

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

EDUARDO MARCOS DE JESUS

**Simulações climáticas regionais para o CORDEX sobre a América
do Sul e impactos das frentes frias na climatologia simulada**

**SÃO PAULO
2014**

EDUARDO MARCOS DE JESUS

Simulações climáticas regionais para o CORDEX sobre a América do Sul e impactos das frentes frias na climatologia simulada

Dissertação apresentada ao Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Programa: Meteorologia

Orientador: Profa. Dr. Rosmeri Porfírio da Rocha

Versão corrigida a original encontra-se na unidade

**SÃO PAULO
2014**

AGRADECIMENTOS

A minha orientadora Dra. Rosmeri Porfírio da Rocha pela paciência, conhecimento transmitido e amizade.

Aos amigos que me ajudaram e apoiaram nessa jornada, em especial, José Leandro, Maria Laura, André Teruya, Profa. Dr. Clara Iwabe e a Livia Dutra pelo suporte com o conjunto de dados utilizados neste trabalho.

A Doutora Marta Lopart que compartilhou muitos conhecimentos comigo e disponibilizou as rodadas do RegCM4 para o desenvolvimento do trabalho de mestrado.

À minha família pelo incentivo e apoio, em especial, a minha mãe e irmãs Elzi, Elisa e minha namorada Andreia, que me apoiaram nos momentos mais difíceis.

Em memória do meu Pai o maior exemplo de minha vida, pela sua perseverança, honestidade e força de vontade. Apesar de todas as dificuldades que enfrentou na vida nunca se entregou, como diziam alguns, “Não existe distâncias para o Sr. Raimundo!” Meu Pai jamais me esquecerei do Senhor, viverá para sempre em minha memória!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE SIGLAS.....	ix
RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xii
1 INTRODUÇÃO.....	01
1.1 Frontogênese e Frentes Frias.....	06
1.2 Objetivo.....	09
2 METODOLOGIA.....	11
2.1 Dados.....	11
2.2 Modelo.....	11
2.3 Configuração da simulação.....	12
2.4 Critério objetivo de rastreamento de FF.....	14
3 CLIMATOLOGIA E VALIDAÇÃO DO MODELO.....	15
3.1 Precipitação.....	15
3.2 Temperatura.....	18
4 FF SOBRE SÃO PAULO E RIO GRANDE.....	23
4.1 Validação do Critério de identificação de FF.....	23
4.2 Composições RG.....	29
4.3 Composições SP.....	70
5 CONCLUSOES E TRABALHOS FUTUROS.....	103
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107
7 APENDICE.....	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Modelo conceitual de ciclogênese no Hemisfério Norte elaborado por Bjerkness (1919).

Figura 1.2 – Modelo conceitual do ciclo de vida de um ciclone no Hemisfério Norte elaborado por Bjerkness (1922).

Figura 2.3.1 – Domínio da simulação (América do Sul) juntamente com as regiões definidas para as análises.

Figura 3.1.1 – Precipitação média (mm/dia) para o período de 1979 a 2009: (a) DJF (b) JJA (c) MAM (d) SON, onde as figuras da esquerda são para o RegCM4, centro CRU e direita diferença RegCM4-CRU.

Figura 3.1.2 – Temperatura média (°C) para o período de 1979 a 2009: (a) Verão (DJF) (b) Inverno (JJA) (c) Outono (MAM) (d) Primavera (SON), onde as figuras da esquerda são para o RegCM4, centro CRU e direita diferença RegCM4-CRU.

Figura 3.1.3 – Série temporal da precipitação para as três diferentes regiões selecionadas (a) Verão austral (DJF) (b) Inverno austral (JJA) (c) Outono austral (MAM) (d) Primavera austral (SON) representada pelo RegCM4.

Figura 4.1.1 – Séries temporais das variáveis: vento meridional (a), vento zonal (b), temperatura do ar a 2 metros (c) e umidade relativa (d), precipitação (e), velocidade do vento (f) e pressão de superfície (g) desde dois antes (i-2) até dois dias depois (i+2) da passagem das FF no IAG-USP, precipitação observada no CPC e simulada pelo RegCM4 na primavera e inverno.

Figura 4.1.2 – Séries temporais das variáveis: vento meridional (a), vento zonal (b), temperatura do ar a 2 metros (c) e umidade relativa (d), precipitação (e), velocidade do vento (f) e pressão de superfície (g) desde dois antes (i-2) até dois dias depois (i+2) da passagem das FF na FURG-RS, precipitação observada no CPC e simulada pelo RegCM4 na primavera e inverno.

Figura 4.2.1 – Anomalias de precipitação (mm/dia) no inverno para CFF aplicado na cidade de Rio Grande – RS no período de 1991 - 2009, coluna da esquerda estão as anomalias com dados do CPC e na coluna da direita anomalias no RegCM4. Os itens (a)-(b) correspondem ao dia menos dois, (c)-(d) dia menos um, (e)-(f) dia da passagem da FF e (g)-(h) dia mais um.

Figura 4.2.2 – Idem à Figura 4.2.1, mas para anomalia de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$).

Figura 4.2.3 – Idem à Figura 4.2.1, mas para anomalia de pressão em superfície (hPa).

Figura 4.2.4 – Campo médio de linhas de corrente e isotacas (sombreado em m/s) em 850 hPa no inverno para CFF aplicado na cidade de Rio Grande – RS no período de 1991 - 2009, coluna da esquerda estão os campos médios com dados da ERA-Interim e na coluna da direita campos médios no RegCM4. Os itens (a)-(b) correspondem ao dia menos dois, (c)-(d) dia menos um, (e)-(f) dia da passagem da FF e (g)-(h) dia mais um.

Figura 4.2.5 – Anomalia de linhas de corrente e velocidade do vento (m/s) em 850 hPa no inverno para CFF aplicado na cidade de Rio Grande – RS no período de 1991 - 2009, coluna da esquerda estão as anomalias com dados da ERA-Interim e na coluna da direita anomalias do RegCM4. Os itens (a)-(b) correspondem ao dia menos dois, (c)-(d) dia menos um, (e)-(f) dia da passagem da FF e (g)-(h) dia mais um.

Figura 4.2.6 – Idem à Figura 4.2.1, mas para umidade específica (g/kg) em 850 hPa.

Figura 4.2.7 – Idem à Figura 4.2.4, mas para o nível de 200 hPa.

Figura 4.2.8 – Idem à Figura 4.2.5, mas para o nível de 500 hPa.

Figura 4.2.9 – Diferença da média de precipitação entre RegCM4 e CPC no inverno nos dias da passagem das FF aplicando o CFF na cidade de Rio Grande-RS no período de 1991-2009. (a) Dois dias antes da passagem da FF, (b) um dia antes da passagem da FF, (c) dia da passagem da FF, (d) um dia depois da passagem da FF e (e) dois dias depois da passagem da FF.

Figura 4.2.10 – Idem à Figura 4.2.1, mas para a primavera.

Figura 4.2.11 – Idem à Figura 4.2.2, mas para a primavera.

Figura 4.2.12 – Idem à Figura 4.2.3, mas para a primavera.

Figura 4.2.13 – Idem à Figura 4.2.4, mas para primavera.

Figura 4.2.14 – Idem à Figura 4.2.5, mas para a primavera.

Figura 4.2.15 – Idem à Figura 4.2.6, mas para primavera.

Figura 4.2.16 – Idem à Figura 4.2.7, mas para primavera.

Figura 4.2.17 – Idem à Figura 4.2.8, mas para a primavera.

Figura 4.2.18 – Idem à Figura 4.2.9, mas para a primavera.

Figura 4.3.1 – Anomalia da variável precipitação no inverno para CFF aplicado na cidade de São Paulo – SP no período de 1979 - 2009, coluna da esquerda estão as anomalias com dados do CPC e na coluna da direita anomalias do RegCM4. Os itens (a)-(b) correspondem ao dia menos um, (c)-(d) dia da passagem da FF e (e)-(f) dia mais um.

