



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

**ANÁLISE DE AGRUPAMENTO DAS PROJEÇÕES DE
PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA PARA O BRASIL
UTILIZANDO OS MODELOS DO CMIP5**

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Bruna Andreлина Silva

Itajubá, MG, Brasil

2017

ANÁLISE DE AGRUPAMENTO DAS PROJEÇÕES DE PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA PARA O BRASIL UTILIZANDO OS MODELOS DO CMIP5

por

Bruna Andrelina Silva

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

Orientador: Dr. Roger Rodrigues Torres

**Itajubá, MG, Brasil
2017**

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a
Monografia

**ANÁLISE DE AGRUPAMENTO DAS PROJEÇÕES DE
PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA UTILIZANDO OS MODELOS
CMIP5 PARA O BRASIL**

elaborada por

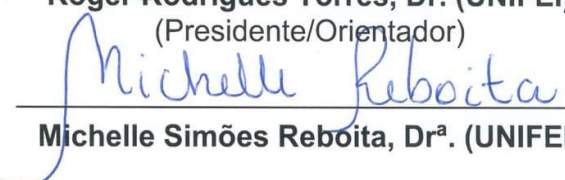
Bruna Andreлина Silva

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

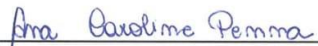
Comissão Examinadora:



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



Michelle Simões Reboita, Dr^a. (UNIFEI)



Ana Caroline Penna, Bel. Met. (UNIFEI)

Itajubá, 17 de novembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Quando comecei a escrever os agradecimentos do meu trabalho final de graduação eu ainda não havia passado por uma das maiores provações da minha vida. E então, não fui capaz de perceber os verdadeiros amigos que, durante esta fase, se mantiveram ao meu lado me apoiando e dando forças para continuar.

Portanto, hoje agradeço aos amigos de turma: Rayan Miranda, Lara Marques, Raniele Pinheiro, Jéssica Mendes, Vitor Marrafon, Thales Teodoro, Mateus Vitoriano e Eduardo Ximenes pelos momentos de felicidade e tristeza que passamos juntos ao longo destes quatro anos de curso, pelo companheirismo e amizade. Vocês são pessoas raras, são como pedras preciosas, pessoas que cresceram junto comigo valorizando sempre as qualidades, ouvindo sempre que necessário fosse e se alegrando a cada etapa vencida sem ter, no olhar, a sombra da cobiça.

A Deus, autor do meu destino, por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades encontradas durante esta caminhada.

Aos Colegas de curso: Camila Sapucci, Aline Freitas, Melissa Dias e Daniela Freitas pelos bons momentos de risadas e encorajamento. Aos meus amigos de vida: Wilber Chomba, Janaina Ferrari, Letícia Costa, Jhaimerson e Andréia Christina.

Ao meu orientador Dr. Roger Rodrigues Torres pelo suporte dado durante a realização deste estudo, pelas correções, incentivos, paciência e ensinamentos transmitidos ao longo de aulas ministradas, orientação em iniciação científica e TFG.

A minha mãe por todo o amor e apoio emocional, pois sem ela isso tudo não seria possível.

A Coordenadora Dra. Michelle Simões Reboita por todo o carinho, força e janelas de oportunidades abertas enquanto me graduava.

A professora e amiga Dra. Sâmia Regina Calheiros por me proporcionar não apenas conhecimento teórico, mas também caráter e afeto.

Aos meus primos Alexsandro José e Alexandre Luíz pelos bons conselhos dados, conselhos estes que meu pai daria se aqui estivesse.

A técnica em meteorologia Tatiana Amaro pelos inúmeros conselhos e palavras de paz

A universidade, ao Instituto de Recursos Naturais, e a todos os docentes do curso de Ciências Atmosféricas por me motivarem como aluna e por fazerem papel fundamental no meu desenvolvimento acadêmico e formação profissional. A banca que do meu TFG pelo

concorde em postergar a data de minha defesa em função de um triste acontecimento.

Ao Grupo de Previsão Climática do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos – GPC – CPTEC, em especial Renata Tedeschi, Carlos Renato, Juliana Anochi e Raul por me proporcionarem a oportunidade de realização do meu estágio, pelo auxílio e conselhos durante esta etapa tão importante em minha vida.

A Orientadora Dra. Mariane Coutinho pela grande oportunidade concedida no final da minha graduação e, a as instituições de fomento FAPEMIG, CNPq e DAE pelo apoio financeiro.

A tia, tios e avó de coração: Inês, Alcides, Fabiano Costa (*In memoriam*) e Efigênia Costa pela imensa ajuda a minha família. Agradeço ainda a Adriana Carvalho também pela ajuda prestada durante longos anos.

Por fim, agradeço aqueles que por vezes me desmotivaram e não acreditaram no meu sonho; foi em vocês que eu encontrei forças para lutar e provar o contrário.

Agora é chegada a hora de chorar de alegria, orgulho e satisfação por mais esta batalha vencida. No futuro, continuarei ousando e me atrevendo, pois, minha história está apenas começando.

Muitíssimo obrigada a todos os envolvidos. Todos foram e são de grande valia e tenham certeza de que vocês e as lembranças nunca serão esquecidos. Fica aqui todo o meu respeito e admiração por todos vocês, meus eternos amigos.

Dedico este trabalho aos meus pais
FRANCISCA ANDRELINA DOS SANTOS SILVA

JOSÉ DONIZETI SILVA (*In memoriam*)

“As melhores amizades são aquelas construídas sem razão.
São aquelas sem previsão.
As que são feitas no acaso.
E sem qualquer explicação.”

GABRIEL DE QUEIROZ RIBEIRO

“A força de dentro é maior. Maior que todos os ventos contrários.”

CAIO FERNANDO ABREU

“Que o caminho seja brando a teus pés, o vento sopra leve em teus ombros; o sol brilhe em tua face, as chuvas caíam serenas em teus campos. E até que, de novo, eu te veja, que Deus te guarde na palma de sua mão.”

BENÇÃO IRLANDESA

“Alguns homens veem as coisas como são, e dizem ‘Por quê?’ Eu sonho com as coisas que nunca foram e digo ‘Por que não?’”

GEROGE BERNARD SHAW

RESUMO

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

ANÁLISE DE AGRUPAMENTO DAS PROJEÇÕES DE PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA UTILIZANDO OS MODELOS DO CMIP5 PARA O BRASIL

AUTORA: BRUNA ANDRELINA SILVA
ORIENTADOR: Dr. ROGER RODRIGUES TORRES
Local e Data da Defesa: Itajubá, 17 de novembro de 2017.

Este trabalho avaliou as projeções de temperatura e precipitação para o Brasil com base no agrupamento pelo método da familiaridade entre os modelos e pelo método da divergência de Kullback Leibler, referente ao cenário de emissões RCP8.5. Foram utilizados vinte e dois modelos do CMIP fase 5 e estes foram interpolados espacialmente para fins de intercomparação. As projeções analisadas correspondem ao período de 2071 a 2100, últimos trinta anos do século XXI. Para avaliar a destreza dos modelos em simular as variáveis citadas, fez-se o cálculo do viés que, nada mais é do que a diferença entre as simulações e observações do período histórico (1971-2000). Em respeito a avaliação do clima presente, notou-se discordância espacial entre os *clusters*. A região com maiores desempenhos foram a região Sul e Nordeste do país, nesta ordem. Já para a temperatura máxima e mínima somente a região Sul denotou homogeneidade entre os *clusters*. A região Centro-Oeste e Norte apresentou maiores divergências entre os grupos de modelos. Fato relevante foi a capacidade dos modelos em caracterizar estações quente com viés úmido e estações úmidas com viés seco. Já as projeções, em geral, mostram aumento da precipitação na região Sul e Nordeste durante o verão e diminuição da precipitação para este mesmo período. Nenhum método ou *cluster* apontou diminuição da temperatura para o domínio do estudo. Os maiores aumentos da temperatura se darão na faixa oeste do país, desde a região Norte até o norte da região Sul, porém, alguns padrões (*clusters*) projetaram o oposto. Todavia, vale ressaltar que se fazem necessárias análises mais robustas com resolução horizontal mais refinada.

Palavras-chave: Análise de *cluster*; Mudanças climáticas; Divergência de Kullback Leibler.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Simulação temporal de mudanças anuais globais na temperatura média da superfície para o período de 1950 a 2100 relativo a 1986 - 2005, utilizando multimodelos do CMIP5. Linhas e sombreamento cinza representam as simulações históricas. Adaptado do Sumário do IPCC – AR5.....	02
Figura 1.2- Detalhamento das incertezas em uma projeção de mudanças climáticas. A sigla AOGCMs significa atmosphere – <i>Ocean General Circulation Models</i> . Fonte: Adaptado de Torres (2014).....	04
Figura 3.1 -Domínio de estudo com contorno das regiões Norte (N), Nordeste (NEB), Centro-Oeste (CO), Sudeste (SEB) e Sul (S).....	07
Figura 3.2 - Classificação climática de Köppen para o Brasil. Fonte: Adaptado de ROLIM (2007).....	08
Figura 3.3 – Detalhamento dos modelos quanto a familiaridade e divergência de Kullback-Leibler realizado por Knutti et al (2013).....	11
Figura 4.1 – Projeção de mudança da média sazonal de precipitação (mm dia ⁻¹) para 2071-2100, com relação ao período histórico de 1971-2000, considerando o método da familiaridade entre os modelos.....	15
Figura 4.2 – <i>Ensemble</i> da projeção de mudança da média sazonal de precipitação (mm dia ⁻¹) para 2071-2100, com relação a 1971-2100, considerando o método da familiaridade entre os modelos.....	16
Figura 4.3 – Projeção da média sazonal de temperatura máxima (°C) para 2071-2100, considerando modelos de uma mesma instituição.....	17
Figura 4.4 – <i>Ensemble</i> da projeção de mudança da média sazonal de temperatura máxima (°C) para 2071-2100, com relação ao período de 1971-2000, considerando o método da familiaridade entre os modelos.....	18
Figura 4.5 – Projeção da média sazonal de temperatura mínima (°C) para 2071-2100, considerando o método da familiaridade entre os modelos.....	20
Figura 4.6 – <i>Ensemble</i> da projeção da média sazonal de temperatura mínima (°C) para 2071-2100, considerando o método da familiaridade entre os modelos.	21
Figura 4.7 – Projeção da média sazonal de precipitação para 2071-2100 (mm dia ⁻¹), considerando o método da divergência de Kullback-Leibler - Knutti et al (2013).....	22
Figura 4.8 – <i>Ensemble</i> da projeção da média sazonal de precipitação (mm dia ⁻¹) para 2071-2100, considerando o método da divergência de Kullback-Leibler - Knutti et al (2013).....	23
Figura 4.9 – Projeção da média sazonal de temperatura máxima (°C) para 2071-2100, considerando o método da divergência de Kullback-Leibler - Knutti et al (2013).....	24
Figura 4.10 – <i>Ensemble</i> da projeção da média sazonal de temperatura máxima (°C) para 2071-2100, considerando o método da divergência de Kullback-Leibler - Knutti et al	

(2013).....	25
Figura 4.11 – Projeção da média sazonal de temperatura mínima (°C) para 2071-2100, considerando o método da divergência de Kullback-Leibler - Knutti et al (2013).	26
Figura 4.12 – <i>Ensemble</i> da projeção da média sazonal de temperatura mínima (°C) para 2071-2100, considerando o método da divergência de Kullback-Leibler - Knutti et al (2013).....	26
Figura 4.13 – Viés da precipitação sazonal (mm dia ⁻¹) para 1971-2000, considerando o método da familiaridade entre os modelos.	28
Figura 4.14 – Viés do <i>ensemble</i> da precipitação sazonal (mm dia ⁻¹) para 1971-2000, considerando o método da familiaridade entre os modelos.	29
Figura 4.15 – Viés da temperatura máxima sazonal (°C) para 1971-2000, considerando o método da familiaridade entre os modelos.	30
Figura 4.16 – Viés do <i>ensemble</i> da temperatura máxima sazonal (°C) para 1971-2000, considerando o método da familiaridade entre os modelos.	31
Figura 4.17 – Viés da temperatura mínima sazonal (°C) para 1971-2000, considerando o método da familiaridade entre os modelos.	32
Figura 4.18 – Viés do <i>ensemble</i> da temperatura mínima sazonal (°C) para 1971-2000, considerando o método da familiaridade entre os modelos.	33
Figura 4.19 – Viés da precipitação sazonal (mm dia ⁻¹) para 1971-2000, considerando o método da divergência de Kullback-Leibler - Knutti et al (2013).	34
Figura 4.20 – Viés do <i>ensemble</i> da precipitação sazonal (mm dia ⁻¹) para 1971-2000, considerando o método da divergência de Kullback-Leibler - Knutti et al (2013).	34
Figura 4.21 – Viés da temperatura máxima sazonal (°C) para 1971-2000, considerando o método da divergência de Kullback-Leibler - Knutti et al (2013).	35
Figura 4.22 – Viés do <i>ensemble</i> da temperatura máxima sazonal (°C) para 1971-2000, considerando o método da divergência de Kullback-Leibler - Knutti et al (2013).	36
Figura 4.23 – Viés da temperatura mínima sazonal (°C) para 1971-2000, considerando o método da divergência de Kullback-Leibler - Knutti et al (2013).....	37
Figura 4.24 – Viés do <i>ensemble</i> da temperatura mínima sazonal (°C) para 1971-2000, considerando o método da divergência de Kullback-Leibler - Knutti et al (2013).	38

LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS

Tabela 3.1 – Modelos do CMIP5 analisados neste estudo com suas respectivas instituições e resolução.	09
Tabela 3.2 – Classificação dos grupos quanto à familiaridade entre os modelos do CMIP5.	12
Tabela 3.3 - Agrupamento dos modelos do CMIP5 quanto à similaridade (método da divergência de Kullback-Leibler).	13

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AOGCM – Ocean General Circulation Models

CH₄ - Metano

CMIP3 - *Coupled Model Intercomparison Project Phase 3*

CMIP5 - *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*

CO – Região Centro-Oeste do Brasil

CO₂ – Dióxido de carbono

CRU – *Climate Research Unit*

DJF – Dezembro, Janeiro e Fevereiro

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

JJA – Junho, Julho e Agosto

MAM – Março, Abril e Maio

MCG – Modelo Climático global

N – Região Norte do Brasil

N₂O – Óxido nitroso

NEB - Região Nordeste do Brasil

O₃ – Ozônio

PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas

RCPs -*Representative Concentration Pathways*

S – Região Sul do Brasil

SEB – Região Sudeste do Brasil

SON – Setembro, Outubro e Novembro

SRES - *Special Report on Emission Scenarios*

WCRP - *World Climate Research Programme*

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

1-	INTRODUÇÃO	1
2-	OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS.....	6
3-	MATERIAL E MÉTODOS	7
	3.1 - DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	7
	3.2 DESCRIÇÃO DOS MODELOS DO CMIP5 UTILIZADOS	8
	3.3 – MÉTODOS DE AGRUPAMENTO: POR FAMILIARIDADE E PELA DIVERGÊNCIA DE KULLBACK-LEIBLER	10
4-	RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
	4.1- CLIMA FUTURO - AGRUPAMENTO POR FAMILIARIDADE	14
	4.1.1 – PRECIPITAÇÃO	14
	4.1.2 - TEMPERATURA MÁXIMA	17
	4.1.3 - TEMPERATURA MÍNIMA	19
	4.2 – CLIMA FUTURO - AGRUPAMENTO PELO MÉTODO DA DIVERGÊNCIA DE KULLBACK- LEIBLER.....	21
	4.2.1 – PRECIPITAÇÃO	21
	4.2.2 – TEMPERATURA MÁXIMA	23
	4.2.3 – TEMPERATURA MÍNIMA.....	25
	4.3 – CLIMA PRESENTE - AGRUPAMENTO POR FAMILIARIDADE.....	27
	4.3.1 - PRECIPITAÇÃO	27
	4.3.2 - TEMPERATURA MÁXIMA	29
	4.3.3 - TEMPERATURA MÍNIMA	31
	4.4 – CLIMA PRESENTE - AGRUPAMENTO PELO MÉTODO DA DIVERGÊNCIA DE KULLBACK-LEIBLER	33
	4.4.1 – PRECIPITAÇÃO	33
	4.4.2 - TEMPERATURA MÁXIMA	35
	4.4.3 - TEMPERATURA MÍNIMA	36
5-	CONCLUSÃO E SUGESTÕES	39
6-	REFERÊNCIAS	41

1- INTRODUÇÃO

O clima é um fator limitante à sobrevivência e ao conforto de espécies e também dos seres humanos, e sofre alterações naturais com o passar dos anos. Todavia, a intensa atividade humana e consequente emissões de gases de efeito estufa vêm acelerando o processo de aquecimento do planeta, causando inúmeras perturbações no sistema climático (KRAEMER et al, 2002). Estas perturbações provocam mudanças a curto, médio e longo prazo, como por exemplo: aumento do nível médio do mar, extinção de espécies, riscos à saúde, migração ou extinção de culturas, variabilidade e aumento da temperatura média do globo (SANTOS, 2016).

