



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**Projeções de mudanças no regime de precipitação e
temperatura na região Sudeste do Brasil baseado nos
novos modelos climáticos do IPCC AR5**

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Heloisa Ramos Pereira

Itajubá, Minas Gerais, Brasil

2015

Projeções de mudanças no regime de precipitação e temperatura na região Sudeste do Brasil baseado nos novos modelos climáticos do IPCC AR5

por

Heloisa Ramos Pereira

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, Minas Gerais), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Ciências Atmosféricas.**

Orientador: Dr. Roger Rodrigues Torres

**Itajubá, MG, Brasil
2015**

**Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Recursos Naturais
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas**

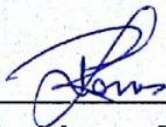
A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a
Monografia

**PROJEÇÕES DE MUDANÇA NO REGIME DE PRECIPITAÇÃO E
TEMPERATURA NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL BASEADO NOS
NOVOS MODELOS CLIMÁTICOS DO IPCC AR5**

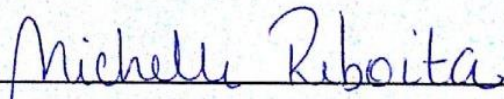
elaborada por
Heloisa Ramos Pereira

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:



Roger Rodrigues Torres, Dr. (UNIFEI)
(Presidente/Orientador)



Michelle Simões Reboita, Dr^a. (UNIFEI)



Sâmia Regina Garcia Calheiros, Dr^a. (UNIFEI)

Itajubá, 09 de novembro de 2015.

AGRADECIMENTOS

A meus avós, minha irmã Débora, minha mãe Isabel e minha Madrinha Marcia por todos os cuidados dispensados a mim durante toda a minha vida.

A meu falecido pai João Ramos Pereira por todas as oportunidades que me proporcionou em vida.

A meu namorado Pedro Furlanetto, sua mãe Maria, seu pai Nilton e seu irmão João Paulo por todo apoio, o qual foi fundamental na conclusão dessa etapa acadêmica.

Ao Dr. Roger Rodrigues Torres pela orientação, apoio e atenção para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos do curso de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) Amanda, Bruno, Carol, Cleverson, Débora, Diego, Igor, Josi, Rebeca, Rodolfo e Thais, e cuja amizade e companheirismo foram fundamentais nesses últimos anos.

A todo o corpo docente do curso de Ciências Atmosféricas da UNIFEI, muito obrigada pelos ensinamentos, apoio e incentivo, por compartilharem conhecimentos, por serem idealistas e por contribuírem para a minha formação acadêmica e profissional.

A meus avós

Orlando Gonçalves
&
Adarci Carrega Gonçalves

A natureza pode suprir todas as necessidades do homem, menos a sua ganância.
Mahatma Gandhi

RESUMO

Monografia de Graduação
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, Brasil

Projeções de mudanças no regime de precipitação e temperatura na região Sudeste do Brasil baseado nos novos modelos climáticos do IPCC AR5

AUTOR(A): HELOISA RAMOS PEREIRA
ORIENTADOR: Dr. ROGER RODRIGUES TORRES
Local e Data da Defesa: Itajubá, 09 de novembro de 2015.

O presente estudo teve como objetivo avaliar as projeções de mudanças nas variáveis temperatura do ar próximo à superfície, doravante denominada temperatura por questões de brevidade, e precipitação para a região Sudeste do Brasil para o final do século XXI. Para isso, foram utilizados os resultados de vinte e quatro Modelos de Circulação Geral (do inglês, GCMs), que integraram o quinto relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças (do inglês, IPCC AR5). Primeiramente os resultados dos GCMs foram confrontados com dados observacionais de temperatura e precipitação provenientes do *Climate Research Unit / University of East Anglia* (CRU/UEA), com a finalidade de avaliar-se o desempenho destes modelos em representar o clima observado da região Sudeste brasileira. Posteriormente, as projeções climáticas destes mesmos modelos foram avaliadas em inúmeros cenários de forçantes climáticas para o período de 2071-2100, estabelecendo-se os padrões climatológicos futuros possíveis para a região de estudo. Finalmente, as simulações referentes ao período 1961-1990 e 2071-2100 foram comparadas para se avaliar a magnitude das projeções climáticas projetadas para o sudeste do Brasil, assim como identificar as incertezas associadas. Ao avaliar os GCMs, constatou-se que os modelos apresentaram um bom desempenho ao simular a climatologia da temperatura. O modelo que melhor representou a climatologia da região Sudeste foi o CanESM2, e para esse mesmo modelo as projeções de aumento da variável são as mais elevadas para todos os cenários, podendo atingir um aumento de até 5°C no final do século XXI. Para a variável precipitação, os modelos apresentaram um bom desempenho na sua simulação climatológica e, projetaram uma variação muito pequena de apenas ± 1 mm.dia⁻¹ para o final deste século. As principais contribuições deste projeto foram uma análise detalhada dos padrões de mudanças climáticas na região mais altamente populosa e economicamente importante do Brasil, utilizando novas e mais complexas simulações e projeções climáticas de GCMs considerados estado da arte. Como consequência, este estudo fornece informações úteis para análises de impacto, adaptação e vulnerabilidade para o sudeste brasileiro.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas, Modelos Climáticos, CMIP5.

LISTA DE FIGURAS

- 2.1 Áreas Urbanizadas no Brasil. Municípios com mais de 100.000 hab. (2005). Domínio selecionado para o estudo (indicado no retângulo vermelho). Fonte:IBGE,DGC/Coordenação Geográfica..... 21
- 3.1 Climatologia média sazonal e anual de temperatura média do ar próximo à superfície observada (a-e), simulada (f-j) e viés associado (l-p). As simulações apresentadas são resultantes da média do conjunto de vinte e quatro modelos do CMIP5 utilizados para o período de 1961 a 1990. As unidades estão em °C.....23
- 3.2 Climatologia média sazonal e anual de precipitação (superior) observada (a-e), simulada (f-j), e viés associado (l-p), resultante da média do conjunto de vinte e quatro modelos do CMIP5 utilizados para o período de 1961 a 1990. As unidades estão em mm.dia⁻¹.....24
- 3.3 Correlação temporal entre a série de temperatura (painéis da esquerda) e precipitação (painéis da direita) simulada pelos MCGs do CMIP5 (indicados na esquerda de cada mapas) e a série observada proveniente do CRU TS 3.0) para o período de 1901 a 1998. Um filtro média móvel foi aplicado a série para reter somente aquela variabilidade com período maior do que 30 anos. O resultado para a média do conjunto de modelos (ENS) é indicado no mapa inferior direito de cada painel.....28
- 3.4 Mesmo que Figura 3.3, exceto para precipitação (mm.dia⁻¹).....29
- 3.5 Mudanças sazonal e anual na temperatura do ar próximo à superfície em °C projetadas para o final do século XXI (2071-2100), para a região sudeste do Brasil. As projeções são obtidas a partir da diferença entre os campos projetados dos períodos de 2071-2100 e dos campos simulados de 1961-1990. Cenários forçantes RCP2.6 (a-e), RCP4.5 (f-j), RCP6.0 (k-o), e RCP8.5 (p-t), provenientes do conjunto CMIP5.....31
- 3.6 Mesma descrição da Figura 3.4 para a variável precipitação em mm.dia⁻¹34
- 3.7 Desvio padrão da mudanças sazonal e anual de temperatura em °C do conjunto de modelos provenientes do CMIP5.....36
- 3.8 Porcentagem de concordância dos modelos nas mudanças sazonal e anual de precipitação projetadas para a região Sudeste do Brasil final do século XXI (2071-2100). Os tons de verde (marrom) indicam a porcentagem de MCGs que projetam um aumento (diminuição) de precipitação sobre a região de estudo. O número de modelos que entram nessa análise em cada cenário é indicado entre parênteses após a nomenclatura do cenário.....37

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Lista de modelos climáticos globais utilizados na análise das variáveis precipitação e temperatura, suas respectivas resoluções horizontais aproximada (em graus de latitude e longitude), os centros desenvolvedores dos e número de rodadas dos modelos para os dados históricos e projetados.....	17
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ASD	- Áreas Susceptíveis à Desertificação
CDO	- <i>Climate Data Operators</i>
CMIP5	- <i>Coupled Model Intercomparison Project Phase 5</i>
CRU	- <i>Climate Research Unit</i>
GCMs	- <i>General Circulation Model</i>
GEEs	- Gases de Efeito Estufa
GRADS	- <i>The Grid Analysis and Display System</i>
IPCC	- <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IPCC AR4	- <i>IPCC Fourth Assessment Report</i>
IPCC AR5	- <i>IPCC Fifth Assessment Report</i>
PAN	- Plano de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca
PBMC	- Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
RCPs	- <i>Representative Concentration Pathways</i>
UNFCCC	- <i>United Nation Framework Convention on Climate Change</i>

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. DADOS E METODOLOGIA	5
2.1 DADOS.....	16
2.2 METODOLOGIA.....	18
2.3. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	8
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	9
3.1 SIMULAÇÃO DOS PADRÕES CLIMÁTICOS OBSERVADOS.....	21
3.2 PROJEÇÕES DE TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO NA REGIÃO SUDESTE.....	28
4. CONCLUSÃO	27
5. REFERÊNCIAS.....	30
APÊNDICE A – SIMULAÇÕES INDIVIDUAIS DOS MODELOS.....	47
APÊNDICE B – PROJEÇÕES INDIVIDUAIS DOS MODELOS.....	57

1. INTRODUÇÃO

O quinto relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (do inglês, IPCC AR5) conclui que a influência humana no sistema climático é evidente, e a emissão de gases de efeito estufa (GEEs) de origem antropogênica que atingiram os maiores níveis da história¹ é a principal causa do aquecimento global observado. Evidências apresentadas naquele relatório, tais como o aquecimento da atmosfera e oceano, a diminuição do volume das geleiras e o aumento do nível do mar, mostraram que o aquecimento global está ocorrendo e de forma anteriormente não observada nas décadas e milênios passados. Segundo o relatório, as três últimas décadas têm sido sucessivamente as mais quentes da história do planeta Terra. Além disso, as projeções de aquecimento global para o final do século XXI retratadas no IPCC AR5 indicam que um aumento da temperatura média global, quando comparada aos valores pré-industriais, poderá alcançar menos de 2°C somente se medidas de urgência, relativas a ações mitigadoras para reduzir as emissões de GEEs forem tomadas, e no pior cenário pode chegar até a 4°C ao final do século se os níveis de emissão continuarem os mesmos que atualmente. Esse limiar de 2°C de aquecimento é definido pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (do inglês, UNFCCC) como o limite de aumento na temperatura para que não haja uma interferência antropogênica perigosa no sistema climático (conhecida como *dangerous climate change*), ou seja, que os ecossistemas possam se adaptar naturalmente às mudanças climáticas, que a produção de alimento não seja prejudicada e ainda que a economia continue a se desenvolver, mas de maneira sustentável.

No entanto, embora o enorme avanço científico e computacional das últimas décadas tenha possibilitado um maior entendimento sobre a complexidade na representação do sistema climático e contribuído valiosamente para as análises das possíveis causas e futuros impactos das mudanças climáticas globais, as incertezas que permeiam as projeções de clima continuam altas.

¹ Segundo os dados da *National Oceanic and Atmosphere Administration* (NOAA), as concentrações de CO₂ atmosférico tem aumentado gradativamente. Em 1970 as concentrações eram em torno de 320 ppm, enquanto que recentemente essa concentração atinge cerca de 400 ppm.

Assim como nos relatórios anteriores, o IPCC AR5 mostra que as incertezas que envolvem as simulações do clima passado, presente e projeções futuras é grande devido a inúmeros fatores, tais como: aspectos estocásticos e não-lineares do sistema climático, aspectos randômicos das forçantes naturais e antropogênicas, desconhecimento do completo estado inicial e das condições de fronteira do sistema e desconhecimento e/ou inabilidade de representação de todos os processos envolvidos no sistema climático em um modelo numérico (GIORGI, 2005; COLLINS, 2007 TORRES e MARENGO 2013; TORRES 2014). Desse modo, as projeções relativas ao cenários de mudanças climáticas possuem e sempre possuirão um intrínseco nível de incerteza, de forma que considerações probabilísticas devem ser sempre levadas em conta. Além disso, as projeções de mudanças climáticas e as previsões de tempo e clima são de uma natureza totalmente distinta, e é importante que o usuário final dessas informações entenda as diferenças e esteja ciente de suas incertezas e limitações (GIORGI, 2005; XU et al., 2009).

Colocando em pauta o contexto brasileiro, o Brasil está entre as regiões do planeta que mais poderão ser afetadas pelas mudanças climáticas projetadas para o final deste século (IPCC, 2007; BAETTIG et al., 2007; TORRES e MARENGO 2014). Esta região é vulnerável aos extremos climáticos atuais e poderá ser profundamente afetada em um cenário de aquecimento global (TORRES et al. 2012, MARENGO et al., 2010a,b; RUSTICUCCI et al., 2010). Com uma economia fortemente baseada na exportação de produtos agrícolas (IPEA 2011), uma matriz energética dominada por energias renováveis altamente susceptíveis a variações climáticas (LUCENA et al., 2009) e com inúmeros problemas socioambientais associados aos padrões de desenvolvimento e transformações do espaço, essa região sofre constantemente com eventos extremos de temperatura e precipitação que causam enormes danos econômicos e inúmeras perdas humanas. As recorrentes chuvas e deslizamentos seguidos de longos períodos de seca presenciados na região Sudeste, sucessão de intensas secas e enchentes na região amazônica (MARENGO et al., 2011) e Nordeste (PONCE, 1995; MARENGO et al., 2015), e recorrência anual de epidemias de dengue por todo o Brasil, revelam quão despreparado o país está para enfrentar os problemas decorrentes de uma possível mudança climática (TORRES et al. 2012). Portanto, devido ao avanço das mudanças climáticas e a clara vulnerabilidade do Brasil as mesmas, é provável que o país tente cumprir suas

disposições perante a UNFCCC, com medidas de mitigação que prometem conduzir a uma redução de emissões entre 36,1% e 38,9% abaixo de suas emissões projetadas para 2020.

Adicionalmente, a região Sudeste do Brasil possui o maior número de habitantes da federação (~ 81 milhões de habitantes), concentrando cerca de 42% do total populacional, com um índice de urbanização de mais de 90% (IBGE, 2011). Esta região corresponde a mais da metade do PIB brasileiro, abrigando os estados mais ricos do país (São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais). No entanto, segundo estudos recentes utilizando projeções futuras de clima e índices sociais de vulnerabilidade, a região Sudeste, principalmente as regiões metropolitanas, podem ser profundamente afetadas pelas mudanças climáticas projetadas para o século XXI, principalmente aquelas relacionadas com mudanças no regime de precipitação, temperatura e extremos climáticos (ex: enchentes e secas) (NOBRE et al. 2010, TORRES et al. 2012, TORRES e MARENGO 2013, DARELA-FILHO et al. 2015). A agricultura dessa região também poderá sofrer com os efeitos adversos das mudanças climáticas. Por exemplo, os altos valores de aquecimento projetados para essa região no quarto e quinto relatório do IPCC (IPCC AR4 e AR5, respectivamente) para o final do século XXI pode impactar fortemente a produção de café, tornando inviável a plantação do produto nos estados de Minas Gerais e São Paulo, obrigando os produtores a transferirem a produção para a região Sul do Brasil, onde a previsão é de temperaturas mais amenas e com riscos reduzidos das típicas geadas (CAMARGO, 2010).

As avaliações das mudanças climáticas para os cenários futuros baseiam-se no uso de Modelos de Circulação Geral (do inglês, GCMs), que representam o comportamento geral da atmosfera e dos oceanos, assim como muitas das interações entre as outras componentes do sistema climático (biosfera, criosfera e litosfera). Apesar dos contínuos avanços desses modelos e o crescimento de recursos computacionais para representar a complexidade do sistema climático, possibilitando aos cientistas a inclusão de inúmeros processos físicos e dinâmicos e um aumento da resolução espacial e temporal com a qual eles são configurados, os modelos continuam a ser processados com baixa resolução espacial (da ordem de centenas de quilômetros) e parametrizações físicas inadequadas. Estas

inadequações se devem em parte à dificuldade da representação de alguns processos físicos e dinâmicos numa escala espacial mais grosseira, e em outra, devido ao ainda pouco conhecimento sobre todos os processos envolvidos (GIORGI, 2005; COLLINS, 2007; LIN, 2007; RÄISÄNEN, 2007; BOÉ et al., 2009; ANNAN e HARGREAVES, 2010). Por esses e outros motivos, os GCMs não possuem uma perfeita representação do clima atual e não possibilitam um detalhamento mais regional das mudanças climáticas, imprescindíveis nos estudos de adaptação, impacto e vulnerabilidade (GIORGI, 2005; COLLINS, 2007; TEBALDI e KNUTTI, 2007; RÄISÄNEN, 2007, TORRES e MARENGO 2012).

Portanto, para aumentar a confiabilidade dos resultados que os modelos numéricos apresentam, vários GCMS são comumente utilizados para se ter uma estimativa das incertezas associadas aos padrões climáticos simulados e projetados. Além disso, à medida que ocorrem alterações nos modelos, usando-se novas técnicas, metodologias e processos, faz-se necessária uma constante avaliação de quão bem os modelos se aproximam das observações, assim como, quão próximas são as estimativas de mudanças projetadas.

Reconhecendo as incertezas envolvidas e os possíveis impactos que as mudanças climáticas podem causar, o presente estudo teve como objetivo avaliar as projeções de mudanças nos regimes de precipitação e temperatura para a região Sudeste do Brasil, até o final do século XXI. Neste contexto, o estudo proposto justifica-se pela importância de avaliação de novos cenários de projeções climáticas decorrentes do uso de modelos climáticos mais complexos e realísticos² na região mais altamente populosa e economicamente importante do Brasil. Além disso, ao utilizar-se vários GCMs para estimarmos os padrões médios de mudanças climáticas com seus respectivos níveis de incerteza no sudeste brasileiro, disponibilizaremos uma ferramenta muito útil para os estudos de impacto, adaptação e vulnerabilidade na região.

² Mais realísticos do ponto de vista de que os novos GCMs integrantes do IPCC AR5 incluem importantes processos e/ ou *feedbacks* não abordados (ou abordados de uma forma mais simplificada) nas versões anteriores, como ciclo de carbono, processos biogeoquímicos e de superfície.

2. DADOS E METODOLOGIA

2.1 DADOS

Para avaliar as projeções de mudanças no regime de precipitação e temperatura para o final do século XXI na região Sudeste do Brasil foram utilizados os dados simulados e projetados dessas variáveis gerados por vinte e quatro GCMs pertencentes ao *Coupled Model Intercomparison Project phase 5* (CMIP5) e fornecidos pelo *World Climate Research Programme's* (WCRP's) (Tabela 1). Mais informações sobre os modelos participantes do CMIP5 e das simulações disponíveis podem ser encontradas em Taylor et al. (2012), e no sítio <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/index.html>. Adicionalmente, para uma avaliação das simulações do GCMs utilizou-se dados globais observados de precipitação e temperatura produzidos pelo CRU/UEA (*Climate Research Unit / University of East Anglia*) com resolução de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Os GCMs e as observações apresentam diferentes resoluções horizontais, e por motivo de intercomparação, os dados foram interpolados para uma grade regular de resolução $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ (graus de latitude/longitude).

As projeções de mudanças climáticas fornecidas pelo conjunto de modelos provenientes do CMIP5 utilizam quatro cenários de forçantes climáticas, denominados *Representative Concentration Pathway* (RCPs): RCPs 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5. O chamado RCP2.6 é o cenário mais otimista, o qual considera que a sociedade poderá reduzir consideravelmente os níveis de emissão de GEEs e ainda colocar em prática ações mitigadoras muito eficientes. As projeções baseadas nesse cenário apresentam uma forçante radiativa que atinge um nível máximo até a metade do século XXI, declinando até o final do século e atingindo a menor forçante radiativa ($\sim 2,6 \text{ Wm}^{-2}$). Os cenários RCP4.5 e RCP6.0 são cenários considerados intermediários, com algumas ações mitigadoras e um aumento provável na temperatura média global maior que 2°C até o final do século XXI, implicando em 2100 em uma forçante radiativa de 4,5 e 6,0 Wm^{-2} , respectivamente. Já o cenário RCP8.5 é o mais pessimista, o qual considera que a sociedade deverá continuar a emitir as mesmas quantidades atuais de GEEs e que não coloque em prática ações mitigadoras para reduzir as emissões e os efeitos adversos das mudanças climáticas, podendo atingir uma forçante radiativa de 8,5 Wm^{-2} até o final do século

XXI. O termo forçante radiativa é definido pelo IPCC AR4 como a diferença em irradiância líquida na tropopausa (em Wm^{-2}) entre um estado de referência e um estado perturbado. Assim, uma forçante radiativa positiva indica que um determinado agente climático tende a aquecer o planeta, e uma forçante negativa, a resfriar o planeta. **O número de modelos que simulam e projetam as variáveis analisadas varia para cada cenário: 21 modelos para o cenário RCP2.6, 24 modelos para o RCP4.5, 15 modelos para o RCP6.0 e 23 para o RCP8.5.**

Tabela 1 - Lista de modelos climáticos globais utilizados na análise das variáveis precipitação e temperatura, suas respectivas resoluções horizontais aproximada (em graus de latitude e longitude), e o número de rodadas utilizados para cada experimento.

