



RELATÓRIO Nº 3

Cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais



**Tércio Ambrizzi
Rosmeri Porfírio da Rocha
José A. Marengo
Igor Pisnitchenko
Lincoln M. Alves
Julio P. R. Fernandez**



2007

**MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA
SECRETARIA DE BIODIVERSIDADE E FLORESTAS - SBF
DIRETORIA DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE –
DCBio**

Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade

Sub projeto:

**Caracterização do clima atual e definição das
alterações climáticas para o território
brasileiro ao longo do Século XXI**

Relatório 3

Cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais

**Tércio Ambrizzi¹
Rosméri Porfírio da Rocha¹
José A. Marengo²
Igor Pisnitchenco²
Lincoln alves Nunes²
Júlio P. R. Fernandez²**

**IAG/USP¹
CPTEC/INPE²
São Paulo, Brasil**

2007

Equipe Científica:

Jose A. Marengo, Coordenador, CPTEC/INPE, SP

Carlos A. Nobre, CPTEC/INPE, SP

Igor Pishchenko, CPTEC/INPE, SP

Tatiana Tarasova, CPTEC/INPE, SP

María Valverde, CPTEC/INPE, SP

Renaud Laborbe, CPTEC/INPE, SP

Guillermo Obregón, CPTEC/INPE, SP

Julio P. Reyes Fernandez, CPTEC/INPE, SP

Wagner R. Soares, CPTEC/INPE, SP

Lincoln M. Alves, CPTEC/INPE, SP

Tercio Ambrizzi, IAG/USP, SP

Rosemeri P. Rocha, IAG/USP, SP

Simone T. Ferraz, IAG/USP, SP

Santiago. V. Quadra, IAG/USP

Eneas Salati, FBDS, RJ

Eneida Salati, FBDS, RJ

Tatiana Campanhol, FBDS, RJ

Nilson Villa Nova, ESALQ/USP, SP

Apoio Administrativo:

Diana Raigoza, CPTEC/INPE, SP

Evanize Fidalgo, CPTEC/INPE, SP

Josiane C. M. de Oliveira, CPTEC/INPE, SP

Letícia Maria Barbosa de Faria, CPTEC/INPE, SP

ÍNDICE

	<i>Pág.</i>
Agradecimentos	02
Apresentação	03
Siglas	04
Índice de Tabelas	07
Índice de Figuras	08
Capítulo 1	10
<i>Introdução</i>	10
Capítulo 2	13
<i>Modelos globais e regionais climáticos utilizados</i>	13
2.1 <i>Experiências de modelos regionais usados em estudos de variabilidade de clima na América do Sul.</i>	14
2.2 <i>Modelo Global a ser utilizado para a regionalização (“downscaling”) fornecendo as condições de contorno: HadAM3P</i>	21
2.3 <i>Modelos regionais a serem utilizados para a regionalização (“downscaling”)</i>	22
2.3.1 <i>Modelo HadRM3P</i>	22
2.3.2 <i>Modelo Eta/CPTEC/CPTEC</i>	25
2.3.3 <i>Modelo RegCM3</i>	26
2.4 <i>Incerteza dos cenários regionais de mudança climática</i>	27
Capítulo 3	30
<i>Metodologia e implementação dos experimentos e rodadas para gerar cenários de clima futuro</i>	30
3.1 <i>O modelo global HadAM3P</i>	30
3.2 <i>Estratégia do Downscaling dinâmico</i>	31
3.3 <i>Concentração de gases de efeito estufa e sua variabilidade considerada nos 3 modelos regionais para projeções de clima futuro</i>	32
3.4 <i>Produtos a serem gerados (projeções climáticas anuais e sazonais dos modelos regionais).</i>	33
Capítulo 4	35
<i>Resultados das simulações numéricas</i>	35
4.1 <i>Validação do clima atual gerado pelos três modelos regionais</i>	35
4.2 <i>Simulações sazonais para os cenários futuros do clima</i>	48
4.2.1 <i>Simulações com o modelo global</i>	48
4.2.2 <i>Simulações com os modelos regionais</i>	54
4.3 <i>Análise sazonal do clima presente e futuro por regiões do Brasil</i>	65
4.4 <i>Anomalia média sazonal dos modelos regionais climáticos (“ensemble”) para o clima presente e futuro</i>	75
4.4.1 <i>Anomalias sazonais grupadas dos três modelos regionais: clima presente</i>	75
4.4.2 <i>Anomalias sazonais grupadas dos três modelos regionais: clima futuro</i>	79
Capítulo 5	85
<i>Discussões e conclusões</i>	85
Referências	102

AGRADECIMENTOS

Este documento é derivado principalmente dos resultados dos projetos “*Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XX*”, apoiado pelo Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira – PROBIO, financiado pelo MMA/BIRD/GEF/CNPq, e pelo Global Opportunity Fund-GOF do Reino Unido, através do projeto “*Using Regional Climate Change Scenarios for Studies on Vulnerability and Adaptation in Brazil and South América*”. Os pesquisadores do projeto agradecem ao CNPq pelas outorga de bolsas de pesquisa para os colaboradores e de bolsas de produtividade na pesquisa para os líderes do projeto. Outras fontes de financiamento incluem o Programa Nacional de Mudanças Climáticas do Ministério da Ciência e Tecnologia, a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (*FAPESP - Projeto de Pesquisa Temático 01/13816-1*), o Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq através do Projeto *Instituto do Milênio LBA II*, o Projeto *GEOMA (Tema Modelagem Climática)* e o Instituto Inter-Americano de Pesquisas sobre Mudanças Globais - Projeto *IAI-PROSUR CRN55*. Grande parte do material incluído neste documento é resultado de estudos publicados pelos autores na literatura nacional e internacional, assim como da revisão de trabalhos realizada para a preparação do Quarto Relatório Científico AR4 do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC).

Estendemos nosso agradecimento ao Centro Técnico Aeroespacial - CTA, Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, a Agência Nacional de Águas - ANA, o CPTEC/INPE, o Instituto Agrônômico de Paraná - IAPAR, e o Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo - DAEE pelo fornecimento de informações meteorológicas. Um agradecimento muito especial vai para o Hadley Centre for Climate Research and Prediction, do Reino Unido, por fornecer dados do modelo global HadAM3P que servem de condições de contorno para as simulações dos modelos regionais, e ao IPCC – Data Distribution Centre (DDC) por fornecer as saídas de modelos climáticos globais do IPCC-TAR e AR4 analisados neste relatório. As simulações dos modelos climáticos regionais foram feitas CPTEC-INPE e no IAG/USP, e agradecemos a Dra. Maria Assunção F. Da Silva Dias, Coordenadora Geral do CPTEC por facilitar o uso do supercomputador NEC SX-6 para rodar o modelo Eta/CPTEC/CPTEC.

APRESENTAÇÃO

O presente relatório foi elaborado em conjunto pelo Grupo de Estudos Climáticos (GrEC) do Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo e o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) onde os resultados de três modelos regionais climáticos (MRC) que foram integrados usando dados iniciais obtidos de um modelo global de circulação atmosfera (MCGA) tanto para o clima presente, para validação do próprio modelo, como para o clima futuro, onde concentrações de CO₂ foram assumidas numa perspectiva mais intensa ou de menor volume. Este documento constitui o Relatório III para o Projeto PROBIO sobre cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI através de projeções de clima e extremos climáticos usando três modelos climáticos e dados de modelos climáticos globais do IPCC-Terceiro Relatório de Avaliação TAR.

Através das análises de dois conjuntos de 30 anos de simulações de cenários climáticos para o período de 2070-2100, uma para o cenário de emissão A2 e o outro para B2 do IPCC, médias sazonais e mensais de temperatura e precipitação para a América do Sul serão discutidas neste relatório. Selecionando-se algumas regiões específicas do Brasil, como a Amazônia, o Pantanal, o Nordeste e o Sul-Paraná, realizou-se um estudo mais regional das mudanças climáticas considerando-se o aumento da concentração dos gases de efeito estufa, em particular o CO₂. Uma comparação dos resultados obtidos com o modelo HadRM3P (Hadley Centre) e ETA/CPTEC/CPTEC integrados no CPTEC/INPE e do modelo RegCM3 utilizado na USP será apresentada. Certezas e incertezas inerentes aos resultados obtidos através da modelagem numérica serão discutidas nas conclusões finais.

SIGLAS

AOGCMs	<i>Atmosphere-Ocean General Circulation Models</i>
AR4	<i>Fourth Assessment Report-IPCC (Quarto Relatório de Avaliação)</i>
BIRD	<i>Banco Internacional de Reconstrução e Desenvolvimento (Banco Mundial)</i>
CCCMA	<i>Canadian Center for Climate Modelling and Analysis (Canada)</i>
CCSR	<i>Center for Climate System Research (Japão)</i>
CEPAGRI-UNICAMP	<i>Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura-Universidade de Campinas</i>
CNPq	<i>Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico</i>
CNRM	<i>Centre National de Recherches Meteorologiques (França)</i>
CPTEC	<i>Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos</i>
CRU	<i>Climate Research Unit (UK)</i>
CSIRO	<i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (Australia)</i>
CTA	<i>Centro Técnico Aeroespacial</i>
DOE	<i>Departament of Energy (EUA)</i>
DTR	<i>Diurnal Temperature Range</i>
EMBRAPA	<i>Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias</i>
ENOS	<i>El Niño oscilação Sul</i>
FAPESP	<i>Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo</i>
FAR	<i>Quarto Relatório de Avaliação</i>
GCMS	<i>General Circulation Models</i>
GEF	<i>Global Environment Facility</i>
GFDL	<i>Geophysical Fluid Dynamic Laboratory (EUA)</i>
GISS	<i>Goddard Institute for Space Studies (EUA)</i>
GOF	<i>Global Opportunity Fund (UK)</i>
GPCP	<i>Global Precipitation Climatology Project (USA)</i>
GT1	<i>Grupo de Trabalho 1</i>
GT2	<i>Grupo de Trabalho 2</i>
GT3	<i>Grupo de Trabalho 3</i>
HadGEM1	<i>Hadley Centre Global Environmental Model Version 1</i>

IAG	<i>Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas</i>
IAI	<i>Inter American Institute for Global Change</i>
INMET	<i>Instituto Nacional de Meteorologia</i>
INMN	<i>Instituto Nacional de Meteorologia da Itália</i>
INPE	<i>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais</i>
IPH	<i>Instituto de Pesquisas Hidráulicas</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IPCC - DDC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change – Data Distribution Centre</i>
MMA	<i>Ministério do Meio Ambiente</i>
NAO	<i>North Atlantic Oscillation</i>
NAE	<i>Núcleo de Assuntos Estratégico da Presidência da República</i>
NASA/GSFC	<i>National Aeronautics & Space Administration/Goddard Space Flight Center (EUA)</i>
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research (EUA)</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NIES	<i>National Institute for Environmental Studies (Japão)</i>
OMM	<i>Organização Meteorológica Mundial</i>
PCM	<i>Parallel Climate Model (EUA)</i>
PORTOBRAS	<i>Administração de Portos do Brasil em Manaus</i>
PDO	<i>Pacific Decadal Oscillation</i>
PNUMA	<i>Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente</i>
PROBIO	<i>Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira</i>
SALLJ	<i>South American Low Level Jet East of the Andes</i>
SAR	<i>Segundo Relatório de Avaliação</i>
SENAMHI	<i>Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (Peru)</i>
SOI	<i>Southern Oscillation Index</i>
SRES	<i>Special Report Emission Scenarios</i>
TAR	<i>Third Assessment Report-IPCC (Terceiro Relatório de Avaliação)</i>
TSM	<i>Temperatura da Superfície do Mar</i>
UBA	<i>Universidad de Buenos Aires</i>
UNFCCC	<i>United National Framework on Climate Change Convention</i>

UFRGS	<i>Universidade Federal de Rio Grande do Sul</i>
UK-MET Office	<i>United Kingdom Meteorological Office (UK)</i>
USP	<i>Universidade de São Paulo</i>
ZCAS	<i>Zona de Convergência do Atlântico Sul</i>
ZCIT	<i>Zona de Convergência Intertropical</i>

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela	Descrição	Pág.
Tabela 1	<i>Principais características do modelo regional HadRM3P, implementado no CPTEC.</i>	24
Tabela 2	<i>Formas de entender alguns dos problemas de incerteza na construção de cenários climáticos.</i>	28
Tabela 3	<i>Índices estatísticos mensais da precipitação calculados nos subdomínios definidos na Fig.6. São mostrados o viés, o desvio padrão (dp), o erro da raiz quadrática média (RMSE) e o coeficiente de correlação (CC) em relação aos dados climatológicos do CRU.</i>	71
Tabela 4	<i>Índices estatísticos mensais da temperatura calculados nos subdomínios definidos na Fig.6. São mostrados o viés, o desvio padrão (dp), o erro da raiz quadrática média (RMSE) e o coeficiente de correlação (CC) em relação aos dados climatológicos do CRU.</i>	72
Tabela 5	<i>Indicador qualitativo das tendências de chuva e temperatura</i>	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras	Descrição	Pág.
Figura 1	Esquema operacional de modelos globais e regionalização (“downscaling”) usando os modelos de IPCC e os modelos regionais Eta/CPTEC/CPTEC, RegCM3 e HadRM3.	32
Figura 2a	Climatologia sazonal da precipitação (mm/dia) – coluna esquerda – e de Temperatura do ar (°C) – coluna direita – para o período base 1961-1990 simulados pelos modelos PRECIS (topo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC/CPTEC (inferior). A escala de cores encontra-se abaixo das figuras.	39
Figura 2b	Climatologia do outono (MAM) da precipitação (mm/dia) – coluna esquerda – e de Temperatura do ar (°C) – coluna direita – para o período base 1961-1990 simulados pelos modelos HadRM3P (topo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC/CPTEC (inferior). A escala de cores encontra-se abaixo das figuras.	39
Figura 2c	Climatologia do inverno (JJA) da precipitação (mm/dia) – coluna esquerda – e de Temperatura do ar (°C) – coluna direita – para o período base 1961-1990 simulados pelos modelos HadRM3P (topo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC/CPTEC (inferior). A escala de cores encontra-se abaixo das figuras.	40
Figura 2d	Climatologia da primavera (SON) da precipitação (mm/dia) – coluna esquerda – e de Temperatura do ar (°C) – coluna direita – para o período base 1961-1990 simulados pelos modelos HadRM3P (topo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC/CPTEC (inferior). A escala de cores encontra-se abaixo das figuras.	41
Figura 3a	Viés da precipitação (mm/dia) – coluna da esquerda – e da Temperatura do ar (°C) – coluna da direita – para as quatro estações do ano simulado dentro do período base 1961-1990 pelos modelos PRECIS (topo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC/CPTEC (inferior).	44
Figura 3b	Viés da precipitação (mm/dia) para outono (MMA) – coluna da esquerda – e da Temperatura do ar (°C) – coluna da direita – para as quatro estações do ano simulado dentro do período base 1961-1990 pelos modelos PRECIS (topo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC/CPTEC (inferior).	45
Figura 3c	Viés da precipitação (mm/dia) para inverno (JJA) – coluna da esquerda – e da Temperatura do ar (°C) – coluna da direita – para as quatro estações do ano simulado dentro do período base 1961-1990 pelos modelos PRECIS (topo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC/CPTEC (inferior).	46
Figura 3d	Viés da precipitação (mm/dia) para primavera (SON) – coluna da esquerda – e da Temperatura do ar (°C) – coluna da direita – para as quatro estações do ano simulado dentro do período base 1961-1990 pelos modelos PRECIS (topo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC/CPTEC (inferior).	47
Figura 4	Anomalia Sazonal de precipitação (mm/dia) e temperatura do ar (°C) para os cenários B2 (coluna da esquerda) e A2 (coluna da direita) simulada pelo modelo global HadAM3P.	50
Figura 5a	Anomalia Sazonal de precipitação (Verão DJF) em mm/dia, para os cenários B2 (coluna da esquerda) e A2 (coluna da direita) simulada pelos modelos HadRM3P (todo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC (inferior). As escalas de cores estão abaixo da figura.	57
Figura 5b	Anomalia Sazonal de temperatura (Verão DJF) em °C, para os cenários B2 (coluna da esquerda) e A2 (coluna da direita) simulada pelos modelos HadRM3P (todo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC (inferior). As escalas de cores estão abaixo da figura.	58
Figura 5c	Anomalia Sazonal de precipitação (Outono MAM) em mm/dia, para os cenários B2 (coluna da esquerda) e A2 (coluna da direita) simulada pelos modelos HadRM3P (todo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC (inferior). As escalas de cores estão abaixo da figura.	59
Figura 5d	Anomalia Sazonal de temperatura (Outono MAM) em °C, para os cenários B2 (coluna da esquerda) e A2 (coluna da direita) simulada pelos modelos HadRM3P (todo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC (inferior). As escalas de cores estão abaixo da figura.	60
Figura 5e	Anomalia Sazonal de precipitação (Inverno JJA) em mm/dia, para os cenários B2 (coluna da esquerda) e A2 (coluna da direita) simulada pelos modelos HadRM3P (todo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC (inferior). As escalas de cores estão abaixo da figura.	61
Figura 5f	Anomalia Sazonal de temperatura (Inverno JJA) em °C, para os cenários B2 (coluna da esquerda) e A2 (coluna da direita) simulada pelos modelos HadRM3P (todo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC (inferior). As escalas de cores estão abaixo da figura.	62
Figura 5g	Anomalia Sazonal de precipitação (Primavera SON) em mm/dia, para os cenários B2 (coluna da esquerda) e A2 (coluna da direita) simulada pelos modelos HadRM3P (todo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC (inferior). As escalas de cores estão abaixo da figura.	63
Figura 5h	Anomalia Sazonal de temperatura (Primavera SON) em °C, para os cenários B2 (coluna da esquerda) e A2 (coluna da direita) simulada pelos modelos HadRM3P (todo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC (inferior). As escalas de cores estão abaixo da figura.	64
Figura 6	Regiões selecionadas para o estudo do clima presente e futuro gerado pelas simulações numéricas.	65
Figura 7a	Médias sazonais de precipitação (mm/dia) e temperatura (°C) dos dados do CRU e simulações do clima presente e cenários de emissões A2 e B2 gerados pelos modelos PRECIS (topo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC/CPTEC (inferior) para as regiões (a) Sul, (b) Pantanal, (c) Amazonas, e (d) Nordeste mostradas na Fig.6.	67
Figura 7b	Médias sazonais de precipitação (mm/dia) e temperatura (°C) dos dados do CRU e simulações do clima presente e cenários de emissões A2 e B2 gerados pelos modelos HadRM3P (topo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC (inferior) para o Pantanal (Fig.6).	68
Figura 7c	Médias sazonais de precipitação (mm/dia) e temperatura (°C) dos dados do CRU e simulações do clima presente e cenários de emissões A2 e B2 gerados pelos modelos HadRM3P (topo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC (inferior) para o Pantanal (Fig.6).	69

Figura 7d	Médias sazonais de precipitação (mm/dia) e temperatura (°C) dos dados do CRU e simulações do clima presente e cenários de emissões A2 e B2 gerados pelos modelos HadRM3P (topo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC (inferior) para o Pantanal (Fig.6).	70
Figura 8a	Anomalias sazonais médias de precipitação (mm/dia) e temperatura (°C) agrupadas das simulações dos modelos HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC/CPTEC. (a) verão, (b) outono, (c) invernos, e (d) primavera. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura.	77
Figura 8b	Anomalias sazonais médias de precipitação (mm/dia) e temperatura (°C) para outono MMA agrupadas das simulações dos modelos HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura.	77
Figura 8c	Anomalias sazonais médias de precipitação (mm/dia) e temperatura (°C) para inverno MAM agrupadas das simulações dos modelos HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura.	78
Figura 8d	Anomalias sazonais médias de precipitação (mm/dia) e temperatura (°C) para primavera SON agrupadas das simulações dos modelos HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura.	78
Figura 9a	Anomalias sazonais médias de precipitação (mm/dia) e temperatura (°C) para verão DJF agrupadas das simulações dos modelos HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura.	81
Figura 9b	Anomalias sazonais médias de precipitação (mm/dia) e temperatura (°C) para outono MAM agrupadas das simulações dos modelos HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura.	82
Figura 9c	Anomalias sazonais médias de precipitação (mm/dia) e temperatura (°C) para inverno JJA agrupadas das simulações dos modelos HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura.	83
Figura 9d	Anomalias sazonais médias de precipitação (mm/dia) e temperatura (°C) para primavera SON agrupadas das simulações dos modelos HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura.	84
Figura 10a	Anomalias anuais médias de precipitação (mm/dia) para o “ensemble” dos modelos regionais (direita) HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura. As anomalias são para o período futuro 2071-2100 em relação ao presente 1961-90.	88
Figura 10b	Anomalias anuais médias de temperatura (°C) para o “ensemble” dos modelos regionais (direita) HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura. As anomalias são para o período futuro 2071-2100 em relação ao presente 1961-90.	89
Figura 10c	Anomalias sazonais médias de chuva (mm/dia) para verão-DJF do “ensemble” dos modelos regionais (direita) HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura. As anomalias são para o período futuro 2071-2100 em relação ao presente 1961-90.	90
Figura 10 d	Anomalias sazonais médias de temperatura (°C) para verão-DJF do “ensemble” dos modelos regionais (direita) HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura. As anomalias são para o período futuro 2071-2100 em relação ao presente 1961-90.	91
Figura 10e	Anomalias sazonais médias de chuva (mm/dia) para outono - MAM do “ensemble” dos modelos regionais (direita) HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura. As anomalias são para o período futuro 2071-2100 em relação ao presente 1961-90.	92
Figura 10f	Anomalias sazonais médias de temperatura (°C) para outono - MAM do “ensemble” dos modelos regionais (direita) HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura. As anomalias são para o período futuro 2071-2100 em relação ao presente 1961-90.	93
Figura 10g	Anomalias sazonais médias de chuva (°C) para inverno-JJA do “ensemble” dos modelos regionais (direita) HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura. As anomalias são para o período futuro 2071-2100 em relação ao presente 1961-90.	94
Figura 10h	Anomalias sazonais médias de temperatura (°C) para inverno-JJA do “ensemble” dos modelos regionais (direita) HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura. As anomalias são para o período futuro 2071-2100 em relação ao presente 1961-90.	95
Figura 10i	Anomalias sazonais médias de chuva (mm/dia) para primavera-SON do “ensemble” dos modelos regionais (direita) HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura. As anomalias são para o período futuro 2071-2100 em relação ao presente 1961-90.	96
Figura 10j	Anomalias sazonais médias de temperatura (°C) para primavera-SON do “ensemble” dos modelos regionais (direita) HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura. As anomalias são para o período futuro 2071-2100 em relação ao presente 1961-90.	97

Capítulo 1

Introdução

Desde a década de 1980, evidências científicas sobre a possibilidade de mudança do clima em nível mundial vêm despertando um interesse crescente no público e na comunidade científica em geral. Em 1988, a OMM (Organização Meteorológica Mundial) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) estabeleceram o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), quando a Assembleia Geral das Nações Unidas trata da mudança do clima pela primeira vez. O IPCC ficou encarregado de apoiar, com trabalhos científicos, as avaliações do clima e os cenários de mudanças climáticas para o futuro. Segundo o IPCC, o aumento nas concentrações de gases de efeito estufa (dióxido de carbono, vapor d'água, metano, óxido nitroso, e ozônio, CFC's, entre outros) tende a reduzir a eficiência com que a Terra se resfria.

Os modelos climáticos são usados como ferramentas para projeções de futuras mudanças do clima, como consequência de futuros cenários de forçantes climáticas (gases de efeito estufa e aerossóis). Sabe-se que existe um grau de incerteza do futuro cenário climático do planeta, incerteza muito maior quando se deseja projetá-los para regiões. Isto se deve principalmente às diferenças observadas nas saídas dos diferentes modelos climáticos usados nas projeções climáticas para o século XXI pelo TAR do IPCC (2001 a, b). No Relatório I deste projeto foram analisadas as saídas dos modelos climáticos do IPCC, simulados com diferentes concentrações de gases de efeito estufa, (ou cenários SRES-Special Report on Emissions Scenários), os quais foram avaliados para o Brasil, propiciando uma primeira aproximação dos cenários futuros de clima para o País em geral, porém sem muito detalhe regional. Usaram-se vários modelos climáticos para poder avaliar a variabilidade entre eles e assim, conhecer e interpretar todos os possíveis cenários, levando-se em conta a dispersão entre suas saídas, fornecendo uma noção de incerteza das projeções. Desta forma, poder-se-ia tentar

reduzir as incertezas das previsões considerando-se não só um, mas vários cenários de modelos diferentes.

As saídas dos modelos globais de clima (acoplados atmosfera-oceano) contêm informações sobre os cenários SRES, os quais foram implementadas pelo IPCC para o terceiro relatório de avaliação de mudanças do clima (IPCC, 2001 a, b). Os novos cenários SRES substituem os cenários IS92 que foram utilizados no segundo relatório de avaliação do IPCC publicado em 1996 (IPCC, 1996 a, b).

A técnica mais aceita para traduzir a relativamente baixa resolução espacial dos modelos climáticos globais para escalas mais refinadas é obtida com a regionalização (“downscaling”) das projeções destes modelos usando modelos climáticos regionais de mais alta resolução sobre a área de interesse e tendo como condições de fronteira (ou de contorno) nas fronteiras laterais do domínio geográfico do mesmo, dados provenientes do modelo climático global.

A técnica de regionalização (“downscaling”) tem sido usada para previsões sazonais de clima no CPTEC (Modelo Eta/CPTEC/CPTEC-40 e 80 km de resolução espacial), FUNCEME (modelo RSM), SENAMHI e IGP-Peru (modelos RSM e MM5) e USP (RegCM3). Em 1999, o PIRCS (Projeto de Intercomparação de Simulações de Modelos Regionais) (Takle et al. 1999) apresentou os primeiros resultados de simulação da grande seca de verão de 1988 nos EUA, mostrando que todos os modelos simulam bem a variabilidade sinótica e as temperaturas máxima e mínima associadas à falta de chuva. Neste experimento 8 modelos regionais (RSM-NCEP, RSM-Scripps, MM5, RegCM32, DARLAM, HIRHAM4, ClimRAMS, ISURAMS) foram forçados com as mesmas condições iniciais fornecidas pelo ISLSCP (Primeiro Projeto Internacional de Climatologia da Superfície usando Satélites). Já para as enchentes de verão de 1993 na mesma região dos EUA (Anderson 2003), 12 modelos regionais (ClimRAMS, CRCM, DARLAM, EM, HIRHAM, MM5-ANL, MM5-BATS, NCER-RSM, PROMES, RegCM32, RSM-Scripps, Swe CLIM) forçados com as condições iniciais e de borda das reanálises do NCEP mostram que a maioria dos modelos simula corretamente a taxa de reciclagem de vapor d’água e os ciclos diurnos. Nove

dos 13 modelos apresentaram chuvas abundantes máximas no período noturno.

Existe uma variedade grande de modelos regionais, cada um com diferente arquitetura, e ainda que as experiências de Tackle (1999) e Anderson (2003) mostraram comparações entre modelos, não existe ainda uma sistemática comparação entre resultados de modelos regionais, assim como uma integração deles no modo de “ensemble”, ou seja, da análise de um conjunto de modelos diferentes (“multimodel ensemble”). “Multimodel ensembles” com modelos globais foram realizadas para previsões climáticas sazonais pelo International Research Institute for Climate Prediction (IRI), Universidade de Columbia, e para previsão de furacões no Atlântico tropical Norte pelo Prof. T. Krishnamurty da Universidade da Flórida-EUA, e tem um potencial grande de melhorar a previsão, combinando-se estatisticamente o melhor de vários modelos, e melhorando também a destreza de previsões. Estas experiências sugerem a eventual conveniência de se ter vários modelos regionais forçados com as mesmas condições de contorno, o que permitiria uma combinação das saídas de vários modelos regionais em modo conjunto.

O presente projeto usou vários modelos regionais (Eta/CPTEC/CPTEC, RegCM3 e HadRM3P) cujas simulações utilizaram as mesmas condições de contorno do modelo global HadCM3, um dos aceitos pelo IPCC TAR. Primeiramente, os três modelos regionais foram integrados para o clima presente a fim de avaliar sua capacidade de representar o mesmo e sua variabilidade para a América do Sul, especialmente para o Brasil. Após constatar-se que houve um desempenho satisfatório neste teste, eles foram utilizados para os cálculos de projeções de cenários climáticos futuros regionalizados. Numa fase seguinte, os resultados destes modelos regionais foram combinados num só, utilizando-se a técnica de “multimodel ensemble” para os períodos de tempo 2071-2100, e para os cenários SRES A2 (alta concentração de emissões de gases de efeito estufa) e B2 (baixa concentração de emissões de gases de efeito estufa considerando a hipótese de que todos os países ratificaram o protocolo de Kyoto).

Capítulo 2

Modelos globais e regionais climáticos utilizados

Os modelos globais climáticos são usados como ferramentas para projeções de futuras mudanças do clima, como consequência de futuros cenários de forçantes climáticas (gases de efeito estufa e aerossóis). Sabe-se que existe um grau de incerteza do futuro cenário climático do planeta, incerteza muito maior quando se deseja projetá-los para regiões usando modelos globais. A formulação de políticas de adaptação em resposta a mudanças do clima tem mostrado que o nível de detalhamento fornecido por esses métodos ainda não está consolidado, ainda que, os MCGAs forneçam simulações adequadas da circulação atmosférica em escala global (Camargo et al., 2001; Cavalcanti et al., 2002; Marengo et al., 2003).

A principal razão é a resolução espacial destes métodos, que por vezes são da ordem de centenas de quilômetros, de forma que, forçantes de mesoescala (topografias complexas, cobertura vegetal, grandes lagos e rios) e uma gama de processos físicos (nuvens, processos de turbulência) com escala espacial inferior à resolução espacial da “grade” do modelo acarretam erros no decorrer da integração e, assim, limitando a possibilidade de simular/prever com exatidão satisfatória alguma variação, por exemplo, da temperatura ou precipitação, em escala regional (Zorita and Von Storch, 1999; Menéndez et al. 2001; Nicolini et al. 2002; Misra et al., 2003; Nobre e Malagutti, 2004).

Um aumento na resolução espacial dos MCGAs poderia melhorar as previsões em escala regional, contudo, o custo computacional e a quantidade de espaço para armazenamento dos arquivos muitas vezes impossibilitam este caminho. Além disto, aumentar a resolução do MCGA não é trivial, pois as parametrizações, tais como convecção pode não estar otimizada para versão de alta resolução e os resultados podem realmente ser mal representados em alguns lugares (Boyle, 1993).

Deste modo, impõe-se o desenvolvimento de técnicas de transferência da informação gerada pelos MCGAs em larga escala, para escalas menores,

isto é, as chamadas técnicas de “downscaling dinâmico” utilizando Modelos Climáticos Regionais (MCR) que permitem um maior detalhamento espacial e temporal das variáveis do sistema climático em relação aos MCGAs.

Os métodos de *downscaling* basicamente podem ser enquadrados em duas vertentes: (a) os modelos dinâmicos regionais, que são modelos numéricos semelhantes aos MCGAs, mas com resolução mais alta, usando como condições de contorno o resultado da simulação do MCGA (McGregor et al., 1993); e (b) métodos estatísticos, na maior parte das vezes funções de transferência estatísticas entre os dados dos campos de larga escala e a variável de interesse na superfície (Wilby et al., 1998). Uma revisão comparando vários métodos de *downscaling* aplicados à saída dos MCGA é visto em Wilby and Wigley (1997) e Giorgi et al. (2001).

A utilização destas técnicas na América do Sul (AS), reveste-se de diversas formas e tem permitido compreender melhor o processo dinâmico e físico da atmosfera e dos oceanos, bem como suas interações com outros componentes do sistema terrestre. Como consequência, tem se conseguido uma melhora na qualidade e na precisão das previsões de tempo e clima (Seluchi and Chou, 2001; Nicolini et al., 2002; Chou et al., 2002; Seth e Rojas 2003; Misra et al., 2003; Alves et al., 2004; Chou et al., 2004).

A seguir será feita uma descrição do modelo global HadCM3 e dos três modelos regionais (HadRM3P, RegCM3 e Eta/CPTEC/CPTEC) utilizado no downscaling.

2.1 Experiências de modelos regionais usados em estudos de variabilidade de clima na América do Sul.

A idéia de se utilizar modelo de área limitada para estudos climáticos regionais foi originalmente proposta por Dickinson et al. (1989) e Giorgi (1990). Tal idéia tem como base a utilização de um MCGA para simular a circulação geral da atmosfera e, com as saídas desse modelo, obter uma distribuição detalhada das variáveis climáticas com um MCR capaz de descrever os efeitos locais. Durante a década de 90 diversos trabalhos foram realizados buscando o ajuste e a validação de modelos climáticos regionais. Para tanto, foram realizados testes de sensibilidade para parametrizações

físicas (Bougeault, 1997; Giorgi e Shields, 1999) e condições de contorno (Giorgi e Marinucci, 1991). A habilidade dos modelos em reproduzir características regionais do clima foi amplamente testada mediante simulações em várias regiões do mundo com diferentes regimes climáticos (Liu et al., 1994; Kato et al., 1999; Sun et al., 1999; Small et al., 1999; Hudson and Jones 2002; Jones et al., 2004). De maneira geral, os resultados mostraram que o desempenho do modelo varia conforme a estação do ano, topografia e localização da região de estudo em relação às circulações que determinam as variáveis prognostica.

Sobre a região da América do Sul, Horel et al. (1994) utilizando uma versão modificada do modelo regional MM4 do National Center for Atmospheric Research (NCAR), realizaram simulações climáticas para investigação dos processos que controlam as características da circulação de grande escala sobre a bacia amazônica, com particular atenção dada na habilidade do modelo em reproduzir o ciclo diurno e os sistemas de escala sinótica. Os resultados deste trabalho revelaram-se inadequados, devido a problemas na circulação interna do modelo próximo a montanhas (condição de contorno) e na parametrização física do modelo, principalmente, no que diz respeito à precipitação excessiva em regiões próximas aos Andes. Segundo os autores, mesmo com melhorias nas parametrizações, tal como no transporte vertical de umidade, as simulações continuaram apresentando características não realísticas.

Da mesma forma, Tanajura (1996), utilizando o modelo ETA/CPTEC do National Centers for Environmental Prediction (NCEP), desenvolveu experimentos para estações de verão (DJF) para analisar seus principais aspectos sobre a AS. Os resultados mostraram que o modelo simulou bem a Alta da Bolívia (AB), o jato subtropical e a variabilidade da precipitação de larga escala. Entretanto subestimou a intensidade da circulação, resultado da dependência em relação à condição de contorno e de suas próprias parametrizações físicas. Por outro lado, de maneira geral, verificou-se uma melhoria na simulação da distribuição espacial da precipitação, exceto na região Amazônica onde se obteve uma superestimativa quando comparado às observações. O autor realizou também experimentos com e sem a presença dos Andes, e os resultados indicaram que os Andes são

fundamentais na organização, em baixos níveis, da distribuição de calor latente da AB. Na ausência dos Andes, não foram produzidas precipitações sobre o sul do continente e não houve transporte de umidade da Amazônia para as latitudes altas. A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) foi simulada independentemente da presença dos Andes.

Analisando também a ZCAS através de simulações numéricas com duração de um mês (janeiro de 1997) utilizando o modelo RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) Teixeira et al. (2002) não mostraram uma clara ligação entre a convecção tropical da Amazônia e a ZCAS. Além do mais, a convecção na Amazônia esteve abaixo da observada, o que atribuíram às deficiências nas parametrizações do modelo.

Utilizando os modelos ETACLIM (Modelo Climático Regional Eta/CPTEC) e o RegCM3 (Regional Climate Model – versão 3) com resolução de 80 Km numa simulação de 10 anos, Fernandez (2004) explorou as circulações quase-estacionárias (Alta da Bolívia) que se desenvolvem sobre a AS durante o verão e os efeitos das anomalias de grande escala (El Niño 97/98 e La Niña 98/99). Os resultados mostraram que ambos os modelos têm desempenhos similares, apesar de apresentarem diferenças significativas com respeito à física e a dinâmica. As simulações da circulação de altos e baixos níveis do ETACLIM foram ligeiramente superiores aos do RegCM3. Entretanto, o vórtice do NEB ficou mais intenso e deslocado para o interior do continente que o observado. Já o RegCM3, simula a AB ao sul e menos intensa que o observado e posiciona corretamente o vórtice no leste do NEB. Essas características causam um efeito direto em ambas as simulações na distribuição da precipitação. Ambos os modelos conseguiram simular a variabilidade interanual durante os eventos extremos. De maneira geral, os dois modelos tendem a subestimar a precipitação sobre grande parte da América do Sul e superestimar na região dos Andes. Com relação à temperatura o ETACLIM tende a superestimar e o RegCM3 subestimar. Segundo o autor, as deficiências encontradas podem ser atribuídas aos parâmetros de convecção e processos de superfície e radiação.

Chou et al. (2002) realizaram simulações de um mês com o modelo Eta/CPTEC/CPTEC, acoplado ao esquema de superfície Simplified Simple Biosphere (SSiB), o mesmo utilizado por Fernandez (2004), para os meses

de agosto (seco) e novembro (úmido) de 1997. Seus resultados mostraram um significativo ganho na simulação da temperatura superficial e o aumento da precipitação sobre o continente no mês úmido. Entretanto, comparações com o esquema "bucket" na versão anterior do modelo ETA/CPTEC/CPTEC, revelaram deficiências na simulação da precipitação da ZCIT. Também, durante os meses secos, o desempenho do modelo foi superior ao de meses úmidos, com respeito à precipitação.

Misra et al. (2002) usando o RSM, também realizaram uma comparação do desempenho de dois esquemas de processos de superfície, o SSiB e o control soil model (CSM), em simulações climáticas regionais sobre a América do Sul. Encontraram que nenhum dos esquemas destaca-se em relação ao outro.

A dificuldade na previsão sazonal de precipitação sobre a América do Sul durante o verão foi discutida também por Misra et al. (2003) através de análises comparativas de simulações climáticas com um MCGA (T42L28) e o RSM (Regional Spectral Model) com 80 km de resolução horizontal. Em geral, o RSM melhora a climatologia do MCGA, e a resolução do RSM foi capaz de resolver as circulações sobre o altiplano andino. No entanto, o RSM não apresenta melhora significativa da precipitação sobre algumas áreas importantes da região (extremo norte da América do Sul, nordeste do Brasil e a zona de convergência intertropical).

Alves et al. (2000) através de simulações climáticas sazonais com o modelo ETA/CPTEC/CPTEC climático, versão operacional do CPTEC, estudou o comportamento da precipitação de verão (1998-1999) e inverno (1999). Os resultados mostraram que a distribuição espacial e o número de dias com precipitação de intensidade fraca a moderada foram relativamente bem simulados. No entanto, as simulações não posicionaram a ZCAS sobre o planalto central. Estes resultados são consistentes com os resultados apresentados por Chou et al. (2004). Eles mostraram que as previsões do Eta/CPTEC/CPTEC têm apresentado potencial para indicação das condições sazonais. Os resultados indicam que a região Amazônica apresentou índices de acerto de previsão de precipitação maiores do que outras regiões do país. Os erros identificados na previsão de precipitação são de pequena

magnitude, exceto no Nordeste do Brasil. Eles sugerem que, a extensão do domínio de integração do modelo pode resultar em melhorias nas previsões.