No compute do balanço de energia global, o dióxido e monóxido de carbono, representados pelas siglas CO₂ e CO, respectivamente, assim como o metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), o ozônio (O₃), os aerossóis e as alterações no albedo da superfície e na irradiação solar, são forçantes biogeoquímicas e físicas extremamente relevantes e correspondem a alguns dos principais compostos químicos, processos naturais e antropogênicos que são inseridos na construção de cenários de mudanças climáticas (IPCC, 2013).

O aumento ou diminuição de uma forçante radiativa pode influenciar positivamente ou negativamente o aquecimento da superfície terrestre e elementos meteorológicos. Para que seja possível a compreensão dos possíveis impactos, criaram-se Modelos Climáticos Globais (MCG) constituídos de equações matemáticas que traduzem os vários processos atmosféricos, terrestres e oceânicos, com o objetivo de representar o comportamento do sistema climático atual e futuro frente às forçantes climáticas (TRENBERTH, 1992). Atualmente os modelos climáticos são a melhor ferramenta no âmbito das simulações climáticas, porém, ainda há incertezas relacionadas às respostas projetadas e para Trenberth et al (2010); quanto maior o número de processos, componentes e interações reconhecidas pelos modelos climáticos, maiores são as incertezas associadas aos novos elementos.

Para estudos regionais, não é recomendada a utilização isolada dos MCGs, em virtude da capacidade de resolução bastante limitada. Marengo et al. (2010) afirma que MCG são modelos de baixa resolução horizontal (100 a 300 km), tornando-os menos eficientes na representação de processos de menor escala (escala sinótica e meso-escala); esta afirmativa,

por sua vez, contribuí para o acúmulo de incertezas.

Segundo o 5º relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*International Panel on Climate Change - IPCC*), divulgado em 2014, projeta-se um aumento de temperatura média global de até 5,5°C para o final do século XXI, baseado no conjunto de cenários de forçantes climáticas denominado *Representative Concentration Pathways – RCPs*. Tais projeções foram realizadas utilizando os modelos do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 – CMIP5*) do *World Climate Research Programm dia-1e* (WCRP) (MOSS et al., 2010).

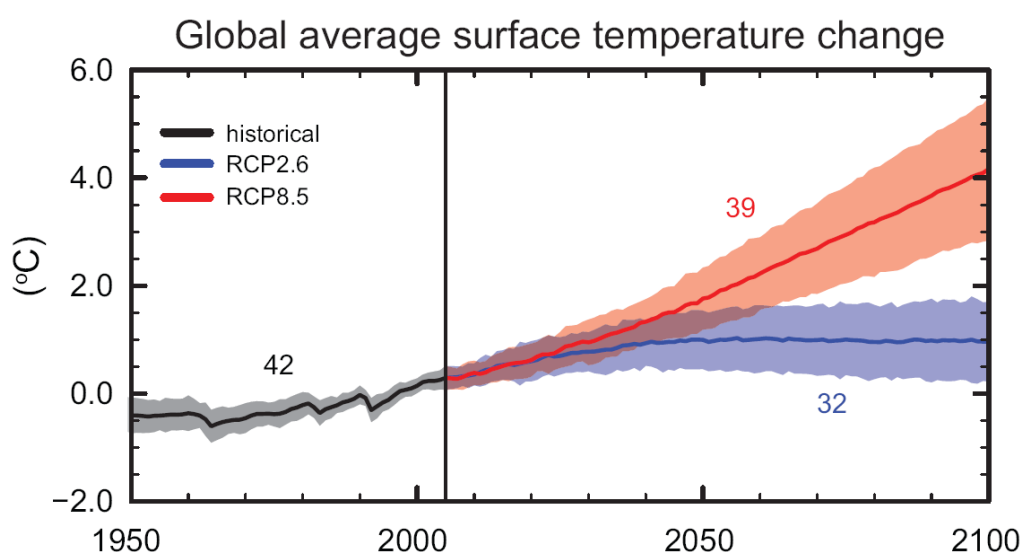


Figura 1.1 – Mudanças anuais globais na temperatura média da superfície para o período de 1950 a 2100 relativo a 1986 - 2005, utilizando multimodelos do CMIP5. Adaptado do Sumário do IPCC – AR5.

A Figura 1.1 ilustra o aquecimento projetado sob um cenário de mitigação e um cenário de alta emissão, juntamente com as mudanças de temperatura observadas. Até meados de 2050 há sobreposição das projeções de temperatura da superfície do globo. Após a primeira metade do século (2050), o aumento da temperatura global diverge entre os cenários de emissões.

Existem quatro cenários de forçantes climáticas: o RCP2.6; RCP4.5; RCP6.0; e RCP8.5 e, cada um destes cenários representa a forçante radiativa medida em W/m^2 projetadas até o final do século XXI, tendo como referência o período pré-industrial, resultante da combinação de diferentes condicionantes climáticos atuantes no balanço energético terrestre (IPCC, 2013). Dentre estes cenários, encontra-se o RCP8.5 que, projeta

uma forçante radiativa de $8,5 \text{ W/m}^2$ no clima futuro e portanto é considerado o cenário mais pessimista.

O Brasil, em particular, apresenta grande extensão territorial, com diversificados tipos de relevo e vegetação, e sofre atuação de vários sistemas meteorológicos de escala sinótica e meso-escala. Portanto, pode ser dividido em regiões com climas distintos, e dada às mudanças projetadas nos padrões de precipitação e temperatura, poderá sofrer alterações ameaçadoras a biodiversidade, a agricultura, ao setor de recursos hídricos e energias renováveis. Sendo assim, é de suma importância uma análise mais detalhada e ampla das tendências de temperatura e precipitação para o Brasil, posto que, é considerado um país de alto potencial econômico. Além disso, um conhecimento mais preciso é necessário para orientar a tomada de decisões e minimização dos danos.

As condições climáticas futuras são embasadas em projeções e são usualmente mostradas como médias de conjuntos de modelos climáticos. Porém, modelos, quando observados separadamente, podem apresentar similaridade ou comportamento diferenciado para as regiões do Brasil ao longo dos meses do ano (Hamada et al. 2008), mesmo para um cenário forçante específico. Segundo Torres (2014), as respostas climáticas simuladas podem ser diferentes devido às considerações físicas e computacionais, que diferem entre os vários modelos de um conjunto, tal como os do CMIP3 e CMIP5. Por exemplo, os diferentes modelos do CMIP3, publicados pelo IPCC-AR4 mostraram cenários divergentes para o campo de precipitação para várias regiões do planeta, alguns projetando aumento de precipitação e outros, redução (MARENGO e VALVERDE, 2007; MARENGO e SOARES, 2005 apud SILVEIRA, 2016). As incertezas nas projeções climáticas globais podem ser divididas em 3 principais campos: incertezas quanto a configuração dos modelos, incertezas quanto a instituição e estrutura de cada modelo e incertezas associadas às forçantes naturais futuras. A Figura 1.2 detalha este quadro.

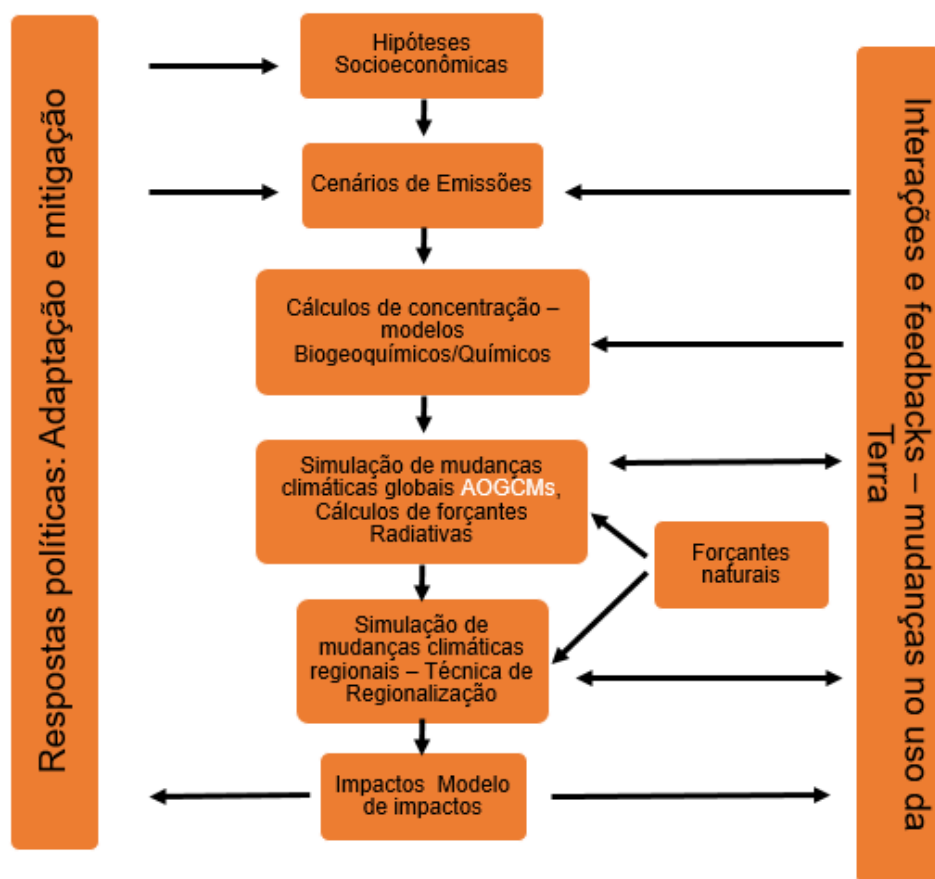


Figura 1.2- Detalhamento das incertezas em uma projeção de mudanças climáticas. A sigla AOGCMs significa atmosphere – Ocean General Circulation Models. Fonte: Adaptado de Torres (2014).

Portanto, neste trabalho, no intuito de buscar um melhoramento nas análises das projeções de precipitação e temperatura, optou-se pelo método de agrupamento. Trata-se de um método que reuni modelos em grupos, de tal forma que exista similaridade dentro do grupo e dissimilaridade entre os grupos. A análise de agrupamento, muitas vezes associada à análise de componentes principais, tem sido utilizada na climatologia para a definição de regiões climáticas homogêneas (MUNÕZ-DIAZ & RODRIGO, 2003; UNAL ET AL.,2003; UVO, 2003 apud KELLER FILHO, 2005).

O propósito desta análise de agrupamento é separar os modelos climáticos em *clusters*, afim de minimizar as incertezas quanto às projeções e melhorar a compreensão dos resultados projetados para as cinco regiões do Brasil entre 2071 a 2100. Neste trabalho, optou-se por separar os modelos climáticos globais em dois agrupamentos. O primeiro foi baseado na familiaridade entre os modelos, ou seja, foram agrupados modelos do mesmo instituto ou que compartilham as mesmas equações numéricas. O outro agrupamento foi feito com base nos modelos de mesma similaridade na representação do clima presente e projeções futuras.

Ambas as escolhas foram seguindo a classificação de Knutti et al (2013).

O processo de agrupamento envolve, basicamente, duas etapas: i) a primeira relaciona-se com a estimativa de uma medida de homogeneidade entre os progenitores e ii) a segunda, com a adoção de uma técnica de agrupamento para a formação dos grupos (CRUZ & REGAZZI, 1994).

Neste trabalho, foram agrupados os modelos da 5ª geração do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP5) com base em duas técnicas de agrupamento.

2- OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS

Este Trabalho Final de Graduação tem como objetivo principal realizar uma análise de agrupamento entre os modelos climáticos globais do CMIP5 quanto às projeções sazonais de precipitação, temperatura mínima e temperatura máxima para as cinco regiões do Brasil: Norte (N), Nordeste (NEB), Sudeste (SEB), Centro-Oeste (CO) e Sul (S), até o final do século XXI (2071-2100), utilizando o cenário de forçante climática RCP8,5.

Aninhado a este objetivo geral coexistem os três objetivos específicos descritos abaixo:

- Discutir as projeções climáticas de temperatura e precipitação baseada em dois métodos de agrupamento. a) Método 1: Agrupamento por familiaridade e b) Método 2: Agrupamento pelo método da divergência de Kullback-Leibler;
- Avaliar a capacidade de simulação de determinado *cluster* com base no cálculo do viés;
- Analisar a similaridade entre os *clusters* de um mesmo método e a similaridade entre os métodos.

3- MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - Descrição da área de estudo

A área de estudo compreende todo o território brasileiro, país com população superior a 200 milhões de habitantes e de maior extensão territorial da América do Sul. É contornado pelo oceano Atlântico, o qual tem importante papel na manutenção do clima na região. O Brasil, por ser extenso territorialmente sofre influência de diversos sistemas sinóticos, o que resulta nas alterações de temperatura e precipitação em escala diária. As regiões do Brasil se dividem em Norte (N), Nordeste (NEB), Centro-Oeste (CO), Sudeste (SEB) e Sul (S). Tais regiões serão analisadas em particular e estão contornadas na Figura 3.1.

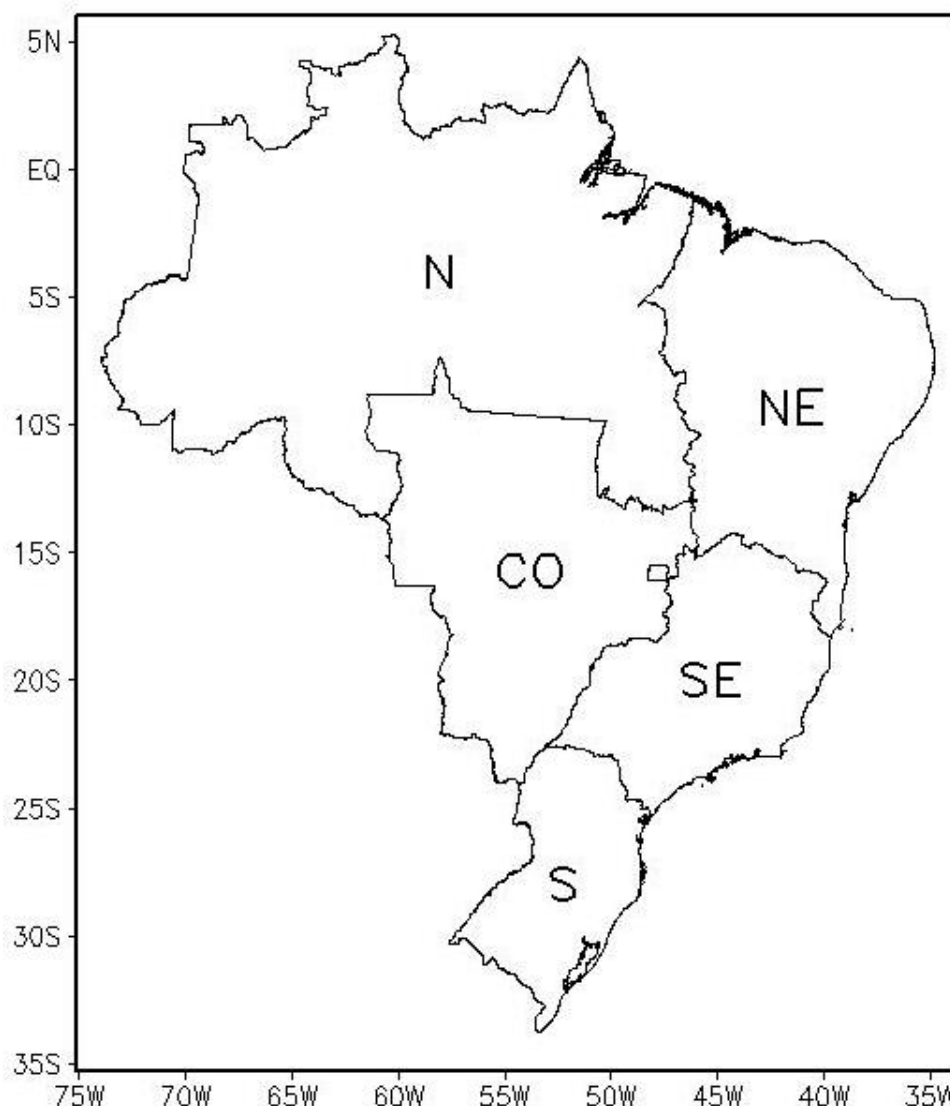


Figura 3.1-Domínio de estudo com contorno das regiões Norte (N), Nordeste (NEB), Centro-Oeste (CO), Sudeste (SEB) e Sul (S).

O país dispõe de uma ampla variedade climática e topografia variada. Segundo a classificação de Köppen-Geiger, o Brasil é dividido em seis diferentes tipos de clima: equatorial, semiárido, subtropical, temperado, tropical e tropical de altitude (ROLIM, 2007). Köppen subdivide o clima do Brasil relacionando a vegetação com temperaturas médias mensais e anuais, sazonalidade e precipitação. O Sul e parte da região Sudeste se destaca pelo clima subtropical úmido com acumulados de precipitação altos durante o ano todo. O semiárido predomina somente em parte da região Nordeste. Em toda a região Norte e Centro-Oeste destaca-se o clima tropical. A Figura 3.2 detalha a classificação climática de Köppen para o Brasil.