Figura 4.3.2 – Idem à Figura 4.3.1, mas para anomalias de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$).

Figura 4.3.3 – Idem à Figura 4.3.1, mas para anomalias de pressão em superfície (hPa).

Figura 4.3.4 – Campo médio de linhas de corrente e isotacas (sombreada em m/s) em 850 hPa no inverno para CFF aplicado na cidade de São Paulo – SP no período de 1979 - 2009, coluna da esquerda estão os campos com dados da ERA-Interim e na coluna da direita campos do RegCM4. Os itens (a)-(b) correspondem ao dia menos um, (c)-(d) dia da passagem da FF e (e)-(f) dia mais um.

Figura 4.3.5 – Anomalia de linha de corrente e velocidade do vento (m/s) em 850 hPa no inverno para CFF aplicado na cidade de São Paulo – SP no período de 1979 - 2009, coluna da esquerda estão as anomalias com dados da ERA-Interim e na coluna da direita anomalias do RegCM4. Os itens (a)-(b) correspondem ao dia menos um, (c)-(d) dia da passagem da FF e (e)-(f) dia mais um.

Figura 4.3.6 – Idem à Figura 4.3.1, mas para umidade específica (g/kg) em 850 hPa.

Figura 4.3.7 – Idem à Figura 4.3.4, mas para o nível de 200 hPa.

Figura 4.3.8 – Idem à Figura 4.3.5, mas para o nível de 500 hPa.

Figura 4.3.9 – Diferença da média de precipitação entre RegCM4 e CPC no inverno nos dias da passagem das FF aplicando o CFF na cidade de São Paulo-SP no período de 1979-2009. (a) Dois dias antes da passagem da FF, (b) um dia antes da passagem da FF, (c) dia da passagem da FF, (d) um dia depois da passagem da FF e (e) dois dias depois da passagem da FF.

Figura 4.3.10 – Idem à Figura 4.3.1, mas para a primavera.

Figura 4.3.11 – Idem à Figura 4.3.2, mas para primavera.

Figura 4.3.12 – Idem à Figura 4.3.3, mas para a primavera.

Figura 4.3.13 – Idem à Figura 4.3.4, mas para primavera.

Figura 4.3.14 – Idem à Figura 4.3.5, mas para a primavera.

Figura 4.3.15 – Idem à Figura 4.3.6, mas para primavera.

Figura 4.3.16 – Idem à Figura 4.3.7, mas para primavera.

Figura 4.3.17 – Idem à Figura 4.3.8, mas para a primavera.

Figura 4.3.18 – Idem à Figura 4.3.9, mas para a primavera.

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1.1 – Número de passagens de frentes frias simuladas pelo RegCM4 e observadas no IAG-USP (1979-2008) e FURG-RS (1991-2008).

LISTA DE SIGLAS

AS	América do Sul
ASA	Alta Subtropical do Atlântico Sul
BATS	Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme
CCM3	Community Climate Model version 3
CFF	Critério de identificação de Frentes Frias
CMAP	Climate prediction Center – Merged Analysis of Precipitation
CORDEX	Coordinated Regional Downscaling Experiment
CPC	Climate prediction Center
CRU	Climate Research Unit
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization
DARLAM	Division of Atmospheric Research limited area model
DJF	Verão
FF	Frentes Frias
FURG	Universidade Federal de Rio Grande
GrEC	Grupo de Estudos Climáticos
IAG	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
IRI	International Research Institute for Climate Prediction
JBN	Jato de baixos níveis
JJA	Inverno
LPB	La Plata Basin
MAM	Outono
MCG	Modelos Climáticos Globais
MM4	Mesoscale Model – version 4

MM5	Mesoscale Model – version 5
MR	Modelos de Área Limitada
MRA	Modelo Regional Aninhado
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NEB	Região Nordeste do Brasil
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PSU	Pennsylvania State University
RAMS	Regional Atmospheric Modeling System
RCM	Modelos Climáticos regionais em escala mais refinadas
RegCM	Regional Climate Model version
RG	Rio Grande
ROL	Radiação de Onda Longa Emergente
RSM	Regional Spectral Model
SAM	Modo Anular Sul
SDAR	Sudeste da Argentina
SDE	Sudeste do Brasil
SON	Primavera
SSiB	Simplified Simple Biosphere
SUBEX	SUB-grid Explicit Moisture Scheme
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
UR	Umidade Relativa
USP	Universidade de São Paulo
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

Resumo

Os sistemas frontais estão associados às bruscas mudanças de tempo e são responsáveis por modular a precipitação na maioria das áreas da América do Sul (AS). É objetivo neste trabalho investigar como o RegCM4 simula a atuação das frentes frias (FF) sobre a AS. A simulação com o RegCM4 foi iniciada e dirigida pela reanálise do ERA-Interim para o período 1979-2009. Como etapa inicial, realizou-se uma validação do RegCM4 através da análise do padrão espacial da precipitação e temperatura e também temporal da precipitação em alguns subdomínios. Em linhas gerais, a climatologia sazonal simulada pelo RegCM4 representa adequadamente padrões espaciais observados dos principais sistemas atuantes na América do Sul, mas apresenta subestimativa de temperatura e precipitação na maior parte da AS ao longo do ano. Em seguida, aplicou-se um algoritmo para identificação das frentes frias (FF) nos dados diários observados e simulados em São Paulo (SP) e Rio Grande (RG), ambas na Bacia do Prata. As datas de passagem de FF foram utilizadas para construir composições de campos espaciais. Os resultados mostram que o RegCM4 subestima em aproximadamente 5% a contagem total de FF nas duas cidades. A subestimativa ocorre na maioria das estações do ano, exceto no inverno em que o modelo superestima ($\sim +7\%$) a frequência de FF em SP. A atuação das FF representam um volume grande de precipitação nestas cidades no inverno e primavera e então estas estações do ano foram escolhidas para análise. As composições mostraram que o RegCM4 simula os padrões associados às passagens de FF sobre SP e RG tanto em superfície como em outros níveis verticais da troposfera. A precipitação simulada pelo RegCM4 associada com as FF mostra padrões espaciais comparáveis aos observados, mas a intensidade da precipitação é subestimada no leste (no nordeste da Argentina, Uruguai e Rio Grande do Sul) e superestimada no oeste (Paraguai e norte da Argentina) da Bacia do Prata. As composições para FF de vários campos (vento, pressão, temperatura, umidade específica e precipitação) também indicam que o RegCM4 simula evolução no tempo e padrões espaciais associados às passagens das FF muito semelhantes aos da ERA-Interim em todos os níveis verticais analisados. No entanto, o RegCM4 subestima a intensidade das anomalias e tende a deslocar as FF mais rapidamente para norte do que a ERA-Interim. Estas diferenças, juntamente com deficiências na parametrização de convecção, podem explicar as subestimativas de chuva pelo RegCM4 no centro-leste da Bacia do Prata no inverno e primavera.