Druyan and Fulakeza (2002) avaliaram quantitativamente simulações de previsão climática sazonal para o período março-maio dos anos 1985 e 1997 com o RCM (Regional Climate Model) da NASA/GISS em vários setores da América do Sul. Eles notaram que, embora o modelo regional apresentasse melhor destreza com relação ao MCGA, a previsão regional climática foi muito dependente da qualidade das condições fornecidas pelo próprio MCGA e da TSM prevista. A região amazônica apresentou os melhores resultados estatísticos para precipitação, o que concorda com os resultados de Chou et al (2004). Já para o sul do Brasil, as correlações foram em geral inferiores ao valor considerado significativo.

Misra et al. (2002) realizaram três simulações da variabilidade interanual no verão austral (janeiro-março) durante três fases contrastantes do ENOS (1997, 1998 e 1999) utilizando o RSM. As suas simulações sobre as regiões da Amazônia, ZCIT e Bacias do Pacífico e Atlântico concordaram razoavelmente bem com as observações. Destacou-se na simulação o jato de baixos níveis, mostrando-se mais intenso em 1998 e menos em 1999. Também, a simulação da radiação de onda longa (ROL) foi melhor que a reanálise do NCEP.

Vernekar et al. (2003), utilizando o modelo Eta/CPTEC/CPTEC em modo climático, estudaram os jatos de baixos níveis (JBN) e seus efeitos no clima de verão da América do Sul em simulações dos anos de 1983, 1985, 1987, 1989 e 1991 (janeiro a março). Seus resultados mostraram que as simulações foram muito mais refinadas do que a reanálise. As simulações conseguiram reproduzir a variabilidade diurna da precipitação e do JBN apresentando máximos à noite. Resultados semelhantes foram encontrados por Douglas et al. (1999), Saulo et al., (2000) e Berbery e Collini (2000) também estudando o JBN através de previsões do modelo regional ETA/CPTEC/CPTEC e ETA/CPTEC/NCEP. Os padrões de convergência de umidade e de precipitação simulados nestes estudos mostraram um ciclo diurno coerente com máximos noturnos esperados na precipitação, mas com diferenças na magnitude e altura de máxima velocidade do vento horizontal.

Estudando o impacto do uso de uma maior resolução horizontal em simulações climáticas de 10 anos para os meses de janeiro e julho, Nicolini et al (2002) obtiveram melhor representação geral da temperatura e pressão média ao nível do mar com o DARLAM (Division of Atmospheric Research limited área model). Entretanto, na região do planalto brasileiro, que inclui a maior parte da região sudeste, os erros do MCR foram maiores para todas variáveis analisadas. As comparações das simulações de janeiro e julho mostram um desempenho melhor no período de inverno.

Sobre os EUA e Europa as climatologias resultantes dos MCRs mostram que os valores médios sazonais simulados apresentam precisão de $\pm 2K$ para a temperatura do ar e $\pm 25\%$ para precipitação. Em termos de correlação espacial, os componentes de grande escala das simulações com estes modelos têm mostrado precisão semelhante, ou melhor, do que os MCGAs utilizados como fronteira (Giorgi e Mearns 1999).

Da mesma forma que Nicolini et al. (2002), Menéndez et al., (2001) utilizando uma nova versão do modelo global LMD-Z (Laboratoire de Météorologie Dynamique General Circulation Model) e o LAHM (Limited Area HIBU Model) uma versão do GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory), também observaram nas simulações de inverno (mês de julho) da América do Sul, que a utilização do MCR resultou freqüentemente em melhorias na simulação dos principais padrões atmosféricos. Contudo, muitos dos erros sistemáticos do modelo global permaneceram embora com viés (“bias”) de menor intensidade.

Conclusões semelhantes foram obtidas por Alves et al., (2004), analisando as previsões sazonais geradas pelo modelo Eta/CPTEC/CPTEC climático do CPTEC durante ano de 2003. Erros sistemáticos, como subestimativa da precipitação no norte do Pará e estado do Amapá, são associados à condição de contorno (Cavalcanti et al. 2002). Eles também mostraram que os totais pluviométricos gerados pelo modelo nos meses de verão foram subestimados, e nos meses de inverno, superestimados. Apesar destas características ficou evidente que em praticamente todas as regiões de estudo o modelo regional mostrou maior semelhança com as observações do que o modelo global.

Seth e Rojas (2003) investigaram a capacidade do RegCM32 em reproduzir a variabilidade interanual de precipitação e circulação sobre a América do Sul. Comparando simulações para anos de El Niño (1983) e La Niña (1985) o RegCM32 simulou corretamente os diferentes padrões da circulação em grande escala e as anomalias nestes padrões, e precipitação associada. Investigaram ainda a influência do domínio nos resultados do RegCM32 e notaram que a utilização de um domínio maior, cobrindo a América do Sul tropical e oceanos adjacentes, permite a evolução temporal da precipitação mais semelhante à observada. No domínio maior empregaram resolução horizontal de 100 km contra 60 km do menor.

Misra et al. (2003), utilizando o modelo RSM e o MCGA COLA efetuaram experimentos de "downscaling" dinâmico para o período de janeiro a março dos anos 1997, 1998 e 1999. Usaram cinco membros para cada ano, tanto para o MCGA como para o RSM, com uma resolução de T42L28 e 80 km, respectivamente. Os resultados mostraram que o RSM melhorou a climatologia do MCGA, e a resolução do RSM foi capaz de resolver as circulações sobre o altiplano andino.

Nobre et al. (2001) utilizando o modelo alemão ECHAM3 e o RSM simulou a estação chuvosa de 1999 sobre o Nordeste do Brasil. Duas resoluções foram empregadas ao RSM, de 80 km e 20 km, sendo a de 20 km forçada pelos prognósticos fornecidos pelo de 80 km. Os resultados mostraram que o modelo RSM consegue simular a precipitação melhor que o ECHAM3. Entretanto, o RSM com resolução de 80 km, consegue diminuir o "bias" com respeito às observações, enquanto que o RSM com a resolução de 20 km mostrou resultados que se afastaram mais do observado. Uma sugestão dos autores foi melhorar o ajuste das parametrizações de convecção e dos processos de superfície do modelo, cruciais nessa resolução. Destaca-se também a destreza do modelo em simular razoavelmente bem a distribuição espacial do número de dias sem chuva.

Também sobre o NEB, Fernandes (2003) avaliou o desempenho do modelo RAMS, versão 4.3, em dois anos de anomalias extremas de precipitação e o impacto da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) na disponibilidade de vapor d'água. Diante dos resultados obtidos verificou-se que apesar do modelo ter respondido razoavelmente bem aos diferentes

conjuntos de TSM utilizados nas simulações, há a necessidade de ajustes nas configurações (condição de contorno) e ou parametrizações utilizadas nos experimentos, para que se possa simular de forma mais realística o trimestre mais chuvoso do NEB.

Os aspectos característicos regionalizados do clima na região do NEB, utilizando o RSM, no período de 1971-2000, também foram apresentados em Sun et al., (2005). Neste estudo os resultados evidenciam que o modelo foi capaz de resolver o padrão espacial da precipitação sazonal observada, bem como a variabilidade interanual. Características importantes como às anomalias de precipitação sazonal, o RSM apresentou melhor concordância com a observação do que o MCGA. A principal deficiência é um sistemático viés negativo na simulação da precipitação

2.2 Modelo Global a ser utilizado para a regionalização (“downscaling”) fornecendo as condições de contorno: HadAM3P

A componente atmosférica do modelo (HadAM3P) permite também a emissão, transporte e oxidação de compostos de enxofre, o que permite que os efeitos diretos e indiretos das forçantes de sulfatos possam ser modelados nos cenários climáticos. A componente oceânica tem uma resolução vertical de 20 níveis e uma resolução horizontal de $1.25 \times 1.25^\circ$. Assim é possível representar processos importantes e as estruturas das correntes oceânicas. O HadAM3P foi o modelo usado como condição de contorno para as rodadas dos três modelos regionais. O HadAM3P rodou com as TSM geradas pela componente oceânica do HadCM3. O esquema de parametrização da superfície deste modelo foi desenvolvido por Cox et al. (1998) e exclui representações de gelo e umidade do solo assim como a evaporação que depende a resistência estomatal e dos gradientes de vapor de água e do CO_2 . Esta versão não tem os esquemas TRIFFID e MOSES de versões posteriores do HadCM3 (Cox et al 2000) que geram o chamado Amazon die back da Amazonia. O HadAM3 é derivado de uma versão anterior do modelo climático HadAM2b, descrito por Stratton (1999), contendo várias melhorias. Mais referências sobre os modelos HadCM3 e HadAM3 podem ser encontradas em Gordon et al (2000), Pope et al (2000), Cox et al (1999),

Johns et al (1997) e no website do Hadley Centre: <http://www.met-office.gov.uk/research/hadleycentre/models/HadCM3.html>.

O modelo HadCM3 é um modelo acoplado oceano-atmosfera desenvolvido no Hadley Centre, UK Meteorological Office, da Grã-Bretanha. O modelo HadCM3 não precisa de ajustes nos fluxos de energia no oceano para produzir uma boa simulação. Tem-se utilizado este modelo para simulações de 1000 anos ou mais e não foram observados derivas (ou *drifts*). Como mencionado anteriormente, a componente atmosférica do modelo global possui 19 níveis na vertical e uma resolução de 2.5° de latitude por 3.75° de longitude, que é equivalente a uma resolução de 417 km x 278 km no Equador, e 295 km x 278 km a 45° de latitude (comparável a uma resolução espectral de T42). Um novo esquema de radiação é incluído com 6 a 8 bandas espectrais para a radiação solar e de onda longa. Os efeitos radiativos de gases de efeito estufa, assim como de CO₂, vapor de água e ozônio são representados explicitamente (Edwards e Slingo, 1996), e também incluem uma parametrização simples de aerossóis (Cusack et al 1998).

Um novo esquema de processos de superfície (Cox et al 1999) inclui a representação de ponto de congelamento e derretimento da umidade do solo, assim como de processos de escoamento superficial e profundo no solo. A formulação de evaporação inclui a dependência deste processo à resistência estomática, a temperatura e a concentração de vapor d'água e de CO₂. O albedo da superfície é uma função da profundidade da neve, tipo de vegetação e também da temperatura sobre neve e gelo.

2.3 Modelos regionais a serem utilizados para a regionalização (“downscaling”)

2.3.1 Modelo HadRM3P

A versão atual do modelo regional do Hadley Centre é o HadRM3, que é baseado na versão mais recente do HadCM3. Possui uma resolução horizontal de 50 km com 19 níveis na vertical (da superfície até 30 km na estratosfera), e 4 níveis no solo. O HadRM3 usa a mesma formulação

climática do modelo HadCM3 o que permite que o modelo regional forneça projeções climáticas consistentes com o modelo global.

O modelo HadRM3 tem sido utilizado em várias regiões do mundo, como na Europa e Índia (PRECIS 2002). Os primeiros resultados mostram que, em domínios grandes, os padrões de circulação de grande escala e a variabilidade diurna diverge do modelo global na escala sinótica. Na escala de ponto de grade, o modelo regional gera seus próprios padrões, ainda em domínios pequenos, e somente em regiões próximas a região de transição entre as bordas do modelo global e do regional (chamada de região de “buffer”) pode-se ter alguma distorção do padrão gerado pelo modelo global. Na Índia, ainda para um domínio maior, a variabilidade gerada pelos modelos regional e global é altamente correlacionada. Isto sugere que ao escolher o domínio para gerar os cenários dos modelos regionais deverá ser considerada a dinâmica regional.

A resolução horizontal do HadRM3 é de 0.44 x 0.44 lat/long o que corresponde a uma grade de 50 km. Este modelo toma aproximadamente um ano para “spin up” (ajuste às condições de fronteira) e esta parte da simulação é descartada para a geração dos cenários climáticos. As principais variáveis que são parte das condições de contorno para rodar o HadRM3 são campos de pressão na superfície e as componentes horizontais de temperatura, vento e umidade em toda a estrutura vertical da atmosfera. Também para fins de mudança climática, o modelo usa uma representação do ciclo de sulfato e de alguns outros aerossóis. O Hadley Centre usa a técnica de relaxamento o que é aplicado nos quatro extremos da região de “buffer” e em cada nível vertical na atmosfera. Valores no HadRM3 são relaxados para valores interpolados no tempo e gerados a cada 6 horas na resolução espacial do modelo global. Resultados de Hudson e Jones (2002) (PRECIS 2002) mostram que a alta resolução do modelo regional pode gerar representações realísticas de transientes na grande escala (e.g. ciclones tropicais). Isto não leva os desvios significativos do padrão de grande escala gerado pelo modelo global, mas são importantes para a simulação do clima local em várias partes da região.

O Hadley Centre usa, para gerar o clima do presente (1961-90), temperaturas da superfície do mar TSM e gelo (a cada 1° grau) usado pela

componente atmosférica do modelo HadCM3, e que logo passa a ser as condições laterais para as simulações do HadRM3. Para cenários futuros, as TSMs e gelo derivado da simulação da componente oceânica do modelo HadCM3, é que são somadas aos campos médios observados de TSM (1961-90) para forçar os modelos globais e regionais. Maior informação sobre o modelo regional HadRM3 pode ser encontrada neste website <http://www.met-office.gov.uk/research/hadleycentre/models/PRECIS.html> ou em PRECIS (2002).

A dinâmica do modelo HadRM3P é baseada no HadAM3P. Uma descrição das principais características do modelo HadRM3P pode ser vista de forma geral na Tabela 1.

TABELA 1: Principais características do modelo regional HadRM3P, implementado no CPTEC.

CARACTERÍSTICAS		HadRM3P
Coordenada vertical		σ
Grade horizontal		B de Arakawa
Dinâmica		Hidrostático
Física	Nuvens	Smith, 1990 e modificado por Gregory e Morris, 1996.
	Precipitação	Esquema descrito por Senior e Mitchell (1993) juntamente com a evaporação da precipitação descrita por Gregory (1995)
	Camada superficial	Wilson and Henderson-Sellers, 1985
	Processos de superfície	MOSES I (Cox et al., 1999)
	Convecção	Fluxo de Massa (Gregory and Rowntree, 1990) com adicional "downdraft" (Gregory and Allen, 1991)
	Radiação	Esquema desenvolvido por Edwards e Slingo (1996) e modificado por Cusack et al., (1999). Este esquema é dividido em 6 bandas de onda curta e 8 de onda longa
Condição de Contorno	Lateral	Método de relaxação Newtoniana (Davies and Turner, 1977)

2.3.2 Modelo Eta/CPTEC/CPTEC

O modelo regional Eta/CPTEC é proveniente do National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (Mesinger et al., 1988; Black, 1994). É um modelo em ponto de grade. Na horizontal é utilizada a grade E de Arakawa, e a coordenada vertical é a coordenada h (Mesinger, 1984), definida por:

$$h = \left[\frac{(p - p_t)}{(p_s - p_t)} \right] * \left[\frac{(p_{ref}(Z_s) - p_t)}{(p_{ref}(0) - p_t)} \right]$$

- onde p é a pressão atmosférica. Os índices S e T se referem à superfície e ao topo da atmosfera, respectivamente. O índice r se refere ao valor da pressão de uma atmosfera de referência; Z_s é a altitude da superfície. A topografia é resolvida na forma de degraus discretos. A coordenada se baseia em pressão, o que a torna aproximadamente horizontal. Esta característica da coordenada *Eta/CPTEC* reduz consideravelmente os problemas nos cálculos das derivadas horizontais próxima de região de montanha, comuns na coordenada *sigma*, e conseqüentemente os problemas relacionados com o termo importante da força do gradiente horizontal de pressão.

O topo do modelo está em 25 hPa. O esquema de integração é o particionamento explícito ('split-explicit'). Os termos de ajuste devido às ondas de gravidade são tratados pelo esquema 'forward-backward', e os termos de advecção pelo 'Euler-backward'. As variáveis prognósticas são: temperatura, umidade, vento horizontal, pressão à superfície, energia cinética turbulenta, umidade e temperatura do solo e hidrômetros das nuvens.

As parametrizações incluídas no modelo são: troca vertical turbulenta pelo esquema de Mellor-Yamada 2.5 (1982); radiação de onda longa, segundo o esquema de Lacis e Hansen (1974), e a radiação de onda curta pelo esquema de Fels e Schwarzkopf (1975); a água no solo segue o esquema de Chen; e as chuvas convectivas são produzidas pelo esquema Betts-Miller-Janjic (Janjic, 1994). O modelo possui também modelo de microfísica de nuvens. O domínio do modelo abrange a maior parte da

América do Sul. A temperatura da superfície do mar é atualizada a cada dia da integração.

Para utilizar os dados das simulações do modelo climático global HadCM3 para fazer a regionalização ("downscaling") para o domínio específico com a ajuda do modelo Eta/CPTEC, é necessária a preparação da "interface" que adapta os dados do Hadley Center de maneira adequada para a utilização destes como dados de entrada no modelo Eta/CPTEC/CPTEC.

O modelo Eta/CPTEC/CPTEC utiliza dados de entrada em formato GRIB em níveis isobáricos (padrão de reanálise e padrão do modelo americano AVN). Estes dados são vento zonal e meridional, altura da superfície isobárica, pressão à superfície e umidade específica.

2.3.3 Modelo RegCM3

A parte dinâmica do RegCM3 é a mesma do MM4 (Mesoscale Model version 4), e as principais modificações implementadas no MM4 para utilizá-lo no modo climático estão descritas em Giorgi et al 1993a-b. Basicamente, o RegCM3 é um modelo compressível, hidrostático, com coordenada vertical σ , e de área limitada em diferenças finitas. Para integração no tempo utiliza o esquema "split-explicit" e na presença de intensos gradientes topográficos inclui um esquema para reduzir a difusão horizontal (Giorgi et al., 1993a-b).

Os processos de interação solo-planta-atmosfera no RegCM3 são representados através do esquema BATS (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme; Dickinson et al.1993). Este esquema considera a presença de vegetação e a interação com o solo nas trocas turbulentas de momento, energia e vapor d'água entre a superfície e atmosfera. Atualmente, o BATS possui uma camada de vegetação, uma de neve, uma de solo de 10 cm de espessura, uma na zona de raiz, com 1-2 m de espessura, e uma terceira camada de 3 m de profundidade. Cada ponto de grade do modelo possui apenas uma classe de vegetação e solo, com a vegetação fornecida por arquivos globais. Os transportes turbulentos de calor, momento e umidade na camada limite planetária (CLP) resultam do produto entre o gradiente vertical destas variáveis e o coeficiente de difusão vertical turbulenta.

O esquema de transferência radiativa do RegCM3 é o mesmo do CCM3 (Community Climate Model 3; Kiehl et al., 1996). Este esquema calcula separadamente as taxas de aquecimento e fluxos na superfície de radiação solar e no infravermelho sob condições de céu claro e nublado. As contribuições dos gases CO₂, H₂O, O₃ e nuvens estão incluídas nos cálculos de transferência radiativa na banda do infravermelho. Os efeitos do CO₂, H₂O, O₃ e O₂ são considerados para a radiação solar.

Na região de fronteira, é aplicada uma relaxação entre a previsão do RegCM3 e os campos de fronteira (análises de observações ou previsões de modelos globais). Normalmente, as simulações com o RegCM3 utilizam relaxação exponencial, já que possibilita uma transição mais suave entre a previsão do modelo e os campos de fronteira, e isto têm impacto positivo na simulação como um todo (Giorgi et al., 1993b).

Para o tratamento da convecção em cúmulos profundos no RegCM3 é possível optar entre os esquemas convectivos de Kuo (Anthes 1977), Grell (Grell 1993) e Betts-Miller (Betts e Miller 1986). A precipitação na escala da grade segue Pal et al. (2000) onde a água de nuvem é a única fase considerada.

2.4 Incerteza dos cenários regionais de mudança climática

Incertezas em projeções regionais de clima são discutidas em detalhe no IPCC WG1 TAR (IPCC 2001a). O primeiro ponto é que toda técnica de regionalização ou “downscaling” contém erros derivados do modelo global que força o modelo regional, e ainda que isto não seja um erro na regionalização, precisa ser levado em conta. Técnicas diferentes de regionalização podem produzir diferentes previsões locais ainda que todas fossem forçadas pelo mesmo modelo global, e diferentes modelos regionais podem fornecer diferentes projeções climáticas.

Se as mudanças climáticas tiverem que ser somadas ao clima do presente para que seja possibilitar a geração de cenários de climas do futuro, então as incertezas vão ser importantes em cada um dos processos de integração. A Tabela 2 mostra as fontes de incerteza do modelo HadRM3.

Tabela 2: Formas de entender alguns dos problemas de incerteza na construção de cenários climáticos.

Fonte de incerteza	Representado no MRC	Como tratar incerteza
Emissões futuras	Sim	Utilizar modelos para uma variedade de cenários de emissão
Taxa de emissão à concentração	Não	Uso de modelos de ciclo de carbono e modelos de química atmosférica
Pouco entendimento/representação imperfeita de processos em modelos de clima (incerteza científica)	Em desenvolvimento	Uso de projeções de vários modelos globais de clima
Variabilidade natural do clima	Sim	Uso de conjunto ou “ensemble” de previsões de GCM com várias condições iniciais
Acrescentar detalhe espacial e temporal	Não	Usar outros modelos regionais de clima ou “downscaling” estatístico juntamente com o HadRM3.

Somente mais recentemente é que comparações entre modelos regionais de previsões climáticas começaram a ser analisadas, e um exemplo desta integração é o projeto PRUDENCE (Prediction of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change: risks and Effects) da comunidade Europeia (Christensen et al. 2002, Ambrosi et al. 2003). PRUDENCE vai fornecer séries climáticas de alta resolução para o período 2071-2100 para a Europa, caracterizando a variabilidade e o nível de confiança destes cenários climáticos como função da incerteza na formulação do modelo, variabilidade natural/interna do clima, e a escolha de cenários

climáticos com futuras concentrações de gases e aerossóis na atmosfera. O PRUDENCE fornece também avaliações quantitativas de risco associado a mudanças em padrões regionais de tempo e clima em diferentes partes da Europa.

O trabalho neste projeto segue na linha do PRUDENCE para o Brasil, usando dois modelos globais e 3 modelos regionais de clima. Mais informações sobre o PRUDENCE podem ser obtidas neste website: <http://prudence.dmi.dk/>. Nesta proposta também segue um pouco a discussão de como reduzir as incertezas mencionadas na Tabela 2.

Capítulo 3

Metodologia e implementação dos experimentos e rodadas para gerar cenários de clima futuro

3.1 O modelo global HadAM3P

Os dados do modelo atmosférico HadAM3P, do Hadley Centre, estão em formato PPP (formato binário). O CPTEC recebeu do Hadley Centre dados de aerossóis de sulfatos, densidade de água em nuvens (líquida e congelada)

e dados dos campos sinóticos em 19 níveis sigma-p híbridos: pressão à superfície (1º nível), vento zonal e meridional, temperatura potencial, umidade específica. A "interface" é composta por conjuntos de programas em linguagem Fortran, os quais lêem os dados do HadAM3P em formato PPP e fazem à interpolação e extrapolação de sigma-p híbrida para as coordenadas isobáricas e também fazem à transformação de temperatura potencial e umidade específica para altura geopotencial. Interpolações horizontais também serão feitas para os campos de vento. Os resultados desta manipulação serão escritos em formato binário. Para a leitura destes arquivos binários serão feitas algumas modificações em programas do modelo Eta/CPTEC/CPTEC e do RegCM3.

As condições de contorno do modelo HadAM3P estão disponíveis para 4 integrações de 31 anos cada uma. Este modelo tem uma resolução de 150 km é a versão atmosférica do modelo do Hadley Centre. Três destas integrações fornecem o conjunto ou ensemble de 3 diferentes simulações de clima de 2070-2100 para o cenário A2 e de uma realização para o cenário B2. As TSMs que forçam o modelo são derivadas dos campos de TSM e gelo do modelo acoplado HadCM3 (usando as mesmos cenários de emissão para o modelo HadAM3P) e com os campos observados de HadISST de 1961-90. Para este período a evolução estimada da concentração de gases de efeito estufa e de enxofre é especificada e sua evolução e impacto na composição atmosférica são simulados com no modelo do ciclo do enxofre do HadAM3P.

3.2 Estratégia do downscaling dinâmico

O esquema abaixo ilustra a sistemática a ser utilizada nesta proposta (Fig. 1). As diferenças entre os 3 modelos regionais já servirão como uma estimativa das incertezas dos cenários climáticos do futuro. Anomalias da correlação foram calculadas para algumas regiões do Brasil para o clima do presente, com o intuito de detectar áreas onde os modelos tem um sinal consistente, o que sugeriria um grau de confiança das projeções de clima do futuro.

A mesma figura mostra a suíte operacional de modelos regionais (RegCM3, HadRM3 e Eta/CPTEC/CPTEC) que serão utilizados com as condições do modelo global HadAM3P. Aqueles modelos regionais que apresentarem bom desempenho na simulação do clima atual serão utilizados para as projeções regionalizadas de clima futuro. A saída dos diferentes modelos regionais será combinada numa única saída usando a técnica de “ensemble”, implementando uma climatologia atual de 1961-90 e as climatologias sazonais para os cenários A2 e B2 no período 2071-2100. Mapas de anomalias da chuva e temperatura do ar a nível mensal, sazonal e anual foram implementados para toda a América do Sul.

Os domínios espaciais a serem utilizados nas simulações com os modelos numéricos regionais foram os seguintes, respeitando a condição do Edital que as fronteiras norte, sul, leste e oeste dos modelos estejam a pelo menos 1.000 km das fronteiras do Brasil.

Modelo	Domínio Espacial
Eta/CPTEC/CPTEC	15N-50S; 25W-90W
Reg CM3	15N-50S; 25W-90W
HadRM3	15N-50S; 25W-90W

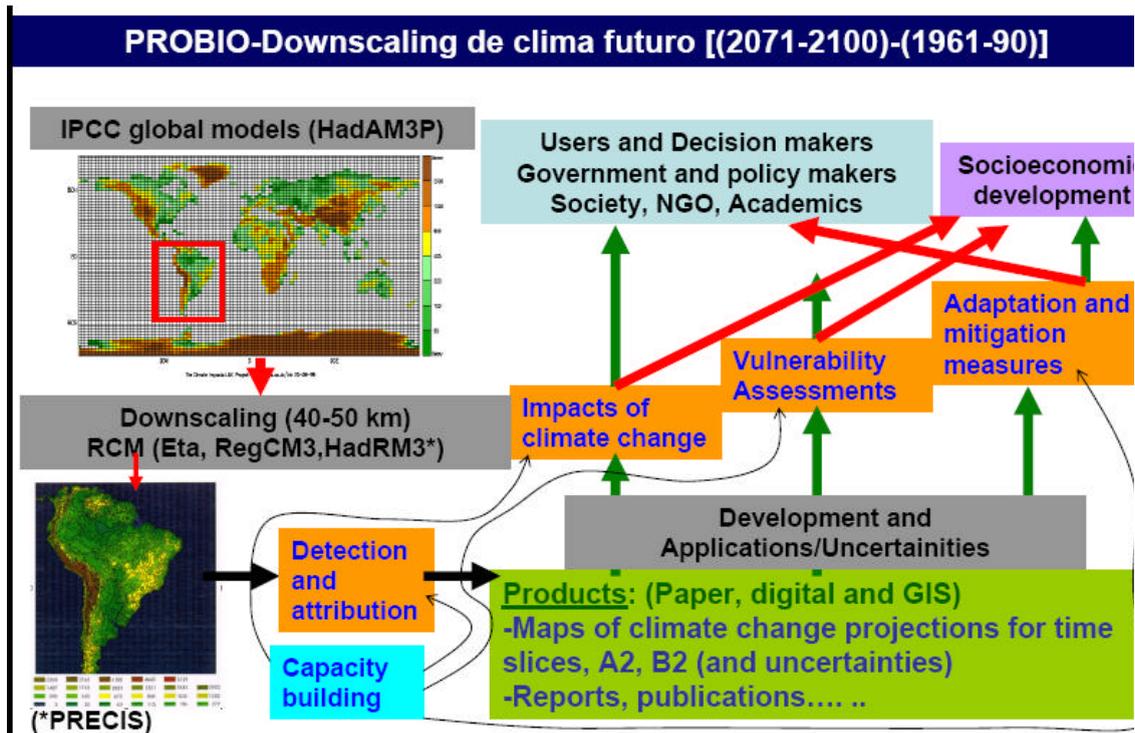


Figura 1. Esquema operacional de modelos globais e regionalização (“downscaling”) usando os modelos de IPCC e os modelos regionais Eta/CPTEC/CPTEC, RegCM3 e HadRM3.

3.3 Concentração de gases de efeito estufa e sua variabilidade considerada nos 3 modelos regionais para projeções de clima futuro

Para o clima do presente, o modelo atmosférico HadAM3P, a concentração de gases de efeito estufa e de enxofre são prescritos, e suas evoluções e impactos no ciclo de enxofre são simulados com o ciclo de enxofre do modelo HadAM3P e do HadRM3P, e as emissões detectadas fora do domínio do modelo regional são tomadas em conta como forçantes do HadRM3P. Para os cenários futuros A2 e B2, e evolução da concentração de gases de efeito estufa e enxofre é a mesma do modelo HadCM3 (Wilson et al 2005).

No modelo RegCM3 a concentração de gases de efeito estufa (CO₂, CH₄, NO₂) e de CFC-11 e 12 foi prescrita cada 10 anos, desde 1960 até 2100, e os dados de concentração de gases de efeito estufa foram entrados manualmente e interpolados linearmente. Os dados de CFC-11 e 12 foram

também entrados manualmente mais só entre 1990 até 2100. Os valores entrados aparecem nas Tabelas 1a e 1b do artigo de Pope et al (2000).

No caso do modelo Eta/CPTEC/CPTEC, a concentração de CO₂ usada para o clima do presente 1961-90 e do futuro 2071-2100 foi a mesma, de 330 ppm (Pisnitchenko et al. 2006, Fernandez et al. 2006 a, b). Na versão do Eta/CPTEC/CPTEC usado neste projeto tem os valores de gases de efeito estufa sem o ciclo de enxofre usado pelo modelo global do CPTEC (Cavalcanti et al. 2002, Marengo et al. 2003) e permanecem constantes até 2100.

3.4 Produtos a serem gerados (projeções climáticas anuais e sazonais dos modelos regionais).

Os produtos gerados pelo projeto são:

- Mapas com as projeções de cenários de climas futuros para o Brasil (médias sazonais e anuais de temperatura do ar à superfície e precipitação pluviométrica) a partir dos resultados dos três modelos regionais, para o período de 2071-2100 em relação a 1960-1990, para dois cenários de emissão (B2, baixas emissões, e A2, altas emissões), na escala para a qual estas projeções estiverem disponíveis;
- Relatório técnico contendo descrição das modificações efetuadas nos modelos climáticos regionais individuais Eta/CPTEC/CPTEC, RegCM3, HadRM3 para permitir que sejam utilizados para regionalização (“downscaling”) de cenários climáticos fornecidos por modelo climático global HadAM3P;
- Elaboração de mapas com as projeções de cenários de climas futuros regionalizados para o Brasil (pelo menos médias sazonais e anuais de temperatura do ar à superfície, precipitação pluviométrica, evapotranspiração e balanço hídrico) a partir dos resultados dos modelos climáticos regionais integrados estatisticamente em modo de “multimodel ensemble” implementados utilizando-se condições de contorno provenientes de pelo menos um modelo climático global aceito pelo IPCC, em particular o HadCM3, para dois cenários de emissão (A2 e B2). O “multimodel ensemble”

será utilizado caso os três modelos regionais tenham desempenho satisfatório em representar o clima atual. Se apenas um modelo regional atingir tal condição, os cenários climáticos futuros regionalizados para o Brasil serão fornecidos para este modelo. A regionalização será apresentada para escala de 0,5° latitude x 0,5° longitude;

- Os resultados de cenários serão lançados em mapas na escala 1:1.000.000 para o Brasil;

- Para a Amazônia, Mata Atlântica, Cerrado e Pantanal, mapas regionalizados dos cenários climáticos futuros para cada uma delas são apresentados na escala 1:500.000;

As variáveis a serem disponibilizadas (via CD e pelo web site do projeto em atual desenvolvimento) serão as médias mensais de:

Precipitação

Temperatura Média - Máxima - Mínima

Fluxo de Calor Latente

Fluxo de Calor Sensível

Pressão ao Nível Médio do Mar

Altura Geopotencial

Umidade Específica

Runoff (escoamento superficial)

Componentes U e V

OLR (Radiação de onda longa)

Valores diários também estão disponíveis, mas devido ao alto volume de dados poderão ser distribuídos para quem solicitar mediante um pedido feito via Internet, através do website do projeto.

Capítulo 4

Resultados das simulações numéricas

4.1 Validação do clima atual gerado pelos três modelos regionais

Antes de iniciar a discussão dos resultados obtidos com as integrações dos modelos regionais sobre a América do Sul para o clima futuro, onde cenários de concentração extrema de CO₂ foram assumidos, é importante descrever como os modelos simulam o clima presente a fim melhor analisarmos seu desempenho para o clima do futuro. Nesta seção e nas próximas, estaremos sempre apresentando os resultados de simulações sazonais (verão, outono, primavera e inverno) para os três modelos regionais e discutindo as variáveis de precipitação e temperatura. Conforme descrito na metodologia, o período padrão da integração foi de 1961 a 1990 e os resultados de cada modelo serão mostrados na seguinte ordem: HadRM3P (topo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC/CPTEC (inferior).

Antes de analisarmos o viés das integrações, é importante discutirmos se os modelos estão de forma geral representando as características climáticas da América do Sul em cada estação do ano. A Fig.2 a seguir mostra a climatologia sazonal da precipitação (coluna da esquerda) e temperatura do ar (coluna da direita) para os três modelos regionais. A Fig.2a, que simula o verão, de forma geral, captura tanto o padrão de precipitação como de temperatura para esta estação. No entanto, algumas diferenças também são observadas entre os três modelos. Por exemplo, a distribuição de chuvas ao longo da posição climatológica da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que se estende do noroeste da Amazônia até do sudeste do Brasil (p.ex., Souza e Ambrizzi 2003), parece ser mais bem representada pelo HadRM3P que nos outros dois modelos, onde o RegCM3 concentra mais chuva no noroeste da Amazônia e menos no sudeste e o ETA/CPTEC/CPTEC tem um comportamento inverso. Por outro lado, é visível que HadRM3P superestima a precipitação ao longo dos Andes, o que é menos acentuado nos outros dois modelos. Outro ponto a ser notado

é na região do nordeste brasileiro, onde o ETA/CPTEC/CPTEC e o RegCM3 colocam ausência de chuvas e o HadRM3P mostra valores em torno de 4 mm/dia nesta região. O resultado dos dois primeiros modelos está mais próximo da climatologia, pois a estação chuvosa inicia-se somente no outono, ou seja, Março-Abril-Maio no Nordeste. Em termos de temperatura, a maior parte do continente sul americano apresenta temperaturas médias acima de 22°C, onde algumas regiões mostram médias superiores a 26 C, como por exemplo, a área da Bacia do Prata e norte e nordeste brasileiro. Apesar da grande similaridade entre as simulações dos três modelos, nota-se que o RegCM3 tende a ser ligeiramente mais frio na região da Amazônia, em comparação aos outros dois.

No outono (Fig.2b), como características climáticas, a banda de precipitação na região da ZCAS começa a recuar para a o noroeste da Amazônia e ocorre a estação chuvosa sobre o norte e nordeste do Brasil. Os três modelos de forma geral conseguem capturar esta variabilidade, embora o ETA/CPTEC/CPTEC mostra-se muito mais seco tanto no Brasil central como no nordeste brasileiro em comparação com os outros dois modelos. Em particular, o RegCM3 apresenta mais chuva que o HadRM3P em toda a parte central, norte e nordeste do Brasil e menos no noroeste da Amazônia. No campo da temperatura, já é possível observar regiões mais frias avançando pelo sul do continente (média em torno de 14 °C), e temperaturas médias em torno de 20 °C, onde o RegCM3 mostra médias mais frias e o ETA/CPTEC/CPTEC valores maiores.

Os três modelos tiveram um comportamento muito similar durante o inverno (Fig.2c). Características como ausência de precipitação na parte central e sudeste do Brasil, chuvas no sul e ao longo da costa nordeste brasileira, um padrão climatológico observado nesta época do ano e que está associado com a intensificação da alta subtropical do Atlântico e propagação de ondas de leste na região foram bem simulados pelos modelos. Os máximos de chuva sobre a Venezuela e Colômbia que em geral ocorrem neste período do ano também está presente nas simulações. Concordância no campo de temperatura também é visível entre os três modelos. O avanço de baixas temperaturas vindas do sul e as temperaturas maiores na parte norte do Brasil são bem próximas da climatologia para esta estação.

A estação da primavera (Fig. 2d) por constituir-se uma estação de transição entre o inverno e o verão, e onde as monções sul-americanas começam a se desenvolver faz com que, em geral, os modelos tenham mais dificuldades em simular adequadamente várias de suas características climatológicas. Apesar dos três modelos terem corretamente simulado a ausência de chuva na região nordeste do Brasil, o RegCM3 expandiu a área seca por parte do sudeste e centro-oeste. Em contrapartida, o ETA/CPTEC/CPTEC secou grande parte do norte da América do Sul. Em relação aos modelos, somente o HadRM3P parece simular mais corretamente a expansão da banda de precipitação do noroeste para o sudeste do Brasil, bem como os máximos de chuva no sul, que é uma característica climatológica na região neste período. Em relação ao campo de temperatura, a concordância entre os modelos é maior, embora o RegCM3 continue apresentando temperaturas mais baixas que os outros dois em particular na parte subtropical-sul do continente. Novamente aqui, o ETA/CPTEC/CPTEC mostra-se mais quente que o HadRM3P (temperatura média acima de 26 °C), embora ambos tenham um padrão similar.

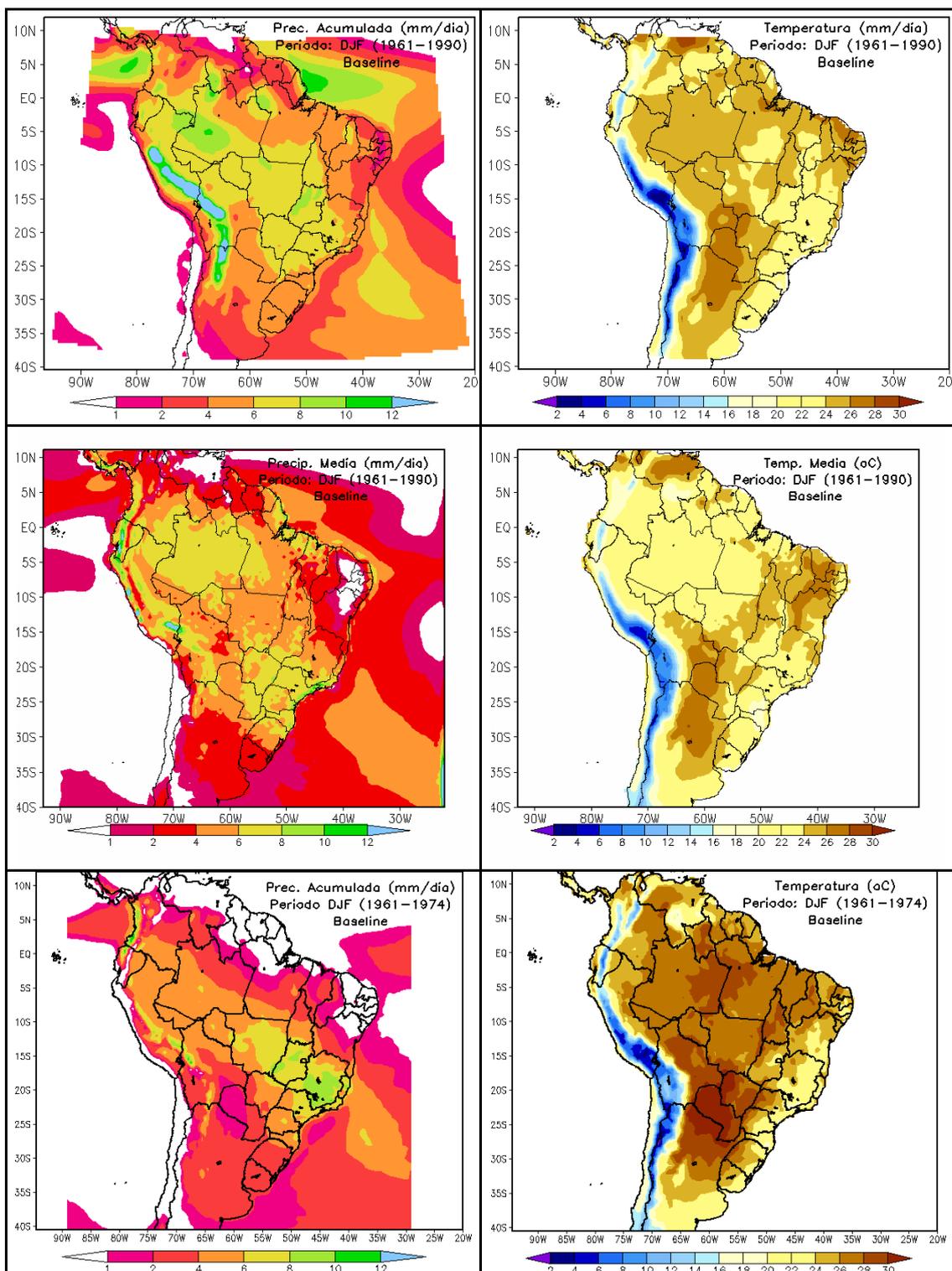


FIGURA 2a: Climatologia do verão (DJF) da precipitação (mm/dia) – coluna esquerda – e de Temperatura do ar (°C) – coluna direita – para o período base 1961-1990 simulados pelos modelos HadRM3P (topo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC/CPTEC (inferior). A escala de cores encontra-se abaixo das figuras.