Modelos	Resolução (lat/lon)	Historical	RCP			
			2.6	4.5	6.0	8.5
FGOALS-g2	3.1°x2.8°	4	1	1	—	1
BCC- CSM1-1	2.8°x2.8°	3	1	1	1	1
CanESM2	2.8°x2.8°	5	5	5	—	5
MIROC-ESM	2.8°x2.8°	3	1	1	1	1
FIO-ESM	2.8°x2.8°	1	1	1	1	1
MIROC-ESM-CHEM	2.8°x2.8°	1	1	1	1	1
GFDL-CM3	2.0°x2.5°	5	1	1	1	1
GFDL-ESM2G	2.0°x2.5°	1	1	1	1	—
Giss-E2-R	2.0°x2.5°	5	1	5	1	1
GFDL-ESM2M	2.0°x2.5°	1	1	1	1	1
IPSL-CM5A-LR	1.9°x3.8°	4	1	3	1	3
NorESM1-M	1,9° x 2,5°	3	1	1	1	1
CSIRO-Mk3-6-0	1.9°x1.9°	10	10	10	10	10
MPI-ESM-LR	1.9°x1.9°	3	3	3	—	3
INMCM4	1.5°x2.0°	1	—	1	—	1
CNRM-CM5	1.4°x1.4°	1	1	1	—	1
MIROC5	1.4°x1.4°	1	1	1	1	1
IPSL-CM5A-MR	1.3°x2.5°	1	1	1	—	1
HadGEM2-CC	1.3°x1.9°	1	—	1	—	1
HadGEM2-ES	1.3°x1.9°	4	1	1	1	4
ACCESS1.0	1.3°x1.9°	1	—	1	—	1
EC-EARTH	1.1°x1.1°	1	1	1	—	1
MRI-CGCM3	1.1°x1.1°	5	1	1	1	1
CCSM4	0.9°x1.3°	6	5	5	5	5

2.2 METODOLOGIA

Primeiramente, para analisar os dados utilizados neste estudo, foram utilizados um conjunto de comandos estatísticos e aritméticos contidos no *software Climate Data Operators* (CDO), para processar os dados meteorológicos extraídos em formato GRIB e netCDF. O CDO é uma ferramenta muito útil para o tratamento de dados meteorológicos, amplamente utilizado na comunidade meteorológica internacional (<https://code.zmaw.de/projects/cdo>). Para automatizar as tarefas utilizando os comandos do CDO, foram criados scripts em linguagem Shell, ou seja, os comandos que seriam digitados e executados no terminal linux foram salvos em um *script* em Korn Shell e posteriormente executados todos de uma só vez através da execução do *script* no terminal. Os comandos do CDO (Anexo A) nesse estudo foram utilizados para:

- Calcular a média sazonal das variáveis analisadas de cada modelo e a média sazonal do conjunto de todos os modelos;
- Selecionar a região de estudo (utilizando coordenadas de latitude e longitude correspondentes a Região Sudeste);
- Selecionar os dois períodos de interesse na base de dados: um período referente a normal climatológica de 1961-1990 dos dados observacionais e simulados e outro referente as projeções para o final do século XXI de 2071-2100, nos diferentes cenários forçantes utilizados;
- Interpolação dos dados para uma mesma grade de resolução espacial, permitindo a intercomparação entre os modelos;
- Calcular o viés em escala sazonal de cada modelo e do conjunto de todos os modelos (simulação menos observação entre os dados observados e as simulações dos GCMs para toda a região de estudo) para avaliar a consistência entre os campos de precipitação e temperatura observada e simulada por cada modelo global utilizado;
- Calcular a projeção estimada em escala sazonal de cada modelo e do conjunto de todos os modelos (projeções dos GCMs em 2071-2100 nos diferentes RCPs menos simulações dos mesmos modelos em 1961-1990).

Após a utilização do CDO para todos os cálculos mais robustos, utilizou-se o *software Grads* (*Grid Analysis and Display System*), amplamente utilizado em

Geociências, no qual é possível a visualização espacial dos resultados. Um dos cálculos realizados pelo CDO foram os correspondentes as correlações temporais entre a série de temperatura/precipitação simulada pelos GCMs e a série observada de cada variável proveniente do CRU TS 3.0. Para o período de 1901 a 1998. Um filtro média móvel foi aplicado a série para reter somente aquela variabilidade com período maior do que 30 anos.

Os valores de correlação pode assumir valores entre -1 e 1 indicando, respectivamente, perfeita anticorrelação e perfeita correlação, um valor nulo indica que não há correlação entre os dados da série. É calculada conforme a Equação 1.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (A_i - \bar{A})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^{i=n} (A_i - \bar{A})^2}} \quad (1)$$

Tal que n corresponde ao número de observações, P é simulação e A , a observação.

2.3. Descrição da área de estudo

A área de estudo avaliada no presente trabalho corresponde à região Sudeste do Brasil, que abriga quatro estados: São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais e Espírito Santo. Juntos esses estados possuem as maiores taxas de urbanização do território brasileiro, com o maior número de cidades com mais de 100.000 habitantes (IBGE, 2005), os chamados grandes centros urbanos (Figura 2.1). Segundo o anuário *Valor 1000*, publicado em 2012, 66,2% das 1000 maiores empresas instaladas no Brasil têm sede na região Sudeste.

A região Sudeste tem sua extensão territorial sobre importantes biomas brasileiros: o Cerrado, a Mata Atlântica e uma pequena porção da Caatinga localizada no extremo norte de Minas Gerais. Segundo dados da Embrapa (2003), a temperatura tem grande variabilidade ao longo da região Sudeste. As temperaturas mínimas ocorrem predominantemente nas regiões mais montanhosas, que cobrem 32,3% do Estado de Minas Gerais e 21,2% do Estado de São Paulo, e o regime de chuvas apresentam os maiores valores de outubro a março.

Um dos principais sistemas meteorológicos que atua na região Sudeste e contribui para os máximos de precipitação é uma zona de convergência do fluxo de umidade na baixa troposfera, a chamada Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), exercendo uma importante influência no regime de chuvas das regiões Sul/Sudeste do Brasil no período de verão. Além disso, alguns sistemas meteorológicos tais como os sistemas frontais, os Vórtices Anticiclônicos de Altos Níveis e a Alta da Bolívia intensificam a ZCAS, assim também influenciam no regime de chuvas da região Sudeste (Reboita et. al., 2010).

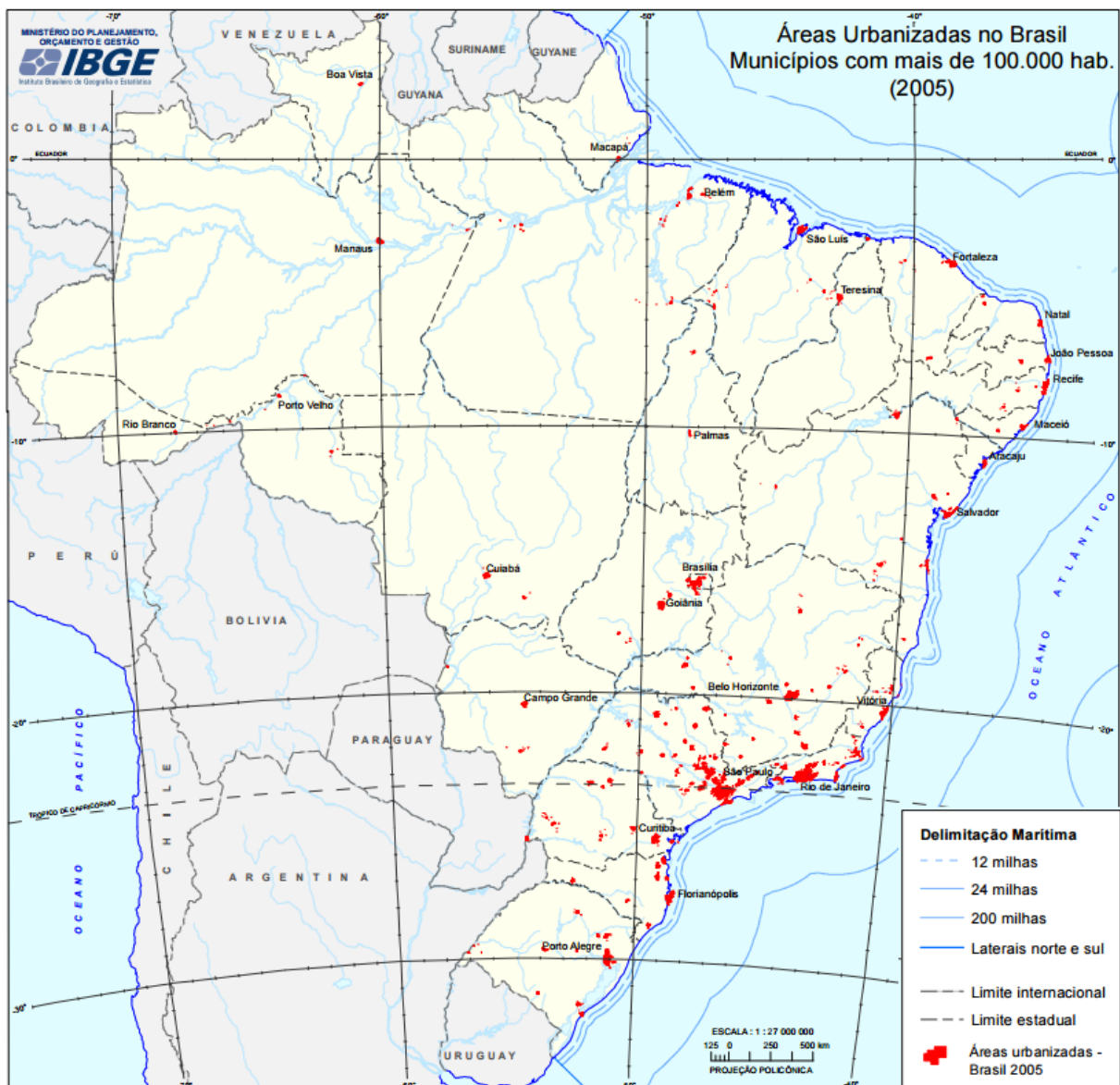


Figura 2.3 - Áreas Urbanizadas no Brasil. Municípios com mais de 100.000 hab. (2005). Domínio selecionado para o estudo (indicado no retângulo vermelho). Fonte: IBGE, DGC/Coordenação Geográfica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na seção 3.1 é feita a análise do desempenho dos vinte e quatro GCMs do CMIP5 utilizados nesse estudo, em simular a climatologia observada (1961-1990) das variáveis temperatura e precipitação sobre a região Sudeste do Brasil. Após tais análises, na seção 3.2 são mostrados os resultados obtidos pelos mesmos modelos e para as mesmas variáveis, porém com relação as projeções de mudanças para o final do século XXI (2071-2100) sob diferentes cenários de forçantes climáticas.

3.1 SIMULAÇÕES DOS PADRÕES CLIMÁTICOS OBSERVADOS

Os padrões climáticos simulados pelos GCMs para a região Sudeste são apresentados nas figuras 3.1 e 3.2, e foram plotados a fim de analisar o desempenho de cada modelo em representar a climatologia observada no período de 1961 a 1990, a partir da comparação dos resultados com os dados observados extraídos do CRU TS 3.0.

Na figura 3.1 é apresentada a climatologia média sazonal e anual da temperatura e viés associado, resultante da média do conjunto dos modelos do CMIP5 utilizados para o período de 1961 a 1990. Para o verão austral (DJF), em geral o conjunto de modelos representa bem a climatologia dessa variável, no qual o viés associado com as simulações indicam que, em média, os modelos subestimam ou superestimam em cerca de menos de 1°C os valores de temperatura média para a maior parte da região Sudeste. Exceto sobre uma pequena porção na região central do estado de Minas Gerais e sobre o Espírito Santo, o viés excede 1°C, em que os modelos subestimam em até 2°C a temperatura observada. Para os meses de outono (MAM), os modelos passam a apresentar suavemente uma tendência maior de subestimar a climatologia da temperatura na porção norte de Minas Gerais, apresentando um viés associado de até 4°C. Para esse mesmo período, o restante do estado de Minas Gerais, exceto uma pequena porção sul, apresenta na média do conjunto um viés de $\pm 1^\circ\text{C}$ na temperatura. No período correspondente ao inverno austral (JJA), os modelos passam a subestimar com mais intensidade (entre 2 a 4°C) os padrões observados de temperatura para boa parte do estado de Minas Gerais, incluindo as porções norte, noroeste e o triângulo mineiro. Por outro lado, o viés associado nas demais regiões, como São Paulo e Rio de Janeiro, indicam uma

superestimativa ou subestimativa de apenas 1°C. Assim como em DJF, para os meses correspondentes a primavera (SON), os modelos tendem a subestimar ou superestimar em no máximo 1°C os valores de temperatura. Para o extremo oeste de São Paulo nos meses de SON, os modelos apontam um viés mais elevado, com uma superestimativa de até 4°C. O padrão observado em JJA influencia na média anual dos modelos, e a climatologia da temperatura simulada pelos modelos mostra ser subestimada para boa parte da extensão do território do estado de Minas Gerais, exceto na porção sul e zona da mata e todo o estado do Espírito Santo, com um viés associado de até 2°C.

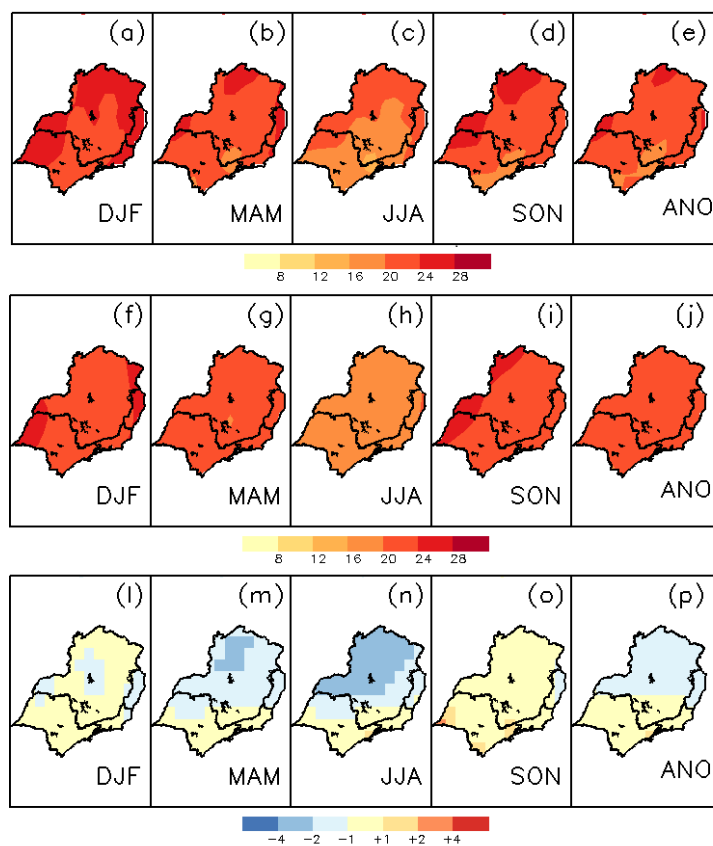


Figura 3.1 - Climatologia média sazonal e anual de temperatura média do ar próximo à superfície observada (a-e), simulada (f-j) e viés associado (l-p). As simulações apresentadas são resultantes da média do conjunto de vinte e quatro modelos do CMIP5 utilizados para o período de 1961 a 1990. As unidades estão em °C..

Na figura 3.2 é apresentada a climatologia média sazonal e anual da variável precipitação e viés associado para a região Sudeste, resultante da média do conjunto dos modelos do CMIP5 utilizados para o período de 1961 a 1990. Nos meses de DJF, os modelos apresentam uma boa representação da climatologia

observada de precipitação para maior parte do Sudeste, com um viés associado de no máximo ± 1 mm.dia⁻¹. No entanto, para o litoral norte de São Paulo, boa parte do sul do Rio de Janeiro e Minas Gerais, há uma subestimativa de precipitação entre 1 a 2 mm.dia⁻¹, enquanto que na porção sudoeste de São Paulo, os modelos apresentam uma tendência a superestimar a precipitação, com um viés associado de até 2 mm.dia⁻¹. Para os meses de MAM grande parte da região sudeste tem sua climatologia bem representada pelos modelos, porém na porção referente ao litoral de São Paulo os modelos subestimam a precipitação em cerca de 2 mm.dia⁻¹, e para uma pequena porção do Vale do Jequitinhonha em Minas Gerais os modelos superestimam os valores de precipitação também em cerca de 2 mm.dia⁻¹. Quando comparado aos meses de DJF e MAM, os meses de JJA apresentaram os menores valores de viés, com um viés associado muito pequeno, sendo que apenas no litoral de São Paulo os modelos subestimam suavemente os valores climatológicos em cerca de 1 mm.dia⁻¹. Já para os meses de SON, em grande parte do estado de Minas Gerais e todo a extensão do Espírito Santo, os modelos apresentam uma tendência a subestimar a precipitação, com um viés de cerca de 1 a 2 mm.dia⁻¹.

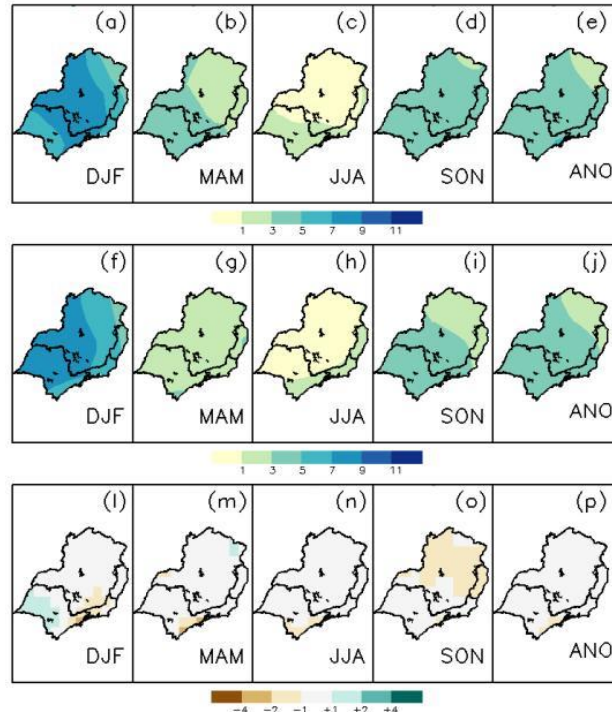


Figura 3.2 - Climatologia média sazonal e anual de precipitação (superior) observada (a-e), simulada (f-j), e viés associado (l-p), resultante da média do conjunto de vinte e quatro modelos do CMIP5 utilizados para o período de 1961 a 1990. As unidades estão em mm.dia

A média anual indica que os modelos em geral apresentam um bom desempenho em simular a climatologia, visto que o viés observado é pequeno para toda a região sudeste, e no máximo tende a subestimar ou superestimar em apenas 1 mm.dia⁻¹.

Os vinte e quatro GCMs provenientes do CMIP5 utilizados nesse estudo, que constituem a média analisada anteriormente, apresentam suas particularidades e um desempenho bom ou ruim que varia de acordo com a época do ano e das características dos modelos. Estudos anteriores também mostram que o desempenho dos modelos em simular toda a América do Sul, para a variável precipitação, apresentam inúmeros vieses sobre o continente, que são dependentes dos modelos analisados (VERA et. al., 2006; BOMBARDI; CARVALHO, 2009; TORRES, 2014).

Os modelos que mais subestimam a climatologia, com relação a temperatura são (Vide apêndice A, Figura A2): ACCESS, que para a região norte de Minas Gerais e boa parte do nordeste do estado de São Paulo chega a ter um viés associado de 4°C abaixo da climatologia observada; CanESM2, nos meses de JJA apresenta um viés associado de cerca de 3°C para região central e norte de Minas Gerais; CCSM4, que também para os meses de JJA, em boa parte do estado de Minas Gerais e centro oeste de São Paulo tem um viés associado de 3°C; CNRM, apresenta um viés associado de cerca de 3°C para toda região compreendida entre os estados de Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro, principalmente nos meses de MAM e JJA; EC-EARTH, apresenta para todas as médias mensais um alto viés associado a valores subestimados de temperatura, chegando a 5°C nos meses de DJF na região extremo oeste de Minas Gerais e nordeste de São Paulo; FIO-ESM, nos meses de JJA também apresenta pontos da região norte e extremo oeste de Minas Gerais com altos valores de viés associado; HadGEM-CC e HadGEM-ES, são modelos que apresentam um viés associado para boa parte da região sudeste, incluindo uma subestimativa de cerca de 5°C em certas áreas do nordeste de São Paulo. Por outro lado, os modelos que superestimam os valores climatológicos são: CanESM2, que para os meses de SON, principalmente na região oeste de São Paulo e triângulo mineiro, chega a ter um viés associado de até 4 °C acima da climatologia observada; CSIRO, apresenta superestimativas para o sul de

Minas Gerais e toda faixa litorânea de São Paulo; FGOALS, superestima os valores climatológicos para os meses de JJA e SON, para a região litoral de São Paulo; GFDL-2G e GFDL-2M, para os meses de SON superestimam os valores de temperatura para a região do estado de São Paulo e parte do sul de Minas Gerais; GISS-E2-R, apresenta um viés associado a superestimativas em todo o estado de São Paulo e boa parte da região oeste de Minas Gerais, para todas as épocas do ano; IPSL-MR, IPSL-LR e MIROC5, apresentam superestimativas consideráveis para boa parte dos estados de São Paulo e Rio de Janeiro. Por outro lado, os modelos que melhor representaram a média anual da climatologia da temperatura, ou seja, obtiveram os menores vieses associados quando comparados aos demais modelos foram o CanESM2, CCSM4, FGOALS, GFDL-CM3 e o IPSL-MR.

Com relação a variável precipitação (Apêndice A, Figura A1), para os meses de JJA os modelos em geral apresentaram um baixo viés associado, mostrando ter um bom desempenho para simular esse período. No entanto, o período supracitado refere-se a estação seca da região de estudo. Porém, para as demais épocas do ano, os modelos superestimam e/ou subestimam os valores também de acordo com a época do ano a qual estão representando. Os modelos mostraram novamente terem suas limitações na representação da climatologia observada para essa variável. Os modelos que subestimaram consideravelmente a climatologia foram: CanESM2, que para os meses de SON na região norte e central de Minas Gerais e norte do Espírito Santo; os modelos CCSM4 e FGOALS, para os meses de SON subestimam em até 3 mm.dia^{-1} a precipitação para a região norte do Espírito Santo e para os meses de DJF subestimam entre 1 a 2 mm.dia^{-1} para os estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais e o litoral de São Paulo; GFDL-2M, GFDL-2G, GFDL-CM3, GISS-E2-R, IPSL-LR, IPSL-MR e INMCM4, são modelos que para os meses de DJF e SON apresentaram um desempenho ruim, subestimando os valores para boa parte da região sudeste em SON e boa parte de Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro em DJF; NorESM1-M, para os meses de DJF, MAM e SON apresentou um viés associado de até 4 mm.dia^{-1} abaixo do observado. Os modelos que superestimaram a climatologia foram: ACCESS, para os meses de DJF, principalmente na região central do estado de São Paulo e sul de Minas Gerais; enquanto que HadGEM-ES e MIROC5 são modelos que apresentaram a tendência de superestimar a variável precipitação principalmente nos meses de DJF. Apesar

das superestimativas ou subestimativas feitas por alguns dos modelos, em geral os modelos demonstraram um bom desempenho ao simular a variável precipitação. Porém, dentre os modelos os que melhor representaram essa variável, apresentando na média anual um viés muito pequeno, da ordem de $\pm 1 \text{ mm.dia}^{-1}$, foram CSIRO, EC-EARTH, FIO-ESM, GFDL-CM3, MIROC-ESM, MIROC-CH e MPI-LR.

