e CMIP6 foram convertidos para dados sazonais utilizando o cálculo de mudanças climáticas. As estações foram definidas como verão Austral (DJF; dezembro-janeiro-fevereiro), outono Austral (MAM; março-abril-maio), inverno Austral (JJA; junho-julho-agosto) e primavera Austral (SON; setembro-outubro-novembro). Essa análise avaliou o padrão da climatologia sazonal da  $ET$ , de modo a identificar as regiões e estações que apresentaram maior impacto das mudanças climáticas.

Os passos detalhados para a realização das etapas 1.2.2.1 e 1.2.2.2 podem ser visualizados na Figura 1.2.

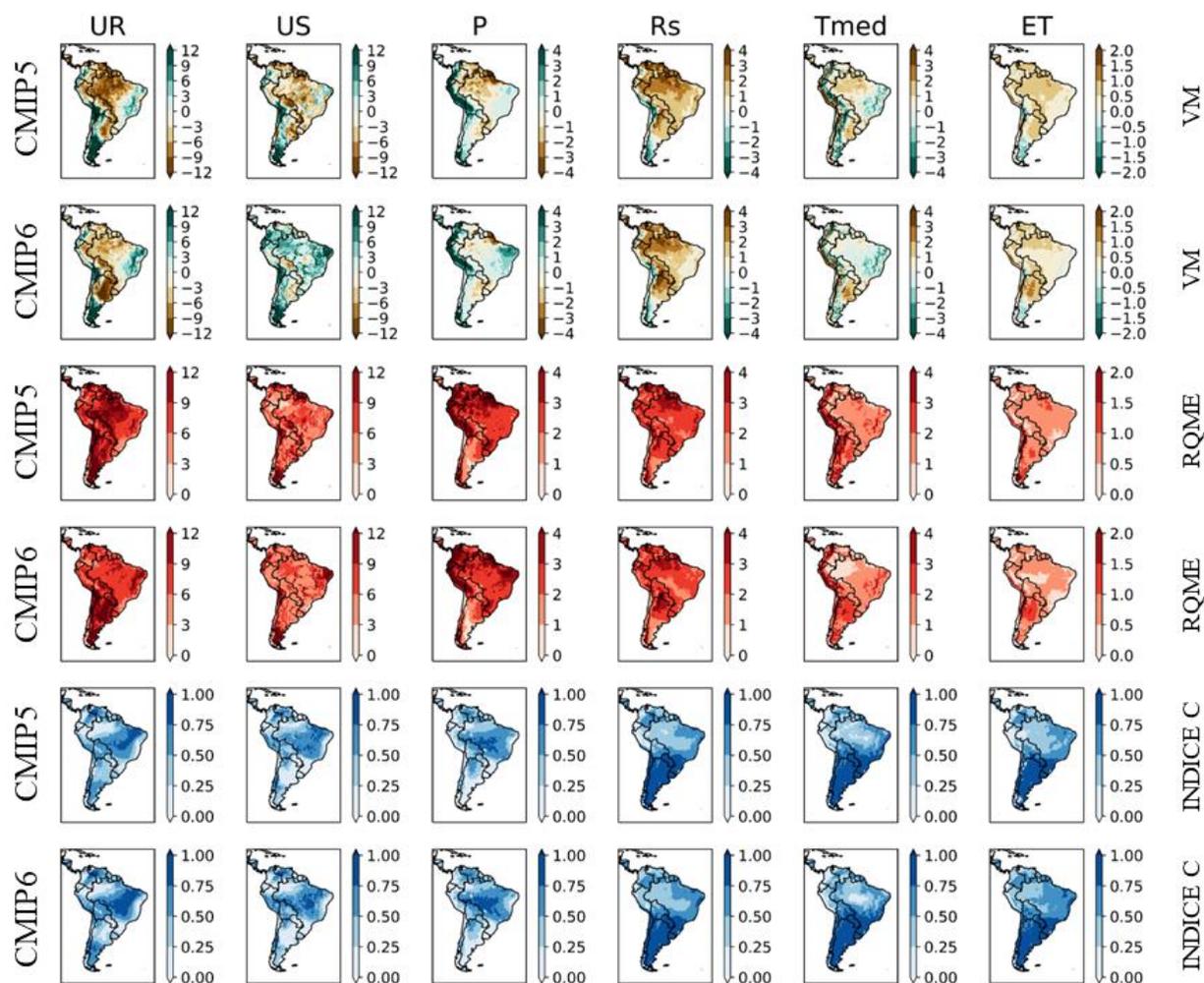


**Figura 1.2.** Fluxograma da metodologia aplicada.

### 1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 1.3.1. Desempenho das simulações dos GCMs (1986-2005)

A Figura 1.3 apresenta a distribuição espacial das estatísticas do desempenho dado pelo VM, RQME e índice  $c$  dos GCMs do CMIP5 e CMIP6 em relação aos dados provenientes do ERA5 ( $ET$ ,  $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $R_s$ ,  $US$ ) e CPC ( $P$ ) para o PP. Ambas as gerações de GCMs apresentaram padrões espaciais similares para todas as variáveis no PP, sendo que a  $ET$  e  $T_{med}$  apresentaram menores magnitudes de VM (entre - 0,5 e 0,5 mm dia<sup>-1</sup>, - 2,0 e 2,0 °C, respectivamente) e RQME (entre 0,5 e 1,0 mm dia<sup>-1</sup>, 1,0 e 2,0 °C, respectivamente) e maiores valores de índice  $c$  (superior a 0,5) em comparação às demais variáveis. De modo geral, o padrão espacial das estatísticas foi semelhante entre os GCMs do CMIP5 e CMIP6, exceto para  $US$ . Nesse caso, os GCMs do CMIP5 subestimaram a  $US$  em praticamente toda porção ocidental da América do Sul (~ 9,0 mm dia<sup>-1</sup>). Em contrapartida, os GCMs do CMIP6 superestimaram a  $US$  em menor magnitude (~ 6,0 mm dia<sup>-1</sup>), exceto no sul da Argentina, norte do Chile e no litoral Nordeste brasileiro (~ 12,0 mm dia<sup>-1</sup>).



**Figura 1.3.** Distribuição espacial das estatísticas do desempenho (VM, RQME e índice  $c$ ) dos modelos de circulação geral (média) provenientes do CMIP5 e CMIP6 para as variáveis diárias de umidade relativa do ar ( $UR$ ; %), umidade do solo a 10 cm da superfície ( $US$ ; mm), precipitação ( $P$ ; mm), radiação solar global ( $R_s$ ;  $\text{MJ m}^{-2}$ ), temperatura média do ar a 2 m da superfície ( $T_{med}$ ;  $^{\circ}\text{C}$ ) e evapotranspiração ( $ET$ ; mm) considerando o período presente (PP; 1986-2005).

Os GCMs do CMIP6 apresentaram melhor desempenho (menor magnitude de VM e RQME, e maior valor de índice  $c$ ) comparado aos GCMs do CMIP5 (Figura 1.3). Por exemplo, considerando a  $UR$ , o CMIP5 apresentou maior erro (VM  $>$  - 9,0 %) na região Norte do Brasil, norte do Peru, sudeste da Colômbia, Venezuela, Guianas e Suriname, enquanto o CMIP6 apresentou menor erro (VM  $>$  - 3,0 %) para as mesmas regiões. Ainda assim, é importante ressaltar que as novas gerações de GCMs (CMIP6) podem estar sujeitas às incertezas também presentes no CMIP5, tal como a dificuldade em representar os processos de interação atmosfera-biosfera (Cook et al. 2020). Além disso, a América do Sul possui topografia complexa (Figura

1.1), que influencia na precisão das simulações, uma vez que as resoluções horizontais dos GCMs não permitem a representação precisa de uma região com relevo complexo, como os Andes (Figura 1.3). Por exemplo, considerando a variável  $T_{med}$ , observou-se menor precisão para a região dos Andes ( $VM > -4,0$  °C e  $RQME > 3,0$  °C), apesar da pequena superioridade do CMIP6. A superioridade dos GCMs do CMIP6 para as variáveis  $T_{med}$  e  $P$ , também foram observadas para outras regiões do mundo, como Austrália (Deng et al. 2021), Egito (Hamed et al. 2021), América Central (Ortega et al. 2021), China (Zhu et al. 2021a) e também na América do Sul (Almazroui et al. 2021; Baker et al. 2021).

Dentre todas as variáveis analisadas em ambas as gerações de GCMs, a  $T_{med}$  apresentou melhor desempenho (Figura 1.3). Os GCMs do CMIP6 reduziram as superestimativas em até 1,0 °C em relação aos GCMs do CMIP5 na região Amazônica, e reduziram as subestimativas em até 1,0 °C no Nordeste do Brasil. Reduções nos erros da  $T_{med}$  simulada pelos GCMs do CMIP6 também foram observadas para a Índia, utilizando a média de quatro GCMs provenientes do CMIP5 e CMIP6 (Gusain et al. 2020); China, considerando 18 GCMs de ambas as gerações de CMIP (Zhu et al. 2021b); e América do Sul, utilizando a média de 38 GCMs do CMIP6 (Almazroui et al. 2021). Portanto, a nova geração do CMIP6 apresentou maior capacidade em reproduzir a  $T_{med}$  e, conseqüentemente, em cenários futuros de mudanças climáticas, com precisão superior às demais variáveis (Lun et al. 2021; Hamed et al. 2022).

Com relação a  $UR$ , ambas as gerações de GCMs superestimaram desde a Colômbia até o sul da Argentina, com maior intensidade na região dos Andes (até 12,0 %) e no Nordeste brasileiro (até 8,0 %) (Figura 1.3). Os GCMs subestimaram a  $UR$ , com menor magnitude no CMIP6 (até 6,0 %) e maior no CMIP5 (até 12,0 %) na região Amazônica, Venezuela, Guianas, Suriname e norte do Peru. Na porção norte da Argentina, os GCMs de ambos os CMIPs subestimaram a  $UR$  em até 12,0 %. O Norte do Brasil, sul da Venezuela, Guianas, Suriname, Chile, Paraguai e Argentina apresentaram os maiores valores de  $RQME$  (~ 9,0 %) e menores valores de índice  $c$  (inferior a 0,5), especialmente para o CMIP5. Apesar do padrão similar de ambas as gerações de GCMs, o CMIP6 apresentou melhor desempenho na representação da  $UR$ .

A variável  $R_s$  apresentou melhor desempenho para o sul do Brasil, Uruguai, Paraguai e Argentina, com  $RQME$  inferior a 2,0 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> e índice  $c$  superior a 0,8 (Figura 1.3). Tanto os GCMs do CMIP5 quanto do CMIP6 apresentaram superestimativa (até 3,0 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>) em praticamente todo o continente Sul-Americano, exceto no Peru, Bolívia e Chile. Além disso,

observou-se maior precisão dos GCMs do CMIP6 na faixa que se estende do Nordeste ao Sudeste brasileiro ( $VM < 1,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) e na região Amazônica ( $VM < 2,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ).

Como mencionado anteriormente, a *US* foi a variável que apresentou maior discrepância entre as duas gerações de CMIP (Figura 1.3). Com predomínio de subestimativas pelos GCMs do CMIP5 em praticamente toda América do Sul ( $\sim 9,0 \text{ mm dia}^{-1}$ ) e predomínio de superestimativas pelos GCMs do CMIP6 ( $\sim 6,0 \text{ mm dia}^{-1}$ ).

Os GCMs do CMIP5 e CMIP6 superestimaram a *P* em toda costa oeste da América do Sul, porção Sudeste e Nordeste do Brasil (até  $3,0 \text{ mm dia}^{-1}$ ) e subestimaram na região Amazônica, Venezuela, Guianas, Suriname, Uruguai, Paraguai e norte da Argentina (até  $2,5 \text{ mm dia}^{-1}$ ), apresentando magnitudes reduzidas para o CMIP6, apesar da imprecisão na Cordilheira dos Andes (Figura 1.3). Além disso, o CMIP6 apresentou superestimativa da *P* na região Nordeste do Brasil ( $VM > 2,0 \text{ mm dia}^{-1}$ ). Os GCMs exibem erros sistemáticos nas magnitudes da *P*, com subestimação na América do Sul tropical e superestimação nos Andes (Almazroui et al. 2021; Dias; Reboita 2021; Ortega et al. 2021), corroborando os resultados apresentados no presente estudo (Figura 1.3). Isso se deve as limitações dos GCMs na simulação de características de circulação de mesoescala associados aos Andes e a gênese de sistemas convectivos de mesoescala no Sudeste da América do Sul (Almazroui et al. 2021). Também apresentam vieses sistemáticos em representar a Zona de Convergência Intertropical (Tian; Dong 2021), devido aos efeitos de nuvens e aerossóis e suas interações (Hwang; Frierson 2013; Zelinka et al. 2020). Além disso, os erros nos GCMs podem estar relacionados ao uso de parametrizações de convecção cumulus (Arias et al. 2021). Os padrões de *P* exibem uma orientação Noroeste-Sudeste sobre o continente Sul-Americano devido à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS; Llopart et al. 2019; Almazroui et al. 2021), que é a principal característica da variabilidade do Sistema de Monção Sul-Americano. A convecção local e o transporte de umidade do Atlântico tropical-subtropical são fatores importantes para a ocorrência da ZCAS (Durán-Quesada et al. 2012; Muñoz et al. 2015). A distribuição da *P* também é influenciada pela topografia, por exemplo os Andes, que são importante fator no mecanismo de transporte de ar quente e úmido dos trópicos para os subtropicais (Ashfaq 2020; Chavez et al. 2020). Resultados similares, em sinal e magnitude, foram observados por Boisier et al. (2015) para a região Amazônica, pela média de 36 GCMs do CMIP5; Barros e Doyle (2018) para América do Sul, utilizando 18 GCMs do CMIP5; Lovino et al. (2018) para Argentina com 27

GCMs do CMIP5; e também foram observados por Torres e Marengo (2014) para América do Sul utilizando GCMs do CMIP3 e CMIP5.

O padrão da variável *ET* demonstrou bom desempenho para os GCMs do CMIP5 e CMIP6, com destaque para o CMIP6 no território brasileiro (Figura 1.3). Ambos CMIPs superestimaram a *ET* em até  $1,5 \text{ mm dia}^{-1}$  na maior parte do continente Sul-Americano, principalmente no norte da Argentina, Paraguai e Norte do Brasil; e subestimaram, em até  $0,5 \text{ mm dia}^{-1}$ , em regiões que se estendem desde o Peru ao sul da Argentina. O resultado de superestimativa na *ET* é similar ao estudo de Wang et al. (2020) realizado para diferentes condições climáticas do globo. No presente estudo foi utilizado o método de Turc, devido ao excelente desempenho para o PP em grande parte da América do Sul (Monteiro et al. 2021), que se baseia na combinação da  $T_{med}$  e  $R_s$ , com penalização da *UR*. Exatamente nos locais com maior superestimativa da  $R_s$  e subestimativa da *UR*, houve maior superestimativa da *ET*, como norte da Argentina e região Amazônica (Figura 1.3).

Ao analisar simultaneamente as três estatísticas (VM, RQME e índice *c*), verificou-se que o conjunto de GCMs do CMIP6 apresentou desempenho superior na representação climática de todas as variáveis *ET*,  $T_{med}$ , *UR*,  $R_s$ , *US* e *P* em relação ao CMIP5 em praticamente toda a América do Sul, com destaque na região Amazônica (Figura 1.3). A limitação das condições climáticas dos GCMs sobre a região Amazônica pode estar relacionada a dificuldade em representar a convecção cumulus, interações biosfera-atmosfera na floresta tropical (Torres; Marengo 2013; Florêncio et al. 2022), além da pouca cobertura de dados provenientes de estações meteorológicas (Condom et al. 2020; Almazroui et al. 2021; Ritchie et al. 2022). Embora vieses ainda sejam observados para a região Amazônica (Figura 1.3), uma melhoria na representatividade dos GCMs para essa região reduz as incertezas nas projeções climáticas futuras (Baker et al. 2021).

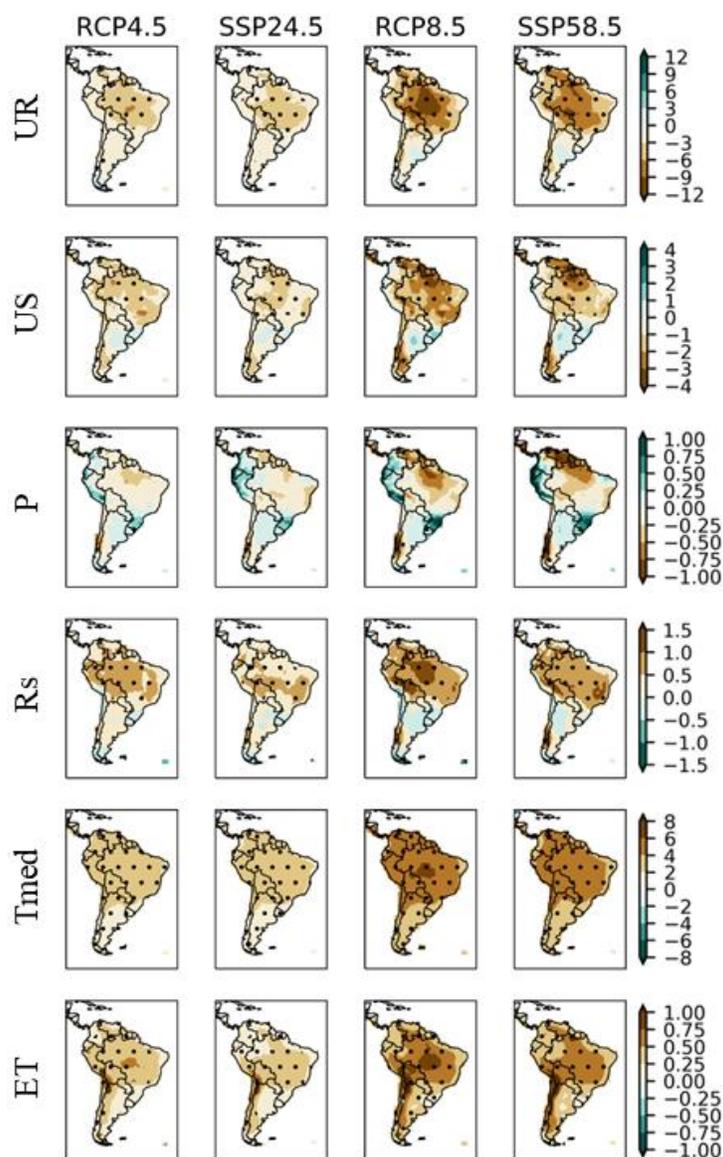
### **1.3.2. Avaliação das projeções de mudanças climáticas na América do Sul: CMIP5 vs. CMIP6**

A Figura 1.4 apresenta a distribuição espacial das mudanças projetadas pela média dos dez GCMs do CMIP5 e CMIP6 para *ET*,  $T_{med}$ , *UR*,  $R_s$ , *US* e *P* em quatro cenários futuros de mudanças climáticas. A média dos GCMs de ambos os CMIPs, tanto no cenário intermediário (RCP4.5 vs. SSP2-4.5) quanto no mais intenso de forçante radiativa (RCP8.5 vs. SSP5-8.5)

projetaram padrões espaciais semelhantes de mudança, em sinal e magnitude, sobre a América do Sul (Figura 1.4). De modo geral, houve um padrão de projeção de aumento das variáveis  $ET$ ,  $T_{med}$  e  $R_s$  e de redução das variáveis  $UR$  e  $US$  para o final do século XXI. Ou seja, exceto no extremo oeste do Peru, Equador e Colômbia, são projetados cenários mais secos, principalmente na zona tropical entre  $5^\circ$  e  $23,5^\circ S$ , concordando com os estudos de Ávila-Díaz et al. (2020b), Ortega et al. (2021), Thaler et al. (2021) e Reboita e Ambrizzi (2022).

O desvio-padrão entre os diferentes GCMs e cenários determinou a confiabilidade com relação a variabilidade inter-modelos dos resultados de mudança (O'Reilly et al. 2021). Observou-se na Figura 1.4 que a concordância dos GCMs para as variáveis  $ET$  e  $T_{med}$ , correspondentes a dois desvios-padrão, projetou aumento em praticamente toda América do Sul, e para a variável  $R_s$ , correspondente a um desvio-padrão, a concordância dos GCMs projetou aumento no território brasileiro. Enquanto que para as variáveis  $UR$  e  $US$ , correspondentes a um desvio-padrão, a concordância dos GCMs projetou redução no território brasileiro. Essa concordância observada entre os GCMs aumenta a confiabilidade das projeções de  $ET$ ,  $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $R_s$  e  $US$  para a América do Sul.

Com relação a variável  $P$  foram observadas projeções heterogêneas, ou seja, sinais positivos (projeção de aumento) até  $1,0 \text{ mm dia}^{-1}$  no Sul do Brasil, Uruguai, norte da Argentina, sul do Paraguai, Peru, Equador e Colômbia; e sinais negativos (projeção de redução) até  $1,0 \text{ mm dia}^{-1}$  no Norte e Nordeste do Brasil, Venezuela, Suriname, Guianas, Bolívia, sul do Chile e da Argentina, principalmente no SSP5-8.5 (Figura 1.4). Esse padrão heterogêneo foi observado nas projeções anteriores do CMIP (Brêda et al. 2020; Parsons 2020; Zhu et al. 2021a; Hamed et al. 2022) e enfatizam o sinal de aumento da  $P$  no Sul do Brasil, Uruguai, porção norte da Argentina, Peru, Equador e sul da Colômbia, e redução no Nordeste brasileiro e na região Amazônica. Porém, é importante salientar que os GCMs não apresentaram concordância na projeção da  $P$ , correspondente a um desvio-padrão, que indicou uma medida de baixa confiabilidade (Figura 1.4). A projeção de redução da  $P$  na região Amazônica aumenta a vulnerabilidade desse ecossistema, devido aos aumentos de episódios de secas, ondas de calor e incêndios florestais, o que interfere no desequilíbrio do sistema terrestre (Almazroui et al. 2021).