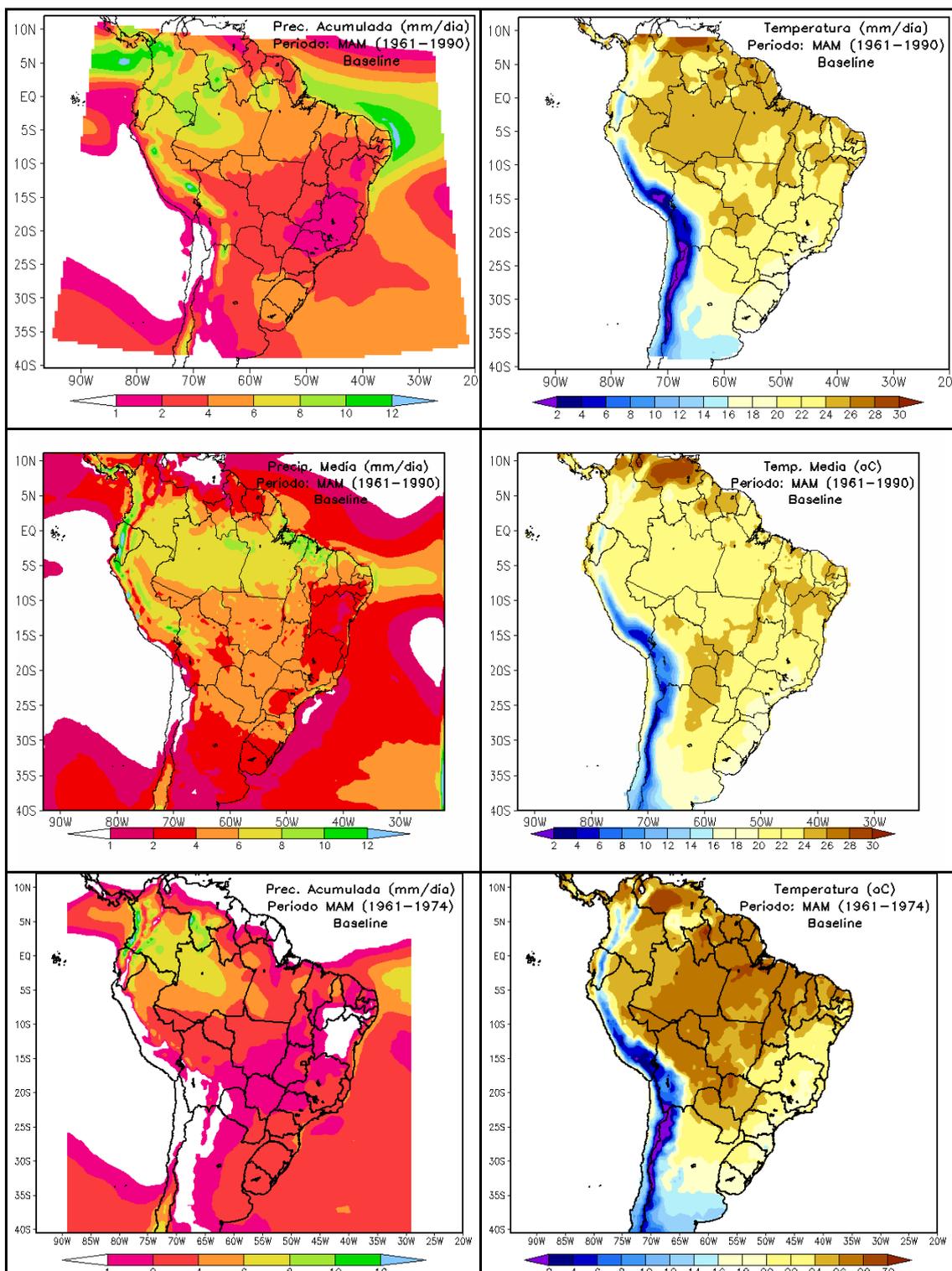


FIGURA 2b: Climatologia do outono (MAM) da precipitação (mm/dia) – coluna esquerda – e de Temperatura do ar (°C) – coluna direita – para o período base 1961-1990 simulados pelos modelos HadRM3P (topo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC/CPTEC (inferior). A escala de cores encontra-se abaixo das figuras.

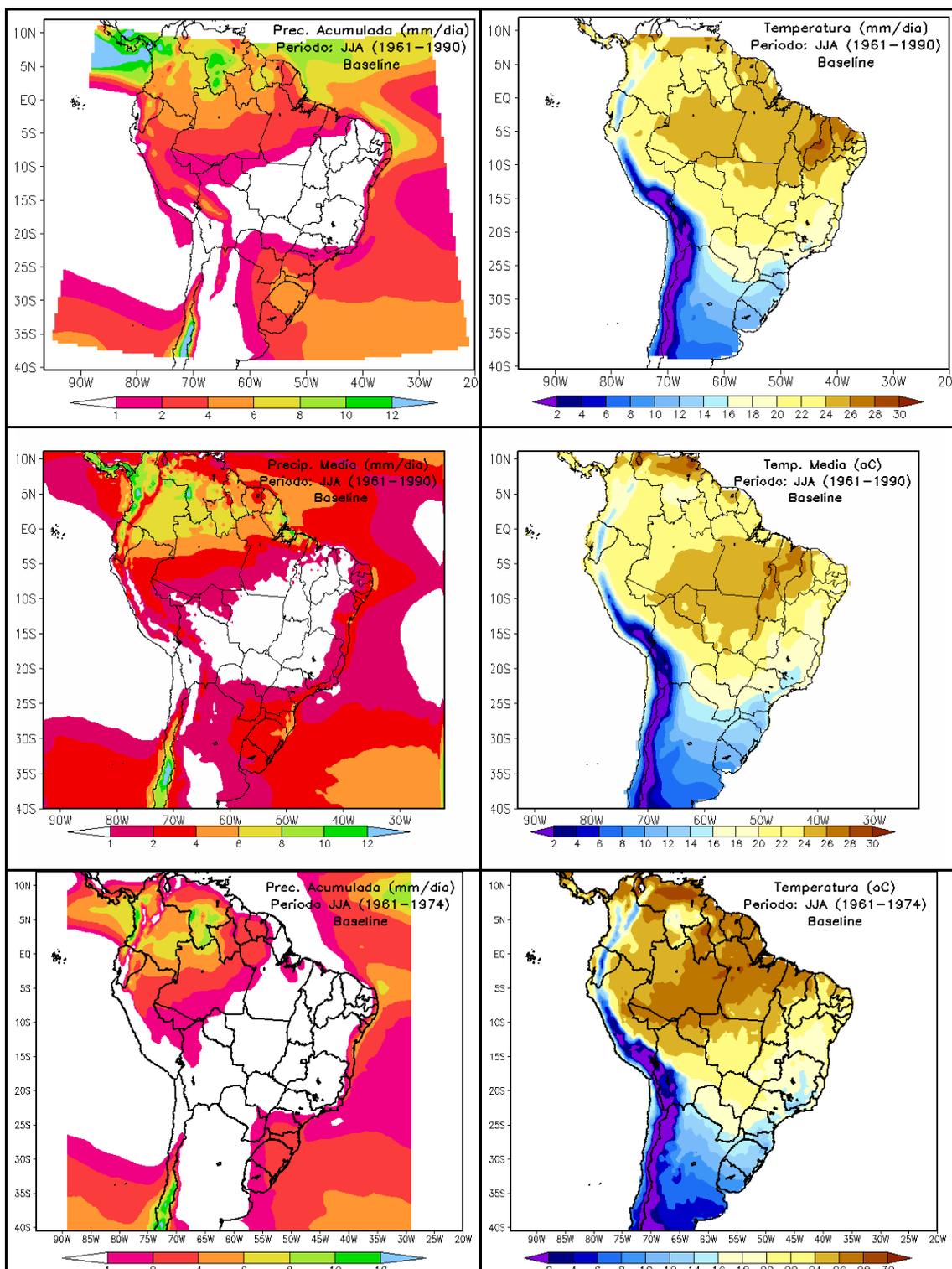


FIGURA 2c: Climatologia do inverno (JJA) da precipitação (mm/dia) – coluna esquerda – e de Temperatura do ar (°C) – coluna direita – para o período base 1961-1990 simulados pelos modelos HadRM3P (topo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC/CPTEC (inferior). A escala de cores encontra-se abaixo das figuras.

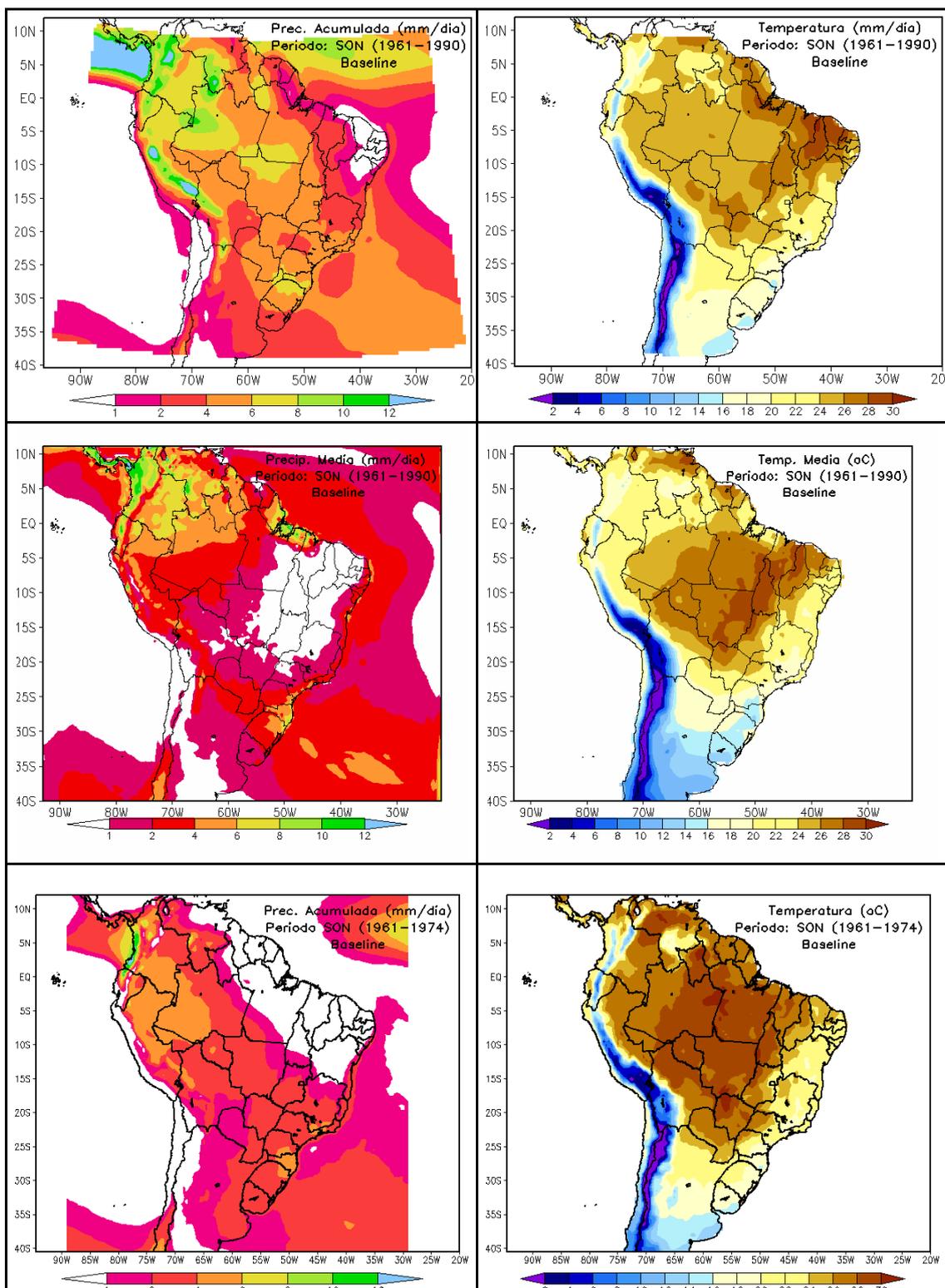


FIGURA 2d: Climatologia da primavera (SON) da precipitação (mm/dia) – coluna esquerda – e de Temperatura do ar (°C) – coluna direita – para o período base 1961-1990 simulados pelos modelos HadRM3P (topo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC/CPTEC (inferior). A escala de cores encontra-se abaixo das figuras.

Vimos na discussão acima que os modelos de forma geral conseguem simular os padrões climatológicos característicos de cada estação do ano, apesar de algumas diferenças encontradas entre eles. Uma forma de enfatizar estas diferenças e saber o quanto e onde elas existem, é através do cálculo do viés, obtidos através da diferença entre o simulado pelo modelo regional e o campo médio do modelo global. A Fig.3 a seguir mostra o viés da precipitação e temperatura do ar para as quatro estações do ano simuladas pelos três modelos regionais durante o período base 1961-1990. A estrutura da Figura é similar ao mostrado na Fig.2.

No verão (Fig.3a), vemos que os desvios do HadRM3P e do RegCM3 são muito similares, embora o último seja um pouco mais seco na região da ZCAS e apresente anomalias positivas de chuva na região costeira norte do Brasil. O ETA/CPTEC/CPTEC de forma geral apresentou desvios negativos em quase toda a América do Sul, embora em parte do sudeste do Brasil, tenha mostrado valores positivos. O padrão de temperatura também é muito similar, entre o HadRM3P e o RegCM3, com desvios negativos em grande parte do continente, com exceção do Uruguai e parte nordeste da Argentina. Em sentido oposto, o ETA/CPTEC/CPTEC mostrou valores positivos de temperatura na parte central da América do Sul e valores negativos nas costas leste e oeste do continente. O Paraguai destaca-se com valores positivos acima de 3°C neste modelo. De forma geral, os modelos tendem a subestimar as chuvas sobre a região da ZCAS e superestimar ao sul da mesma durante o verão. Este resultado deverá ser levado em consideração durante as análises dos cenários climáticas futuros apresentados mais adiante neste relatório.

No outono (Fig.3b) o HadRM3P e o RegCM3 continuam apresentando padrões de desvio similares, subestimando a precipitação em grande parte do Brasil e particularmente no norte do continente. Interessante notar que a exceção do ETA/CPTEC/CPTEC que apresenta desvios negativos de chuva em praticamente toda a América do Sul, os outros dois modelos simularam bem a estação chuvosa no nordeste, onde não se observam desvios significativos. No campo de temperatura, desvios negativos em praticamente todo o continente sul americano são observados nos modelos HadRM3P e RegCM3, sendo mais intensos neste último. Com exceção de parte do

sudeste e costa leste do nordeste, que apresentaram desvios negativos de temperatura, além da costa oeste da América do Sul, o ETA/CPTEC/CPTEC não mostra um viés significativo no resto do continente.

Os padrões de precipitação e temperatura durante o inverno (Fig.3c) são semelhantes entre os três modelos, destacando-se inclusive que todos eles apresentaram desvios negativos de precipitação ao longo da costa do nordeste brasileiro, subestimando assim as chuvas climatológicas observadas nesta região durante esta estação. Novamente aqui, o RegCM3 e o HadRM3P mostram desvios negativos de temperatura mais acentuados do que o ETA/CPTEC/CPTEC, em particular sobre a região Amazônica.

Ao contrário do que foi observado no inverno (Fig.3c) os desvios mostrados para a temperatura e principalmente na precipitação pelos três modelos são relativamente diferentes na primavera (Fig.3d). O HadRM3P apresenta desvios positivos de chuva em várias regiões da América do Sul, com valores mais altos em grande parte da costa oeste do continente. O RegCM3 mostra-se mais seco na parte central e sul do Brasil, Venezuela, Colômbia e noroeste da Amazônia, enquanto o ETA/CPTEC/CPTEC apresenta viés negativo em praticamente todo o continente. No campo de temperatura é interessante notar que o RegCM3 e o ETA/CPTEC/CPTEC mostram padrões de desvios similares neste caso, tendo valores negativos na parte oeste do continente e região nordeste do Brasil, e viés positivo na região mais central da América do Sul, embora o ETA/CPTEC/CPTEC na região norte do Brasil é mais quente que o RegCM3, que mostra valores negativos similares aos obtidos com o HadRM3P.

Sendo assim, tendo uma visão geral do comportamento dos modelos regionais na simulação de sistemas climatológicos ao longo das quatro estações do ano, bem como os desvios em relação à simulação do modelo global, vamos analisar a seguir os cenários futuros do clima quando concentrações extremas de CO₂ são consideradas nas simulações do modelo global.

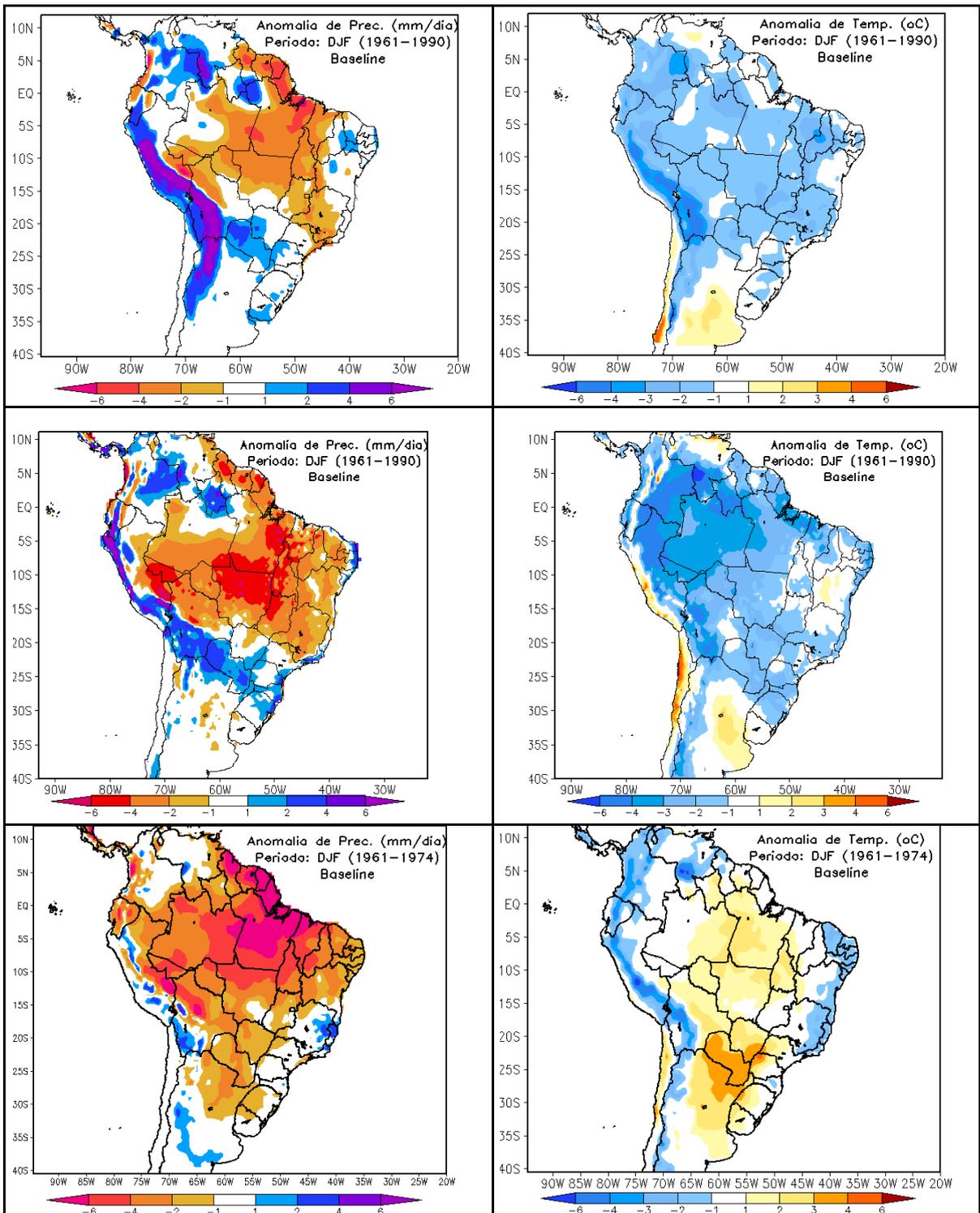


FIGURA 3a: Viés da precipitação (mm/dia) para verão (DJF) – coluna da esquerda – e da Temperatura do ar (°C) – coluna da direita – para as quatro estações do ano simulado dentro do período base 1961-1990 pelos modelos PRECIS (topo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC/CPTEC (inferior).

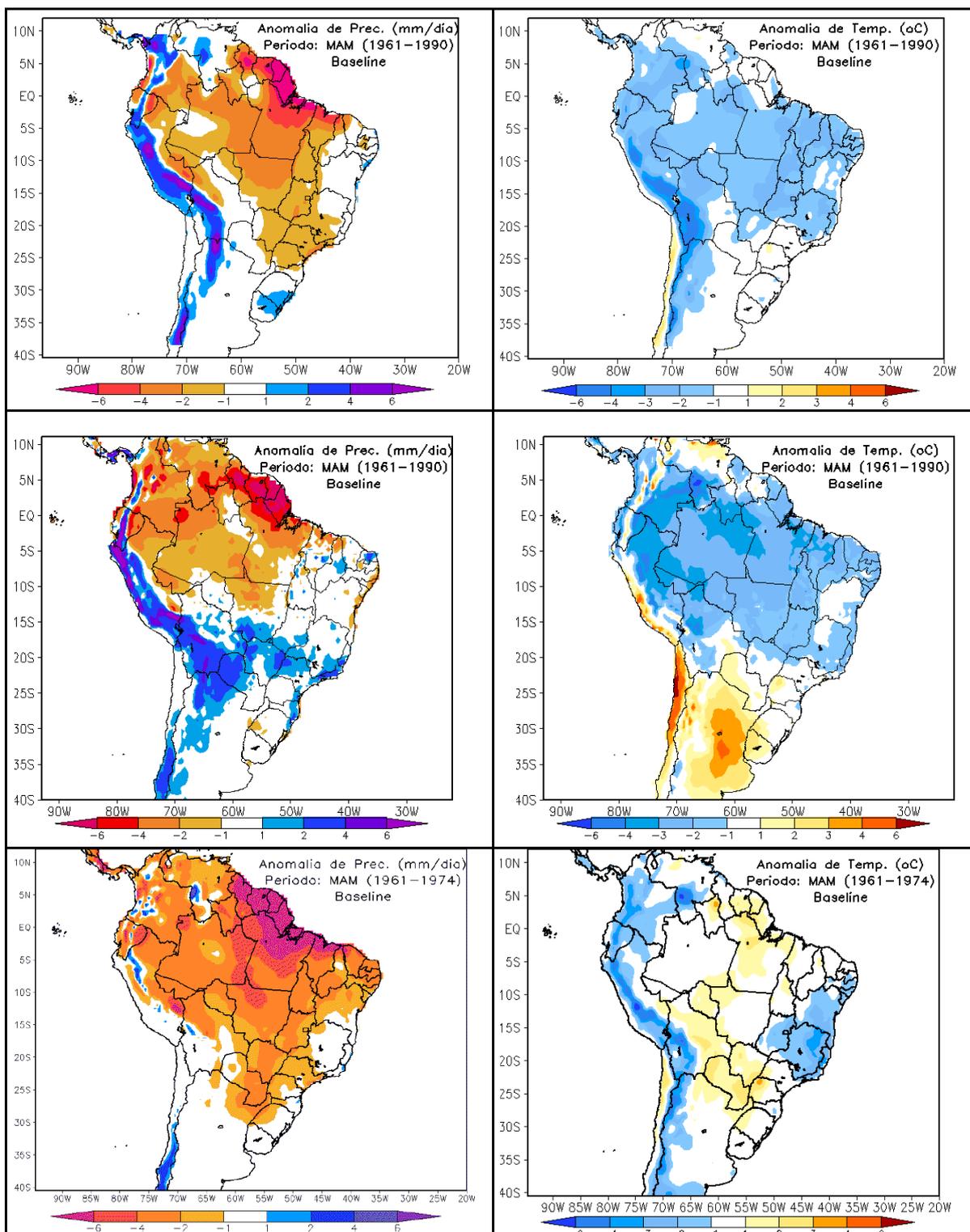


FIGURA 3b: Viés da precipitação (mm/dia) para outono (MMA) – coluna da esquerda – e da Temperatura do ar (°C) – coluna da direita – para as quatro estações do ano simulado dentro do período base 1961-1990 pelos modelos PRECIS (topo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC/CPTEC (inferior).

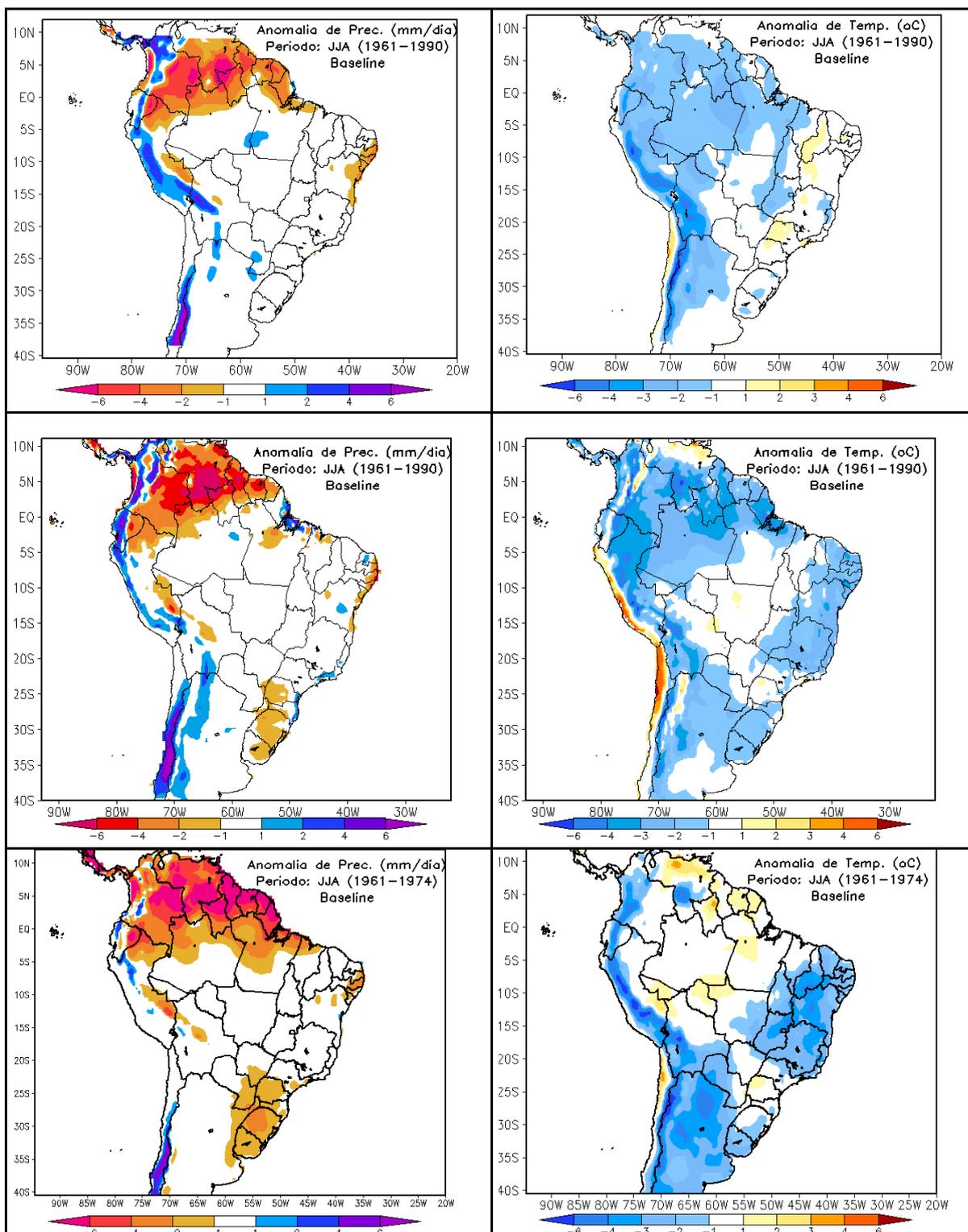


FIGURA 3c: Viés da precipitação (mm/dia) para inverno (JJA) – coluna da esquerda – e da Temperatura do ar (°C) – coluna da direita – para as quatro estações do ano simulado dentro do período base 1961-1990 pelos modelos PRECIS (topo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC/CPTEC (inferior).

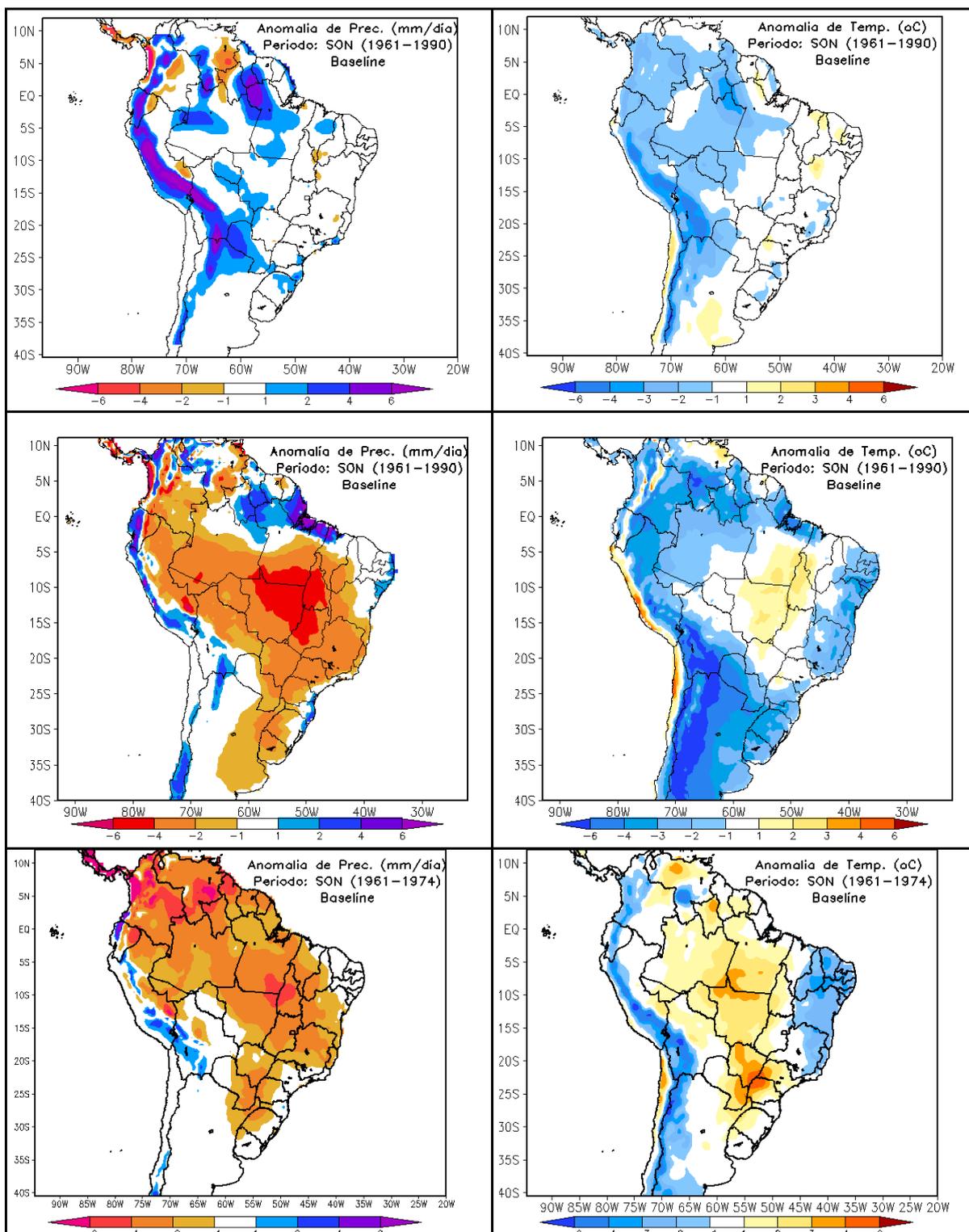


FIGURA 3d: Viés da precipitação (mm/dia) para primavera (SON) – coluna da esquerda – e da Temperatura do ar (°C) – coluna da direita – para as quatro estações do ano simulado dentro do período base 1961-1990 pelos modelos PRECIS (topo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC/CPTEC (inferior).

4.2 Simulações sazonais para os cenários futuros do clima

4.2.1 Simulações com o modelo global

As simulações sazonais para os cenários A2 e B2 no período 2071-2100 serão analisadas neste item através de mapas de anomalias da chuva e temperatura do ar. Antes de discutirmos os resultados obtidos das simulações com os modelos regionais, é interessante analisarmos de forma breve como o modelo global HadAM3P projeta o clima do futuro, tendo em vista que os dados deste modelo serviram de condição de contorno para o HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC/CPTEC conforme vimos anteriormente. Conhecendo-se os padrões gerados pelo modelo global, é possível detectar as diferenças dos mesmos em relação aos resultados gerados pelos modelos regionais.

A Fig.4 mostra as anomalias sazonais dos dados simulados pelo HadCM3 para os cenários futuros de emissão B2 e A2 para as variáveis precipitação e temperatura. Estas anomalias foram calculadas removendo-se o campo base (1961-1990) simulado para o clima presente.

Os campos de precipitação e temperatura simulados para os cenários A2 e B2 durante o verão (Fig.4a) mostram padrões muito similares, embora o primeiro mostre-se mais intenso, como seria esperado. Anomalias negativas de precipitação são observadas em toda a parte norte do Brasil, enquanto no sudeste e algumas porções do sul, vê-se anomalias positivas entre 2 e 4 mm/dia. O campo de temperatura mostra anomalias positivas em toda a América do Sul, com valores mais altos, entre 4 e 6°C na região Amazônica e partes da Colômbia e Venezuela, particularmente para o campo A2. Estes resultados apontam para um quadro de monção sul-americana mais seca e quente, tendo uma ZCAS mais intensa e deslocada para o sul de sua posição climatológica.

O outono (Fig.4b) apresenta padrões similares aos do verão (Fig.4a), porém com intensidades muito mais reduzidas tanto na precipitação como na temperatura. O lado leste da Amazônia e norte do nordeste brasileiro continuam apresentando anomalias negativas de chuva em ambos os cenários de emissões, embora para os resultados com A2, ainda se

observam anomalias positivas sobre Goiás e Mato Grosso do Norte. No lado norte dos estados do Amazonas e Pará e região do semi-árido nordestino apresentam temperaturas superiores a 6°C no cenário mais forte e a América do Sul como um todo continua com anomalias positivas tendo valores acima de 2°C.

Durante o inverno (Fig.4c), somente a parte norte da América do Sul mostra desvios negativos significativos de precipitação tanto para o cenário A2 como para o B2. No entanto, em termos de anomalias positivas de temperatura, uma grande região encobrindo todo o norte e parte do centro oeste do Brasil e parte das regiões do Peru, Colômbia e Bolívia apresentam valores superiores a 6°C para o mapa A2. A mesma área, mas com valores menores (em torno de 4°C) é observada no mapa B2.

Praticamente não se observa diferença significativa entre os mapas A2 e B2 de precipitação no período da primavera (Fig.4d). Em particular, a região de início das monções, ou seja, no noroeste da Amazônia, vemos desvios negativos da ordem de 2 a 4 mm/dia. No entanto, padrões bem diferentes são vistos no campo de temperatura entre os dois cenários de emissões. Valores intensos de anomalias positivas são observados em grande parte do Brasil e países vizinhos no mapa A2. Através destes resultados especula-se que num clima futuro com intensa concentração de gases de efeito estufa e, portanto um aquecimento global, o início e a qualidade da estação chuvosa poderiam ser prejudicados. A seguir, vamos analisar se os modelos regionais, que possuem uma melhor resolução e detalhamento físico podem corroborar ou não com esta hipótese.