Nas figuras 3.3 e 3.4 são apresentados os resultados das correlações temporais de todas as simulações dos GCMs do CMIP5 com as observações para as variáveis de temperatura e precipitação, respectivamente. Para a variável temperatura, como mostra a correlação entre as observações e a média do conjunto de modelos representada pela sigla ENS, os modelos juntos obtiveram um bom desempenho, com uma correlação de cerca de 0,9 para a maior parte da área de estudo (Figura 3.3). Entretanto, particularmente os modelos HadGEM-ES e HadGEM-CC apresentaram um desempenho ruim para grande parte da área de estudo, chegando a atingir uma correlação negativa de, aproximadamente, 0,9 para as regiões norte de São Paulo e triângulo mineiro. Assim como os modelos citados anteriormente, outros modelos que apresentaram correlações negativas foram GFDL-CM3, GFDL-2G e GFDL-2M. Todavia, a maioria dos outros GCMs apresentaram um bom desempenho em simular a série temporal de temperatura, principalmente os modelos: FGOALS, INMCM4, IPSL-LR, IPSL-MR e MIROC-ESM. Dentre os modelos que apresentaram correlações positivas e negativas alternadas sobre o domínio de estudo podemos destacar os modelos MIROC-CHEM, MIROC5, e GFDL-CM3. No caso do MIROC-CHEM, para boa parte da região do estado de São Paulo, Espírito Santo e fronteiras do estado de Minas Gerais (para uma pequena parte da região central de Minas Gerais), o modelo apresentou correlações positivas (negativas). Enquanto no MIROC5, as correlações negativas (positivas) foram para a maior parte do estado de São Paulo (foram para para os estados de Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro).

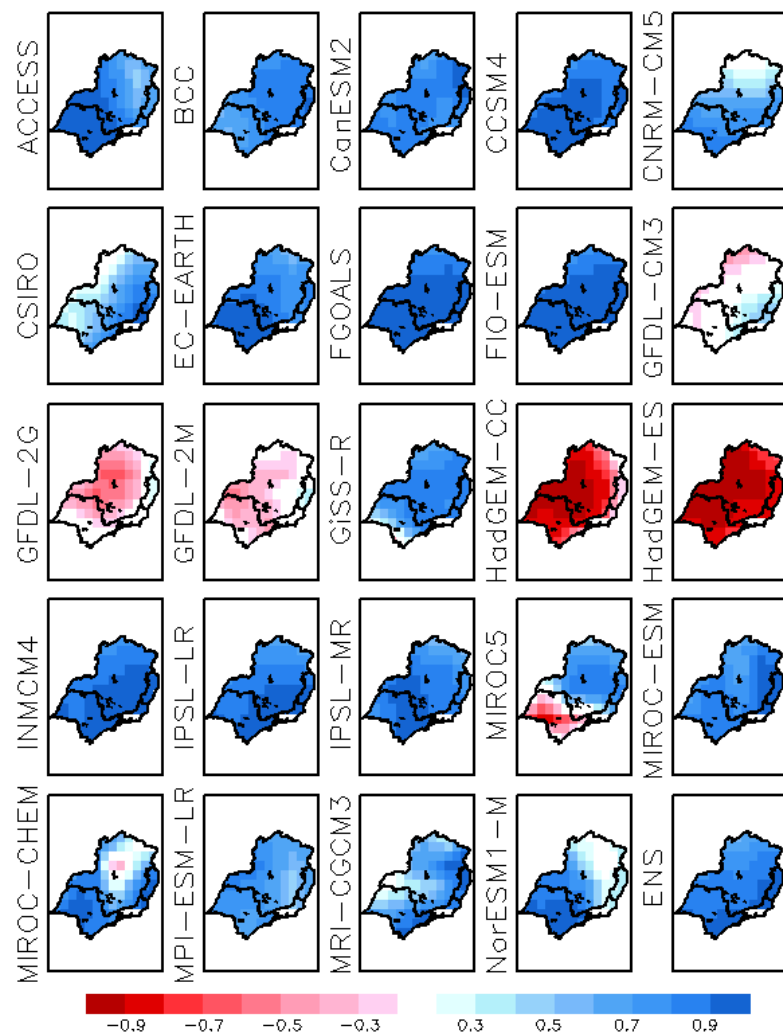


Figura 3.3 - Correlação temporal entre a série de temperatura e simulada pelos MCGs do CMIP5 (indicados na esquerda de cada mapas) e a série observada proveniente do CRU TS 3.0 para o período de 1901 a 1998. Um filtro média móvel foi aplicado a série para reter somente aquela variabilidade com período maior do que 30 anos. O resultado para a média do conjunto de modelos (ENS) é indicado no mapa inferior direito de cada painel.

Para a variável precipitação, as correlações obtidas, mostradas na figura 3.4, foram negativas para a maior parte dos modelos. Os maiores valores de correlação positiva foram obtidos pelos modelos CanESM2, BCC, FIO-ESM, MIROC5 e MIROC-CHEM e mas apenas para a região do estado de São Paulo e pequenas porções dos demais estados que constituem o sudeste do Brasil. Já os modelos HadGEM-CC, HadGEM-ES MPI-ESM-CGCM3 e NorESM1-M, apresentaram os

maiores valores de correlação negativa, principalmente para a região sul de Minas Gerais e todo o litoral de São Paulo.

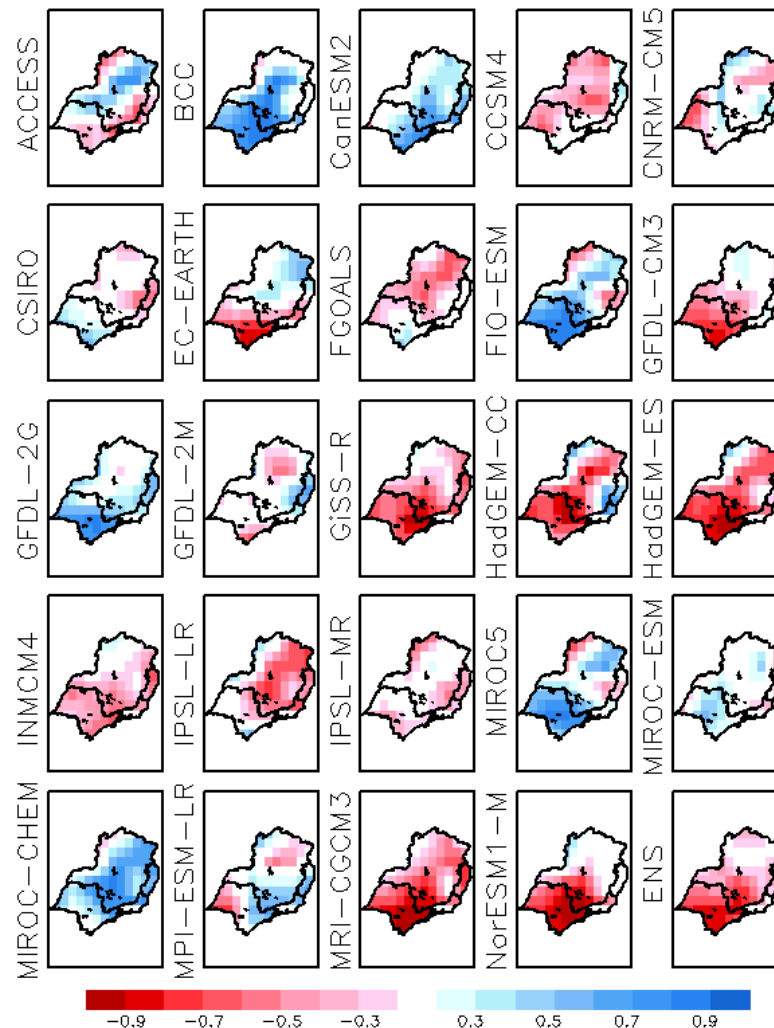


Figura 3.4 - Mesmo que Figura 3.3, exceto para precipitação (mm.dia-1).

3.2 PROJEÇÕES DE TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO NA REGIÃO SUDESTE

Com base no desempenho dos modelos em simular a climatologia da região Sudeste, análises acerca do desempenho desses modelos em projetar as variáveis precipitação e temperatura podem ser feitas. No entanto, como visto nos resultados anteriores, os modelos não representam acuradamente a climatologia das variáveis. Além disso, diversos estudos que avaliaram as simulações utilizadas no IPCC AR5 (BLÁZQUEZ; NUÑEZ, 2013; IPCC, 2013; JOETZJER et al., 2013; JONES; CARVALHO, 2013), concluem que nenhum modelo tem um desempenho superior

em representar o clima observado, especialmente sobre a América do Sul. Apesar disso, um modelo que simula consideravelmente bem a climatologia, ainda que não apresente um desempenho alto, pode ter uma projeção de mudança considerada mais confiável do que um modelo que não simula bem os dados climatológicos observados.

Nessa seção, são discutidos os resultados relacionados a projeções de mudanças para as variáveis temperatura e precipitação. O desvio padrão entre as inúmeras projeções de mudança de temperatura também é analisado para verificar as diferenças ao projetar essa variável pelos diferentes modelos do conjunto. E por fim, são apresentados os resultados com relação a concordância dos modelos ao projetar as possíveis tendências de mudanças sazonal e anual na precipitação para o final do século XXI. Tanto o desvio padrão das projeções de mudança de temperatura quanto a concordância no sinal de mudanças de precipitação são importantes indicativos de incertezas nas projeções.

De acordo com os diferentes cenários forçantes, as projeções de mudanças na temperatura mostram uma tendência unânime de aumento na média do conjunto de modelos (Figura 3.5), assim como quando avaliado os modelos individuais (Apêndice B, Figura B1). Para o cenário mais otimista, o RCP2.6, a região de estudo apresenta um aumento na temperatura que pode atingir cerca de 2°C para boa parte do norte de Minas Gerais nos meses de DJF, boa parte do oeste de São Paulo e noroeste de Minas Gerais e triângulo mineiro nos meses de JJA e praticamente toda a região sudeste nos meses de SON. Isto é, o cenário considerado o de menor forçante radiativa devido a práticas mitigadoras presente no IPCC AR5, que são chamadas de “mitigação agressiva”, mostra que a região de estudo ainda é vulnerável. Assim, se as medidas mitigadoras da magnitude que o cenário RCP2.6 exige não forem tomadas, a região irá sofrer com um aumento de pelo menos os 2°C que o IPCC AR5 projeta para o cenário mais otimista. Ainda no cenário RCP2.6, as projeções de aumento são menores para toda uma faixa que vai do litoral de São Paulo, passa pelo Rio de Janeiro e chega ao extremo norte do Espírito Santo, abrangendo também as regiões no lado leste de Minas Gerais, onde as temperaturas podem aumentar cerca de 1,5°C. Individualmente, os modelos que apresentaram as maiores projeções, em torno de 3 a 4°C, para aumento de

temperatura no cenário RCP2.6 foram os modelos CanESM2, MIROC-ESM e o GFDL-CM3. Enquanto que para esse mesmo cenário, o restante dos modelos projetaram um aumento menos intenso para temperatura em torno de 2°C.

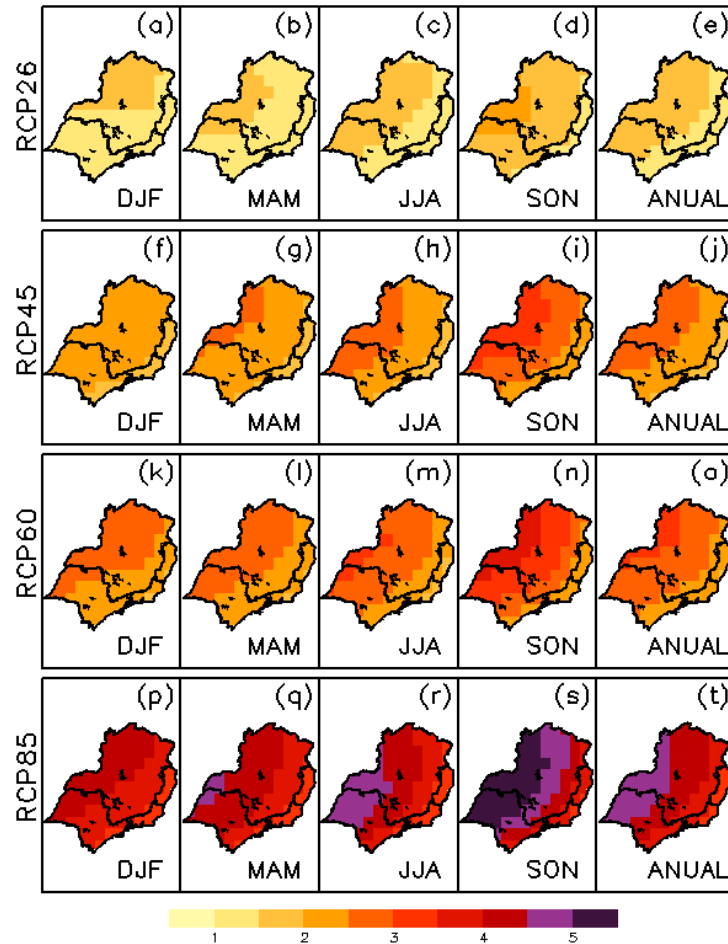


Figura 3.5 - Mudanças sazonal e anual na temperatura (em °C) projetadas para o final do século XXI (2071-2100), para a região sudeste do Brasil. As projeções são obtidas a partir da diferença entre os campos projetados dos períodos de 2071-2100 e dos campos simulados de 1961-1990. Cenários forçantes RCP2.6 (a-e), RCP4.5 (f-j), RCP6.0 (k-o), e RCP8.5 (p-t), provenientes do conjunto CMIP5.

Os cenários intermediários, RCP4.5 e RCP6.0, mostram que a projeção de aumento nas temperaturas podem atingir níveis ainda maiores de aumento dentro da área de estudo, mesmo se as ações mitigadoras às mudanças climáticas forem relativamente fortes, como prevêem esses cenários. Para os meses de SON, ambos os cenários projetam um aumento na temperatura ultrapassando os 3°C para uma grande área da região de estudo, praticamente todo o estado de Minas Gerais e boa parte do oeste e nordeste de São Paulo. Os meses de JJA seguem também a

tendência de aumento segundo as projeções, porém com menor magnitude quando comparado a SON, atingindo um aumento de até 3°C em certas regiões e, segundo a projeção do RCP6.0 para a região nordeste de São Paulo, triângulo mineiro e pequena porção do noroeste de Minas Gerais esse aumento pode ultrapassar os 3°C. Mesmo as projeções que mostram a tendência de um menor aumento nas temperaturas para esses cenários, indicam que as temperaturas podem aumentar pelo menos cerca de 2,5°C para toda faixa litorânea de São Paulo até o norte do Espírito Santo, abrangendo Zona da Mata, e Vale do Rio Doce localizados no leste de Minas Gerais. Em termos de avaliação individual de cada projeção por modelo, os modelos ACCESS, CanESM2, CSIRO, GFDL-CM3, HadGEM-CC, HadGEM-ES, IPSL-LR, IPSL-MR, MIROC-ESM e MIROC-CH são os que apresentam os maiores valores de aumento de temperatura, projetando um aumento entre 4 a 5°C. Em geral, a região norte de Minas Gerais e nordeste de São Paulo foram as regiões para as quais esses modelos apresentaram as maiores projeções de aumento na temperatura. Os demais modelos no entanto, projetaram um aumento abaixo de 4°C, principalmente para a região do litoral de São Paulo, leste de Minas Gerais, todo o Espírito Santo e o Rio de Janeiro.

Para o cenário mais pessimista, o RCP8.5, que considera que as emissões de GEEs continuarão a aumentar de forma acentuada e não serão tomadas ações mitigadoras no combate ao avanço das mudanças climáticas, podem ser verificadas as maiores projeções de aumento. Para os meses de SON, esse aumento pode chegar a 5°C na temperatura das regiões central, oeste e norte de São Paulo e se estender pelo triângulo mineiro até o norte de Minas Gerais. Como nos dois cenários anteriores, para esse cenário, os modelos que apresentaram os maiores valores, cerca de 5°C, projetados para aumento de temperatura foram: ACCESS, CanESM2, CSIRO, GFDL-CM3, HadG-CC, HadG-ES, IPSL-LR, IPSL-MR, MIROC-ESM e MIROC-CH. Porém, as áreas projetadas para se ter um aumento dessa magnitude de temperatura nesse cenário aumentou, abrangendo quase completamente toda a região sudeste do Brasil.

Para todos os cenários, o oeste de Minas Gerais é uma região para a qual os modelos apontam persistentemente um elevado aumento na temperatura para todos os cenários e períodos no presente estudo. Segundo Torres (2014), essa região foi

identificada, através do índice climático *Regional Climate Index- RCCI* (GIORGI,2006), como uma localidade onde possivelmente as mudanças climáticas podem ser mais exacerbadas. Além disso, segundo o Plano de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca (PAN Brasil), as Áreas Susceptíveis à Desertificação (ASDs) abrangem boa parte do estado de Minas Gerais, 142 municípios das regiões Norte de Minas, Mucuri e Vale do Jequitinhonha, que ocupam uma área de 177 mil km² (30,3% da área do estado). Segundo o PAN essas ASDs concentram-se na região Nordeste, mas algumas áreas podem ser igualmente afetadas pelos fenômenos da seca no norte de Minas Gerais e norte do Espírito Santo. Essas regiões são as consideradas mais vulneráveis aos efeitos do aquecimento global no Brasil, pois atualmente já apresentam restrições climáticas.

Os resultados obtidos para as projeções climáticas possuem diversas incertezas envolvidas. Segundo Knutti e Sedláček (2013), alguns motivos para o surgimento dessas incertezas são: as limitações intrínsecas aos modelos, o modo como eles são construídos, as limitações nos recursos computacionais e a resolução espacial, a falta de conhecimento aprofundado dos processos físicos inseridos nas equações que governam os modelos, falta de observações de longo prazo acuradas para calibração dos modelos e ainda a inclusão de novos processos, componentes, ou forçantes climáticas não compreendidas, não bem representadas ou não bem “calibradas” pela observação nos modelos do conjunto CMIP5. A complexidade do sistema climático é difícil de ser reproduzida, e por isso os modelos climáticos estão em constante desenvolvimento e evoluindo de acordo com novas descobertas científicas e novas metodologias de análise e de medições.

No entanto, a medida que um modelo se torna capaz de reproduzir as características principais do sistema climático e suas variações, aumenta-se sua credibilidade para simular mudanças no clima (TORRES, 2014). Entre os modelos que apresentaram os menores valores de viés na representação climatológica anual da temperatura, o modelo CanESM2 é o que mais bem representou a climatologia, principalmente nos meses de DJF e MAM. Avaliando a projeção desse modelo para o período de 2071-2100, no cenário mais otimista, RCP2.6, o modelo indica um aumento na temperatura da ordem de 4°C para praticamente toda a área de estudo. Para o cenário RCP4.5, segundo este modelo, a temperatura pode aumentar cerca

de 5°C para uma pequena porção da área de estudo, e no cenário mais pessimista, RCP8.5, esse modelo indica que o aumento pode chegar a mesma magnitude do cenário intermediário, porém para praticamente toda a região sudeste. Este modelo que melhor representou a climatologia da região Sudeste não foi o único a indicar essa tendência de aumento para alguns períodos, ou seja, mesmo não representando tão bem a climatologia quanto o modelo CanESM2, os demais modelos apresentam uma projeção similar no aumento da temperatura. Entretanto, o CanESM2 é o único modelo que apresenta essa tendência de aumento para quase toda a área de estudo. Aumentos dessa magnitude na temperatura média da região podem resultar ao final do século XXI em modificações perturbadoras no ciclo da hidrologia (Poppe e Santos, 2007). Essas modificações podem atingir mesmo a região Sudeste que possui uma grande oferta hídrica, a região pode ser afetada pela seca decorrente da urbanização descontrolada e das mudanças climáticas, tornando a região cada vez mais vulnerável à escassez dos recursos hidrológicos disponíveis para população (Marengo et al., 2010).

Os resultados de projeção obtidos para a variável precipitação (Figura 3.6) mostram que os vinte e quatro GCMs apresentam magnitudes muito pequenas de mudanças, em torno de 1 mm.dia⁻¹, tanto de aumento quanto de diminuição para toda a região sudeste e para todos os cenários. Para o cenário forçante RCP2.6, segundo a média do conjunto, o final do século XXI será marcado por pouquíssimas alterações no padrão pluviométrico e, apenas os meses correspondentes a primavera (SON) terão uma pequena mudança, da ordem de 0.5 mm.dia⁻¹, para todo o estado de Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro e boa parte do norte de São Paulo. Avaliando as projeções dos modelos individuais (Figura B1), os modelos que projetam uma diminuição na precipitação da ordem de 1 mm.dia⁻¹, no cenário RCP2.6, para uma área considerável dentro da região de estudo são: CanESM2, para o outono e o verão; GFDL-2G, para os meses de verão; MIROC-ESM, para o verão. Por outro lado, os modelos que projetam um aumento na precipitação para esse cenário, também no máximo da ordem de 1 mm.dia⁻¹ são: BCC, para o outono e o verão; e CSIRO e IPSL-MR, para o verão.

Para os cenários intermediários, RCP4.5 e RCP6.0, as projeções nas mudanças de precipitação para o final do século também são de pequena

magnitude, e na média do conjunto dos modelos não ultrapassa cerca de 0.5 mm.dia^{-1} , tanto para projeções de aumento quanto de diminuição. Porém, a área dentro da região de estudo que pode ser afetada com uma mudança de aproximadamente $\sim 1 \text{ mm.dia}^{-1}$ é maior nesses cenários quando comparada ao cenário RCP2.6, principalmente segundo o cenário RCP6.0 para os meses de SON, no qual a projeção de mudança de 1 mm.dia^{-1} a menos na precipitação se estende por toda a região norte de Minas Gerais.

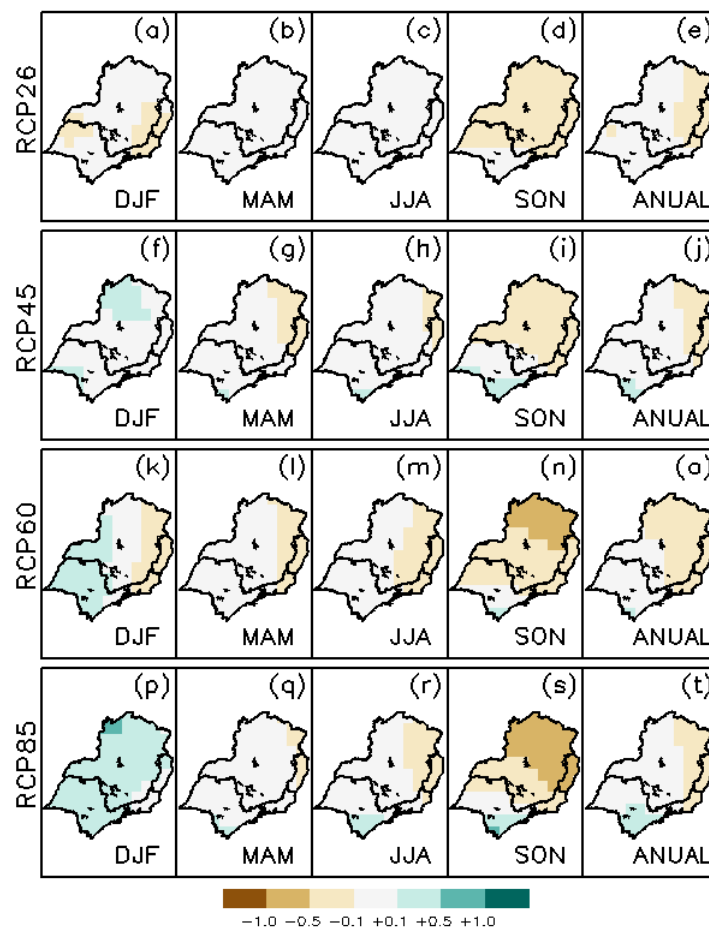


Figura 3.6 – Mesma descrição da Figura 3.5 para a variável precipitação em mm.dia^{-1}

Quanto aos resultados individuais dos modelos, no cenário RCP4.5, os modelos que projetam um aumento da precipitação da ordem de 1 mm.dia^{-1} para uma boa parte da área de estudo são: ACCESS, para a primavera; e BCC, CSIRO, FIO-ESM, HadGEM-ES, IPSL-MR, MIROC5, MPI-LR, NorESM1-M para a estação de verão. Já nesse mesmo cenário, os modelos que projetam uma diminuição dessa magnitude são: CanESM2, GFDL-CM3 e MIROC-ESM, para o verão e a primavera; e MIROC-CH, para a primavera. No cenário RCP6.0, os modelos que projetam um pequeno aumento, também cerca de 1 mm.dia^{-1} , na precipitação são: CSIRO, FIO-

ESM, HadG-ES e NorESM1-M para o verão. Em contrapartida, nesse mesmo cenário, os modelos que projetam uma diminuição para uma área consideravelmente grande dentro da região de estudo são: GFDL-CM3, MIROC-ESM e MIROC-CH para o verão e a primavera.