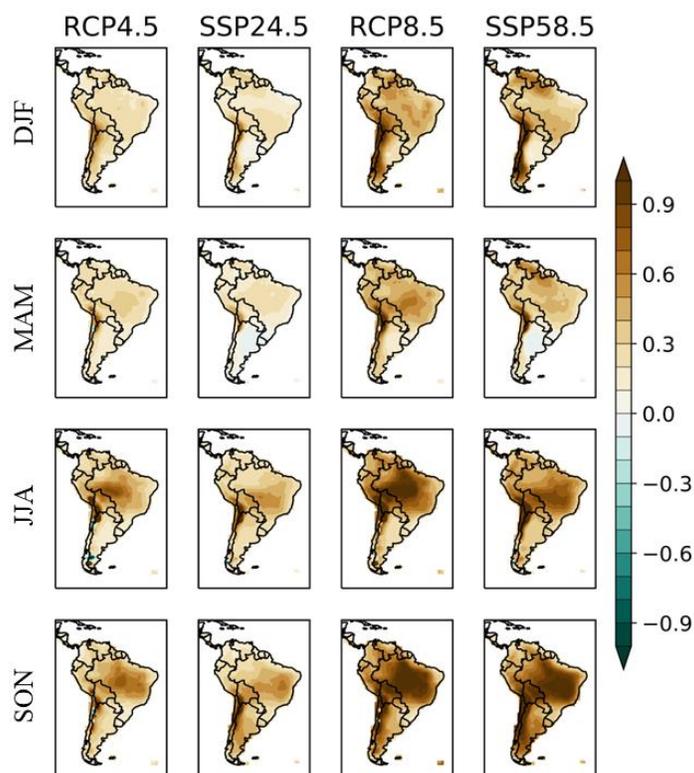


**Figura 1.4.** Distribuição espacial da mudança climática (PF - PP) para as variáveis umidade relativa do ar ( $UR$ ; %), umidade do solo a 10 cm da superfície ( $US$ ; mm), precipitação ( $P$ ; mm), radiação solar global ( $R_s$ ;  $\text{MJ m}^{-2}$ ), temperatura média do ar a 2 m da superfície ( $T_{med}$ ;  $^{\circ}\text{C}$ ) e evapotranspiração ( $ET$ ; mm) provenientes da média dos dez modelos de circulação geral do CMIP5 (RCPs 4.5 e 8.5) e CMIP6 (SSPs 2-4.5 e 5-8.5). O pontilhado representa áreas em que a magnitude da mudança é maior que dois desvios-padrão para  $ET$  e  $T_{med}$ ; e um desvio-padrão para  $UR$ ,  $R_s$ ,  $US$  e  $P$ .

A variável  $ET$  apresentou aumento até  $1,0 \text{ mm dia}^{-1}$  no Chile, noroeste da Argentina, sudoeste da Bolívia e sul do Peru, principalmente nos cenários mais intensos de forçante radiativa (Figura 1.4), corroborando com o estudo de Liu et al. (2020b). Adicionalmente, a América do Sul está sujeita a um aumento na intensidade e frequência de eventos de seca,

principalmente sobre a Amazônia, Nordeste brasileiro, oeste da Bolívia e norte do Chile, tornando essas regiões sensíveis às mudanças climáticas (Cook et al. 2020; Almazroui et al. 2021; Ruscica et al. 2021; Santos et al. 2022). Isso se deve principalmente pelo aumento da  $ET$  ( $\sim 0,75 \text{ mm dia}^{-1}$ ) e redução da  $P$  ( $\sim 0,75 \text{ mm dia}^{-1}$ ) (Pan et al. 2021) que, associado ao aumento de  $R_s$  ( $\sim 1,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) reduz a  $US$  ( $\sim 3,0 \text{ mm dia}^{-1}$ ) (Pietschnig et al. 2019; Liu et al. 2020a). Esse declínio da  $US$  é consistente com as projeções mais intensas de aquecimento sobre o continente Sul-Americano (Byrne, O’Gorman 2018; IPCC 2022). Portanto, as mudanças espaço-temporais na  $ET$  são governadas por mudanças na  $P$  e  $US$ , diretamente influenciadas pela vegetação, que modulam os efeitos diretos do aumento da  $T_{med}$  e redução da  $UR$  (Sehler et al. 2019; Baker et al. 2021; Ruscica et al. 2021; IPCC 2022). O aumento da  $ET$  é acompanhado do aumento da  $T_{med}$  e  $R_s$  (Gomes et al. 2021; Monteiro et al. 2021) e diminuição da  $US$  e  $UR$ , porém a contribuição de cada uma dessas variáveis climáticas nas alterações da  $ET$  deve ser analisada em estudos futuros.

A Figura 1.5 apresenta o padrão sazonal das mudanças projetadas pela média dos dez GCMs do CMIP5 e CMIP6 para a variável  $ET$  nos quatro cenários futuros de mudanças climáticas. De modo geral, houve projeção de aumento da  $ET$  sobre o continente Sul-Americano em ambos os cenários do CMIP5 e CMIP6. Nos cenários intermediários de forçante radiativa (RCP4.5 e SSP2-4.5) a magnitude de aumento da  $ET$  foi menor (entre  $0,2$  e  $0,5 \text{ mm dia}^{-1}$ ) comparado aos cenários mais intensos (RCP8.5 e SSP5-8.5), com valor superior a  $0,4 \text{ mm dia}^{-1}$ .



**Figura 1.5.** Padrão sazonal de mudanças (futuro menos presente) para a evapotranspiração ( $ET$ ; mm) provenientes da média dos dez modelos de circulação geral do CMIP5 (RCPs 4.5 e 8.5) e CMIP6 (SSPs 2-4.5 e 5-8.5).

Analisando as mudanças da  $ET$  em escala sazonal, é possível verificar que no verão Austral (DJF) os GCMs de ambos os CMIPs projetaram aumento na  $ET$  superior a  $0,9 \text{ mm dia}^{-1}$  em toda extensão da Cordilheira dos Andes, no extremo Norte do Brasil, Venezuela, Guianas e Suriname. Para o outono Austral (MAM) os GCMs do CMIP6 projetaram uma redução até  $0,2 \text{ mm dia}^{-1}$  no centro-norte da Argentina, Uruguai e extremo Sul do Brasil. Para o inverno Austral (JJA) o padrão de aumento (superior a  $0,9 \text{ mm dia}^{-1}$ ) de ambos os CMIPs deslocou-se para o norte do Chile, noroeste da Argentina, sul do Peru, Bolívia e Centro-Norte do Brasil. Nessas três estações (DJF, MAM, JJA), os GCMs do CMIP6 apresentaram redução na magnitude da  $ET$  comparado aos GCMs do CMIP5 em toda América do Sul. Para a primavera Austral (SON) os GCMs de ambos CMIPs projetaram aumento na  $ET$ , superior a  $0,9 \text{ mm dia}^{-1}$ , no Chile, Argentina, Bolívia, Peru, norte do Paraguai e quase todo território brasileiro, principalmente nos cenários mais intensos de forçante radiativa.

## 1.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentre as variáveis climáticas analisadas, a umidade do solo apresentou maior discrepância nas simulações para o período presente (1986-2005) entre as duas gerações de CMIP. Para as demais variáveis, em especial a temperatura do ar e a evapotranspiração, a simulação dos GCMs pertencentes ao CMIP5 e CMIP6 apresentaram padrões similares, com melhor desempenho (menor VM e RQME e maior índice  $c$ ) nos GCMs do CMIP6 comparado aos GCMs do CMIP5. Para ambas as gerações de CMIP, os GCMs projetaram aumento na evapotranspiração, temperatura do ar e radiação solar, e redução na umidade do ar e do solo para o final do século XXI (2081-2100), o que indica cenário mais seco na América do Sul, especialmente na zona tropical entre 5° e 23,5 °S. Essas projeções apresentaram concordância entre os GCMs, aumentando a confiabilidade desses resultados. Além disso, projetaram redução na precipitação no Nordeste brasileiro e na região Amazônica, e aumento na precipitação no Sul do Brasil, Uruguai, porção norte da Argentina, Peru, Equador e sul da Colômbia. Para a projeção da precipitação, os GCMs não apresentaram concordância, indicando baixa confiabilidade. O padrão sazonal da evapotranspiração apresentou aumento sobre o continente Sul-Americano, principalmente na primavera Austral. Os GCMs do CMIP6 podem estar sujeitos às incertezas também presentes no CMIP5, evidenciadas na dificuldade em representar os processos de interação biosfera-atmosfera em regiões com relevo complexo, como os Andes, e em regiões com disponibilidade limitada de conjuntos de dados observacionais de alta qualidade, como a Amazônia. Ainda assim, há melhoria na representatividade dos GCMs do CMIP6 para a região Amazônica, reduzindo as incertezas nas projeções climáticas futuras.

Este estudo auxilia na avaliação das simulações e das incertezas nas projeções de evapotranspiração, temperatura do ar, umidade do ar, radiação solar, umidade do solo e precipitação para a América do Sul utilizando os GCMs do CMIP5 e CMIP6. Entretanto, a contribuição de cada uma dessas variáveis climáticas nas alterações da evapotranspiração deve ser analisada em estudos futuros.

## 1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen RG, Pereira LS, Raes D *et al.* (1998) Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Almazroui M, Ashfaq M, Islam MN *et al.* (2021) Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America. *Earth Sys Environ* 5:155-183. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6>

Alves AMMR, Martins FB, Reboita MS (2020) Balanço hídrico climatológico para Itajubá-MG: cenário atual e projeções climáticas. *Rev Bras Clim* 26:712-732. <https://doi.org/10.5380/abclima.v26i0.70387>

Arias PA, Ortega G, Villegas LD *et al.* (2021) Colombian climatology in CMIP5/CMIP6 models: persistent biases and improvements. *Rev Fac Ing* 100:75-96. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20210525>

Ashfaq (2020) Topographic controls on the distribution of summer monsoon precipitation over South Asia. *Earth Syst Environ* 4:667-683. <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00196-0>

Ávila-Díaz A, Abrahão G, Justino F *et al.* (2020a) Extreme climate indices in Brazil: evaluation of downscaled earth system models at high horizontal resolution. *Clim Dyn* 54:5065-5088. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05272-9>

Ávila-Díaz A, Benezoli V, Justino F *et al.* (2020b) Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. *Clim Dyn* 55:1403-1426. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05333-z>

Baker JCA, Souza DC, Kubota PY *et al.* (2021) An assessment of land-atmosphere interactions over South America using satellites, reanalysis, and two global climate models. *Am Meteorol Soc* 22:905-922. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0132.1>

Barkhordarian A, Saatchu SS, Behrangi A *et al.* (2019) A recent systematic increase in vapor pressure deficit over tropical South America. *Sci Rep* 9:15331. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51857-8>

Barros VR, Doyle ME (2018) Low-level circulation and precipitation simulated by CMIP5 GCMs over southeastern South America. *Int J Climatol* 38:5476-5490. <https://doi.org/10.1002/joc.5740>

Basu S, Sauchyn DJ (2022) Future changes in the surface water balance over western Canada using CanESM5 (CMIP6) ensemble for the Shared Socioeconomic Pathways 5 scenario. *Water* 14:1-14. <https://doi.org/10.3390/w14050691>

Boisier JP, Ciais P, Ducharne A *et al.* (2015) Projected strengthening of Amazonian dry season by constrained climate model simulations. *Nat Clim Change* 5:656-660. <https://doi.org/10.1038/nclimate2658>

Boysen LR, Brovkin V, Pongratz J *et al.* (2020) Global climate response to idealized deforestation in CMIP6 models. *Biogeosciences* 17:5615-5638. <https://doi.org/10.5194/bg-17-5615-2020>

Brêda JPLF, Paiva RCD, Collischon W *et al.* (2020) Climate change impacts on South America water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. *Clim Change* 159:503-522. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02667-9>

Byrne MP, O’Gorman PA (2018) Trends in continental temperature and humidity directly linked to ocean warming. *Proc Natl Acad Sci* 115:4863-4868. <https://doi.org/10.1073/pnas.1722312115>

- Camargo AP, Sentelhas PC (1997) Performance evaluation of different potential evapotranspiration estimating methods in the state of São Paulo, Brazil. *Rev Bras Agrometeo* 5:89-97.
- Cao B, Gruber S, Zheng DH *et al.* (2020) The ERA5-land soil temperature bias in permafrost regions. *The Cryosphere* 14:2581-2595. <https://doi.org/10.5194/tc-14-2581-2020>
- Chavez SP, Silva Y, Barros AP *et al.* (2020) High-elevation monsoon precipitation processes in the Central Andes of Peru. *J Geophys Res Atmos* 125:e2020JD032947. <https://doi.org/10.1029/2020JD032947>
- Condom T, Martínez R, Pabón JD *et al.* (2020) Climatological and hydrological observations for the South American Andes: In situ stations, satellite, and reanalysis data sets. *Front Earth Sci* 8:92. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00092>
- Cook BI, Mankin JS, Marvel K *et al.* (2020) Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. *Earth's Future* 1-20. <https://doi.org/10.1029/2019EF001461>
- Darela Filho JP, Lapola DM, Torres RR *et al.* (2016) Socio-climatic hotspots in Brazil: how do changes driven by the new set of IPCC climatic projections affect their relevance for policy? *Clim Change* 136:413-425. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1635-z>
- Das S, Datta P, Sharma D *et al.* (2022) Trends in temperature, precipitation, potential evapotranspiration, and water availability across the Teesta River basin under 1.5 and 2 °C temperature rise scenarios of CMIP6. *Atmos* 13:941. <https://doi.org/10.3390/atmos13060941>
- Debortoli NS, Sung CL, Hirota M (2020) Assessing farmers' vulnerability to extreme weather events in the Ararangua River Watershed - Southern Brazil. *Vulnerability Studies in the Americas: Extrem Wea Clim Chang*, pp.125.
- Deng X, Perkins-Kirkpatrick SE, Lewis SC *et al.* (2021) Evaluation of extreme temperatures over Australia in the historical simulations of CMIP5 and CMIP6 models. *Earth's Future* 9:1-23. <https://doi.org/10.1029/2020EF001902>
- Dias CS, Reboita MS (2021) Assessment of CMIP6 simulations over Tropical South America. *Braz J Phys Geogr* 14:1282-1295. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1282-1295>
- Durán-Quesada AM, Reboita MS, Gimeno L (2012) Precipitation in tropical America and the associated sources of moisture: a short review. *Hydro Sci J* 57:612-624. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.673723>
- Duveiller G, Forzieri G, Robertson E *et al.* (2018) Biophysics and vegetation cover change: a process-based evaluation framework for confronting land surface models with satellite observations. *Earth Syst Sci Data* 10:1265-1279. <https://doi.org/10.5194/essd-10-1265-2018>
- Feron S, Cordero RR, Damiani A *et al.* (2019) Observations and projections of heat waver in South America. *Sci Rep* 9:8173. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44614-4>
- Florêncio GWL, Martins FB, Fagundes FFA (2022) Climate change on Eucalyptus plantations and adaptive measures for sustainable forestry development across Brazil. *Ind Crops Prod* 115538:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115538>

Gomes WWE, Leite-Filho AT, Soares-Filho BS (2021) Simulation of the impacts of global climate change on reference evapotranspiration in the Brazilian Amazon basin. *Rev Bras Meteorol* 28:450-470. <http://dx.doi.org/10.5380/rbclima.v28i0.74046>

Gusain A, Ghosh S, Karmakar S (2020) Added value of CMIP6 over CMIP5 models in simulating Indian summer monsoon rainfall. *Atmos Res* 232:104680. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104680>

Hagen I, Huggel C, Ramajo L *et al.* (2022) Climate change-related risks and adaptation potential in Central and South America during the 21<sup>st</sup> century. *Environ Res Lett* 17:033002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5271>

Hamed MM, Nashwan MS, Shahid S *et al.* (2022) Inconsistency in historical simulations and future projections of temperature and rainfall: A comparison of CMIP5 and CMIP6 models over Southeast Asia. *Atmos Res* 265:1-15. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105927>

Hamed MM, Nashwan MS, Shahid S (2021) Inter-comparison of historical simulation and future projections of rainfall and temperature by CMIP5 and CMIP6 GCMs over Egypt. *Int J Climatol*. <https://doi.org/10.1002/joc.7468>

Hersbach H, Bell B, Berrisford P *et al.* (2020) The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc* 146:1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

Hu X, Yuan W (2021) Evaluation of ERA5 precipitation over the eastern periphery of the Tibetan Plateau from the perspective of regional rainfall events. *Int J Climatol* 41:2625-2637. <https://doi.org/10.1002/joc.6980>

Hwang YT, Frierson DMW (2013) Link between the double-Intertropical Convergence Zone problem and cloud biases over the Southern Ocean. *Proc Natl Acad Sci* 110:4935-4940. <https://doi.org/10.1073/pnas.1213302110>

IPCC. Portner HO, Roberts DC, Tignor M *et al.* (eds.) (2022) *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 University Press. In Press.

Jerszurki JM, Souza JLM, Silva LCR (2019) Sensitivity of ASCE-Penman-Monteith reference evapotranspiration under different climate types in Brazil. *Clim Dyn* 53:943-956. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04619-1>

Jiang Y, Yang M, Liu W *et al.* (2022) Eco-hydrological responses to recent droughts in tropical South America. *Environ Res Lett* 17:024037. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac507a>

Li J, Chen B, Zhou J *et al.* (2019) The optimal planning of wind power capacity and energy storage capacity based on the bilinear interpolation theory. In: Yang Q, Yang T, Li W (eds) *Smart power distribution systems.* Academic Press, pp. 411-445.

Lin P, He Z, Du J *et al.* (2018) Impacts of climate change on reference evapotranspiration in the Qilian Mountains of China: historical trends and projected changes. *Int J Climatol* 38:2980-2993. <https://doi.org/10.1002/joc.5477>

Liu L, Gudmundsson L, Hauser M *et al.* (2020a) Soil moisture dominates dryness stress on ecosystem production globally. *Nat Commun* 11:4892. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18631-1>

- Liu X, Li C, Zhao T *et al.* (2020b) Future changes of global potential evapotranspiration simulated from CMIP5 to CMIP6 models. *Atmos Ocean Sci Lett* 13:568-275. <https://doi.org/10.1080/16742834.2020.1824983>
- Llopart M, Reboita MS, Rocha RP (2019) Assessment of multi-model climate projections of water resources over South America CORDEX domain. *Clim Dyn* 54:99-116. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04990-z>
- Lovino MA, Müller OV, Berbery EH *et al.* (2018) Evaluation of CMIP5 retrospective simulations of temperature and precipitation in northeastern Argentina. *Int J Climatol* 38:e1158-e1175. <https://doi.org/10.1002/joc.5441>
- Lun Y, Liu L, Cheng L *et al.* (2021) Assessment of GCM simulation performance for precipitation and temperature from CMIP5 to CMIP6 over the Tibetan Plateau. *Int J Climatol* 41:3994-4018. <https://doi.org/10.1002/joc.7055>
- Lyra GB, Souza JL, Silva ED *et al.* (2016) Soil water stress co-efficient for estimating actual evapotranspiration of maize in northeastern Brazil. *Meteorol Appl* 23:26-34. <https://doi.org/10.1002/met.1516>
- Marrafon VH, Reboita MS (2020) Precipitation features in South America shown by climate indices. *Rev Bras Climatol* 26:663-676. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v26i0.72181>
- Martins FB, Benassi RB, Torres RR *et al.* (2022) Impacts of 1.5°C and 2°C global warming on Eucalyptus plantations in South America. *Sci Total Environ* 825:153820. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153820>
- Mishra V, Bhatia U, Tiwari AD (2020) Bias-corrected climate projections for South Asia from coupled model intercomparison project-6. *Sci Data* 7:338. <http://doi.org/10.1038/s41597-020-00681-1>
- Monteiro AFM, Martins FB, Torres RR *et al.* (2021) Intercomparison and uncertainty assessment of methods for estimating evapotranspiration using a high-resolution gridded weather dataset over Brazil. *Theor Appl Climatol* 146:583-597. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03747-1>
- Monteiro AFM, Martins FB (2019) Global solar radiation models in Minas Gerais, Southeastern Brazil. *Adv Meteorol* 9515430:1-18. <https://doi.org/10.1155/2019/9515430>
- Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA *et al.* (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463:747-756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Muñoz ÁG, Goddard L, Robertson AW *et al.* (2015) Cross-time scale interactions and rainfall extreme events in southeastern South America for the austral summer. Part I: potential predictors. *J Clim* 28:7894-7913. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00693.1>
- Nóia Júnior RS, Fraisse CW, Cerbaro VA *et al.* (2019) Evaluation of the Hargreaves-Samani method for estimating reference evapotranspiration with ground and gridded weather data sources. *Appl Eng Agric* 35:823-835. <https://doi.org/10.13031/aea.13363>
- Olmo ME, Bettolli ML (2021) Extreme daily precipitation in southern South America: statistical characterization and circulation types using observational datasets and regional climate models. *Clim Dyn* 57:895-916. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05748-2>

- O'Reilly CH, Befort DJ, Weisheimer A *et al.* (2021) Projections of northern hemisphere extratropical climate underestimate internal variability and associated uncertainty. *Earth Environ* 2:194. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00268-7>
- Ortega G, Arias PA, Villegas JC *et al.* (2021) Present-day and future climate over Central and South America according to CMIP5/CMIP6 models. *Int J Climatol* 41:6713-6735. <https://doi.org/10.1002/joc.7221>
- Pan N, Wang S, Liu Y *et al.* (2021) Rapid increase of potential evapotranspiration weakens the effect of precipitation on aridity in global drylands. *J Arid Environ* 186:104414. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104414>
- Pan N, Wang S, Liu Y *et al.* (2019) Global surface soil moisture dynamics in 1979-2016 observed from ESA CCI SM dataset. *Water* 11:1-17. <https://doi.org/10.3390/w11050883>
- Parsons LA (2020) Implications of CMIP6 projected drying trends for 21st century Amazonian drought risk. *Earth's Future* 8:1-13. <https://doi.org/10.1029/2020EF001608>
- Pietschnig M, Lambert FH, Saint-Lu M *et al.* (2019) The presence of Africa and limited soil moisture contribute to future drying of South America. *Geophys Res Lett* 46:445-453. <https://doi.org/10.1029/2019GL084441>
- Reboita MS, Ambrizzi T (2022) Climate system in a nutshell: an overview for understanding climate change. *Int J Dev Resear* 12:53365-53378. <https://doi.org/10.37118/ijdr.23731.01.2022>
- Reboita MS, Rocha RSP da, Souza CA de *et al.* (2022) Future projections of extreme precipitation climate indices over South America based on CORDEX-CORE multimodel ensemble. *Atmos* 13:1463. <https://doi.org/10.3390/atmos13091463>
- Riahi K, Van Vuuren DP, Kriegler E *et al.* (2017) The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environ Change* 42:153-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Ritchie PD, Parry I, Clarke JJ *et al.* (2022) Increases in the temperature seasonal cycle indicate long-term drying trends in Amazonia. *Commun Earth Environ.* 3:1-8. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00528-0>
- Ruscica RC, Sorensson AA, Diaz LB *et al.* (2021) Evapotranspiration trends and variability in southeastern South America: the roles of land-cover change and precipitation variability. *Int J Climatol* 2021:1-20. <https://doi.org/10.1002/joc.7350>
- Ruosteenoja K, Markkanen T, Venalainen A *et al.* (2018) Seasonal soil moisture and drought occurrence in Europe in CMIP5 projections for the 21<sup>st</sup> century. *Clim Dyn* 50:1177-1192. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3671-4>
- Santos JCS, Lyra GB, Abreu MC *et al.* (2022) Aridity indices to assess desertification susceptibility: a methodological approach using gridded climate data and cartographic modelling. *Nat Hazards* 111:2531-2558. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05147-0>
- Schowengerdt RA (2007) Chapter 7 - correction and calibration. In: Schiwengerdt RA (ed) *Remote sensing*, 3<sup>rd</sup> edn. Academic Press, San Diego, pp 285-354.