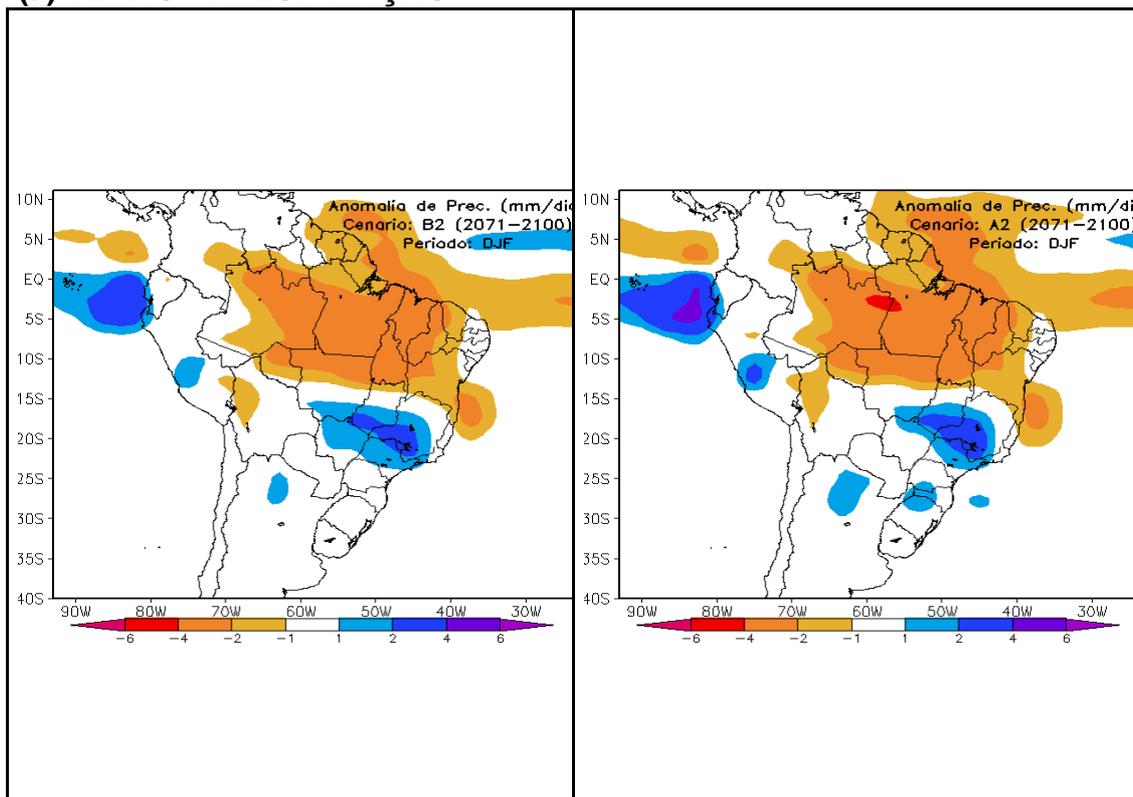
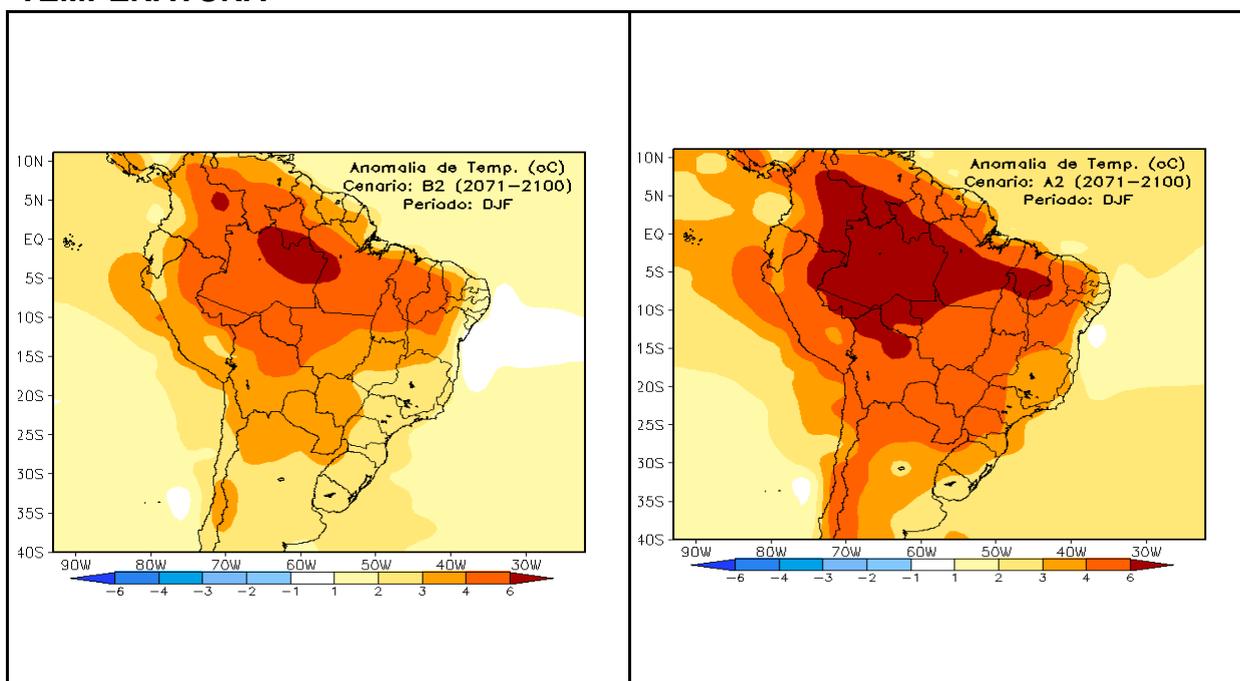
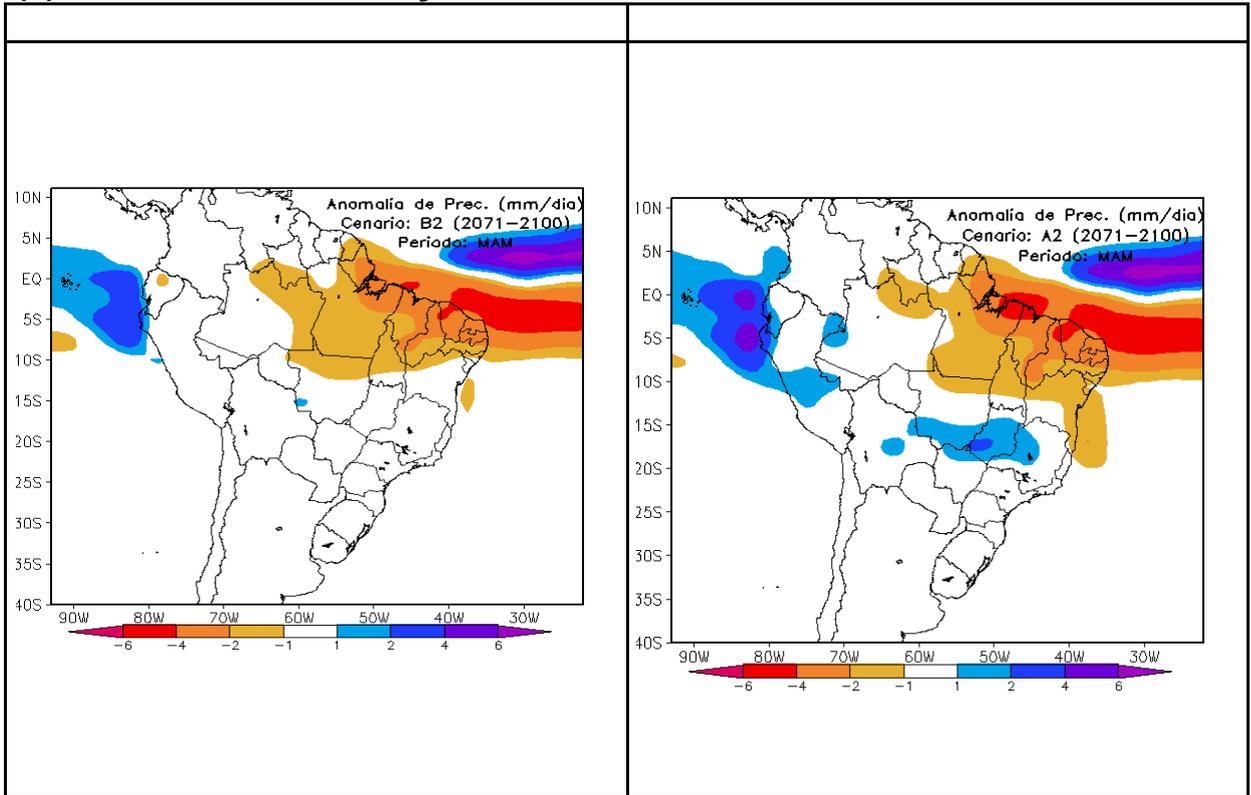
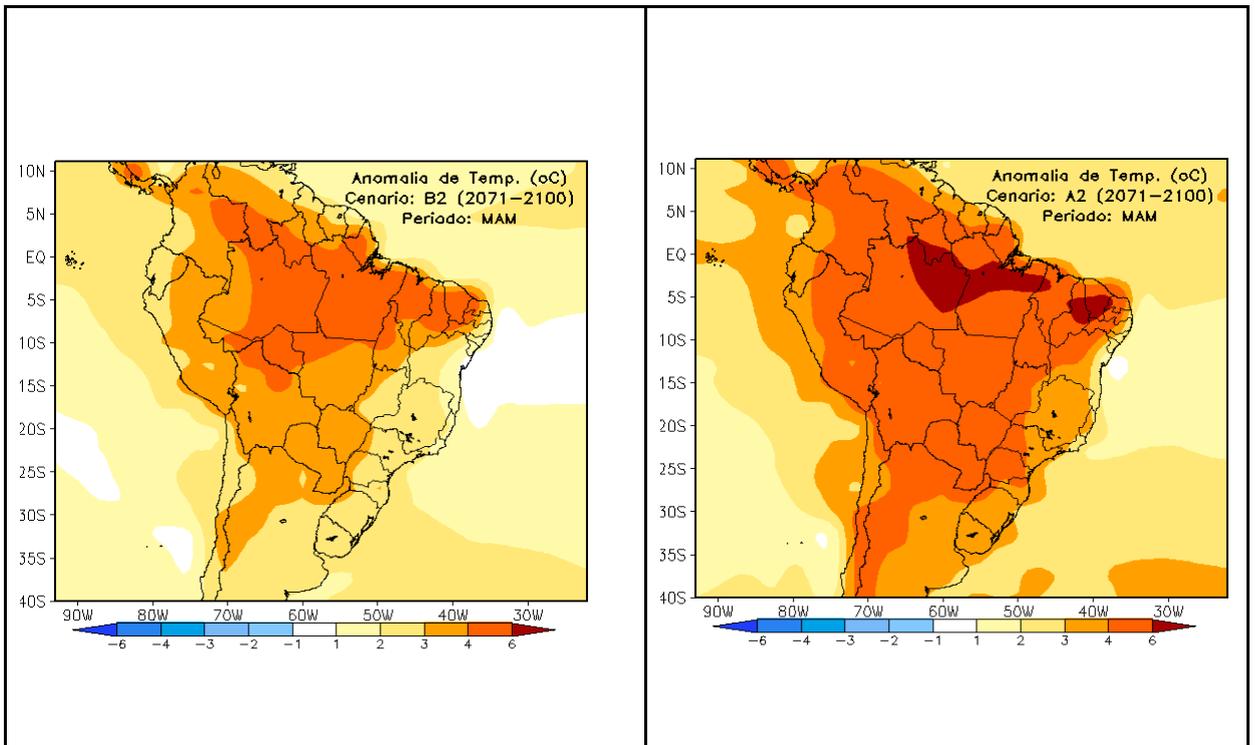
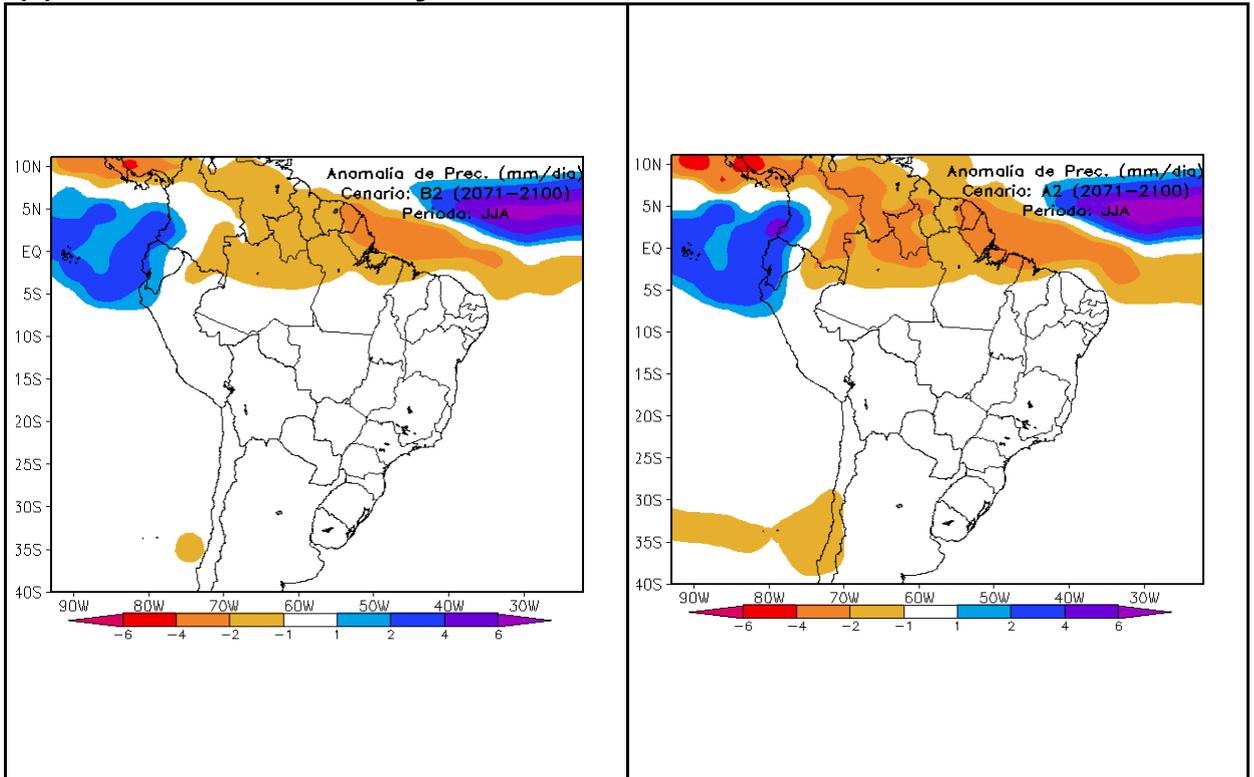
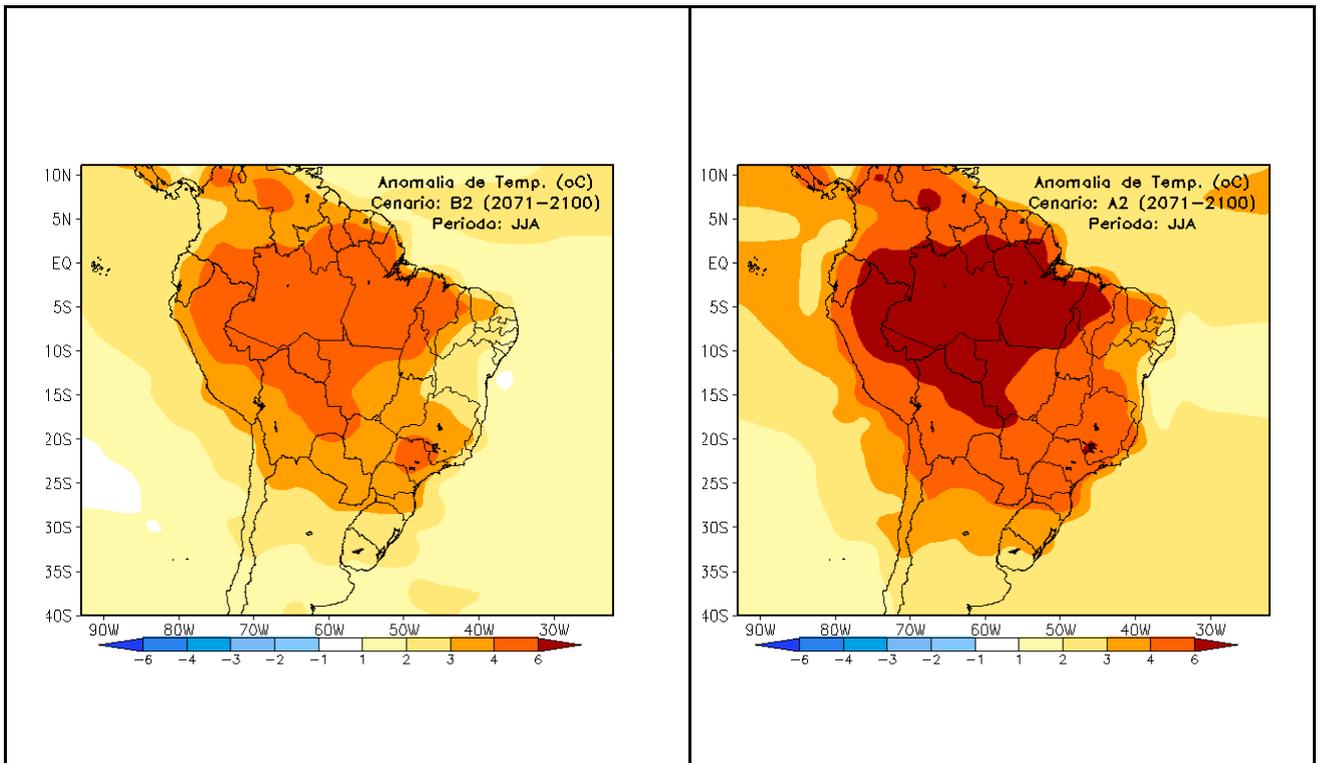
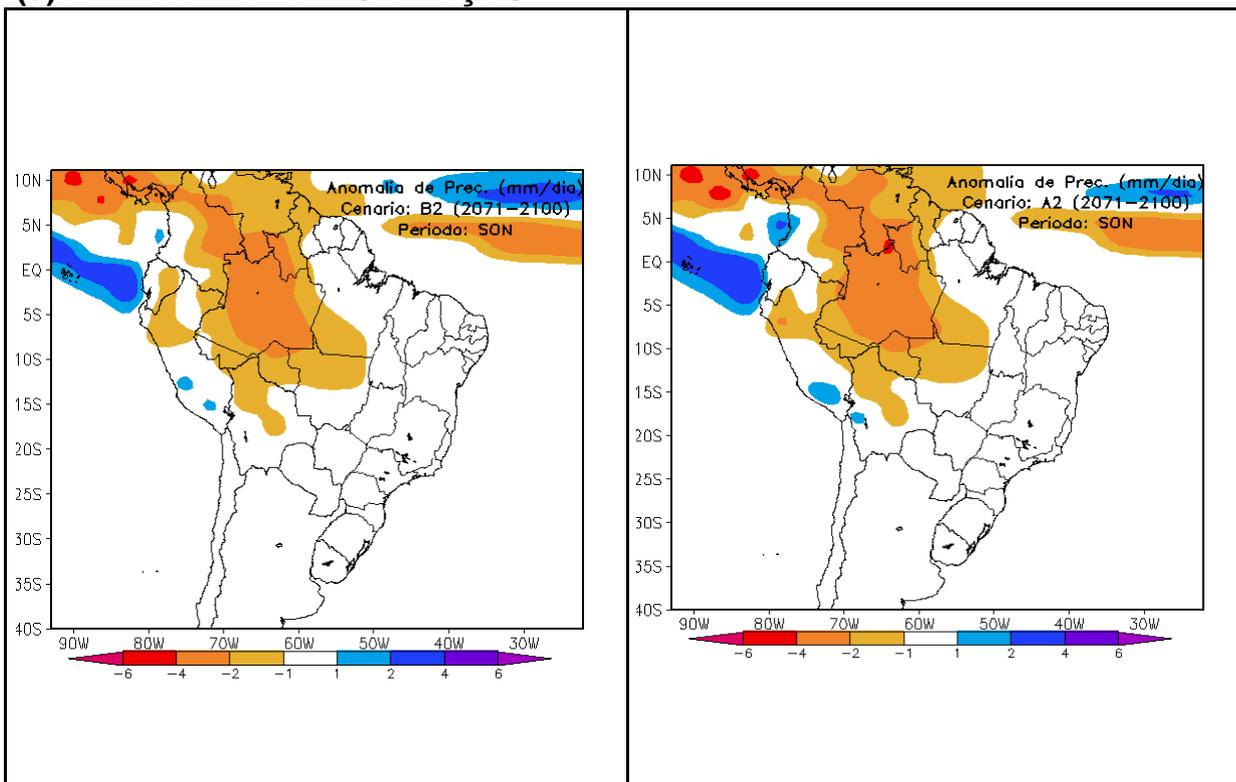
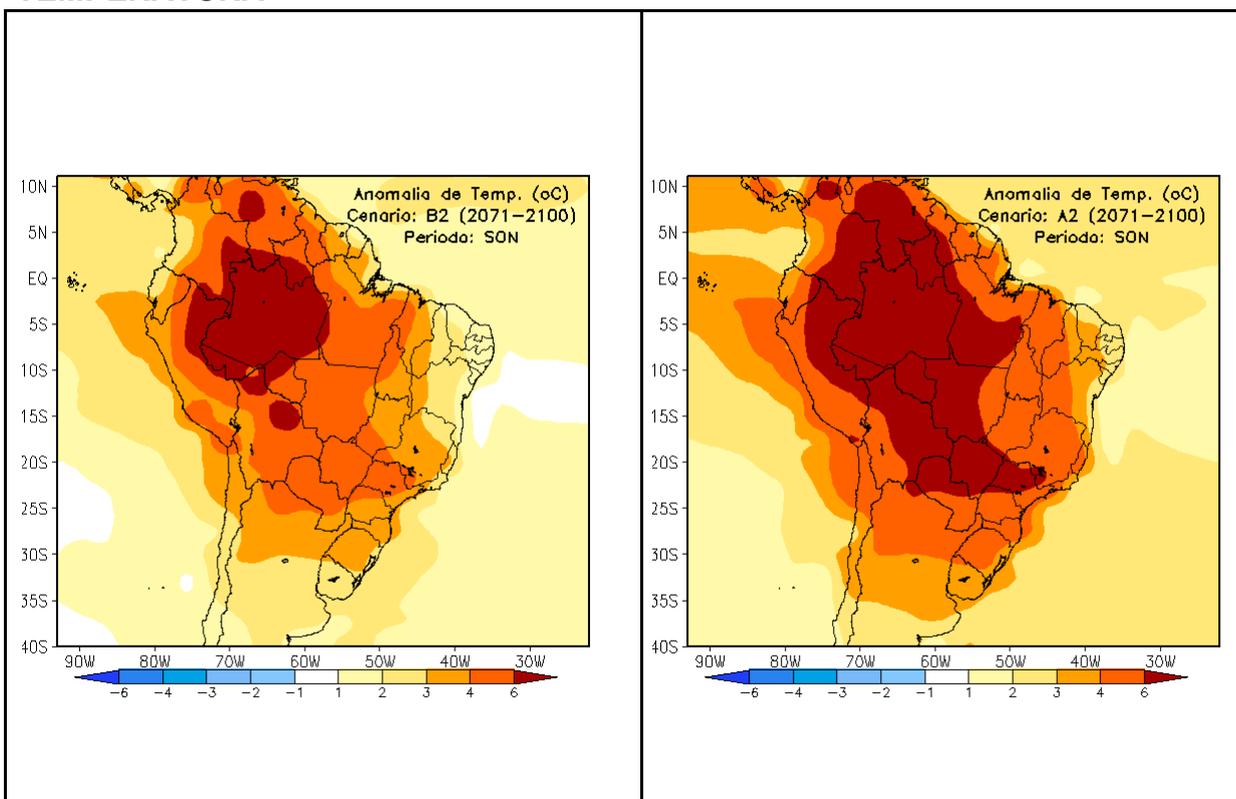
(a) VERÃO - PRECIPITAÇÃO**TEMPERATURA**

FIGURA 4: Anomalia Sazonal de precipitação (mm/dia) e temperatura do ar (°C) para os cenários B2 (coluna da esquerda) e A2 (coluna da direita) simulada pelo modelo global HadAM3P. (a) Verão, (b) Outono, (c) Inverno, e (d) Primavera. A legenda de cores encontra-se abaixo de cada figura.

(b) OUTONO – PRECIPITAÇÃO**TEMPERATURA****FIGURA 4 - Continuação**

(c) INVERNO - PRECIPITAÇÃO**TEMPERATURA****FIGURA 4 - Continuação**

(d) PRIMAVERA - PRECIPITAÇÃO**TEMPERATURA****FIGURA 4 - Continuação.**

4.2.2 Simulações com os modelos regionais

Comparando as simulações feitas para o verão usando os modelos regionais (Fig. 5a e 5b) com aquela gerada pelo modelo global (Fig.4a) para os dois cenários de emissão, vemos importantes diferenças. O modelo HadRM3P no cenário A2 mostra um padrão de precipitação muito parecido com o do modelo global, embora as anomalias negativas de precipitação sejam muito mais fracas e concentradas no extremo norte e nordeste brasileiro. No entanto, a ZCAS ficou muito mais bem definida com anomalias positivas superiores a 4 mm/dia e posicionada em torno de sua região climatológica. A simulação do RegCM3 mostra um padrão similar ao HadAM3P de anomalias negativas de precipitação, no entanto, a configuração da ZCAS não está bem definida. Com relação ao ETA/CPTEC/CPTEC, os resultados mostram regiões de seca em praticamente todo o território brasileiro com exceção dos extremos norte e nordeste sendo, portanto contrário ao dos outros dois modelos. Os resultados com o cenário B2 mostram padrões similares aos obtidos com o A2, embora no caso do RegCM3 há indicação de anomalias positivas em torno da posição climatológica da ZCAS, porém mais fracas do que o HadAM3P mostra. O campo de temperatura no cenário A2 para os três modelos concorda bem com o apresentado pelo modelo global, com anomalias de temperatura positiva superiores a 2°C em todo o continente e extremos concentrados mais na parte norte da América do Sul, onde em particular, o ETA/CPTEC mostra amplitudes maiores sobre a região da Amazônia. Com exceção do RegCM3 que mostra um campo menos intenso e inclusive neutro de temperatura no cenário B2, os outros dois modelos seguem o mesmo padrão do mapa A2, mas com intensidades menores.

Anomalias negativas de precipitação numa banda que engloba a parte norte da América do Sul e se estende de leste a oeste do continente nos cenários A2 e B2 é observada nas simulações de outono (Fig.5b) dos modelos ETA/CPTEC e RegCM3. Este padrão é bem próximo do apresentado pelo HadAM3P e (Fig.4b). Entretanto, é interessante notar que o HadRM3P apresenta uma configuração bem diferente dos outros modelos, onde anomalias negativas de precipitação ficam mais concentradas ao longo

da costa norte e do nordeste brasileiro, e anomalias positivas são observadas no lado oeste do continente sul americano e região sul do Brasil. Este sinal positivo no sul é levemente indicado nos outros dois modelos também, mas com amplitudes muito menores e que não aparecem em virtude do intervalo de contorno. Os campos de temperatura apresentados nesta estação (Fig.5 d) mostram padrões muito similares aos discutidos para o período de verão (Fig.5b), onde temperaturas médias superiores a 2°C predominam ao longo do continente.

Durante a estação de inverno, as configurações de distribuição de precipitação (Fig.5e) simuladas pelos modelos RegCM3 e ETA/CPTEC são bem similares aos do modelo global (Fig.4c) em ambos os cenários de emissão, onde anomalias negativas são observadas na parte noroeste do continente sul americano. O modelo HadRM3P, por outro lado, mostra anomalias negativas mais concentradas próximas à costa norte do Brasil e Guianas, e uma região com valores positivos sobre a Colômbia, norte do Peru e oeste da Amazônia. Os mapas de temperatura (Fig.5f) mostram padrões similares aos discutidos na estação de verão (Fig.5b), mas com amplitudes menores ao longo de todo o continente. Quando comparamos estes campos com os apresentados pelo modelo global (Fig.4c) vemos que as simulações feitas pelos modelos regionais mostram núcleos de valores de temperatura menos intensos e mais distribuídos pelo continente. Novamente aqui, com exceção do RegCM3, os padrões de temperatura observados são similares, porém mais fracos, no cenário B2 em relação ao A2.

As simulações da precipitação durante a estação de primavera (Fig.5g) para o cenário A2 indicam anomalias negativas na parte norte/noroeste do continente sul americano pelo RegCM3, uma larga banda de anomalia negativa se estendendo desde a região Amazônica e países vizinhos até o sudeste do Brasil e estados do sul pelo modelo ETA/CPTEC. O modelo HadRM3P mostra regiões com anomalias negativas mais centradas na parte norte e nordeste do Brasil e anomalias positivas numa banda que se estende da Bolívia ao sul do Brasil. Estes mesmos padrões são observados para o cenário B2, embora com intensidades ligeiramente mais fracas. Em termos da temperatura (Fig.5h), os padrões mostrados são similares aos observados nas outras estações e de forma geral parecidos com os obtidos pelo

HadAM3P variando apenas a extensão dos núcleos de anomalias positivas máximas. Tanto o RegCM3 como o ETA/CPTEC mostram que a Amazônia terá um aquecimento anômalo superior a 6°C, bem como os países vizinhos, ou seja, sul da Colômbia e Venezuela, norte do Peru e Guianas. As características para o cenário B2 se repetem, indicando conforme visto anteriormente amplitudes menores.

De forma geral, apesar de diferenças específicas em algumas regiões, os três modelos regionais convergem no sentido de indicar temperaturas mais quentes para toda a América do Sul num cenário A2 de emissão, particularmente sobre a parte norte do continente, englobando principalmente a região Amazônica. Em termos da precipitação, apesar de algumas diferenças significativas entre alguns modelos regionais e o modelo global, há indicação de que partes do norte e na região da posição climatológica da ZCAS, anomalias negativas devem prevalecer num cenário futuro de aumento de gases de efeito estufa. Vamos a seguir focar nossas análises em quatro regiões específicas do Brasil, avaliando conjuntamente a variabilidade sazonal da precipitação e temperatura nas mesmas.

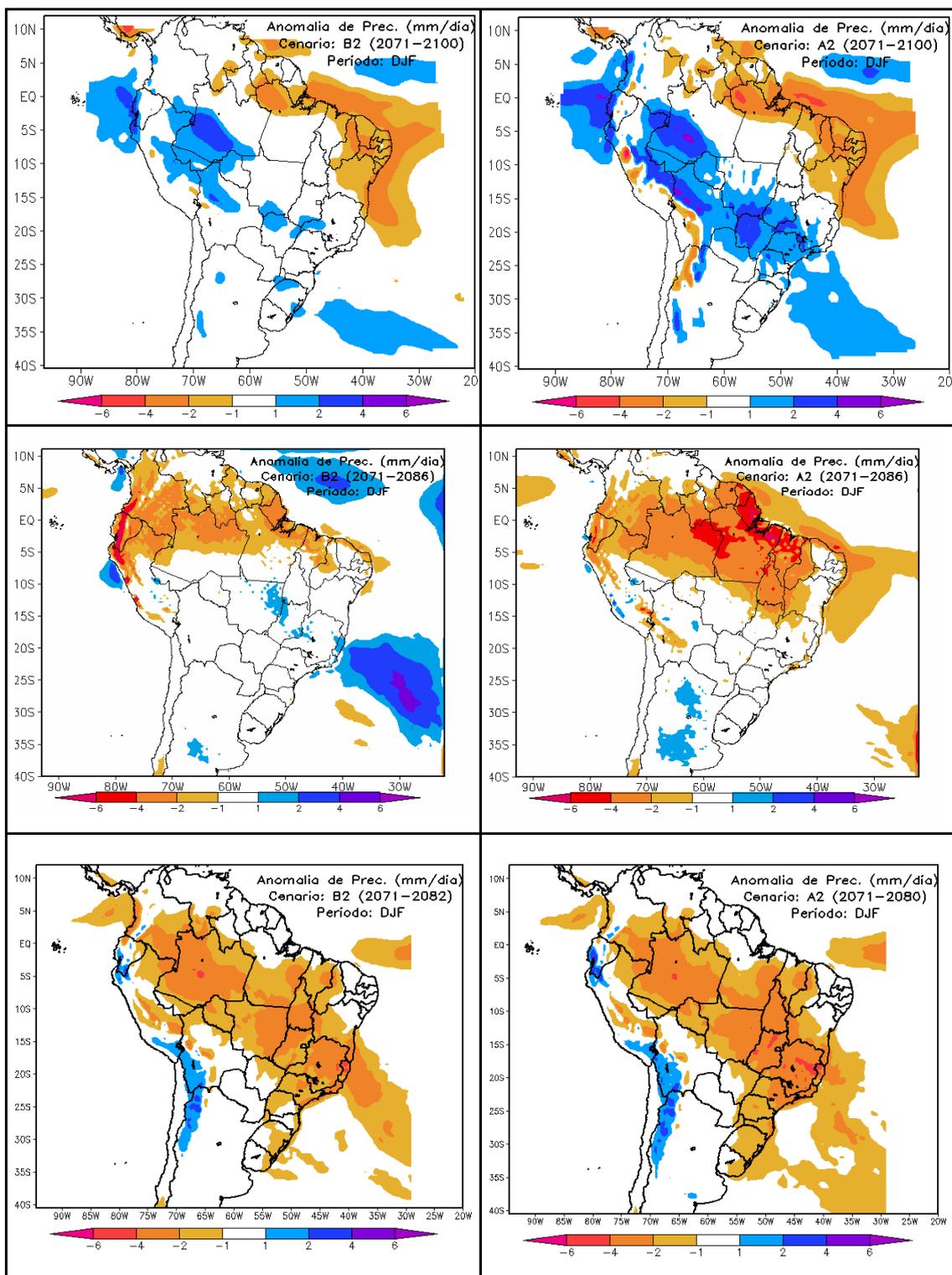


FIGURA 5a: Anomalia Sazonal de precipitação (Verão DJF) em mm/dia, para os cenários B2 (coluna da esquerda) e A2 (coluna da direita) simulada pelos modelos HadRM3P (todo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC (inferior). As escalas de cores estão abaixo da figura.

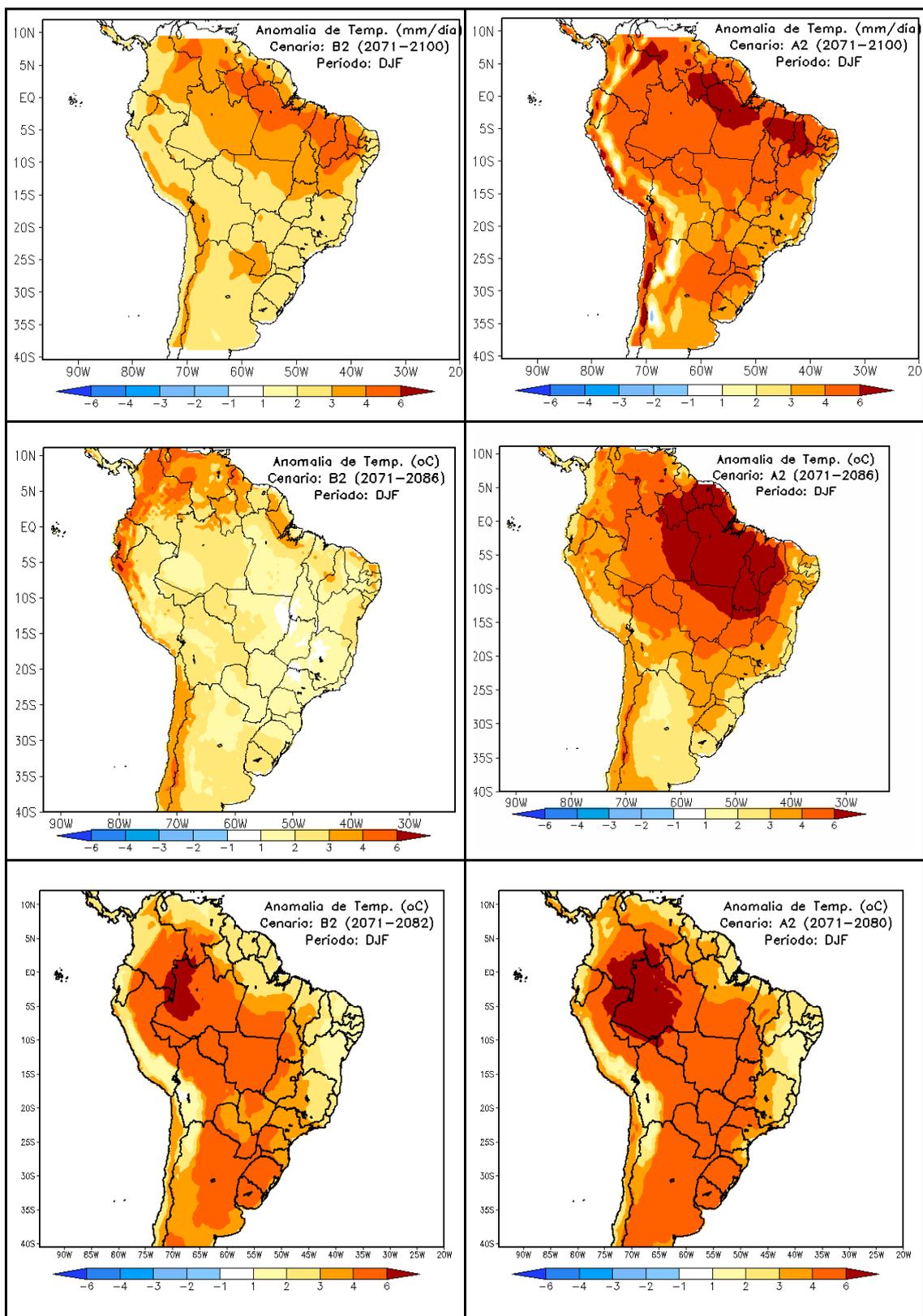


FIGURA 5b: Anomalia Sazonal de temperatura (Verão DJF) em °C, para os cenários B2 (coluna da esquerda) e A2 (coluna da direita) simulada pelos modelos HadRM3P (todo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC (inferior). As escalas de cores estão abaixo da figura.

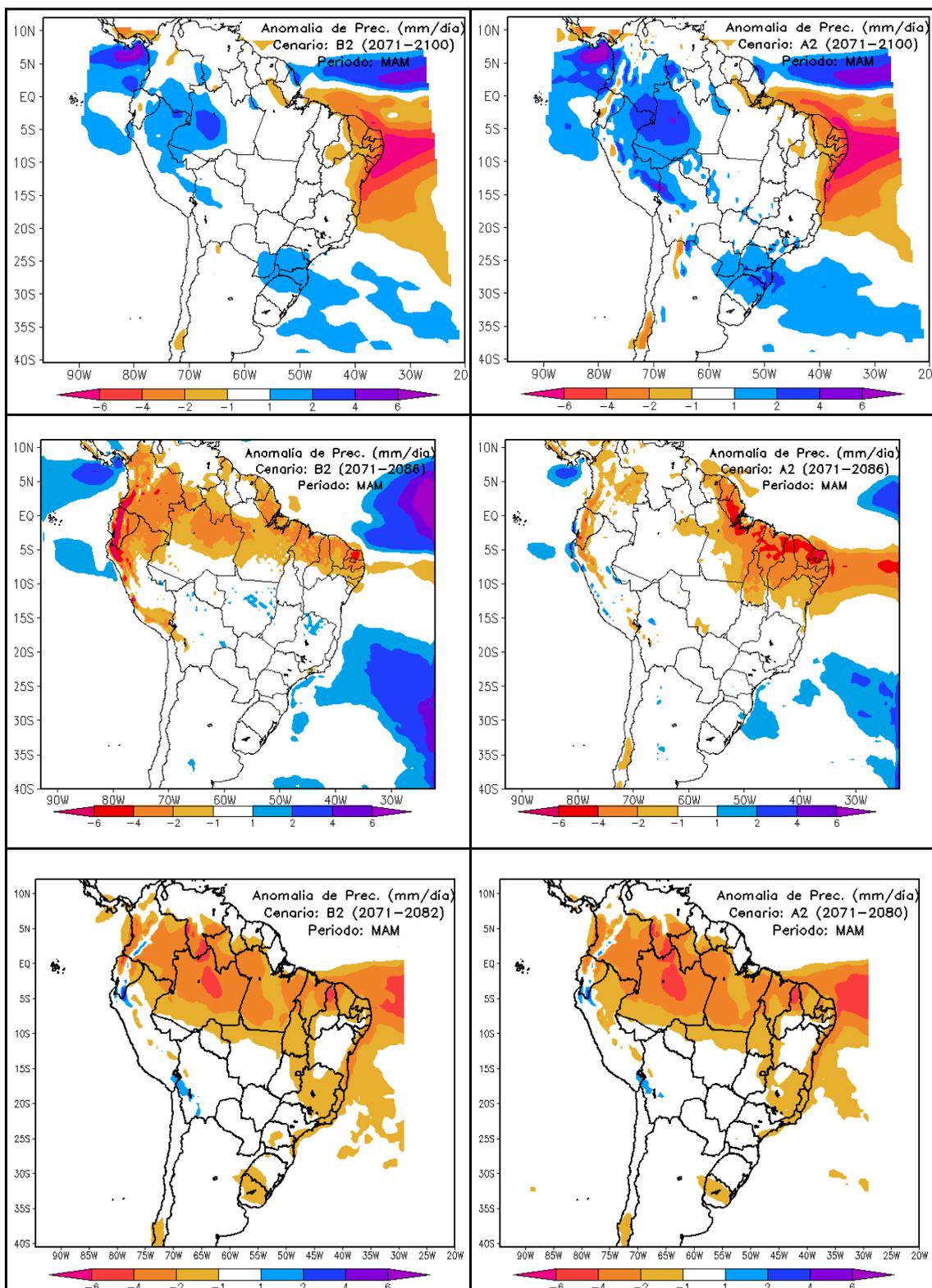


FIGURA 5c: Anomalia Sazonal de precipitação (Outono MAM) em mm/dia, para os cenários B2 (coluna da esquerda) e A2 (coluna da direita) simulada pelos modelos HadRM3P (todo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC (inferior). As escalas de cores estão abaixo da figura.