Mesmo para o cenário mais forçante, RCP8.5, os modelos mostram que se os níveis de emissões não forem atenuados por nenhum tipo de ação mitigadora às mudanças climáticas, a variação na precipitação possivelmente não vai aumentar ou diminuir mais do que 1 mm.dia^{-1} na projeção de todos os modelos. Porém, a área afetada por esse máximo de mudança de 1 mm.dia^{-1} é maior. Dentro desse cenário, os modelos que projetam o pequeno aumento na precipitação para uma grande área são: ACCESS, BCC, CSIRO, FIO-ESM, HadG-ES, IPSL-MR e MIROC5, MPI-LR, MRI-GCM3 e NorESM1-M, para estação de verão. Já os modelos que projetam a diminuição são: CanESM2, para o verão; MIROC-ESM, GFDL-CM3 e MIROC-CH, para a primavera e o verão. Embora as magnitudes das projeções de mudanças de precipitação sejam baixas, estudos apontam para o aumento da ocorrência de chuvas mais intensas (aquelas com volume acima de 10 mm). Para a região metropolitana de São Paulo, por exemplo, as projeções para o período de 2070 a 2100 apontam que o número de dias com chuvas intensas pode dobrar. Aumentando assim a vulnerabilidade dessa região as enchentes, inundações, alagamentos, escorregamento de massas em encostas devido aos eventos pluviométricos mais severos (Nobre *et al.*, 2010b).

Na figura 3.7 pode ser verificada a dispersão entre as projeções para mudanças na temperatura dos GCMs para a região de estudo, assim como estimada pelo desvio padrão entre as projeções individuais. Para os cenários RCP2.6, RCP4.5 e RCP6.0, o desvio entre as projeções dos modelos que constituem a média desse cenário é menor do que 0.9°C . O cenário de forçante RCP2.6 apresenta dentre todos os cenários o segundo maior desvio padrão para a região sudeste. Os maiores valores de desvio padrão é observado para o cenário de maior forçante, RCP8.5, que apresenta valores de até 1.4°C . As incertezas envolvidas nas projeções de mudanças climáticas podem ser ilustradas por esses resultados: enquanto cenários de mitigação intermediária tem um conjunto de modelos que projetam mudanças com maior homogeneidade, o cenário de forçante climática mais

intensa tem dentre seus modelos as maiores diferenças nas projeções. No entanto, os valores projetados de mudança de temperatura (Figura 3.5) são maiores do que o desvio padrão associado para todas as localidades avaliadas no domínio deste estudo, indicando boa confiabilidade nos resultados projetados.

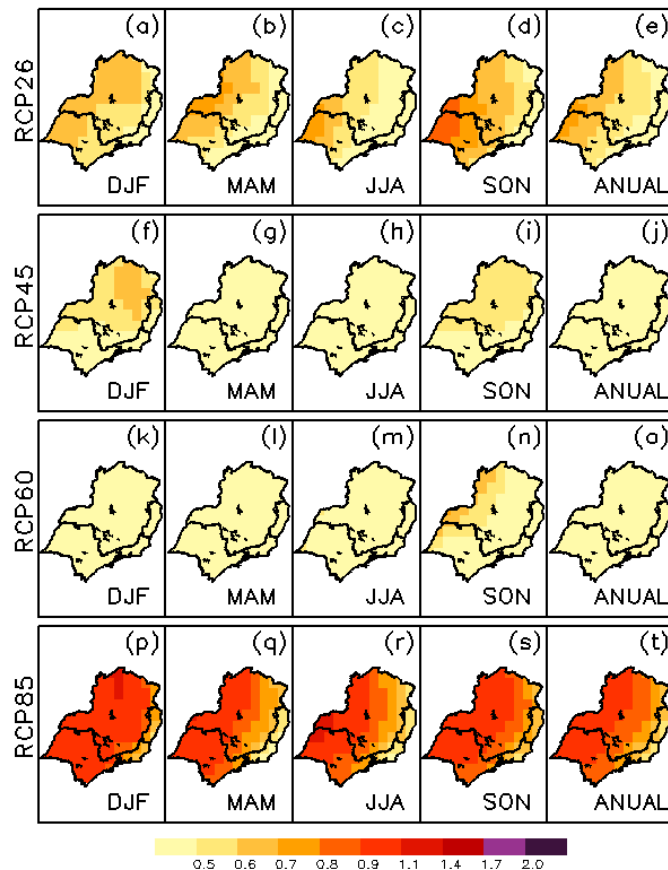


Figura 3.7 - Desvio padrão da mudanças sazonal e anual de temperatura (em °C) do conjunto de modelos provenientes do CMIP5.

A figura 3.8 apresenta a concordância (%) entre os GCMs no sinal projetado de mudança sazonal e anual de precipitação sobre a região Sudeste do Brasil para o final do século XXI. Os 21 GCMs que projetam as mudanças para o cenário RCP2.6, não apresentam uma boa concordância entre si. Apenas para pequenas áreas da região de estudo os modelos concordam consideravelmente, cerca de 70% dos modelos, com a ocorrência de uma redução na precipitação, principalmente para os meses de SON para a região nordeste e norte de Minas Gerais. Já os 24 GCMs que constituem a projeção para o cenário RCP4.5 apresentam menor concordância entre as projeções dos modelos na porção oeste e sul de Minas Gerais e todo o estado do Rio de Janeiro, principalmente para os meses de DJF e MAM, com exceção de uma pequena área na região de estudo no sul do estado de São Paulo, no Espírito Santo

e nordeste de Minas Gerais, locais onde a concordância de redução de precipitação pode chegar a 90% para os meses de JJA e SON. O mesmo ocorre para os 15 modelos que constituem a média do cenário RCP6.0, exceto para os meses de JJA e SON, para uma porção da área de estudo que engloba Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro, onde os modelos chegam a uma concordância de 90% nas projeções de redução na precipitação para certas áreas. Por fim, os 23 GCMs utilizados para projeção do cenário RCP8.5 apresentam uma razoável concordância (~ 70%) no aumento da precipitação para os meses de DJF em boa parte do estado de São Paulo e pequena porção no nordeste de Minas Gerais, e maior concordância (> 70%) com reduções para os meses de JJA e SON para porção norte do estado de Minas Gerais, todo o Espírito Santo e boa parte do Rio de Janeiro.

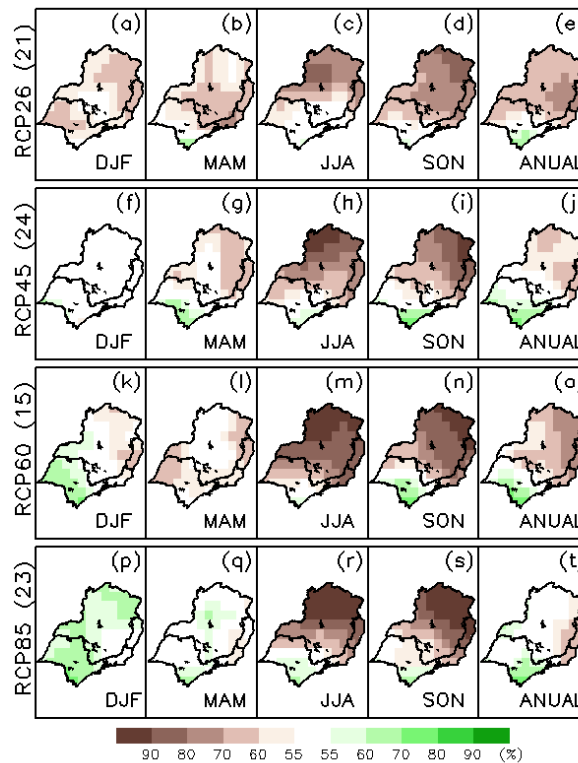


Figura 3.8 – Porcentagem de concordância dos modelos nas mudanças sazonal e anual de precipitação projetadas para a região Sudeste do Brasil para o final do século XXI (2071-2100). Os tons de verde (marrom) indicam a porcentagem de MCGs que projetam um aumento (diminuição) de precipitação sobre a região de estudo. O número de modelos que entram nessa análise em cada cenário é indicado entre parênteses após a nomenclatura do cenário.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os modelos apresentaram um bom desempenho em simular a climatologia da variável temperatura. Em geral, os valores climatológicos apresentaram um viés associado muito pequeno entre $\pm 1^\circ\text{C}$ para a maior parte da região Sudeste. Na média anual, para boa parte do estado de Minas Gerais e Espírito Santo os modelos subestimam os valores de temperatura climatológica e, para os estados de São Paulo e Rio de Janeiro superestimam esses valores. A correlação temporal entre os valores de temperatura observados e simulados pelo modelo foram boas, exceto para os modelos GFDL-2G, HadGEM-CC e HadGEM-ES.

Para a variável precipitação, os modelos também apresentaram um bom desempenho ao simular a climatologia, subestimando ou superestimando muito pouco ($\sim 1 \text{ mm.dia}^{-1}$) os valores climatológicos da variável. Apenas nos meses de SON a subestimativa dos valores pelos modelos variou entre 1 a 2 mm.dia^{-1} . Entretanto, a correlação temporal entre os valores simulados e observados para essa variável não foi boa. Para alguns modelos a correlação temporal obtida era positiva para boa parte da região de estudo, enquanto para outros modelos as correlações negativas eram predominantes. Assim, os maiores valores de correlação positiva entre simulação e observação da variável precipitação foram obtidos pelos modelos FIO-ESM, CanESM2, MIROC5, MIROC-CHEM e BCC apenas para a região do estado de São Paulo e pequenas porções dos demais estados que constituem o sudeste do Brasil. E os modelos MPI-ESM-CGCM3, NorESM1-M, HadGEM-CC e HadGEM-ES apresentaram os maiores valores de correlação negativa, principalmente para a região sul de Minas Gerais e todo o litoral de São Paulo.

As projeções nas mudanças de temperatura e precipitação avaliadas neste estudo para a região Sudeste do Brasil, estão de acordo com as projeções feitas pelo IPCC AR5. Essa região, pode ser considerada vulnerável as mudanças climáticas e dependente de ações mitigadoras para que haja um controle ao avanço das mudanças climáticas. O cenário RCP2.6 projeta para a região de estudo um aumento na temperatura que pode atingir pelo menos 2°C , isso se as emissões forem reduzidas pela metade até o final do século XXI. Porém isto não indica que, se

a área de estudo conseguir exercer as chamadas ações de “mitigação agressiva”, vai diminuir sua vulnerabilidade às mudanças climáticas, visto que a região sozinha não tem representatividade global suficiente para combater as mudanças climáticas. Além disso, a região Sudeste é responsável por boa parte do consumo de gás liquefeito de petróleo (~46%) no cenário nacional (EPE,2010b), o que indica que a base da economia da região está fortemente ligada a fontes de recursos não renováveis e poluentes, o que torna mais difícil inserir na região medidas mitigadoras como o uso de recursos provenientes de fontes renováveis. O Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) faz alusão aos possíveis métodos que podem ser utilizados para minimizar os impactos das mudanças climáticas e, chega a conclusão que ainda falta muito para que haja um tratamento adequado do tema. Esse organismo científico nacional que avalia os aspectos relevantes das mudanças climáticas no Brasil, afirma que o desenvolvimento de metas viáveis e compatíveis com a realidade de cada região é fundamental para implementar adequadamente políticas públicas no país no que diz respeito as ações mitigadoras as mudanças climáticas.

Na projeção dos cenários RCP4.5 e RCP6.0, as temperaturas da região Sudeste podem chegar a 3°C de aumento para uma grande área da região de estudo, mesmo se ações mitigadoras fortes forem tomadas em um contexto global. Esses cenários, para praticamente todo o estado de Minas Gerais e boa parte do oeste e nordeste de São Paulo, projetam mudanças mais drásticas. Principalmente na projeção do cenário RCP6.0, para região nordeste de São Paulo, triângulo mineiro e pequena porção do noroeste de Minas Gerais o aumento na temperatura pode ultrapassar os 3°C. Ainda, o cenário RCP8.5, mostra que a região de estudo está sujeita aos valores de maior projeção no aumento da temperatura, e que esse aumento pode chegar a 5°C nas regiões central, oeste e norte de São Paulo e se estender pelo triângulo mineiro até o norte de Minas Gerais.

Mudanças nas variáveis analisadas podem afetar os ecossistemas, os sistemas urbanos, sistemas econômicos e sociais da região de estudo. Entender como o clima vai se comportar no futuro é importante para planejar ações mitigadoras ou ainda adaptativas às mudanças climáticas. Segundo as projeções, a região Sudeste não será afetada igualmente em toda a sua extensão pelas

mudanças projetadas para o final do século XXI. Por exemplo, a região oeste de Minas Gerais nas projeções dos modelos aparece persistentemente como uma região onde a tendência de aumento na temperatura é maior que nas demais áreas da região Sudeste. Além disso, o extremo oeste de São Paulo acompanha essa tendência de um maior aumento na temperatura para praticamente todos os modelos do CMIP5.

Com relação a precipitação, os modelos por representarem melhor a climatologia observada, apresentam uma maior confiabilidade e mostram que para toda a região, todos os cenários e períodos, as mudanças para a região nessa variável são muito pequenas ou inexistentes. No entanto, ao contrário das mudanças projetadas para a variável precipitação, para os eventos pluviométricos mais severos são previstos aumentos. Segundo Groisman et al.(2005) e Marengo et al. (2010), as tendências no aumento sistemático da frequência de chuvas intensas na região Sudeste tem se mostrado positivas desde 1940. Segundo o PBMC, essas tendências de aumento apareceram mais intensas sobre a região do estado de São Paulo e, a falta de dados pluviométricos não permitiu estender essa análise ao estado de Minas Gerais.

A mudança climática avaliada nesse estudo pode trazer para a região Sudeste seus efeitos adversos, modificando além das características das variáveis precipitação e temperatura da região os setores de energia, transporte, agrícola e demais setores da sociedade brasileira. Eventos climáticos tais como o aumento da frequência de ocorrência de tempestades, inundações, ondas de calor, secas e elevação do nível do mar causados pelas mudanças climáticas causam danos substanciais a todas as nações de um modo geral. Segundo o PBMC, para combater o avanço das mudanças climáticas é necessário grandes mudanças no estilo de vida da sociedade, uma verdadeira revolução no setor energético e uma mudança no modo como a sociedade lida com os recursos renováveis.

REFERÊNCIAS

Annan, J. D., and J. C. Hargreaves (2010), Reliability of the CMIP3 ensemble, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L02703, doi:10.1029/2009GL041994.

Baettig MB, Wild M, Imboden DM (2007) A climate change index: where climate change may be most prominent in the 21st century. *Geophys Res Lett* 34, L01705

Blazquez, J. and Nunez, M.N. (2013) Analysis of Uncertainties in Future Climate Projections for South America: Comparison of WCRP-CMIP3 and WCRP-CMIP5 Models. *Climate Dynamics*, 41, 1039-1056. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-012-1489-7>

Camargo, MBP. The impact of climatic variability and climate change on arabic coffee crop in Brazil. *Bragantia* [online]. 2010, vol.69, n.1, pp. 239-vinte e quatro7. ISSN 0006-8705.

Darela-Filho, JF, Lapola, DM, Torres, RR, Lemos, MC (2015) An update on the socio-climatic hotspots in Brazil: changes driven by the new set of IPCC climatic projections. *Clim Chang* (no prelo)

Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) - Pecuária Sudeste Sistemas de Produção. 2003. Aspectos Agro e Zooecológicos . Disponível em:<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 22/05/15.

EPE, 2010b: Balanço Energético Nacional 2010, Ano base 2009. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Rio de Janeiro, RJ. Disponível em <http://www.epe.gov.br>. Acesso em: 17/10/15.

Giorgi F (2005) Climate change prediction. *Clim Chang* 73:239–265

Groisman, P. et al., 2005: Trends in tense precipitation in the climate record. *Journal of Climate*, 18,1326-1350.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. 2011. Censo Demográfico. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 22/05/15.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. 2005. Áreas Urbanizadas. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 22/05/15.

IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (Eds.) IPCC, Geneva, Switzerland. pp 104

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IPEA, 2011: Instituto de pesquisas Agrícolas.

Joetzjer, E.; Douville, H.; Delire, C.; Ciais, P. Present-day and future Amazonian precipitation in global climate models: CMIP5 versus CMIP3. *Climate Dynamics*, p. 1-16, 2013.

Jones, C.; Carvalho, L. M. V. Climate change in the South American Monsoon System: present climate and CMIP5 projections. *Journal of Climate*, v. 26, 6660-6678, 2013.

Knutti, R, Sedláček J (2013) Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nat Clim Chang* 3:369-373

Lucena AFP, Szklo AS, Schaeffer R, Souza RR, Borba BSMC, Costa IVL, Pereira Júnior AO, Cunha SHF (2009) The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil. *Energy Policy* 37:879 – 889

Marengo JA, Ambrizzi T, Rocha RP, Alves LM, Cuadra SV, Valverde M, Ferraz SET, Torres RR, Santos DC (2010) Future climate change of climate in South America in the late XXI century: intercomparison of scenarios from three climate models. *Clim Dyn* 35:1073-1097

Marengo, J.A. et al., 2010: Mudanças climáticas e recursos hídricos, Cap. 12, pp. 199-215. In: *Águas do Brasil: análises estratégicas* [Bicudo, C.E.M. et al. (Orgs.)].

Academia Brasileira de Ciências (ABC), Instituto de Botânica da Secretaria do Meio Ambiente (SMA) do Estado de São Paulo. São Paulo, SP: ABC.

Marengo, JA, Nobre, CA, Chou, SC, Tomasella J, Sampaio G, Alves, L, Obregon, GO, Soares W (2011) Dangerous Climate Change in Brazil: A Brazil-UK analysis of Climate Change and Deforestation impacts in the Amazon. UK Met Office/INPE. Sao Jose dos Campos, SP, 34 pp

Marengo, JA, Torres, RR, Alves, L (2015) Drought in Northeast Brazil - Past, Present and Future. Theor Appl Climatol (no prelo)

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration. Global Monitoring Division Disponível em: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>. Acesso em: 09/11/2015.

Nobre CA, Young AF, Saldiva P, Marengo JA, Nobre AD, Alves Júnior SP, Silva GCM, Lombardo M (2010) Vulnerabilidades das megacidades brasileiras às mudanças climáticas: região metropolitana de São Paulo. Disponível em: http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/publicacoes/2010/SumarioExecutivo_megacidades.pdf. Acesso em: 22/05/15.

Ponce, V.M. 1995. Hidrologic and enviromental impact of the Paraná-Paraguay waterway on the Pantanal of Mato Grosso, Brazil. San Diego State University. http://ponce.sdsu.edu/hidrovia_report.html

Poppe, M.K. e M.M. Santos, 2007: Impactos, vulnerabilidade e adaptação. Tema 2. pp. 23-29. In: Mudança climática: rumo a um novo acordo mundial. Relatório Científico [Diniz, E.M. (Ed.)]. Conferência Regional sobre Mudanças Globais: América do Sul, 3. São Paulo, SP, IEA/USP.

Reboita, M.S.; Gan, M.A.; Rocha, R.P.; Ambrizzi, T. (2010): Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. Revista Brasileira de Meteorologia, v.25, n.2, p.185-204, 2010

Rusticucci, M.; Marengo, J. A.; Penalba, O.; Renom, M. An intercomparison of model-simulated in extreme rainfall and temperature events during the last half of the

XX century: Part 1: Mean values and variability. *Climatic Change*, v. 98, n. 3-4, p. 493 - 508, 2010. doi: 10.1007/s10584-009-9742-8.

Tebaldi, C., and R. Knutti (2007), The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections, *Philos. Trans. R. Soc. A*, 365(1857), 2053–2075.