- Sehler R, Li J, Reager JT *et al.* (2019) Investigating relationship between soil moisture and precipitation globally using remote sensing observations. *J Contemp Water Resear Educ* 168:106-118. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2019.03324.x>
- Silveira CS, Souza-Filho FA, Vasconcelos-Júnior FC (2017) Streamflow projections for the Brazilian hydropower sector from RCP scenarios. *J Water Clim Chang* 8:114-126. <https://doi.org/10.2166/wcc.2016.052>
- Song YH, Chung ES, Shahid S (2022) Uncertainties in evapotranspiration projections associated with estimation methods and CMIP6 GCMs for South Korea. *Sci Total Environ* 825:153953. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153953>
- Song YH, Shahid S, Chung ES (2021) Differences in multi-model ensembles of CMIP5 and CMIP6 projections for future droughts in South Korea. *Int J Climatol*. <https://doi.org/10.1002/joc.7386>
- Thaler V, Loikith PC, Mechoso CR *et al.* (2021) A multivariate assessment of climate change projections over South America using the fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project. *Int J Climatol* 41:4265-4282. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.7072>
- Tian B, Dong X (2020) The double - ITCZ bias in CMIP3, CMIP5 and CMIP6 models based on annual mean precipitation. *Geophys Res Lett* 47:e2020GL087232. <https://doi.org/10.1029/2020GL087232>
- Torres RR, Benassi RB, Martins FB *et al.* (2021) Projected impacts of 1.5 and 2 °C global warming on temperature and precipitation patterns in South America. *Int J Climatol* 42:1597-1611. <https://doi.org/10.1002/joc.7322>
- Torres RR, Marengo JA (2014) Climate change hotspots over South America: from CMIP3 to CMIP5 multi-model datasets. *Theor Appl Climatol* 117:579-587. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-1030-x>
- Torres RR, Marengo JA (2013) Uncertainty assessment of climate change projections over South America. *Theor Appl Climatol* 112:253-272. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0718-7>
- Van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M *et al.* (2011) The representative concentration pathways: an overview. *Clim Change* 109:5-31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Vieira RMDSP, Tomasella J, Barbosa AA *et al.* (2021) Desertification risk assessment in Northeast Brazil: current trends and future scenarios. *Land Degr Devel* 32:224-240. <https://doi.org/10.1002/ldr.3681>
- Vuille M, Carey M, Huggel C *et al.* (2018) Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes - impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Rev* 176:195-213. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019>
- Wang Z, Zhang C, Ning L *et al.* (2020) Evaluation of global terrestrial evapotranspiration in CMIP6 models. *Theor Appl Climatol* 143:521-531. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03437-4>
- Xin Y, Liu J, Liu X *et al.* (2022) Reduction of uncertainties in surface heat flux over the Tibetan Plateau from ERA-Interim to ERA5. *Int J Climatol* 42:6277-6292. <https://doi.org/10.1002/joc.7589>

Zaninelli PG, Menéndez CG, Falco M *et al.* (2018) Future hydroclimatological changes in South America based on an ensemble of regional climate models. *Clim Dyn* 52:819-830. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4225-0>

Zelinka MD, Myers TA, McCoy DT *et al.* (2020) Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models. *Geophys Res Lett* 47:e2019GL085782. <https://doi.org/10.1029/2019GL085782>

Zhu X, Lee SY, Wen X *et al.* (2021a) Extreme climate changes over three major river basins in China as seen in CMIP5 and CMIP6. *Clim Dyn* 57:1187-1205. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05767-z>

Zhu H, Jiang Z, Li L (2021b) Projection of climate extremes in China, an incremental exercise from CMIP5 to CMIP6. *Sci Bull* 66:2528-2537. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.07.026>

Zhu J, Xie A, Qin X *et al.* (2021c) An assessment of ERA5 reanalysis for Antarctic near-surface air temperature. *Atmosphere* 12:217. <https://doi.org/10.3390/atmos12020217>

Zubieta R, Molina-Carpio J, Laqui W *et al.* (2021) Comparative analysis of climate change impacts on meteorological, hydrological, and agricultural droughts in the Lake Titicaca Basin. *Water* 13:175. <https://doi.org/10.3390/w13020175>

## CAPÍTULO II

### TENDÊNCIA E CONTRIBUIÇÃO DAS VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM A EVAPOTRANSPIRAÇÃO NA AMÉRICA DO SUL: AVALIAÇÃO MULTI-MODELOS CMIP6

#### RESUMO

A América do Sul é uma região vulnerável às mudanças climáticas projetadas para ocorrer até o final do século XXI. Portanto, uma compreensão abrangente acerca dessas mudanças e seus impactos na evapotranspiração auxilia no planejamento de ações efetivas de mitigação e adaptação de diversos setores da sociedade. Assim, o presente estudo analisou as tendências espaço-temporais e a contribuição relativa das variáveis climáticas que influenciam na evapotranspiração na América do Sul. Para isso foi utilizado um conjunto de dados diários de temperatura média do ar a 2 m da superfície ( $T_{med}$ ), umidade relativa do ar ( $UR$ ), radiação solar global ( $R_s$ ), umidade do solo a 10 cm da superfície ( $US$ ) e precipitação ( $P$ ) de dez modelos de circulação geral (GCMs) pertencentes ao *Coupled Model Intercomparison Project 6* (CMIP6) para o período presente (1986-2005) e futuro (2081-2100) no cenário SSP5-8.5. A evapotranspiração diária ( $ET$ ) foi obtida utilizando o método de Turc. Os GCMs projetaram tendência positiva na  $ET$ , em consequência de um efeito integrado e positivo na  $T_{med}$  e  $R_s$ , e negativo na  $UR$ ,  $US$  e  $P$ , coerentes com as projeções que indicam um clima mais seco para o final do século XXI, principalmente na região Amazônica, norte da Bolívia e sul do Peru. Apesar da distribuição espacial da contribuição relativa possuir diferenças nos padrões regionais, de maneira geral, a  $T_{med}$  foi a variável climática que mais contribuiu para a tendência de aumento da  $ET$ , principalmente para o período futuro. Esses resultados auxiliam nos impactos das mudanças climáticas para América do Sul.

#### 2.1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas vêm limitando a capacidade de adaptação do sistema terrestre (Hagen et al. 2022; Li et al. 2022; Zeng et al. 2022) e, ocasionam o aumento da frequência de episódios de secas e de chuvas extremas (Garreaud et al. 2020), modificação de paisagens (Gatti et al. 2021; Ritchie et al. 2022), deterioração do solo (Vieira et al. 2021), derretimento de geleiras (Masiokas et al. 2020), elevação do nível do mar (Duarte et al. 2020), deslizamentos de terras (Hirabayashi et al. 2021), redução na disponibilidade hídrica impactando seus diversos usos (Sun et al. 2020; Ng et al. 2022), em especial no setor agrícola (Basu, Sauchyn 2022; Florêncio et al. 2022; Martins et al. 2022), além de diversos outros impactos socioeconômicos (Zaninelli et al. 2018; Brêda et al. 2020). Portanto, é necessário planejar estratégias sustentáveis

de adaptação aos impactos de mudanças climáticas (Lin et al. 2018; Cook et al. 2020), especialmente em regiões vulneráveis, como a América do Sul (Reboita et al. 2022; Jiang et al. 2022).

Uma vez que eventos extremos têm sido frequentemente registrados na América do Sul (Ortega et al. 2021; Reboita et al. 2022), estudos sobre impactos e vulnerabilidades advindas das mudanças climáticas são cada vez mais necessários para o desenvolvimento de diversos setores socioeconômicos (Guimarães et al. 2016; Lyra et al. 2017; Lin et al. 2018; Ritchie et al. 2022), principalmente no setor agrícola que depende da disponibilidade hídrica (Porfirio et al. 2018; Florêncio et al. 2022; Martins et al. 2022).

A evapotranspiração é uma variável chave na disponibilidade hídrica e no ciclo hidrológico, pois controla a transferência de água para atmosfera (Allen et al. 1998; Lin et al. 2018; Ng et al. 2022), sendo essencial para o dimensionamento, planejamento e manejo de irrigação (Lin et al. 2018; Martins et al. 2022), gerenciamento de recursos hídricos (Ng et al. 2022; Song et al. 2022) e análise dos impactos das mudanças climáticas (Monteiro et al. 2021). De modo geral, a evapotranspiração é influenciada diretamente pela temperatura do ar, radiação solar e velocidade do vento, e indiretamente pela umidade do ar e precipitação (Lin et al. 2018; Gomes et al. 2021; Monteiro et al. 2021). Além disso, pode ser limitada pelas condições de superfície, especialmente pela umidade do solo (Ruosteenoja et al. 2018; Ruscica et al. 2021; Basu, Sauchyn 2022; Jiang et al. 2022). Portanto, é fundamental analisar a contribuição de cada uma dessas variáveis climáticas nas alterações da evapotranspiração e a tendência em cenários de mudanças climáticas (Gomes et al. 2021; Monteiro et al. 2021; Ruscica et al. 2021; Jiang et al. 2022).

A contribuição de variáveis condicionantes de um fenômeno é uma análise quantitativa que demonstra as influências de cada variável climática no aumento e/ou redução da evapotranspiração, ou seja, determina as causas subjacentes às mudanças (Gong et al. 2006; Zheng et al. 2009; Zhao et al. 2020), conforme as regiões (Ning et al. 2016; Liu et al. 2022; Ng et al. 2022). Por exemplo, para as condições climáticas do noroeste da China, a umidade do ar e temperatura máxima do ar apresentaram maiores contribuições na evapotranspiração (Zhao et al. 2020), na Coreia é a temperatura do ar (Nam et al. 2015), no Golfo do México é a precipitação (Liu et al. 2013), enquanto que na bacia da Sibéria é a velocidade do vento e a radiação solar que apresentaram maiores contribuições na alteração da evapotranspiração (Tang; Tang 2021). Para

América do Sul, ainda não foram realizados estudos sobre as variáveis que influenciam a evapotranspiração nas condições atuais e em cenários futuros, considerando os modelos de circulação geral (GCMs) do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6).

O objetivo do capítulo II desta tese é analisar a contribuição das variáveis climáticas: temperatura do ar, umidade do ar, radiação solar, umidade do solo e precipitação, assim como as tendências espaço-temporais na evapotranspiração na América do Sul para o período presente (PP; 1986-2005) e futuro (PF; 2081-2100) utilizando dez GCMs do CMIP6 e cenário forçante SSP5-8.5.

## 2.2. DADOS E METODOLOGIA

### 2.2.1. Simulações e projeções climáticas

Este estudo utilizou simulações e projeções climáticas diárias de um conjunto de dez GCMs (Tabela 1.1) da última geração do CMIP6 para cada ponto de grade sob todo o domínio continental da América do Sul (Figura 1.1). Foram utilizados dados de temperatura média do ar a 2 m da superfície ( $T_{med}$ , °C), umidade relativa do ar ( $UR$ ; %), radiação solar global ( $R_s$ , MJ m<sup>-2</sup>), umidade do solo a 10 cm da superfície ( $US$ ; mm) e precipitação ( $P$ , mm) simulados para o período presente (PP; 1986-2005) e projetados para o período futuro (PF; 2081-2100), disponibilizados no portal de dados *Earth System Grid Federation* (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/esgf-llnl/>).

Como os dados diários de evapotranspiração ( $ET$ ; mm) são limitados nos GCMs do CMIP6, essa variável foi obtida pelo método de Turc (Equação 1), devido ao seu excelente desempenho espaço-temporal em estimar a  $ET$  em grande parte da América do Sul (Monteiro et al. 2021) e outras regiões com características climáticas similares como em regiões subtropicais de monções, regiões temperadas continentais de monção e regiões temperadas continentais da China (Yang et al. 2021), em clima úmido e subtropical da Índia (Vishwakarma et al. 2022) e na Turquia (Gharehbaghi; Kaya 2022).

Foram utilizados dados diários de  $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $R_s$ ,  $US$  e  $P$  provenientes do ERA5, disponibilizado no portal *Climate Data Store* (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset>) para o PP (1986-2005). Os dados do ERA5 possuem grade regular com resolução horizontal de 0,25° em latitude x

longitude (Hersbach et al. 2020; Jiang et al. 2022; Ritchie et al. 2022) e, abrangem todo domínio global (Lin et al. 2018; Das et al. 2022). Todos os dados dos GCMs foram interpolados para uma grade regular comum de 0,25° em latitude x longitude por meio do método de interpolação bilinear (Schowengerdt 2007; Reboita et al. 2021), a fim de realizar intercomparações entre os GCMs do CMIP6 e o produto do ERA5 (Lin et al. 2018).

As projeções climáticas do CMIP6 para o PF (2081-2100) utilizam cenários *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs), que representam emissões futuras de gases de efeito estufa e cenários de mudança no uso da terra (O'Neill et al. 2016; Almazroui et al. 2021; Ritchie et al. 2022), com uma análise integrada à adaptação, mitigação e vulnerabilidade baseada nos *Representative Concentration Pathways* (RCPs) (Riahi et al. 2017; Arias et al. 2021; Hagen et al. 2022). Portanto, considera a forçante radiativa correspondente para o final do século XXI relativo às condições pré-industriais (Moss et al. 2010; Van Vuuren et al. 2011). Neste estudo foi considerado o cenário SSP5-8.5, que corresponde a altos desafios para mitigação e baixos desafios para adaptação, e forçante radiativa de 8,5 W m<sup>-2</sup> (CO<sub>2</sub> equivalente ≈ 1370 ppm) até o final do século XXI.

### 2.2.2. Análise de tendência das variáveis climáticas no período presente e futuro

O teste não paramétrico de Mann-Kendall (Mann 1945; Kendall 1975) tem sido amplamente utilizado para detecção de tendências (Zheng et al. 2009; Li et al. 2022) em séries temporais de variáveis climáticas (Das et al. 2022; Liu et al. 2022; Reboita et al. 2022). Por isso, foi utilizado para detectar a tendência das variáveis *ET*, *T<sub>med</sub>*, *UR*, *R<sub>s</sub>*, *US* e *P* no PP (1986-2005) e PF (2081-2100). Esse método define a estatística de teste *Z* como:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma_s} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma_s} & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

em que:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (6)$$

$$\sigma_s^2 = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i i(i-1)(2i+5)}{18} \quad (7)$$

em que:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x > 0 \\ 0 & \text{se } x = 0 \\ -1 & \text{se } x < 0 \end{cases} \quad (8)$$

em que  $n$  é o número de dias da série temporal;  $x_i$  e  $x_j$  são os valores sequenciais das séries temporais. A tendência é significativa se  $|Z| > Z_{(1-p/2)}$ , onde  $Z_{(1-p/2)}$  é o valor da distribuição normal padrão (Kendall 1975) e quando  $p = 0,05$  e  $Z_{(1-p/2)} = 1,96$  (Zheng et al. 2009; Lin et al. 2018).

A magnitude da tendência,  $\beta$ , ou a inclinação (variação por unidade de tempo) foi estimada usando o método não paramétrico proposto por Sen (1968) e Hirsch et al. (1982):

$$\beta = \text{median} \left( \frac{x_j - x_k}{j - k} \right) \text{ para todo } k < j \quad (9)$$

em que  $1 < k < j < n$ , ou o estimador de inclinação  $\beta$  é a mediana de todas as combinações possíveis para toda a série temporal (Lin et al. 2018). Quando  $\beta > 0$  a série temporal apresenta uma tendência positiva, quando  $\beta < 0$  a série temporal apresenta tendência negativa, e quando  $\beta = 0$  a série temporal não apresenta tendência (Li et al. 2022).

A magnitude e a significância da tendência das variáveis climáticas  $ET$ ,  $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $R_s$ ,  $US$  e  $P$  foram calculadas, com os dados diários, para cada um dos dez GCMs no PP (1986-2005) e no PF (2081-2100) e estão apresentadas no material suplementar (MS1 e MS2, respectivamente).

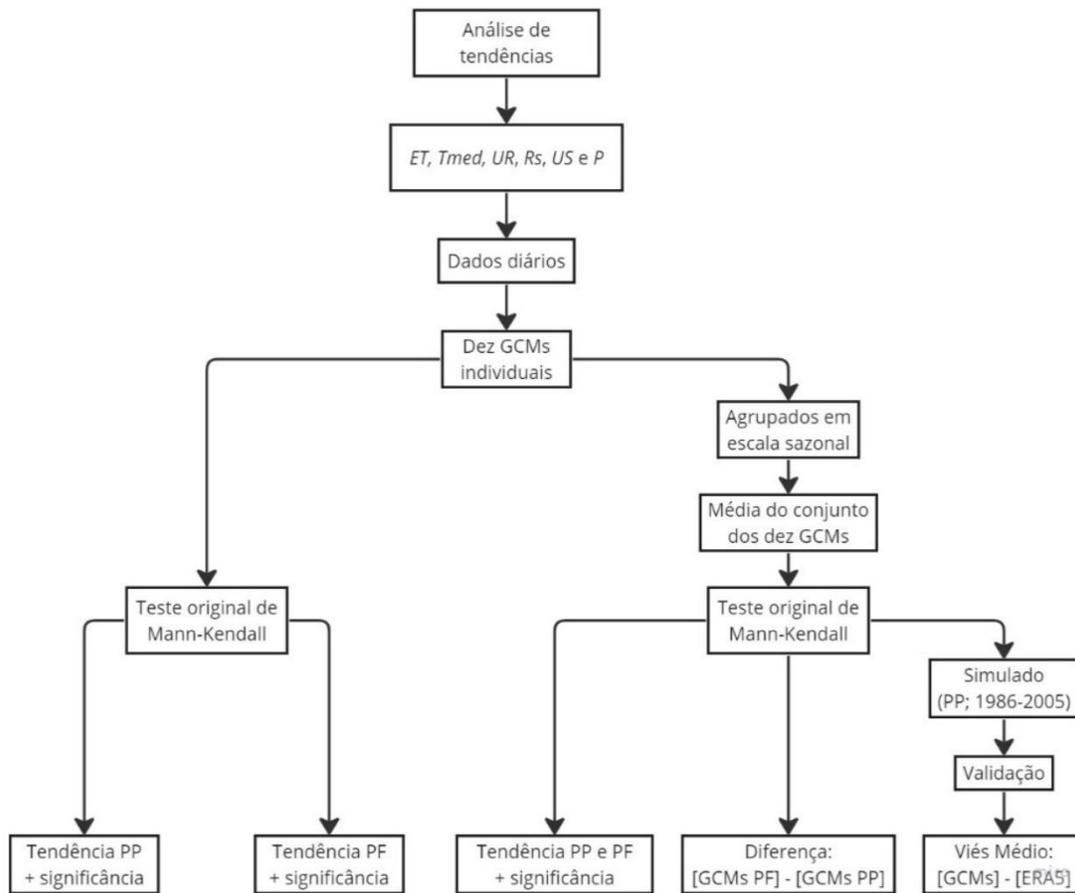
Adicionalmente, os dados diários de cada um dos dez GCMs foram agrupados em escala sazonal. Posteriormente, foi calculada a média dos GCMs para cada período sazonal, verão Austral (DJF; dezembro-janeiro-fevereiro), outono Austral (MAM; março-abril-maio), inverno Austral (JJA; junho-julho-agosto) e primavera Austral (SON; setembro-outubro-novembro). Com isso, a magnitude e significância da tendência foram calculadas para o PP (1986-2005), PF (2081-2100) e a diferença entre eles (PF - PP), para escala sazonal e anual.

Além disso, a análise de tendência foi validada para o PP (1986-2005), também em ambas as escalas, utilizando o viés médio (VM) (Equação 10). Esse procedimento foi realizado para verificar o quanto os GCMs sub/superestimam as variáveis climáticas nas tendências observadas.

$$VM = \frac{\sum_{i=1}^{nd} (E_i - O_i)}{nd} \quad (10)$$

em que  $E_i$  = dados de  $ET$ ,  $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $R_s$ ,  $US$  e  $P$  da média do conjunto dos dez GCMs do CMIP6;  $O_i$  = dados de reanálise fornecidos pelo ERA5;  $nd$  o número de dias da série temporal.

Os passos detalhados para a realização dessa etapa pode ser visualizado na Figura 2.1.



**Figura 2.1.** Etapas metodológicas para a análise de tendência.

### 2.2.3. Avaliação da contribuição no período presente e futuro

Para analisar a influência das variáveis  $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $R_s$ ,  $US$  e  $P$  na  $ET$ , foi utilizado a contribuição relativa (Liu et al. 2022), obtida pela multiplicação entre o coeficiente angular da regressão linear entre a  $ET$  (variável dependente) e  $x_i$  ( $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $R_s$ ,  $US$  e  $P$ , variáveis independentes) e o coeficiente angular da regressão linear entre  $x_i$  no tempo. Assim, a

contribuição relativa que cada variável climática exerce nas alterações da *ET* foi calculada por (Zheng et al. 2009; Ning et al. 2016):

$$C(x_i) = \left( \frac{\partial ET}{\partial x_i} \cdot \frac{dx_i}{dt} \right) \cdot 365 \quad (11)$$

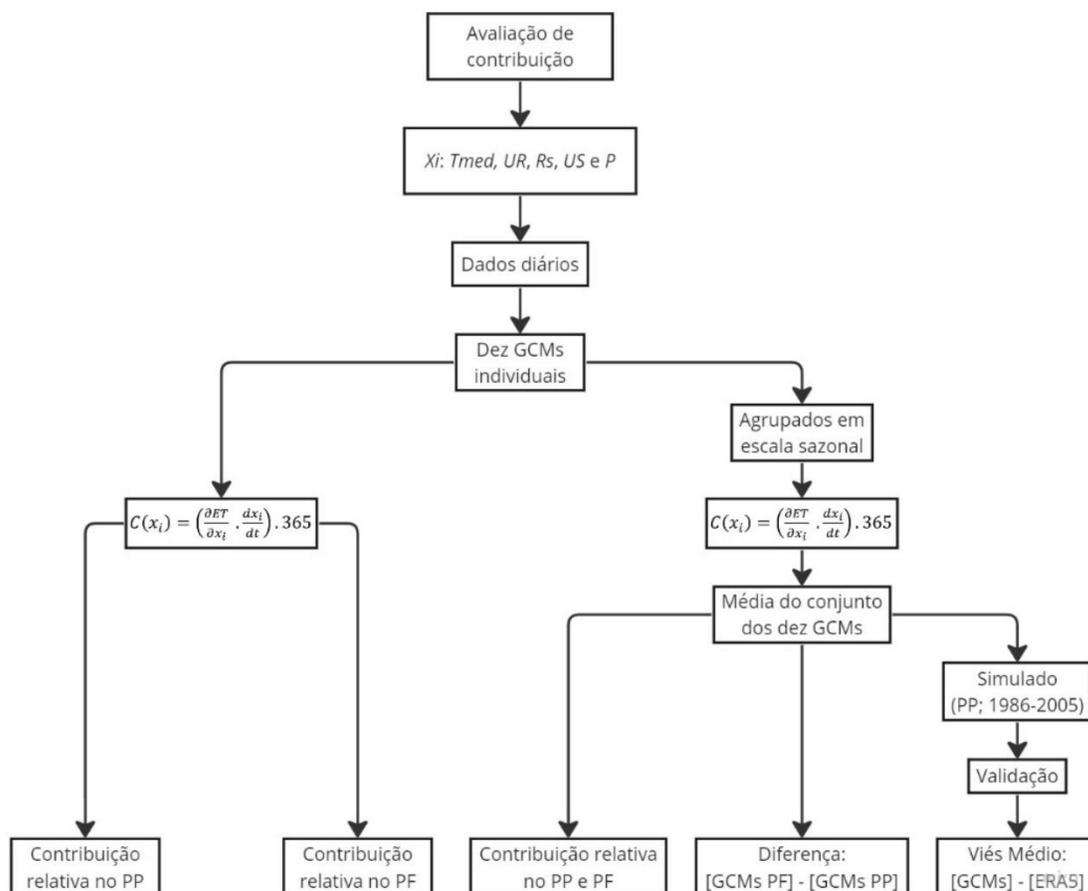
em que  $C(x_i)$  é a contribuição relativa de cada variável climática na *ET* ( $\text{mm ano}^{-1}$ );  $\frac{\partial ET}{\partial x_i}$  é o coeficiente angular da regressão linear entre a *ET* e  $x_i$  ( $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $R_s$ ,  $US$  e  $P$ );  $\frac{dx_i}{dt}$  é o coeficiente angular da regressão linear de  $x_i$  no tempo. O valor = 365 foi utilizado para plotar as contribuições relativas para o acumulado anual.