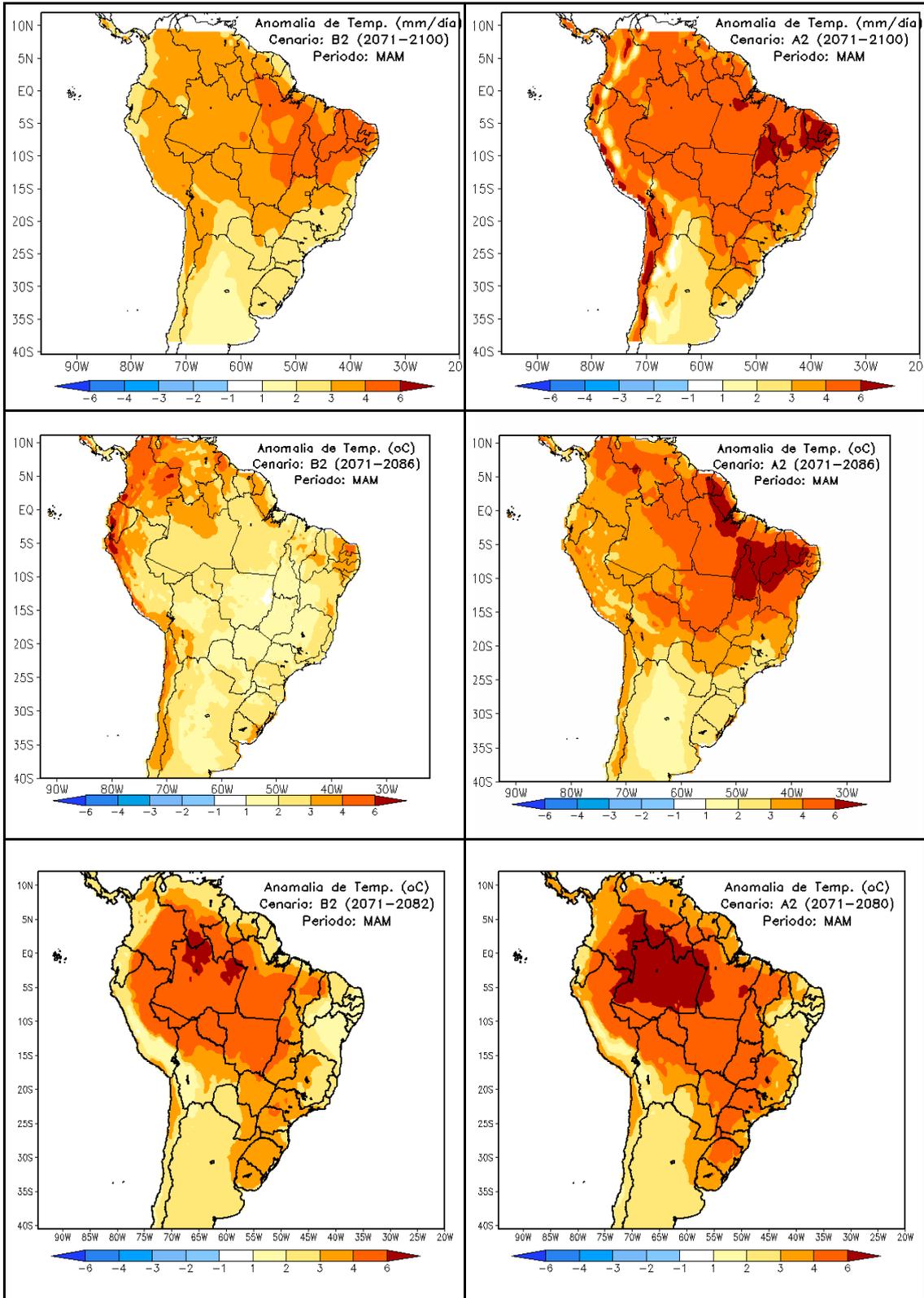


FIGURA 5d: Anomalia Sazonal de temperatura (Outono MAM) em °C, para os cenários B2 (coluna da esquerda) e A2 (coluna da direita) simulada pelos modelos HadRM3P (todo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC (inferior). As escalas de cores estão abaixo da figura.

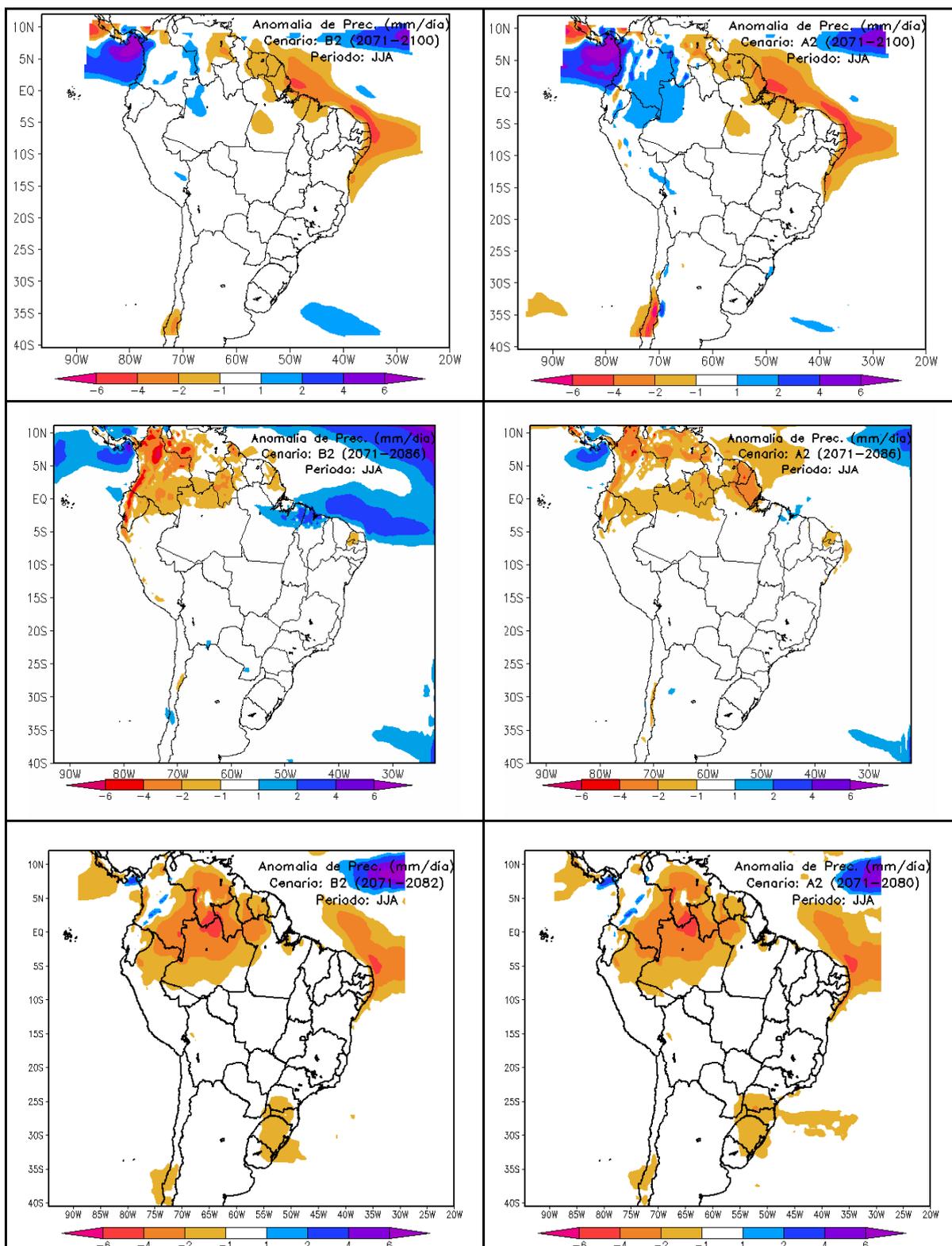


FIGURA 5e: Anomalia Sazonal de precipitação (Inverno JJA) em mm/dia, para os cenários B2 (coluna da esquerda) e A2 (coluna da direita) simulada pelos modelos HarDM3P (todo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC (inferior). As escalas de cores estão abaixo da figura.

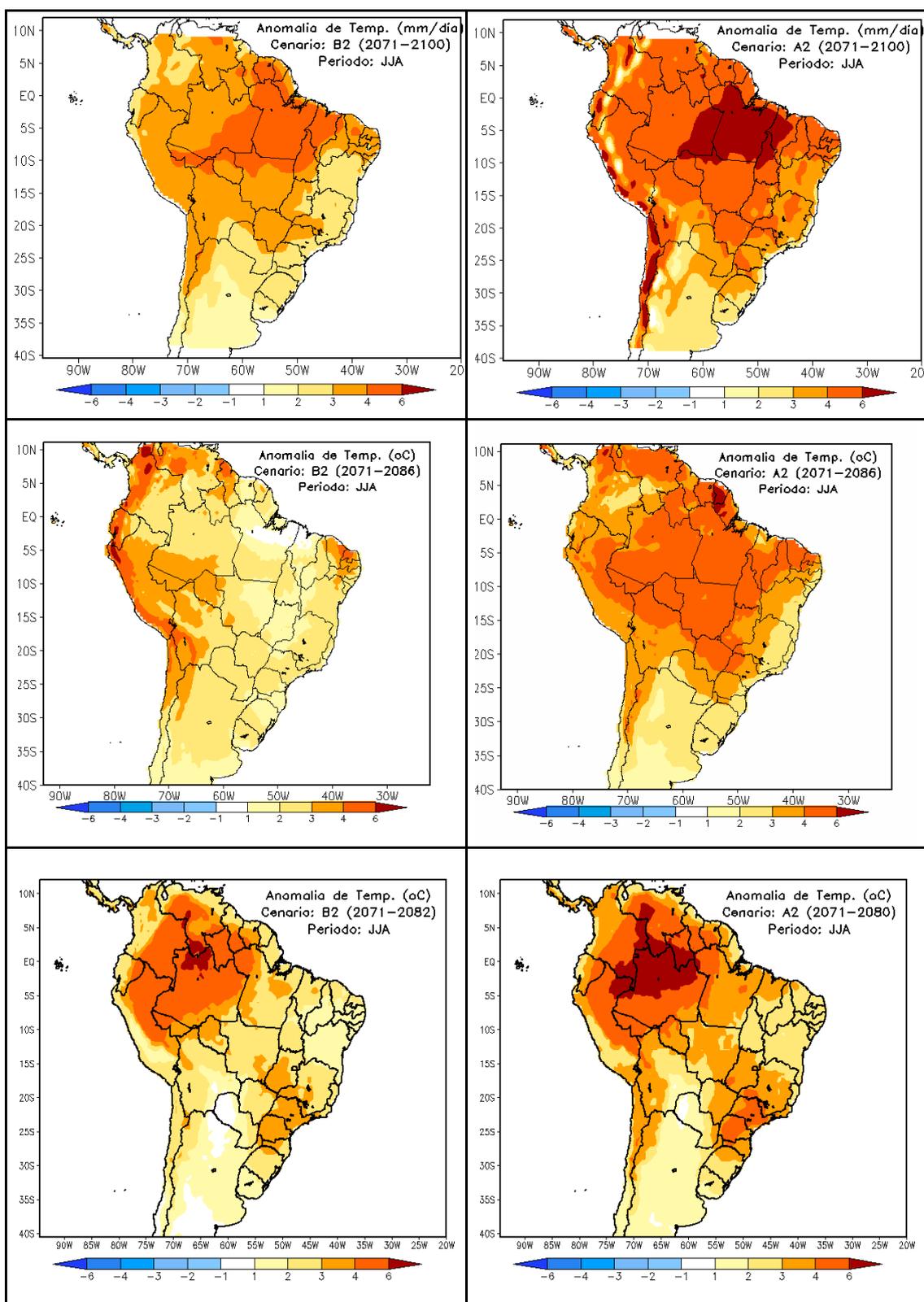


FIGURA 5f: Anomalia Sazonal de temperatura (Inverno JJA) em °C, para os cenários B2 (coluna da esquerda) e A2 (coluna da direita) simulada pelos modelos HarDM3P (todo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC (inferior). As escalas de cores estão abaixo da figura.

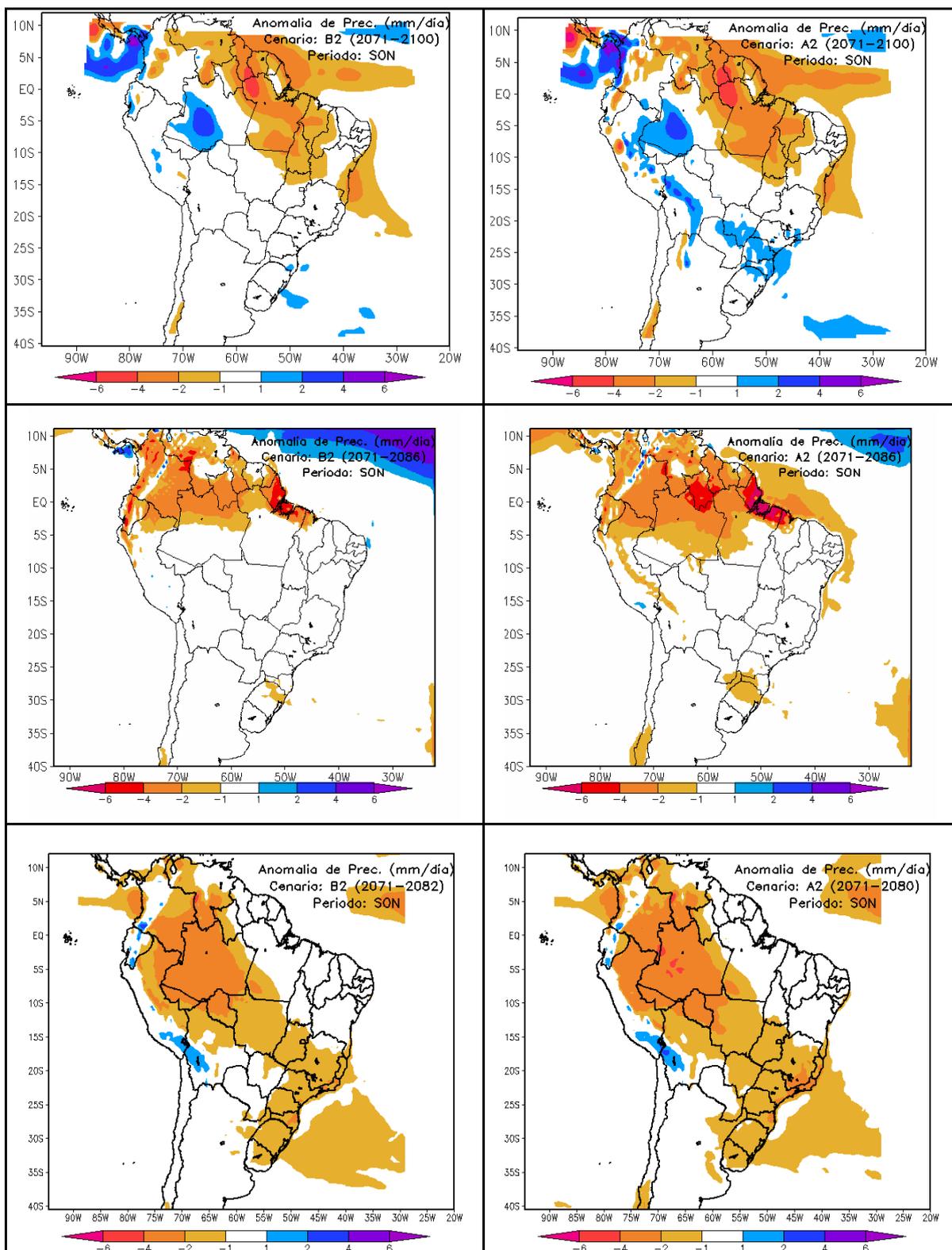


FIGURA 5g: Anomalia Sazonal de precipitação (Primavera SON) em mm/dia, para os cenários B2 (coluna da esquerda) e A2 (coluna da direita) simulada pelos modelos HarDM3P (todo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC (inferior). As escalas de cores estão abaixo da figura.

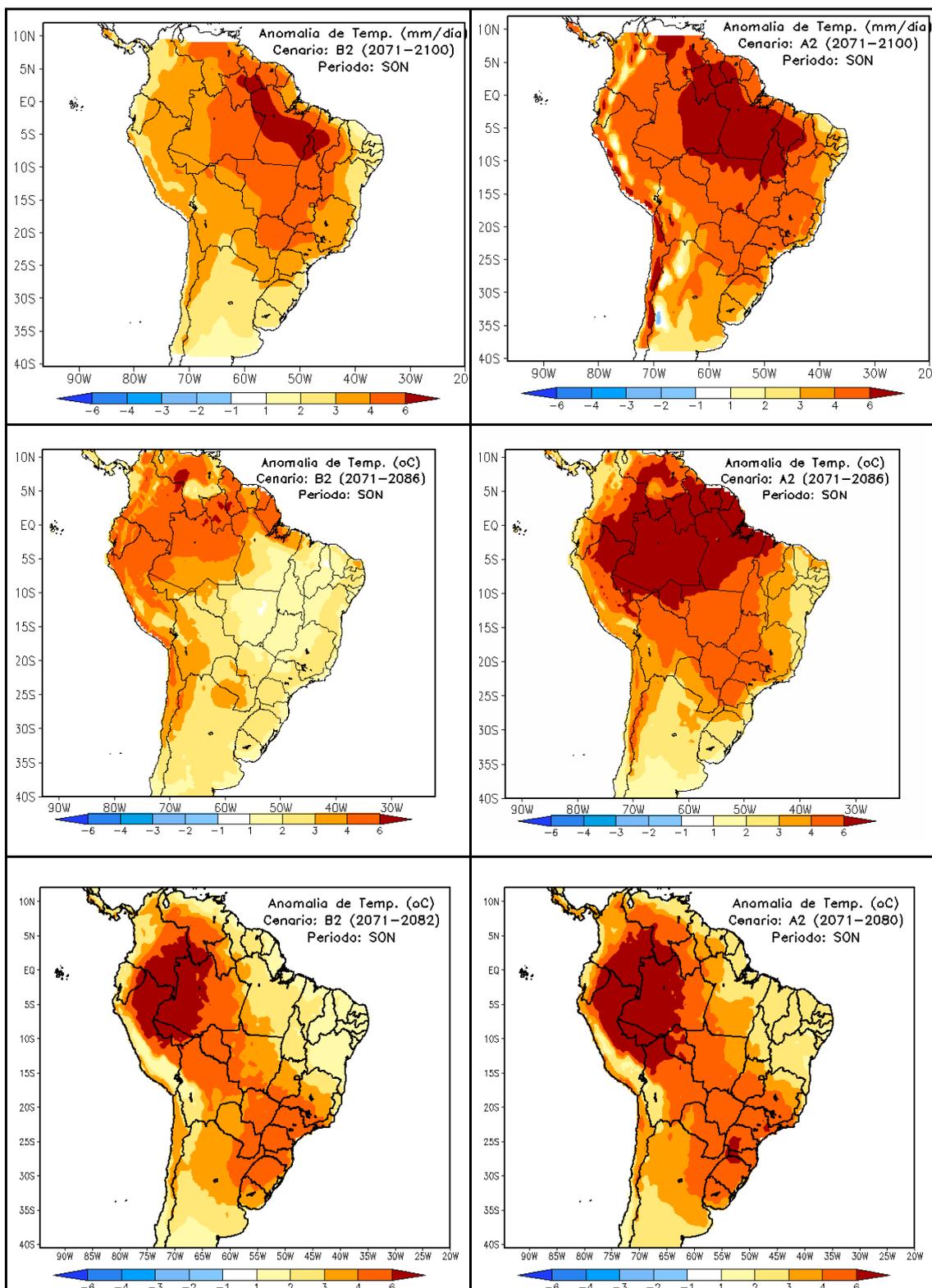


FIGURA 5h: Anomalia Sazonal de temperatura (Primavera SON) em °C, para os cenários B2 (coluna da esquerda) e A2 (coluna da direita) simulada pelos modelos HarDM3P (todo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC (inferior). As escalas de cores estão abaixo da figura.

4.3 Análise sazonal do clima presente e futuro por regiões do Brasil

Vimos nas discussões anteriores que existem algumas regiões em que os modelos regionais convergem mais em termos de padrões de distribuição de precipitação e temperatura que em outras. Para termos uma visão mais detalhada sobre o Brasil da habilidade dos modelos em simular tanto do clima presente como o futuro, selecionaram-se quatro regiões específicas para este estudo: Amazônia, Nordeste, Pantanal e Sul-Paraná. A Fig.6 abaixo mostra a posição em latitude e longitude destas regiões, bem como qual é sua área de abrangência. De forma geral, as quatro áreas praticamente cobrem todo o país e, portanto possibilitando uma análise mais regional do clima simulado.

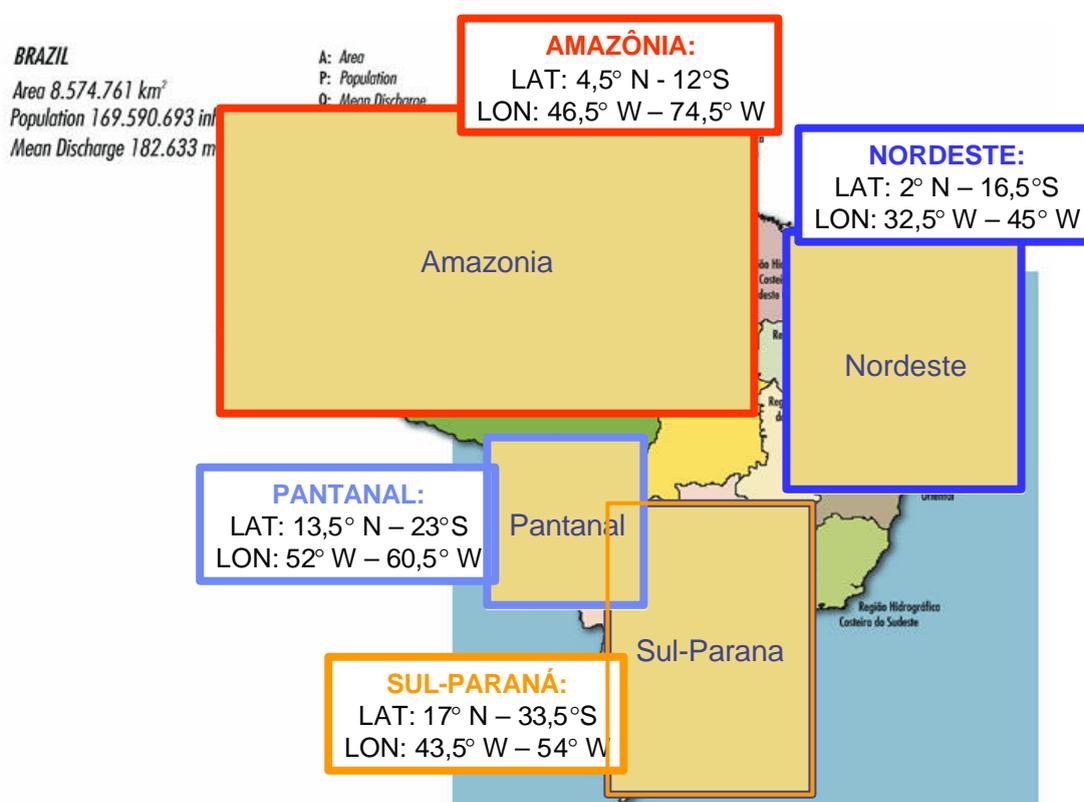


FIGURA 6: Regiões selecionadas para o estudo do clima presente e futuro gerado pelas simulações numéricas.

A Fig.7 a seguir mostra a variação sazonal da precipitação e temperatura para as quatro estações do ano, ou seja, verão (Dez-Jan-Fev), outono (Mar-Abr-Mai), inverno (Jun-Jul-Ago) e primavera (Set-Out-Nov), média dentro das áreas mostradas na Fig.6. Nos gráficos serão mostrados a variação observada do clima presente através da série de dados do CRU e

os dados simulados para o clima atual e cenários futuros de emissão A2 e B2. As análises estatísticas mensais nos sub-domínios indicados em cada figura serão mostrados na tabela 3 (precipitação) e tabela 4 (temperatura) considerando o clima presente. Estas tabelas mostram os cálculos do viés, desvio padrão, o erro da raiz quadrática média e o coeficiente de correlação em relação aos dados climatológicos observados.

De forma geral, os três modelos representaram bem o ciclo anual da precipitação e temperatura na região sul (Fig.7a), onde máximos valores são observados em DJF e mínimos em JJA. Através da tabela 3 vemos que o Coeficiente de Correlação (CC) do ETA/CPTEC é o maior dos três (0.96) seguido do HadRM3P (0.95), e do RegCM3 (0.79), no entanto, a simulação do clima presente nos dois primeiros subestima a precipitação nesta região, com viés de -1.21 e -0.60, respectivamente. Por outro lado, o HadRM3P subestima a precipitação no verão e outono e superestima no inverno e primavera, mas mantém um viés negativo (-0.40). Estes padrões observados na simulação do clima atual também são observados nos resultados das simulações A2 e B2. Os campos de temperatura também mostram viés negativo nos três modelos (Tabela 4), sendo que o RegCM3 apresenta os maiores valores (-0.98) e o ETA/CPTEC o menor (-0.02). Este resultado acaba sendo refletido no CC com valores de 0.89 para o RegCM3 e valores altos para o ETA/CPTEC (0.98) e HadRM3P (0.99). Todos os modelos prevêem temperaturas mais altas no futuro em relação ao clima atual tanto para o cenário A2, que possui os maiores valores, como para o B2.

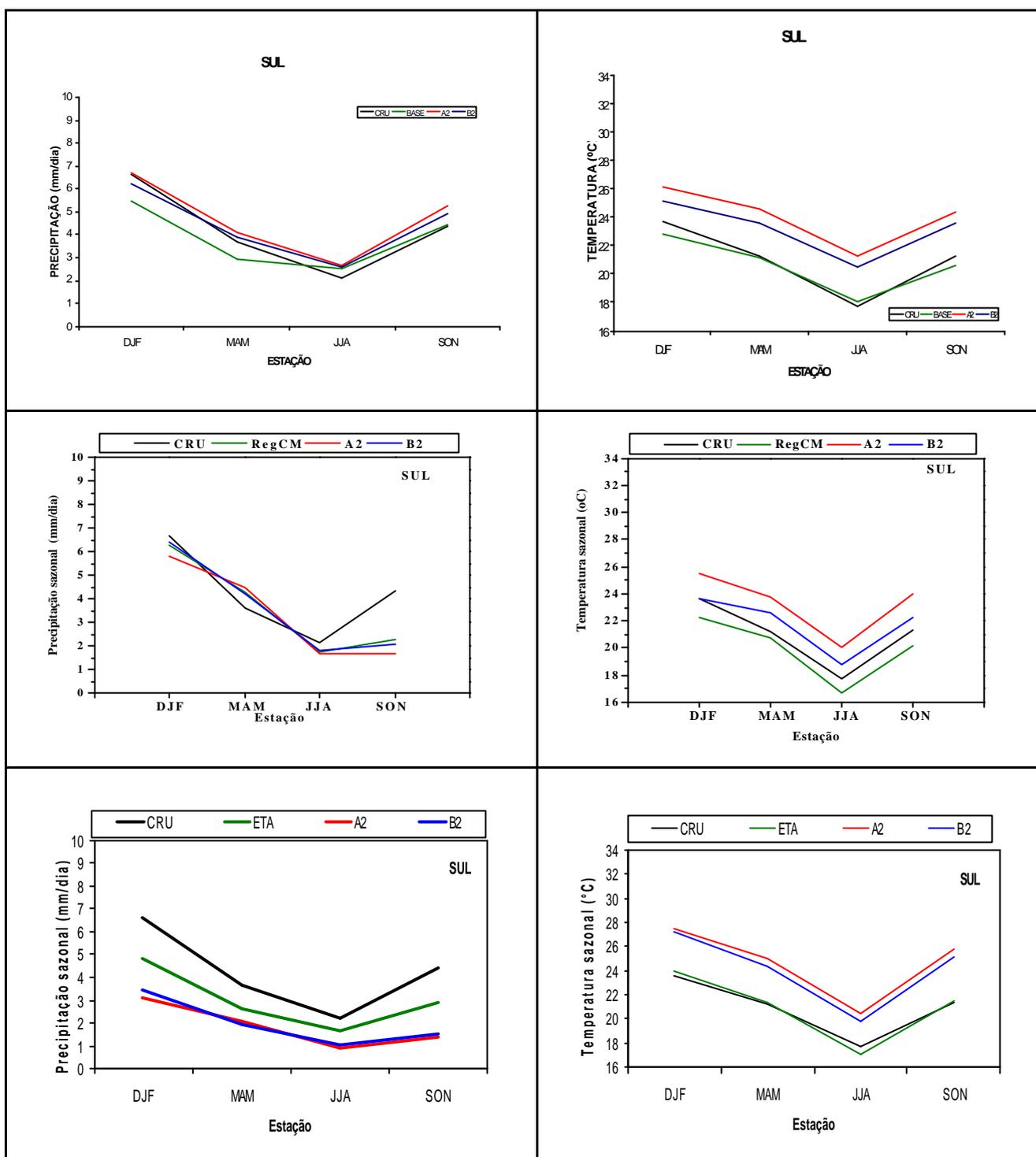


FIGURA 7a: Médias sazonais de precipitação (mm/dia) e temperatura (°C) dos dados do CRU e simulações do clima presente e cenários de emissões A2 e B2 gerados pelos modelos HadRM3P (topo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC (inferior) para a Paraná-Sul (Fig.6).

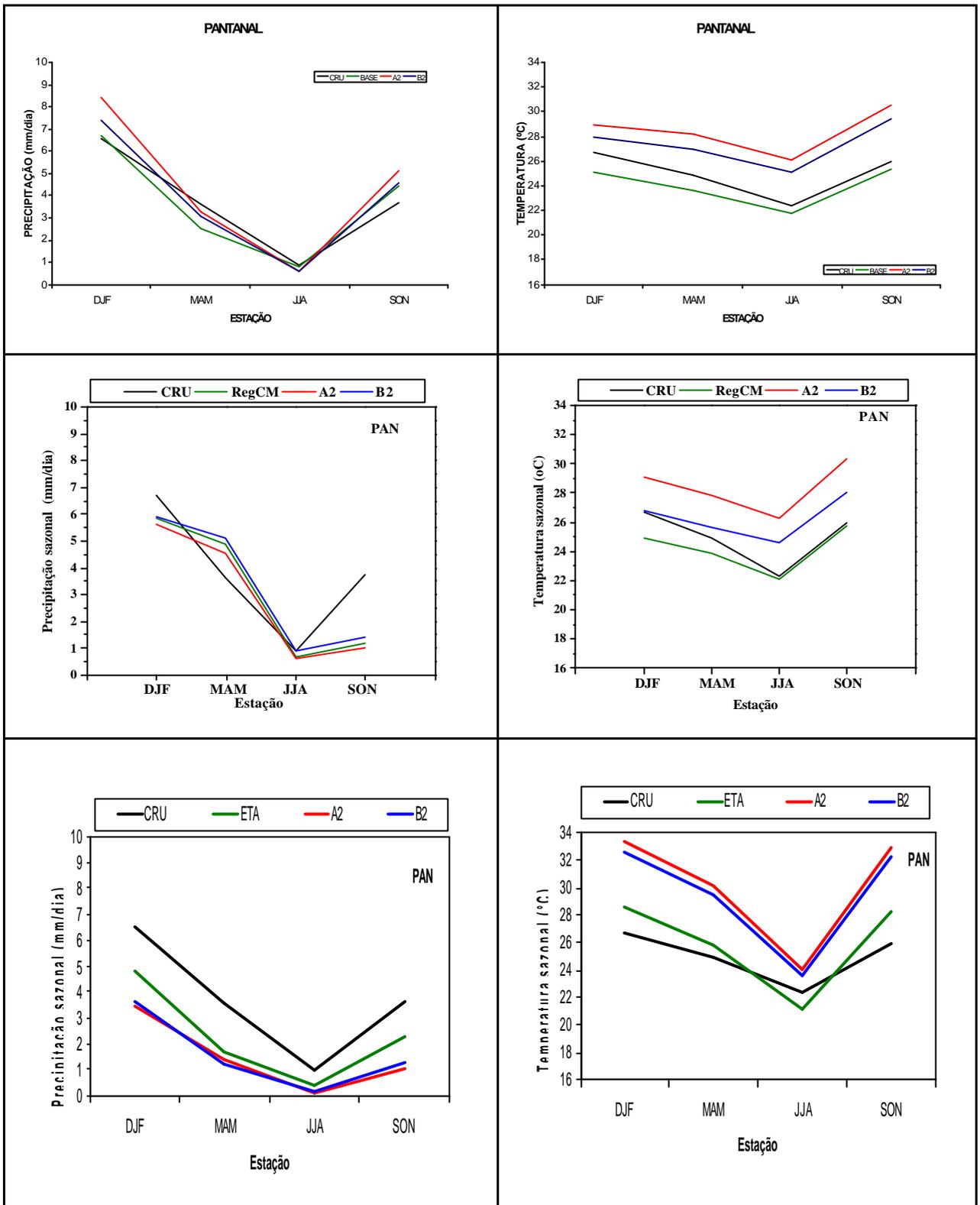


FIGURA 7b: Médias sazonais de precipitação (mm/dia) e temperatura (°C) dos dados do CRU e simulações do clima presente e cenários de emissões A2 e B2 gerados pelos modelos HadRM3P (topo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC (inferior) para o Pantanal (Fig.6).

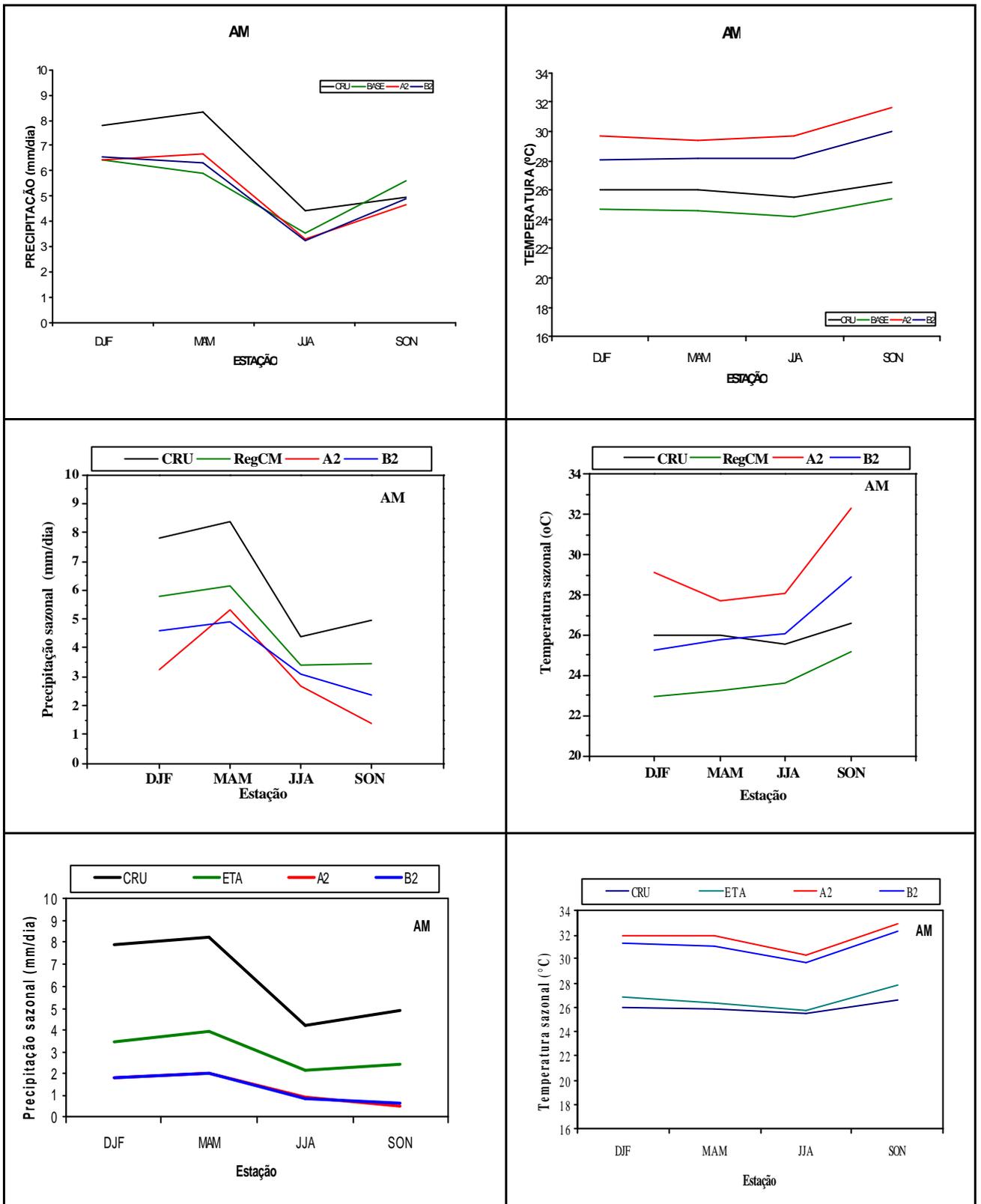


FIGURA 7c: Médias sazonais de precipitação (mm/dia) e temperatura (°C) dos dados do CRU e simulações do clima presente e cenários de emissões A2 e B2 gerados pelos modelos HadRM3P (topo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC (inferior) para a Amazonia (Fig.6).