Torres, RR. *Análise de incertezas em projeções de mudanças climáticas na América do Sul* / Roger Rodrigues Torres. – São José dos Campos: INPE, 2014

Torres RR, Lapola DM, Marengo JA, Lombardo MA (2012) Socio-climatic hospots in Brazil. *Clim Chang* 115:597-609

Xu Y, Xuejie G, Giorgi F (2009) Regional variability of climate change hot-spots in East Asia. *Adv Atmos Sci* 26(4):783-792

APÊNDICE A – SIMULAÇÕES INDIVIDUAIS DOS MODELOS

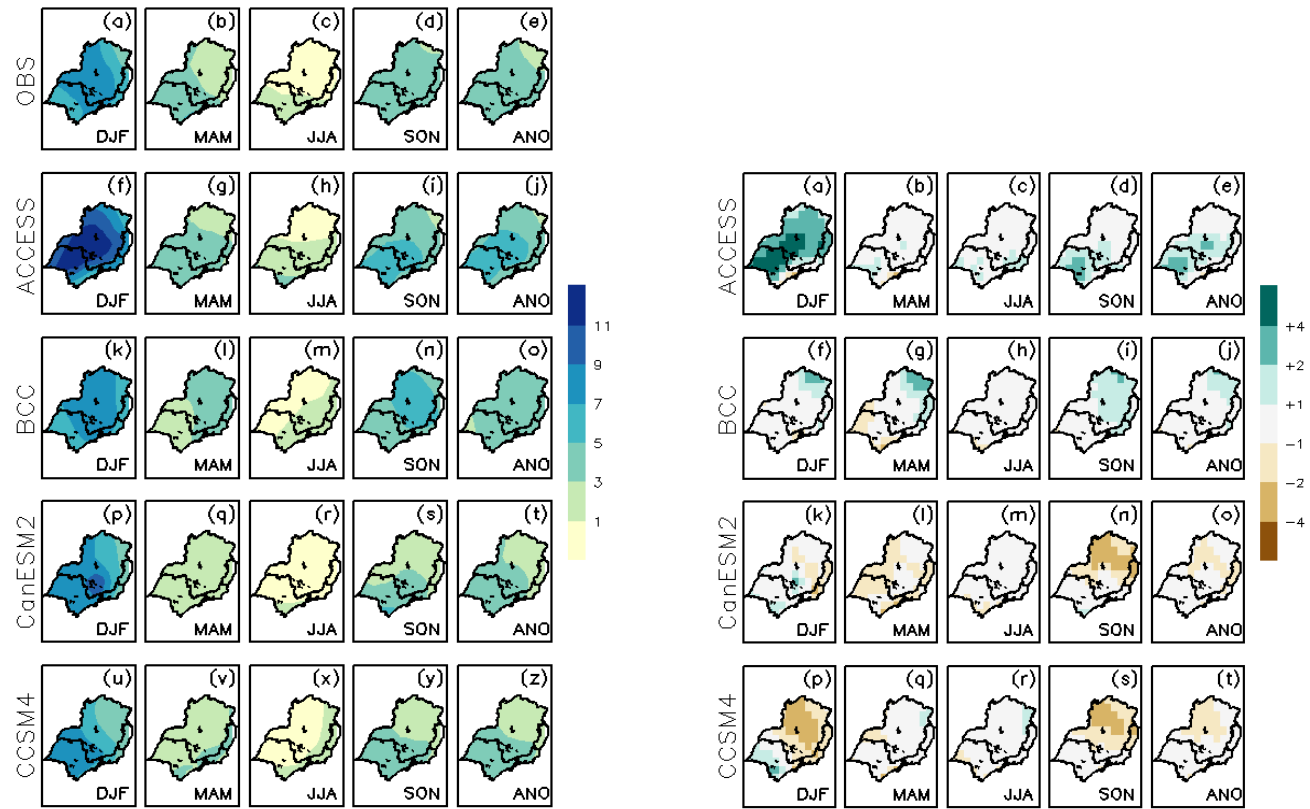


Figura A.1 – Climatologia média sazonal e anual de precipitação (esquerda), e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do CMIP5 para o período de 1961 a 1990. A climatologia observada encontra-se no canto superior esquerdo. As unidades estão em mm.dia⁻¹

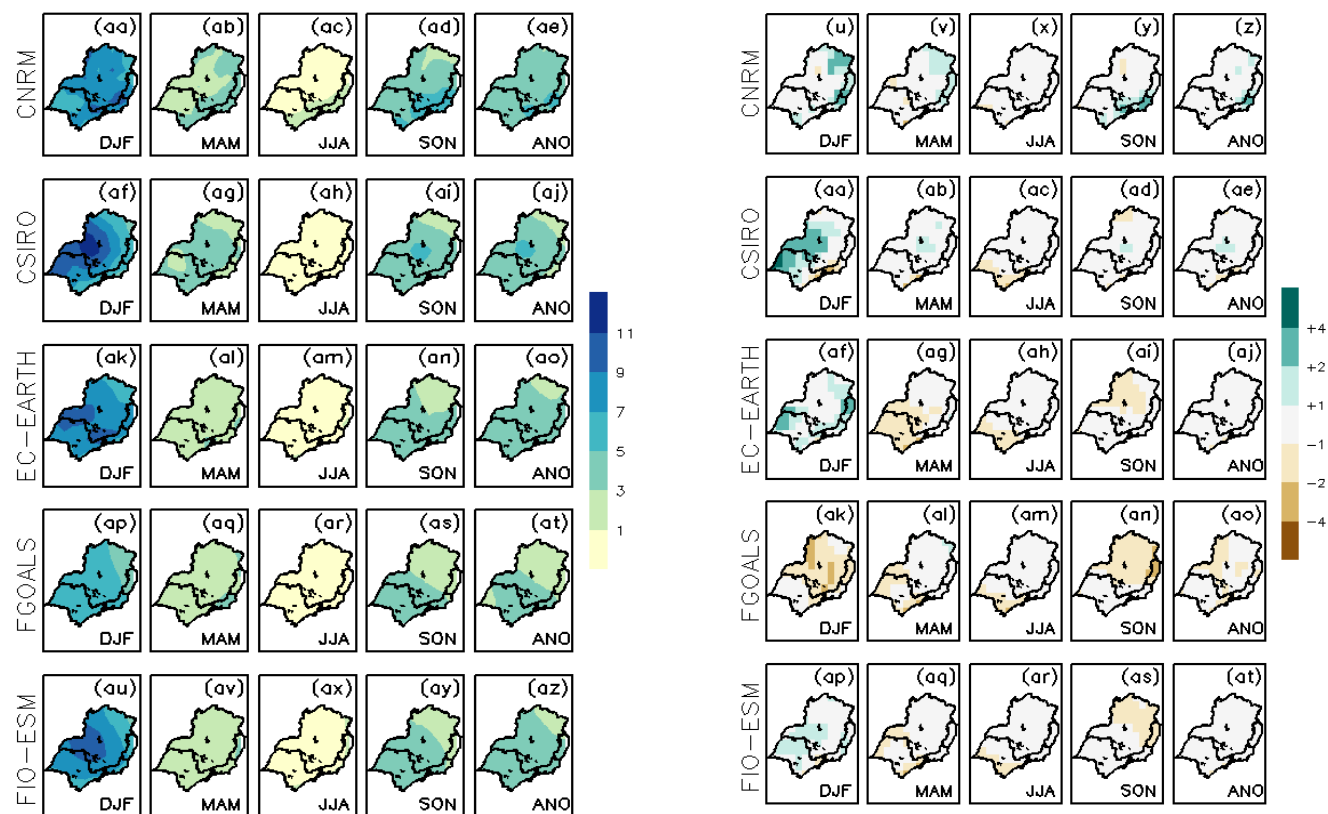


Figura A.1 – Continuação.

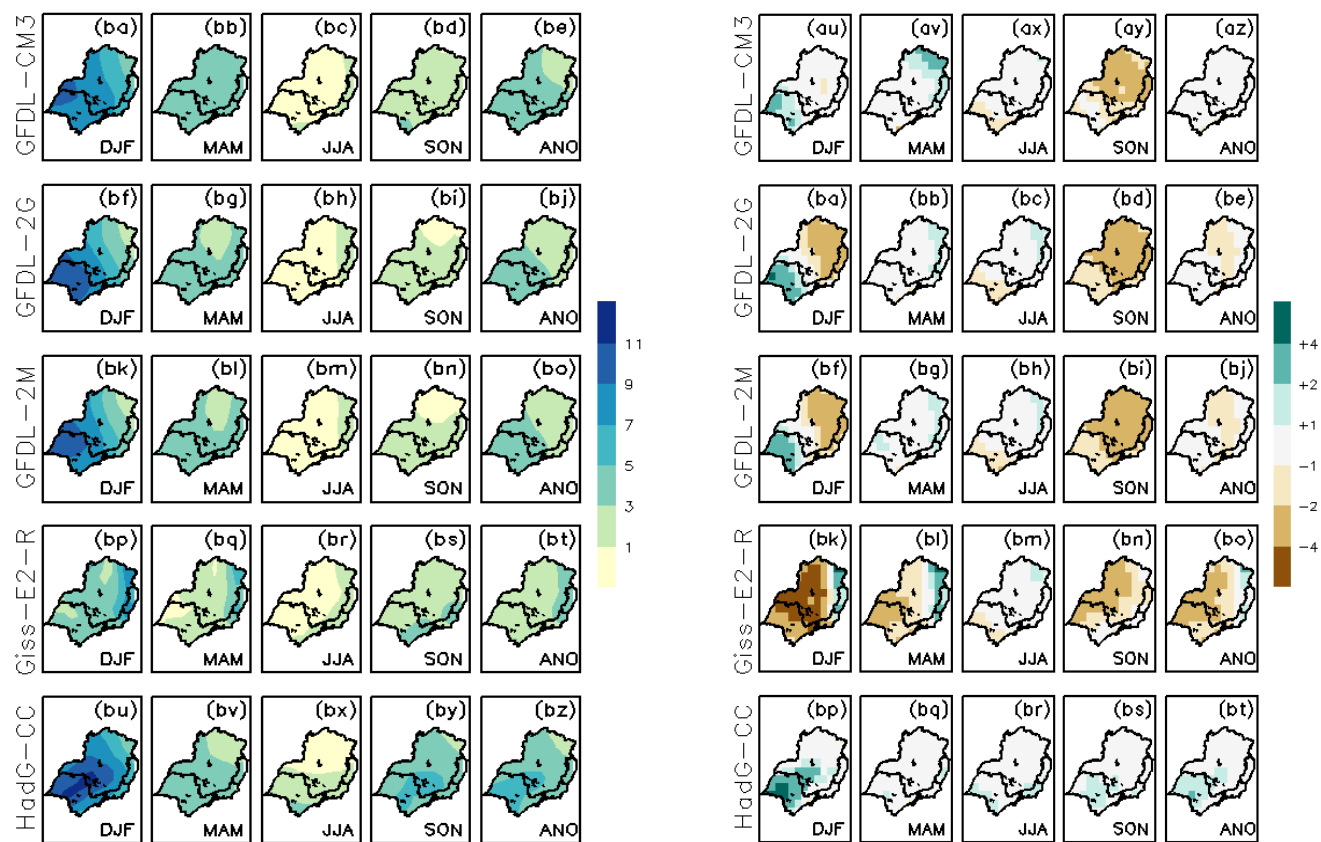


Figura A.1 – Continuação.

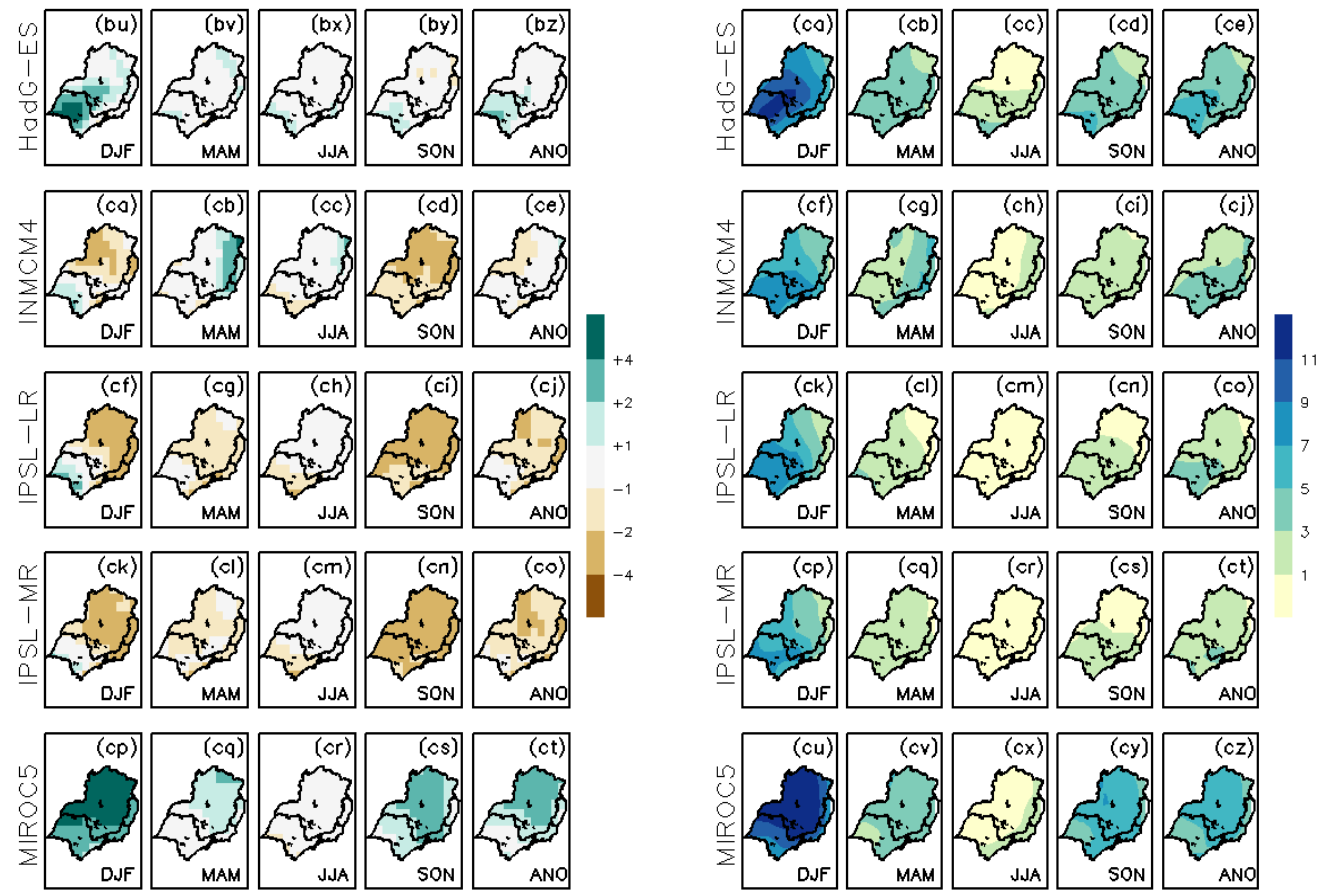


Figura A.1 – Continuação.

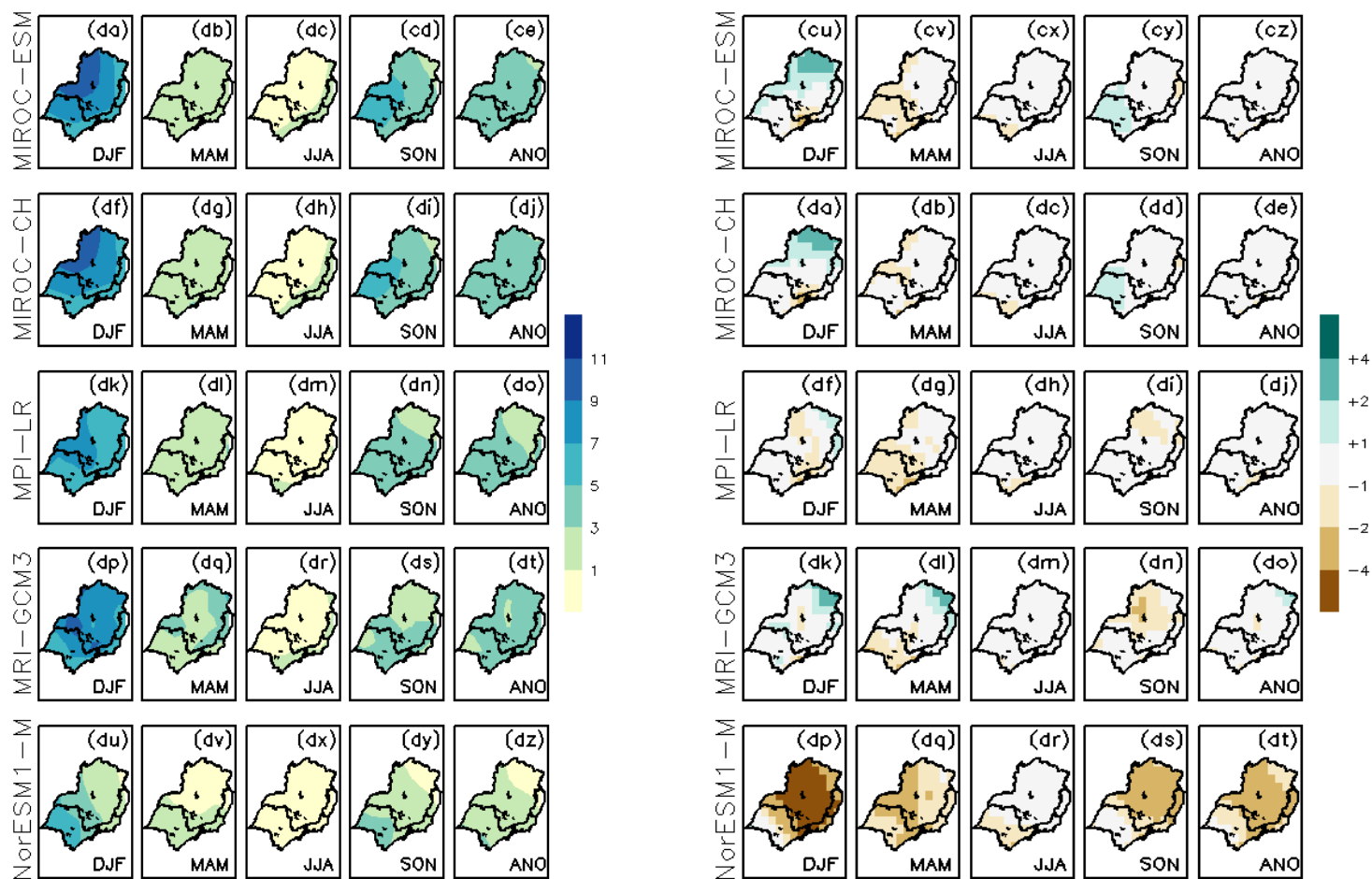


Figura A.1 – Continuação.

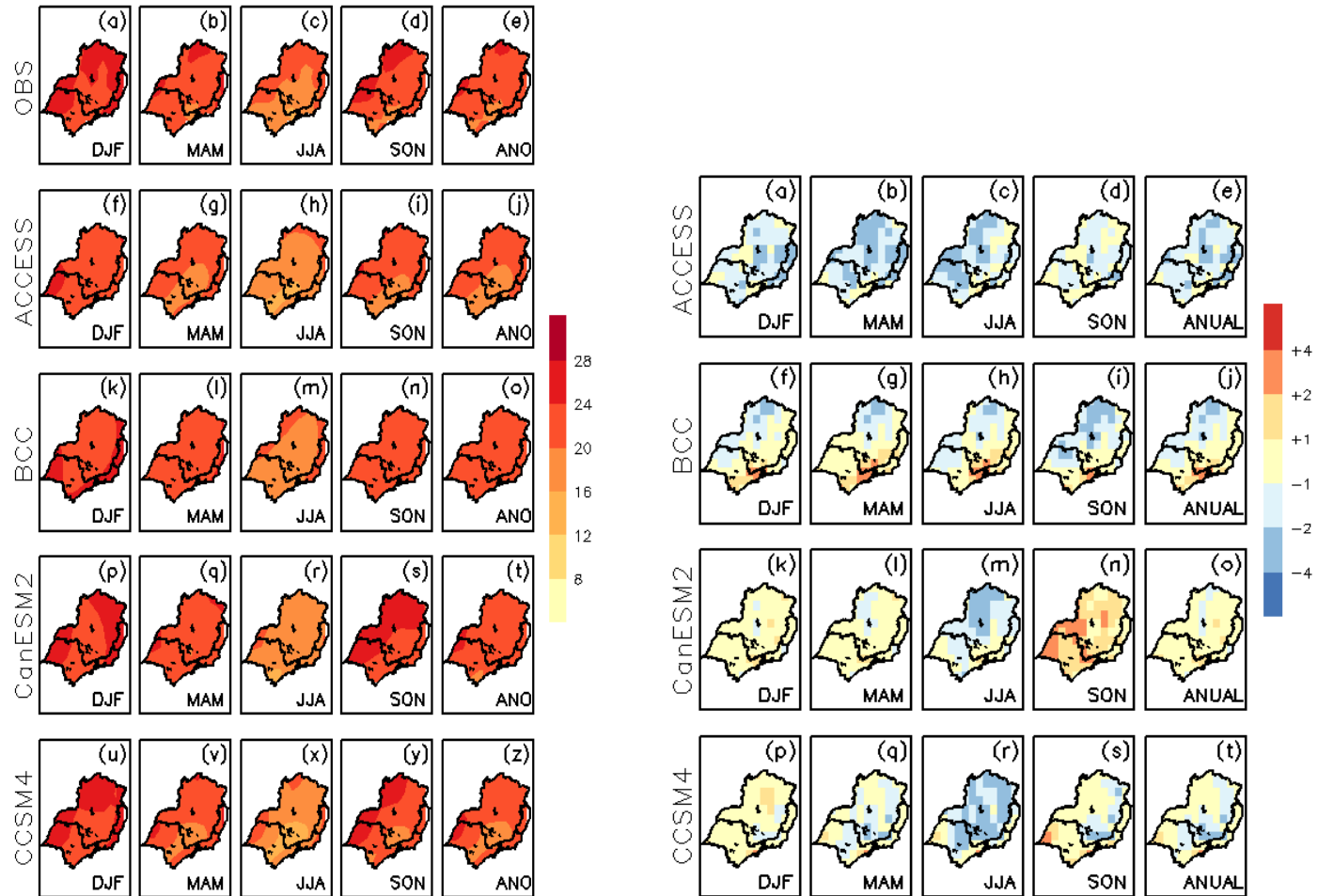


Figura A.2 – Climatologia média sazonal e anual de temperatura (esquerda), e viés associado (direita), simulada pelos MCGs do CMIP5 para o período de 1961 a 1990. A climatologia observada encontra-se no canto superior esquerdo. As unidades estão em oC.

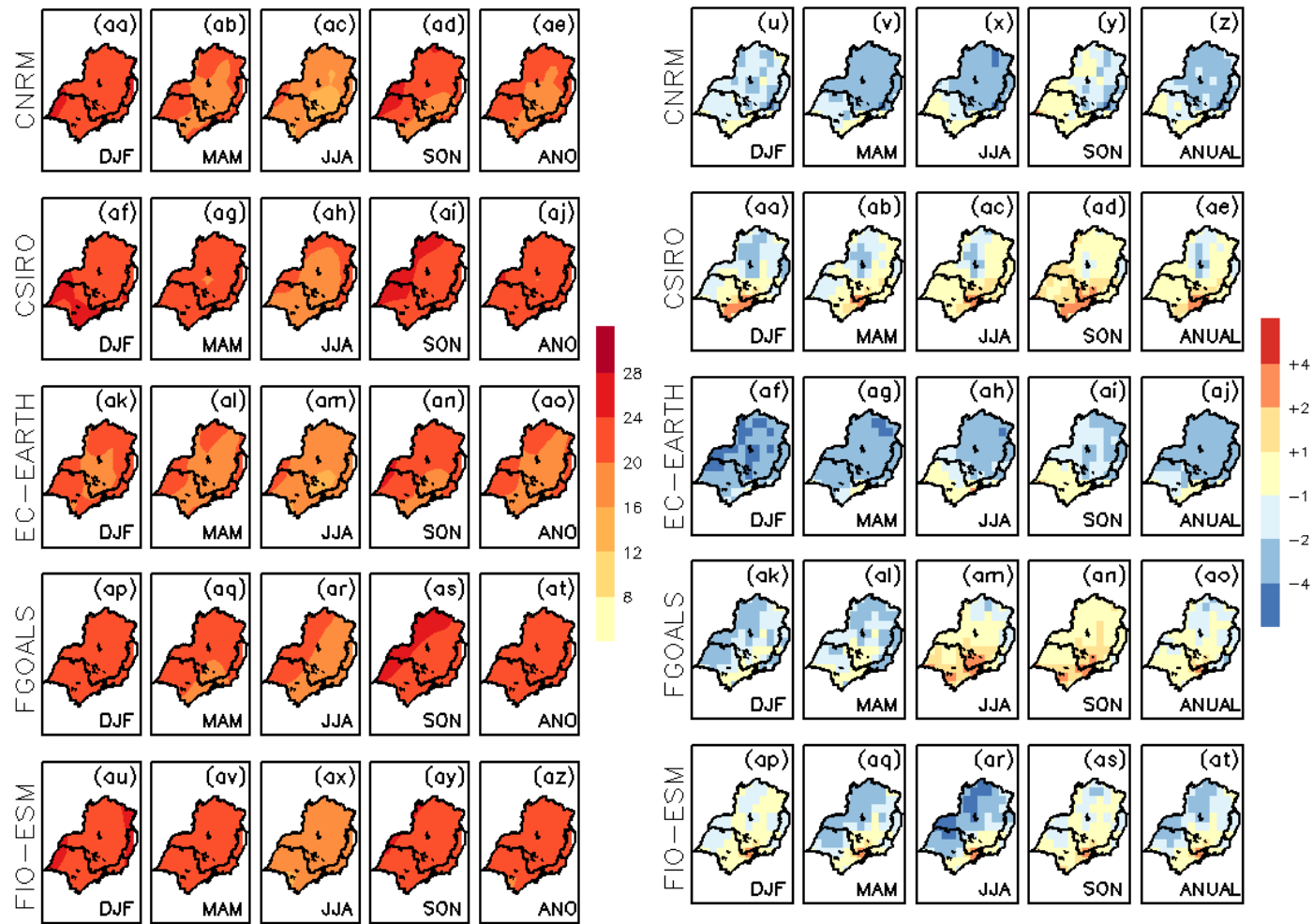


Figura A.2 – Continuação.