Figura 3.2 - Classificação climática de Köppen para o Brasil. Fonte: MARIANO (2010).

3.2 Descrição dos modelos do CMIP5 utilizados

Os modelos utilizados neste estudo fazem parte da 5ª fase do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (*Coupled Model Intercomparison Project*), e são

disponibilizados pelo *Earth System Grid data portal* (<https://esgf-data.dkrz.de>).

Tabela 3.1 – Modelos do CMIP5 analisados neste estudo com suas respectivas instituições e resolução aproximada.

INSTITUIÇÃO, país	Modelo	Resolução (Lat x Lon)
CNRM-CERFACS, França	CNRM-CM5	1,5° x 1,5
CSIRO-BOM, Austrália	ACCESS1.0	1,25 x 1,875°
CSIRO-BOM, Austrália	ACCESS1.3	1,25 x 1,875°
EC-EARTH, Europa	EC-EARTH	1,1215° x 1,125°
FIO, SOA, China	FIO-ESM	2,75° x 2,81°
FIO, SOA, China	FGOALS-s2	3,05° x 2,81°
IPSL, França	IPSL-CM5A-LR	1,8° x 3,7°
IPSL, França	IPSL-CM5A-MR	1,89° x 3,75°
MIROC, Japão	MIROC-ESM	2,8° x 2,8°
MIROC, Japão	MIROC-ESM-CHEM	2,8° x 2,8°
MIROC, Japão	MIROC5	1,5° x 1,5
MOHC, Inglaterra	HadGEM2-ES	1,25° x 1,25°
MPI-M, Alemanha	MPI-ESM-LR	1,8° x 1,8°
MPI-M, Alemanha	MPI-ESM-MR	1,865 x 1,875
NCAR, USA	CCSM4	0,9424° x 2,25°
NCC, Noruega	NorESM1-M	1,89° x 2,5°
NCC, Noruega	NorESM1-ME	1° x 1°
NOAA-GFDL, USA	HadGEM2-CC	1,8° x 1,2°
NOAA-GFDL, USA	GFDL-CM3	2° x 1,25°
NOAA-GFDL, USA	GFDL-ESM2G	2,01° x 1,25°
NOAA-GFDL, USA	GFDL-ESM2M	2,022° x 2,5°
NOAA-GFDL, USA	BCC-CSM1.1	2,8° x 2,8°

Como visto na Tabela 3.1, os modelos utilizados deste estudo possuem resoluções distintas, sendo necessária uma interpolação. Sendo assim, todos os modelos, foram interpolados a uma grade regular com resolução de 2,5° de latitude por longitude para intercomparação. As variáveis interpoladas são médias mensais de precipitação e temperatura (máxima e mínima). O período compreendido entre 1971 a 2000 refere-se ao período histórico e o período referente ao futuro compreende os anos entre 2071-2100. Em posse disso, foram calculadas as projeções de mudanças sazonais e anual. As projeções são calculadas mediante a diferença entre o campo da variável projetada (2071-2100) menos o campo da variável simulada pelo modelo (1971-2000).

Para testar a destreza dos modelos, optou-se por calcular o viés para cada *cluster*. Este cálculo foi realizado após a obtenção de dados observados de temperatura máxima,

temperatura mínima e precipitação para o mesmo período histórico, 1971 a 2000. O viés é calculado pela diferença entre o período histórico simulado pelos modelos, após agrupamento, e o campo relativo ao período histórico observado.

Os dados observados foram obtidos da plataforma CRU (*Climate Research Unit*) e foram interpolados espacialmente para a mesma resolução horizontal dos modelos, 2,5° de latitude por longitude.

O que se espera com o cálculo do viés é atribuir característica de superestimativa ou subestimativa, e melhorar as análises finais do agrupamento. Para que o *cluster* receba característica de superestimativa, o mapa espacial no qual será apresentado o viés deve, denotar valores maiores que zero; valores menores que zero indicam subestimativa do grupo de modelos (*cluster*). Quanto mais próximo de zero, menor é a diferença entre o campo observado e o campo simulado pelo modelo e portanto atribui-se maior destreza e confiabilidade a este *cluster*.

Em outras palavras, será atribuído maior relevância aos *clusters* com menores viés, uma vez que espera-se que determinado *cluster* seja capaz de projetar com êxito as mudanças de temperatura e precipitação para o final do século XXI.

3.3 – Métodos de agrupamento: por familiaridade e pela divergência de Kullback-Leibler

Há instituições com modelos climáticos globais derivados de outros modelos, assim como existem modelos de instituições diferentes porém envolvem equações matemáticas numéricas parecidas.

Estes, são classificados por Knutti et al (2013), como modelos de uma mesma família. Aqueles que, na Figura 3.3 aparecem com a mesma cor, possuem familiaridade entre si. Acredita-se que este grupo de modelos retratam um mesmo padrão de distribuição e magnitude de uma determinada variável. Partindo da premissa de que estes, são modelos similares, agrupou-se vinte MCG de modo a constituir sete *clusters* (Tabela 3.2).

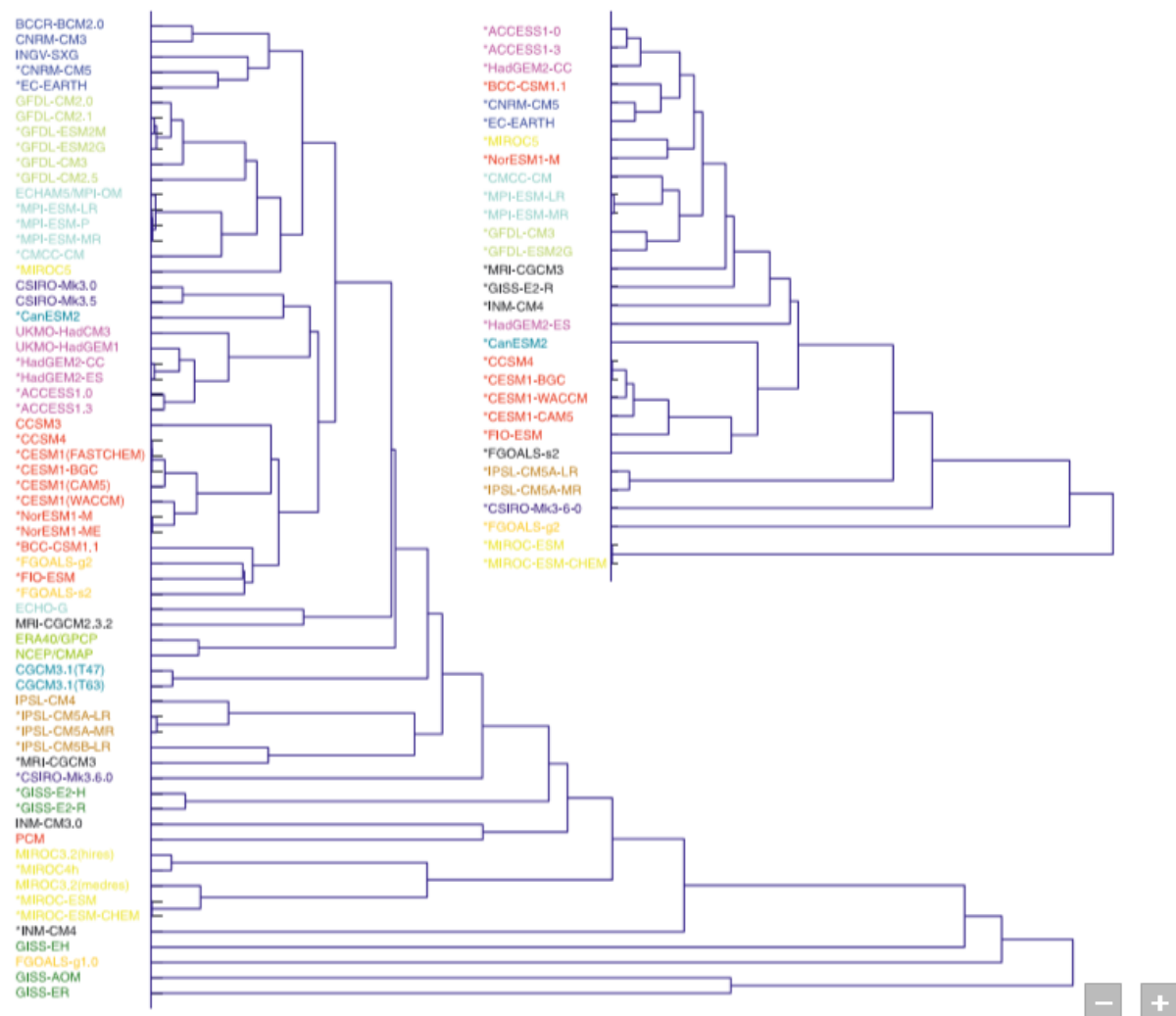


Figura 3.3 – Detalhamento dos modelos quanto a familiaridade e divergência de Kullback-Leibler realizado por Knutti et al (2013).

Nem todos os modelos descritos na Figura 3.3 foram utilizados devido a falta desses dados na plataforma do CMIP5.

Tabela 3.2 – Classificação dos grupos quanto à familiaridade entre os modelos do CMIP5.

<i>Clusters</i>	INSTITUIÇÃO, país	Modelo
<i>Cluster 1</i>	CSIRO-BOM, Austrália	ACCESS1.0
		ACCESS1.3
	NOAA-GFDL, USA	HadGEM2-CC
	MOHC, Inglaterra	HadGEM2-ES
<i>Cluster 2</i>	NCAR, USA	CCSM4
	FIO, SOA, China	FIO-ESM
	NCC, Noruega	NorESM1-M
		NorESM1-ME
<i>Cluster 3</i>	EC-EARTH, Europa	EC-EARTH
	CNRM-CERFACS, França	CNRM-CM5
<i>Cluster 4</i>	MIROC, Japão	MIROC-ESM
		MIROC-ESM-CHEM
		MIROC5
<i>Cluster 5</i>	NOAA-GFDL, USA	GFDL-CM3
		GFDL-ESM2G
		GFDL-ESM2M
<i>Cluster 6</i>	IPSL, França	IPSL-CM5A-LR
		IPSL-CM5A-MR
<i>Cluster 7</i>	MPI-M, Alemanha	MPI-ESM-LR
		MPI-ESM-MR

Para cada grupo de modelos da Tabela 3.2, foi calculado a média sazonal do período histórico, e futuro; no intuito de realizar o cálculo do viés, bem como das projeções, foram utilizadas as funções para cálculos estatísticos do Climate Data Operators CDO, inseridas em *scripts* em Shell; para a plotagem dos mapas, foi utilizado o software GrADS. Foram geradas ainda, séries temporais para facilitar a visualização dos resultados. Os gráficos das séries temporais foram gerados com o software Origin, versão 8.

Outros três *clusters* foram criados (Tabela 3.3) com base no agrupamento de Knutti et al (2013) – Figura 2.3. O método aplicado por ele e seus colaboradores para quantificar as simulações foi o da divergência de Kullback-Leibler proposto por Salomon Kullback e Richard Leibler em 1951 que permite a comparação de informação dada por duas funções. Este método considera o estado médio, o ciclo sazonal, as variações interanuais e a correlação espacial (MASSON e KNUTTI, 2011) e por esse motivo, esta é uma medida amplamente utilizada em testes de adequabilidade.

Ainda na Figura 2.3, o esquema da direita indica que cada modelo agrupado em pares

possuí semelhança entre as simulações e, cada par de modelos não agrupados indica dissimilaridade/desacordo entre as simulações. Neste método foram agrupados dezessete MCG.

Tabela 3.3 - Agrupamento dos modelos do CMIP5 quanto à similaridade (método da da divergência de Kullback-Leibler).

<i>Clusters</i>	INSTITUIÇÃO, país	Modelo
<i>Cluster 1</i>	CSIRO-BOM, Austrália	ACCESS1.0
		ACCESS1.3
	NOAA-GFDL, USA	HadGEM2-CC
		BCC-CSM1.1
	EC-EARTH, Europa	EC-EARTH
	CNRM-CERFACS, França	CNRM-CM5
	MIROC, Japão	MIROC5
	NCC, Noruega	NorESM1-M
<i>Cluster 2</i>	MOHC, Inglaterra	HadGEM2-ES
	MPI-M, Alemanha	MPI-ESM-LR
		MPI-ESM-MR
	NOAA-GFDL, USA	GFDL-ESM2G
		GFDL-ESM2M
<i>Cluster 3</i>	NCAR, USA	CCSM4
	CCCMA, Canadá	CanESM2
	FIO, SOA, China	FIO-ESM
		FGOALS-s2

4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1- Clima futuro - Agrupamento por familiaridade

As análises relativas às projeções do clima futuro estão detalhada em escala de tempo sazonal para as três variáveis em análise: temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação, as quais são apresentadas separadamente nas subseções seguintes.

4.1.1 – Precipitação

Os campos de precipitação média sazonal estão ilustrados nas Figuras 4.1 e 4.2 e constituem a diferença entre as projeções para 2071 – 2100 e as simulações para 1971-2000.

Todos os sete *clusters* divergem com relação ao regime médio de precipitação. O *cluster* 1 (Figura 4.1) projeta diminuição do total pluviométrico em toda a região Norte do Brasil e aumento de mais de 1,5 mm dia⁻¹ na região Sul entre as estações de verão a primavera austral. Na região Sudeste, parte leste da região Centro-Oeste e parte do Nordeste brasileiro é notável um sinal de aumento da precipitação apenas para o verão, meses entre dezembro e fevereiro. O *cluster* 2, é apresentado com diminuição da precipitação nas estações de verão e outono em quase todo o Nordeste brasileiro e diminuição de até 2 mm dia⁻¹ em parte da região Norte durante a primavera. Na média anual, se mantém apenas um sinal de redução (de 1 a 1,5 mm dia⁻¹) para o Nordeste do Brasil.

O *cluster* 3 se destaca por não apresentar padrão muito elevado de aumento ou diminuição em todo o território brasileiro, com exceção de parte da região Sul na estação de primavera e a região de divisa entre os regiões CO, SEB e N durante o verão, que denotou aumento de até 1,5 mm dia⁻¹. Na média anual, não há predominância muito elevada de aumento ou diminuição, assim como para o *cluster* 4 e 5. O *cluster* 4 mostra um sinal positivo na estação de verão para o norte da região Norte e sinal oposto nesta mesma região para a estação de inverno. Entre o sul do NEB, leste do CO e norte do SEB, há projeções de aumento da precipitação nos meses de setembro a novembro.

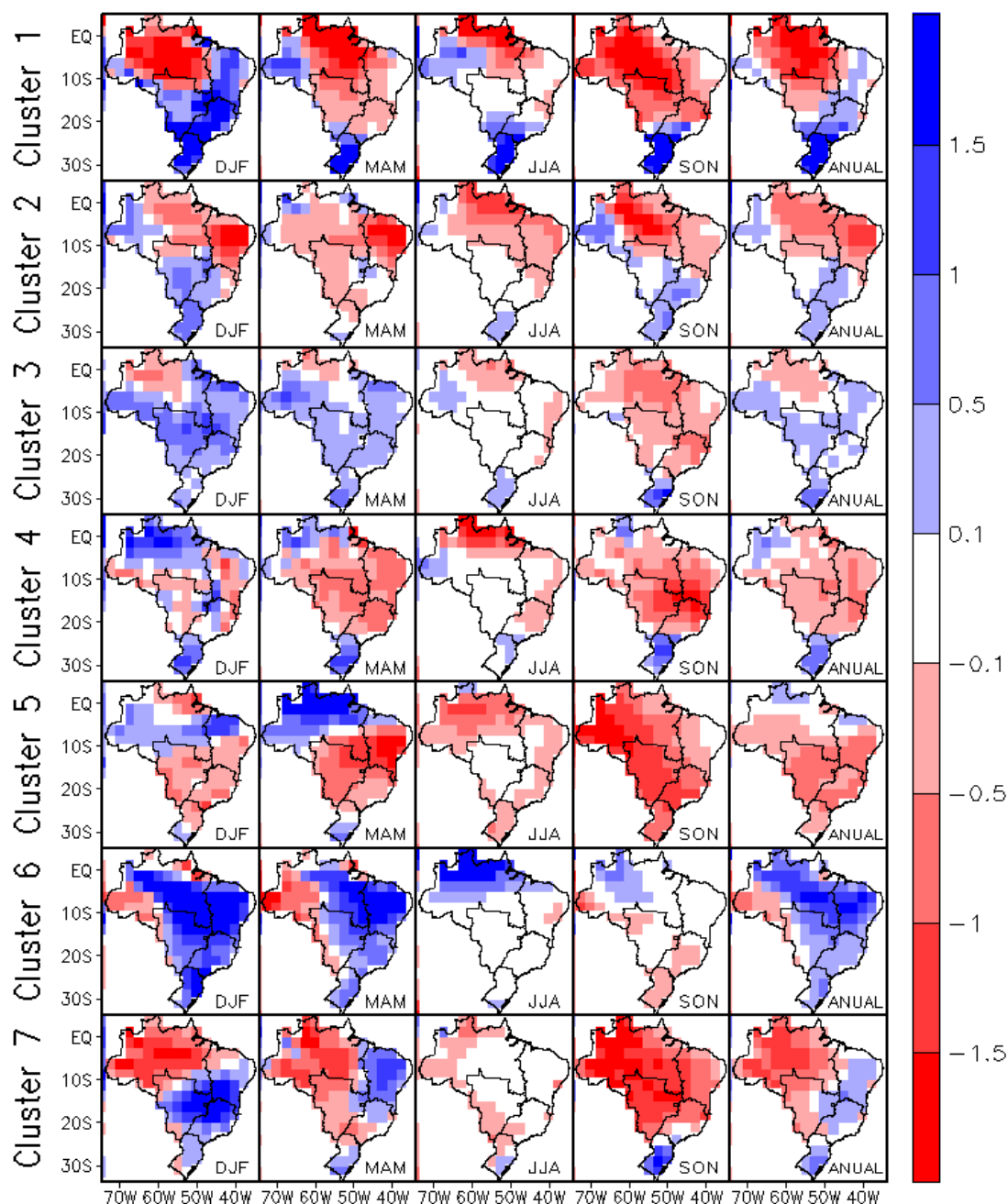


Figura 4.1 – Projeção de mudança da média sazonal de precipitação (mm dia⁻¹) para 2071-2100, com relação ao período histórico de 1971-2000, considerando o método da familiaridade entre os modelos.