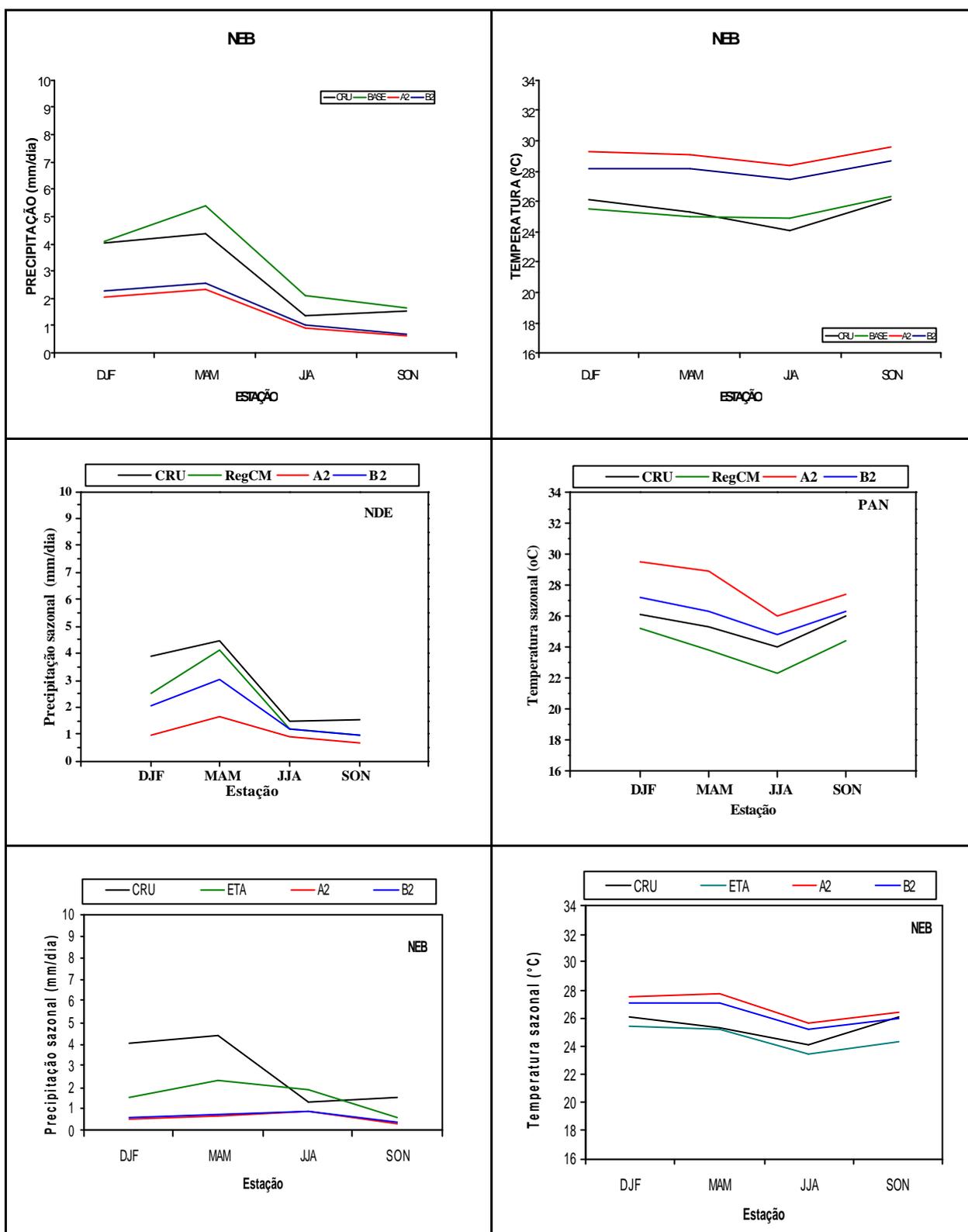


FIGURA 7d: Médias sazonais de precipitação (mm/dia) e temperatura (°C) dos dados do CRU e simulações do clima presente e cenários de emissões A2 e B2 gerados pelos modelos HadRM3P (topo), RegCM3 (centro) e ETA/CPTEC (inferior) para o Nordeste (Fig.6).

TABELA 3: Índices estatísticos mensais da precipitação calculados nos subdomínios definidos na Fig.6. São mostrados o viés, o desvio padrão (dp), o erro da raiz quadrática média (RMSE) e o coeficiente de correlação (CC) em relação aos dados climatológicos do CRU.

	HadRM3P	RegCM3	ETA/CPTEC
Amazonia			
Bias	-1.0	-1.70	-3.31
dp	1.82	1.40	0.78
Rmse	1.78	2.04	3.51
COR	0.77	0.91	0.97
Nordeste			
Bias	0.5	-0.67	-1.19
dp	1.98	2.20	0.67
Rmse	1.50	1.00	1.82
COR	0.92	0.91	0.49
Sul			
Bias	-0.4	-0.60	-1.21
Dp	1.85	1.07	1.27
Rmse	1.51	1.08	1.34
COR	0.95	0.79	0.96
Pantanal			
Bias	0.0	-0.62	-1.38
Dp	1.85	0.41	1.62
Rmse	1.51	1.01	1.49
COR	0.96	0.79	0.97

TABELA 4: Índices estatísticos mensais da temperatura calculados nos subdomínios definidos na Fig.6. São mostrados o viés, o desvio padrão (dp), o erro da raiz quadrática média (RMSE) e o coeficiente de correlação (CC) em relação aos dados climatológicos do CRU.

	PRECIS	RegCM3	ETA/CPTEC
Amazônia			
Bias	-1.30	-2.25	0.71
dp	0.94	1.25	0.86
Rmse	1.42	2.53	0.86
COR	0.95	0.71	0.95
Nordeste			
Bias	0.0	-1.41	-1.12
dp	0.88	1.38	1.14
Rmse	0.70	1.59	1.33
COR	0.75	0.91	0.77
Sul			
Bias	-0.30	-0.98	-0.02
Dp	2.31	2.11	2.70
Rmse	1.23	1.22	0.61
COR	0.99	0.89	0.98
Pantanal			
Bias	-1.0	-0.73	0.96
Dp	2.09	1.08	3.22
Rmse	1.76	0.88	1.84
COR	0.95	0.75	0.97

Através dos dados do CRU vemos que a região do Pantanal (Fig.7b) apresenta duas estações bem distintas, a seca (outono e inverno) com temperaturas médias mais baixas, e a úmida (primavera e verão), onde as temperaturas máximas são observadas. Os três modelos mostram viés negativo, onde o ETA/CPTEC apresenta o valor mais alto (-1.38), seguido do RegCM3 e HadRM3P (-0.62 e -0.1 respectivamente – Tabela 3). Por outro lado, o CC do ETA/CPTEC é de 0.97, enquanto os outros dois modelos ficaram com 0.79 e 0.96. A chuva no clima futuro será menor do que a atual na região independente dos cenários de emissão tanto nas simulações do RegCM3 como do ETA/CPTEC. No entanto, nas simulações A2 do HadRM3P, há indicação de que na primavera e verão a precipitação poderá ser superior ao do clima presente. De certa forma, este resultado acaba refletindo no campo de temperatura simulado por este modelo, pois apesar

das simulações mostrarem o viés mais alto negativo no clima atual (-1.0 - Tabela 4) em relação aos outros dois modelos, as anomalias de temperatura são positivamente altas no clima futuro. Em particular o ETA/CPTEC apresenta um viés positivo (0.96) para esta região e um alto CC também (0.97). No geral, todos os modelos mostraram valores sazonais de temperatura acima do clima atual para o cenário A2 e valores próximos do presente para o B2.

Através das análises sazonais da precipitação e temperatura feitas para toda a América do Sul, observou-se que em geral, é na região norte que os modelos mostravam sinais mais relevantes de mudanças climáticas em cenários futuros. Em particular, a Amazônia é uma região que pode vir a ser bem afetada caso haja alterações significativas das variáveis acima mencionadas. Focando os resultados dos modelos regionais sobre esta região (Fig.7c), vemos novamente que eles conseguem capturar razoavelmente o ciclo sazonal das chuvas, onde um máximo é observado no período MAM e um mínimo em JJA. Mesmo no campo de temperatura, apesar do gradiente entre as estações serem muito fracos, os modelos ainda foram hábeis em descrever o aumento entre o inverno e a primavera. O coeficiente de correlação dos resultados simulados de precipitação do ETA/CPTEC e do RegCM3 em relação à observação foi de 0.97 e 0.91, respectivamente, enquanto o HadRM3P obteve um valor mais baixo (0.77 – Tabela 3). No entanto, todos os modelos subestimaram a chuva sazonal com valores de viés tão altos quanto -3.31 mm/dia (ETA/CPTEC). Nas simulações A2 e B2 todos os modelos mostram ocorrência de chuvas bem abaixo dos níveis atuais, com valores no pico da estação de -6 mm/dia. Considerando a variação da temperatura nos dias atuais, com exceção do ETA/CPTEC que tem um viés positivo (0.71 – Tabela 4), os outros modelos mostram um viés negativo, com valores da ordem de -2.25 como nas simulações do RegCM3. Por outro lado é interessante notar que o ETA/CPTEC e o HadRM3P tem um CC de 0.95 contra 0.71 do RegCM3. No cenário A2 a temperatura tende a ficar até 6°C acima das médias atuais no período mais quente, ou seja, durante a primavera. Os resultados do B2 mostram padrões similares, mas intensidades inferiores ao do A2. É interessante notar que todos os modelos apresentaram resultados muito similares para a variação sazonal da

temperatura. Baseado nestes resultados, vemos que a região Amazônica do futuro poderá apresentar temperaturas mais elevadas e níveis de precipitação mais baixos o que sem dúvida estaria afetando toda a América do Sul, uma vez que esta região é responsável pelo transporte de calor e umidade para todo o continente.

A habilidade dos modelos em simular o clima presente para a região nordeste do Brasil (Fig.7d) é bem variável. Por exemplo, o CC do modelo HadRM3P (Tabela 3) foi de 0.92, enquanto que o RegCM3 teve 0.91 e o ETA/CPTEC somente 0.49, onde este valor baixo está refletindo a dificuldade deste modelo em simular o ciclo sazonal da chuva nesta região. No entanto, o RegCM3 e o ETA/CPTEC apresentaram viés negativo de chuva (-0.67 e -1.19, respectivamente), enquanto o HadRM3P teve um desvio positivo de 0.5. As simulações com os cenários A2 e B2 prevêem chuva abaixo da média em relação aos valores atuais, mas com exceção do ETA/CPTEC, os dois modelos mantêm o ciclo sazonal da mesma. Na temperatura, o HadRM3P mostra um viés zero (Tabela 4) e o RegCM3 e ETA/CPTEC valores negativos de -1.41 e -1.12, respectivamente. Por outro lado, o CC do RegCM3 é de 0.91, enquanto que o HadRM3P e ETA/CPTEC têm valores de 0.75 e 0.77, indicando que o primeiro modelo representa melhor o ciclo sazonal. Todos os modelos mostram temperaturas mais altas num cenário futuro, com valores de até 4°C em relação ao clima presente. De forma geral, as características de precipitação e temperatura para a região nordeste são similares às observadas para a região Amazônica, embora neste caso os impactos pareçam ser menores do que verificado naquela região.

4.4 Anomalia média sazonal dos modelos regionais climáticos (“ensemble”) para o clima presente e futuro

Conforme pudemos ver nas seções anteriores, onde analisamos as anomalias de precipitação e temperatura sazonais para os três modelos regionais climáticos adotados neste projeto, apesar de existir vários pontos de convergência em termos de resultados, é sempre mais difícil analisar isoladamente cada modelo, uma vez que dependendo da estação ou da região um resultado pode estar mais próximo do esperado do que o outro. Uma forma de melhorar este tipo de análise é gerar figuras onde se utiliza a média dos resultados obtidos de cada modelo de forma que os acertos e erros de cada um são representados numa única figura. Esta técnica conhecida em inglês como “ensemble” é muito utilizada em previsões de tempo e clima nos grandes centros operacionais de meteorologia. A seguir vamos analisar as anomalias sazonais agrupadas dos três modelos para o clima presente e futuro.

4.4.1 Anomalias sazonais grupadas dos três modelos regionais: clima presente

A Fig.8 mostra as anomalias sazonais de precipitação e temperatura obtidas do agrupamento das simulações dos três modelos regionais que estão sendo utilizados neste projeto, ou seja, o HadRM3P, o RegCM3 e o ETA/CPTEC. As análises destas figuras não ajudam a localizar o viés sistemático dos modelos e desta forma, compensar estes erros nas análises das simulações do clima futuro.

Comparando conjuntamente os campos de precipitação para o verão e outono (Figs. 8a e 8b) vemos certas similaridades entre eles. Fica claro que a região norte e centro-oeste do Brasil apresentam anomalias sistemáticas de chuva, com máximos em torno de até 6 mm/dia na costa norte. No verão, em particular, a região da posição climatológica da ZCAS mostra valores negativos em toda a sua extensão. No entanto anomalias fracas, mas positivas são observadas do leste dos Andes passando pelo Paraguai até o Paraná. Interessante notar que no outono os desvios de chuva no nordeste

brasileiro, que é a estação chuvosa, são negativos, mas pequenos, em torno de 1 mm/dia, o que sugere uma confiabilidade média de simulação para esta região. O campo de temperatura para estas duas estações mostra anomalias negativas em praticamente toda a parte central e norte da América do Sul, com valores pequenos, mas positivos, localizados no norte da Argentina, partes do Paraguai e Paraná.

Durante o inverno (Fig.8c), as anomalias negativas de precipitação ficam concentradas mais no norte da América do Sul, já que nesta estação do ano, o regime de chuvas é muito fraco em quase todo o continente. Exceções a este padrão seriam a costa nordeste do Brasil, onde a estação chuvosa é neste período e o sul do Brasil que tem um regime de chuvas mais regular. Nota-se aqui, que estas regiões mencionadas possuem anomalias negativas de precipitação, sugerindo que os modelos tem uma certa dificuldade em quantificar adequadamente esta variável. Em termos da temperatura, há um predomínio em sua quase totalidade de anomalias negativas, exceto na parte mais central do Brasil.

A primavera (Fig.8d) mostra anomalias positivas de precipitação no extremo norte do Brasil, praticamente neutralidade sobre o nordeste e desvios negativos deste a Colômbia e Bolívia até o sudeste e sul do território brasileiro. O padrão de temperatura é muito similar ao obtido durante o inverno (Fig.8c), embora mostre valores positivos em torno de 1°C na parte mais central do Brasil.

De forma geral, notamos que tem um viés negativo de precipitação na parte mais norte da América do Sul e também um viés negativo que domina quase todo o continente com exceção da parte mais central, onde dependendo da estação do ano observa-se mais neutralidade ou mesmo valores positivos não significativos.

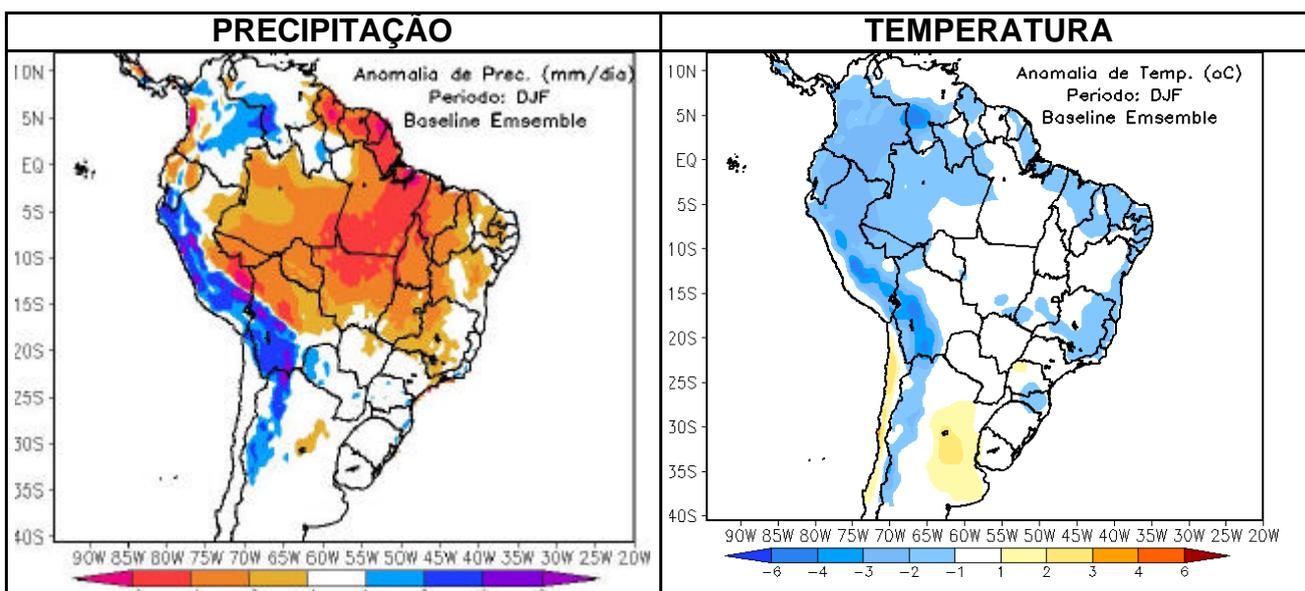


FIGURA 8a: Anomalias sazonais médias de precipitação (mm/dia) e temperatura (°C) para verão DJF agrupadas das simulações dos modelos HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura.

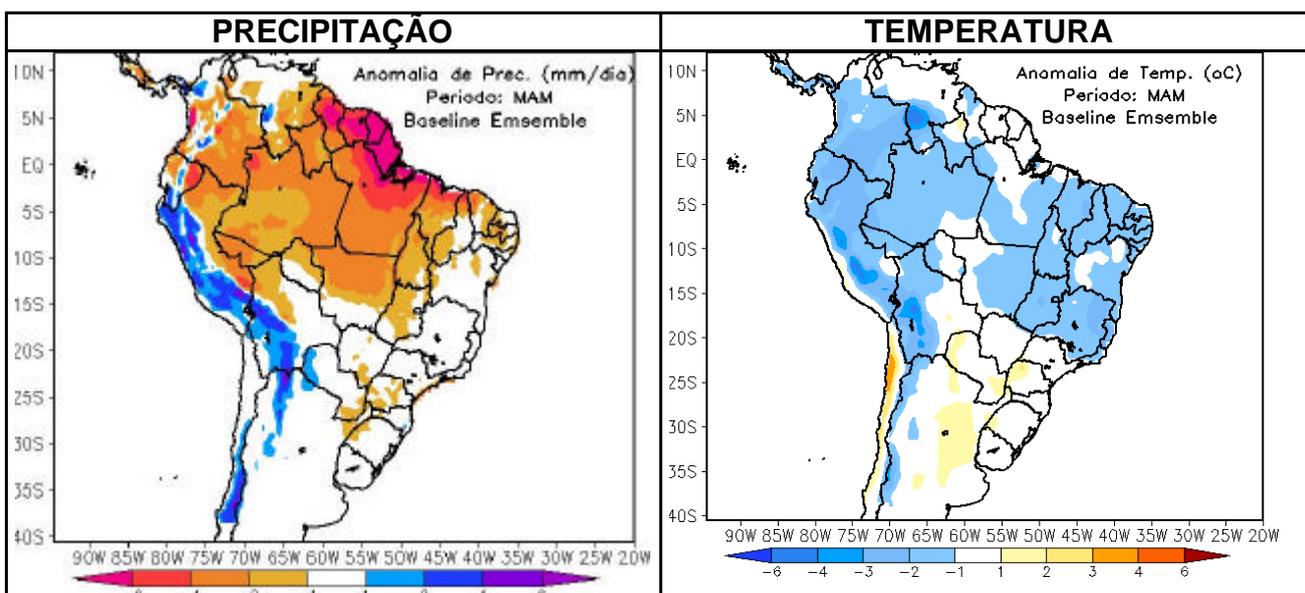


FIGURA 8b: Anomalias sazonais médias de precipitação (mm/dia) e temperatura (°C) para outono MMA agrupadas das simulações dos modelos HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura.

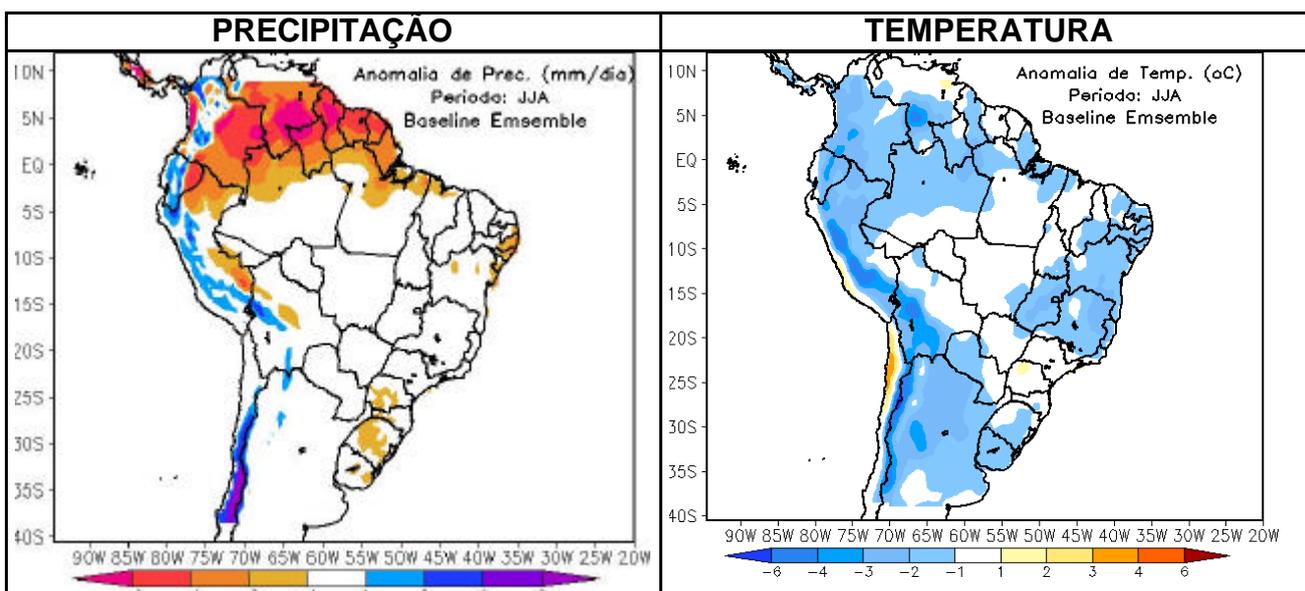


FIGURA 8c: Anomalias sazonais médias de precipitação (mm/dia) e temperatura (°C) para inverno MAM agrupadas das simulações dos modelos HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura.

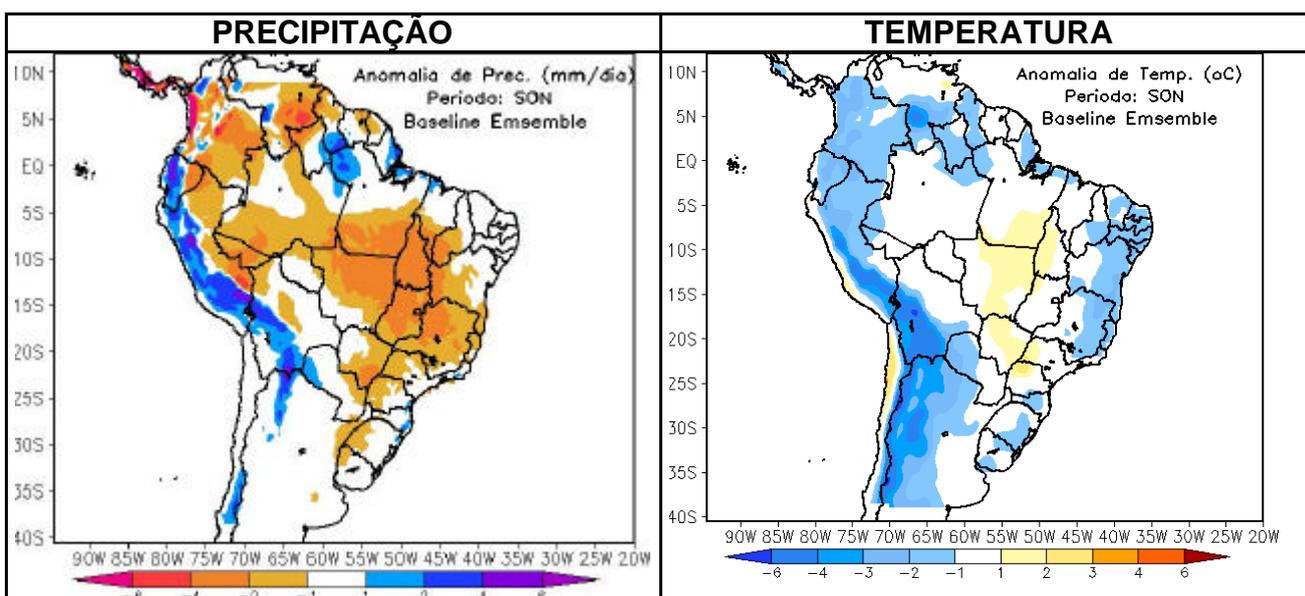


FIGURA 8d: Anomalias sazonais médias de precipitação (mm/dia) e temperatura (°C) para primavera SON agrupadas das simulações dos modelos HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura.

4.4.2 Anomalias sazonais grupadas dos três modelos regionais: clima futuro

Através da Fig.8 pudemos conhecer qual o viés na precipitação e temperatura geradas nas simulações dos modelos regionais para o clima presente. Nesta seção vamos analisar os resultados das médias sazonais das simulações dos três modelos usados neste estudo para os cenários climáticos A2 e B2 (Fig.9).

Para o cenário A2, durante o verão (Fig.9a), vemos que toda a parte norte e nordeste do Brasil apresentam anomalias negativas de precipitação em torno de 2 a 4 mm/dia. Na região climatológica da ZCAS vemos anomalias positivas fracas e neutralidade em quase toda sua extensão. De forma geral este resultado é semelhante ao obtido com o modelo global descrito na Fig.4a. A diferença maior é que o HadAM3P coloca anomalias positivas mais intensas sobre a parte centro oeste e sudeste do Brasil. Para o cenário B2, as anomalias negativas se enfraquecem e diminuem sua área de domínio, concentrando-se mais ao norte da América do Sul. No campo de temperatura vemos que todo o continente é dominado por anomalias positivas, sendo estas muito mais intensas no cenário A2, onde alguns núcleos com valores superiores a 6°C são observados na parte norte do Brasil. Considerando-se que os modelos regionais possuem em geral um viés negativo (veja Fig.8a, por exemplo), os valores mostrados no mapa podem estar ainda subestimados e, portanto, muito mais semelhantes aos obtidos com o modelo global. Nota-se, entretanto, que o ganho em usar os modelos regionais climáticos está no detalhamento de cada região.

Durante o outono (Fig.9b), as anomalias negativas de precipitação tanto no cenário A2 como no B2 concentram-se na parte norte e nordeste brasileiro, principalmente na região costeira. Num clima futuro, a estação chuvosa do nordeste poderia ser menos intensa conforme vemos nestas simulações. Estes resultados também concordam com o modelo global (Fig.4b) que mostra valores muito mais intensos e localizados. O campo de temperatura prevê anomalias entre 4 e 6°C para todo o território brasileiro no cenário de emissão mais intensa e valores mais baixos na simulação B2. Deve ser lembrado aqui, que para algumas regiões os valores podem ser

ainda mais altos devido ao viés negativo que foi observado nas simulações do clima presente (Fig.8b).

Similarmente ao obtido pelo modelo global (Fig.4c) e concordando com as discussões anteriores, no inverno (Fig.9c) a precipitação do ponto de vista climático é reduzida em praticamente toda a América do Sul. Neste caso, as simulações mostram anomalias negativas concentrando-se mais na parte norte do continente, havendo muito pouca diferença entre os diferentes cenários de emissões. O padrão de distribuição de temperatura é muito similar ao observado nas outras estações, possuindo valores de anomalia positiva em praticamente todo o continente, com altas mais significativas na parte norte do Brasil.

Na primavera (Fig.9d) a área de anomalias negativas é similar ao mostrado para o inverno (Fig.9c), mas com uma extensão maior para o sul, cobrindo boa parte do norte do Brasil, enquanto que nas outras regiões observam-se valores neutros. Vale a pena ressaltar que nas análises do clima presente (Fig.8d), obteve-se desvios negativos de precipitação na parte central e sudeste do Brasil. Os valores neutros encontrados nestas regiões podem significar pequenas anomalias positivas de chuva e, portanto, uma modificação climática no futuro. Novamente aqui, o campo de temperatura mostra anomalias positivas em todo o continente, mas com uma grande região na parte noroeste da América do Sul, englobando grande parte do norte do Brasil com valores superiores a 6°C, o que concorda com os resultados do modelo global (Fig.4d), mas regionaliza os máximos em torno da região Amazônica.

Sendo assim, vemos que apesar do agrupamento de resultados de simulações de um número pequeno de modelos tem o período de ser dominado por alguns deles, as análises apresentadas aqui, concordam de forma geral com as análises individuais dos modelos apresentados nas outras sessões.

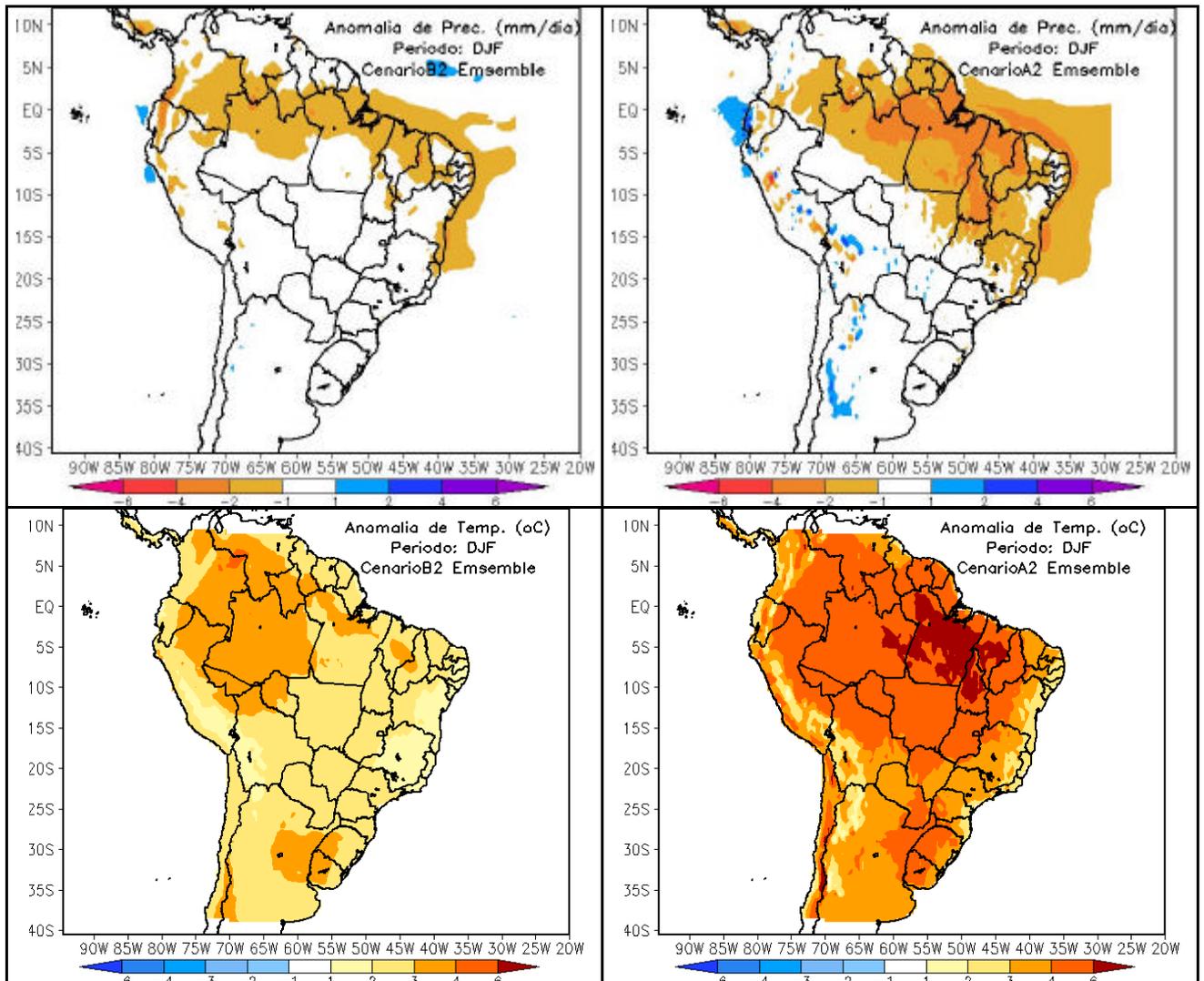


FIGURA 9a: Anomalias sazonais médias de precipitação (mm/dia) e temperatura (°C) para verão DJF agrupadas das simulações dos modelos HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura.

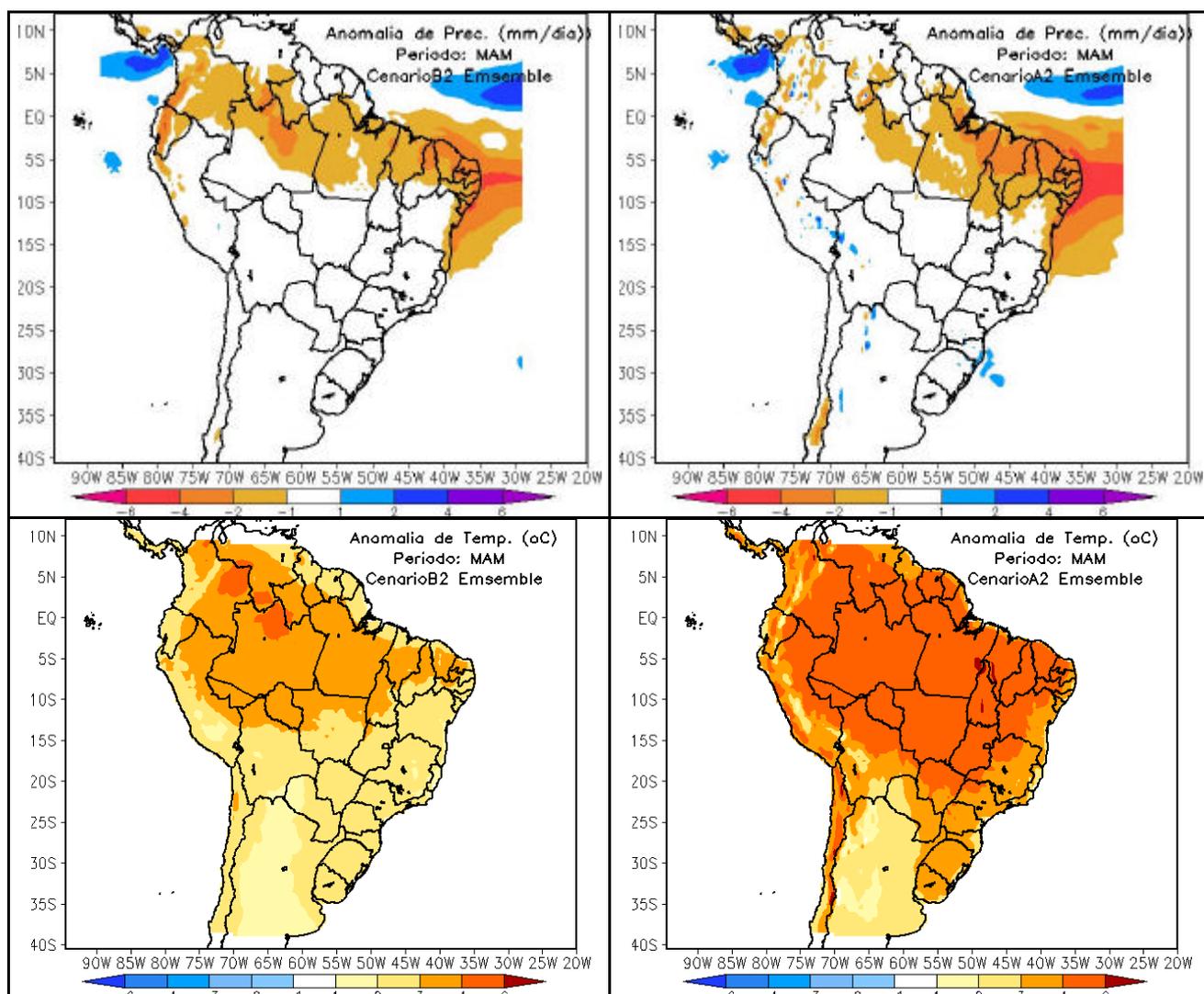


FIGURA 9b: Anomalias sazonais médias de precipitação (mm/dia) e temperatura (°C) para outono MAM agrupadas das simulações dos modelos HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura.

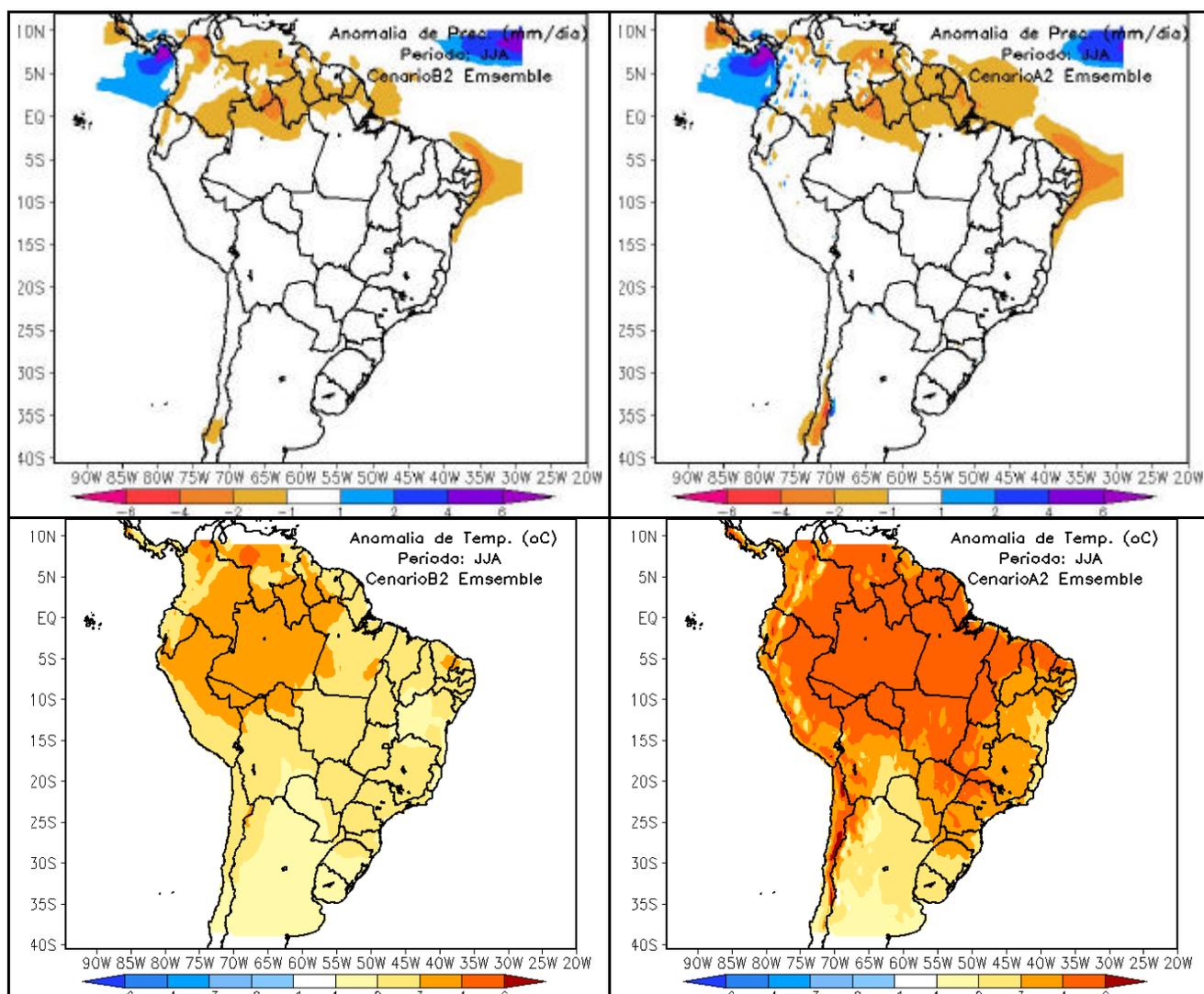


FIGURA 9c: Anomalias sazonais médias de precipitação (mm/dia) e temperatura (°C) para inverno JJA agrupadas das simulações dos modelos HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura.