Abstract

The frontal systems are associated with abrupt changes of weather and are responsible for modulating the rainfall in most areas of South America (SA). The objective of this work is to investigate how the RegCM4 simulates the action of cold fronts (FF) over SA. The simulation with RegCM4 used initial and boundary conditions of the ERA-Interim reanalysis for the period 1979-2009. As an initial step, the validation of RegCM4 was performed through of the analysis of the spatial patterns of precipitation and temperature and also of the time series of seasonal rainfall in some subdomains. . In general, the seasonal climatology simulated by RegCM4 adequately represents the observed spatial patterns of the main active systems in SA, but it underestimates the temperature and precipitation in most regions of AS throughout the year. Then, an algorithm to identify cold fronts (FF) was applied in daily observed and simulated data in São Paulo (SP) and Rio Grande (RG), both located in the La Plata Basin. The dates of FF were used to compositions of the local and spatial fields. The results show that RegCM4 underestimated by approximately 5% the total annual counts of FF in these two locations. The underestimation of FF occurs in most of the seasons, except in winter when the model overestimates ($\sim 7\%$) the frequency of FF over SP. The FFs account for a large volume of rainfall in SP e RG in winter and spring and then these stations were chosen for the spatial pattern analysis. The compositions showed that RegCM4 simulates the observed patterns associated with FF passages over SP and RG both at the surface and in other vertical levels of troposphere. The simulated precipitation by RegCM4 associated with the FF presents spatial patterns comparable to those observed, but the intensity of the precipitation is underestimated in eastern (northeastern Argentina, Uruguay and Rio Grande do Sul) and overestimated in western (Paraguay and northwest Argentina) of the La Plata Basin. The compositions of several fields (wind, pressure, humidity specific, temperature and precipitation) indicate that RegCM4 simulates the time evolution and spatial patterns during FF passages very similar to the ERA-Interim in all vertical levels analyzed. However, it underestimates the intensity of the anomalies and tends to move the FF faster to the north than the ERA-Interim. These differences, along with deficiencies in the parameterization of convection, may explain the underestimation of rainfall by RegCM4 over center-eastern of the La Plata Basin in winter and spring.

1. Introdução

O processo de avaliação e validação das simulações climáticas regionais sobre a América do Sul é necessário para o desenvolvimento de projeções futuras, para simular possíveis mudanças regionais no clima como atualmente é feito em várias regiões do globo (Giorgi et al., 2009). Os modelos climáticos utilizados em outros centros foram ajustados as características muito peculiares de relevo.

As características de relevo e proporção de continente e oceano na América do Sul determinam um clima regional característico, o qual não é observado em outras regiões do globo, tornando o processo de adaptação e validação de modelos atmosféricos muitas vezes trabalhoso. No continente Sulamericano a presença da Cordilheira dos Andes provoca uma circulação muito característica sobre os países do Cone Sul, incluindo as regiões centro-oeste e sul-sudeste do Brasil e Bolívia. O obstáculo da Cordilheira posicionado no oeste canaliza a leste do mesmo um fluxo de umidade e momento em baixos níveis (850 hPa), que vai da Amazônia para as regiões no sudeste do continente, realizados pelo jato de baixos níveis, o qual contribui significativamente para a precipitação nas regiões do Cone Sul (Marengo et al., 2004; da Silva et al., 2010).

A proposta inicial de utilizar modelos de área limitada para fins climáticos foi feita por Dickinson et al. (1989) e Giorgi (1990). Estes trabalhos buscaram com esta ideia aumentar a resolução, e por consequência representar melhor padrões de mesoescala, que os Modelos Climáticos Globais (MCG) não conseguem representar satisfatoriamente em função da grade grosseira que utilizam em comparação com a que pode ser usada nos modelos climáticos de área limitada. Os modelos de área limitada estão baseados no conceito de modelo regional aninhado (MRA) no MCG, com este fornecendo ao MRA condições iniciais e a dependência das variáveis meteorológicas no tempo nas bordas laterais. Em resumo os MCG fornecem de tempos em tempos a informação de grande escala para o MRA. Antes dessa proposta os modelos de área limitada eram empregados somente para previsão de tempo com duração de poucos dias. No entanto, Giorgi e Bates (1989) e Giorgi (1990) mostraram pela primeira vez que MRA podem ser aplicados para simulações contínuas de longos períodos de tempo até a escala climática (meses, estações, anos, décadas, etc).

A transição de uma grade mais grosseira para grade mais refinada dos MRA implicaria em cálculos com custo computacional elevado e para armazenar os resultados seria necessário um aumento na capacidade de espaço muito maior que as atuais. A transição dos MCG para modelos climáticos regionais em escala mais refinada (RCM) não é simples, pois os efeitos

das forçantes de mesoescala associadas à orografia, áreas costeiras, rios e água sobre a superfície podem gerar erros nesta transição. Desta maneira, para suavizar esta transição é utilizado o método de downscaling (Giorgi e Mearns 1991), que faz a transição de forma suave do MCG para o RCM.

A necessária implementação de técnicas de downscaling procura então aumentar o detalhamento na representação dos processos de mesoescala, que são importantes para determinar os padrões climatológicos regionais, principalmente de variáveis como chuva e temperatura do ar.

Após a proposta de regionalização com RCM, Horel et al. (1994) utilizou o modelo regional MM4 (National Center for Atmospheric Research - NCAR) para um domínio sobre a América do Sul e obteve um excessivo volume de precipitação simulada sobre os Andes. Esta excessiva precipitação foi associada à forte circulação divergente e à circulação sobre a cadeia de montanha dos Andes não realista, a atuação desses efeitos ficaram restritos às regiões de alta topografia nestas simulações. Outro problema nas simulações foi o posicionamento da Alta da Bolívia, que estava deslocada para oeste da sua posição climatológica. Os autores atribuíram este erro ao termo da força do gradiente de pressão em coordenada sigma nas vizinhanças de terrenos íngrimes.

O modelo RCM ETA do National Centers for Environmental Prediction (NCEP) aninhado em um MCG foi utilizado por Tanajura (1996) em simulações para o domínio da América do Sul. O RCM ETA com a física completa conseguiu identificar a ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul; Kodama, 1992) com e sem a presença da cadeia de montanha dos Andes. Ainda neste trabalho, o autor analisou as principais características da América do Sul no período de verão (DJF) e obteve que o modelo simulou de forma eficaz a Alta da Bolívia, o jato subtropical e precipitação de grande escala. Embora o ETA tenha subestimado a intensidade da circulação, verificou melhora na distribuição espacial da precipitação comparado ao MCG.

Teixeira et al. (2002), também analisaram a atuação das ZCAS no verão da América do Sul utilizando o modelo RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) e verificaram que as anomalias positivas de TSM atuam favorecendo o aumento de convecção na região de ZCAS no verão. Esta configuração da TSM contribui significativamente para a maior disponibilidade de vapor d'água, que está associada com ar menos denso e por consequência induz à instabilização da atmosfera provocando maior quantidade de precipitação na região das ZCAS.

Chou et al. (2002) utilizaram o modelo Eta/SSiB para simular padrões climatológicos

sobre a América do Sul. Neste estudo o Eta/SSiB estava configurado com 80 km de espaçamento de grade na horizontal, 38 níveis verticais, acoplado ao esquema de superfície Simplified Simple Biosphere (SSiB) e o período de integração foi de um mês nas estações seca e úmida. Os autores verificaram que durante o mês úmido as simulações reproduziram uma área de precipitação mais ampla induzindo subsidência sobre a ZCIT (Zona de Convergência Intertropical). Isto inibiu parte da banda de convecção na ZCIT, com a ROL (radiação de onda longa emergente) mostrando bias positivo generalizado predominante sobre os oceanos adjacentes. Durante a estação seca a taxa da precipitação simulada seguiu razoavelmente o campo observado, mas nos meses úmidos mostrou redução da qualidade. De maneira geral, o Eta/SSiB reproduziu a maioria das características do ciclo diurno dos fluxos de calor e umidade em superfície.

Misra et al. (2003) discutiu as dificuldades na previsão de precipitação sobre a América do Sul no verão utilizando um MCG (T42) e comparando com o RSM (Regional Spectral Model) com 80 km de grade horizontal. Seus resultados mostraram que em comparação com o MCG o RSM melhora razoavelmente a circulação atmosférica, no entanto não altera substancialmente a previsibilidade da precipitação, fluxos de superfície e os ventos em altos e baixos níveis na vizinhança dos Andes. Outro resultado abordado pelos autores revelou que a variável temperatura de superfície e os fluxos de superfície dos dois modelos são comparáveis, exceto sobre algumas áreas próximas a Bacia do rio Amazonas.