Já o *cluster* 5 é destacado pelo sinal negativo, na primavera, na região da zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que se estende no sentido noroeste-sudeste, desde a Amazônia até o Sudeste do Brasil. Outro padrão notável é o aumento de mais de 1,5 mm dia⁻¹ na parte norte da região Norte, bem como o decréscimo de cerca de 2 mm dia⁻¹ em quase todo o Nordeste brasileiro durante o outono. O *cluster* 6 projeta aumento da precipitação (>1,5 mm dia⁻¹) desde o oeste da Amazônia até o litoral nordestino, abrangendo o noroeste do Centro – Oeste e norte de Minas Gerais; esse padrão permanece com pequena queda de sua magnitude,

desde o verão até o outono. Em JJA (Junho, Julho e Agosto), o aumento descrito anteriormente, migra para o norte da região Norte e se opõe ao padrão de precipitação visto nos dias atuais, já que nesta região, os máximos de chuva ocorrem até o fim do primeiro semestre.

Por fim, na análise deste agrupamento, ressalta-se a inversão que ocorre no verão, ilustrado nos mapas referentes ao sétimo e último *cluster*; enquanto que percebe-se aumento da precipitação na região Norte, o contrário é perceptível na região que abrange o norte do NEB, o sul do SEB e oeste do CO. Nas projeções analisadas, a região Norte tenderá a ficar ainda mais seca durante a primavera e um sinal de aumento é notado na região Sul do Brasil. Na média anual, mantém-se a diminuição da precipitação na região Norte do país a cerca de 1,5 mm dia⁻¹.

A Figura 4.2 apresenta a média entre os sete *clusters* já descritos acima para o mesmo período. Pode-se notar diminuição (<1,5 mm dia⁻¹) do total pluviométrico na parte leste da região Norte nos meses de março a maio; esse padrão diminui quando se aproxima do fim da estação fria (JJA). Na parte central da região Norte, a diminuição de precipitação é maior na primavera e verão. Toda a região Sul do país mostra sinal positivo de precipitação desde e outono, aumentando na primavera, chegando a abranger uma pequena extensão territorial do Centro-Oeste e sul do Sudeste. O NEB e norte da região SEB apresenta projeção de aumento significativo da precipitação apenas para a estação quente (DJF).

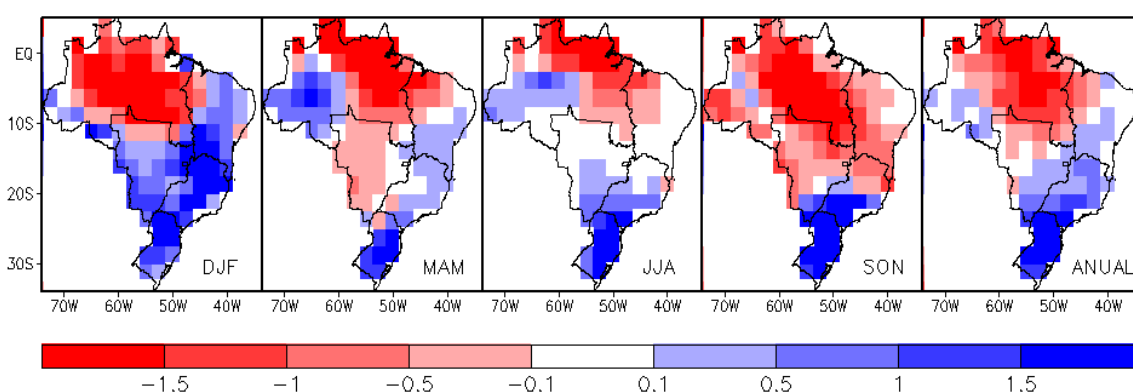


Figura 4.2 – Ensemble da projeção de mudança da média sazonal de precipitação (mm dia⁻¹) para 2071-2100, com relação a 1971-2100, considerando o método da familiaridade entre os modelos.

Na média anual, predomina apenas o aumento do total pluviométrico na região Sul e a diminuição em toda a parte que se estende desde o centro até o leste da região norte do Brasil.

De modo geral, a média entre os *clusters* se assemelha mais ao padrão de chuva visto para o *cluster* 1.

4.1.2 - Temperatura máxima

Assim como a precipitação, as projeções de temperatura máxima são apresentadas em mapas espaciais da diferença entre o período futuro e o período histórico simulado pelas médias (ensemble) entre os modelos climáticos globais de cada *cluster*. Todos os sete *clusters* concordam com o sinal positivo desta variável para todo o país. Ou seja, nenhum *cluster* indicou diminuição da temperatura para este cenário em todas as estações do ano. O que ocorre é a diferença na magnitude desta projeção, como mostra a Figura 4.3, e esta, será a discussão desta subseção.

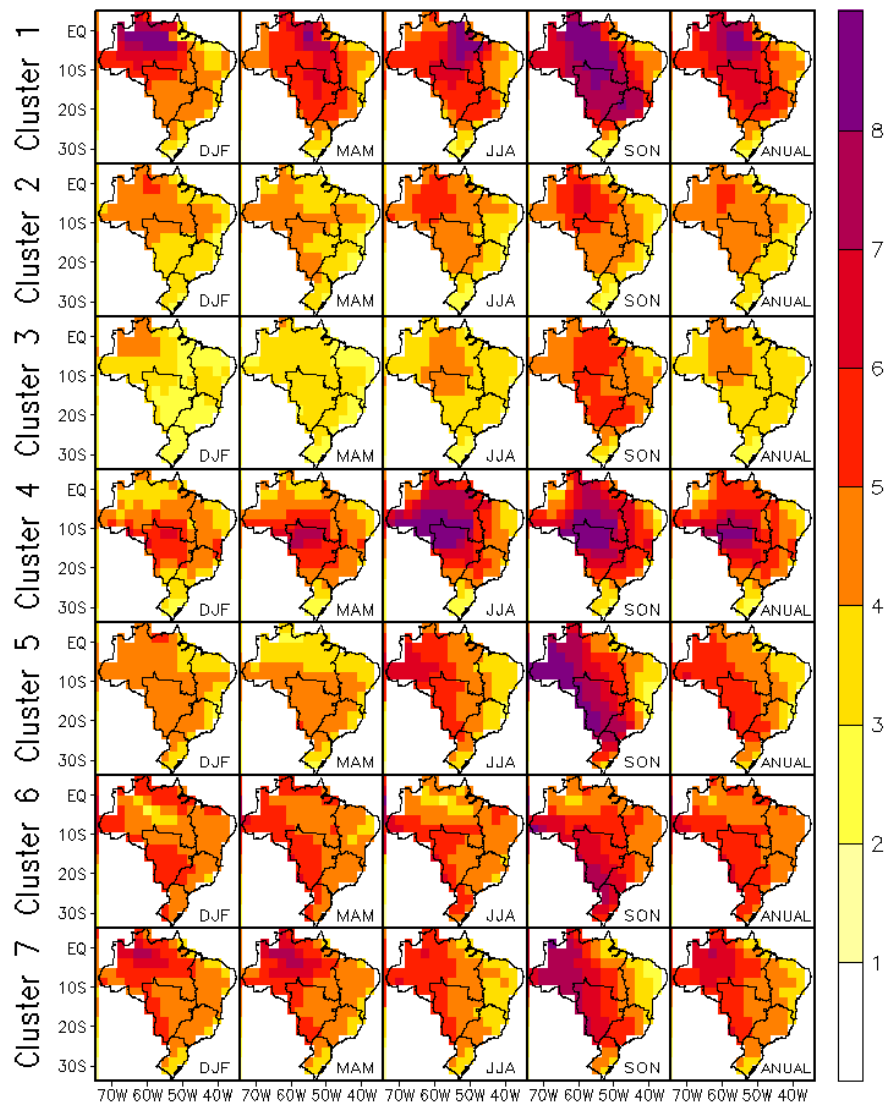


Figura 4.3 – Projeção da média sazonal de temperatura máxima (°C) para 2071-2100, considerando modelos de uma mesma instituição.

Em todos os sete *clusters*, o aumento mais intenso se deu na estação de primavera. Com exceção do *cluster* 2 e 3 que mostrou aumento de no máximo 5°C, todos os outros *clusters* mostram aumentos superiores a 8°C. A área de maior aquecimento está localizada na região Norte, Centro-Oeste e Sudeste.

Todas as quatro estações mostradas no *cluster* 1 apresentaram aumento acima de 8°C no norte da região Norte, se estendendo em direção ao Sudeste brasileiro. A região Sul e costa leste do Nordeste se mantiveram com magnitude em torno de 2-3°C. O *cluster* 2 ilustra o mesmo padrão de regionalização do *cluster* 1, porém, em menor magnitude. O *cluster* 1, 2, 3 e 4 concordam sinal e magnitude para a região sul do Brasil.

O *cluster* 6 mantém o mesmo padrão de aumento de temperatura máxima em todas as estações; máximo de 6°C no norte da região Norte e oeste do CO e quase toda a área do mapa com incremento de até 5°C na temperatura. Notou-se ainda, um aumento (em torno de 7°C) desde o Acre, passando por parte oeste do Centro-Oeste, seguindo em direção a região Sul, apenas durante a primavera.

Na média anual, os *clusters* 5, 6 e 7 têm padrão parecido, destaca-se o litoral nordeste (3-4°C), e toda a costa oeste do país (aumento de até 6°C). O único grupo de modelos que projeta aumento da temperatura máxima uniforme em quase toda a área do mapa é o *cluster* 3, referente a estação de outono que na média mostrou aumento de até 4°C.

Na média por *ensemble* (Figura 4.4), assim como na precipitação, há predominância do padrão de distribuição, sinal e magnitude mostrada no *cluster* 1 e 7.

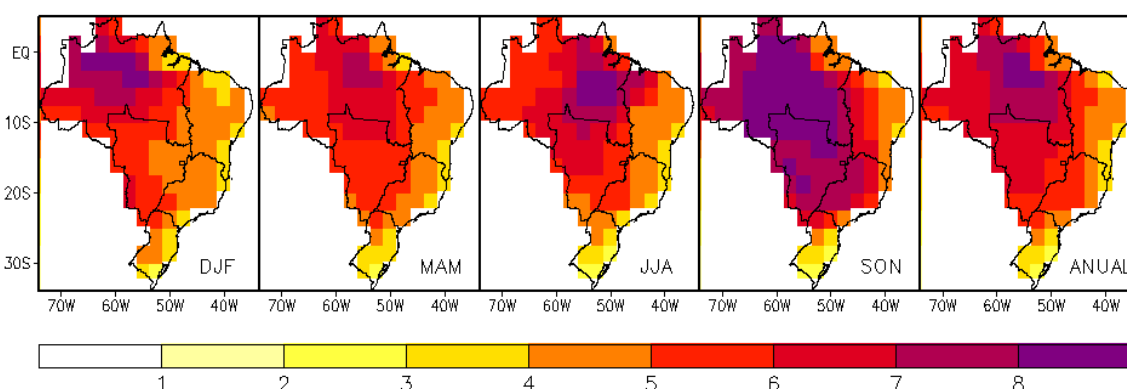


Figura 4.4 – Ensemble da projeção de mudança da média sazonal de temperatura máxima (°C) para 2071-2100, com relação ao período de 1971-2000, considerando o método da familiaridade entre os modelos.

O leste do Nordeste e leste do SEB apresenta acréscimo em torno de 5°C, aumentando em direção ao oeste do Brasil, chegando a mais de 8°C no norte do país. O Sul é a região menos sensível e não ultrapassa valores iguais a 5-6°C. O maior incremento da temperatura se deu na primavera, coerente com a literatura.

4.1.3 - Temperatura mínima

A literatura afirma que as projeções de temperatura mínima são maiores em magnitude se comparados às projeções de temperatura máxima. Porém, numa análise de agrupamento essa afirmativa pode não ser válida. Na Figura 4.5, o *cluster* 6 e 7 são os únicos a concordar com esta afirmativa. Vê-se na média anual, incremento de até 7°C em quase todo o território brasileiro com maiores valores durante a primavera (> 8°C em alguns pontos isolados do mapa). O *cluster* 2 e 3 são bastante similares entre si por denotarem aumento nas mesmas regiões. As estações de verão, outono e inverno e média anual não ultrapassam 5°C de aumento na temperatura mínima.

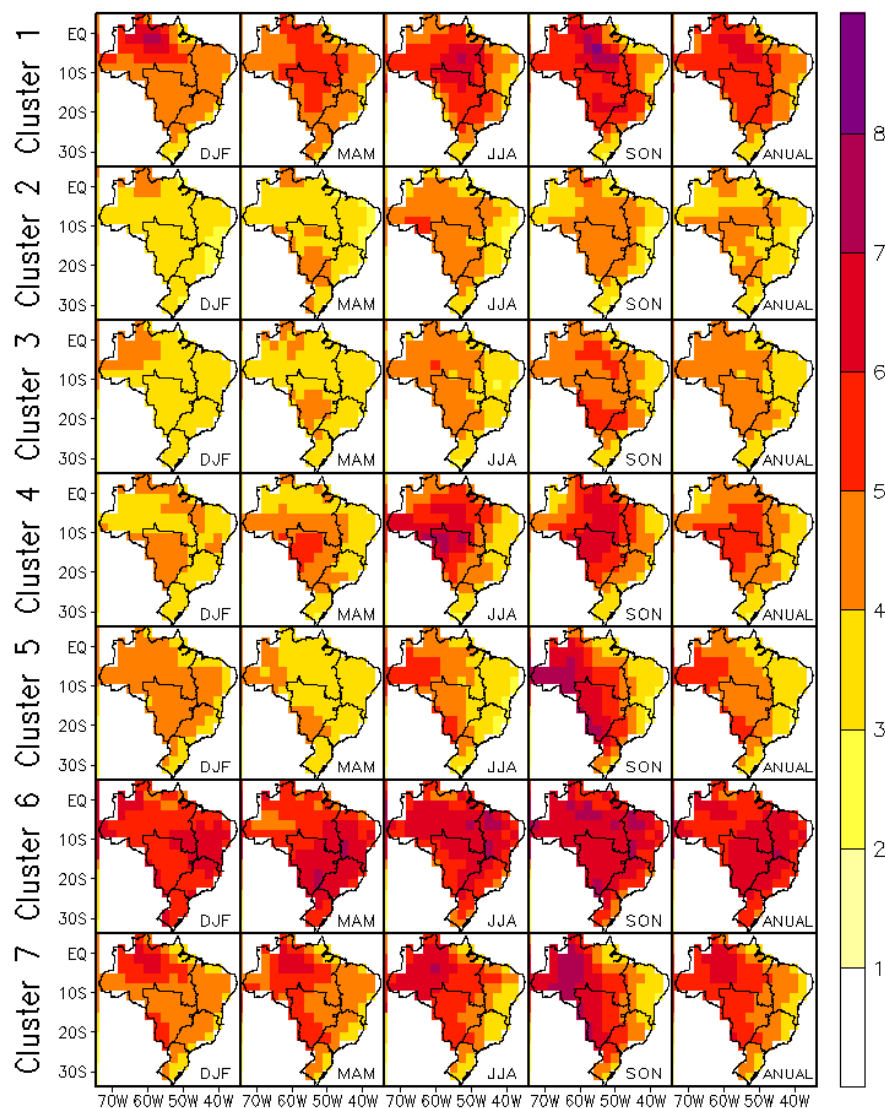


Figura 4.5 – Projeção da média sazonal de temperatura mínima (°C) para 2071-2100, considerando o método da familiaridade entre os modelos.

As áreas do mapa a qual apresentaram diminuição da precipitação, são as mesmas áreas que projetam maiores aumentos da temperatura máxima e, por conseguinte, da temperatura mínima. A estação fria (inverno) apresentou maiores aumentos desta variável, do que o verão.