A contribuição relativa de cada variável climática -  $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $R_s$ ,  $US$  e  $P$  - na *ET* foi calculada com os dados diários para cada um dos dez GCMs no PP (1986-2005) e no PF (2081-2100) e estão apresentadas no material suplementar (MS3 e MS4, respectivamente).

Adicionalmente, os dados diários de cada um dos dez GCMs foram agrupados em escala sazonal e a contribuição relativa das variáveis climáticas foi calculada para os mesmos no PP (1986-2005), PF (2081-2100) e para a diferença entre eles (PF - PP), para escala sazonal e anual. Posteriormente, foi calculada a média da contribuição relativa dos GCMs para cada período sazonal.

Além disso, a contribuição relativa foi validada para o PP (1986-2005), também em ambas as escalas, utilizando o viés médio (VM) (Equação 10). Esse procedimento foi realizado para verificar a magnitude das contribuições relativas dos GCMs comparado ao observado pelo ERA5.

Os passos detalhados para a realização dessa etapa podem ser visualizados na Figura 2.2.



**Figura 2.2.** Etapas metodológicas para a avaliação da contribuição relativa de cada variável ( $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $R_s$ ,  $US$  e  $P$ ) na evapotranspiração.

## 2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 2.3.1. Tendência das variáveis climáticas: período presente e futuro

A Figura 2.3 apresenta a distribuição espacial em escala sazonal e anual do VM das tendências das variáveis climáticas ( $ET$ ,  $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $R_s$ ,  $US$  e  $P$ ) entre a média do conjunto dos dez GCMs do CMIP6 e os dados provenientes do ERA5 para o PP. De maneira geral, os GCMs conseguiram detectar as tendências das variáveis em escala sazonal e anual, com destaque para a  $T_{med}$  e  $P$  que apresentaram menores valores de VM.

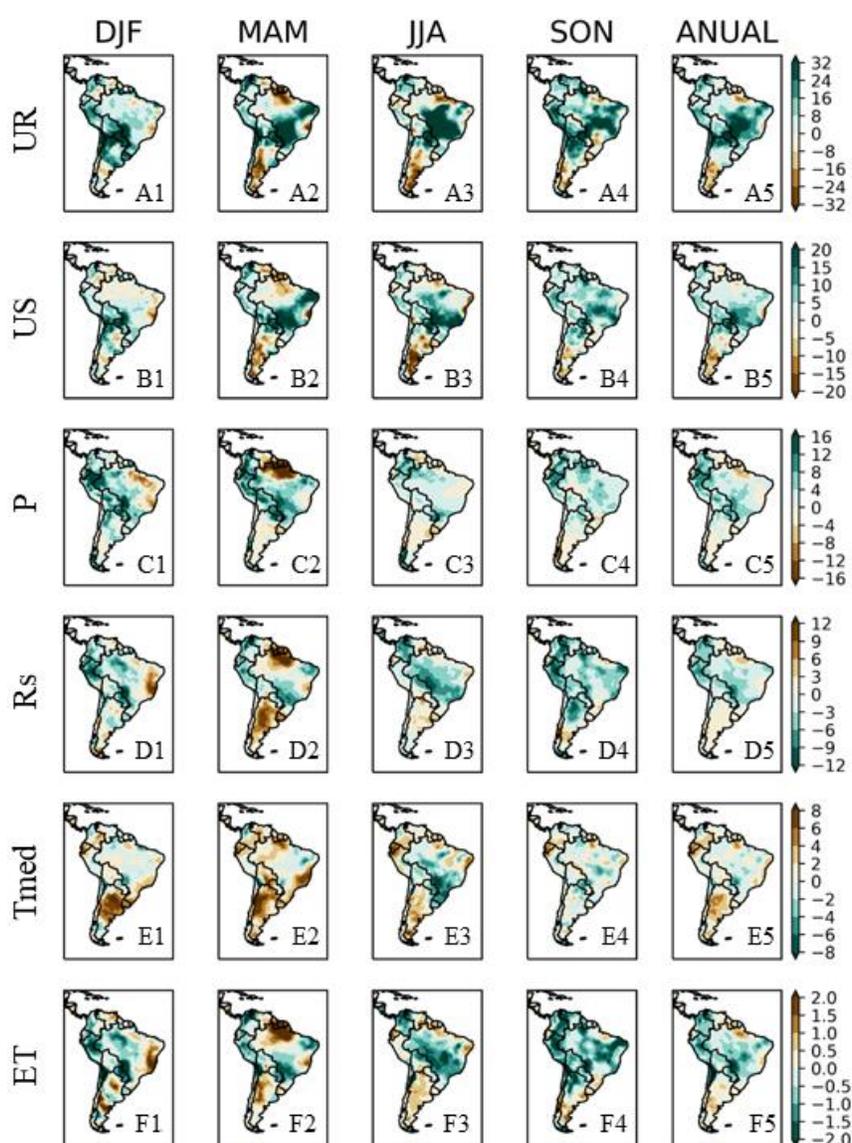
Os GCMs superestimaram a tendência da  $UR$  na escala anual em até 32,0 %, principalmente na região central e porção do Nordeste do Brasil, Paraguai, norte da Argentina e do Chile (Figura 2.3, Painel A5). Esse padrão persistiu nas diferentes estações do ano. Além disso, os GCMs subestimaram a tendência da  $UR$  no outono e inverno Austral (até 24,0 %) no

extremo Norte do Brasil, Guianas, Suriname e centro-sul da Argentina (Figura 2.3, Painéis A2 e A3).

Para a variável *US*, os GCMs apresentaram superestimativa na escala anual (até 20,0 mm dia<sup>-1</sup>) no Centro-Oeste, Sudeste e parte do Nordeste do Brasil, Paraguai, norte da Argentina, Bolívia, região central do Peru e norte da Colômbia (Figura 2.3, Painel B5). Além disso, os GCMs subestimaram a tendência da *US* no outono e inverno Austral em até 15,0 mm dia<sup>-1</sup> na Argentina, Uruguai, extremo Norte e litoral nordestino do Brasil, Suriname, Guianas e porção central da Venezuela (Figura 2.3, Painéis B2 e B3). Superestimativa na tendência da *US* também foi observada por Baker et al. (2021) na região do Cerrado brasileiro nos meses DJF e MAM e para a região Amazônica nos meses JJA e SON. Como ilustrado na Figura 2.3, foi observado um padrão similar entre os GCMs para a tendência das variáveis *UR* e *US*. Ou seja, áreas de maior (menor) VM para *UR* são acompanhadas por maior (menor) VM para *US*. A superestimativa (subestimativa) na *UR* e *US* tem implicações nas projeções climáticas, pois as tendências de umidade (seca) sobre essas áreas podem ser exacerbadas (Baker et al. 2021).

Em escala anual, os GCMs superestimaram a tendência da *P* em até 8,0 mm dia<sup>-1</sup> em praticamente todo território brasileiro, extremo sul do Chile, Paraguai, norte da Argentina, Bolívia, Peru, Equador e Colômbia (Figura 2.3, Painel C5). Em escala sazonal, os GCMs subestimaram a tendência da *P* no outono Austral (superior a 16,0 mm dia<sup>-1</sup>) no extremo Norte do Brasil, Suriname e Guianas (Figura 2.3, Painel C2). Os GCMs subestimaram a tendência da *P* no extremo norte do continente Sul-Americano, na costa leste do Nordeste e Sul do Brasil nos meses JJA (Llopart et al. 2019; Reboita et al. 2021), enquanto que superestimaram no oeste da Colômbia em todas as estações do ano, principalmente em MAM e SON (Arias et al. 2021), corroborando com os resultados deste estudo. Além disso, em todas as estações, os GCMs subestimaram a tendência da *P* no sul do Brasil e superestimaram na Cordilheira dos Andes (Ortega et al. 2021), as limitações dos GCMs nessa última região podem estar relacionadas à representação topográfica e ausência de estações terrestres (Almazroui et al. 2021; Dias; Reboita 2021). Para o inverno e primavera Austral, a tendência da *P* apresentou menores VM em comparação com a tendência da *P* para o verão e outono Austral, corroborando com Ortega et al. (2021). Os padrões de *P* exibem uma orientação que se estende desde a Amazônia Ocidental até o Sudeste do Brasil, que é a principal característica da variabilidade do Sistema de Monções Sul-Americano sobre a América do Sul em sua estação chuvosa (DJF) (Almazroui et al. 2021). Esse

padrão de  $P$  está associado à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS; Llopart et al. 2019), que no presente estudo apresentou maior VM (até  $16,0 \text{ mm dia}^{-1}$ ) na tendência da  $P$  (Figura 2.3, Painel C1). Na porção central do continente e sobre a Cordilheira dos Andes do Peru à Bolívia, os GCMs superestimaram a tendência da  $P$ , enquanto que na região de atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) os GCMs subestimaram a tendência da  $P$  (Llopart et al. 2019), apresentando maiores VM (até  $-16,0 \text{ mm dia}^{-1}$ ). Isso se deve ao fato de que no verão Austral grande parte da  $P$  é decorrente da atividade convectiva, o que é parametrizado pelos GCMs, podendo levar a incertezas que se refletem no VM (Ortega et al. 2021; Oliveira et al. 2023).



**Figura 2.3.** Distribuição espacial (em escala sazonal e anual) do viés médio entre a média dos dez modelos de circulação geral do CMIP6 e os dados provenientes do ERA5 para a tendência das variáveis diárias de umidade relativa do ar ( $UR$ ; %), umidade do solo a 10 cm da superfície ( $US$ ; mm), precipitação ( $P$ ; mm), radiação solar global ( $R_s$ ; MJ m<sup>-2</sup>), temperatura média do ar a 2 m da superfície ( $T_{med}$ ; °C) e evapotranspiração ( $ET$ ; mm) considerando o período presente (PP; 1986-2005).

Na Colômbia, Equador, Peru, norte da Bolívia, Paraguai e em praticamente todo território brasileiro, os GCMs apresentaram subestimativa na tendência da  $R_s$  em escala anual (até 6,0 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>) (Figura 2.3, Painel D5). No extremo Norte do Brasil, Suriname, Guianas, Argentina e Uruguai, os GCMs superestimaram a tendência da  $R_s$  no outono Austral (até 12,0 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>) (Figura 2.3, Painel D2).

A  $T_{med}$  apresentou menor valor de VM na escala anual em relação às escalas anuais das demais variáveis, com subestimativa dos GCMs (até 2,0 °C) na maioria do território brasileiro e superestimativa (até 4,0 °C) no centro-norte da Argentina, Equador, sul da Colômbia e extremo Norte do Brasil (Figura 2.3, Painel E5). Em escala sazonal, os GCMs superestimaram a tendência da  $T_{med}$  no verão e outono Austral (superior a 8,0 °C) na Argentina, Uruguai, litoral sudeste e extremo Norte do Brasil, Equador, sul da Bolívia e norte do Paraguai (Figura 2.3, Painéis E1 e E2). Além disso, os GCMs subestimaram a tendência da  $T_{med}$  no inverno Austral (até 8,0 °C) no Centro-Sul do Brasil, Uruguai, Paraguai e norte da Bolívia (Figura 2.3, Painel E3). Os GCMs superestimaram a tendência da  $T_{med}$  no norte da Argentina, centro do Chile e norte da Cordilheira dos Andes em praticamente todas as estações do ano (Dias; Reboita 2021; Ortega et al. 2021), concordando com a Figura 2.3 (Painéis E1-E3). A tendência da  $T_{med}$  apresentou menores VM para a primavera Austral em relação às demais estações do ano, corroborando com Ortega et al. (2021). Os valores de VM observados na região Amazônica indicam que as parametrizações da cobertura de nuvens são um desafio persistente nos GCMs, o que implica uma subestimação na tendência da  $T_{med}$  sobre essa região (Arias et al. 2021). Além disso, as parametrizações da camada limite variam na representação de fluxos de temperatura e umidade, albedo e turbulência próxima à superfície, impactando na  $T_{med}$  (Ávila-Diaz et al. 2020). Portanto, parametrizações adequadas nos processos de vegetação/solo apresentam limitações, principalmente em um bioma complexo como a floresta Amazônica (Fersch; Kunstmann 2014).

Os GCMs subestimaram a tendência da  $ET$  na escala anual em até 2,0 mm dia<sup>-1</sup> na maior parte do território brasileiro, Paraguai, Bolívia, norte do Chile, Peru, Colômbia e noroeste da

Venezuela (Figura 2.3, Painel F5), o que concorda com os resultados de Wang et al. (2020), principalmente para a região Amazônica e Nordeste do Brasil. Na primavera austral, os GCMs subestimaram a tendência da  $ET$  (superior a  $2,0 \text{ mm dia}^{-1}$ ) na maior parte da região subtropical da América do Sul (Figura 2.3, Painel F4), e superestimaram no outono austral (superior a  $2,0 \text{ mm dia}^{-1}$ ) no extremo Norte do Brasil, Guianas e Suriname (Figura 2.3, Painel F2). Em geral, o padrão dos GCMs para a tendência das variáveis  $R_s$  e  $ET$  apresentaram similaridade, de forma que áreas de menor (maior) VM para  $ET$  são acompanhadas por menor (maior) VM para  $R_s$ .

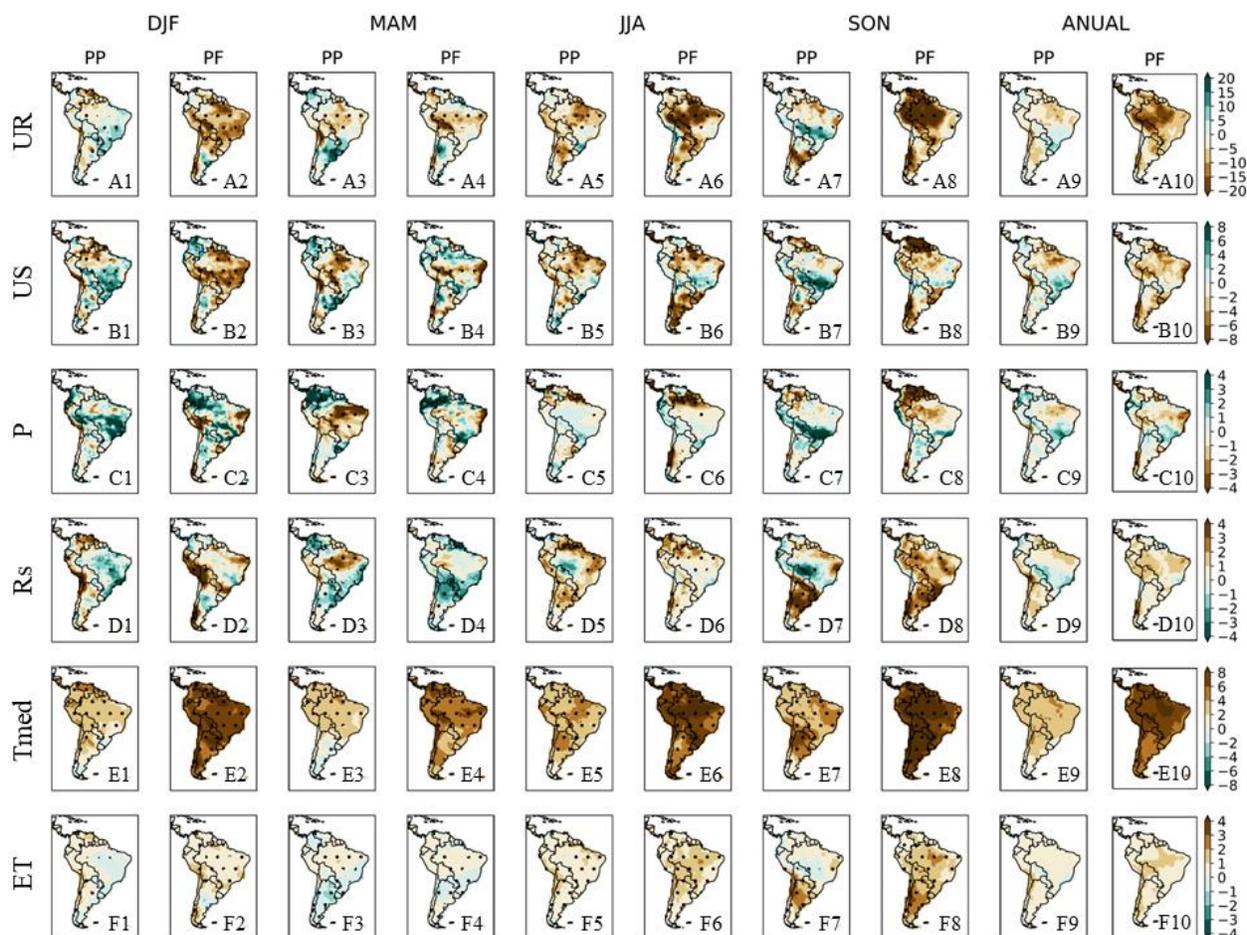
A Figura 2.4 apresenta a distribuição espacial em escala sazonal e anual de tendências significativas ( $p = 0,05$ ) das variáveis climáticas ( $ET$ ,  $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $R_s$ ,  $US$  e  $P$ ), obtidas pela média do conjunto dos dez GCMs do CMIP6 para o PP e PF. De forma geral, a variável  $T_{med}$  apresentou tendência positiva significativa em todas as estações do ano, principalmente no PF, para todo o território Sul-Americano. Além disso, tendências significativas também foram observadas para a  $ET$  principalmente no território brasileiro, e significância não foi observada para a variável  $P$ .

No PP, a  $UR$  apresentou tendência positiva de até 10,0 % em escala anual no Centro-Sul do Brasil, Uruguai, Paraguai, Bolívia, norte da Argentina e Colômbia. Nas demais regiões, foi observada tendência negativa até 10,0 % (Figura 4, Painel A9). Para o PF, projetou-se tendência positiva na  $UR$  até 5,0 % no norte do Chile e noroeste da Argentina, e tendência negativa na  $UR$  até 20,0 % principalmente na região Amazônica, nordeste do Peru, norte da Bolívia e porção central do Chile (Figura 2.4, Painel A10).

A  $US$  apresentou tendência positiva na escala anual para o PP até  $6,0 \text{ mm dia}^{-1}$  na região Centro-Sul do Brasil, Uruguai, Paraguai, Bolívia, Colômbia e parte da Argentina, e tendência negativa até  $8,0 \text{ mm dia}^{-1}$  principalmente no norte do Chile, sudoeste da Bolívia, sul do Peru e parte da região Amazônica (Figura 2.4, Painel B9). Tendência positiva também foi observada por Pan et al. (2019) na porção centro-sul da América do Sul, enquanto tendência negativa foi observada no nordeste do continente. Foi projetada tendência positiva na  $US$  até  $2,0 \text{ mm dia}^{-1}$  para o PF no norte do Chile, sul do Paraguai, parte do sudoeste do território brasileiro, sul da Bolívia, Equador e oeste da Venezuela. Nas demais regiões, os GCMs projetaram tendência negativa na  $US$  até  $8,0 \text{ mm dia}^{-1}$  (Figura 2.4, Painel B10), concordando com os resultados de Berg et al. (2017).

Tendência positiva foi observada na  $P$  na escala anual até  $4,0 \text{ mm dia}^{-1}$  para o PP na região que se estende de noroeste a sudeste da América do Sul e até  $1,0 \text{ mm dia}^{-1}$  na Argentina, e

tendência negativa até  $3,0 \text{ mm dia}^{-1}$  no Centro-Norte do Brasil, norte do Chile, sudoeste da Bolívia e sul do Peru (Figura 2.4, Painel C9). Além disso, tendências negativas na  $P$  no PP também foram observadas por Reboita et al. (2021) na região Amazônica, Centro e Nordeste do Brasil com GCMs do CMIP5. Com exceção da Patagônia, deserto do Atacama no Chile, região árida do litoral do Peru e semiárido do Nordeste brasileiro, a maioria das regiões da América do Sul também apresentou tendência positiva na  $P$  (superior a  $2 \text{ mm dia}^{-1}$ ) (Almazroui et al. 2021). Tendência positiva foi projetada na  $P$  até  $3,0 \text{ mm dia}^{-1}$  para o PF no Centro-Sul do Brasil, Paraguai, norte da Argentina, sul da Bolívia, Equador e sul da Colômbia. Nas demais regiões, tendência negativa foi projetada na  $P$  até  $4,0 \text{ mm dia}^{-1}$ , principalmente no Nordeste brasileiro, região Amazônica e porção central do Chile (Figura 2.4, Painel C10). Projeções de tendência positiva no sudeste da América do Sul e negativa na região Amazônica e sul do Chile são consistentes com Llopart et al. (2019), Ávila-Díaz et al. (2020) e Almazroui et al. (2021). Estudos anteriores associaram a tendência negativa da  $P$  no norte do continente Sul-Americano com o enfraquecimento dos ventos alísios do Nordeste do Brasil (Ambrizzi et al. 2019; Llopart et al. 2019), essa característica leva a uma diminuição no transporte de umidade do oceano para o continente. A explicação física para o padrão heterogêneo da tendência da  $P$  pode estar relacionada as parametrizações físicas utilizadas nos GCMs (Reboita et al. 2021). Além disso, a  $P$  não apresenta resposta linear ao aumento dos gases de efeito estufa como a  $T_{med}$ , pois a  $P$  depende de fatores como a presença de núcleos de condensação na atmosfera para formação de nuvens (Fanourgakis et al. 2019), advecção horizontal de umidade (Llopart et al. 2020) e instabilidade atmosférica (Reboita et al. 2021).