Em simulações para América do Sul Nicolini et al. (2002) utilizaram o modelo DARLAM (Division of Atmospheric Research limited area model) aninhado com o MCG CSIRO-Mk-2 para os meses de Janeiro e Julho. No geral, os campos simulados pelo DARLAM representaram melhor o clima sobre a América do Sul em comparação com o MCG, sobretudo foi notada uma grande melhora na representação da climatologia para variáveis temperatura próxima a superfície e pressão no nível médio do mar. A comparação entre as simulações de Janeiro e Julho indicou melhor desempenho no inverno. Algumas outras características importantes, como a alta da Bolívia, foram também melhor simuladas pelo DARLAM em comparação com o MCG.

Seth e Rojas (2003) utilizando o RegCM2 (Regional Climate Model version 2) investigaram a capacidade deste modelo em simular as variações interanuais da circulação e precipitação sobre a América do Sul. As análises foram feitas tomando como base dois anos com estações chuvosas distintas, 1983 (seco – El Niño) e 1985 (úmido – La Niña) que estiveram associados, respectivamente, a anomalias positivas de TSM (temperatura da superfície do mar) no centro e oeste equatorial do oceano Pacífico (El Niño) no ano de 1985 e

anomalias negativas de TSM em 1983 (La Niña). Após esta seleção, foram testadas simulações com tipos diferentes de forçamento, como por exemplo, forçamento local e remoto. Os resultados indicaram que para as integrações sazonais para Janeiro a Maio nos anos analisados, o RegCM2 simulou a diferença nas condições de grande escala e também as diferenças no padrão de precipitação. Discutiram também a influência do domínio nos resultados do RegCM2 e obtiveram que um domínio de simulação maior, incluindo a América do Sul tropical e oceanos adjacentes, induz melhoras na simulação da evolução temporal da precipitação em comparação com o observado.

Estudos utilizando o IRI (International Research Institute for Climate Prediction – RCM), na qual o RCM foi forçado nas bordas pelo ECHAM3 (MCG), e as rodadas foram efetuadas com 80 km (RCM-80) de grade (Nobre et al. 2001). Outra simulação foi feita utilizando uma grade mais fina de 20 km forçada pelo RCM-80. As simulações foram comparadas com as observações e o MCG. Em geral, os resultados mostraram que o RCM-80 em comparação com a previsão de precipitação do MCG reduziu o bias e os erros quadráticos médios. Por outro lado, o RCM-20 apresentou grandes erros de simulação, em que os padrões espaciais assemelharam-se muito com a topografia local. Os autores sugeriram uma melhora nos ajustes das parametrizações dos processos físicos ligados a precipitação.

O estudo do clima para a região nordeste do Brasil (NEB) realizado por Sun et al. (2005) utilizou o NCEP Regional Spectral Model (RSM), com resolução horizontal de 60 km e aplicando downscaling a partir do ECHAM4.5 (MCG – T42), o qual foi forçado pela TSM observada. Os resultados mostraram que as anomalias de precipitação no RSM concordaram melhor com as observações do que com o MCG. Em adição o RSM capturou a variabilidade interanual da precipitação observada em escala de tempo intrasazonal.

Reboita et al. (2010) utilizaram o RegCM3 aninhado à reanálise do NCEP e simulação do modelo ECHAM4.5 para simular e avaliar o clima presente na América do Sul. Neste estudo, o RegCM3 simulou o padrão espacial e a intensidade da temperatura do ar a 2m observada. No inverno a precipitação foi melhor representada pelo RegCM3, enquanto no verão as subestimativas chegaram a 2 mm/dia na região das ZCAS e no norte da Argentina, Paraguai e Uruguai. Os autores ainda verificaram que o RegCM3 melhorou as previsões do ECHAM e simulou melhor o clima nas latitudes ao sul de 30°S.

Andrade, K. M. et. al (2011) utilizaram os modelos GFDL e Hadley para analisar a frequência de FF no clima presente e futuro, os modelos simularam as principais características atmosféricas associadas as FF. Os resultados mostram que os dois modelos superestimam a frequência de FF em comparação com o NCEP, sendo que o Hadley

superestima ainda mais em relação ao NCEP e o GFDL. Ao analisar eventos extremos em projeções futuras os dois modelos indicam aumento do número de FF mais intensas.

No domínio da América do Sul ($60^{\circ}\text{S} - 15^{\circ}\text{N}$ e $90^{\circ}\text{W} - 20^{\circ}\text{W}$) tem sido feitos esforços para melhorar os resultados nas simulações de RCM com o projeto CORDEX (Coordinated Regional Downscaling Experiment; Giorgi et al., 2009). Neste contexto, Solman et al. (2013) fizeram análise do desempenho de uma série de RCM para este domínio. Para esse fim utilizaram o conjunto de RCM, RCA (134 x 155 pontos de grade – 40 níveis), REMO (151 x 181 pontos de grade – 31 níveis), PROMES (145 x 163 pontos de grade – 37 níveis), RegCM3 (190 x 202 pontos de grade – 18 níveis), MM5 (150 x 203 pontos de grade – 23 níveis), LMDZ (184 x 180 pontos de grade – 19 níveis) e ETA (123 x 245 pontos de grade – 38 níveis). O tamanho do domínio nestes experimentos abrange as principais características da América do Sul, que contribuem para a modulação do clima nesta região. Estas simulações contaram com condições de borda a partir da reanálise da ERA-Interim (Simmons et al. 2007), espaçamento de grade de ~50 km, período de simulação de 1989 – 2008 incluindo o período de um ano (1989) de *spin-up* característico para cada RCM.

Solman et al. (2013) analisaram os RCM como um conjunto e compararam os resultados com análises em ponto de grade. Em termos de erros nas simulações, os resultados mostraram que para o verão (DJF) os bias positivos mais elevados de temperatura predominam sobre o Paraguai, nordeste da Argentina e nordeste do Brasil. Enquanto, no inverno (JJA) as subestimativas se concentram sul da Amazônia e centro-oeste do Brasil, e ocorreram superestimativas na região nordeste. Já para precipitação os autores obtiveram que no inverno os padrões de magnitude e distribuição espacial foram reproduzidos em acordo com as análises. No entanto uma forte subestimativa ocorreu sobre o sul do Brasil, Uruguai e nordeste da Argentina, com diferenças superiores a 40 mm/mês. No verão os RCM simularam a região de precipitação que vai da bacia Amazônica até o sudeste do Brasil (região de atuação das ZCAS), no entanto subestimaram em pelo menos 20% a chuva nesta região e em 15% a Bacia do Prata. Isto indica que nesta regiões os MCR tem dificuldades em representar os processos físicos e dinâmicos que controlam a precipitação na Bacia do Prata e ZCAS.

Em particular, na América do Sul pesquisadores do GrEC-USP (Grupo de Estudos Climáticos da USP) vem utilizando o RegCM3 para estudar o clima do presente e futuro (Cuadra e da Rocha, 2006; Cuadra e da Rocha, 2007; da Rocha et al., 2009; Reboita et al., 2010 a-b; Kruger et al., 2012). Além disso, o GrEC participou do projeto CLARIS-LPB (a Europe–South America network for climate change assessment and impact studies in La Plata Basin; Solman et al., 2011). Este esforço será estendido para outras regiões do globo através

do projeto CORDEX, que é um programa internacional da Organização Meteorológica Mundial (OMM) com objetivos de: (1) avaliar e melhorar as técnicas de downscalings climático regional dinâmico e estatístico (RCD); (2) produzir uma nova geração de projeções climáticas para diversas regiões do globo; e (3) promover a comunicação entre as comunidades de modelagem climática e de aplicação e reforçar o engajamento de cientistas dos países em desenvolvimento nas pesquisas de mudanças climáticas.