A Figura 4.5 faz referência a média entre todos os vinte modelos analisados dentro dos sete *clusters* descritos acima.

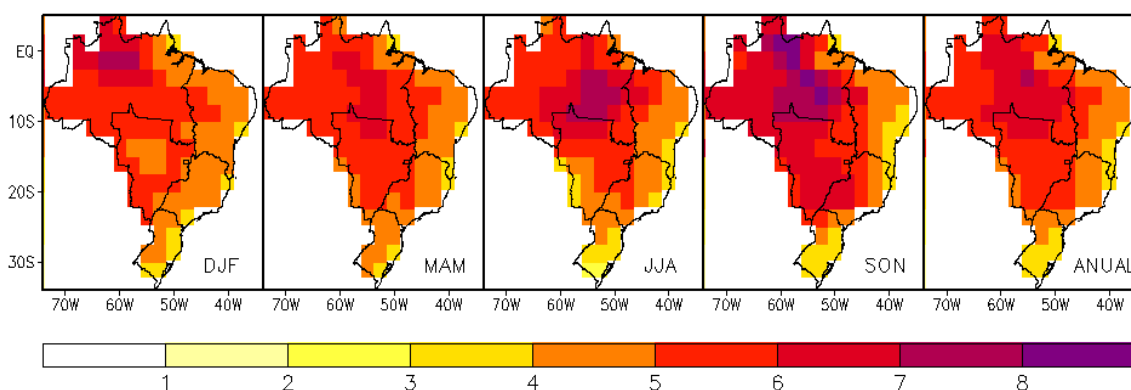


Figura 4.6 – Ensemble da projeção da média sazonal de temperatura mínima (°C) para 2071-2100, considerando o método da familiaridade entre os modelos.

Novamente, o padrão predominante é o exibido no *cluster 1*, com máximos de até 8 °C a noroeste da Amazônia, vindo em direção ao SEB, passando pela região Centro-Oeste, chegando a valores próximos a 5-6°C; isso ocorre em todas as estações. A região Sul do Brasil, principalmente o extremo sul do estado, permanece com incremento de até 4°C para todo o período.

4.2 – Clima futuro - Agrupamento pelo método da divergência de Kullback-Leibler

4.2.1 – Precipitação

Esta análise parte da afirmativa de que os modelos agrupados, mesmo não sendo produzidos pelo mesmo instituto ou tendo códigos computacionais parecidos, suas projeções não divergem e, portanto, podem ser consideradas como uma única simulação. Assim, diminui-se as incertezas relacionadas a esta variável tão difícil de ser prevista e parametrizada: a precipitação.

A Figura 4.7 detalha as projeções de precipitação para o fim do século XXI. Dentre os três *clusters*, o que mais se espelha ao *cluster 1* da Figura 3.1 é o *cluster 3* que, mantém padrão de diminuição da precipitação (déficit de no máximo 2 mm dia⁻¹/dia) no verão para parte da região Norte; máximos de precipitação (>2,5 mm dia⁻¹/dia) na divisa entre o norte do Sudeste brasileiro e sul do NEB. Porém, na média anual, não mostra alteração de grande magnitude para a região Sudeste do país. A região Sul tem maiores totais pluviométricos na primavera.

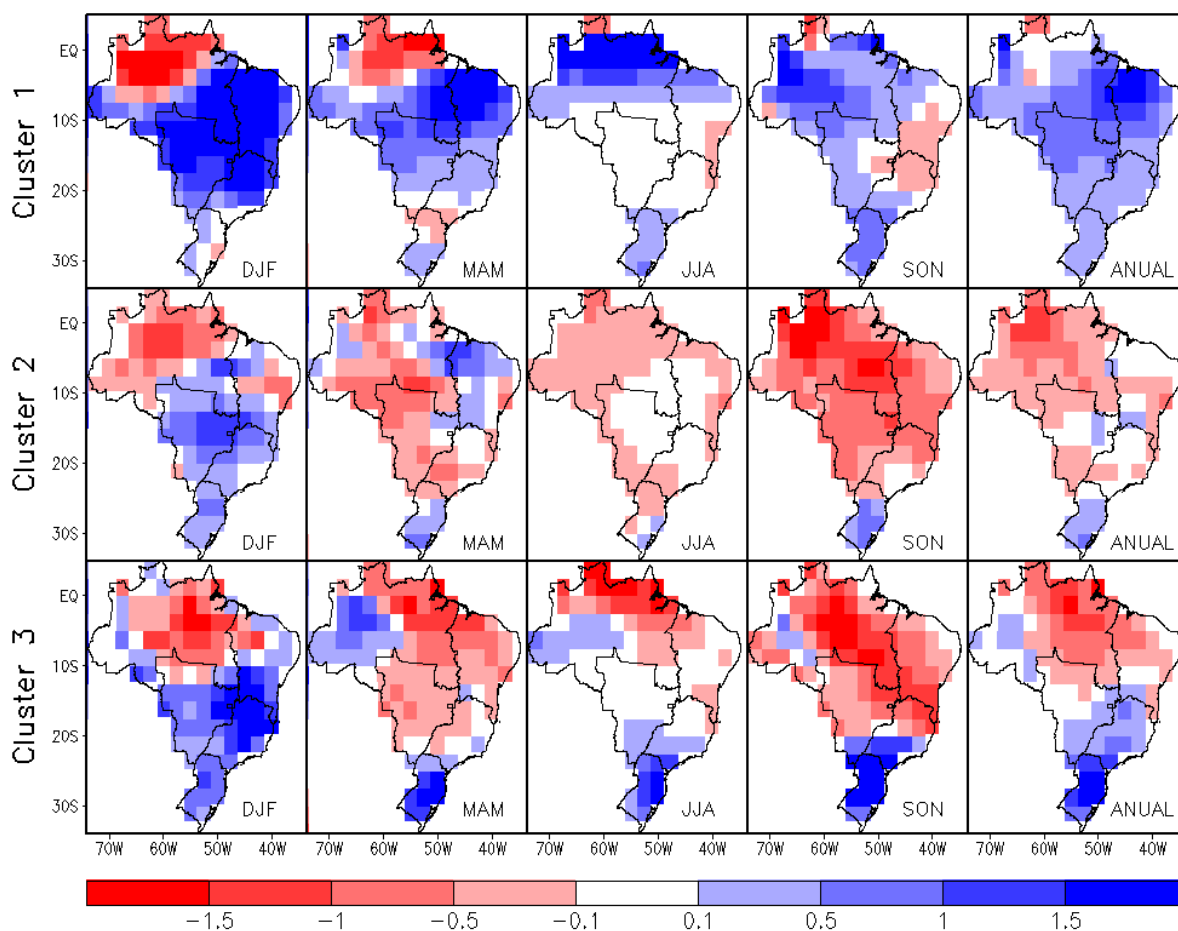


Figura 4.7 – Projeção da média sazonal de precipitação para 2071-2100 (mm dia⁻¹), considerando o método da divergência de Kullback-Leibler - Knutti et al (2013).

O *cluster 2* denota maior tendência de neutralidade com relação aos demais. Na média anual é visto um sinal de redução de precipitação a noroeste da região Norte, não ultrapassando 1,5 mm dia⁻¹. A projeção deste *cluster* condiz com o que foi projetado pelo *cluster 7* da Figura 3.1. Por fim, o *cluster 1* foi o único a mostrar aumento maior que 1,5 mm dia⁻¹ para a região Nordeste na estação de verão e extremo norte da região Norte. Na estação de inverno; todos os *clusters* concordam com diminuição da precipitação em parte da região Norte durante o verão, para o extremo norte, o *cluster 1* e o *cluster 3* mostram padrão contrário enquanto que o *cluster 2* se mantém neutro. Não foi possível avaliar a região Centro-Oeste e Sudeste com clareza nas projeções.

Assim como no agrupamento por familiaridade, foi feito a média entre os *clusters* e o resultado pode ser visto na Figura 4.8.

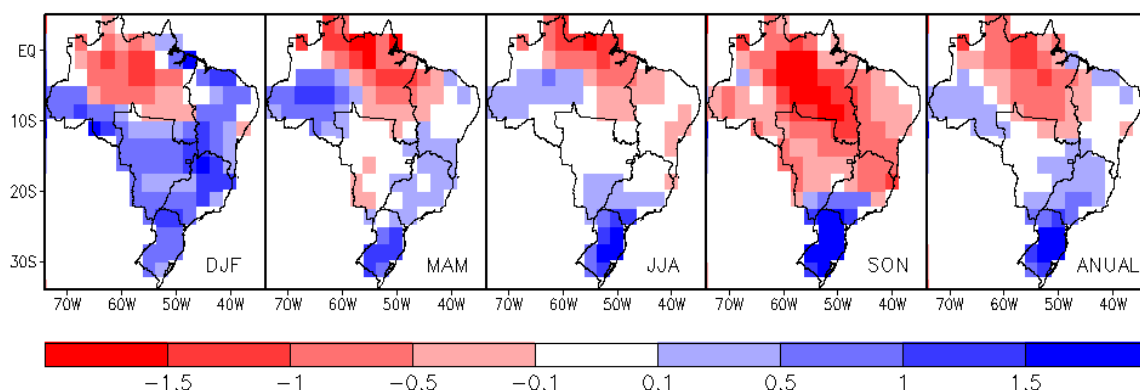


Figura 4.8 – Ensemble da projeção da média sazonal de precipitação (mm dia⁻¹) para 2071-2100, considerando o método da divergência de Kullback-Leibler - Knutti et al (2013).

É visto, na média anual diminuição de até 1,5 mm dia⁻¹ em uma pequena área da região Norte e aumento do acumulado de chuva de até 2 mm dia⁻¹ para toda a região Sul, padrão similar ao visto no *cluster* 3. Há projeção de diminuição da precipitação durante a primavera em uma faixa que se estende desde o centro norte da região Norte do país diminuindo em direção ao sudeste da região Norte. Na divisa entre as regiões SEB, NEB e CO, as chuvas prometem aumentar cerca de 1-1,5 mm dia⁻¹ durante o verão.

4.2.2 – Temperatura máxima

No agrupamento proposto por Knutt et al (2013), visto na Figura 4.9, todos os *clusters* concordam com relação ao sinal da temperatura máxima, porém divergem na magnitude em algumas regiões. Há concordância da magnitude desta variável desde o extremo norte do Nordeste descendo pela costa leste do NEB e SEB e região Sul; nestas áreas, o incremento na temperatura máxima não ultrapassa 4°C.

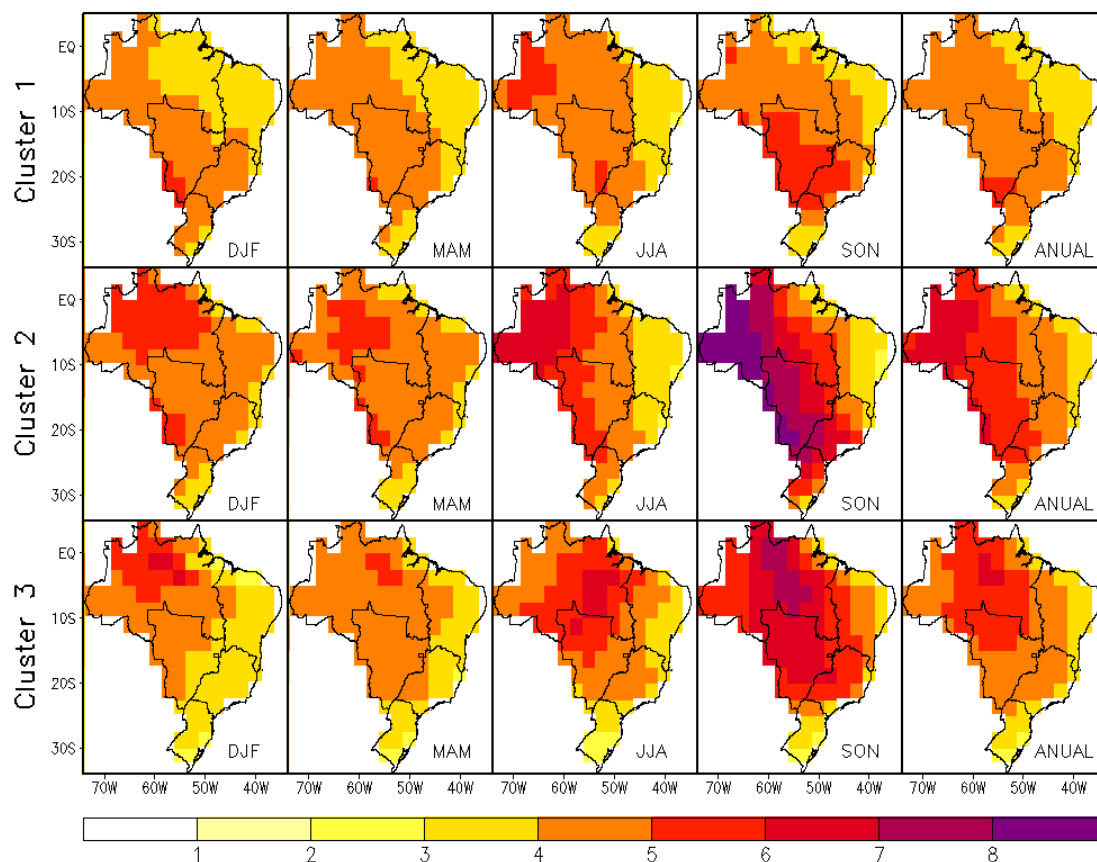


Figura 4.9 – Projeção da média sazonal de temperatura máxima (°C) para 2071-2100, considerando o método da divergência de Kullback-Leibler - Knutti et al (2013).

Novamente as maiores amplitudes se dão na estação de primavera, na qual o *cluster 3* denota aumento superior a 8°C, na região Norte, é notável o aumento de até 6°C em todas as estações de acordo com as projeções dos *clusters 2 e 3*. Estes ainda concordam que os maiores aumentos se darão do lado oeste do país. Na média anual o *cluster 1* mostra uniformidade, com máximos que não ultrapassam 4°C, em todo o país com exceção do noroeste da região Norte (~4-5°C).

Na média (Figura 4.10), as regiões com maiores incrementos são a região Norte, seguida de parte da região Centro-Oeste e Sudeste para todas as estações. A região Sul se mantém com acréscimos de no máximo 4°C, assim como o litoral nordeste.

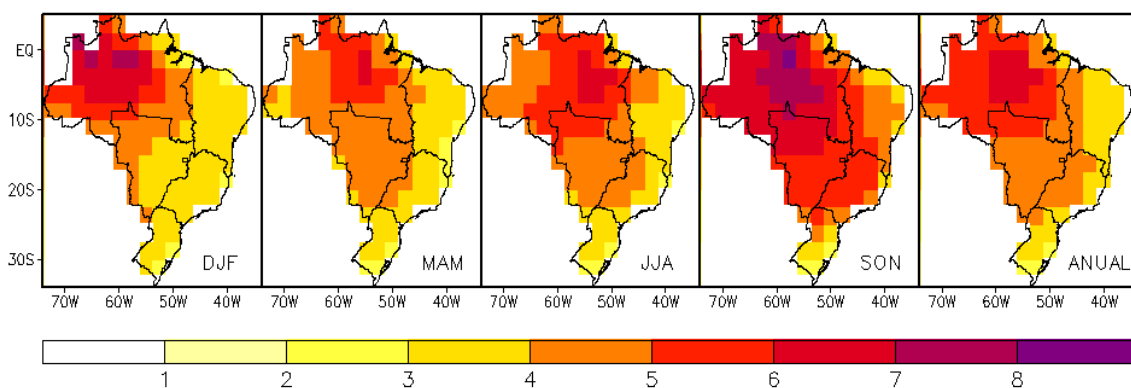


Figura 4.10 – Ensemble da projeção da média sazonal de temperatura máxima (°C) para 2071-2100, considerando o método da divergência de Kullback-Leibler - Knutti et al (2013).

De modo geral, os incrementos na temperatura mostrados na figura 3.10 condizem mais com o padrão do *cluster* 3 da Figura 4.9.

4.2.3 – Temperatura mínima

Para a temperatura mínima, o *cluster* 1 (Figura 4.11) se mostrou uniforme em quase toda a área do mapa nas estações de verão e outono. No inverno e primavera a região Centro-Oeste poderá sofrer um aumento de até 5°C na média para o período entre 2071 a 2100.

Com exceção da média para primavera do *cluster* 3, nenhuma outra projeção denotou aumento na temperatura superior a 8°C. A única área que, em todas as projeções mantém o mesmo padrão, é a costa leste do nordeste do Brasil (3-4°C).