**Figura 2.4.** Distribuição espacial (em escala sazonal e anual) da tendência das variáveis diárias de umidade relativa do ar (UR; %), umidade do solo a 10 cm da superfície (US; mm), precipitação (P; mm), radiação solar global ( $R_s$ ;  $\text{MJ m}^{-2}$ ), temperatura média do ar a 2 m da superfície ( $T_{med}$ ;  $^{\circ}\text{C}$ ) e evapotranspiração (ET; mm), considerando a média dos dez modelos de circulação geral do CMIP6 para o período presente (PP; 1986-2005) e futuro (PF; 2081-2100). Os pontilhados representam áreas de tendência significativa pelo teste de Mann-Kendall ( $p = 0,05$ ).

Em escala anual, a  $R_s$  apresentou tendência positiva em até  $2,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  na Argentina, porção Norte e Nordeste do Brasil, Suriname, Guianas, Venezuela e costa oeste do Peru, sendo superior a  $4,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  no norte do Chile, sul da Bolívia e do Peru para o PP. Do contrário, tendência negativa de  $R_s$  (até  $2,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) foi observada na porção que se estende de noroeste a sudeste da América do Sul (Figura 2.4, Painel D9). Para o PF, os GCMs projetaram tendência positiva de  $R_s$  até  $2,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  nas regiões subtropicais do continente, e superior a  $4,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  na região central do Chile, e tendência negativa até  $1,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  no Sudeste do Brasil, norte e sul do Chile, sul da Argentina, Suriname e Guiana Francesa (Figura 2.4, Painel D10).

Com exceção do Sul do Brasil e da Argentina, tendência positiva da  $T_{med}$  (até 6,0 °C) foi observada para o continente Sul-Americano em escala anual para o PP (Figura 2.4, Painel E9). O mesmo padrão de tendência (em sinal e magnitude) na  $T_{med}$  foi projetado para o PF, em até 6,0 °C na costa leste do Brasil, Uruguai, Argentina, sul do Chile, Equador e costa oeste da Colômbia, sendo maior (8,0 °C) para as demais regiões (Figura 2.4, Painel E10), corroborando com Ávila-Díaz et al. (2020), Ortega et al. (2021) e Reboita et al. (2021).

Os GCMs apresentaram tendência positiva na  $ET$  na escala anual para o PP até 1,0 mm dia<sup>-1</sup> em todo território Sul-Americano, exceto no litoral do Sudeste brasileiro, Bolívia, Paraguai, extremo sul do Chile e extremo norte da Colômbia, que apresentaram tendência negativa até 1,0 mm dia<sup>-1</sup> (Figura 2.4, Painel F9). Na América do Sul, tendência positiva na  $ET$  também foi observada por Wang et al. (2020) para o PP (1980-2014), relatando que o aumento na  $ET$  provavelmente resultará em secas regionais. Tendência positiva foi projetada na  $ET$  até 2,0 mm dia<sup>-1</sup> para o PF em toda América do Sul, principalmente no Chile, Bolívia, sul do Peru e parte da região Amazônica (Figura 2.4, Painel F10). Esse aumento projetado na tendência da  $ET$  é justificado pela projeção de temperaturas elevadas, que permitem que a atmosfera armazene mais vapor d'água, resultando no aumento da  $ET$  (Thaler et al. 2021).

Regiões com tendências positivas e negativas significativas para o PP e PF, em escala sazonal, para as variáveis  $UR$ ,  $US$ ,  $P$ ,  $R_s$ ,  $T_{med}$  e  $ET$  são sintetizadas no Quadro 2.1.

**Quadro 2.1.** Tendências significativas das variáveis diárias de umidade relativa do ar (*UR*; %), umidade do solo a 10 cm da superfície (*US*; mm), precipitação (*P*; mm), radiação solar global (*R<sub>s</sub>*; MJ m<sup>-2</sup>), temperatura média do ar a 2 m da superfície (*T<sub>med</sub>*; °C) e evapotranspiração (*ET*; mm) na América do Sul, em escala sazonal.

		<i>UR</i>		<i>US</i>		<i>P</i>	
		Tendência Positiva	Tendência Negativa	Tendência Positiva	Tendência Negativa	Tendência Positiva	Tendência Negativa
<b>Verão Austral</b>	<b>PP</b>	Até 10,0 % nas regiões Centro-Sul do Brasil, Uruguai e Paraguai	Até 10,0 % na região norte da Argentina, Chile, sul do Peru, oeste da região Amazônica, sul da Colômbia e Venezuela	Até 6,0 mm nas regiões Centro-Sul do Brasil, Paraguai, norte da Bolívia e centro da Argentina	Até 4,0 mm na região Amazônica	Até 4,0 mm no leste do Brasil	<i>ns</i>
	<b>PF</b>	Até 10,0 % na costa leste da Argentina	Até 15,0 % no Brasil, Paraguai, norte da Argentina, Bolívia e Peru	<i>ns</i>	Até 6,0 mm no Brasil, Paraguai e Bolívia	Até 2,0 mm no centro da Argentina	<i>ns</i>
<b>Outono Austral</b>	<b>PP</b>	Até 15,0 % na região norte da Argentina, Uruguai, Paraguai, extremo oeste da Venezuela	Até 10,0 % nas regiões Centro-Norte e Nordeste do Brasil e leste da Bolívia	Até 8,0 mm na região Sul do Brasil, centro-norte da Argentina, Colômbia e norte do Peru	Até 6,0 mm nas regiões Centro-Norte do Brasil	<i>ns</i>	Até 4,0 mm no Centro, Norte e Nordeste do Brasil
	<b>PF</b>	Até 15,0 % no oeste da Argentina	Até 15,0 % na faixa que se estende do extremo oeste ao extremo leste do Brasil e Bolívia	Até 6,0 mm na costa oeste da Argentina	Até 6,0 mm na faixa que se estende de Centro-Oeste a Nordeste do Brasil e norte da Argentina	<i>ns</i>	<i>ns</i>
<b>Inverno Austral</b>	<b>PP</b>	Até 5,0 % no Centro do	Até 10,0 % nas regiões Norte e	Até 6,0 mm no Chile, Sul do	Até 6,0 mm nas regiões Norte e	<i>ns</i>	Até 2,0 mm na região

		Brasil	Nordeste do Brasil, leste da Bolívia e norte da Argentina	Brasil e sul da Argentina	Nordeste do Brasil, leste do Peru e Equador		Nordeste do Brasil e Uruguai
	<b>PF</b>	Até 5,0 % no Centro do Brasil	Até 20,0 % na faixa que se estende do extremo oeste ao extremo leste do Brasil, Bolívia e extremo norte da Argentina	Até 4,0 mm nas regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil	Até 8,0 mm nas regiões Norte e Sul do Brasil e Argentina	<i>ns</i>	Até 4,0 mm na região Norte do Brasil
<b>Primavera Austral</b>	<b>PP</b>	Até 15,0 % no Centro do Brasil e Bolívia	Até 15,0 % na região Nordeste do Brasil, Uruguai e leste da Argentina	Até 8,0 mm nas regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, Paraguai e norte da Argentina	<i>ns</i>	Até 4,0 mm na Bolívia e noroeste da Argentina	<i>ns</i>
	<b>PF</b>	<i>ns</i>	Até 20,0 % na região Amazônica, litoral do Nordeste e parte da região Sul do Brasil, Colômbia, Bolívia e oeste da Argentina	<i>ns</i>	Até 8,0 mm na Colômbia	<i>ns</i>	Até 4,0 mm na Venezuela e centro do Chile
		<b><i>R<sub>s</sub></i></b>		<b><i>T<sub>med</sub></i></b>		<b><i>ET</i></b>	
		<b>Tendência Positiva</b>	<b>Tendência Negativa</b>	<b>Tendência Positiva</b>	<b>Tendência Negativa</b>	<b>Tendência Positiva</b>	<b>Tendência Negativa</b>
<b>Verão Austral</b>	<b>PP</b>	Até 3,0 MJ m <sup>-2</sup> na região norte do Peru	Até 3,0 MJ m <sup>-2</sup> no Centro e Sudeste do Brasil	Até 4,0 °C na maior parte do Brasil, Bolívia, Colômbia, Equador, Peru, norte da Argentina	<i>ns</i>	Até 1,0 mm nas regiões norte da Argentina e porção central do Chile	Até 1,0 mm na região Amazônica

				Até 6,0 °C na Venezuela, Suriname e Guianas			
	<b>PF</b>	Até 4,0 MJ m <sup>-2</sup> no Peru e norte da Bolívia	<i>ns</i>	Até 8,0 °C na América do Sul	<i>ns</i>	Até 2,0 mm no Brasil, Bolívia e sul do Peru	<i>ns</i>
<b>Outono Austral</b>	<b>PP</b>	Até 3,0 MJ m <sup>-2</sup> na região Amazônica	Até 4,0 MJ m <sup>-2</sup> na Colômbia, costa leste do Brasil, Paraguai e Argentina	Até 4,0 °C na maior parte do Brasil, Venezuela, Colômbia, Equador e Peru	Até 2,0 °C na Argentina	Até 1,0 mm na região Centro- Norte do Brasil	Até 2,0 mm nas regiões Nordeste e Sul do Brasil, Argentina, Chile e Paraguai
	<b>PF</b>	<i>ns</i>	Até 4,0 MJ m <sup>-2</sup> no Suriname, Guianas, Sul do Brasil, Paraguai, Argentina, norte do Chile	Até 6,0 °C na maior parte do Brasil, Bolívia, Peru e Equador  Até 8,0 °C na Colômbia e Venezuela	<i>ns</i>	Até 1,0 mm no Centro, Norte e Nordeste do Brasil	Até 1,0 mm na região Sul do Brasil, norte da Argentina e Paraguai
<b>Inverno Austral</b>	<b>PP</b>	Até 4,0 MJ m <sup>-2</sup> no Suriname, Guianas, Venezuela, Nordeste e Sul do Brasil, Peru, norte do Chile e Argentina	Até 3,0 MJ m <sup>-2</sup> na região norte da Bolívia	Até 6,0 °C na América do Sul	<i>ns</i>	Até 2,0 mm no Brasil, sul do Peru, Bolívia, Paraguai e norte da Argentina	<i>ns</i>
	<b>PF</b>	Até 3,0 MJ m <sup>-2</sup> na região sul da Venezuela,	<i>ns</i>	Até 8,0 °C na América do Sul	<i>ns</i>	Até 2,0 mm no Brasil, sul do Peru, Bolívia,	<i>ns</i>

		Norte do Brasil, centro da Argentina e norte do Chile				Paraguai e norte da Argentina	
<b>Primavera Austral</b>	<b>PP</b>	Até 4,0 MJ m <sup>-2</sup> na Argentina, norte do Chile, Sul do Brasil	Até 4,0 MJ m <sup>-2</sup> no Centro do Brasil	Até 6,0 °C na América do Sul	<i>ns</i>	Até 3,0 mm na região Nordeste do Brasil, Argentina e sul do Peru	Até 1,0 mm no Centro do Brasil e norte da Bolívia
	<b>PF</b>	Até 4,0 MJ m <sup>-2</sup> na região norte da Bolívia, Argentina, parte da região Norte, Nordeste e Sul do Brasil	<i>ns</i>	Até 8,0 °C na América do Sul	<i>ns</i>	Até 4,0 mm na América do Sul	<i>ns</i>

*ns* representa tendências não significativas.

Tendência positiva no verão e negativa no inverno para a *US* foram significativas no PP para a maioria das regiões da América do Sul (Figura 2.4, Painéis B1 e B5), concordando com os resultados de Pan et al. (2019), que afirmam que os GCMs simulam padrão úmido na estação chuvosa e padrão seco na estação seca.

A ausência de tendências significativas na *P* observada no presente estudo coincidiu com os resultados obtidos por Ortega et al. (2021). Para DJF, os GCMs projetaram tendência negativa na *P* no sul do Chile, relacionada com uma zona de diminuição da *P* no Pacífico Sul (Ortega et al. 2021) e tendência positiva na Colômbia, Equador, Peru, norte da Argentina, Paraguai, sul da Bolívia e sudeste da América do Sul (Ortega et al. 2021; Reboita et al. 2021; Thaler et al. 2021); esses resultados estão consistentes com a Figura 2.4 (Painel C2). Essa tendência positiva no sudeste do continente está relacionada à ZCAS, que é observada o ano todo, mas atinge intensidade máxima durante DJF quando está conectada a uma área de convecção intensificada sobre a parte central do continente (Garreaud, 2009). No outono Austral, tendência positiva na *P* foi projetada sobre a Colômbia (Figura 2.4, Painel C4), assim como observado por Arias et al. (2021), e tendência negativa foi projetada no leste da América do Sul (Figura 2.4, Painel C4), indicando diminuição na *P*, concordando com os resultados obtidos por Ortega et al. (2021). Os GCMs projetaram tendência negativa na *P* para JJA na maior parte do continente Sul-Americano, com maior intensidade no norte da América do Sul e sul do Chile (Figura 2.4, Painel C6), consistente com os estudos de Llopart et al. (2019), Ortega et al. (2021), Reboita et al. (2021) e Thaler et al. (2021). Na primavera Austral, as projeções indicaram tendência negativa na *P* no norte da América do Sul, região Amazônica e no Nordeste do Brasil (Figura 2.4, Painel C8), assim como nos estudos de Arias et al. (2021), Ortega et al. (2021) e Thaler et al. (2021). Uma redução na tendência da *P*, durante essa estação de transição entre a estação seca (JJA) e chuvosa (DJF), sugere uma estação seca mais longa (Thaler et al. 2021).

Em todas as estações do ano, tendências positivas significativas de  $T_{med}$  foram observadas em praticamente todo continente Sul-Americano, com maiores magnitudes de aquecimento no PF em JJA e SON (Figura 2.4, Painéis E6 e E8), consistentes com Ávila-Diaz et al. (2020), Almazroui et al. (2021), Reboita et al. (2021) e Thaler et al. (2021). Além disso, a região tropical da América do Sul apresentou maiores magnitudes de tendência positiva, enquanto o sul do continente apresentou menores magnitudes de tendência positiva na  $T_{med}$  (Figura 2.4, Painéis E1-E8). Condições mais secas e quentes para o final do século XXI na maior parte da América do Sul, principalmente nos meses de inverno e primavera Austral,

também foram relatadas por Llopart et al. (2019), Ortega et al. (2021), Reboita et al. (2021) e Thaler et al. (2021).

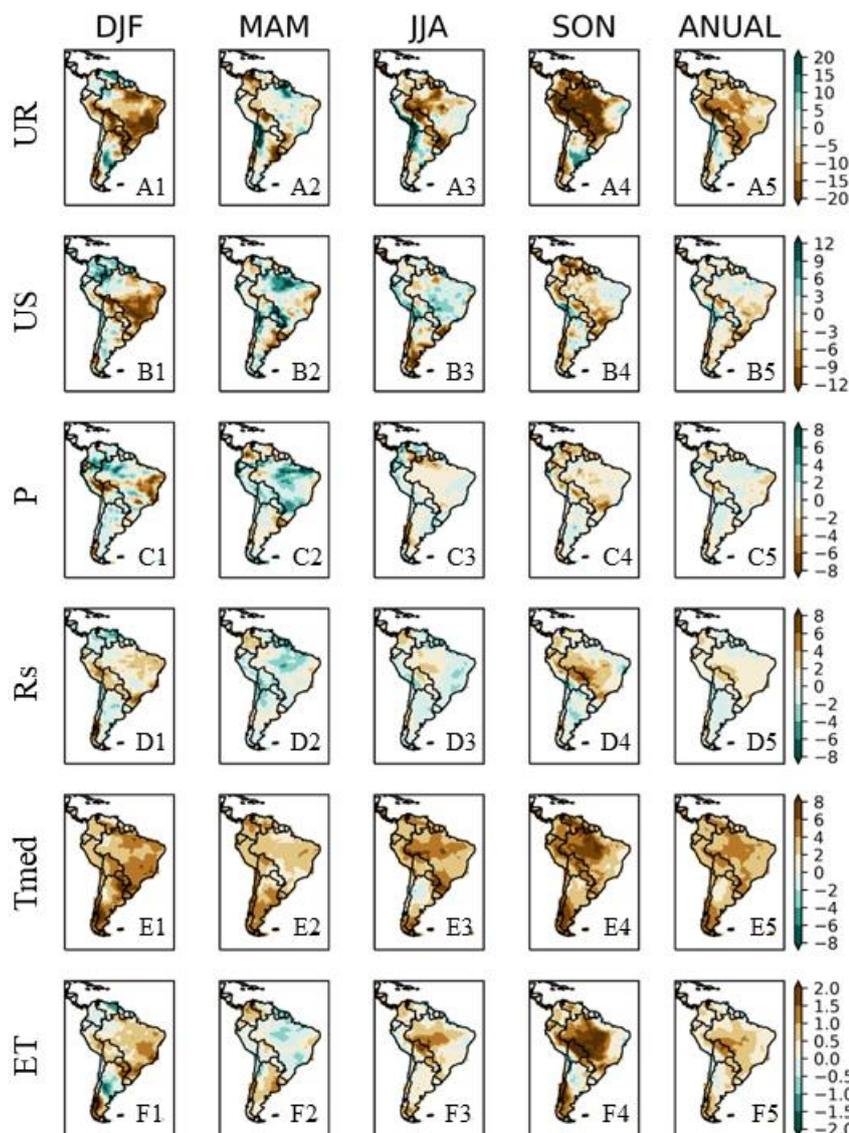
Em grande parte do continente Sul-Americano, os GCMs projetaram tendência positiva na *ET* para todas as estações do ano (Figura 2.4, Painéis F1-F8), corroborando com Thaler et al. (2021). Além disso, considerando o PP para a região Amazônica, foi observado tendência negativa na *ET* nos meses DJF e positiva nos meses JJA (Figura 2.4, Painéis F1 e F5), similar aos resultados obtidos por Gomes et al. (2021).

De modo geral, as maiores magnitudes de tendências positivas de *UR*, *US* e *P* caracterizam regiões úmidas (Ruscica et al. 2021), como exemplo as regiões Sudeste e Sul do Brasil, principalmente na primavera Austral para o PP de  $\sim 15,0\%$ ,  $\sim 8,0 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $\sim 4,0 \text{ mm dia}^{-1}$ , respectivamente (Figura 2.4, Painéis A7, B7 e C7), e regiões do extremo norte do continente Sul-Americano, principalmente no outono Austral com valores  $\sim 10,0\%$ ,  $\sim 6,0 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $\sim 4,0 \text{ mm dia}^{-1}$  no PP, respectivamente (Figura 2.4, Painéis A3, B3 e C3), corroborando com Reboita et al. (2021; 2022). Em contrapartida, as maiores magnitudes de tendências negativas de *UR*, *US* e *P* caracterizam regiões secas (Ukkola et al. 2020; Parsons 2020; Parry et al. 2022), como por exemplo, as projeções para a região Amazônica, principalmente no inverno e primavera Austral de  $\sim 20,0\%$ ,  $\sim 8,0 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $\sim 4,0 \text{ mm dia}^{-1}$ , respectivamente (Figura 2.4, Painéis A6, B6, C6, A8, B8 e C8). As projeções sobre a Amazônia indicam que a tendência negativa está associada ao enfraquecimento dos ventos Alísios no Nordeste do Brasil, o que diminui o transporte de umidade do oceano para o continente (Reboita et al. 2021). As condições secas sobre a Amazônia podem influenciar o clima de outras regiões que recebem a umidade tropical transportada pelos Jatos de Baixos Níveis a leste dos Andes, como as tendências negativas projetadas na *UR* ( $\sim 10,0\%$ ) e *US* ( $\sim 4,0 \text{ mm dia}^{-1}$ ) sobre o Sudeste do Brasil.

Resumindo, os GCMs projetaram tendência positiva na *ET* até  $2,0 \text{ mm dia}^{-1}$ , principalmente sobre a região Amazônica, norte da Bolívia e sul do Peru. Essa projeção foi acompanhada de um efeito integrado de tendência positiva de  $T_{med}$  ( $\sim 8,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) e  $R_s$  ( $\sim 2,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) e tendência negativa de *UR* ( $\sim 20,0\%$ ), *US* ( $\sim 6,0 \text{ mm dia}^{-1}$ ) e *P* ( $\sim 2,0 \text{ mm dia}^{-1}$ ). Esses resultados estão consistentes com a literatura (Pan et al. 2021; Ruscica et al. 2021; IPCC 2022), em que a tendência positiva de  $T_{med}$  e  $R_s$  favorecem o decréscimo da *UR*, que juntos contribuem para o aumento da *ET* (Jerszurki et al. 2019; Gomes et al. 2021). Em contrapartida, quanto maior quantidade de água é transferida para a atmosfera pela *ET*, maior é a redução da *US* (Basu, Sauchyn 2022). Essa redução é mais intensificada pela redução da *P*

(Wang et al. 2022) e ao aumento do fluxo de calor sensível, o qual favorece tendência positiva da  $T_{med}$  (Ruosteenoja et al. 2018).

A Figura 2.5 apresenta a distribuição espacial em escala sazonal e anual da diferença (PF - PP) das tendências das variáveis climáticas ( $ET$ ,  $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $R_s$ ,  $US$  e  $P$ ), considerando a média do conjunto dos dez GCMs do CMIP6.



**Figura 2.5.** Distribuição espacial (em escala sazonal e anual) da diferença (PF - PP) da tendência das variáveis diárias de umidade relativa do ar ( $UR$ ; %), umidade do solo a 10 cm da superfície ( $US$ ; mm), precipitação ( $P$ ; mm), radiação solar global ( $R_s$ ;  $\text{MJ m}^{-2}$ ), temperatura média do ar a 2 m da superfície ( $T_{med}$ ;  $^{\circ}\text{C}$ ) e evapotranspiração ( $ET$ ; mm), considerando a média dos dez modelos de circulação geral do CMIP6.

Em escala anual, projeções de tendências negativas para a  $UR$  foram observadas em praticamente toda América do Sul (Figura 2.5, Painel A5), para a  $US$  no Nordeste e Centro-Sul do Brasil, Uruguai, Argentina, centro-sul do Chile, norte do Paraguai, norte da Bolívia, centro-norte do Peru, Colômbia, Equador, Venezuela e Guiana (Figura 2.5, Painel B5), e para

$P$  no Nordeste e Sudeste do Brasil, costa leste da Argentina, Uruguai, norte do Paraguai e da Bolívia, sul do Peru, Equador, Colômbia, Venezuela e Guiana (Figura 2.5, Painel C5). Em contrapartida, projeções de tendências positivas de  $R_s$  foram observadas na faixa que se estende do noroeste da América do Sul até a costa leste do Brasil (Figura 2.5, Painel D5), para a  $T_{med}$  em todo continente (Figura 2.5, Painel E5) e para  $ET$  em praticamente toda América do Sul (Figura 2.5, Painel F5), corroborando com a Figura 4.