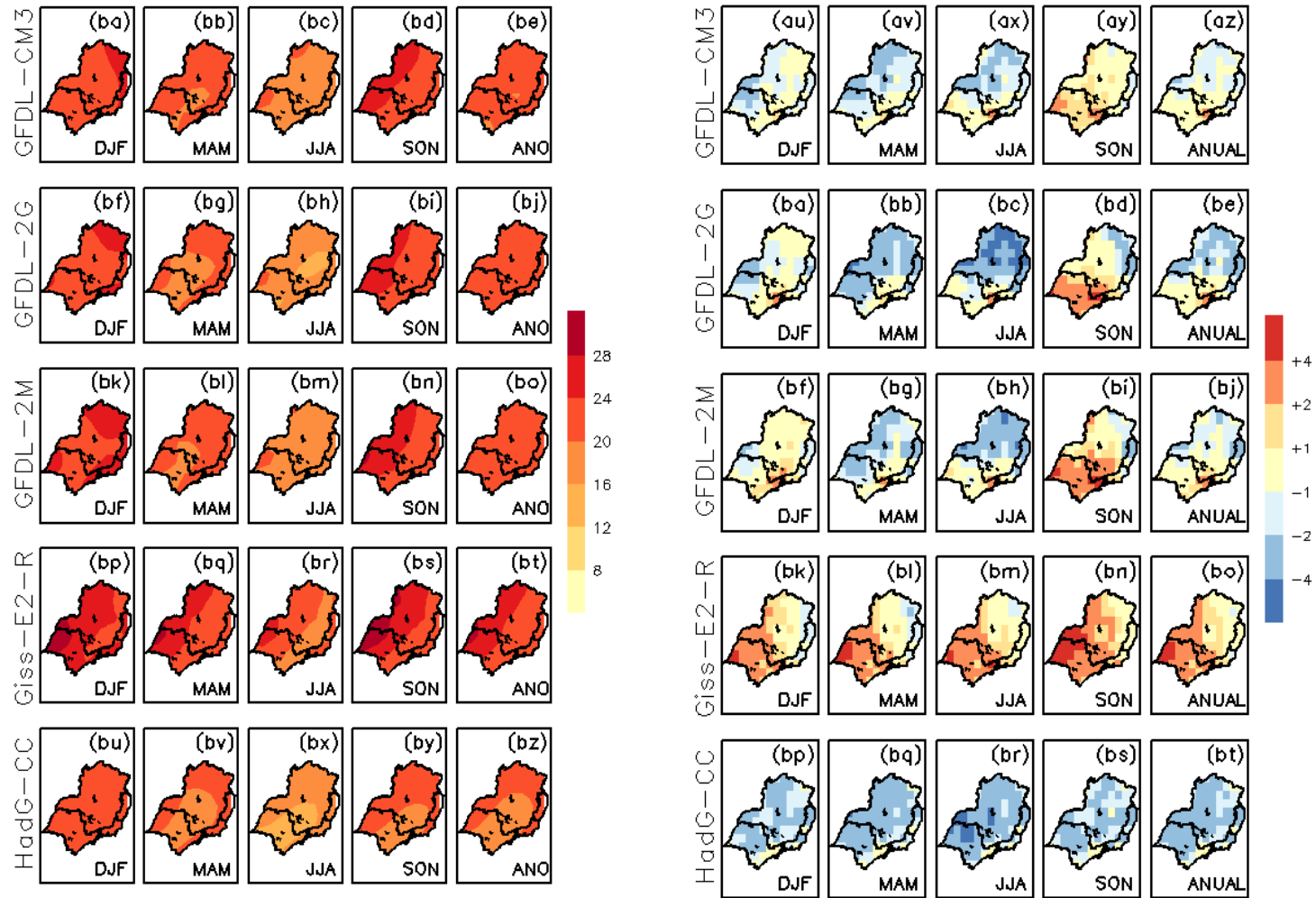


Figura A.2 – Continuação.

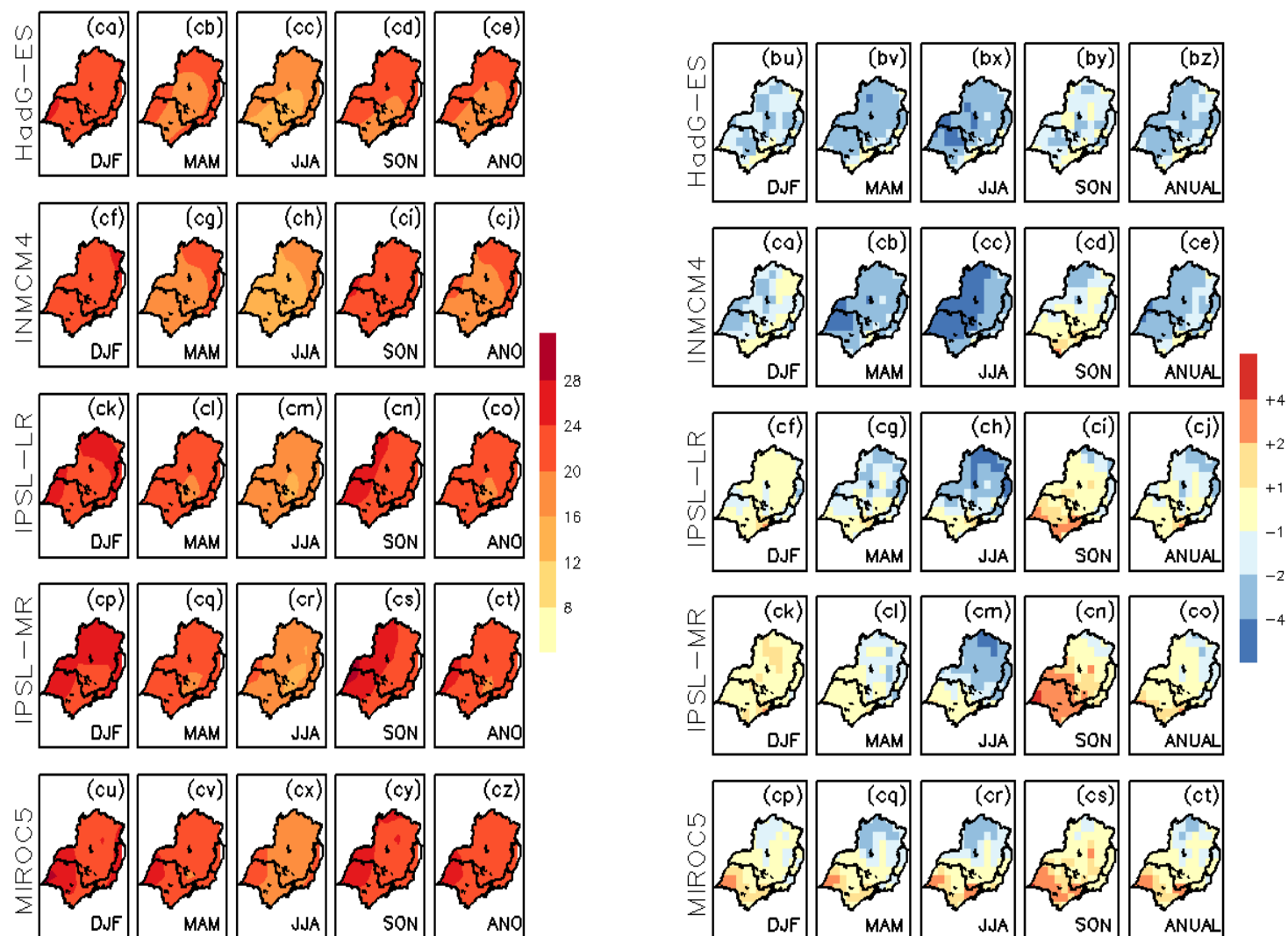


Figura A.2 – Continuação.

APÊNDICE B – PROJEÇÕES INDIVIDUAIS DOS MODELOS

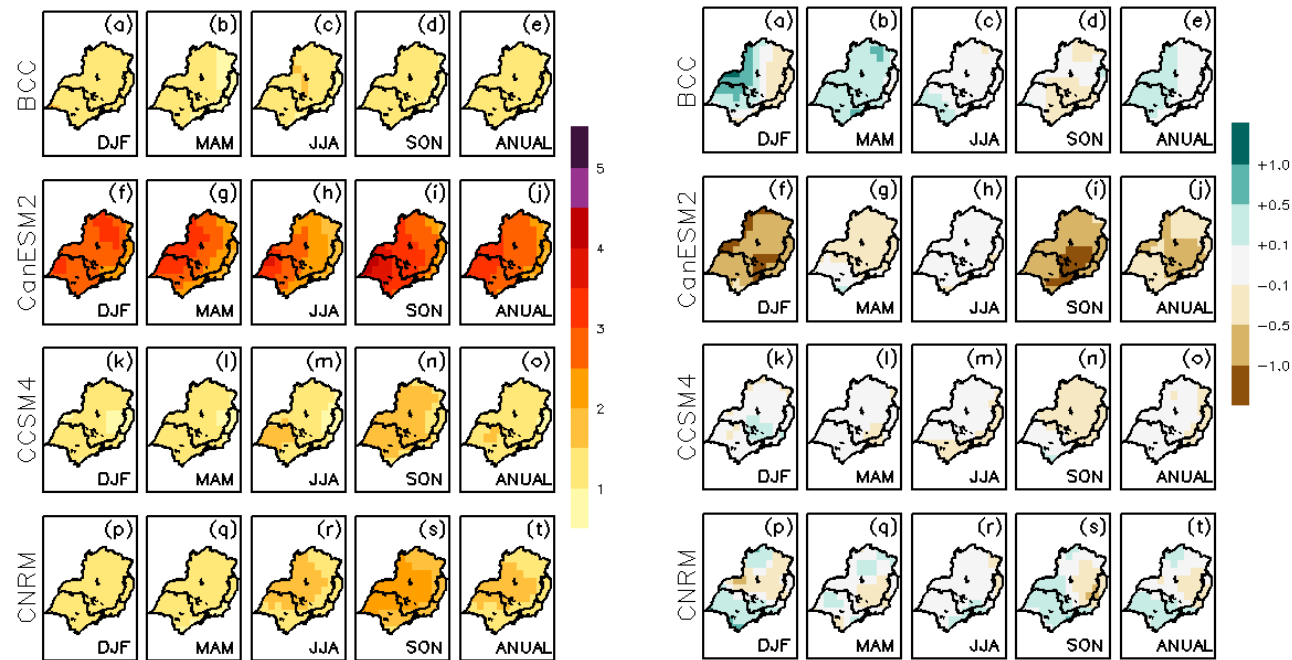


Figura B.1 -Mudanças sazonal e anual de temperatura (painéis da esquerda) e precipitação (painéis da direita) projetadas para o final do século XXI (2071-2100) no cenário de emissões RCP2.6, provenientes do conjunto CMIP5. As mudanças são definidas como a diferença entre os períodos de 2071-2100 e 1961-1990. As unidades de temperatura e precipitação são $^{\circ}\text{C}$ e mm.dia^{-1} , respectivamente.

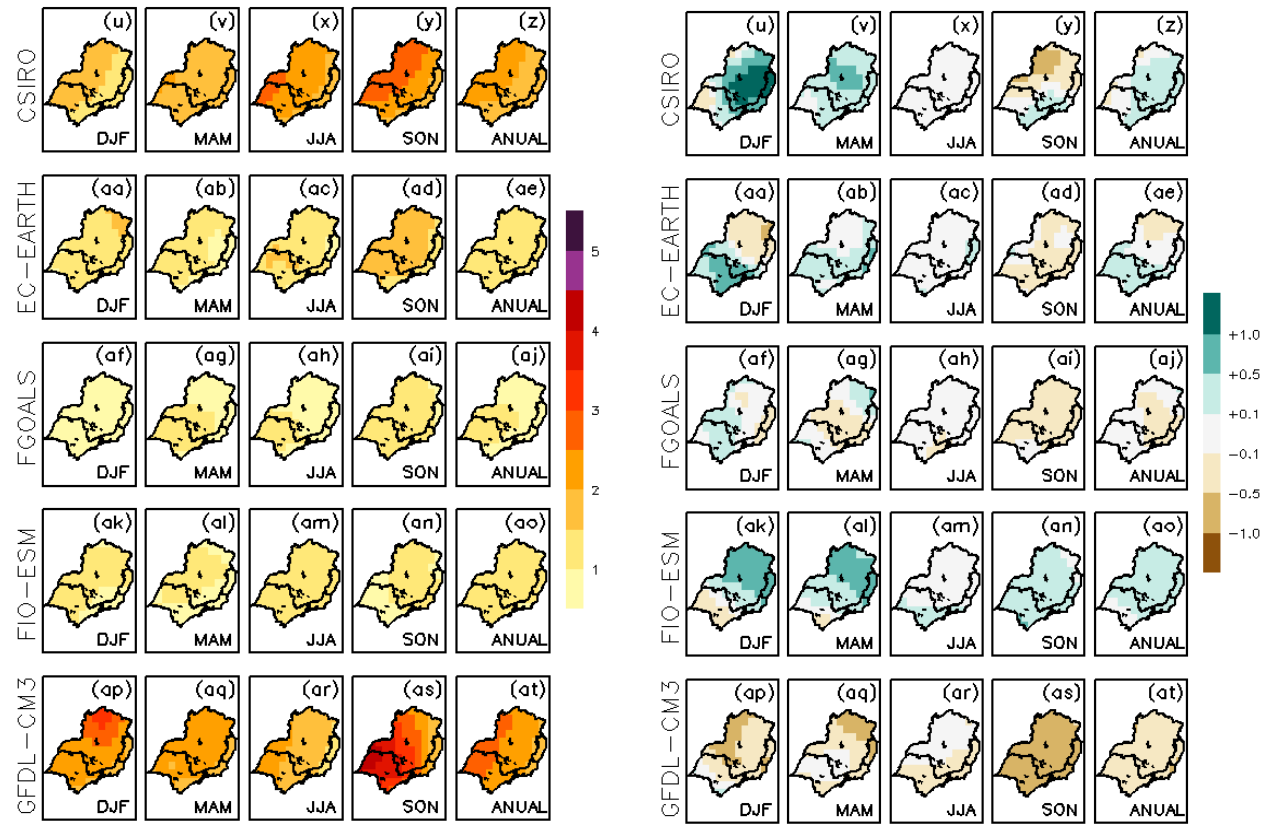


Figura B.1 – Continuação

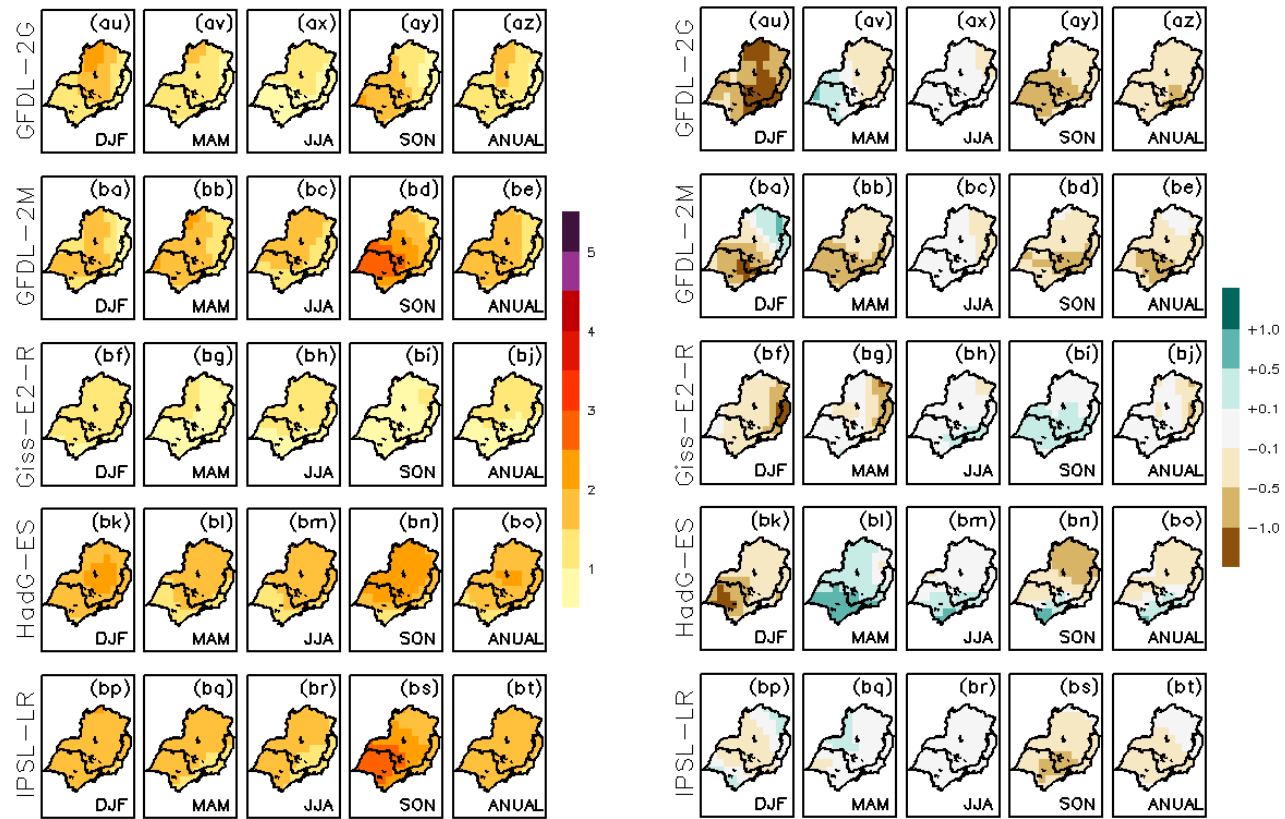


Figura B.1 – Continuação.

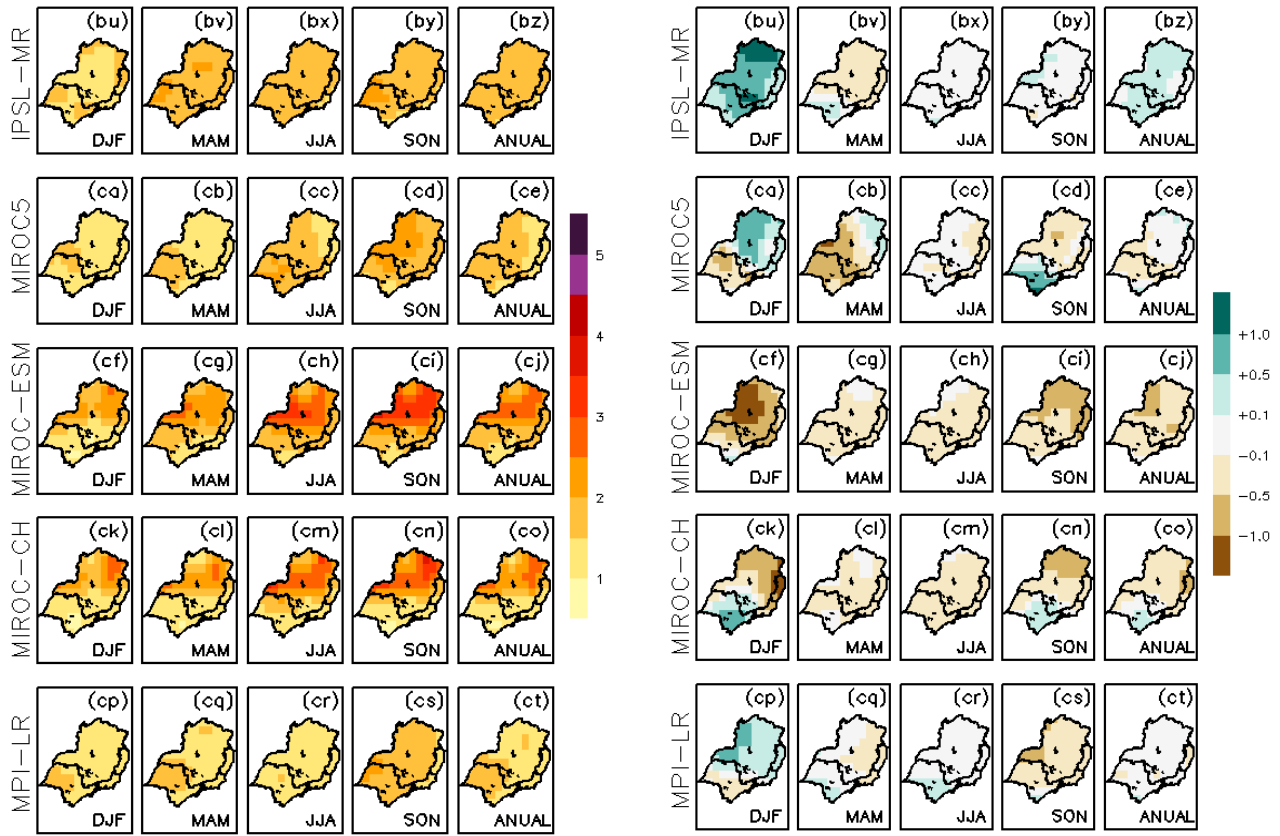


Figura B.1 – Continuação.