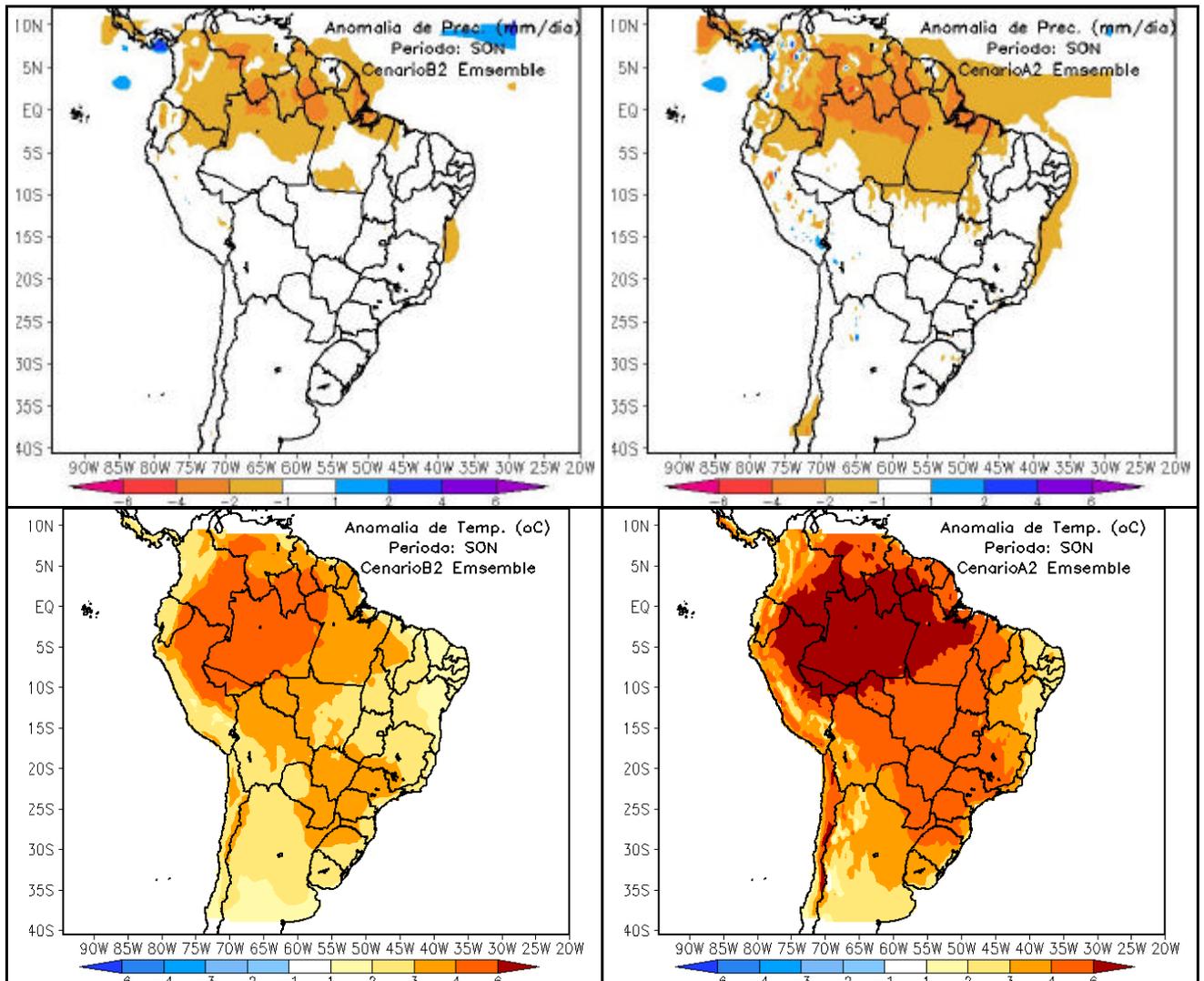


FIGURA 9d: Anomalias sazonais médias de precipitação (mm/dia) e temperatura (°C) para primavera SON agrupadas das simulações dos modelos HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTec para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura.

Capítulo 5

Discussões e Conclusões

O primeiro ponto é que toda técnica de regionalização ou “downscaling” contém erros derivados do modelo global que força o modelo regional, e ainda que isto não seja um erro na regionalização, precisa ser levado em conta. Técnicas diferentes de regionalização podem produzir diferentes previsões locais, ainda que todas fossem forçadas pelo mesmo modelo global, e diferentes modelos regionais pudessem fornecer diferentes projeções climáticas. Se as mudanças climáticas tiverem que ser somadas ao clima do presente para que seja possível gerar cenários de climas do futuro, então as incertezas vão ser importantes em cada um dos processos de integração. O skill dos modelos regionais na América do Sul tem sido similar ao skill dos modelos globais no clima do presente. Assim, regiões como o Nordeste, a Amazônia, o Sul do Brasil, o Noroeste do Peru-Ecuador e o Sul do Chile apresentam uma previsibilidade melhor no clima do presente, comparada com regiões como o sudeste-centro oeste do Brasil. Assumindo que a previsibilidade do futuro seria a mesma que no presente, então podemos dar maior credibilidade às projeções de clima para o futuro nestas áreas.

Após a análise dos modelos regionais para o clima do presente, notamos que os modelos têm um viés negativo de precipitação na parte mais norte da América do Sul e também um viés negativo que domina quase todo o continente com exceção da parte mais central, onde dependendo da estação do ano observa-se mais neutralidade ou mesmo valores positivos não significativos. Este viés é estimado em relação à climatologia da CRU (observações) no período de 1961-90.

Conforme pudemos ver nas seções anteriores, onde analisamos as anomalias de precipitação e temperatura sazonais para os três modelos regionais climáticos adotados neste projeto, apesar de existir vários pontos de convergência em termos de resultados, é sempre mais difícil analisar

isoladamente cada modelo, uma vez que, dependendo da estação ou da região, um resultado pode estar mais próximo do esperado do que o outro. Uma forma de melhorar este tipo de análise é gerar figuras onde se utiliza a média dos resultados obtidos de cada modelo de forma que os acertos e erros de cada um são representados numa única figura. Os resultados do “ensemble” mostram que apesar do agrupamento de resultados de simulações de um número pequeno de modelos tem o período de ser dominado por alguns deles, as análises apresentadas aqui, concordam de forma geral com as análises individuais dos modelos apresentados nas outras sessões. As diferenças mais notáveis são em relação à chuva, onde o modelo Eta/CPTEC tem uma tendência de secar a ZCAS e o sul do Brasil durante o verão e outono, o que não é observado no HadRM3P e RegCM3. Por outro lado o HadRM3P coloca uma área de muita chuva no oeste da Amazônia perto do Peru-Ecuador durante as mesmas épocas do ano, o que não aparece nos modelos Eta/CPTEC e HadRM3P, nem no global HadAM3P.

Em relação à temperatura do ar, todos os modelos regionais apresentam tendências de aquecimento, que tendem a ser maior nos três modelos na Amazônia, chegando até 8°C todo o ano, especialmente no inverno e estações de transição. As diferenças entre o Eta/CPTEC e RegCM3/HadRM3P é que o Eta/CPTEC apresenta um maior aquecimento no oeste da Amazônia, e tanto que os outros dois modelos regionais apresentam maior aquecimento na região leste da Amazônia. A Fig.10 mostra as anomalias de chuva e temperatura para o futuro (2071-2100) menos presente (1961-90), para cenários A2 e B2, a nível anual e sazonal. Os mapas apresentam cada modelo regional assim como o “ensemble” dos três modelos. Baseada nas discussões destes mapas foi elaborada a Tabela 5, a nível anual e sazonal, para chuva e temperatura. Esta tabela apresenta para cada região do Brasil as tendências das mudanças para o futuro, assim como um indicador do grau de confiança nas projeções derivadas do “ensemble” de modelos. Usam-se números: 3 = os três modelos apresentam o mesmo sinal (maior confiança), 2 = dois modelos apresentam o mesmo sinal e o terceiro mostra sinal oposta ou não apresenta sinal; (média confiança), 1 = dois modelos apresentam sinais diferentes e o terceiro não apresenta sinal, ou um

modelo apresenta sinal e outros dois não apresentam sinal (baixa confiança), 0 = os três modelos não apresentam sinal de mudança.

Tabela 5: Indicador qualitativo das tendências de chuva e temperatura anual nas regiões da América do Sul para o futuro (2071-2100) menos o presente, derivadas da análise dos modelos regionais e do ensemble dos três modelos (Fig.10) e para os cenários A2 e B2. Índices apresentam o grau de concordância entre modelos: 3 = os três modelos apresentam o mesmo sinal (maior confiança), 2 = dois modelos apresentam o mesmo sinal e o terceiro mostra sinal oposta ou não apresenta sinal; (média confiança), 1 = dois modelos apresentam sinais diferentes e o terceiro não apresenta sinal, ou um modelo apresenta sinal e outros dois não apresentam sinal ou apresentam sinal oposta (baixa confiança), 0 = os três modelos não apresentam sinal de mudança. Sinal + ou – mostra aumento ou diminuição. P = precipitação, T = temperatura. Áreas de maior confiança são ressaltadas em vermelho, e com confiança média aparecem em azul.

	Anual				Verão				Inverno			
	P		T		P		T		P		T	
Região	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
N	-2	-2	+3	+3	-2	-2	+3	+3	-2	-2	+3	+3
NE	-3	-2	+3	+3	-2	-2	+3	+3	-2	-2	+3	+3
CO	-1	-1	+3	+2	-1	+2	+3	+2	0	0	+3	+2
SE	-1	-1	+3	+3	-1	-1	+3	+3	0	0	+3	+3
S	-1	-1	+3	+3	-1	-1	+3	+3	-1	-1	+3	+3

	Outono				Primavera			
	P		T		P		T	
Região	A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
N	-2	-2	+3	+3	-3	-2	+3	+3
NE	-3	-3	+3	+3	-1	-1	+3	+3
CO	-1	0	+3	+2	-1	-1	+3	+2
SE	0	-1	+3	+3	-1	-1	+3	+3
S	-1	-1	+3	+3	-1	-1	+3	+3

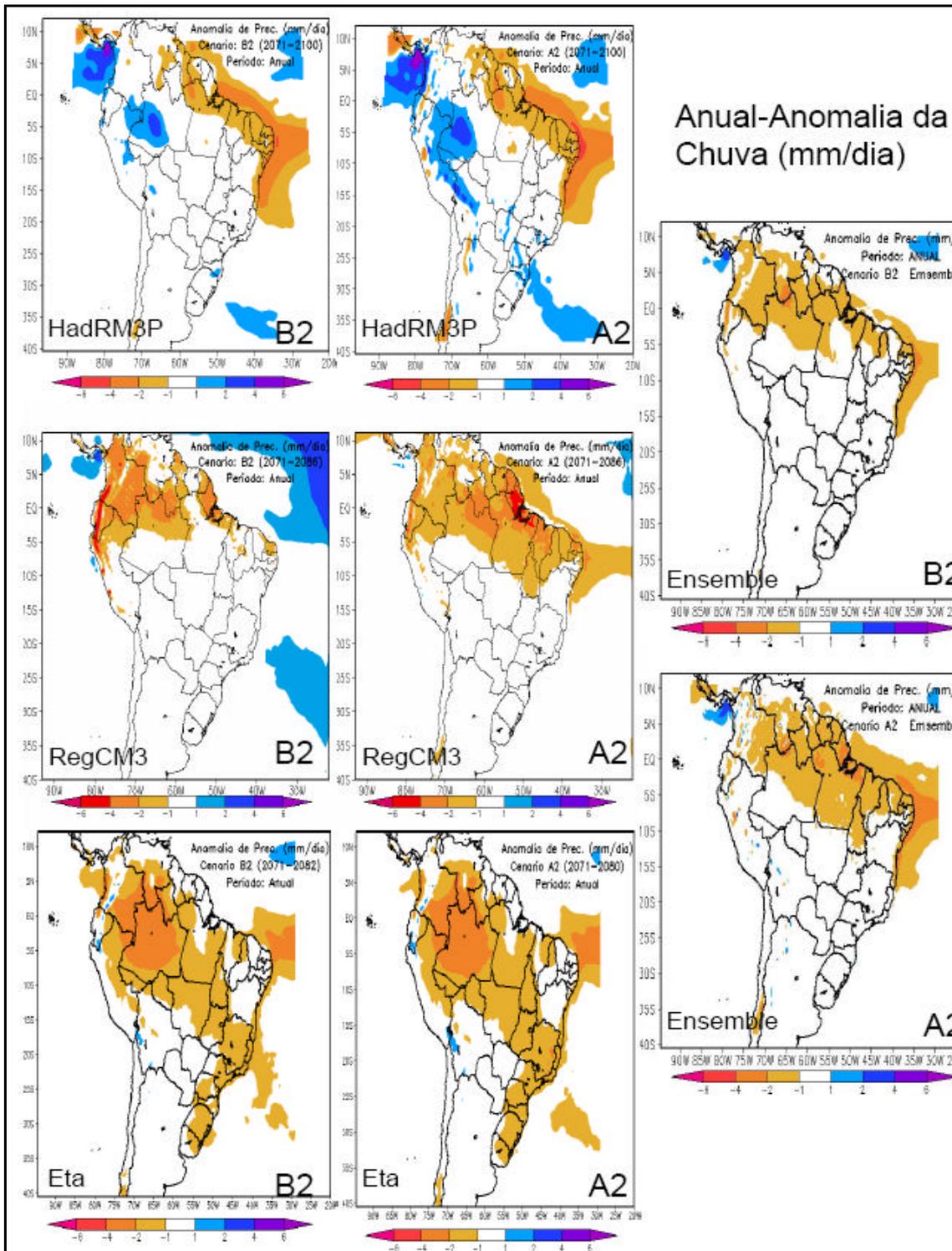


FIGURA 10a: Anomalias anuais médias de precipitação (mm/dia) para o “ensemble” dos modelos regionais (direita) HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura. As anomalias são para o período futuro 2071-2100 em relação ao presente 1961-90.

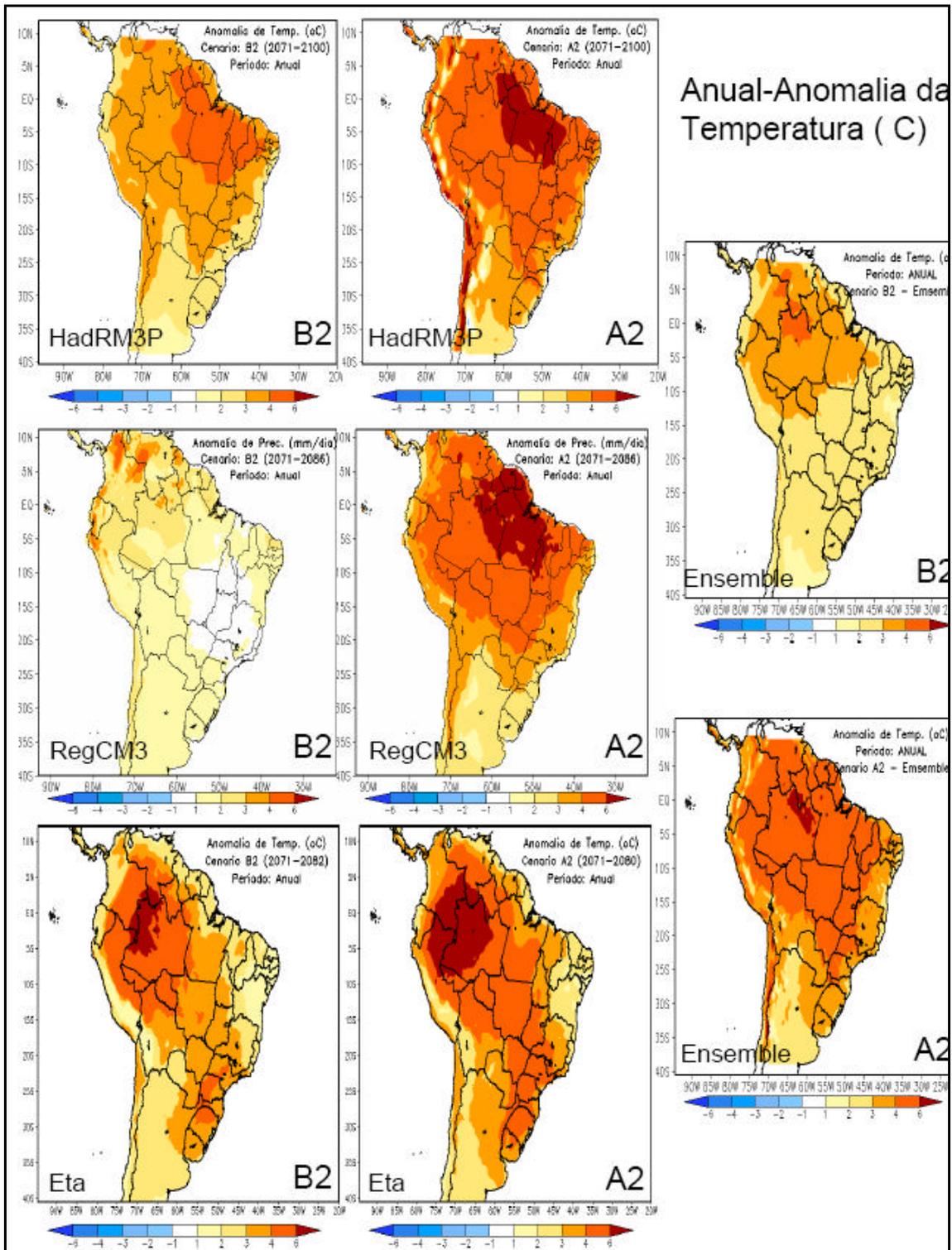


FIGURA 10b: Anomalias anuais médias de temperatura (°C) para o “ensemble” dos modelos regionais (direita) HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura. As anomalias são para o período futuro 2071-2100 em relação ao presente 1961-90.

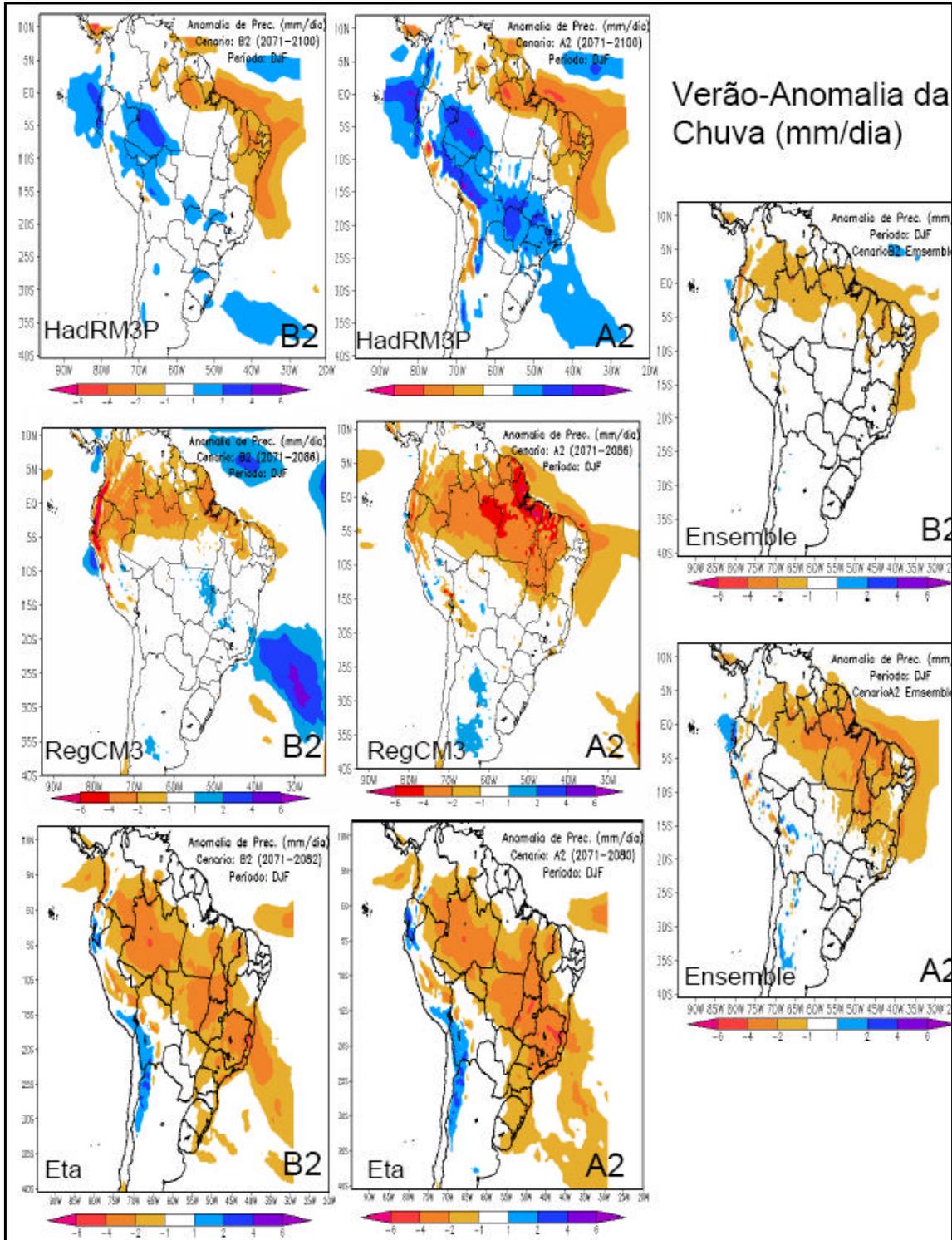


FIGURA 10c: Anomalias sazonais médias de chuva (mm/dia) para verão-DJF do “ensemble” dos modelos regionais (direita) HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura. As anomalias são para o período futuro 2071-2100 em relação ao presente 1961-90.

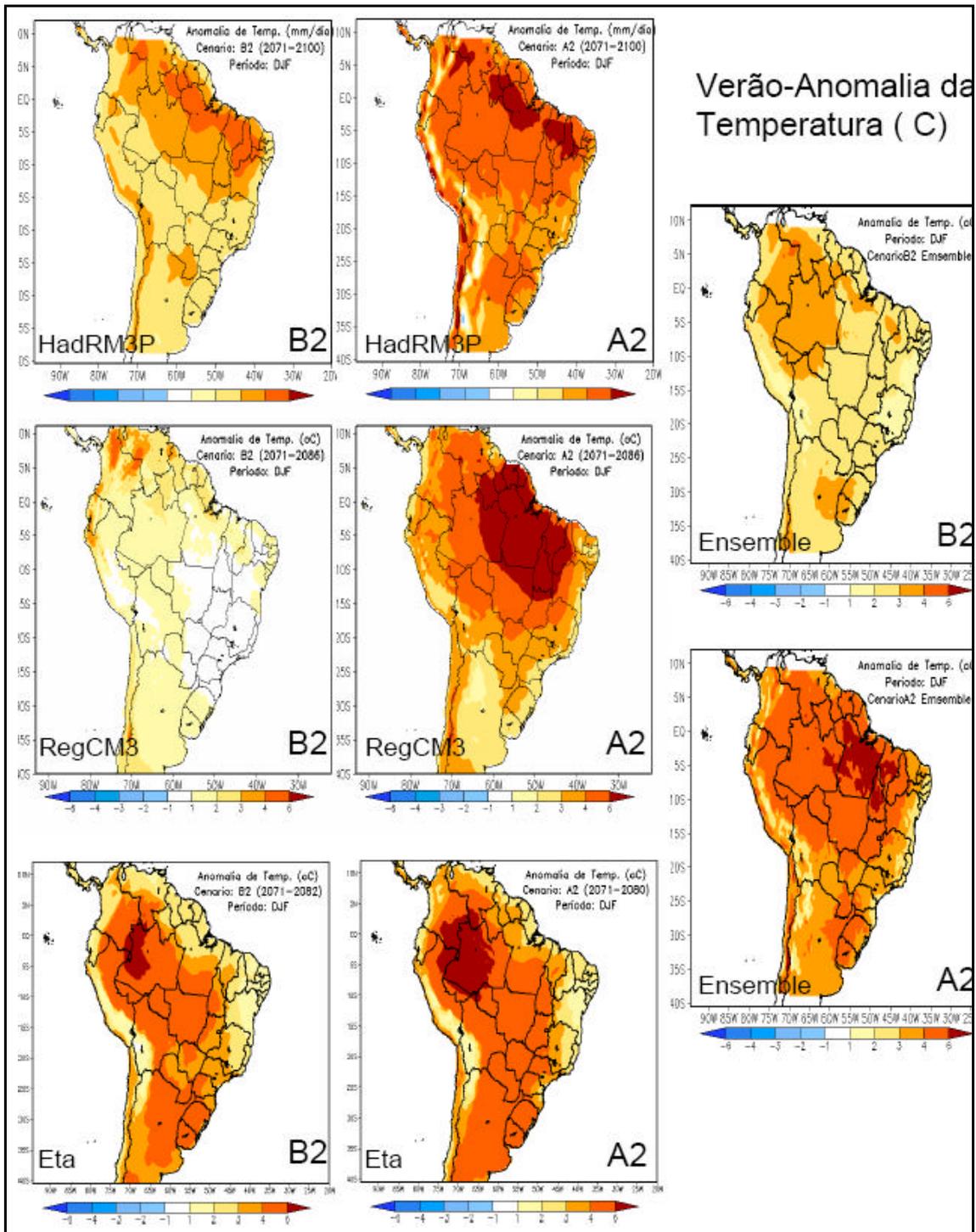


FIGURA 10d: Anomalias sazonais médias de temperatura (°C) para verão-DJF do “ensemble” dos modelos regionais (direita) HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura. As anomalias são para o período futuro 2071-2100 em relação ao presente 1961-90.

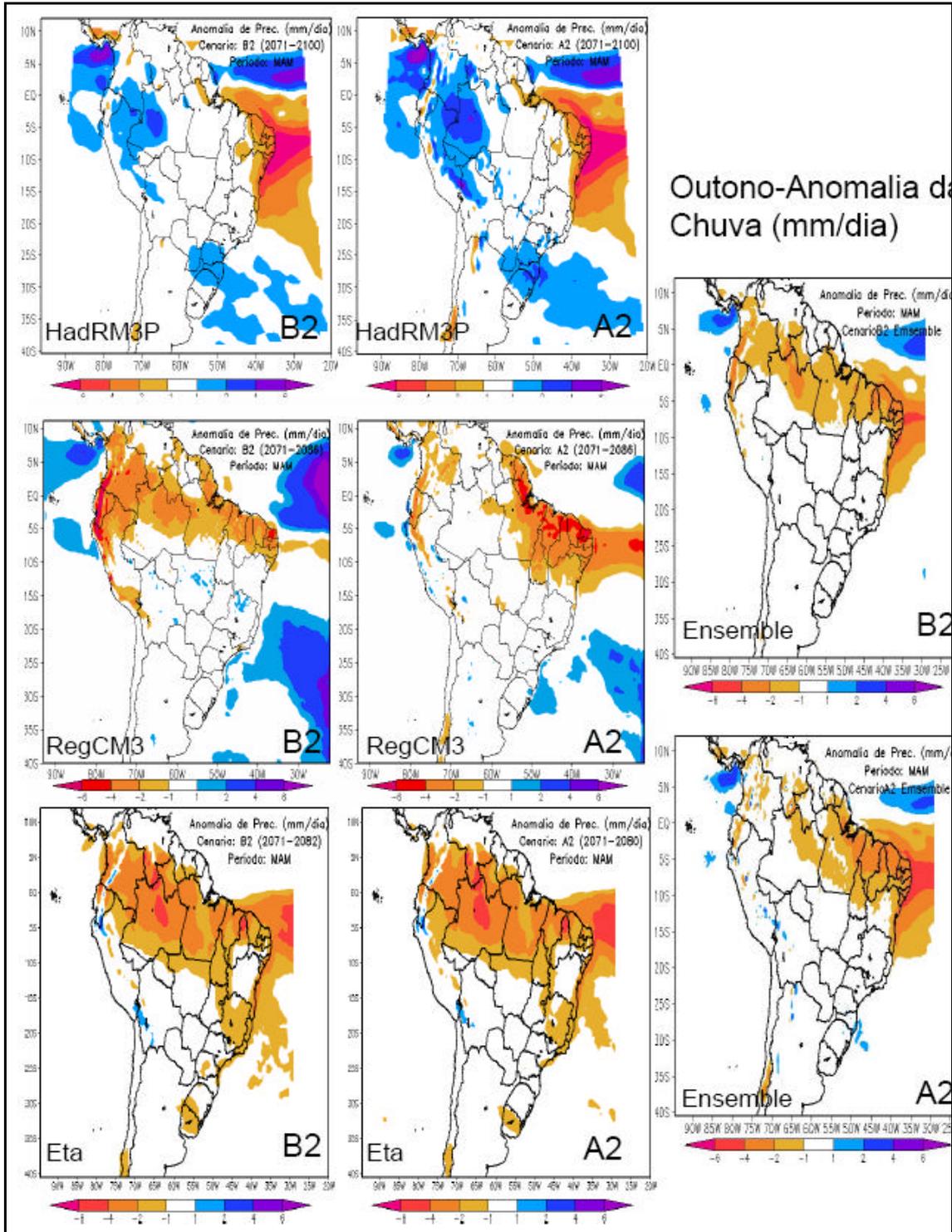


FIGURA 10e: Anomalias sazonais médias de chuva (mm/dia) para outono-MAM do “ensemble” dos modelos regionais (direita) HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura. As anomalias são para o período futuro 2071-2100 em relação ao presente 1961-90.

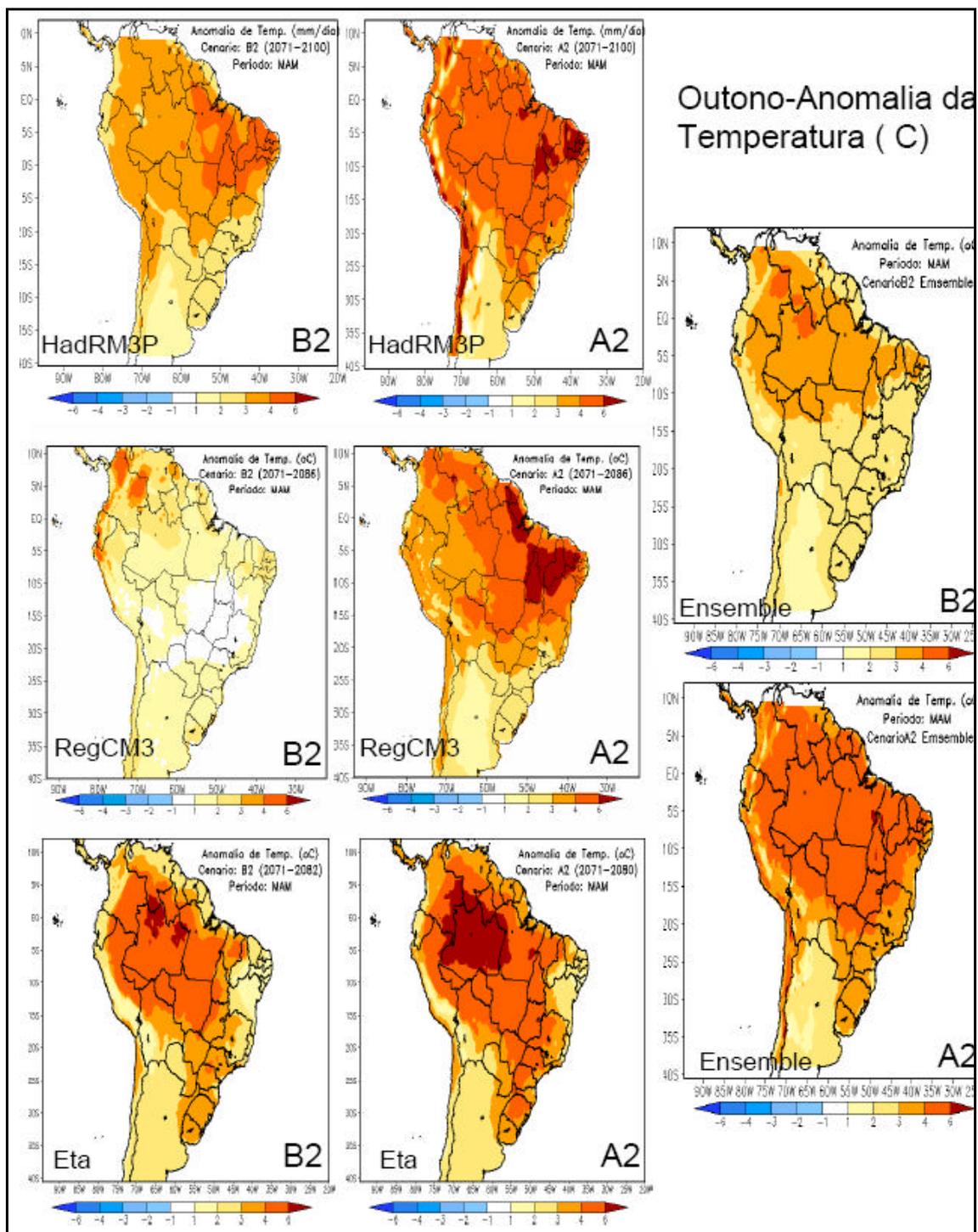


FIGURA 10f: Anomalias sazonais médias de temperatura (°C) para outono - MAM do “ensemble” dos modelos regionais (direita) HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura. As anomalias são para o período futuro 2071-2100 em relação ao presente 1961-90.

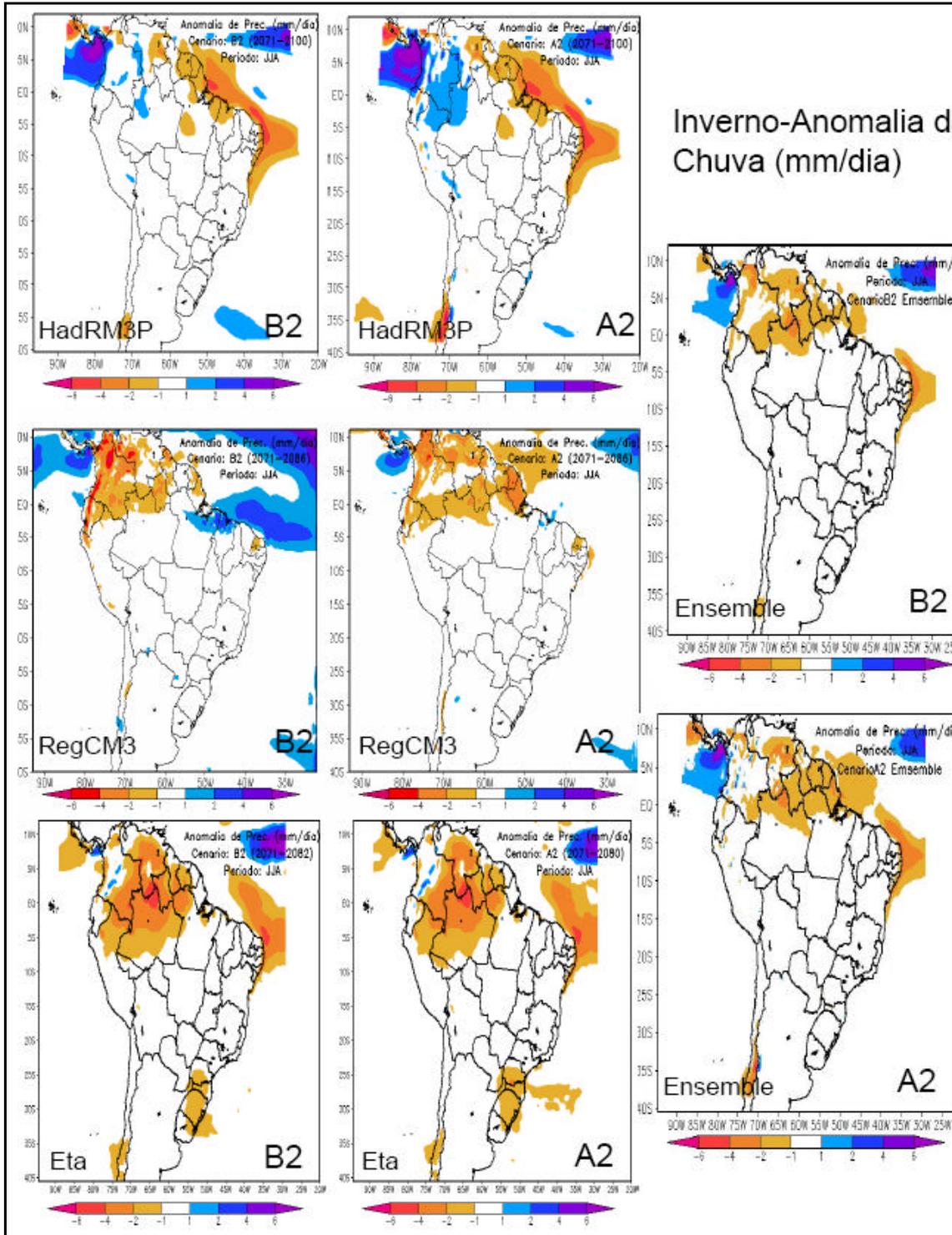


FIGURA 10g: Anomalias sazonais médias de chuva ($^{\circ}\text{C}$) para inverno-JJA do “ensemble” dos modelos regionais (direita) HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura. As anomalias são para o período futuro 2071-2100 em relação ao presente 1961-90.

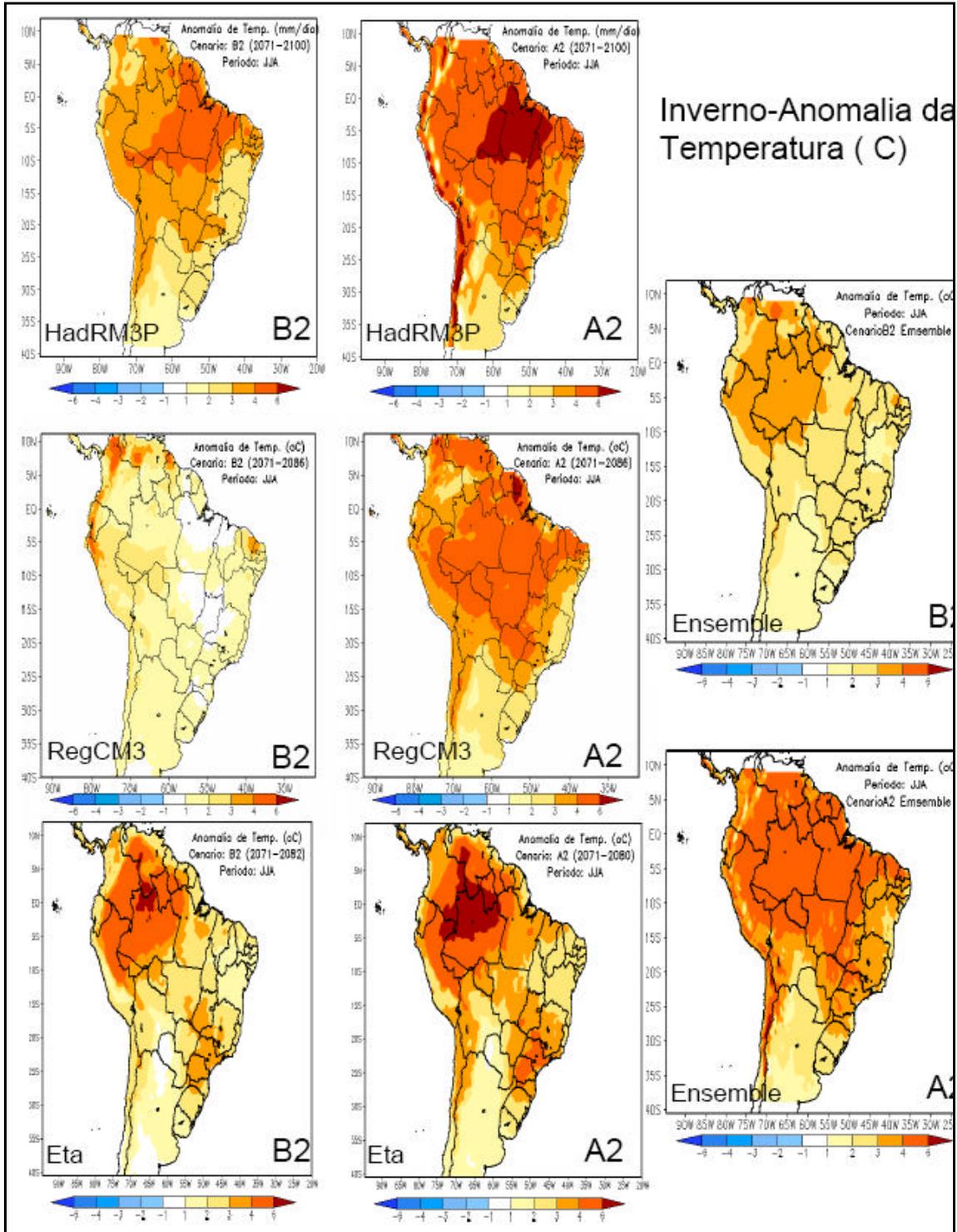


FIGURA 10h: Anomalias sazonais médias de temperatura (°C) para inverno-JJA do “ensemble” dos modelos regionais (direita) HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura. As anomalias são para o período futuro 2071-2100 em relação ao presente 1961-90.