Os resultados de Solman et al. (2013) que utilizaram RegCM3 são base para estudos realizados no presente trabalho, o qual investiga como os sistemas frontais podem contribuir para a subestimativa de precipitação na LPB em simulações com o modelo RegCM4. Os esforços em modelagem climática regional colaboraram para uma melhora significativa na qualidade das simulações climáticas sobre o domínio da América do Sul. Contudo, neste estudo será avaliada a representação do clima na América do Sul imersa nas características dos campos meteorológicos sob a atuação dos sistemas frontais.

1.1 Frontogênese e Frentes Frias

As frentes são associadas aos ciclones extratropicais, que são sistemas importantes para modular o regime de precipitação na maioria das regiões da AS. Para discutir a atuação das frentes é necessário introduzir primeiro os conceitos de ciclogênese e frontogênese. Bjerknes (1919,1922) apresentou um modelo conceitual de ciclogênese onde a formação de ciclones em latitudes médias (região que apresenta intensos gradientes de temperatura, umidade e vorticidade) ocorre a partir de uma perturbação inicial em superfície. O escoamento inicialmente com padrão linear ganha ondulação a partir deste distúrbio. A medida que o sistema se desenvolve, a massa de ar quente e úmido migra em direção ao polo, no lado leste da perturbação, e a massa de ar fria e seca para o equador, no lado oeste da perturbação. Este processo faz com que essas massas adquiram giro ciclônico fazendo com o lado frio mais rápido comece a se deslocar sob o lado quente, conforme apresentado na **Figura 1.1**. Dessa maneira o ar frio mais denso provoca o levantamento do ar mais quente menos denso. Com este levantamento o ar condensa liberando calor latente e promovendo a diminuição do peso da coluna e assim induzindo convergência de massa em superfície.

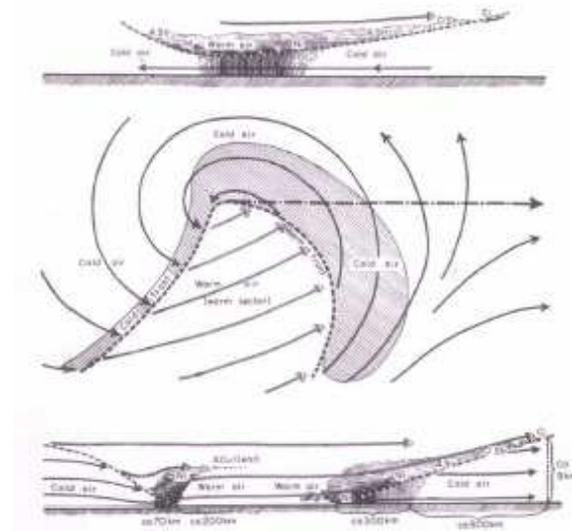


Figura 1.1.: Modelo conceitual de ciclogênese no Hemisfério Norte elaborado por Bjerkness (1919)

Na parte superior da **Figura 1.1** observa-se uma zona de intensa precipitação na dianteira da frente quente. Bjerkness ainda contribuiu em 1922 propondo uma sequência esquemática para o ciclo de vida dos ciclones representada na **Figura 1.2**. As **Figuras 1.2 a e b** mostram o estágio de formação do ciclone, onde uma perturbação em superfície induz o início de um giro ciclônico. Na **Figura 1.2c**, a onda começa a se movimentar para leste aumentando a amplitude da onda quente, enquanto no estágio d o ciclone está maduro e seu perfil vertical tem inclinação para oeste com a altura (baroclínico) e a partir de 'e' atinge o estágio de oclusão onde a inclinação para oeste começa a diminuir gradativamente até h, onde se torna barotrópico.

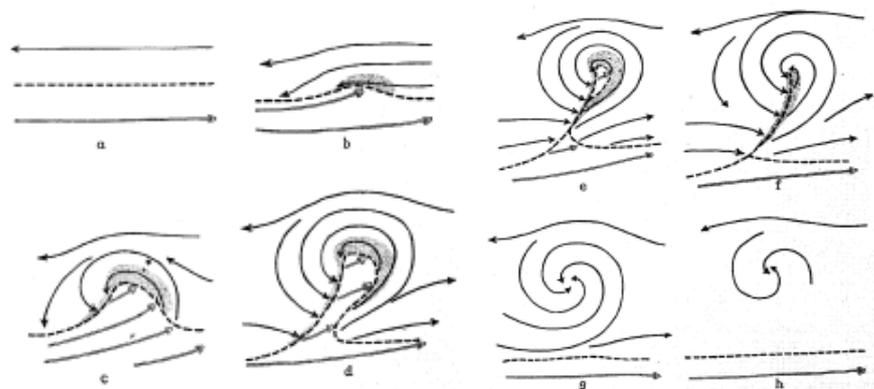


Figura 1.2.: Modelo conceitual do ciclo de vida de um ciclone no Hemisfério Norte elaborado por Bjerkness (1922)

A zona de transição entre massas de ar quente e fria, onde geralmente em latitudes médias os contrastes de temperatura e umidade são mais intensos, recebe a denominação de zonal frontal. As frentes podem ser classificadas como frias e quentes, em função dos

movimentos aparentes das massas de ar, ou ainda, como estacionárias quando não apresentam movimento aparente importante. Estes são sistemas de escala sinótica e estão associados ciclones extratropicais.

Segundo Wallace Hobbs (1977) frente fria é uma linha de confluência que define o limite entre uma massa de ar quente homogênea e a zona frontal, na qual na borda anterior da zona frontal avança substituindo o ar mais quente. Kousky e Elias (1982) observaram que a zona frontal acontece quando duas massas de diferentes regiões, uma fria e outra quente, com características diferentes (induzindo gradiente de temperatura e umidade intensos) se encontram.

Alguns ciclones extratropicais apresentam frente fria muito ativa que pode provocar precipitação intensa e queda acentuada de temperatura nas regiões por onde passam. Na AS alguns autores identificaram as principais regiões ciclogênicas, como Gan e Rao (1991), Sinclair (1997), Hoskins e Hodges (2005) e Reboita et al. (2010). Estes últimos autores calcularam a densidade total de ciclones para AS utilizando dados do NCEP e mostraram que uma das principais regiões ciclogênicas está localizada na costa sudeste da Argentina (aproximadamente entre 50°-45°S), enquanto outras duas também importantes são encontradas na costa leste do Uruguai (aproximadamente entre 38S e 32S) e no sul-sudeste do Brasil em todas as estações do ano.

As análises de frequência e área de atuação de sistemas frontais buscam entender as condições de grande escala, intensidade e frequência de formação utilizando tanto re-análises como também observações locais, já que estes sistemas possuem forte impacto no clima de determinada região. No litoral sudeste do Brasil, Oliveira (1986) e Justi da Silva e Silva Dias (2000) obtiveram que mais frentes frias cruzam esta região no inverno do que no verão. Por outro lado, para o litoral de Santa Catarina Rodrigues et al. (2004) caracterizaram passagens frontais usando reanálise do NCEP, obtendo maior frequência destes sistemas durante a primavera, mas com diferenças pequena em relação às outras estações do ano. Esta maior frequência de sistemas frontais na primavera também foi obtida por Justi da Silva e Silva Dias (2002) e Andrade (2005), mas assim como outros autores obtiveram menor atividade frontal no verão. Resultado este semelhante ao obtido por Dametto e da Rocha (2006) para a cidade de São Paulo. No entanto, nos meses de verão as frentes frias tendem a atuar por mais tempo, se associando muitas vezes à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) como discutido em Satyamurti et al. (1998) e Ferreira e Chao (2013).