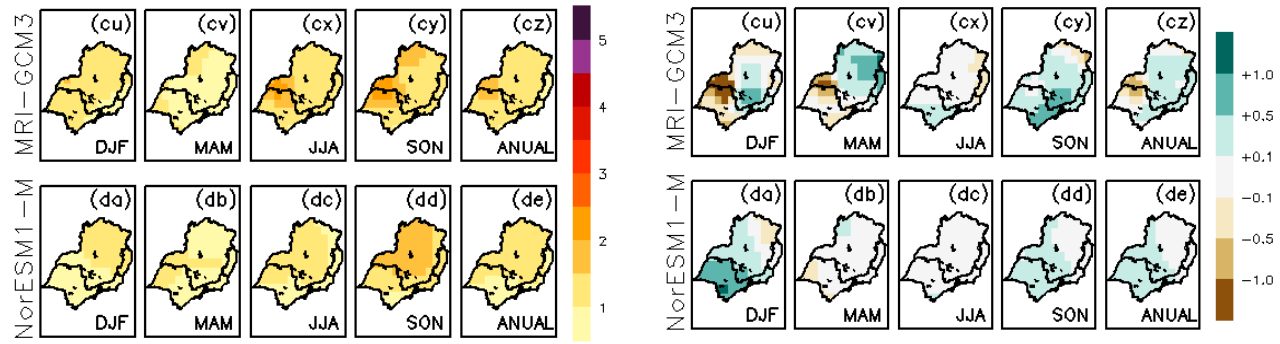


Figura B.1 – Continuação.

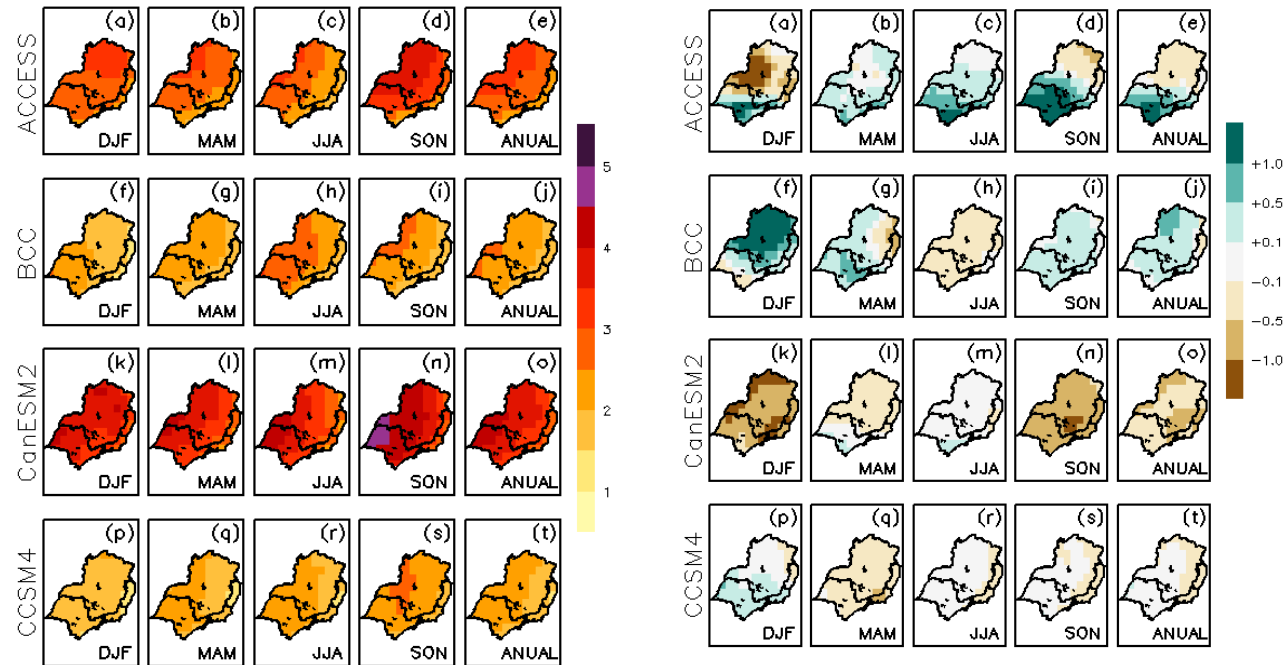


Figura B.2 – Mudanças sazonal e anual de temperatura (painéis da esquerda) e precipitação (painéis da direita) projetadas para o final do século XXI (2071-2100) no cenário de emissões RCP4.5, provenientes do conjunto CMIP5. As mudanças são definidas como a diferença entre os períodos de 2071-2100 e 1961-1990. As unidades de temperatura e precipitação são °C e mm.dia⁻¹, respectivamente.

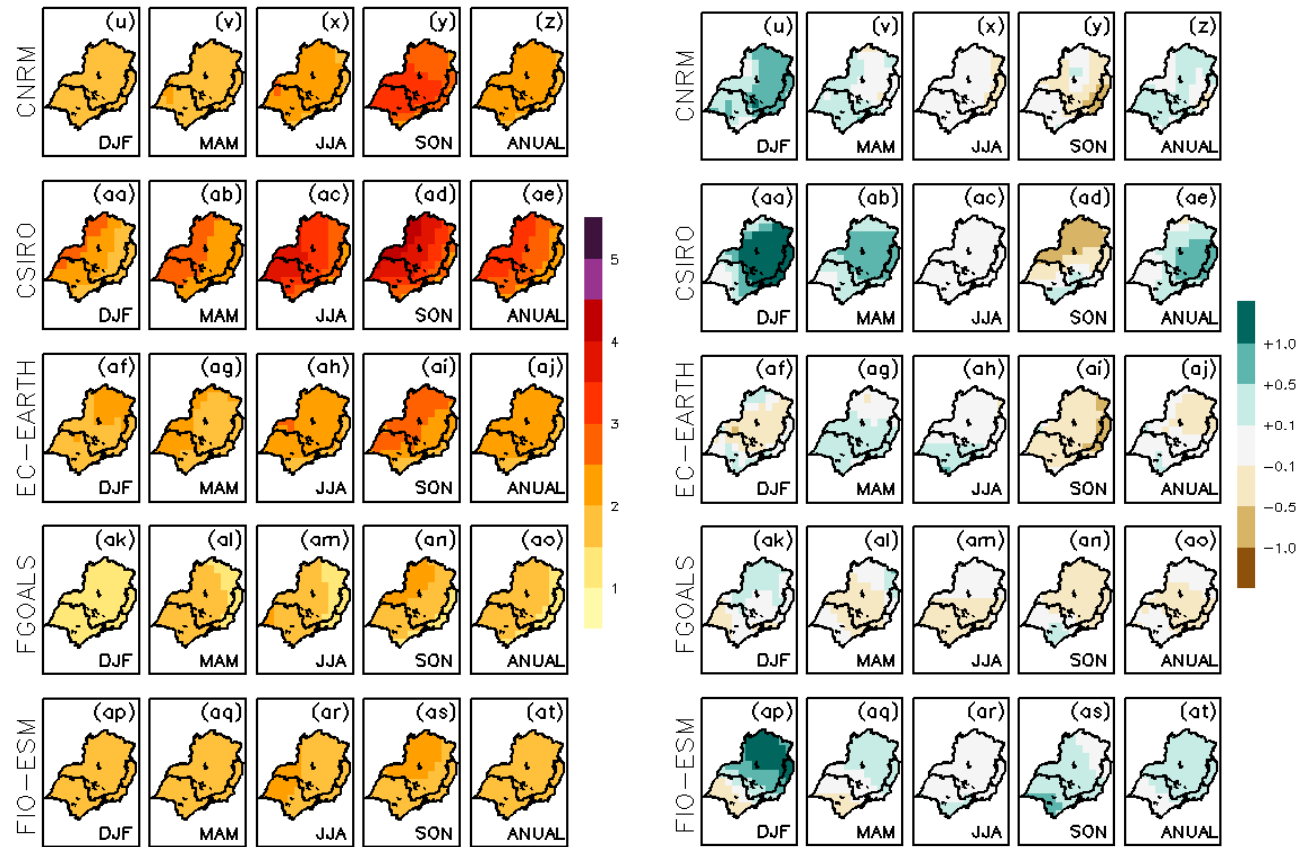


Figura B.2 – Continuação.

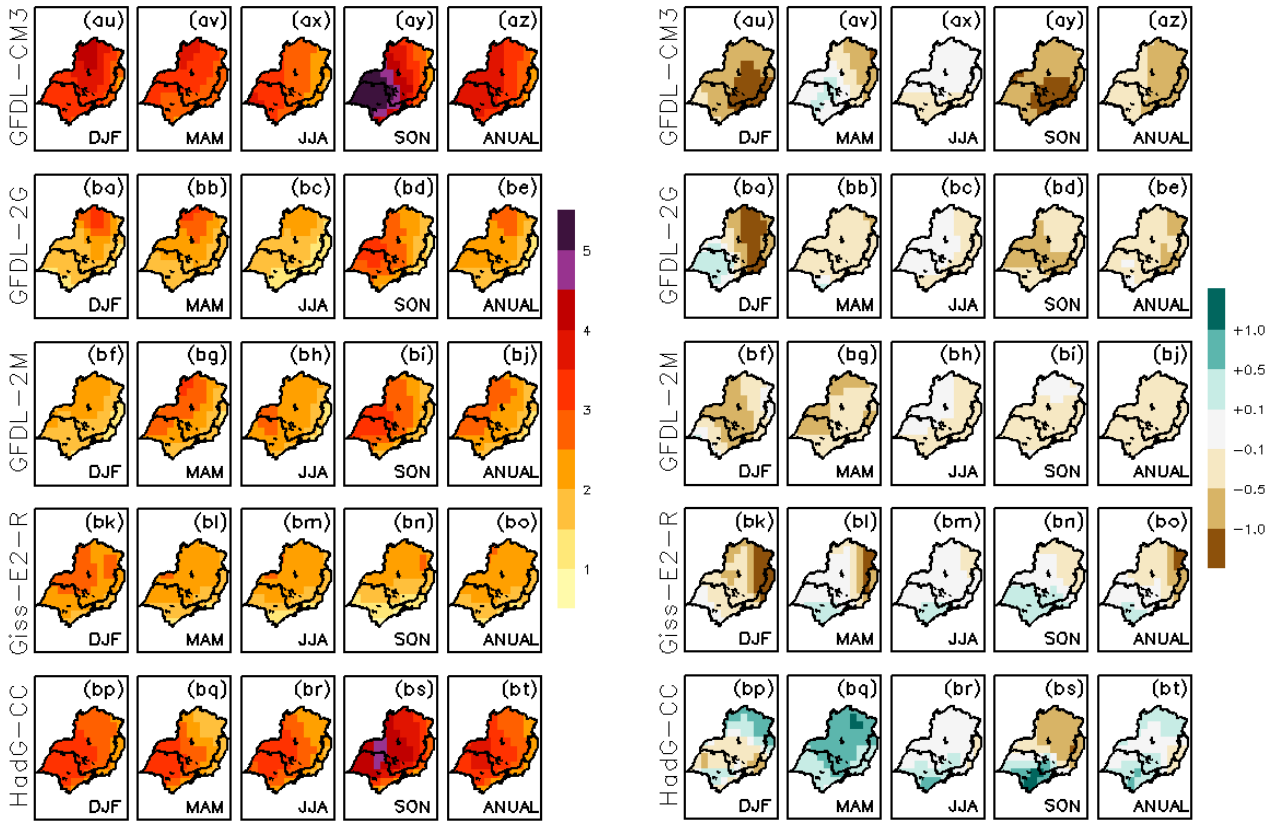


Figura B.2 – Continuação.

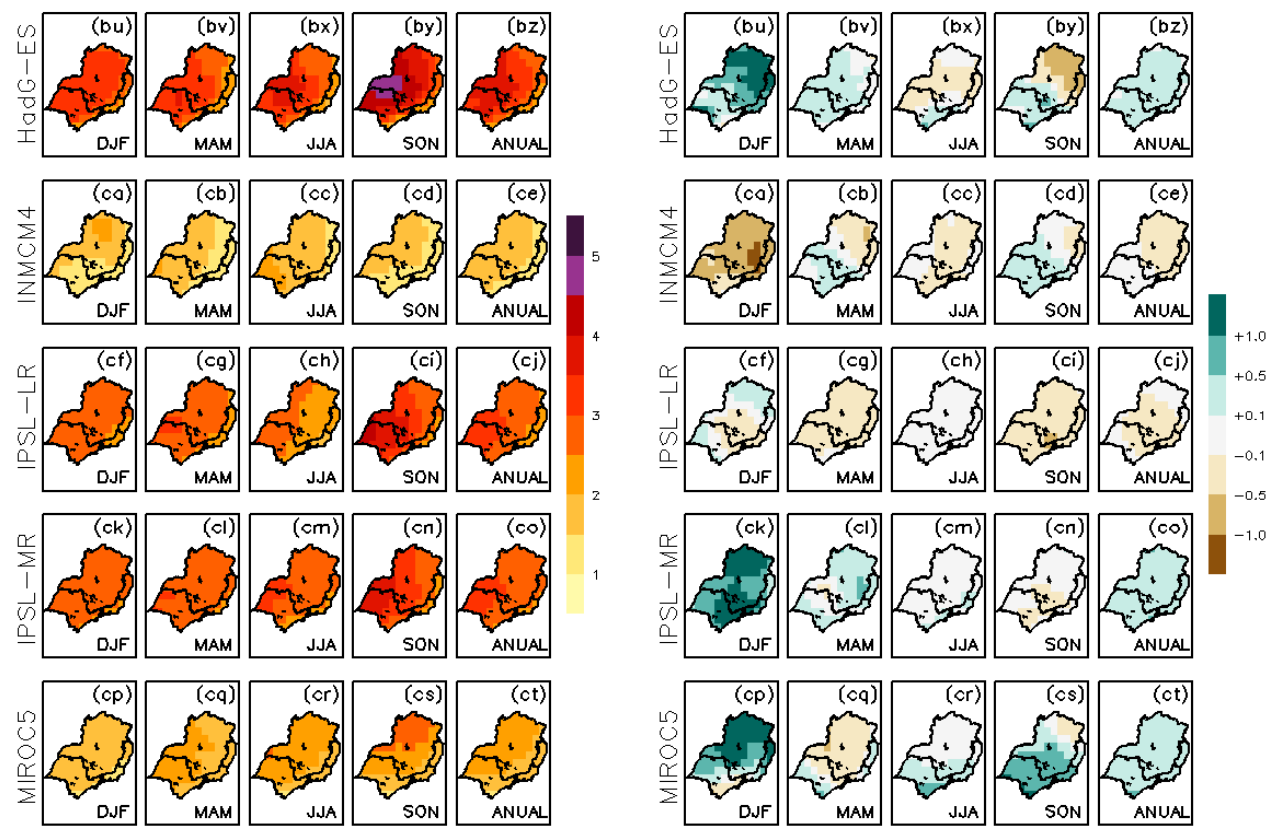


Figura B.2 – Continuação.

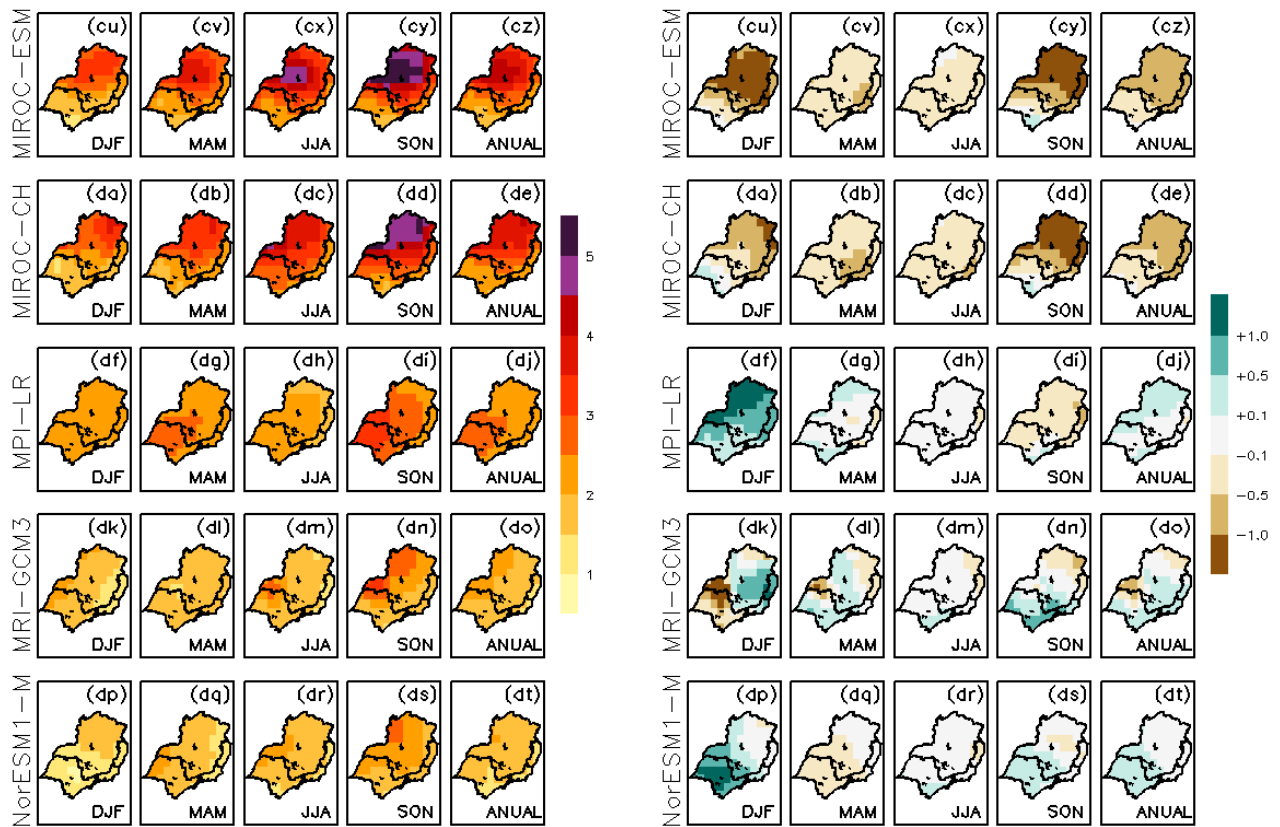


Figura B.2 – Continuação.

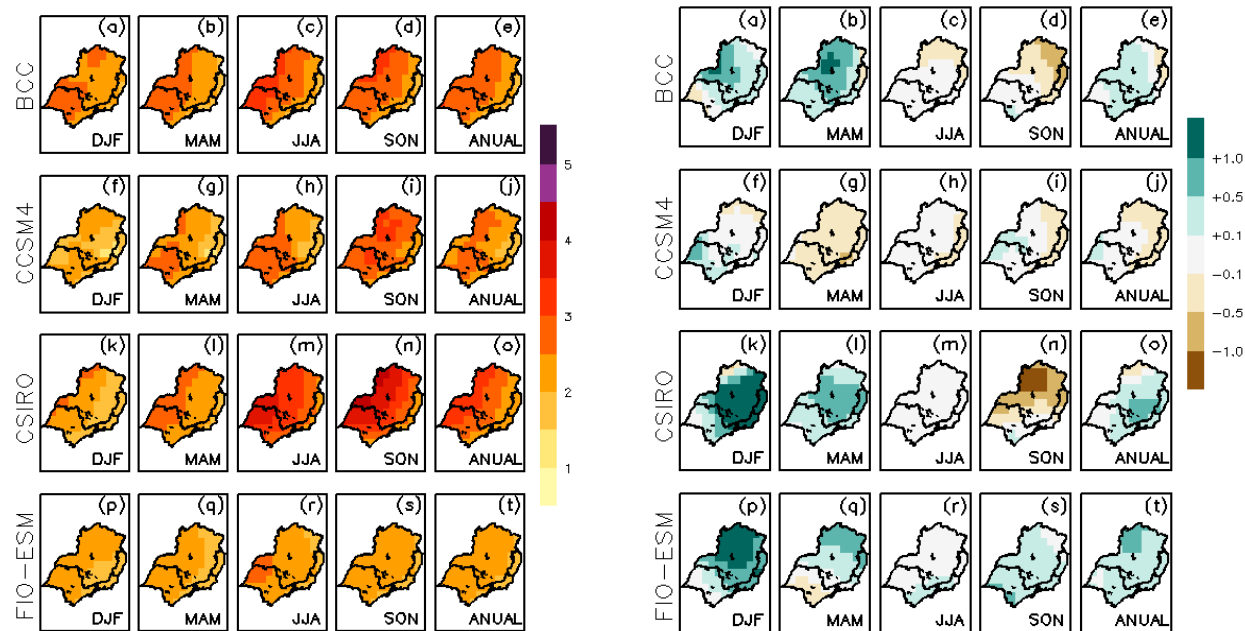


Figura B.3 – Mudanças sazonal e anual de temperatura (painéis da esquerda) e precipitação (painéis da direita) projetadas para o final do século XXI (2071-2100) no cenário de emissões RCP6.0, provenientes do conjunto CMIP5. As mudanças são definidas como a diferença entre os períodos de 2071-2100 e 1961-1990. As unidades de temperatura e precipitação são °C e $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$, respectivamente.

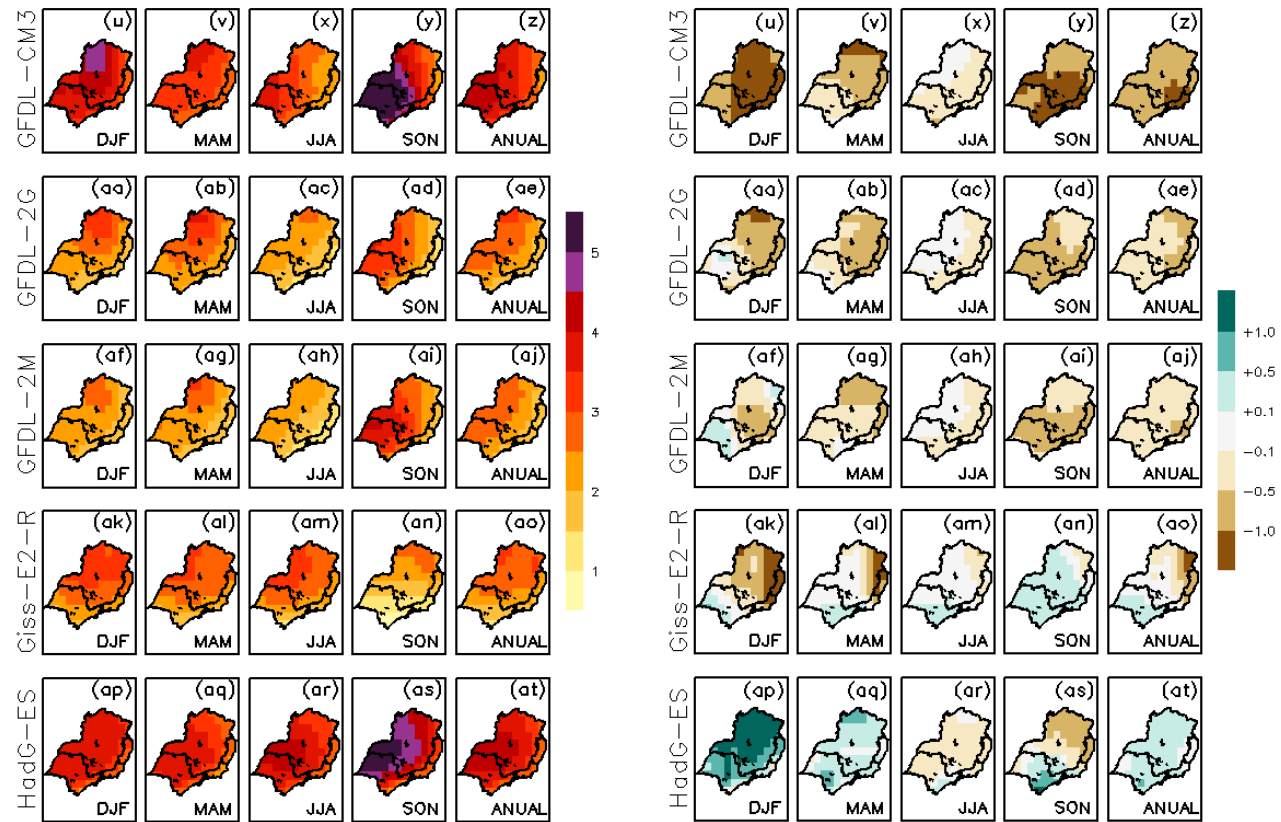


Figura B.3 – Continuação.