Considerando as regiões com tendências significativas (Figura 2.4), os GCMs projetaram tendência de aumento, ou seja, as diferenças entre o PF e PP estão se tornando maiores para a  $US$  (até  $6,0 \text{ mm dia}^{-1}$ ) no noroeste do Brasil no verão Austral (Figura 2.5, Painel B1), na  $R_s$  (até  $4,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) para a região Amazônica no inverno Austral (Figura 2.5, Painel D3), na  $T_{med}$  (até  $8,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) e na  $ET$  (até  $2,0 \text{ mm dia}^{-1}$ ) para a região Amazônica na primavera Austral (Figura 2.5, Painéis E4 e F4). Em contrapartida, os GCMs projetaram tendência de redução, ou seja, diferenças (PF - PP) negativas na  $UR$  (20,0 %) para a região Amazônica na primavera Austral (Figura 2.5, Painel A4), na  $US$  (até  $12,0 \text{ mm dia}^{-1}$ ) para quase todo território brasileiro no verão Austral (Figura 2.5, Painel B1), na  $R_s$  (até  $4,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) para o Nordeste do Brasil no inverno Austral (Figura 2.5, Painel D3), na  $T_{med}$  (até  $2,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) no norte da Argentina no inverno Austral (Figura 2.5, Painel E3) e na  $ET$  (até  $1,0 \text{ mm dia}^{-1}$ ) para a região Amazônica no outono Austral (Figura 2.5, Painel F2).

### **2.3.2. Contribuição das variáveis climáticas na evapotranspiração: período presente e futuro**

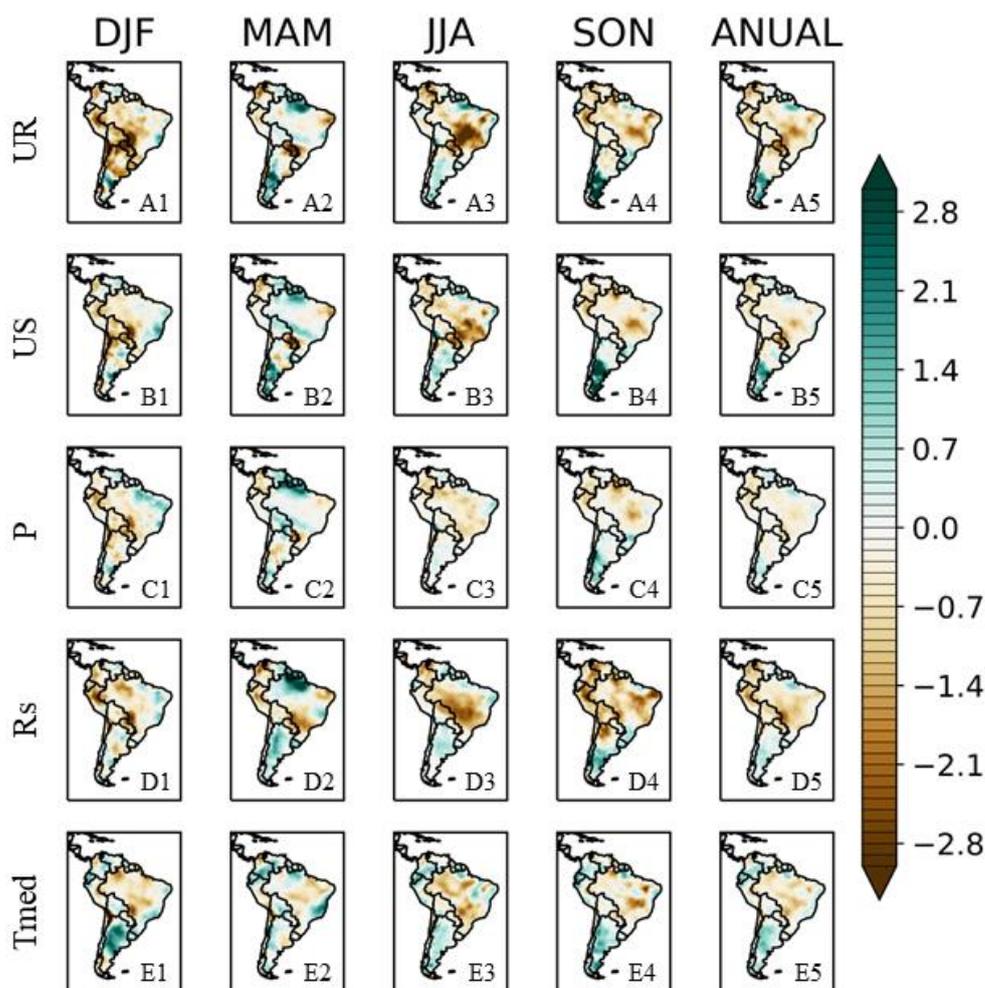
A Figura 2.6 apresenta a distribuição espacial em escala sazonal e anual do VM da contribuição relativa das variáveis climáticas ( $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $R_s$ ,  $US$  e  $P$ ) na  $ET$  no PP, obtida entre a média do conjunto dos dez GCMs do CMIP6 e os dados provenientes do ERA5. De maneira geral, os GCMs conseguiram representar as contribuições relativas em escala sazonal e anual, com destaque para a  $T_{med}$  e  $P$  que apresentaram menores valores de VM.

O VM da contribuição da  $UR$  apresentou superestimativa na escala anual para o centro-sul da Argentina, Equador, Venezuela, Suriname, Guianas, extremo Norte e litoral Nordeste do Brasil (até  $\sim 2,8 \text{ mm ano}^{-1}$ ), e subestimativa nas demais regiões (até  $\sim 2,2 \text{ mm ano}^{-1}$ ) (Figura 2.6, Painel A5). Padrão similar foi verificado analisando o VM para escala sazonal. No entanto, no verão Austral, os GCMs apresentaram maior VM (até  $\sim 2,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ) para o Sudeste do Brasil e da Colômbia (Figura 2.6, Painel A1). No outono Austral, os GCMs superestimaram a contribuição da  $UR$  (até  $\sim 1,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ) para a Bolívia, sul da Colômbia e em uma faixa que se estende de Noroeste à Sudeste do Brasil (Figura 2.6, Painel

A2). Os GCMs apresentaram maior VM (até  $\sim 1,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ) para o sudoeste da Bolívia, Uruguai, norte do Peru e da Argentina no inverno Austral (Figura 2.6, Painel A3). O VM da contribuição da *UR* apresentou subestimativa na primavera Austral para a Venezuela e Suriname (até  $\sim 2,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ), e superestimativa para o Sul do Brasil e Uruguai (até  $\sim 1,4 \text{ mm ano}^{-1}$ ) (Figura 2.6, Painel A4).

Considerando a escala anual, os GCMs apresentaram maior VM (até  $\sim 2,1 \text{ mm ano}^{-1}$ ) para a contribuição da *US* para o centro-sul da Argentina, Uruguai, Venezuela, Suriname, Guianas, extremo Norte e litoral Nordeste do Brasil, e menor VM (até  $\sim - 2,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ) nas demais regiões (Figura 2.6, Painel B5). Em contrapartida, os GCMs superestimaram a contribuição da *US* (até  $\sim 1,7 \text{ mm ano}^{-1}$ ) no verão Austral para o sudeste da Colômbia e centro leste do Brasil, e subestimaram (até  $\sim 0,5 \text{ mm ano}^{-1}$ ) para o Uruguai (Figura 2.6, Painel B1). Os GCMs apresentaram maior VM (até  $\sim 2,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ) para a Bolívia, sul do Peru, sul da Venezuela e em uma faixa que se estende de Norte à Sudeste do Brasil no outono Austral (Figura 2.6, Painel B2), e maior VM (até  $\sim 1,5 \text{ mm ano}^{-1}$ ) para o sudoeste da Bolívia e norte da Argentina no inverno Austral (Figura 2.6, Painel B3). E, na primavera Austral, os GCMs subestimaram a contribuição da *US* (até  $\sim 2,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ) para a Venezuela, Suriname, Guianas e extremo da região Norte do Brasil, e superestimaram (até  $\sim 2,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ) para a região Sul do Brasil (Figura 2.6, Painel B4).

Os GCMs simularam a contribuição da *P* com maior VM (até  $\sim 0,7 \text{ mm ano}^{-1}$ ) para o centro-sul da Argentina, Venezuela, Suriname, Guianas, extrema região Norte e Nordeste do Brasil, e com menor VM (até  $\sim - 0,9 \text{ mm ano}^{-1}$ ) nas demais regiões na escala anual (Figura 2.6, Painel C5). No entanto, o VM da contribuição da *P* apresentou superestimativa (até  $\sim 1,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ) no verão Austral para o sul do Peru e litoral do Sudeste brasileiro (Figura 2.6, Painel C1). No outono Austral, os GCMs apresentaram maior VM (até  $\sim 2,5 \text{ mm ano}^{-1}$ ) para a Bolívia, sul do Peru, norte do Paraguai e em uma faixa que se estende da região Norte à Sudeste do Brasil, e menor VM (até  $\sim - 1,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ) para a região Nordeste do Brasil (Figura 2.6, Painel C2). O VM da contribuição da *P* apresentou superestimativa no inverno Austral para o sudoeste da Bolívia e norte da Argentina (até  $\sim 1,2 \text{ mm ano}^{-1}$ ) (Figura 2.6, Painel C3). Na primavera Austral, os GCMs subestimaram a contribuição da *P* (até  $\sim 2,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ) para a Venezuela, Suriname, Guianas e extremo Norte do Brasil, e superestimaram (até  $\sim 2,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ) para o Sul do Brasil, Uruguai, sul do Paraguai e norte da Argentina (Figura 2.6, Painel C4).

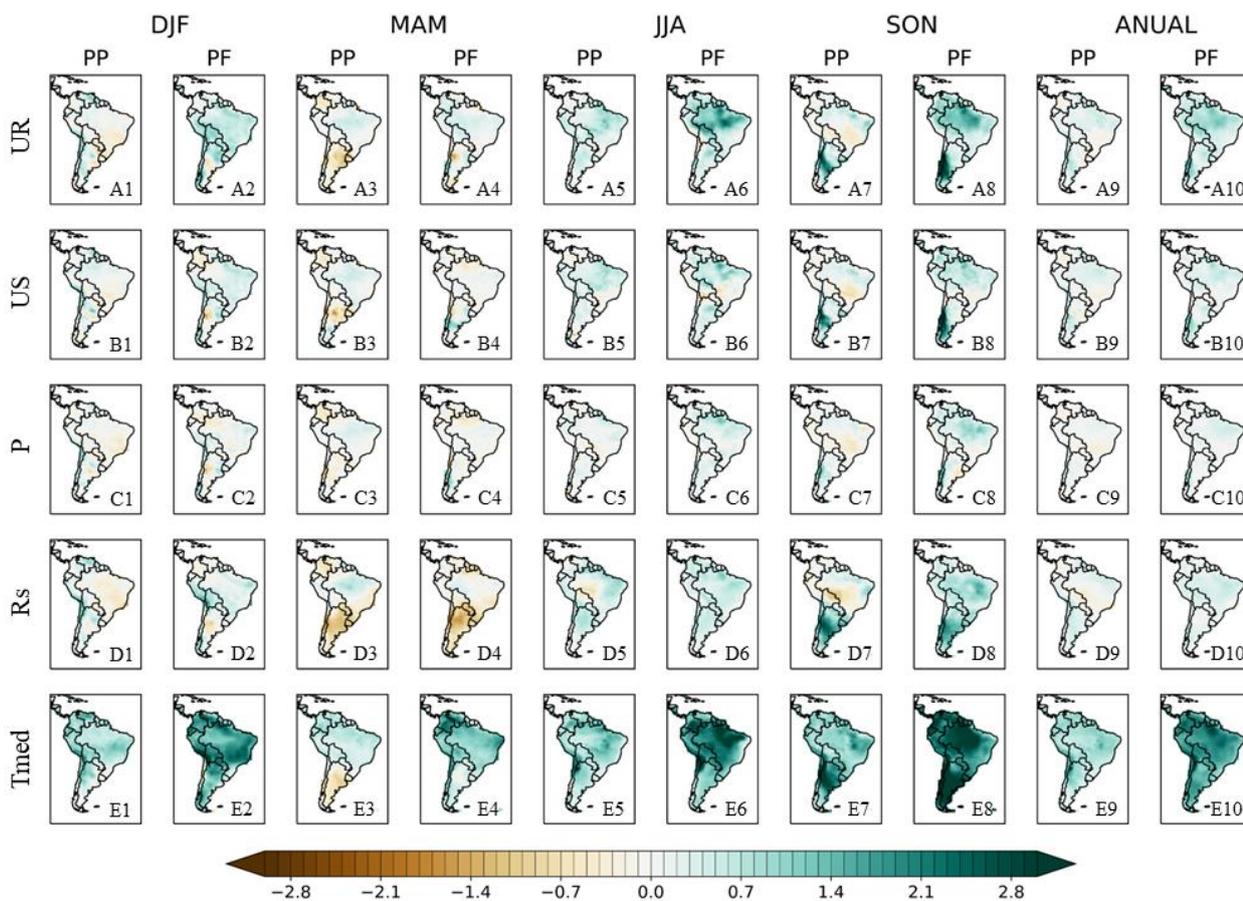


**Figura 2.6.** Distribuição espacial (em escala sazonal e anual) do viés médio entre a média dos dez modelos de circulação geral do CMIP6 e os dados provenientes do ERA5 para a contribuição relativa ( $\text{mm ano}^{-1}$ ) das variáveis diárias de umidade relativa do ar (UR), umidade do solo a 10 cm da superfície (US), precipitação (P), radiação solar global ( $R_s$ ) e temperatura média do ar a 2 m da superfície ( $T_{\text{med}}$ ) na evapotranspiração (ET) considerando o período presente (PP; 1986-2005).

Para o extremo Norte e Sul do Brasil, Suriname, Guianas, leste da Venezuela, Equador, Uruguai, Argentina e Chile, VM da contribuição da  $R_s$  apresentou superestimativa na escala anual (até  $\sim 1,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ), e subestimativa nas demais regiões (até  $\sim 2,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ) (Figura 2.6, Painel D5). Do contrário, os GCMs superestimaram a contribuição da  $R_s$  (até  $\sim 1,4 \text{ mm ano}^{-1}$ ) no verão Austral para o Nordeste e Sudeste do Brasil e subestimaram (até  $\sim 1,4 \text{ mm ano}^{-1}$ ) na região central da Argentina (Figura 2.6, Painel D1). O VM da contribuição da  $R_s$  apresentou superestimativa no outono Austral para o extremo Norte do Brasil, leste da Venezuela, Suriname e Guianas (até  $\sim 3,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ) (Figura 2.6, Painel D2). No inverno Austral, os GCMs apresentaram maior VM (até  $\sim 1,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ) para o Nordeste do Brasil (Figura 2.6, Painel D3), e na primavera Austral, os GCMs apresentaram menor VM (até  $\sim -2,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ) para o norte da Argentina (Figura 2.6, Painel D4).

A contribuição da  $T_{med}$  apresentou menor VM (até  $\sim -1,4 \text{ mm ano}^{-1}$ ) para a maioria do território brasileiro e norte da Colômbia, e maior VM (até  $\sim 1,7 \text{ mm ano}^{-1}$ ) para as demais regiões da América do Sul na escala anual (Figura 2.6, Painel E5). Padrão similar foi verificado analisando o VM para escala sazonal, exceto no Brasil, em que os GCMs apresentaram maior VM para a  $T_{med}$ . No verão Austral, os GCMs superestimaram a contribuição da  $T_{med}$  (até  $\sim 1,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ) para a porção do Nordeste e na faixa que se estende do litoral do Sudeste ao Sul do Brasil (Figura 2.6, Painel E1). O VM da contribuição da  $T_{med}$  apresentou superestimativa no outono Austral para o Sudeste e extremo Norte do Brasil (até  $\sim 1,6 \text{ mm ano}^{-1}$ ) (Figura 2.6, Painel E2). No inverno e na primavera Austral, os GCMs apresentaram maior VM (até  $\sim 1,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ) para o Nordeste e extremo Norte do Brasil (Figura 2.6, Painéis E3 e E4).

A Figura 2.7 apresenta a distribuição espacial em escala sazonal e anual da contribuição relativa das variáveis climáticas ( $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $R_s$ ,  $US$  e  $P$ ) na  $ET$  para o PP e PF. De forma geral, a contribuição relativa das variáveis climáticas na mudança da  $ET$  é majoritariamente positiva, com maiores magnitudes na contribuição da  $T_{med}$ . Além disso, a contribuição relativa no PF apresentou maiores magnitudes em relação ao PP em todas as estações do ano, principalmente na primavera Austral.



**Figura 2.7.** Distribuição espacial (em escala sazonal e anual) da contribuição relativa ( $\text{mm ano}^{-1}$ ) das variáveis diárias de umidade relativa do ar (UR), umidade do solo a 10 cm da superfície (US), precipitação (P), radiação solar global ( $R_s$ ) e temperatura média do ar a 2 m da superfície ( $T_{med}$ ) na evapotranspiração (ET), considerando a média dos dez modelos de circulação geral do CMIP6 para o período presente (PP; 1986-2005) e futuro (PF; 2081-2100).

Por exemplo, em escala anual, para o PP, a região central da América do Sul, que engloba Centro-Sul do Brasil, Bolívia e Paraguai, além da Colômbia, apresentou contribuição positiva da  $T_{med}$  de  $\sim 1,3 \text{ mm ano}^{-1}$  (Figura 2.7, Painel E9), e contribuição negativa da UR, US, P e  $R_s$  de  $\sim 0,1 \text{ mm ano}^{-1}$ ,  $\sim 0,2 \text{ mm ano}^{-1}$ ,  $\sim 0,1 \text{ mm ano}^{-1}$  e  $\sim 0,3 \text{ mm ano}^{-1}$ , respectivamente (Figura 2.7, Painéis A9-D9). Nesse caso, as mudanças na ET foram dominadas pela variável  $T_{med}$  ( $\sim 1,3 \text{ mm ano}^{-1}$ ), o que significa que a tendência de aumento da  $T_{med}$  (Figura 2.4, Painel E9) resultou na tendência de aumento da ET (Figura 2.4, Painel F9). E para o PF, todas as variáveis climáticas projetaram contribuição positiva na América do Sul, com destaque para  $T_{med}$  (Figura 2.7, Painel E10). Logo, a tendência de aumento da  $T_{med}$  (Figura 2.4, Painel E10) levou a um aumento de  $2,8 \text{ mm ano}^{-1}$  na ET (Figura 2.4, Painel F10).

Contribuição positiva da  $T_{med}$  de  $\sim 0,9 \text{ mm ano}^{-1}$  foi observada no verão Austral para o PP na região Centro-Sul do Brasil (Figura 2.7, Painel E1), enquanto as variáveis UR, US, P e  $R_s$  apresentaram contribuição negativa de  $\sim 0,7 \text{ mm ano}^{-1}$ ,  $\sim 0,2 \text{ mm ano}^{-1}$ ,  $\sim 0,1 \text{ mm ano}^{-1}$  e  $\sim$

0,5 mm ano<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 2.7, Painéis A1-D1). Portanto, as mudanças na *ET* também foram dominadas pela  $T_{med}$  ( $\sim 0,9$  mm ano<sup>-1</sup>), no entanto, seu efeito foi enfraquecido pelas contribuições das demais variáveis, principalmente da *UR* ( $\sim 0,7$  mm ano<sup>-1</sup>), significando que a tendência de aumento da *UR* (Figura 2.4, Painel A1) influenciou na tendência de diminuição da *ET* (Figura 2.4, Painel F1). As maiores contribuições positivas foram projetadas na porção central da Argentina pela  $T_{med}$  de  $\sim 1,4$  mm ano<sup>-1</sup> (Figura 2.7, Painel E2) para o PF, enquanto a *UR*, *US*, *P* e  $R_s$  projetaram contribuição negativa de  $\sim 0,8$  mm ano<sup>-1</sup>,  $\sim 1,2$  mm ano<sup>-1</sup>,  $\sim 1,0$  mm ano<sup>-1</sup> e  $\sim 0,7$  mm ano<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 2.7, Painéis A2-D2). Para essa região, as mudanças na *ET* também foram dominadas pela  $T_{med}$  ( $\sim 1,4$  mm ano<sup>-1</sup>), no entanto, seu efeito foi enfraquecido pelas contribuições das demais variáveis, principalmente da *US* ( $\sim 1,2$  mm ano<sup>-1</sup>), significando que a tendência de aumento da *US* (Figura 2.4, Painel B2) influenciou na tendência de diminuição da *ET* (Figura 2.4, Painel F2).

No outono Austral, todas as variáveis climáticas apresentaram contribuição negativa, para o PP, com destaque para a  $R_s$  de  $\sim 1,5$  mm ano<sup>-1</sup>, que dominou as mudanças na *ET* para a região da Argentina e Uruguai (Figura 2.7, Painel D3). Esse resultado mostrou que a tendência de redução da *ET* (Figura 2.4, Painel F3) foi influenciada pela tendência de redução da  $R_s$  (Figura 4, Painel D3). Considerando o PF, para as regiões Suriname, Guianas e o extremo norte da região Amazônica os GCMs projetaram contribuição positiva da  $T_{med}$  de  $\sim 1,6$  mm ano<sup>-1</sup> (Figura 2.7, Painel E4), enquanto para as variáveis *UR*, *US*, *P* e  $R_s$  os GCMs projetaram contribuição negativa de  $\sim 0,7$  mm ano<sup>-1</sup> (Figura 2.7, Painéis A4-D4). Apesar das alterações na *ET* serem dominadas pela  $T_{med}$  ( $\sim 1,6$  mm ano<sup>-1</sup>), a soma das contribuições das demais variáveis ( $\sim 2,8$  mm ano<sup>-1</sup>) enfraqueceu o efeito da  $T_{med}$ . Isto é, a tendência de aumento da *UR* (Figura 2.4, Painel A4), *US* (Figura 2.4, Painel B4) e *P* (Figura 2.4, Painel C4) e tendência de diminuição da  $R_s$  (Figura 2.4, Painel D4) colaboraram para a tendência de redução da *ET* (Figura 2.4, Painel F4).