As principais regiões frontogênicas segundo Reboita et al. (2009), que analisaram a relação sazonal entre o SAM (Modo Anular Sul) e a distribuição espacial dos sistemas

ciclônicos sobre o Hemisfério Sul, no período de 1980 até 1999, concentram-se principalmente na costa sudeste e centro da Argentina no verão. No inverno as frontogêneses ocorrem no norte-centro leste da Argentina, sul do Brasil e Uruguai. Os resultados destes autores mostram a variabilidade intrasazonal da frontogênese é muito intensa na AS. As principais regiões do Brasil em que os sistemas frontais atuam ao longo do ano são sul, sudeste e centro-oeste. Cavalcanti e Kousky (2009) estudaram passagens de frentes frias sobre o Brasil durante o período de 1979 a 2005 e obtiveram um número médio variando entre 5 a 10 frentes que passam na costa leste do país e atingem até 15°S.

1.2 Objetivo

Para o domínio da América do Sul, uma contribuição importante ao CORDEX é analisar como as simulações/projeções realizadas com o RegCM4 representam os sistemas frontais e condições de tempo associadas. Isto é necessário já que estudos prévios têm mostrado que existe grande subestimativa de chuva na primavera e inverno na área da LPB, tanto pelo RegCM3 (da Rocha et al., 2012) como por outros MRAs (Solman et al., 2013). Portanto, o objetivo deste trabalho é investigar como os sistemas frontais simulados pelo do RegCM4-CORDEX contribuem para a subestimativa na LPB.

2. Metodologia

Neste capítulo serão apresentados métodos, dados utilizados e configurações do modelo (RegCM4).

2.1 Dados

Para a validação do modelo foram realizadas análises comparando a climatologia da precipitação e da temperatura do ar. Os dados do *Climate Research Unit* – CRU – espaçamento horizontal de $0,5^0 \times 0,5^0$ (Brohan et al., 2006) foram usados para temperatura a 2m de altura e o *Climate prediction Center – Merged Analysis of Precipitation* (CMAP – espaçamento horizontal de $2,5^0 \times 2,5^0$) para a precipitação. As análises constituem em comparar a séries temporais e mapas espaciais de temperatura do ar e precipitação observadas do CRU e CMAP, respectivamente, com as mesmas variáveis obtidas do modelo climático RegCM4.

O método objetivo de rastreamento de FF sobre as cidades de São Paulo e Rio Grande foram efetuados utilizando dados médios diários das estações meteorológicas do IAG-USP (desde 1979 até 2009) e FURG-RS (desde 1991 até 2009). Para fazer a validação do critério foram construídos gráficos da variação média diária das variáveis vento meridional, vento zonal, temperatura do ar, umidade relativa, precipitação e pressão de superfície, comparando com as mesmas variáveis obtidas modelo climático RegCM4.

Uma vez com o critério objetivo de rastreamento de FF realizado e validado, afim de avaliar as simulações do RegCM4 foram construídas composições de variáveis em superfície, baixos, médios e altos níveis e posteriormente comparando com dados de reanálise. Para as variáveis temperatura do ar a 2 metros, pressão de superfície, vento em 850 hPa, umidade específica em 850 hPa, vento em 500hPa e 200 hPa foram utilizados dados de reanálise da ERA-Interim (espaçamento horizontal de $1,5^0$), já para precipitação foi utilizado os dados do *Climate prediction Center* – (CPC – espaçamento horizontal de $0,5^0$). Estas análises permitiram avaliar como o RegCM4 simula a dinâmica e processos termodinâmicos da atmosfera em níveis importantes inclusas em um cenário de passagem de FF.

2.2 Modelo

O RegCM teve sua primeira versão desenvolvida na década de 80 pelo *National Center for Atmospheric Research – Pennsylvania State University* (NCAR-PSU), a partir do *Mesooscale Model* versão 4 - MM4 (Anthes et al. 1977) como documentado em Pal et al.

(2007). Atualmente o RegCM encontra-se na quarta versão (RegCM4). Apresenta núcleo dinâmico muito similar ao do MM5 (Grell et al., 1994), exceto por ser hidrostático.

O RegCM4 (Giorgi et al., 2012) é um modelo de área limitada, considera a atmosfera compressível, de equações primitivas e em coordenada vertical sigma. As equações são discretizadas através do método de diferenças finitas na grade B de Arakawa-Lamb. Para integração no tempo, o RegCM4 utiliza um esquema *split-explicit*, que resolve a dinâmica dos modos de gravidade mais rápidos usando passos de tempo menores do que nas demais componentes do modelo. O RegCM4 também possuiu um algoritmo para reduzir a difusão horizontal na presença de intensos gradientes de topografia (Giorgi et al., 1993 a,b).

Para aplicação em estudos climáticos, várias parametrizações físicas foram incorporadas no RegCM ao longo de suas versões (Giorgi et al. 2012), sendo que para a quarta versão que serão utilizadas neste estudo as parametrizações: dinâmica – MM5 (Grell et al., 1994); transferência radiativa – CCM3 (Kiehl et al. 1996); camada limite – modelo proposto por Holtslag modificado (Holtslag et al. 1990); superfície continental - BATS (Giorgi et al. 2003); convecção – Grell (Grell 1993), MIT (Emanuel & Zivkovic-Rothman, 1999); precipitação na escala de grade - SUBEX (Pal et al. 2000).

2.3 Configuração da simulação e Análise da climatologia

A simulação aqui analisada com o RegCM4 compreende um período de 30 anos (1979/2009) para o domínio da América do Sul (**Figura 2.3.1**) e com espaçamento de grade de 50km, estas simulações foram realizadas por Llopart 2014. As condições iniciais e de fronteira foram obtidas do Era-Interim (Simmons et al., 2007).

A simulação seguiu a configuração descrita em da Rocha et al. (2012), onde foi utilizado o BATS como esquema de superfície e o esquema Grell/Emanuel para convecção. O RegCM4 permite combinar dois diferentes esquemas de convecção ao mesmo tempo, no caso da simulação realizada, foi utilizado o esquema de Grell (1993) sobre o continente e o esquema de Emanuel (1991) sobre o oceano.

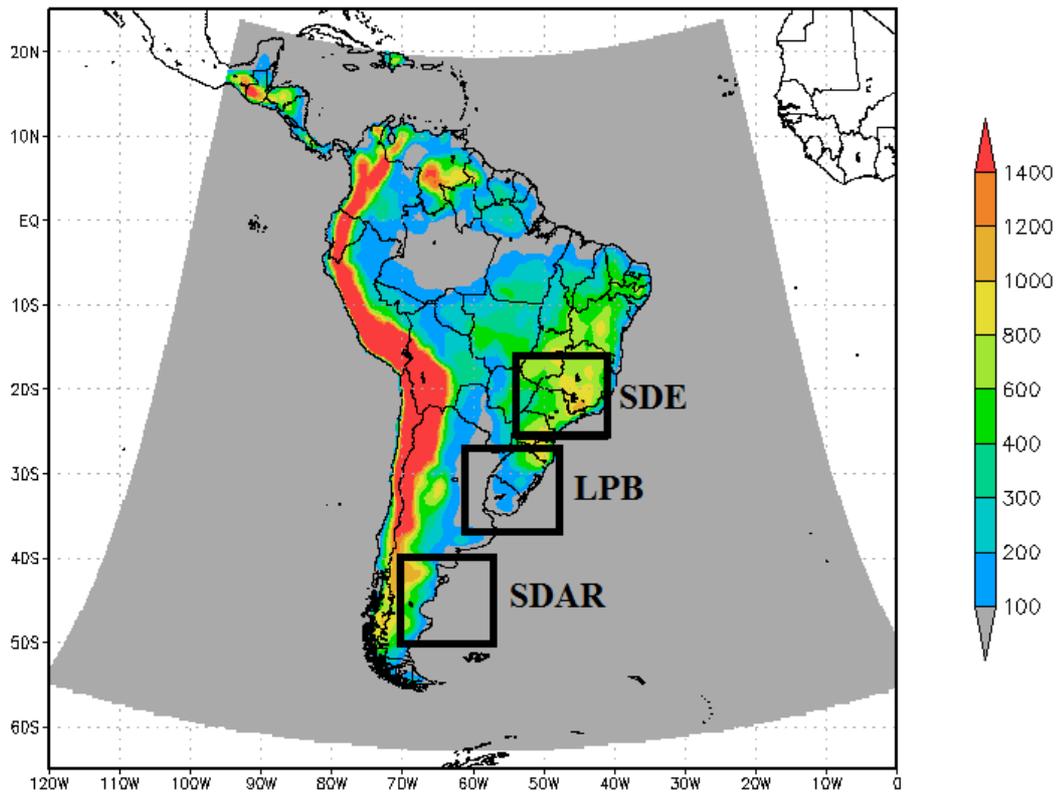


Figura 2.3.1.: Domínio da simulação (América do Sul) juntamente com as regiões definidas para as análises.