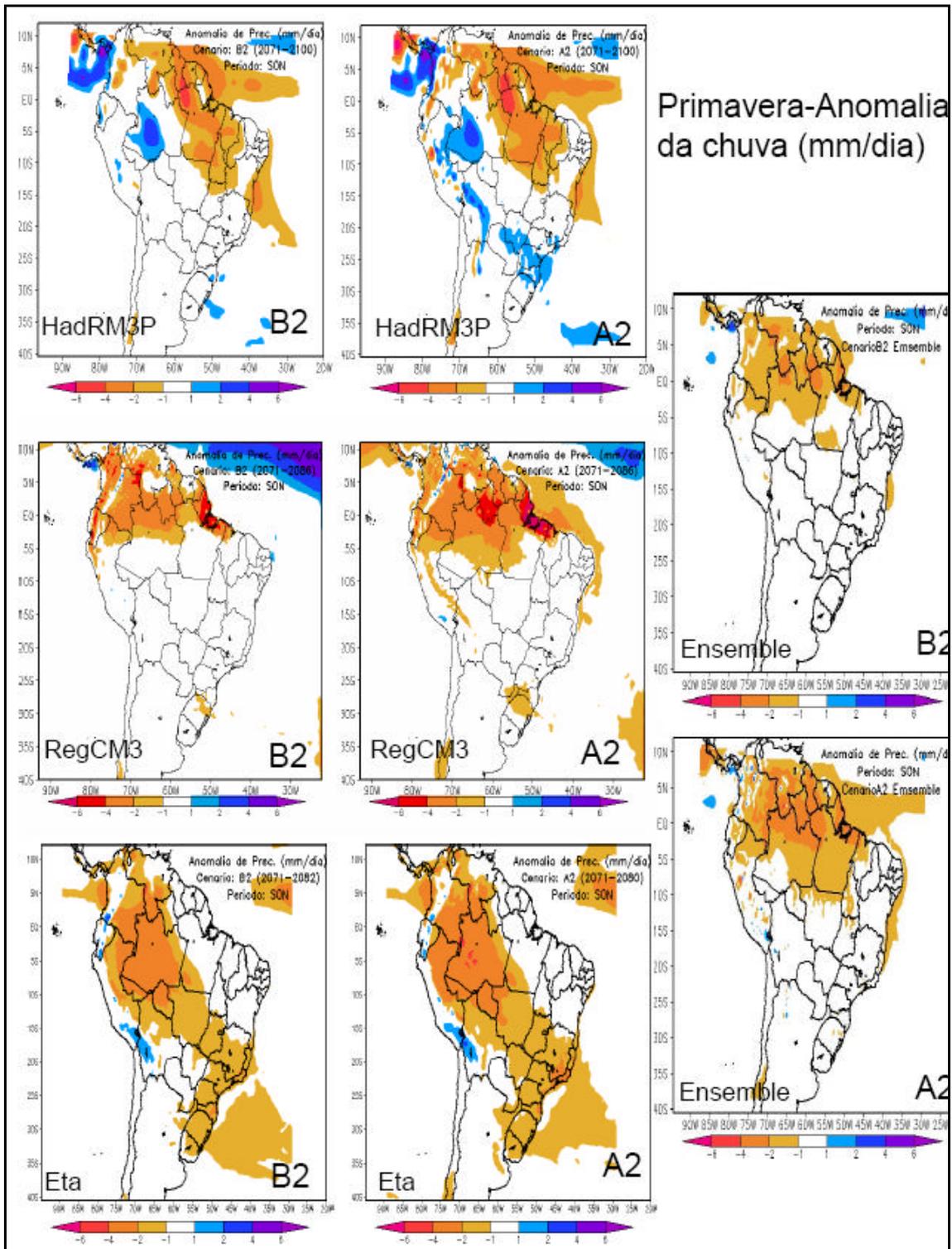


FIGURA 10: Anomalias sazonais médias de chuva (mm/dia) para primavera-SON do “ensemble” dos modelos regionais (direita) HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTec para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura. As anomalias são para o período futuro 2071-2100 em relação ao presente 1961-90.

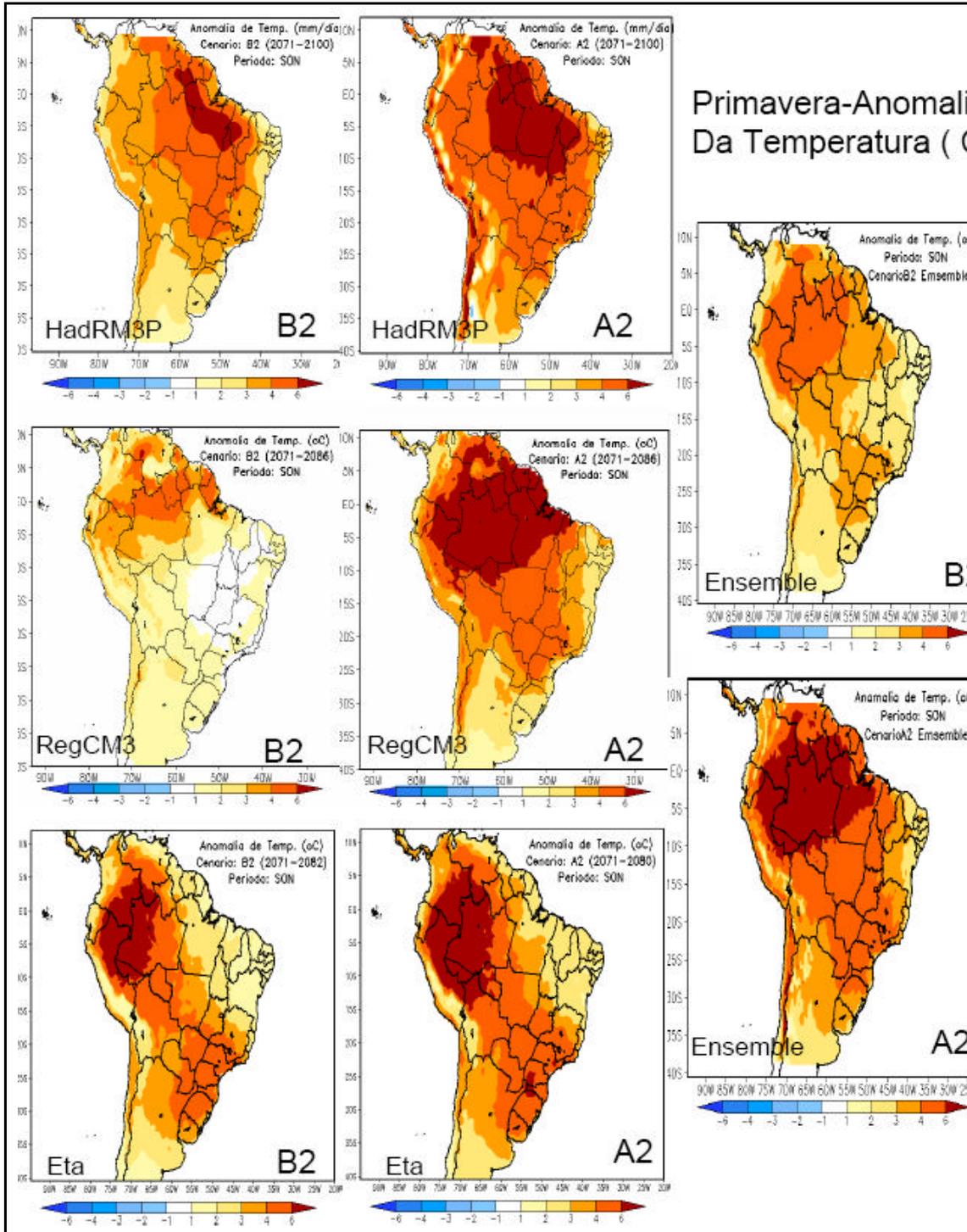


FIGURA 10j: Anomalias sazonais médias de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para primavera-SON do “ensemble” dos modelos regionais (direita) HadRM3P, RegCM3 e ETA/CPTEC para os cenários A2 e B2. A escala de cores dos contornos encontra-se abaixo de cada figura. As anomalias são para o período futuro 2071-2100 em relação ao presente 1961-90.

A Tabela 5 e a Fig 10 mostram que na escala continental, em relação à chuva, a região que apresenta maior confiança nas projeções de clima futuro para 2071-2100 é o Nordeste, especialmente durante o outono, que é o pico da estação chuvosa no Norte e Nordeste. Isto sugere que no futuro a estação chuvosa nesta região possa apresentar chuvas mais fracas, com um alto nível de confiança. Já na região Norte a confiança é média e mostra reduções de chuva a nível anual e sazonal, especialmente no verão e outono. Nas outras regiões o sinal de mudanças é mais fraco e com tendências opostas entre os modelos, e com baixo nível de confiança. As mudanças de sinal tendem a ser mais intensas no cenário A2.

Em relação à temperatura do ar, todos os modelos apresentam maior aquecimento no futuro em todas as regiões do país, especialmente na Amazônia e durante os meses de verão e primavera e maior no cenário A2 em relação a B2. O nível de confiança é maior em todo o Brasil, exceto o do centro oeste onde em algumas áreas no cenário B2 não há mudanças na temperatura. A outra área de anomalias positivas de chuva no clima do futuro, especialmente durante o verão, é a costa Norte do Peru-Ecuador, onde todos os modelos regionais apresentam o mesmo sinal.

Tradicionalmente, temperatura do ar e precipitação são consideradas como indicadores clássicos de mudanças de clima. Porém, é geralmente aceito que mudanças nos padrões de precipitação e chuva e dos eventos extremos podem ter fortes impactos no meio ambiente e na sociedade, ainda mais que as tendências na precipitação acumulada ou na temperatura média a nível anual ou sazonal. As projeções derivadas dos modelos regionais, ainda que possam apresentar algum viés associado ao comportamento do modelo climático global do Hadley Centre (usado como condição de contorno para as integrações com os modelos regionais) projeta climas mais secos e quentes para a Amazônia e Nordeste em comparação com o clima do presente. Estas duas regiões do Brasil tropical podem ser consideradas com as mais vulneráveis a mudanças de clima devido ao aumento na concentração de gases de efeito estufa.

A Fig. 11 sumariza as mudanças de clima no Brasil para os cenários extremos A2 e B2, a nível anual. As projeções médias para o período 2071-2100 para Amazônia variam de 4-8 °C para o cenário pessimista A2, e de 3-5

°C para o cenário otimista B2, com grande variação espacial (Fig. 7). Para o Nordeste, o aquecimento pode chegar até 4 °C no cenário pessimista A2 e até 2-3 °C no cenário otimista B2. No cenário A2 o aquecimento no centro oeste e sudeste podem chegar até 4-6 °C enquanto que o cenário B2 apresenta valores até 2-3 °C. No sul, o cenário A2 sugere aquecimento da ordem de 3-4 °C no cenário A2 e até 2-3 °C no cenário B2. Ainda que o aquecimento seja maior na região tropical da América do Sul para os vários modelos regionais utilizados, as projeções destes modelos diferem sobre onde se dá o maior aquecimento (acima de 8°C): na Amazônia oriental ou na Amazônia ocidental, depende do modelo regional utilizado. Para as regiões sul, sudeste e centro oeste, mesmo se não houver aumento da precipitação, ou até diminuição do total anual, as chuvas poderiam ser mais intensas, individualmente, com possibilidades de temporais mais frequentes, e de ondas de calor mais intensas. Maiores detalhes sobre mudanças de extremos poderão ser achadas no Relatório 5 (Marengo et al. 2007).

As projeções climáticas mostradas na Fig. 11 para os cenários A2 e B2 no período 2071-2100 apresentam consistência com resultados de um estudo recente sobre de mudanças de clima a nível global. O estudo de Baettig et al. (2007) define um índice de mudança de clima (CCI) baseado em projeções sazonais de temperatura e precipitação usando 3 modelos globais do IPCC TAR para os cenários A2 e B2. Este índice CCI não representa impactos das mudanças de clima, representando uma medida da intensidade da futura mudança de clima em relação ao presente. O índice, que varia de 0 a 19 foi calculado para o período 2071-2100, mesmo período usado nos estudos reportados neste relatório.

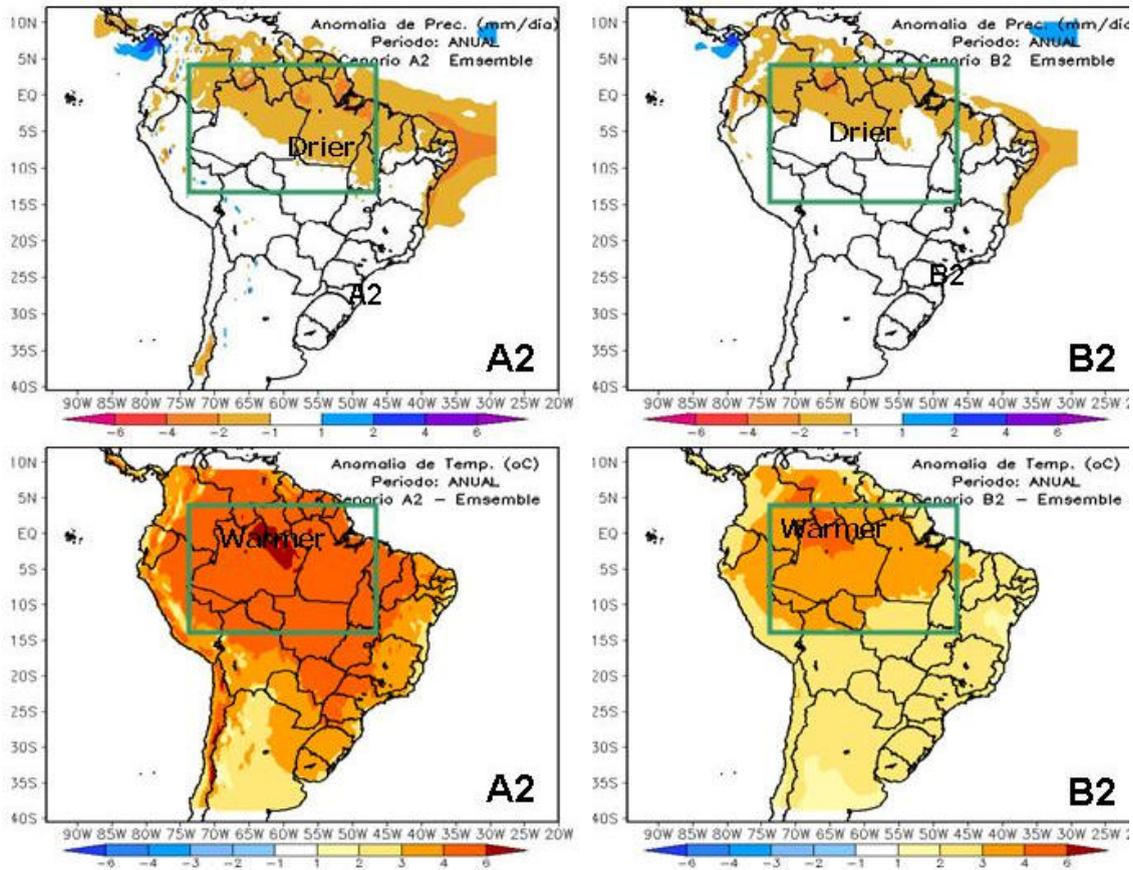


Figura 11. Anomalias anuais de chuva (painel superior, em mm/dia) e temperatura (painel inferior, em C) (para América do Sul, período 2071-2100 em relação a 1961-90, para os cenários IPCC A2 (pessimista) e IPCC B2 (Otimista)). As projeções representam a média aritmética dos cenários produzidos pelos modelos regionais Eta/CPTEC/CPTEC, RegCM3 e HadRM3P (50 km de resolução). Fonte: Relatório 4-Ambrizzi et al. (2007).

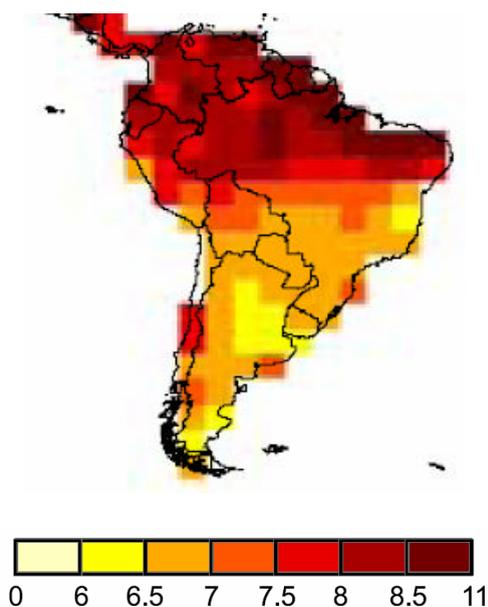


Figura 12. Valores agregados do índice de Mudanças Climáticas CCI na América do Sul, período 2071-2100 em relação a 1961-90. Escala de cor do índice aparece na parte inferior do mapa. Fonte: Baettig et al. (2007).

Os resultados apresentados na Fig. 12 confirmam nossos resultados mostrados na Fig. 11, e nos duas simulações as mudanças seriam conseqüências de aumento na intensidade de extremos climáticos a nível anual e sazonal, especialmente na precipitação mais também na temperatura. Na região tropical, em relação a grandes aumentos na temperatura no futuro, deve ser notado que nos trópicos as altas temperaturas respondem mais fortemente as mudanças na temperatura média que em outras regiões do planeta, porque a amplitude média anual é menor que em latitudes mais altas.

Os resultados deste estudo para América do Sul indicam que as mudanças climáticas mais intensas para o final do Século XXI, relativo ao clima atual vão acontecer na região tropical, especificamente Amazônia Norte de Peru e Equador e no Nordeste do Brasil. No Brasil, o CCI alcança valores entre 7.5 a 11 na Amazônia do oeste e no sertão nordestino. Estas duas regiões constituem o que poderia ser chamado de “climatic change hot spots” e representam as regiões mais vulneráveis do Brasil às mudanças de clima, tanto na componente social (Nordeste) como na componente de biodiversidade (Amazônia).

REFERÊNCIAS

- Alves, L. M.; A. B. C. de Melo; S. C. Chou; P. Nobre. 2000: Estudo comparativo entre a precipitação sazonal simulada pelo modelo Eta/CPTEC e observada sobre o Brasil. Proc. XI Cong. Bras. de Meteorologia, Rio de Janeiro, Brasil, (in CD-ROM), 2000.
- Alves, L. M.; Chou, S. C.; Marengo, J. A. 2004: Avaliação das previsões de chuvas sazonais do modelo Eta/CPTEC climático sobre o Brasil. Proc. XIII Cong. Bras. de Meteorologia, Fortaleza, Brasil, (in CD-ROM), 2004.
- Ambrosi P., Hourcade J.-C., Hallegatte S., Lecocq F., Dumas P., Ha-Duong M., 2003, Optimal control models and elicitation of attitudes towards climate damages, *Environment Modeling and Assessment*, 8, pp. 133-147.
- Anderson, C, Arritt, R, Takle, E, Pan Z, Gutowski W, Otieno F, da Silva R, Caya D, Chirstensen J, Luthi D, gaertner M, Gallardo C, Giorgi F, Hon SY, Jones C, Juan H, Katsfey J, lapenta W, Laprise R, Larson J, Liston G, McGregor J, Pielke R, Roads J, Taylor J 2003: Hydrological processes in regional climate model simulations of the Central United States Flood of June-July 1993. *J. Hydrometeorology*, 4, 584-597.
- Anthes, R. A., 1977: A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model. *Mon. Wea. Rev.*, 105, 270-286.
- Baettig, M., Wild, M., Imboden, M, 2007: A climate change index: Where climate change may be more prominent in the 21st century. *Geophys. Res. Letters*, L01705, doi:10.1029/2006GL028159, 2007
- Berberly, H., Collini, E. 2000: Springtime precipitation and water vapor flux over southeastern South America. *Mon Wea Rev.*, v.128, p.1328-1346, 2000
- Betts, A. K.; Miller, M. J., 1986: A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and arctic air-mass data sets. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 112, 693-709.
- Black, T. L., 1994: The new NMC mesoscale Eta/CPTEC model: Description and forecast examples. *Wea. Forecasting*, 9, 265–278.
- Bougeault, P. 1997: Physical parametrizations for limited Area Models: Some current problems and issues. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1997, v. 63, p. 71-88.
- Boyle, J. S. 1993: Sensitivity of dynamical quantities to horizontal resolution for a climate simulation using the ECMWF (cycle 33) model. *J. Climate*, 1993, v. 6, p. 796-815.
- Camargo, J. S., Zebiak, S. E., DeWitt, D. G., Goddard, L. 2001: Seasonal Comparison of the Response of CCM3.6, ECHAM4.5 and COLA2.0 Atmospheric Models to Observed SSTs. IRI Technical Report 01-01, 6/21/2001.
- Cavalcanti, I, J. Marengo, P. Satyamurty, C.A. Nobre, I. Trosnikov, J. P. Bonatti, A. O. Manzi, T. Tarasova, L.P. Pezzi, C. D’Almeida, G. Sampaio, C.C. Castro, M.B. Sanches, and H. Camargo. 2002: Global climatological features in a simulation using the CPTECCOLA AGCM. *J. Climate*, 2002, v. 15, p. 2965-2988.

- Chou, S. C.; Bustamante, J. F.; Gomes, J. L. 2004: Previsões sazonais utilizando o modelo Eta/CPTEC sobre América do Sul. Proc. XIII Cong. Bras. de Meteorologia, Fortaleza, Brasil, (in CD-ROM), 2004.
- Chou, S. C.; Tanajura, C. A. S.; Xue, Y.; Nobre, C. A. 2002: Validation of the coupled Eta/CPTEC/SSiB model over South America. *Journal Geophysical Research*, v. 107, n. D20, p. doi:10.1029/2000JD000270, Oct. 2002. 34, 37.
- Christensen, J.H., T. Carter, F. Giorgi: 2002: PRUDENCE Employs New Methods to Assess European Climate Change, *EOS*, Vol. 82, p. 147., 2002.
- Cox P., Huntingford C. & Harding R.J. 1998 A canopy conductance and photosynthesis model for use in a GCM land surface scheme. *Journal of Hydrology*, 212-213, pp79-94
- Cox, P., R. Betts, C. Bunton, R. Essery, P.R. Rowntree, and J. Smith, 1999: The impact of new land surface physics on the GCM simulation of climate and climate sensitivity. *Climate Dynamics* 15: 183-203.
- Cox P, Betts RA, Jones CD, Spall SA, Totterdell IJ, 2000: Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature* 408:184-187.
- Cusack, S., J. M. Edwards and J. M. Crowther. 1999: Investigating k-distribution methods for parametrizing gaseous absorption in the Hadley Centre climate model. *J. Geophys. Res.*, 104, 2051-2057, 1999.
- Cusack S., A. Slingo, J.M. Edwards, and M. Wild, 1998: The radiative impact of a simple aerosol climatology on the Hadley Centre GCM. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 124: 2517-2526.
- Davies, H.C., and R.E. Turner. 1977: Updating prediction models by dynamical relaxation: An examination of the technique. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 103, 225-245, 1977.
- Dickinson, R. E., R. M. Errico, F. Giorgi, G. T. Bates. 1989: A regional climate model for the western United States. *Climatic Change*, 1989, v. 15, p. 383-422.
- Dickinson, R. E., A. Henderson-Sellers, and P. J. Kennedy, 1993: Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as coupled to the NCAR Community Climate Model. NCAR Tech. Note NCAR/ TN-3871STR, 72 pp.
- Douglas, M. W., Nicolini, M., Saulo, C. 1999: The Low-level jet at Santa Cruz, Bolívia during January-March 1998, pilot balloon observations and model comparisons. In *Extended Abstracts of the 10th Symposium on Global Change Studies*, 10-15 de Janeiro de 1999, Anais. Dallas, Texas, p.223-226, 1999
- Druyan, L. M. and M. Fulakeza. 2002: Dynamic downscaling of Seasonal Climate Predictions over Brazil. *J. Climate*, 2002, v. 15, p. 3411-3426.
- Edwards, J.M. and A. Slingo, 1996: Studies with a flexible new radiation code. I: Choosing a configuration for a large scale model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 122: 689-719.
- Fels, S. B., and M. D. Schwarzkopf, 1975: The simplified exchange approximation: A new method for radiative transfer calculations. *J. Atmos. Sci.*, 32, 1475-1488.
- Fernandez, J. P. R. . CPTEC's Climate simulations over South America: A preliminary comparison between the Regional Model ETA and RegCM. In:

- Workshop on the Theory and Use of Regional Climate Models, 2003, Trieste. Workshop on the Theory and Use of Regional Climate, 2003.
- Fernandez, J. P. R. . Ondas Quase-estacionárias no Hemisfério Sul: Observações e Simulações Climáticas sobre América do Sul, Tese Doutorado em Meteorologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, Brasil. 2004.
- Fernandez, J. P. R. ; Franchito, S. H. ; Rao, V. B. 2006a: . Simulation of the Summer Circulation over South America by two Regional Climate Models. Part I: Mean Climatology. *Theoretical and Applied Climatology*, Austria, v. 86, p. 243-256.
- Fernandez, J. P. R. ; Franchito, S. H. ; Rao, V. B. 2006b: . Simulation of the Summer Circulation over South America by two Regional Climate Models. Part II: A comparison between 1997/1998 El Niño and 1998/1999 La Niña events. *Theoretical and Applied Climatology*, Austria, v. 86, p. 257-266.
- Giorgi, F.; M. R. Marinucci; G. T. Bates, 1993a: Development of a second-generation regional climate model (RegCM32). Part I: Boundary-layer and radiative transfer processes. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 2749-2813.
- Giorgi, F., M. R. Marinucci, G. T. Bates, 1993b: Development of a second-generation regional climate model (RegCM32). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. *Mon. Wea. Rev.*, 121,2814-2832.
- Giorgi, F. 1990: On the simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *Journal of Climatology*, 3, 941-963, 1990.
- Giorgi, F., B. Hewitson, J. Christensen, C. Fu, R. Jones, M. Hulme, L. Mearns, H. Von Storch and P. Whetton. 2001: Regional climate information - evaluation and projections. In IPCC WG1 TAR, 2001.
- Giorgi, F.; Marinucci, M. R. 1991: Validation of a regional atmospheric model over Europe: Sensitivity of wintertime and summertime simulations to selected physics parameterizations and lower boundary conditions. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 117, 1171-1206, 1991.
- Giorgi, F.; Mearns, L. O. 1999: Introduction to special section: Regional climate modeling revisited - *Journal of Geophysical Research*, 104(D6), 6335-6352, 1999.
- Giorgi, F.; Shields C. 1999: Tests of precipitation parameterizations available in latest version of NCAR regional climate model (RegCM) over continental United States. *Journal of Geophysical Research*, 104, 6353-6375, 1999.
- Gordon, C., Cooper, C., Senior, C., Banks, H., Gregory, J., Johns, T., Mitchell, J. and Wood, R. 2000: The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, 16: 147-168, 2000.
- Gregory, D. A 1995: consistent treatment of the evaporation of rain and snow for use in large-scale models. *Mon. Weather Rev.*, 123, 2716-2732, 1995.
- Gregory, D. and Allen S. 1991: The effect of convective scale downdrafts upon NWP and climate simulations. *Ninth conference on numerical weather prediction*. Denver, Colorado, Amer Met Soc, 122-123, 1991.
- Gregory, D. and Morris, D. 1996: The sensitivity of climate simulations to the specification of mixed phase clouds. *Clim Dyn.*, 12, 641-651, 1996.

- Gregory, D., and P. R. Rowntree. 1990: A mass-flux convection scheme with representation of cloud ensemble characteristics and stability dependent closure. *Mon. Wea. Rev.*, 118:1483-1506, 1990.
- Grell, G. A., 1993: Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 764-787.
- Horel, J. D.; Pechmann, J. B.; Hahmann, A. N.; Gleisler, J. E. 1994: Simulations of the Amazon basin circulation with a regional model. *Journal of Climate*, v. 7, n. 1, p. 56-71, 1994.
- Hudson, D. A. and R. G. Jones. 2002: Regional climate model simulations of present-day and future climates of southern Africa. Hadley Centre Technical Note 39, Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Office, Bracknell, U.K. 2002.
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC 1996a: Climate Change 1995: The Science of Climate Change-Contribution of Working Group 1 to the IPCC Second Assessment Report. J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattemberg and K. Maskell (Eds.) Cambridge Univ. Press. 1996.
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC 1996b: Climate Change 1995: The Science of Climate Change-Summary for Policymakers and Technical Summary of the Working Group I Report. Cambridge Univ. Press. 1996. 56 pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC (2001a) Climate Change 2001: The Scientific Basis-Contribution of Working Group 1 to the IPCC Third Assessment Report. Cambridge Univ. Press. 2001.
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC 2001b: Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability- Contribution of Working Group 2 to the IPCC Third Assessment Report. Cambridge Univ. Press. 2001.
- Janjic, Z. I., 1994: The step-mountain Eta/CPTEC coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927-945.
- Johns TC, Carnell RE, Crossley JF, Gregory JM, Mitchell JFB, Senior CA, Tett SFB, Wood RA 1997: The second Hadley Centre coupled ocean-atmosphere GCM: model description, spinup and validation. *Clim Dyn* 13: 103±134
- Jones, R., Murphy, J., Hassell, D. and Taylor, R. 2001: Ensemble mean changes in a simulation of the European climate of 2071-2100 using the new Hadley Centre regional modelling system HadAM3H/HadRM3H. DEFRA Report 2/2/01, Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Office, Bracknell, U.K, 2001.
- Jones, R.G.; Noguer, M., Hassell, D.C., Hudson, D., Wilson, S.S., Jenkins, G.J. and Mitchell, J.F.B. 2004: Generating high resolution climate change change scenarios using PRECIS. Met Office Hadley Centre, Exeter, Uk, 40pp, April 2004.
- Kato, H.; Hirakuchi, H.; Nischizawa, K.; Giorgi, F. 1999: Performance of NCAR RegCM in the simulation of june and january climates over eastern Asia and the high-resolution effect of the model. *Journal of Geophysical Research*, 104(D6), 6455-6476, 1999.

- Kiehl, J.T., J.J. Hack, G.B. Bonan, B.A. Boville, B.P. Briegleb, D.L. Williamson, and P.J. Rasch, 1996: Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3), *NCAR Tech. Note*, NCAR/TN-420+STR, 152 pp.
- Lacis, A. A., and J. E. Hansen, 1974: A parameterization of the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 31, 118–131.
- Liu, Y.; Giorgi, F.; Washington, W. M. 1994: Simulation of summer monsoon climate over east Asia with an NCAR Regional Climate Model. *Monthly weather review*, 122, 2331-2348, 1994.
- Marengo, J., I.F.A. Cavalcanti, P. Satyamurty, I. Trosnikov, C.A. Nobre, J.P. Bonatti, H. Camargo, G. Sampaio, M.B. Sanches, A. O. Manzi, C. A. C. Castro, C. D'almeida, L. P. Pezzi, L. Candido. 2003: Assessment of regional seasonal rainfall predictability using the CPTEC/COLA atmospheric GCM. *Climate Dynamics*, 21, 459-475, 2003.
- Mellor, G. L., and T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, 851–875.
- Mesinger, F., Z. I. Janjic, S. Nickovic, D. Garilov, and D. G. Deaven, 1988: The step-mountain coordinate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of an Appalachian redevelopment. *Mon. Wea. Rev.*, 116, 1493–1518.
- Mcgregor, J.L., Walsh, K.J., Katzfey, J.J. 1993: Nested modelling for regional climate studies. *Modelling change in environmental systems*. Chichester: Wiley. p.367-386, 1993.
- Menéndez, C. G., A. C. Saulo, Z. X. Li. 2001: Simulation of South American wintertime climate with a nesting system. *Clim. Dyn.* 17:219-231, 2001.
- Misra, V.; Dirmeyer, P. A.; Kirtman, B. P.; Juang, H.-M. H.; Kanamitsu, M. 2002: Regional simulation of interannual variability over South America. *Journal Geophysical Research*, v. 107, n. D20, p. doi:10.1029/2001JD900216, 2002.
- Misra, V., P. A. Dirmeyer, B. P. Kirtman. 2003: Dynamic Downscaling of Seasonal Simulation over South American. *J. Climate*, 2003, 16, 103-117.
- Nicolini, M., P. Salio, J. J. Katzfey, J. L. McGregor, A. C. Saulo. 2002: January and July regional climate simulation over South American. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107, NO. D22, 4637.
- Nobre P.; Malagutti, M. 2004: Uma avaliação do modelo de circulação geral do CPTEC para estudos de modelagem acoplada oceano-atmosfera. XIII Cong. Bras. de Meteorologia, Fortaleza, Brasil, (in CD-ROM), 2004.
- Nobre, P.; Moura, A. D.; Sun, L. 2001: Dynamical downscaling of seasonal climate prediction over Nordeste Brazil with ECHAM3 and NCEP regional spectral model at IRI. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 82, n. 12, p. 2787-2796, 2001.
- Pal, J.S., E.E. Small, and E.A.B. Eltahir, 2000: Simulation of regional-scale water and energy budgets: Representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM3. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 105 (D24), 29579-29594.
- Pisnichenko, I.A., T.A. Tarasova, J.P.R. Fernandez, and J. Marengo, 2006: Validation of the ETA/CPTEC WS regional climate model driven by boundary conditions from the HADAM3H over South America. *Proceedings of 8 ICSHMO*, Foz do Iguaçu, Brazil, April 24-28, 2006, p. 595-597.

- Pope, V. D., M. L. Gallani, P. R. Rowntree and R. A. Stratton, 2000: The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model -- HadAM3. *Climate Dynamics*, 16: 123-146.
- PRECIS 2002: PRECIS-Providing Regional Climates for Impacts Studies. The Hadley Centre Regional Climate Modelling system. Hadley Centre, Exeter, UK. 29 pp.
- Saulo, C., Nicolini, M., Chou S. C. 2000: Model characterization of the South American low-level flow during the 1997-98 spring-summer season. *Climate Dynamics*. v.16, p.867-881, 2000.
- Seluchi, M. E.; Chou, S. C. 2001: Evaluation of two Eta/CPTEC Model versions for weather forecast over South America. *Geofísica Internacional*, v. 40, n 3 p. 219-237, 2001.
- Seth, A.; Rojas, M. 2003: Simulation and sensitivity in a nested modeling system for South America. Part I: reanalysis boundary forcing. *Journal of Climate*, v. 16, n. 15, p. 2437-2453, 2003.
- Senior, C. and Mitchell, 1993: J. F. B. CO₂ and climate: The impact of cloud parametrization. *J. Clim.* 6: 393-418, 1993.
- Small, E. E.; Giorgi, F.; Sloan, L. C. 1999: Regional climate model simulation of precipitation in central Asia: Mean and interannual variability. *Journal of Geophysical Research*, 104(D6), 6563-6582, 1999.
- Smith, R. N. B. 1990: A scheme for predicting layer clouds and their water content in a general circulation model. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 116:435-460, 1990.
- Souza, E.B. & Ambrizzi, T. 2003: "Pentad Precipitation Climatology over Brazil and the Associated Atmospheric Mechanisms". *Climanálise*. p. 1-40 (disponível eletronicamente no endereço: <http://tucupi.cptec.inpe.br/products/climanalise/artigos/artcien2.shtml>.)
- Stratton RA 1999: A high resolution AMIP integration using the Hadley Centre model HadAM2b. *Clim Dyn* 15: 9±28
- Sun, L.; Semazzi, F. H. M.; Giorgi, F.; Ogallo, L. 1999: Application of the NCAR regional climate model to eastern Africa: 1- Simulation of the short rains of 1988. *Journal of Geophysical Research*. 104(D6), 6529-6548, 1999.
- Sun, L.; Moncunill, D. F.; Li, H.; Moura, A. D.; Filho, F. de A. de S. 2005: Climate Downscaling over Nordeste, Brazil, Using the NCEP RSM97. *J. Climate*, v. 18, p. 551–567, 2005.
- Takle, E, Gutowski W, Arritt R, Pan Z, Anderson C, da Silva R, Caya D, Chen SY, Giorgi F, Christensen J, Hong SY, Juan H, Katzfey, J, Lapenta, W, Laprise R, Liston G, Lopez P, McGregor J, Pielke R, Roads J 1999: Project to Intercompare Regional Climate Simulations (PIRCS): Description and initial results. *J. Geophys Res.*, 104, 19443-19461.
- Tanajura, C. A. S. 1996: Modeling and analysis of the South American summer climate, 1996. Ph.D. diss. University of Maryland, College Park Maryland, 1996.
- Teixeira, F. V. B., C. A. S. Tanajura, E. M. Toledo. 2002: An investigation of the SACZ with extended simulations of the atmospheric model RAMS. *Rev. Bras. Meteor.*, 17, 83-91, 2002.
- Vernekar, A. D.; Kirtman, B. P.; Fennessy, M. J. 2003: Low level jets and their effects on the South America summer climate as simulated by the NCEP Eta/CPTEC model. *Journal of Climate*, v. 16, n. 2, p. 297-311, 2003.

- Wilby, R. L., and Wigley, T. M. L. 1997: Downscaling general circulation model output: A review of methods and limitations. *Prog. Phys. Geogr.*, 21, 530-548, 1997.
- Wilby, R.L., Wigley, T.M.L., Conway, D., Jones, P.D., Hewitson, B.C., Main, J., Wilks, D.S. 1998: Statistical downscaling of general circulation model output: a comparison of methods. *Water Resources Research*, Washington, v.34, n.11, p.2995-3008, 1998.
- Wilson, M. F., and A. Henderson-Sellers. 1985: A Global Archive of Land Cover and Soils Data for Use in General Circulation Climate Models. *Journal of Climatology*, 5, p.199-143, 1985.
- Wilson, S., Hassell, D., Hein D., Jones., R., Taylor, R. 2005: Installing and using the Hadley Centre modelling system, PRECIS. October 2005, Exeter, UK. 135 pp.
- Zorita, E. and von Storch, H. 1999: The analog method as a simple statistical downscaling technique: Comparison with more complicated methods. *J. Clim.*,12, 2474-2489, 1999.



Ministério da
Ciência e Tecnologia