Para a região Noroeste do Brasil e norte da Bolívia, as variáveis *UR*, *US*, *P* e  $T_{med}$  apresentaram contribuição positiva de  $\sim 1,0$  mm ano<sup>-1</sup>,  $\sim 0,7$  mm ano<sup>-1</sup>,  $\sim 0,1$  mm ano<sup>-1</sup> e  $\sim 1,3$  mm ano<sup>-1</sup>, respectivamente, para o PP no inverno Austral (Figura 2.7, Painéis A5-C5 e E5), enquanto a  $R_s$  apresentou contribuição negativa de  $\sim 0,6$  mm ano<sup>-1</sup> (Figura 2.7, Painel D5). Para essa região, as mudanças na *ET* foram dominadas pela  $T_{med}$  ( $\sim 1,3$  mm ano<sup>-1</sup>), portanto, a tendência de aumento da  $T_{med}$  (Figura 2.4, Painel E5) contribuiu para a tendência de aumento da *ET* (Figura 2.4, Painel F5). As projeções para a região Amazônica apresentaram contribuição positiva para todas as variáveis climáticas no PF, com destaque para a *UR* (até  $\sim$

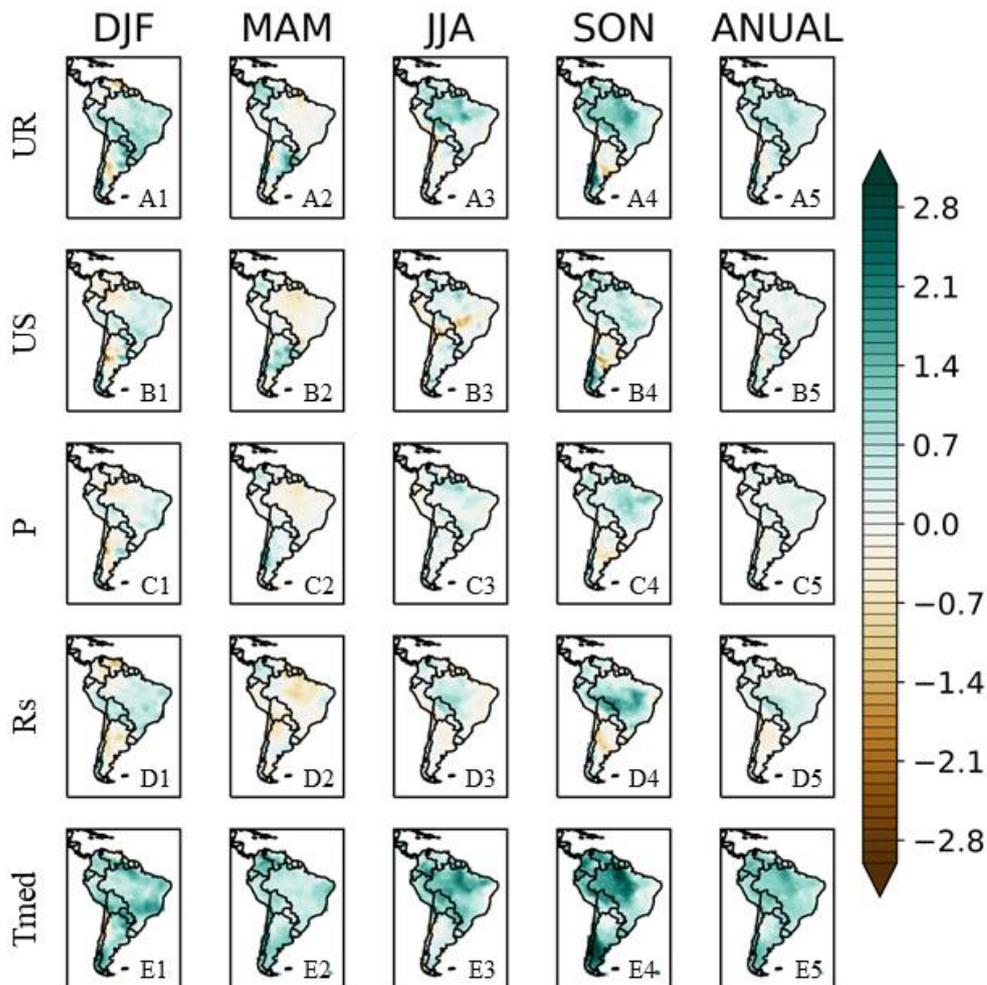
2,5 mm ano<sup>-1</sup>) e  $T_{med}$  (até ~ 2,9 mm ano<sup>-1</sup>), que dominaram as mudanças na  $ET$  (Figura 2.7, Painéis A6 e E6), isto é, a tendência de aumento da  $ET$  (Figura 2.4, Painel F6) foi influenciada pela tendência de redução da  $UR$  (Figura 2.4, Painel A6) e aumento da  $T_{med}$  (Figura 2.4, Painel E6). Este resultado corrobora com estudos prévios de Gomes et al. (2021) que indicaram a  $T_{med}$  como a principal variável que influencia o aumento da  $ET$  na região Amazônica.

No PP, para as porções ao norte da Bolívia, Equador, Peru, Centro e Sudeste do Brasil, observou-se contribuição positiva da  $T_{med}$  de ~ 1,2 mm ano<sup>-1</sup> (Figura 2.7, Painel E7), enquanto as variáveis  $UR$ ,  $US$ ,  $P$  e  $R_s$  apresentaram contribuição negativa de ~ 0,5 mm ano<sup>-1</sup>, ~ 0,7 mm ano<sup>-1</sup>, ~ 0,3 mm ano<sup>-1</sup> e ~ 1,0 mm ano<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 2.7, Painéis A7-D7). Nesse caso, as mudanças na  $ET$  foram dominadas pela  $T_{med}$  (~ 1,2 mm ano<sup>-1</sup>), no entanto, seu efeito foi enfraquecido pelas contribuições das demais variáveis, principalmente da  $R_s$  (~ 1,0 mm ano<sup>-1</sup>), significando que a tendência de redução da  $R_s$  (Figura 2.4, Painel D7) influenciou na tendência de redução da  $ET$  (Figura 2.4, Painel F7). Os GCMs projetaram contribuição positiva para todas as variáveis climáticas para o PF na maior parte do continente Sul-Americano, com destaque para a  $T_{med}$  (superior a 3,0 mm ano<sup>-1</sup>), evidenciando sua influência nas alterações da  $ET$  (Figura 2.7, Painel E8), em que a tendência de aumento da  $ET$  (Figura 2.4, Painel F8) é dominada pela tendência de aumento da  $T_{med}$  (Figura 2.4, Painel E8).

Em suma, a contribuição positiva das variáveis climáticas resultam no aumento da  $ET$ , em que a tendência das variáveis  $UR$ ,  $US$  e  $P$  apresenta um padrão de redução, enquanto que a tendência das variáveis  $R_s$  e  $T_{med}$  apresenta um padrão de aumento. Por outro lado, a contribuição negativa das variáveis climáticas resultam na diminuição da  $ET$ , em que a tendência das variáveis  $UR$ ,  $US$  e  $P$  apresenta um padrão de aumento, enquanto que a tendência das variáveis  $R_s$  e  $T_{med}$  apresenta um padrão de redução.

De modo geral, a variável climática dominante que mais contribuiu para as mudanças de  $ET$  foi a  $T_{med}$ , principalmente para o PF, ou seja, a tendência de aumento projetada na  $ET$  é mais influenciada pela tendência de aumento projetada na  $T_{med}$ . Resultado semelhante foi observado para o sul da América do Sul (Merino; Gassmann 2022) e em diferentes condições climáticas da China (Gong et al. 2006; Liu et al. 2022). Em contrapartida, a  $R_s$  foi a variável dominante que contribuiu para as mudanças na  $ET$  para as Montanhas Qilian da China (Lin et al. 2018). Esses resultados destacaram a importância da avaliação da contribuição das variáveis nas alterações da  $ET$ , devido às características climáticas e topográficas específicas que varia em cada região (Ning et al. 2016; Gomes et al. 2021; Merino; Grassmann 2022; Zeng et al. 2022).

A Figura 2.8 apresenta a distribuição espacial em escala sazonal e anual da diferença (PF - PP) da contribuição relativa das variáveis climáticas ( $T_{med}$ ,  $UR$ ,  $R_s$ ,  $US$  e  $P$ ) na  $ET$ , considerando a média do conjunto dos dez GCMs do CMIP6.



**Figura 2.8.** Distribuição espacial (em escala sazonal e anual) da diferença (PF - PP) da contribuição relativa ( $\text{mm ano}^{-1}$ ) das variáveis diárias de umidade relativa do ar ( $UR$ ), umidade do solo a 10 cm da superfície ( $US$ ), precipitação ( $P$ ), radiação solar global ( $R_s$ ) e temperatura média do ar a 2 m da superfície ( $T_{med}$ ) na evapotranspiração ( $ET$ ), considerando a média dos dez modelos de circulação geral do CMIP6.

Considerando a escala anual, as maiores diferenças (PF - PP) positivas foram observadas na contribuição da  $UR$  ( $\sim 1,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ) e  $T_{med}$  (até  $\sim 1,5 \text{ mm ano}^{-1}$ ), principalmente na região Norte do Brasil (Figura 2.8, Painel A5 e E5). Ou seja, a contribuição da  $UR$  e  $T_{med}$  no PF será maior que a contribuição delas no PP. Em contrapartida, as menores diferenças negativas foram observadas na contribuição da  $R_s$  ( $\sim -0,3 \text{ mm ano}^{-1}$ ) na região da Argentina (Figura 2.8, Painel D5), isto é, a contribuição da  $R_s$  no PF será menor que a contribuição da  $R_s$  no PP.

Diferenças (PF - PP) negativas indicam que a contribuição da variável climática no PF será menor que a contribuição da mesma no PP. Por exemplo, para a  $UR$  no verão Austral na

região da Venezuela e porção central da Argentina ( $\sim - 1,4 \text{ mm ano}^{-1}$ ) (Figura 2.8, Painel A1) e na primavera Austral para a porção central da Argentina ( $\sim - 1,6 \text{ mm ano}^{-1}$ ) (Figura 2.8, Painel A4). Para a variável  $US$ , diferenças negativas foram observadas no outono Austral para a região Amazônica ( $\sim - 1,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ) (Figura 2.8, Painel B2), no inverno Austral para o Centro-Oeste do Brasil e sul da Bolívia ( $\sim - 1,6 \text{ mm ano}^{-1}$ ) (Figura 2.8, Painel B3) e na primavera Austral para a região central da Argentina ( $\sim - 1,6 \text{ mm ano}^{-1}$ ) (Figura 2.8, Painel B4). E diferenças negativas também foram observadas na  $R_s$  no outono Austral para a região Amazônica ( $\sim - 1,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ) (Figura 2.8, Painel D2).

A contribuição da variável climática no PF será maior que a contribuição da mesma para o PP quando as diferenças (PF - PP) forem positivas. Exemplificando essa condição, para a variável  $UR$ , isso foi observado no outono Austral para a região do Uruguai e nordeste da Argentina ( $\sim 2,1 \text{ mm ano}^{-1}$ ) (Figura 2.8, Painel A2) e no inverno Austral para a região Amazônica ( $\sim 2,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ) (Figura 2.8, Painel A3). Diferenças positivas também foram observadas na  $T_{med}$  no verão Austral para a região sul da Argentina e do Chile, extremo Norte, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil ( $\sim 2,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ) (Figura 2.8, Painel E1), no inverno Austral para a região Amazônica ( $\sim 2,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ) (Figura 2.8, Painel E3) e na primavera Austral para a região Amazônica, Equador, norte da Bolívia, sul da Argentina e do Chile ( $\sim 3,0 \text{ mm ano}^{-1}$ ) (Figura 2.8, Painel E4).

Portanto, esses resultados indicaram que em cenários futuros de mudanças climáticas a  $T_{med}$  foi a variável que mais contribuiu para as mudanças na  $ET$  em todas as estações do ano para grande parte do continente Sul-Americano. Além disso, as maiores diferenças positivas foram observadas na primavera Austral para todas as variáveis climáticas, o que significa que a tendência de redução na  $UR$ ,  $US$  e  $P$  e tendência de aumento na  $R_s$  e  $T_{med}$ , principalmente na região Amazônica, foi evidenciada nessa estação (SON), consistente com a Figura 2.4 (Painéis A8-F8).

## 2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os GCMs projetaram para a primavera Austral no período futuro (2081-2100) tendência significativa positiva na evapotranspiração ( $\sim 3,0 \text{ mm dia}^{-1}$ ) e temperatura do ar ( $\sim 8,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) para todo o continente Sul-Americano, e radiação solar ( $\sim 3,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) para o norte da Bolívia, Argentina, Norte, Nordeste e Sul do Brasil. Em contrapartida, tendência significativa negativa foi projetada na umidade do ar ( $\sim 20,0 \text{ \%}$ ) para a região Amazônica, litoral Nordeste e Sul do Brasil, Colômbia, Bolívia e oeste da Argentina, umidade do solo ( $\sim$

8,0 mm dia<sup>-1</sup>) para a Colômbia e precipitação (~ 4,0 mm dia<sup>-1</sup>) para a Venezuela e porção central do Chile.

De modo geral, a contribuição relativa das variáveis climáticas nas alterações da evapotranspiração é majoritariamente positiva, com maiores magnitudes projetadas na primavera Austral. Nesse caso, para grande parte do continente Sul-Americano, a temperatura do ar apresentou maior contribuição positiva (superior a 3,0 mm ano<sup>-1</sup>) nas mudanças da evapotranspiração, evidenciando que a tendência de aumento da evapotranspiração é dominada pela tendência de aumento da temperatura do ar. As contribuições apresentaram padrões sazonais ligeiramente distintos, com maiores magnitudes de contribuição negativa projetadas no outono Austral. Nessa estação, para as regiões Suriname, Guianas e no extremo norte da região Amazônica, o efeito da contribuição positiva da temperatura do ar (~ 1,6 mm ano<sup>-1</sup>) foi enfraquecido pela soma das contribuições negativas das demais variáveis climáticas (~ 2,8 mm ano<sup>-1</sup>). Isto é, a tendência de redução projetada para a evapotranspiração foi influenciada pela tendência de aumento da umidade do ar, umidade do solo e precipitação, e tendência de redução da radiação solar. Apesar da distribuição espacial da contribuição possuir diferenças nos padrões regionais, a variável climática dominante que mais contribuiu para as mudanças de evapotranspiração foi a temperatura do ar, principalmente para o período futuro.

Em resumo, a tendência de aumento projetada na evapotranspiração é influenciada pela contribuição positiva das variáveis climáticas, que apresentam uma tendência de redução na umidade do ar, umidade do solo e precipitação, e tendência de aumento na radiação solar e temperatura do ar. Os resultados obtidos neste estudo são indicativos de informações úteis para os tomadores de decisões planejarem ações efetivas e sustentáveis relativas aos impactos provenientes das mudanças climáticas na América do Sul.

## 2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen RG, Pereira LS, Raes D *et al.* (1998) Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Almazroui M, Ashfaq M, Islam MN *et al.* (2021) Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America. *Earth Sys Environ* 5:155-183. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6>

Ambrizzi T, Reboita MS, Rocha PP *et al.* (2019) The state of the art and fundamental aspects of regional climate modelling in South America. *Ann NY Acad Sci* 1436:98-120. <https://doi.org/10.1111/nyas.13932>

- Arias PA, Ortega G, Villegas LD *et al.* (2021) Colombian climatology in CMIP5/CMIP6 models: persistent biases and improvements. *Rev Fac Ing* 100:75-96. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20210525>
- Ávila-Díaz A, Benezoli V, Justino F *et al.* (2020) Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. *Clim Dyn* 55:1403-1426. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05333-z>
- Baker JCA, Souza DC, Kubota PY *et al.* (2021) An assessment of land-atmosphere interactions over South America using satellites, reanalysis, and two global climate models. *Am Meteorol Soc* 22:905-922. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0132.1>
- Basu S, Sauchyn DJ (2022) Future changes in the surface water balance over western Canada using the CanESM5 (CMIP6) ensemble for the Shared Socioeconomic Pathways 5 Scenario. *Water* 14:691. <https://doi.org/10.3390/w14050691>
- Berg A, Sheffield J, Milly PCD (2017) Divergent surface and total soil moisture projections under global warming. *Geophys Res Lett* 44:236-244. <https://doi.org/10.1002/2016GL071921>
- Brêda JPLF, Paiva RCD, Collischon W *et al.* (2020) Climate change impacts on South America water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. *Clim Change* 159:503-522. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02667-9>
- Cook BI, Mankin JS, Marvel K *et al.* (2020) Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. *Earth's Future* 8:e2019EF001461. <https://doi.org/10.1029/2019EF001461>
- Das S, Datta P, Sharma D *et al.* (2022) Trends in temperature, precipitation, potential evapotranspiration, and water availability across the Teesta River basin under 1.5 and 2 °C temperature rise scenarios of CMIP6. *Atmos* 13:941. <https://doi.org/10.3390/atmos13060941>
- Dereczynski C, Chou SC, Lyra A *et al.* (2020) Downscaling of climate extremes over South America - part I: model evaluation in the reference climate. *Wea Clim Extr* 29:100273. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100273>
- Dias CS, Reboita MS (2021) Assessment of CMIP6 simulations over Tropical South America. *Braz J Phys Geogr* 14:1282-1295. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1282-1295>
- Duarte GAS, Villela HDM, Deocleciano M *et al.* (2020) Heat waves are a major threat to turbid coral reefs in Brazil. *Front Mar Sci* 7:179. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00179>
- Fanourgakis GS, Kanakidou M, Nenes A *et al.* (2019) Evaluation of global simulations of aerosol particle and cloud condensation nuclei number, with implications for cloud droplet formation. *Atmos Chem Phys* 19:8591-8617. <https://doi.org/10.5194/acp-19-8591-2019>
- Ferreira GWS, Reboita MS (2022) A new look into the South America precipitation regimes: Observation and Forecast. *Atmos* 13:873. <http://doi.org/10.3390/atmos13060873>
- Fersch B, Kunstmann H (2014) Atmospheric and terrestrial water budgets: sensitivity and performance of configurations and global driving data for long term continental scale WRF simulations. *Clim Dyn* 42:2367-2396. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1915-5>
- Florêncio GWL, Martins FB, Fagundes FFA (2022) Climate change on Eucalyptus plantations and adaptive measures for sustainable forestry development across Brazil. *Ind Crops Prod* 115538:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115538>
- Garreaud RD, Boisier JP, Rondanelli R *et al.* (2020) The Central Chile mega drought (2010-2018): a climate dynamics perspective. *Int J Climatol* 40:421-439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>

- Garreaud R (2009) The Andes climate and weather. *Adv Geosci* 22:3-11. <https://doi.org/10.5194/adgeo-22-3-2009>
- Gatti LV, Basso LS, Miller JB *et al.* (2021) Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature* 595:388-393. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>
- Gharehbaghi A, Kaya B (2022) Calibration and evaluation of six popular evapotranspiration formula based on the Penman-Monteith model for continental climate in Turkey. *Phys Chem Earth* 127:103190. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103190>
- Gomes WWE, Leite-Filho AT, Soares-Filho BS (2021) Simulation of the impacts of global climate change on reference evapotranspiration in the Brazilian Amazon basin. *Rev Bras Meteorol* 28:450-470. <http://dx.doi.org/10.5380/rbclima.v28i0.74046>
- Gong L, Xu C, Chen D *et al.* (2006) Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *J Hydrol* 329:620-629. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.027>
- Guimarães SO, Costa AA, Vasconcelos Júnior FC *et al.* (2016) Climate change projections over the Brazilian Northeast of the CMIP5 and CORDEX models. *Rev Bras Meteorol* 31:337-364. <https://doi.org/10.1590/0102-778631320150150>
- Hagen I, Huggel C, Ramajo L *et al.* (2022) Climate change-related risks and adaptation potential in Central and South America during the 21<sup>st</sup> century. *Environ Res Lett* 17:033002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5271>
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P *et al.* (2020) The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc* 146:1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hirabayashi T, Tanoue M, Sasaki O *et al.* (2021) Global exposure to flooding from the new CMIP6 climate model projections. *Sci Rep* 11:3740. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83279-w>
- Hirsch RM, Slack JR, Smith RA (1982) Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resour Res* 18:107-121. <https://doi.org/10.1029/WR018i001p00107>
- IPCC. Portner HO, Roberts DC, Tignor M *et al.* (eds.) (2022) *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 University Press. In Press.
- Jerszurki JM, Souza JLM, Silva LCR (2019) Sensitivity of ASCE-Penman-Monteith reference evapotranspiration under different climate types in Brazil. *Clim Dyn* 53:943-956. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04619-1>
- Jiang Y, Yang M, Liu W *et al.* (2022) Eco-hydrological responses to recent droughts in tropical South America. *Environ Res Lett* 17:024037. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac507a>
- Kendall MG (1975) *Rank Correlation Measures*, Charles Griffin, London.
- Li Y, Qin Y, Rong P (2022) Evolution of potential evapotranspiration and its sensitivity to climate change based on the Thornthwaite, Hargreaves, and Penman-Monteith equation in environmental sensitive areas of China. *Atmos Res* 273:106178. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106178>

- Lin P, He Z, Du J *et al.* (2018) Impacts of climate change on reference evapotranspiration in the Qilian Mountains of China: historical trends and projected changes. *Int J Climatol* 38:5. <https://doi.org/10.1002/joc.5477>
- Liu Z, Jing D, Han Y *et al.* (2022) Spatiotemporal distribution characteristics and influencing factors analysis of reference evapotranspiration in Beijing-Tianjin-Hebei region from 1990 to 2019 under climate change. *Sustainability* 14:6277. <https://doi.org/10.3390/su14106277>
- Liu M, Tian H, Yang Q *et al.* (2013) Long-term trends in evapotranspiration and runoff over the drainage basins of the Gulf of Mexico during 1901-2008. *Water Resour Res* 49:1988-2012. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20180>
- Llopart M, Domingues LM, Torma C *et al.* (2020) Assessing changes in the atmospheric water budget as drivers for precipitation change over two CORDEX-CORE domains. *Clim Dyn* 57:1615-1628. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05539-1>
- Llopart M, Reboita MS, Rocha RP (2019) Assessment of multi-model climate projections of water resources over South America CORDEX domain. *Clim Dyn* 54:99-116. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04990-z>
- Lyra A, Tavares P, Chou SC *et al.* (2017) Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. *Theor Appl Climatol* 132:663-682. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2067-z>
- Mann HB (1945) Non-parametric tests against trend. *Econometrica* 13:245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Martins FB, Benassi RB, Torres RR *et al.* (2022) Impacts of 1.5°C and 2°C global warming on Eucalyptus plantations in South America. *Sci Total Environ* 825:153820. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153820>
- Masiokas MH, Rabatel A, Rivera A *et al.* (2020) A review of the current state and recent changes of the Andean cryosphere. *Front Earth Sci* 8:99. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00099>
- Merino RA, Gassmann MI (2022) Trends of reference evapotranspiration and its physical drivers in southern South America. *Int J Climatol* 2022:1-17. <https://doi.org/10.1002/joc.7935>
- Monteiro AFM, Martins FB, Torres RR *et al.* (2021) Intercomparison and uncertainty assessment of methods for estimating evapotranspiration using a high-resolution gridded weather dataset over Brazil. *Theor Appl Climatol* 146:583-597. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03747-1>
- Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA *et al.* (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463:747-756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Nam WH, Hong EM, Choi JY (2015) Has climate change already affected the spatial distribution and temporal trends of reference evapotranspiration in South Korea? *Agric Water Manag* 150:129-138. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.11.019>
- Ng JL, Huang YF, Yong SLS *et al.* (2022) Comparative assessment of reference crop evapotranspiration models and its sensitivity to meteorological variables in Peninsular Malaysia. *Stoch Environ Res Risk Assess* 36:3557-3575. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02209-y>