Para avaliar a variação temporal foram analisadas as séries temporais da precipitação e temperatura para três diferentes regiões na América do Sul – **Figura 2.3.1** (Sudeste da Argentina - SDAR; Sudeste do Brasil – SDE e Bacia do Prata – LPB). A partir dos valores sazonais foi calculada a correlação entre os dados simulados de temperatura e precipitação com os valores do CRU e CMAP, respectivamente. Essa análise é importante para saber como o modelo RegCM4 simula a variabilidade interanual em determinadas regiões do domínio de simulação.

O erro médio ou desvio médio (bias) foi calculado utilizando a equação (1) e o coeficiente de correlação de Pearson calculada através da equação (2).

$$\text{BIAS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{Mi} - X_{Oi}) \quad (1)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{Mi} - \bar{X}_M) (X_{Oi} - \bar{X}_O)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{Mi} - \bar{X}_M)^2 \sum_{i=1}^N (X_{Oi} - \bar{X}_O)^2}} \quad (2)$$

Considerando uma variável X, onde os sub-índices M e O indicam o valor simulado (X_M) e o valor observado (X_O), respectivamente, e a barra superior indicando a média temporal.

2.4 Critério objetivo de rastreamento de FF

O critério de identificação de frentes frias (CFF) considera que houve passagem de uma FF pelas cidades de São Paulo e Rio Grande quando as seguintes condições forem estabelecidas e nesta seqüência:

- giro do componente meridional médio diário do quadrante norte para o sul;
- queda da temperatura do ar de um até dois dias depois da identificação do critério anterior;

O critério utilizado neste trabalho é muito semelhante ao empregado em Dametto e da Rocha (2006) para identificar frentes frias de São Paulo e também ao de Rodrigues al., (2004) que identificaram FFs sobre o Oceano Atlântico Sul, na altura do estado de Santa Catarina. No entanto, diferente de Dametto e da Rocha (2006) e de Rodrigues et al. (2004) no presente estudo não se impõe a persistência por dois dias do vento de sul, desde a complicada topografia da Serra do Mar na qual se encontra o IAG limitam tal persistência.

3. Climatologia e validação do modelo

3.1 Precipitação

Na **Figura 3.1.1** são apresentados os campos médios sazonais da precipitação para o período de 1979 a 2009. As Figuras que vão de 4.a a 4.d referem-se, respectivamente, ao verão (DJF), inverno (JJA), outono (MAM) e primavera (SON) austral.

Na estação de verão (DJF), o CMAP (**Figura 3.1.1a**) apresenta precipitação de 4 a 8 mm/dia as regiões norte, centro-oeste, sudeste, sul do Brasil, norte da Argentina, Paraguai, Bolívia e norte da AS, e precipitação da ordem de 2 - 4 mm/dia sobre o nordeste do Brasil. A região mais úmida no CMAP indica a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A ZCAS é uma faixa de nebulosidade e chuva convectiva com orientação noroeste-sudeste, associada a uma zona de convergência do ar na baixa atmosfera, sendo mais evidente durante o verão no hemisfério sul (Quadro et al, 2006).

O RegCM4 (**Figura 3.1.1a**) simula chuva menos intensa sobre o continente na região da ZCAS, contudo sobre o Oceano Atlântico, no ramo oceânico da ZCAS a chuva é mais fraca no RegCM4 do que no CMAP entre as longitudes 40° - 30° W e latitudes 35° - 40° S. Estudos prévios utilizando RegCM3 mostraram que a ZCAS sobre o oceano era bem simulada pelo modelo, apresentando apenas um deslocamento para nordeste (Kruger, 2009; Machado, 2008), indicando que a versão anterior deste modelo apresenta maior habilidade em simular a ZCAS (mesmo deslocada) do que a atual. Para as outras regiões o RegCM4 durante o verão superestima na precipitação em cerca de 2-4 mm/dia (**Figura 3.1.1a**). Na região da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) o RegCM4 subestima a precipitação no setor oceânico (1 a 8 mm/dia), mas superestima na região continental (~ 4 mm/dia). da Rocha et al. (2012) também notou subestimativa semelhante no RegCM3 ao simular a ZCIT.

No período JJA, o CMAP (**Figura 3.1.1b**) mostra uma extensa área seca sobre a parte central-leste do Brasil, norte da Argentina e sul da Bolívia. Como descrito em Kruger (2009) o sul do sudeste e sul do Brasil são mais úmidos e grande parte da precipitação é proveniente da passagem de ciclones extratropicais e frentes frias associadas. Estes sistemas são responsáveis pelo núcleo de maior precipitação sobre o sul do Brasil durante o inverno, que corresponde à estação de maior atividade ciclogénica conforme reportado em Gan (1992), Sinclair (1995) e Reboita et al (2008). De forma geral o RegCM4 (**Figura 3.1.1b**) simula a precipitação observada pelo CMAP para o inverno, mas superestima a precipitação no norte da Argentina e sul da Bolívia em ~ 2 mm/dia.

A precipitação na região sul, que apresenta máximos durante o inverno, é simulada com pequena subestimativa de ~ 1 mm/dia (**Figura 3.1.1b**). Kruger (2009) também obteve subestimativa na precipitação pelo RegCM3 no sul do Brasil para o trimestre JJA. No leste da região nordeste do Brasil o RegCM4 também subestima a precipitação em $\sim 1 - 2$ mm/dia.

Sobre o continente o RegCM4 também subestima a precipitação no norte do Brasil e na Venezuela, e nas demais regiões superestima a precipitação. A ZCIT simulada está em posição similar à do CMAP, mas com chuva menos intensa do que o CMAP na porção oceânica (**Figura 3.1.1b**). O RegCM4 simula a região da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASA), muito mais úmida quando comparado com o CMAP.

Para os meses de outono (MAM), o CMAP apresenta máximos de precipitação nas regiões Amazônica, sul do Brasil e na ZCIT (**Figura 3.1.1c**). De uma forma geral o RegCM4 simula padrão espacial da precipitação semelhante ao CMAP (**Figura 3.1.1c**), mas subestima a precipitação no sul do Equador e norte do Peru, região Amazônica, centro-oeste e sul do Brasil entre ~ 1 a 4 mm/dia (**Figura 3.1.1c**). A porção oceânica da ZCIT também apresenta chuva mais fraca do que no CMAP. Para as demais regiões a precipitação é superestimada pelo modelo ~ 1 a 4 mm/dia.

Durante a primavera o CMAP (**Figura 3.1.1d**) apresenta índices pluviométricos mais elevados no sul do Brasil, oeste da Amazônia, leste do Peru, norte da Bolívia, Colômbia e sul da Venezuela, enquanto seca predomina no norte do nordeste brasileira.