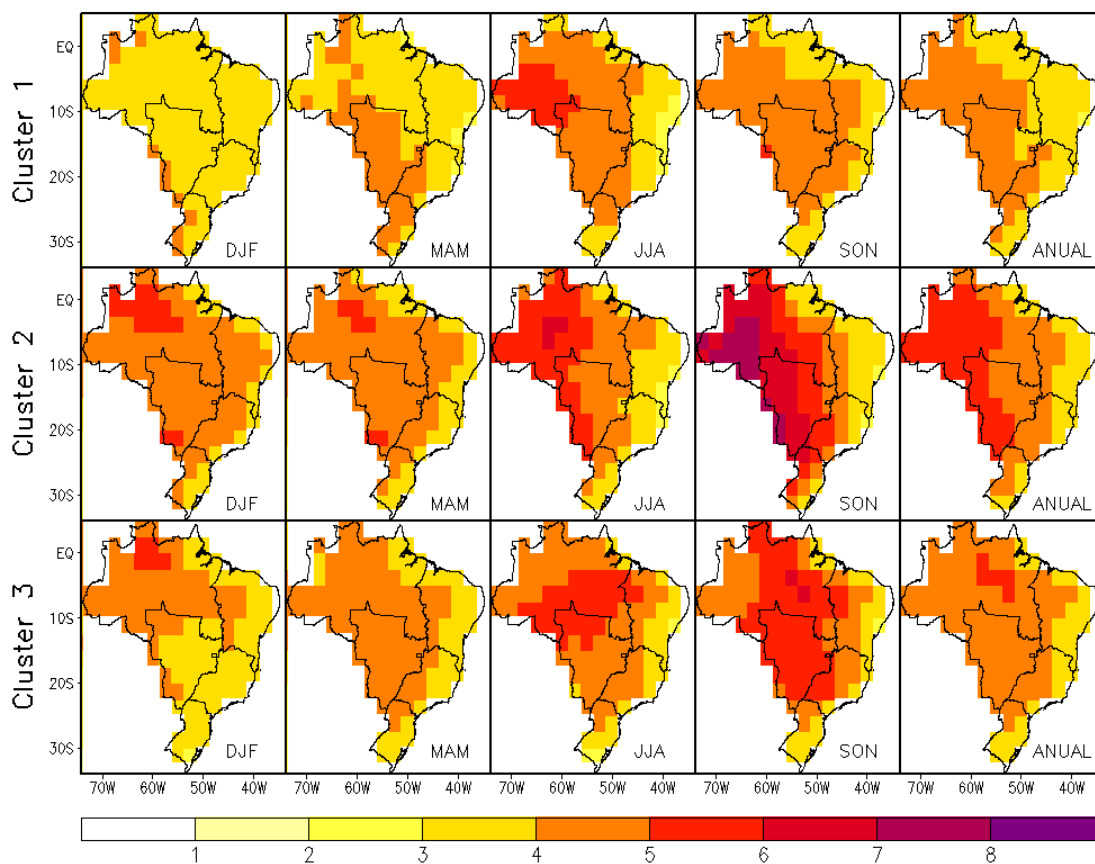


Figura 4.11 – Projeção da média sazonal de temperatura mínima (°C) para 2071-2100, considerando o método da divergência de Kullback-Leibler - Knutti et al (2013).

Vale ressaltar que, as mesmas regiões que mostraram aumento da temperatura máxima, também mostraram aumento da temperatura mínima, porém, em menor magnitude.

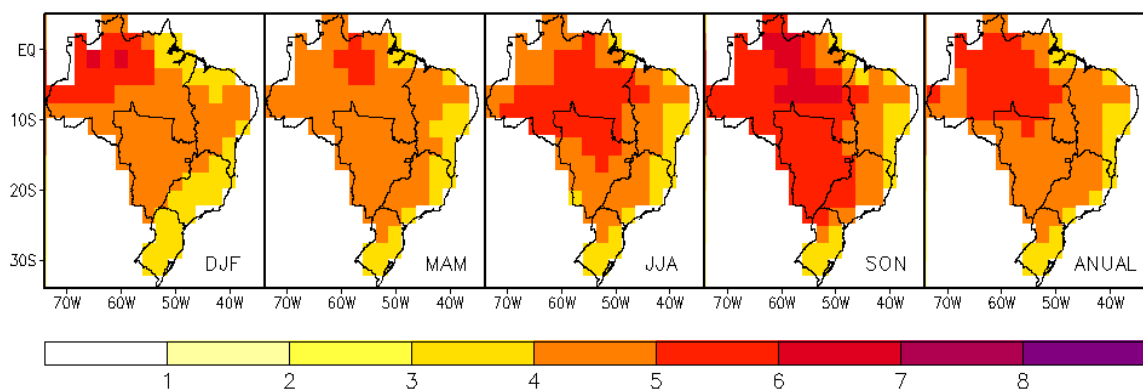


Figura 4.12 – Ensemble da projeção da média sazonal de temperatura mínima (°C) para 2071-2100, considerando o método da divergência de Kullback-Leibler - Knutti et al (2013).

Na média entre os *clusters* (Figura 4.12), outra vez o padrão predominante é o do *cluster* 3. Não se vê projeções maiores que 7°C para todo o período. No verão o extremo norte não ultrapassa 6°C, toda a costa leste do país e extremo Sul se mantém com incremento em torno de 4°C em todas as estações. A região CO se destaca com maiores incrementos durante a primavera.

4.3 – Clima presente - Agrupamento por familiaridade

Para dar maior confiabilidade às projeções de um determinado *cluster*, é imprescindível avaliar seu desempenho com relação ao clima presente. Nesta etapa, fez-se necessário calcular o viés sazonal para cada grupo de modelos de cada um dos dois agrupamentos. O resultado desta análise prévia está ilustrado em mapas espaciais nos tópicos seguintes.

4.3.1 - Precipitação

A Figura 4.13 exprime a destreza dos *clusters* em simular a precipitação sazonal no clima presente. Para o verão, a região Centro-Oeste se apresentou maior destreza na média entre os modelos presentes no *cluster* 3 e a região Sul para o *cluster* 2. Esta mesma estação, de modo geral, apresenta superestimativa desta variável da região Nordeste e subestimativa na região Norte do país.

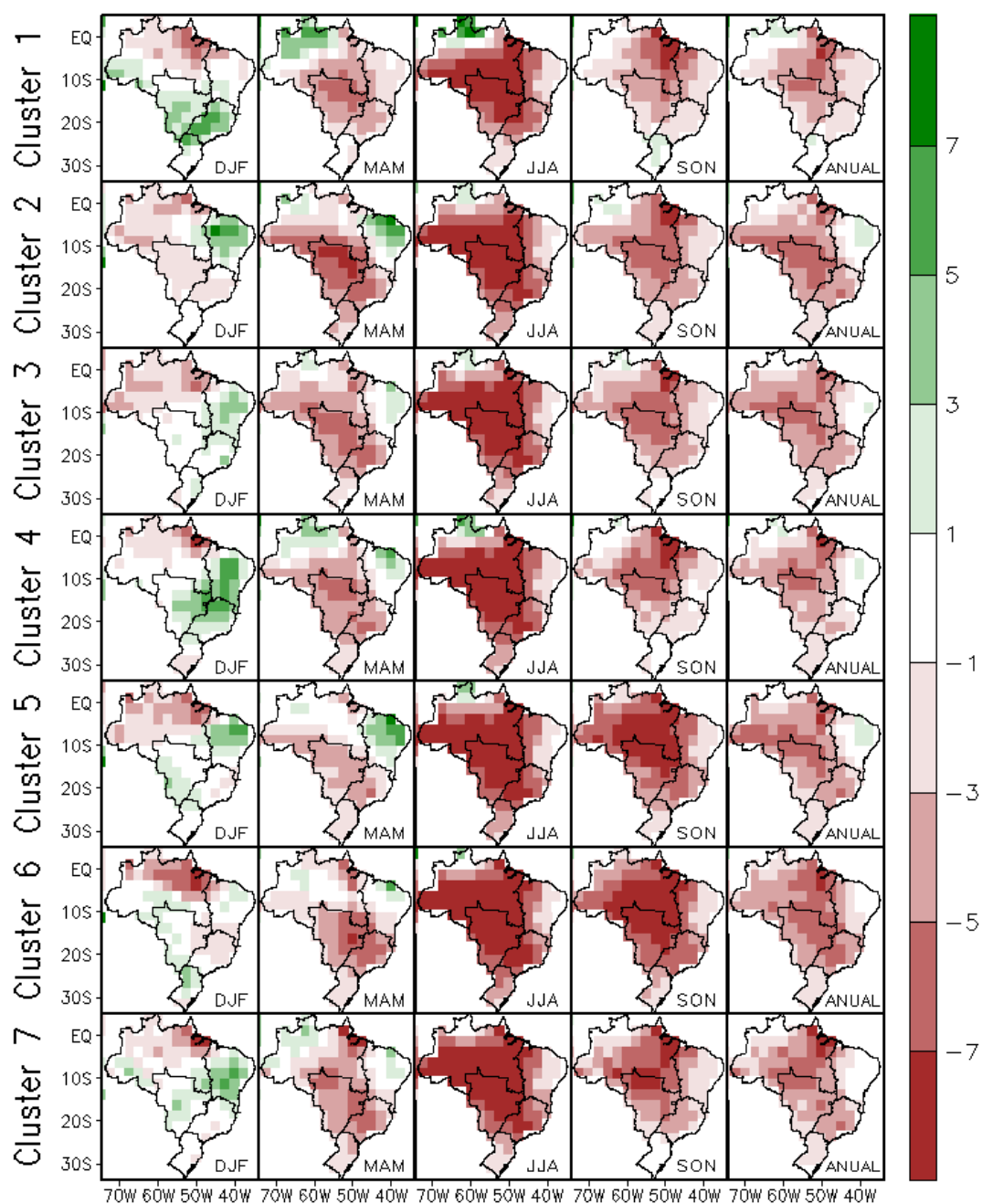


Figura 4.13 – Viés da precipitação sazonal (mm dia^{-1}) para 1971-2000, considerando o método da familiaridade entre os modelos.

O inverno apresentou subestimativa para quase toda área do domínio, com valores superiores a 7 mm dia^{-1} , com exceção do extremo norte da região Norte, leste da região Nordeste e extremo sul da região Sul.

Na média anual, a região Nordeste e Sul foram as áreas do mapa com melhores resultados entre as cinco regiões do Brasil. A média entre os 7 *clusters* (Figura 4.14) destaca-se pelo bom desempenho da região Sul na média anual e entre as estações.

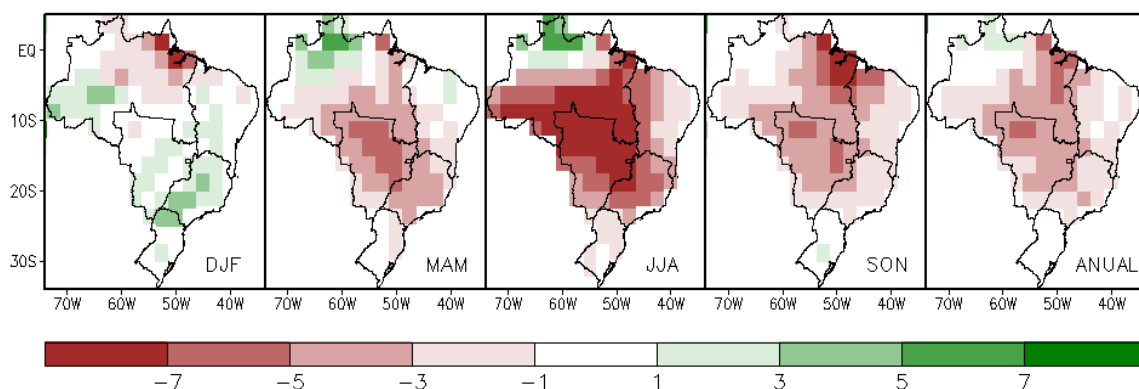


Figura 4.14 – Viés do *ensemble* da precipitação sazonal (mm dia⁻¹) para 1971-2000, considerando o método da familiaridade entre os modelos.

Na primavera houve melhoramento das simulações do extremo noroeste da região Norte. As estações de verão e outono a região Nordeste também com poucas diferenças das simulações em relação às observações. As maiores diferenças ainda ocorrem na estação fria (JJA), com valores de precipitação de subestimam a precipitação observada em mais de 7 mm dia⁻¹.

4.3.2 - Temperatura máxima

As diferenças entre as simulações o observação da temperatura máxima estão ilustrados na Figura 4.15 desta subseção. Os clusters 1, 2,5 e 7 descrevem toda a parte oeste da região Norte como sendo a área menos enviesada durante os meses de DJF.

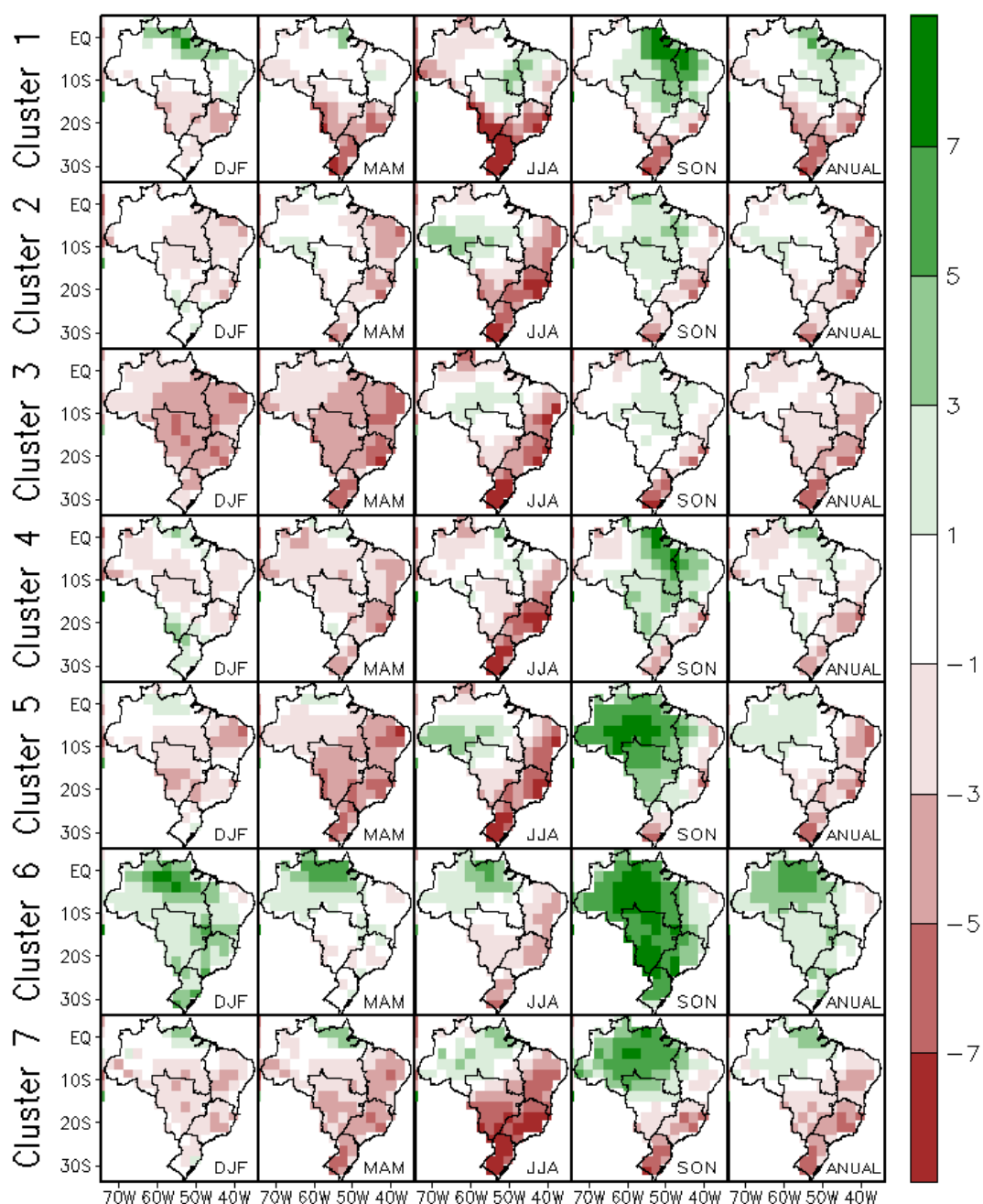


Figura 4.15 – Viés da temperatura máxima sazonal (°C) para 1971-2000, considerando o método da familiaridade entre os modelos.

Toda a costa leste do Brasil apresentou valores negativos da diferença entre a simulação e observação durante o inverno, ou seja, esta área do mapa apresenta subestimativa com destaque para a região sul em todos os *clusters*. O único *cluster* que denota superestimativa da temperatura máxima, para todas as estações na região Norte, é o *cluster* 6 (superior a 7°C).