- Ning T, Li Z, Liu W *et al.* (2016) Evolution of potential evapotranspiration in the northern Loess Plateau of China: recent trends and climatic drivers. *Int J Climatol* 36:12. <https://doi.org/10.1002/joc.4611>
- Oliveira DM, Ribeiro JGM, Faria LF *et al.* (2023) Performance of CMIP6 climate models in simulating precipitation in subdomains of South America in the historical period. *R Bras Geogr Fis* 16:116-133. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.1.p116-133>
- O'Neill BC, Tebaldi C, Van Vuuren DP *et al.* (2016) The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci Model Dev* 9:3461-3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Ortega G, Arias PA, Villegas JC *et al.* (2021) Present-day and future climate over Central and South America according to CMIP5/CMIP6 models. *Int J Climatol* 41:6713-6735. <https://doi.org/10.1002/joc.7221>
- Pan N, Wang S, Liu Y *et al.* (2021) Rapid increase of potential evapotranspiration weakens the effect of precipitation on aridity in global drylands. *J Arid Environ* 186:104414. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104414>
- Pan N, Wang S, Liu Y *et al.* (2019) Global surface soil moisture dynamics in 1979-2016 observed from ESA CCI SM dataset. *Water* 11:1-17. <https://doi.org/10.3390/w11050883>
- Parry I, Ritchie P, Cox P (2022) Evidence of Amazon rainforest dieback in CMIP6 models. *EGU sphere* 2022:1-11. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-82>
- Parsons LA (2020) Implications of CMIP6 projected drying trends for 21<sup>st</sup> century Amazonian drought risk. *Earth's Future* 8:e2020EF001608. <https://doi.org/10.1029/2020EF001608>
- Porfirio LL, Newth D, Finnigan JJ *et al.* (2018) Economic shifts in agricultural production and trade due to climate change. *Palgrave Commun* 4:111. <https://doi.org/10.1057/s41599-018-0164-y>
- Reboita MS, Rocha RSP da, Souza CA de *et al.* (2022) Future projections of extreme precipitation climate indices over South America based on CORDEX-CORE multimodel ensemble. *Atmos* 13:1463. <https://doi.org/10.3390/atmos13091463>
- Reboita MS, Kuki CAC, Marrafon VH *et al.* (2021) South America climate change revealed through climate indices projected by GCMs and Eta-RCM ensembles. *Clim Dyn* 58:459-485. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05918-2>
- Reboita MS, Gan MA, Rocha RP da *et al.* (2010) Precipitation regimes in South America: a bibliography review. *Rev Bras Meteorol* 25:185-204. <http://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>
- Riahi K, Van Vuuren DP, Kriegler E *et al.* (2017) The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environ Change* 42:153-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Ritchie PD, Parry I, Clarke JJ *et al.* (2022) Increases in the temperature seasonal cycle indicate long-term drying trends in Amazonia. *Commun Earth Environ.* 3:1-8. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00528-0>
- Ruosteenoja K, Markkanen T, Venalainen A *et al.* (2018) Seasonal soil moisture and drought occurrence in Europe in CMIP5 projections for the 21<sup>st</sup> century. *Clim Dyn* 50:1177-1192. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3671-4>

- Ruscica RC, Sorensoon AA, Diaz LB *et al.* (2021) Evapotranspiration trends and variability in southeastern South America: the roles of land-cover change and precipitation variability. *Inter J Climatol* 2021:1-20. <https://doi.org/10.1002/joc.7350>
- Schowengerdt RA (2007) Chapter 7 - correction and calibration. In: Schiwengerdt RA (ed) *Remote sensing*, 3<sup>rd</sup> edn. Academic Press, San Diego, pp 285-354.
- Sen PK (1968) Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *J Am Stat Assoc* 324:1379-1389. <https://doi.org/10.2307/2285291>
- Song YH, Chung ES, Shahid S (2022) Uncertainties in evapotranspiration projections associated with estimation methods and CMIP6 GCMs for South Korea. *Sci Total Environ* 825:153953. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153953>
- Sun J, Wang G, Sun X *et al.* (2020) Elevation-dependent changes in reference evapotranspiration due to climate change. *Hydrol Process* 34:5580-5594. <https://doi.org/10.1002/hyp.13978>
- Tang Y, Tang Q (2021) Variations and influencing factors of potential evapotranspiration in large Siberian River basins during 1975-2014. *J Hydrol* 598:443-465. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126443>
- Thaler V, Loikith PC, Mechoso CR *et al.* (2021) A multivariate assessment of climate change projections over South America using the fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project. *Int J Climatol* 2021:1-18. <https://doi.org/10.1002/joc.7072>
- Torres RR, Benassi RB, Martins FB *et al.* (2021) Projected impacts of 1.5 and 2 °C global warming on temperature and precipitation patterns in South America. *Int J Climatol* 42:1597-1611. <https://doi.org/10.1002/joc.7322>
- Ukkola AM, De Kauwe MG, Roderick ML *et al.* (2020) Robust future changes in meteorological drought in CMIP6 projections despite uncertainty in precipitation. *Geophys Res Lett* 47:e2020GL087820. <https://doi.org/10.1029/2020GL087820>
- Van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M *et al.* (2011) The representative concentration pathways: an overview. *Clim Change* 109:5-31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Vieira RMDSP, Tomasella J, Barbosa AA *et al.* (2021) Desertification risk assessment in northeast Brazil: current trends and future scenarios. *Land Degrad Dev* 32:224-240. <https://doi.org/10.1002/ldr.3681>
- Vishwakarma DK, Pandey K, Kaur A, Kushwaha NL, Kumar R, Ali R, Elbeltagi A, Kuriqi A (2022) Methods to estimate evapotranspiration in humid and subtropical climate conditions. *Agric Water Manag* 261:107378. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107378>
- Wang Y, Wang S, Zhao W *et al.* (2022) The increasing contribution of potential evapotranspiration to severe droughts in the Yellow River basin. *J Hydrol* 605:127310. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127310>
- Wang Z, Zhan C, Ning L *et al.* (2020) Evaluation of global terrestrial evapotranspiration in CMIP6 models. *Theor Appl Climatol* 143:521-531. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03437-4>
- Yang Y, Chen R, Han C, Liu Z (2021) Evaluation of 18 models for calculating potential evapotranspiration in different climatic zones of China. *Agric Water Manag* 244:106545. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106545>

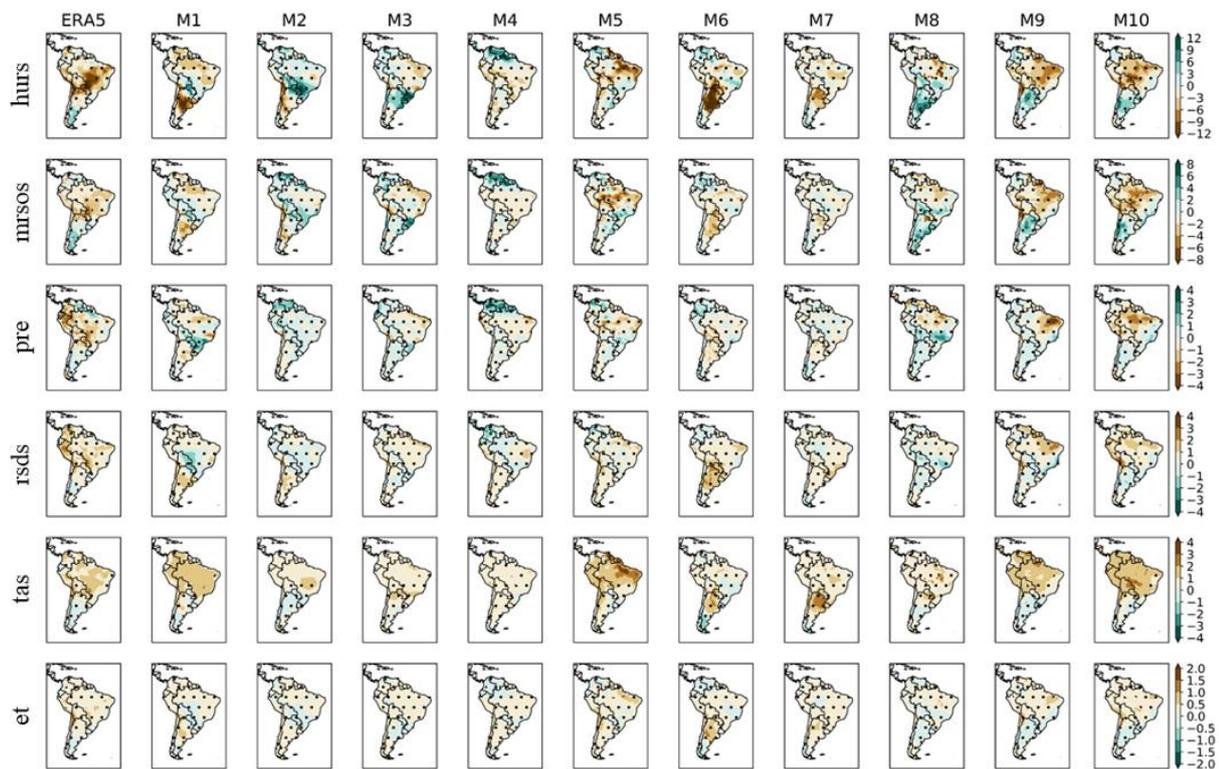
Zeng J, Li J, Lu X *et al.* (2022) Assessment of global meteorological, hydrological and agricultural drought under future warming based on CMIP6. *Atmos Ocean Sci Lett* 15:100143. <https://doi.org/10.1016/j.aosl.2021.100143>

Zaninelli PG, Menéndez CG, Falco M *et al.* (2018) Future hydroclimatological changes in South America based on an ensemble of regional climate models. *Clim Dyn* 52:819-830. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4225-0>

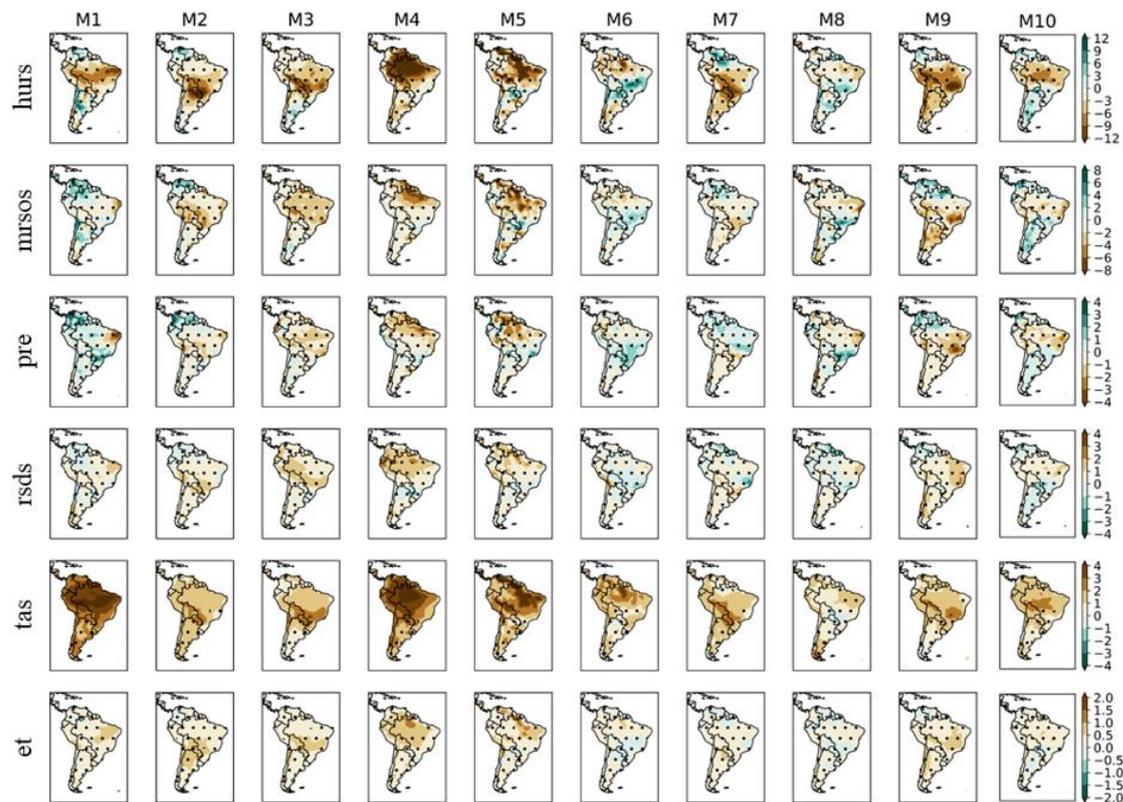
Zhao Z, Wang H, Wang C *et al.* (2020) Impacts of climatic change in reference crop evapotranspiration across different climatic zones of Ningxia at multi-time scales from 1957 to 2018. *Adv Meteorol* 2020:3156460. <https://doi.org/10.1155/2020/3156460>

Zheng H, Liu X, Liu C *et al.* (2009) Assessing contributions to panevaporation trends in Haihe River Basin, China. *J Geophys Res* 114:D24105. <https://doi.org/10.1029/2009JD012203>

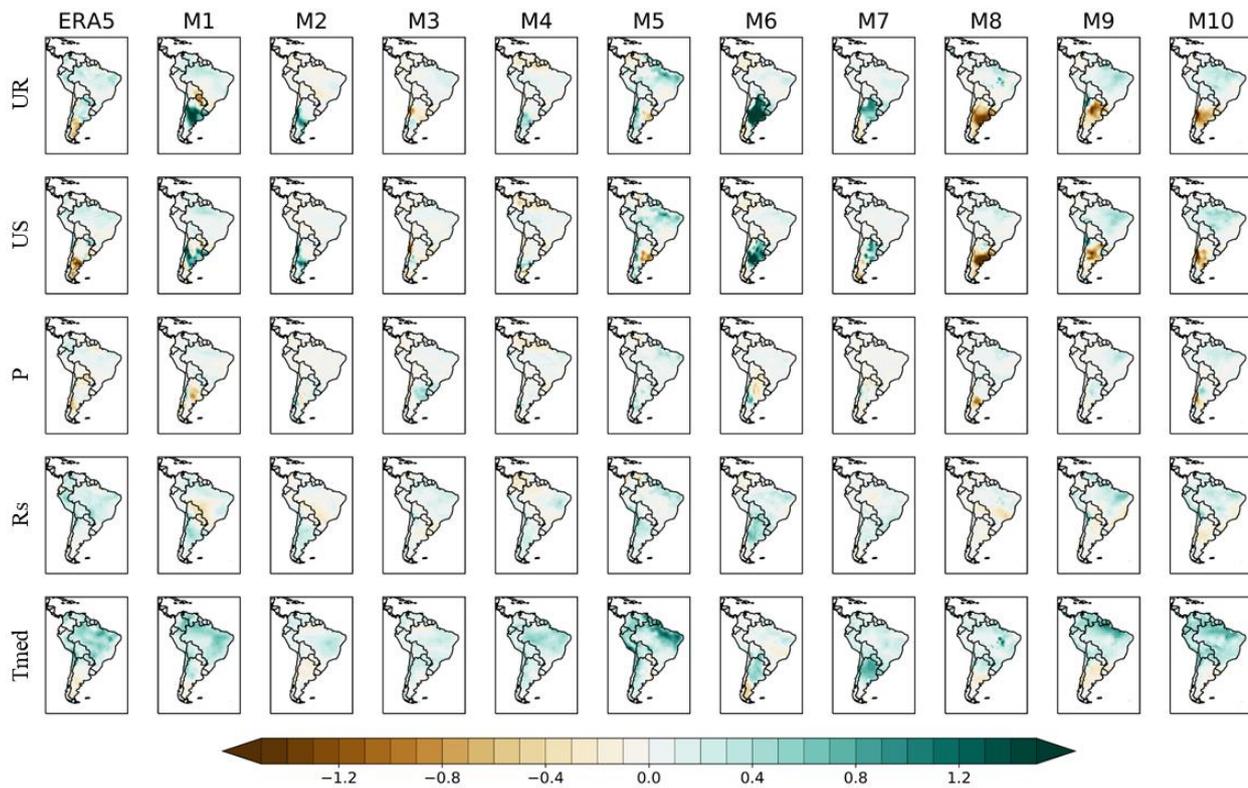
## MATERIAL SUPLEMENTAR



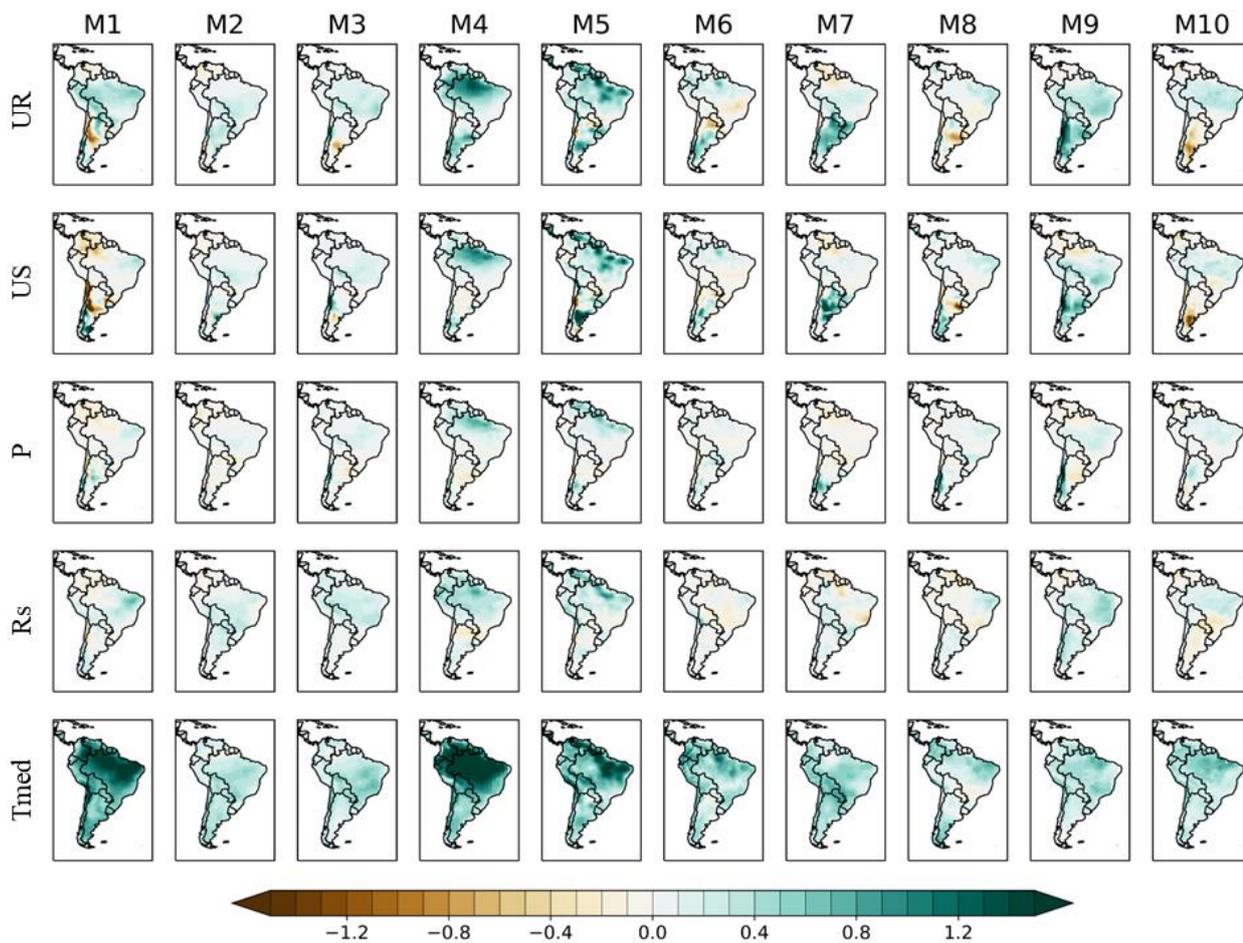
**MS1.** Distribuição espacial (em escala anual) da tendência das variáveis diárias de umidade relativa do ar (UR; %), umidade do solo a 10 cm da superfície (US; mm), precipitação (P; mm), radiação solar global ( $R_s$ ;  $\text{MJ m}^{-2}$ ), temperatura média do ar a 2 m da superfície ( $T_{\text{med}}$ ; °C) e evapotranspiração (ET; mm), considerando os dados provenientes do ERA5 e os dez modelos de circulação geral do CMIP6 para o período presente (PP; 1986-2005). Os pontilhados representam áreas de tendência significativa pelo teste de Mann-Kendall ( $p = 0,05$ ).



**MS2.** Distribuição espacial (em escala anual) da tendência das variáveis diárias de umidade relativa do ar (UR; %), umidade do solo a 10 cm da superfície (US; mm), precipitação (P; mm), radiação solar global ( $R_s$ ;  $\text{MJ m}^{-2}$ ), temperatura média do ar a 2 m da superfície ( $T_{\text{med}}$ ;  $^{\circ}\text{C}$ ) e evapotranspiração (ET; mm), considerando os dez modelos de circulação geral do CMIP6 para o período futuro (PF; 2081-2100). Os pontilhados representam áreas de tendência significativa pelo teste de Mann-Kendall ( $p = 0,05$ ).



**MS3.** Distribuição espacial (em escala anual) da contribuição relativa ( $\text{mm ano}^{-1}$ ) das variáveis diárias de umidade relativa do ar (UR), umidade do solo a 10 cm da superfície (US), precipitação (P), radiação solar global ( $R_s$ ) e temperatura média do ar a 2 m da superfície ( $T_{\text{med}}$ ) na evapotranspiração (ET), considerando os dados provenientes do ERA5 e os dez modelos de circulação geral do CMIP6 para o período presente (PP; 1986-2005).



**MS4.** Distribuição espacial (em escala anual) da contribuição relativa ( $\text{mm ano}^{-1}$ ) das variáveis diárias de umidade relativa do ar (UR), umidade do solo a 10 cm da superfície (US), precipitação (P), radiação solar global ( $R_s$ ) e temperatura média do ar a 2m da superfície ( $T_{\text{med}}$ ) na evapotranspiração (ET), considerando os dez modelos de circulação geral do CMIP6 para o período futuro (PF; 2081-2100).