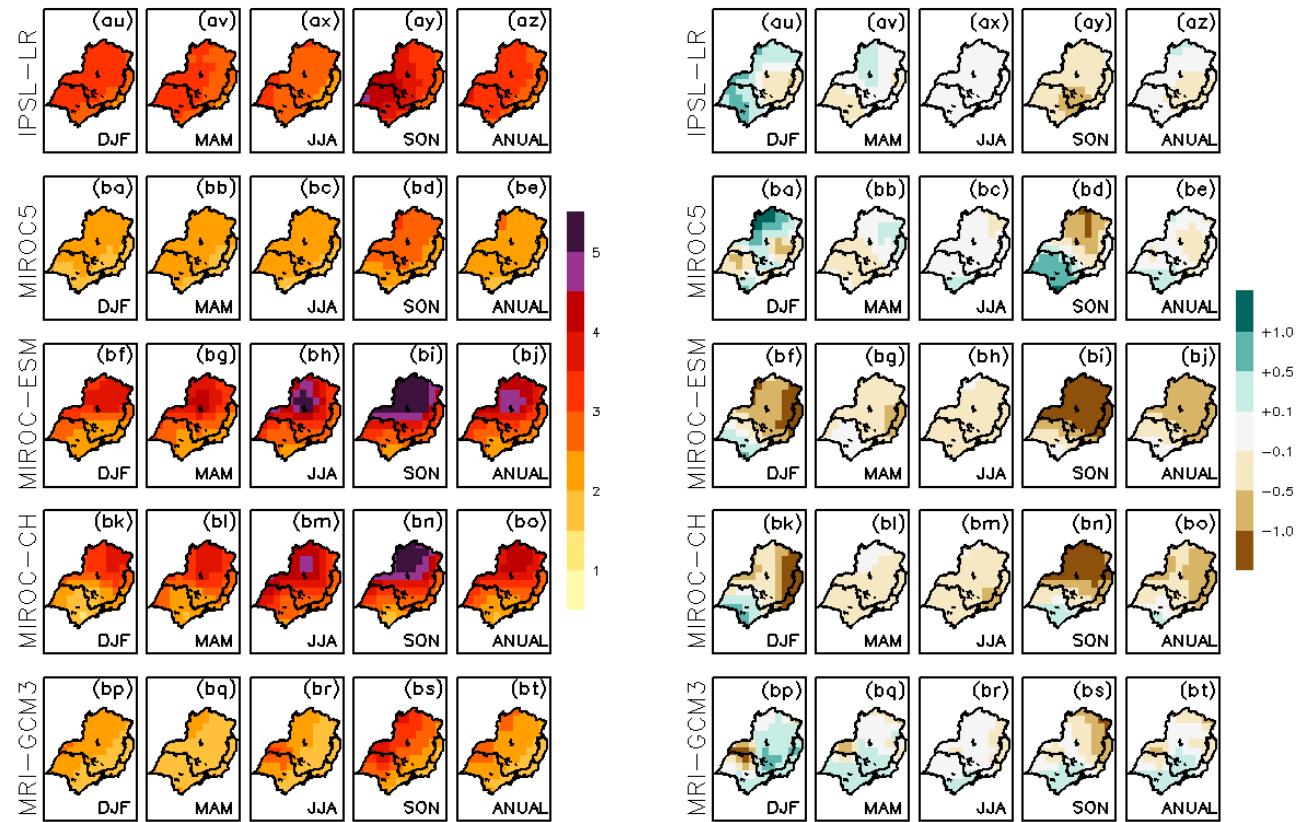


Figura B.3 – Continuação.

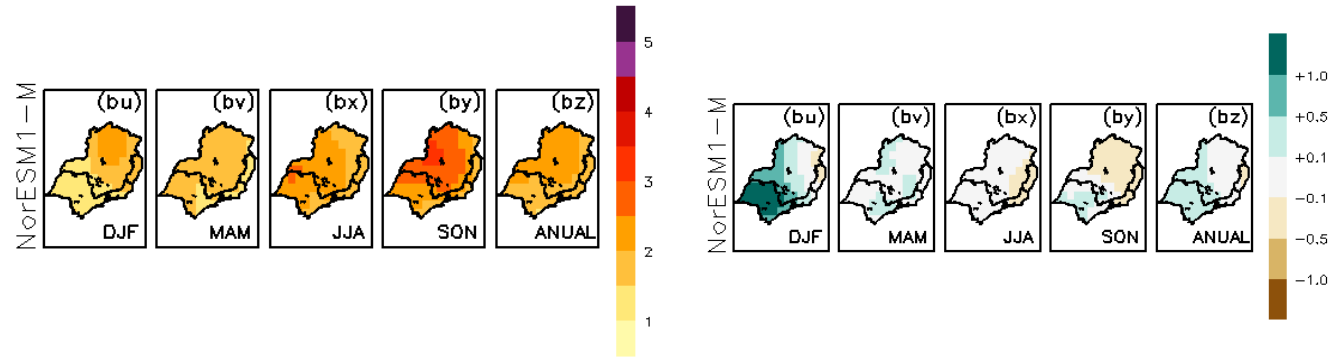


Figura B.3 – Continuação.

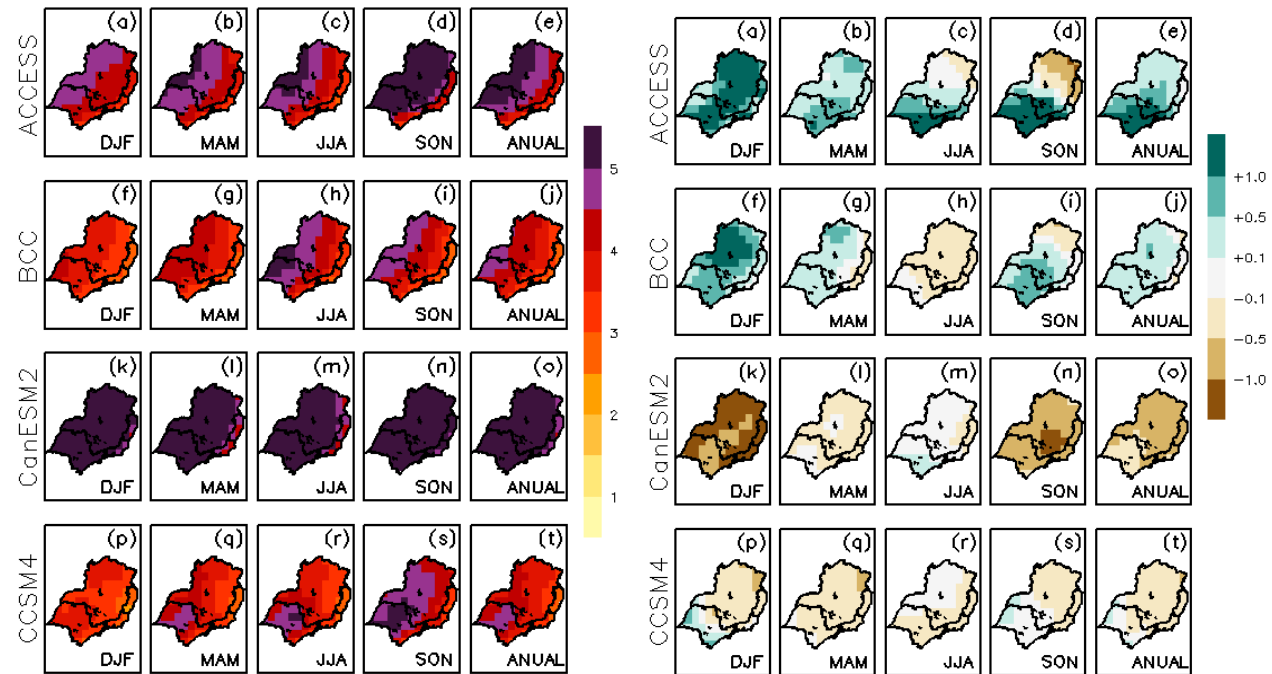


Figura B.4 – Mudanças sazonal e anual de temperatura (painéis da esquerda) e precipitação (painéis da direita) projetadas para o final do século XXI (2071-2100) no cenário de emissões RCP8.5, provenientes do conjunto CMIP5. As mudanças são definidas como a diferença entre os períodos de 2071-2100 e 1961-1990. As unidades de temperatura e precipitação são $^{\circ}\text{C}$ e mm.dia^{-1} , respectivamente.

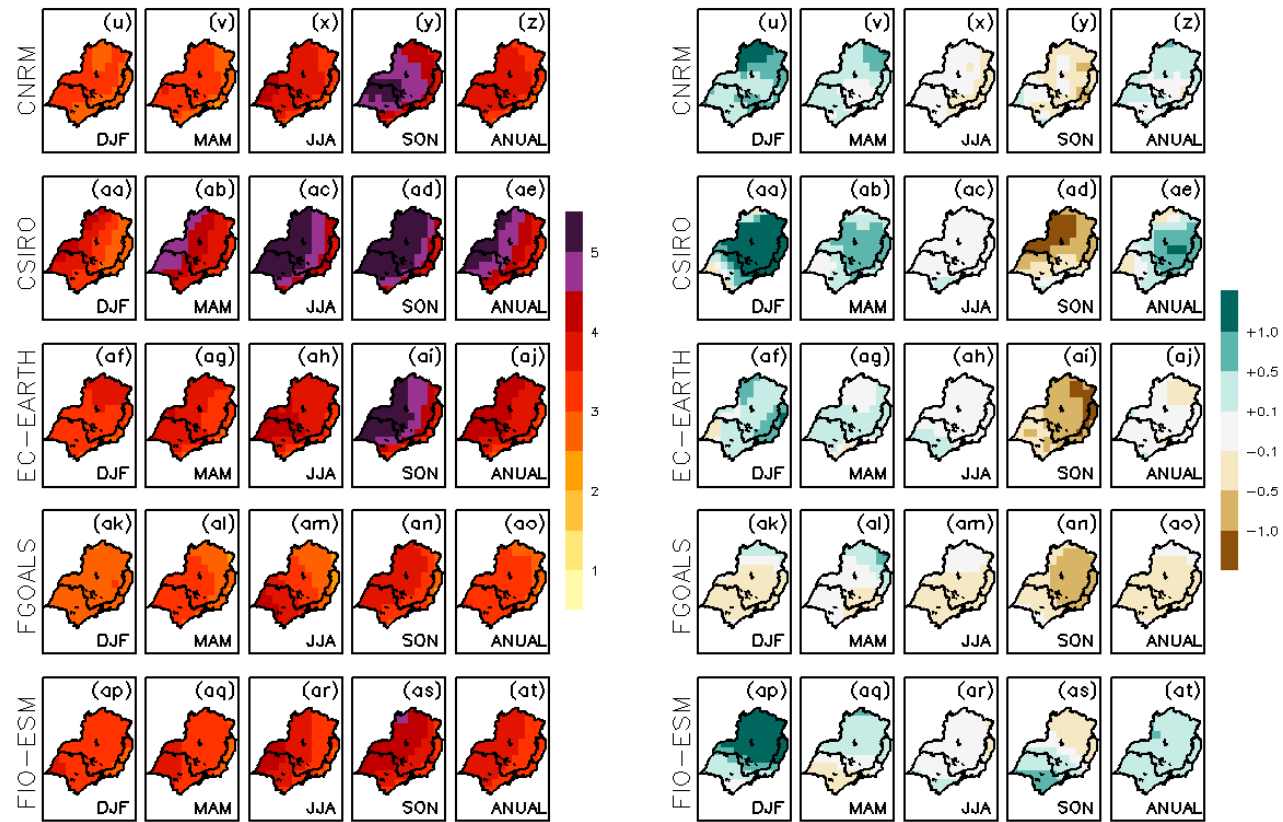


Figura B.4 – Continuação.

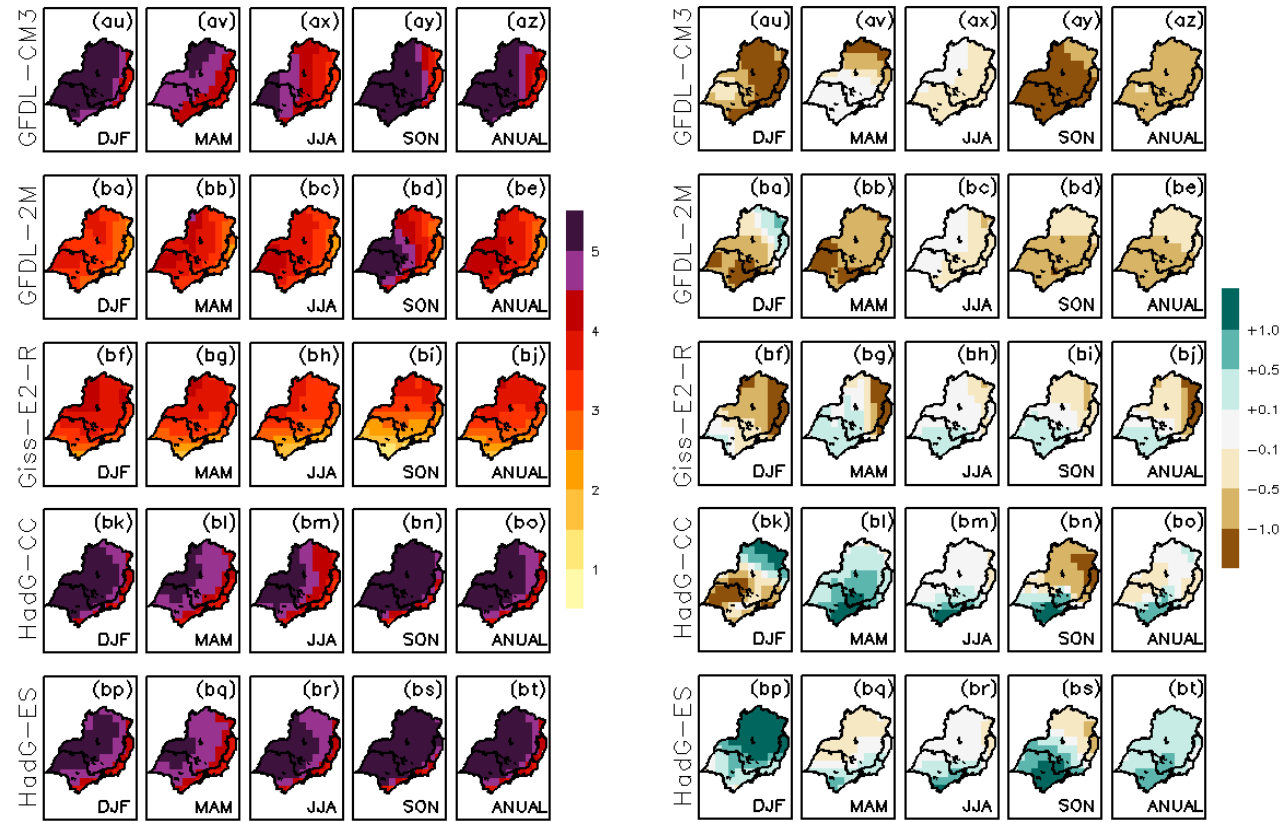


Figura B.4 – Continuação.

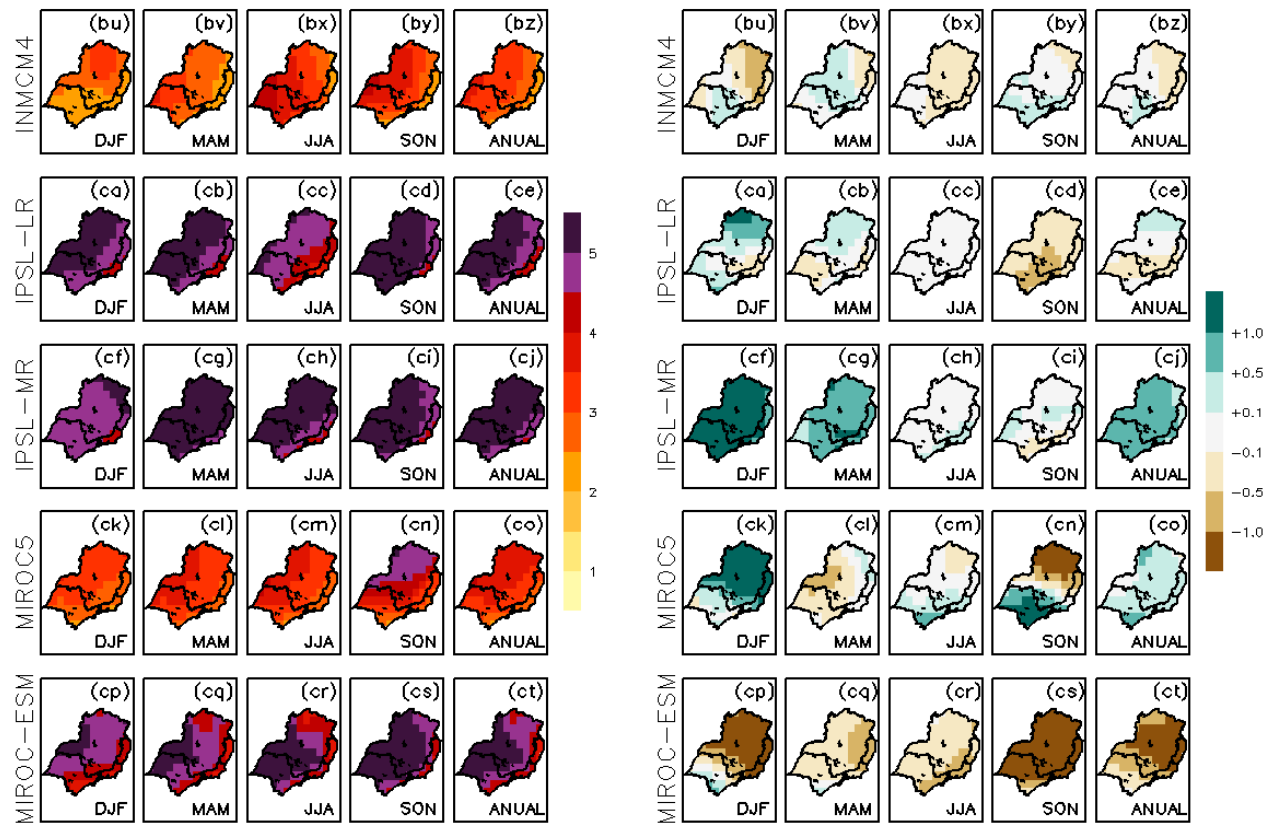


Figura B.4 – Continuação.

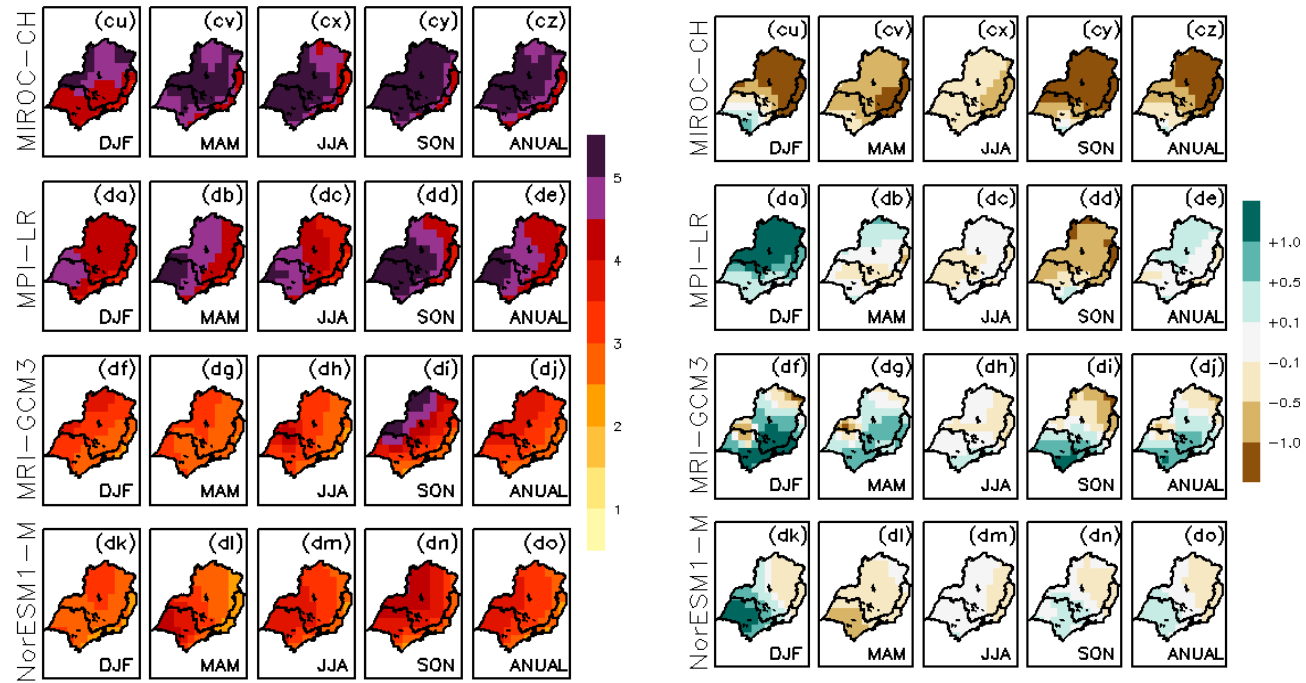


Figura B.4 – Continuação.