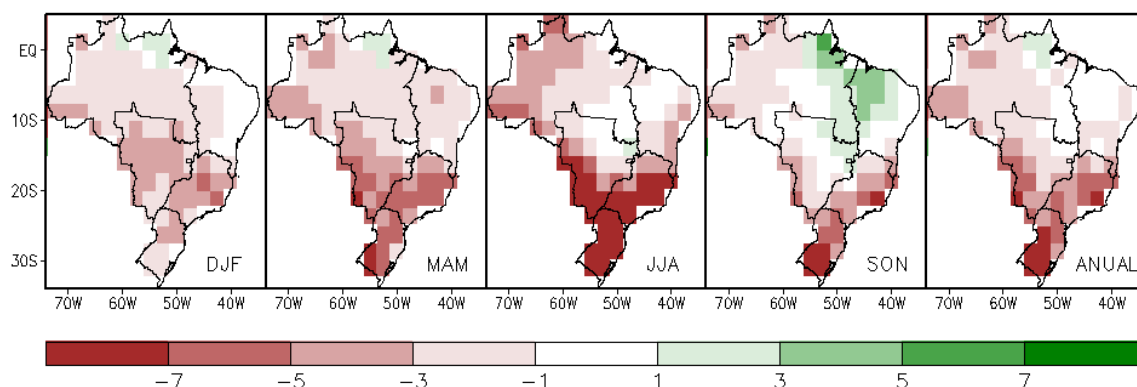


Figura 4.16 – Viés do *ensemble* da temperatura máxima sazonal (°C) para 1971-2000, considerando o método da familiaridade entre os modelos.

Os resultados mostrados no *ensemble* da Figura 4.16 exibem padrão de distribuição idem ao do *cluster* 1, com menor magnitude. Houve uma superestimativa isolada na divisa entre a região Norte e Nordeste próximo a 5°C na primavera.

4.3.3 - Temperatura mínima

Para a temperatura mínima (Figura 4.17), os resultados são melhores se comparados a precipitação e temperatura máxima. A estação mais sensível compreende os meses entre julho a agosto, ou seja, o inverno. Esta estação explicita valores de temperatura mínima simulados menores do que os observados. Este foi um padrão característico de inverno, porém, a magnitude desta subestimativa (maior que 7°C na região Sul e parte do CO e SEB) em geral, é ruim pois esta é a estação onde ocorre os mínimos de temperatura e, portanto, merece maior atenção.

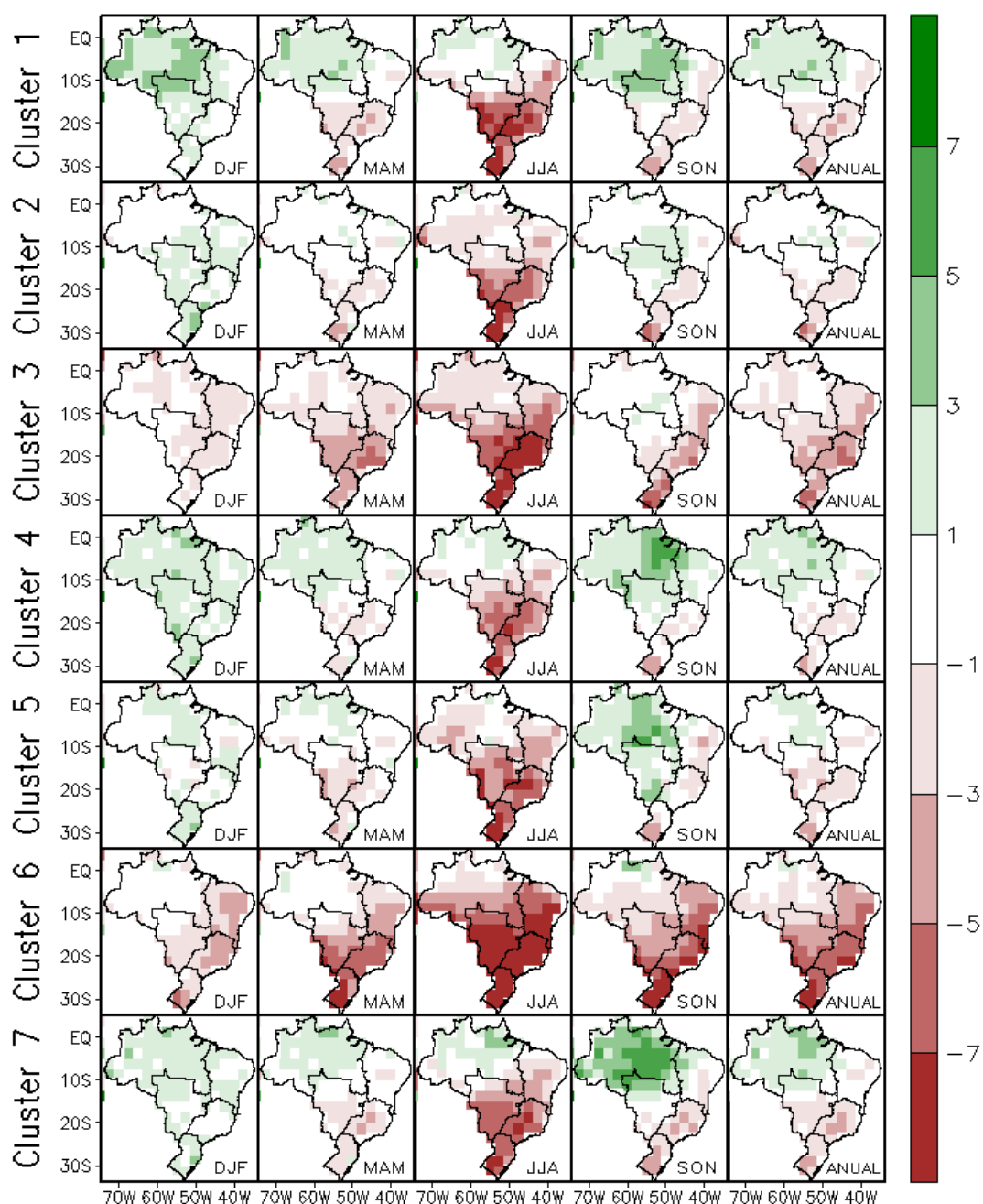


Figura 4.17 – Viés da temperatura mínima sazonal (°C) para 1971-2000, considerando o método da familiaridade entre os modelos.

A região norte ainda se destaca pelo bom desempenho das simulações dos *clusters* assim como a estação fria se destaca por apresentar valores de temperatura abaixo de 7°C desde a região central do Brasil até o extremo sul do país. A temperatura mínima, de modo geral, não exprime valores de viés maiores que 5°C, em módulo. A média entre os sete *clusters*, Figura 4.18, para esta variável, não apresenta diferença entre os meses de DJF e SON e isso reflete no média anual. Toda a região norte apresentou excelente resultado na análise do inverno.

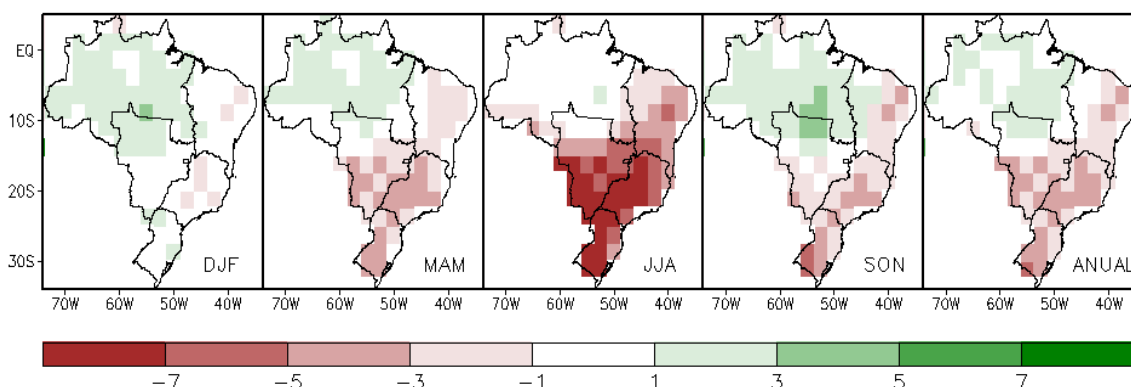


Figura 4.18 – Viés do *ensemble* da temperatura mínima sazonal (°C) para 1971-2000, considerando o método da familiaridade entre os modelos.

Resultado completamente contrário é visto desde a o centro do CO até o sul da região Sul, onde os valores das simulações excedem os 7°C a menos do que os valores das observações.

4.4 – Clima presente - Agrupamento pelo método da divergência de Kullback-Leibler

O mesmo critério adotado para as projeções foi aplicado às análises de viés para as três variáveis deste estudo: precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima.

4.4.1 – Precipitação

Similar aos *clusters* do método da familiaridade, a estação de inverno subestima em mais de 7 mm dia⁻¹ a precipitação nos três *clusters* deste método (Figura 4.19). Não houve diferença considerável entre estes grupos de modelos, pois no verão, há superestimativa na região Nordeste durante o verão; subestimativa em torno de 1 a 7 mm dia⁻¹ a região CO e para os *clusters* 1 e 2 as simulações subestimaram a precipitação próximo a região de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

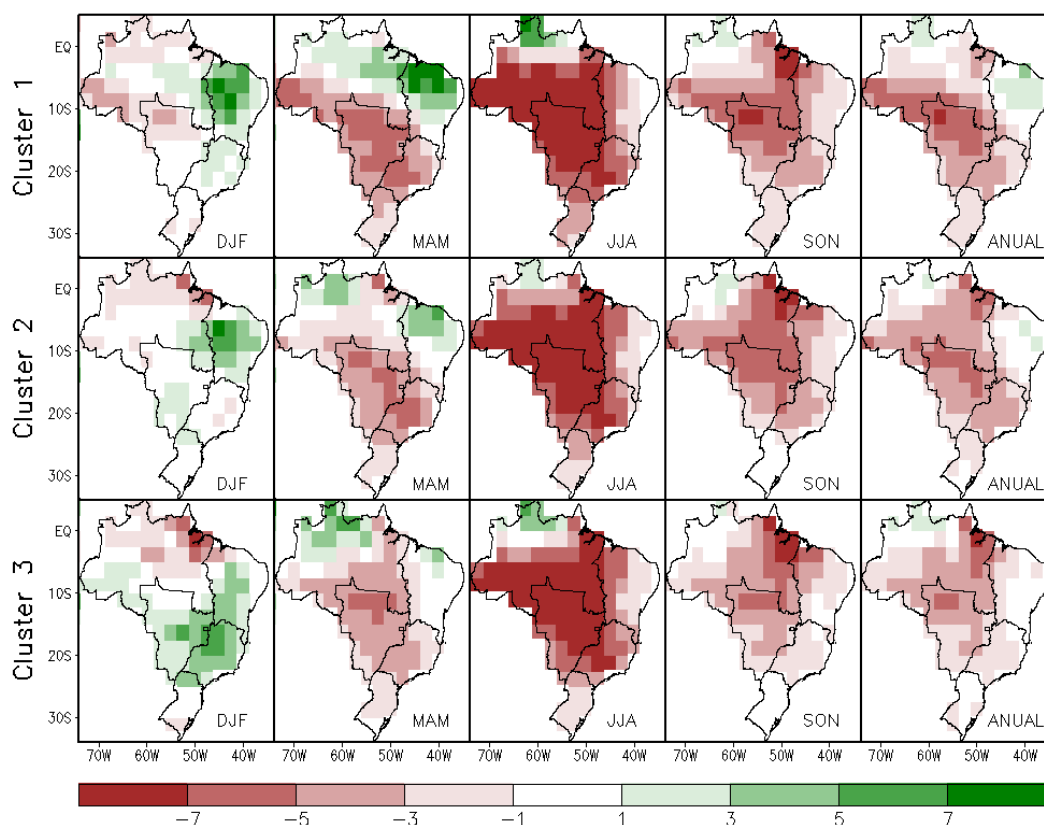


Figura 4.19 – Viés da precipitação sazonal (mm dia^{-1}) para 1971-2000, considerando o método da divergência de Kullback-Leibler - Knutti et al (2013).

A média anual é análoga a estação primavera (Figura 4.20). O *ensemble* mostra o mesmo padrão descrito para o *cluster 1* da análise anterior. A melhor simulação ocorreu na estação de verão (DJF) e a região com maior destreza foi a região Sul do país seguida da região Nordeste e extremo norte da região Norte.

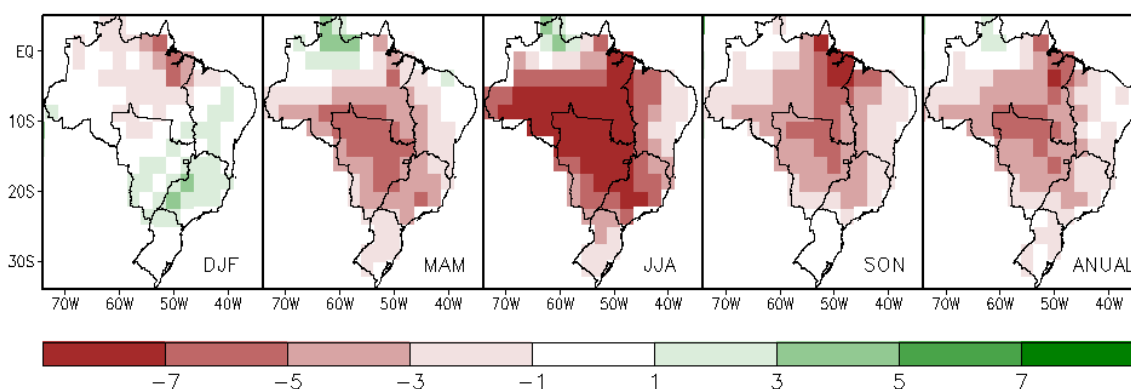


Figura 4.20 – Viés do *ensemble* da precipitação sazonal (mm dia^{-1}) para 1971-2000, considerando o método da divergência de Kullback-Leibler - Knutti et al (2013).

4.4.2 - Temperatura máxima

No viés da temperatura máxima têm se uma homogeneidade durante o verão em grande parte do território brasileiro, com destaque para a região Norte e Sul. Os *clusters* 1 e 2 (Figura 4.21) denotam superestimativa (até 3°C) na região Norte entre os meses de inverno enquanto que o *cluster* 3 exibe uma subestimativa dos modelos para esta mesma região (~3°C).

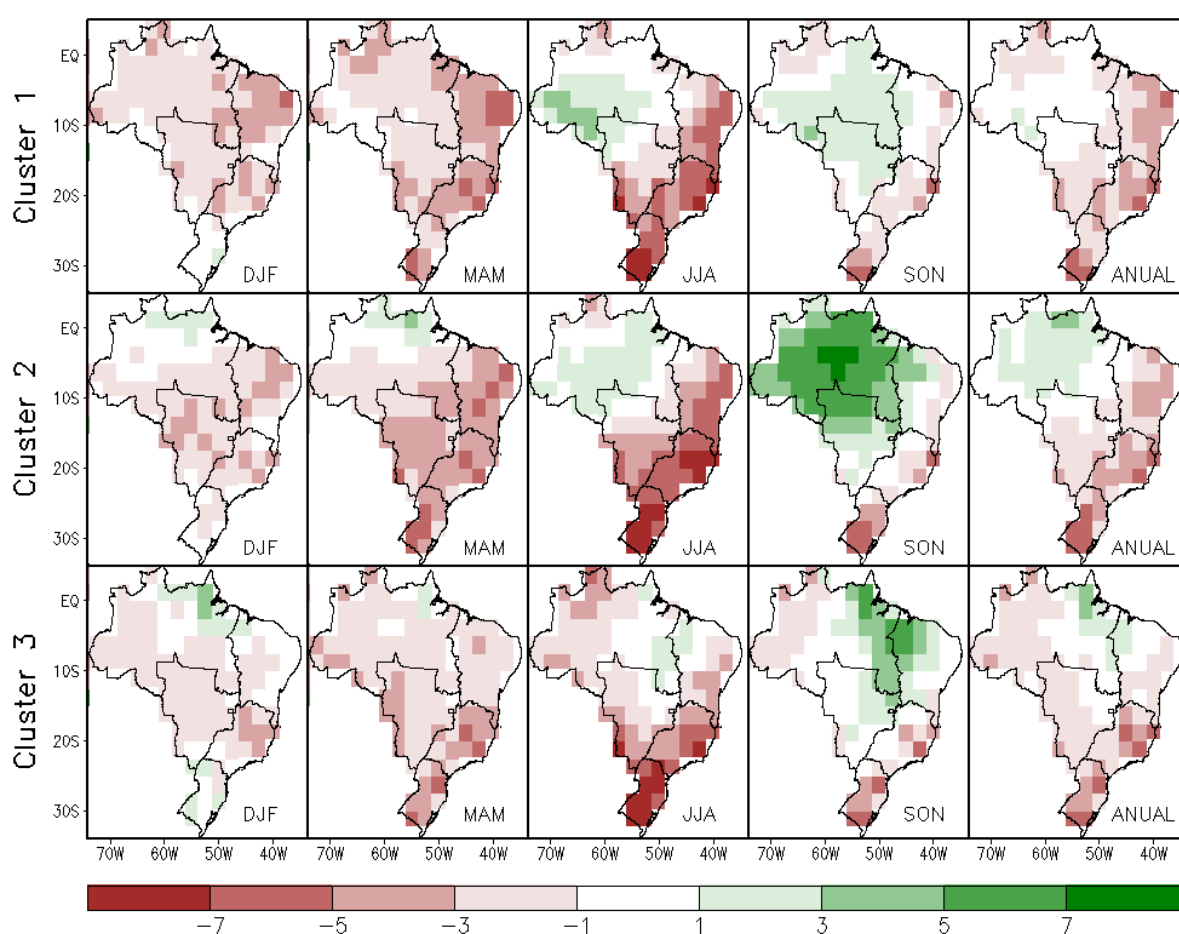


Figura 4.21 – Viés da temperatura máxima sazonal (°C) para 1971-2000, considerando o método da divergência de Kullback-Leibler - Knutti et al (2013).

Passado o inverno, durante a primavera na região Norte, o *cluster* 2 mostra um aumento da temperatura máxima simulada em relação a temperatura máxima observada em torno de 5 a mais de 7°C, em especial para a região central do Norte do país.

Na média, os valores de viés são mais amenos e não ultrapassam 5°C em toda a área

do mapa, com exceção da região Sul, como mostra a figura 4.22.

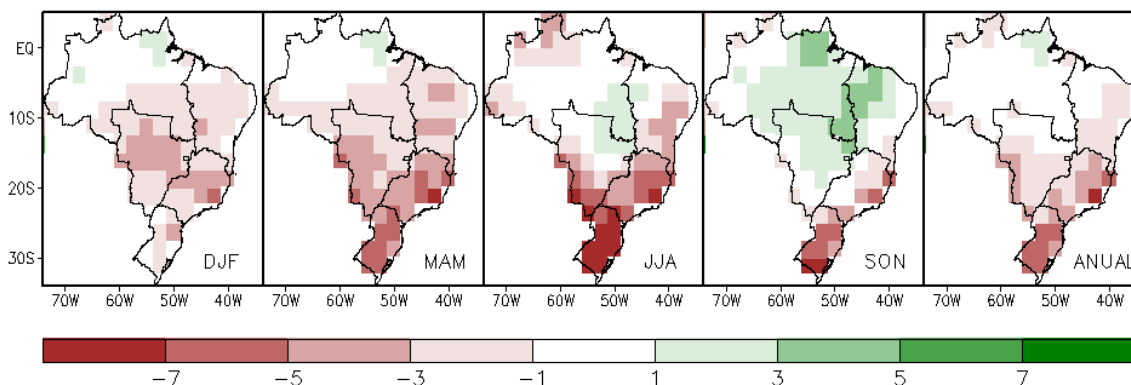


Figura 4.22 – Viés do *ensemble* da temperatura máxima sazonal (°C) para 1971-2000, considerando o método da divergência de Kullback-Leibler - Knutti et al (2013).

Análogo às análises feitas para a Figura 4.20, a região Norte apresenta a área do mapa com viés em torno de zero e, portanto, pode-se afirmar que para tal região as projeções feitas por este *ensemble* podem levar maior confiabilidade.

4.4.3 - Temperatura mínima

Dentre todas as análises e discussões feitas até este momento, nenhuma outra variável apresentou resultado mais satisfatório do que estes exibidos na Figura 4.23, para a temperatura mínima. Para este método, o *cluster* de melhor resultado é o *cluster* 1. Este expressou resultados de subestimativa ou superestimativa em torno de 0 a 3°C.

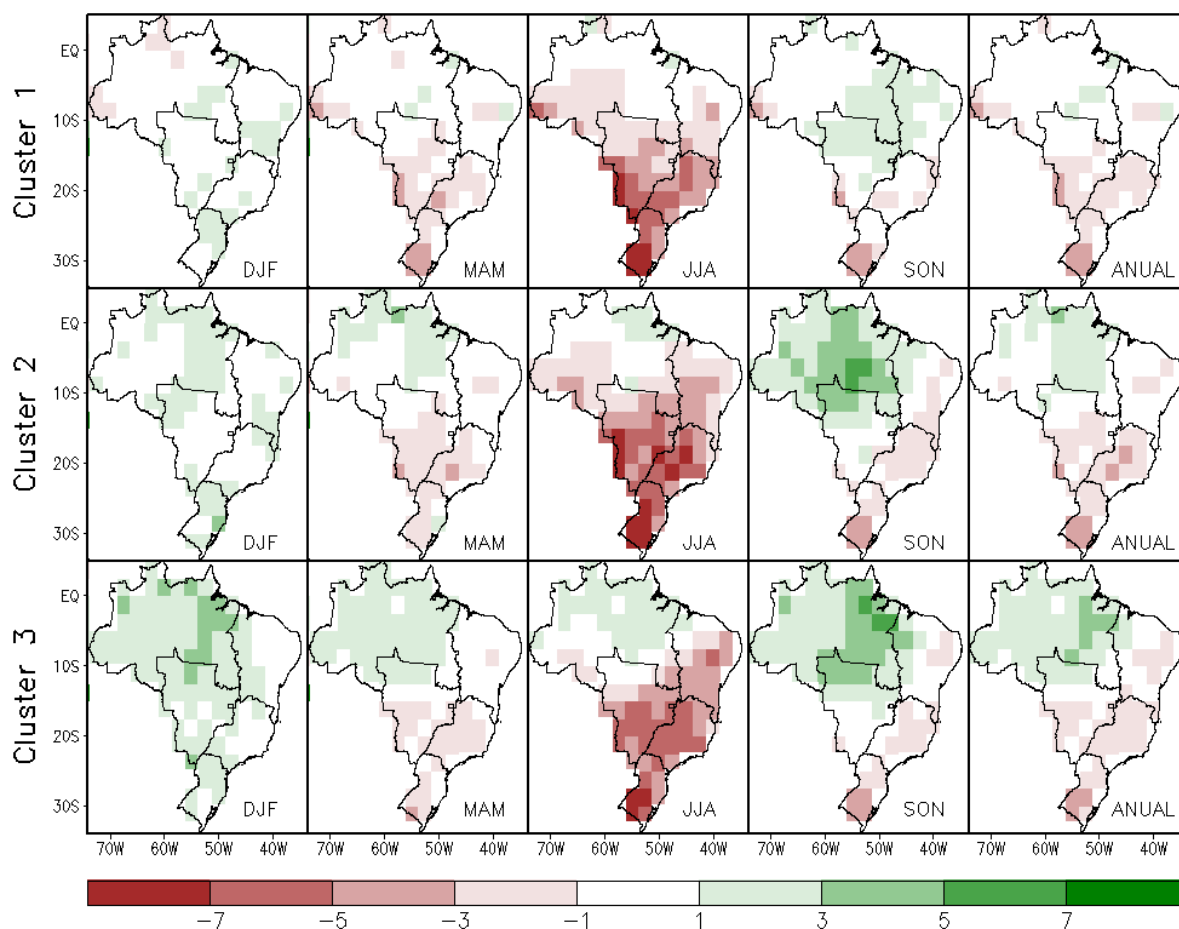


Figura 4.23 – Viés da temperatura mínima sazonal (°C) para 1971-2000, considerando o método da divergência de Kullback-Leibler - Knutti et al (2013).

A única discordância entre estes três *clusters* se dá aos redores do Acre em algumas partes da região Norte. Esta afirmativa é bem notada na estação de outono e inverno. Os resultados do ensemble não foram tão satisfatórios quanto os resultados mostrados na Figura 4.24.

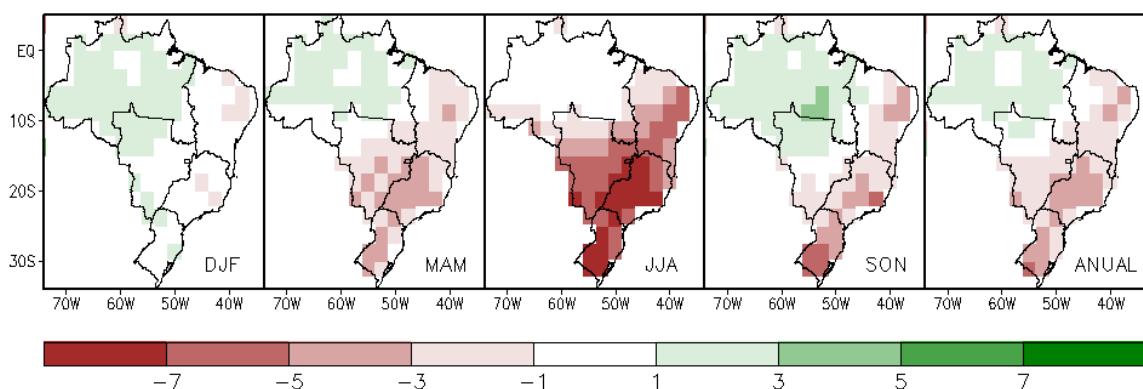


Figura 4.24 – Viés do *ensemble* da temperatura mínima sazonal (°C) para 1971-2000, considerando o método da divergência de Kullback-Leibler - Knutti et al (2013).

Toda a região costeira mostra subestimativa das simulações dos modelos e a região Norte que é contornada por outros países, exibe máximos de 3°C de superestimativa. Pode haver influência da região continental assim como também devem ser levadas em consideração os grandes contornos de água do lado leste do Brasil. Na região CO há discordância; hora é mostrada com leve superestimativa na parte norte desta região (verão e primavera) e outrora subestima as observações em quase toda a região (outono e inverno).

5- CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Este estudo realizou análise de agrupamento entre os modelos do CMIP5 quanto às projeções sazonais de temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação sobre o domínio de território brasileiro. Esta análise se deu para o cenário de forçante radiativa: RCP8.5. O período relativo às projeções foi representado pelos anos entre 2071 e 2100. Optou-se por agrupar os modelos climático globais em *clusters* seguindo dois métodos de agrupamento: i) baseado na familiaridade entre os modelos e ii) baseado no agrupamento feito por Knutti et al (2013) no qual utilizou-se o método da divergência de Kullback-leibler.

Para avaliar a destreza de cada *cluster* optou-se por calcular o viés, que constituiu na diferença entre o período simulado e período observado, referente ao clima histórico (1971 - 2000). Os resultados do agrupamento por familiaridade mostraram menores viés para o verão. As regiões Sul e Nordeste se destacaram pelo bom desempenho dos modelos em simular a precipitação para o período. Todos os sete *clusters* exibiram subestimativa da precipitação (viés seco) na estação seca; resultado coerente ao encontrado por Sales et al (2015) no qual os autores utilizaram a técnica de *downscaling* dinâmico para projeções de mudanças climáticas sobre o Nordeste brasileiro.

Como a estação menos enviesada para a variável precipitação foi o verão, relativo ao método 1, pode-se atribuir maior confiabilidade às projeções para esta estação. Para o futuro, projeta-se aumento da precipitação na estação úmida para o Nordeste, Sudeste e Sul do Brasil e diminuição no Sudeste, Norte e Nordeste na estação seca; resultado encontrado por maioria dos *clusters* considerando os dois métodos de agrupamento.

Os estudos de Vera et al. (2006) para o período 2071-2099 apontaram um aumento da precipitação sobre a América do Sul subtropical durante o verão, redução de precipitação durante o inverno em quase todo o continente. Este resultado é análogo ao encontrado neste presente estudo.

A região Sul irá ter seu volume pluviométrico aumentado em todas as estações do ano em mais de 2 mm dia⁻¹. A região CO não exprime mudança significativa na precipitação durante o inverno. Contudo, vale ressaltar que, esta região apresentou viés seco, ou seja, a precipitação simulada foi menor do que a observada.

Por fim, ficou notável a redução das chuvas no Nordeste (2 mm dia⁻¹), no outono,

inverno e primavera, exibidas pelos dois métodos assim como Marengo e Valverde (2007) percebeu em suas análises.

A temperatura máxima deverá aumentar em mais de 8°C na primavera no oeste da região Norte em direção ao sul do Centro-Oeste. Os menores aumentos se darão nas regiões costeiras: Nordeste, Sul e Sudeste. A afirmativa anterior também é contrária aos resultados do estudo de Marengo e Camargo (2007) onde foi detectado um aquecimento sistemático da região Sul no que se diz respeito a temperatura máxima e mínima. O agrupamento pelo método 2 mostrou homogeneidade em todas as regiões pelo *cluster* 1, não ultrapassando 3°C. O mesmo ocorre com a temperatura mínima, porém em menor magnitude.

De modo geral, os extremos de temperatura (máxima e mínima) serão maiores na estação de inverno o que poderá aumentar o risco de ondas de calor, em especial nas regiões de maior densidade populacional. Esta afirmativa também é feita por Marengo e Valverde (2007) no estudo do clima no século XXI, porém com modelos do IPCC – AR4.

As áreas consideradas mais vulneráveis são: parte da região Norte e Centro – Oeste. Apenas o *cluster* 6 indicou aumento maior na temperatura mínima se comparada a temperatura máxima.

O fato é que as temperaturas irão aumentar em toda o território brasileiro segundo este estudo e os estudos do primeiro relatório de avaliação nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2014), o que definirá o quanto a população sofrerá com este aumento é a capacidade adaptativa desta. Ou seja, medidas como reflorestamento, aumento do poder econômico, redução da desigualdade regional e crescimento populacional são algumas das medidas que podem ser tomadas a fim de diminuir a sensibilidade da população, pecuária e agricultura que, são os setores mais sensíveis segundo Marengo (2014). Assim, será possível garantir a disponibilidade hídrica e energética para o fim do século XXI.

Verificou-se uma variabilidade dos resultados entre os *clusters* e entre os dois métodos de agrupamento. Sendo assim, sugere-se outros cálculos estatísticos para representar melhor a destreza dos modelos em simular projeções futuras bem como um refinamento da resolução espacial dos modelos já que, os modelos utilizam diferentes representações físicas distintas o que contribuí para um aumento do grau de incerteza nos cenários de mudanças climáticas.

6- REFERÊNCIAS

CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1994. 390p.

DATA DISTRIBUTION CENTRE. Dica de Leitura. Disponível em:< http://sedac.ipcc-data.org/ddc/ar5_scenario_process/RCPs.html. >. Acesso em: 28 de maio. 2017.

HAMADA, E.; GONÇALVES, R.R.V.; MARENGO, J.; GHINI, R. Cenários climáticos futuros para o Brasil. In: GHINI, R.; HAMADA, E. (Ed.). **Mudanças climáticas: impactos sobre doenças de plantas no Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 27-73.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate Change 2013: The physical science basis**. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the IPCC, Stockholm, September, 2014. 2216p

KELLER FILHO, Thadeu; ASSAD, Eduardo Delgado; LIMA, Paulo Roberto Schubnell de Rezende. **Regiões pluviometricamente homogêneas no Brasil**. Pesquisa agropecuária Brasileira. Brasília, v. 40, n. 4, p. 311-322, Apr. 2005 .

KNUTTI, R., D. Masson, and A. Gettelman, Climate model genealogy: **Generation CMIP5 and how we got there**, Geophys. Res. Lett.40,1194-1199, doi: 10.1002/grl.50256. 2013.

KRAEMER, Tânia Henke et al. **Modelo econômico de controle e avaliação de impactos ambientais: MECAIA**. 2002.

MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P.; ALVES, L. M.; CUADRA, S. V.; VALVERDE, M. C.; TORRES, R. R.; SANTOS, D. C.; FERRAZ, S. E. T. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. *Climate Dynamics*, New York, v. 35, p. 1073-1097, 2010.

MARENGO, José A. O futuro clima do Brasil. **Revista USP**, n. 103, p. 25-32, 2014.

MARENGO, Jose A.; VALVERDE, Maria C. **Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4**. *Revista Multiciência*, v. 8, p. 5-28, 2007.

MARIANO, Glauber Lopes. **Classificação climática**. Departamento de Meteorologia Universidade Federal de Pelotas, 2010.

MASSON, D., and R. KNUTTI (2011), **Climate model genealogy**, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L08703.2011.

MOSS, Richard H. et al. **The next generation of scenarios for climate change research and assessment**. *Nature*, v. 463, n. 7282, p. 747, 2010.

PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Base Científica das Mudanças Climáticas. **Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas**.

Organização de T. Ambrizzi & M. Araujo. Rio de Janeiro, Coppe/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

SALES, Domingo Cassain et al. Projeções de mudanças na precipitação e temperatura no Nordeste brasileiro utilizando a técnica de Downscaling dinâmico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 4, p. 435-456, 2015.

SANTOS, Filipe Duarte. **Alterações Globais: Os desafios e os riscos presentes e futuros**. FUNDAÇÃO FRANCISCO MANUEL DOS SANTOS, 2016.

SILVEIRA, Cleiton da Silva et al. **Mudanças climáticas na bacia do rio São Francisco: Uma análise para precipitação e temperatura**. RBRH, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 416-428, June 2016.

TORRES, Roger Rodrigues. **Análise de incertezas em projeções de Mudanças climáticas na América do Sul**. 2014. 271f. Tese (Doutorado em meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

TRENBERTH, K. E. **Climate System Modeling**. Cambridge University Press. 787 p., 1992.
TRENBERTH, Kevin E.; FASULLO, John T. Simulation of present-day and twenty-first-century energy budgets of the southern oceans. **Journal of Climate**, v. 23, n. 2, p. 440-454, 2010

VERA, Carolina et al. Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 13, 2006.