O núcleo seco no CMAP (**Figura 3.1.1d**) no norte do nordeste é simulado pelo RegCM, que apresenta apenas superestimativa da área desse núcleo. Sobre a região Amazônica o RegCM4 superestima a área com precipitação mais intensa, e o núcleo úmido observado na região sul está deslocado para o norte no RegCM4. Com isso o modelo subestima a precipitação no sul da AS em cerca de $\sim 1 - 4$ mm/dia. Para as outras regiões continentais o modelo superestima a precipitação de 2 a 4 mm/dia. A chuva na ZCIT foi subestimada pelo RegCM4 na sua parte oceânica mais distante da costa brasileira.

As análises espaciais da precipitação permitem conhecer o viés dessa versão do RegCM4 e também comparar diferenças com a versão anterior – RegCM3. De uma forma geral, o RegCM4 subestima a precipitação na região da ZCIT nas quatro estações do ano. Esta subestimativa também foi identificada em Kruger (2009), Machado (2008) e da Rocha et al. (2012). Outro ponto importante dessa análise foi o aumento do viés seco na porção oceânica da ZCAS, como discutido para o verão no Hemisfério sul.

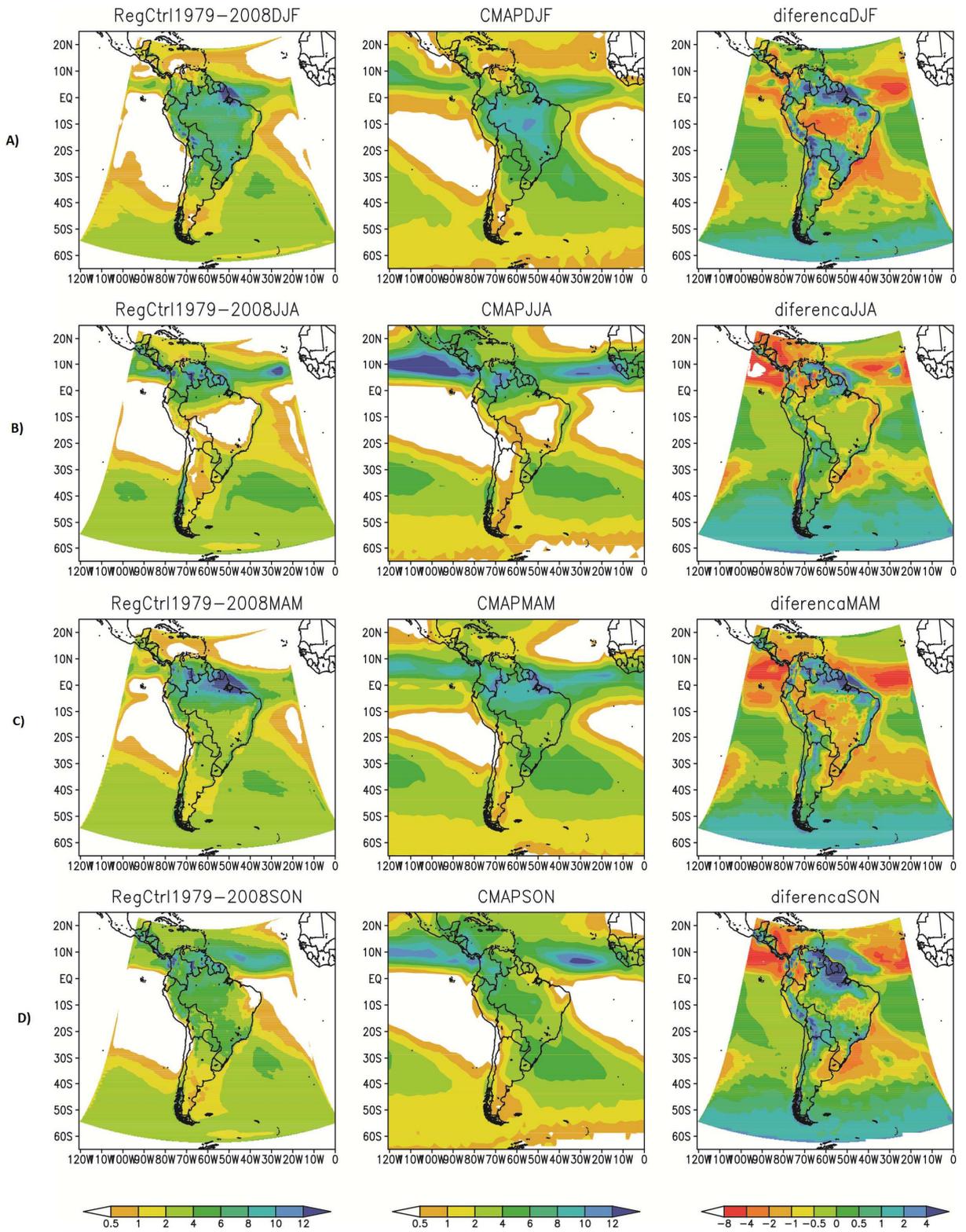


Figura 3.1.1.: Precipitação média (mm/dia) para o período de 1979 a 2009: (a) DJF (b) JJA (c) MAM (d) SON, onde as figuras da esquerda são para o RegCM4, centro CMAP e direita diferença RegCM4-CMAP.

3.2. Temperatura

Na **Figura 3.1.2** são apresentadas as análises dos campos médios sazonais da temperatura a 2m de altura para o período de 1979 a 2009. As Figuras **3.1.2.a** a **3.1.2.d** referem-se respectivamente: verão (DJF), inverno (JJA), outono (MAM) e primavera (SON) no hemisfério sul.

Durante o verão, o CRU (Figura 3.1.2a) apresenta temperaturas que variam de 20 a 25 °C na maior parte da AS, com exceção da região localizada sobre a cordilheira dos Andes, sul da Argentina e Chile. A temperatura é subestimada em praticamente toda a América do Sul pelo RegCM4 (Figura 3.1.2a), com erro médio frio variando no intervalo de ~1 a 8 °C, exceto no nordeste da Argentina e na costa oeste da América do Sul em que a temperatura é superestimada (Figura 3.1.2a).

No inverno, as temperaturas variam de 15 a 25 °C na maior parte da América do Sul de acordo com o CRU (Figura 3.1.2b), com exceção do sul da região sul do Brasil, Uruguai, Andes, costa oeste da América do Sul e Argentina, com variação entre 0 a 15 °C. Kruger (2009), que utilizou o RegCM3, obteve um padrão similar entre o CRU e as simulações para América do Sul. O RegCM4 segue o mesmo padrão mostrado por ele de temperaturas menores sobre o sul e sudeste do Brasil (Figura 3.1.2b). O RegCM4 apresenta um bias frio (Figura 3.1.2b) em quase toda a América do Sul (entre -0,5 até -8 °C), salvo na costa oeste da América do Sul e em uma porção que se estende do oeste da Amazônia ao norte do nordeste, em que nota-se temperaturas maiores no RegCM4 do que no CRU.

O CRU (Figura 3.1.2c) mostra temperaturas acima de 15 °C no outono na maior parte do continente sul-americano, exceto nos Andes, sul da Argentina e costa Oeste da AS (temperaturas menores que 15 °C). O RegCM4 (Figura 3.1.2c) simula temperaturas entre 20 e 25 °C sobre a maior parte da AS incluindo a região dos Andes. Na costa oeste da AS e sul da Argentina as temperaturas são menores (0 a 15 °C). Em praticamente toda a AS as temperaturas são subestimadas (Figura 3.1.2c), entretanto, a exceção ocorre na costa oeste onde o RegCM4 simula temperaturas maiores que o CRU.

Na primavera, o RegCM4 (Figura 3.1.2d) mostra um padrão similar a estação de outono, com pequenas diferenças apenas sobre uma porção que compreende o leste da Bolívia, o sul da região Amazônica, norte do centro-oeste e norte da região Nordeste. No CRU (Figura 3.1.2d) as temperaturas também possuem padrão muito similar ao do outono na

AS. O bias frio no RegCM4 ocorre em praticamente todo o continente (Figura 3.1.2d), mas na

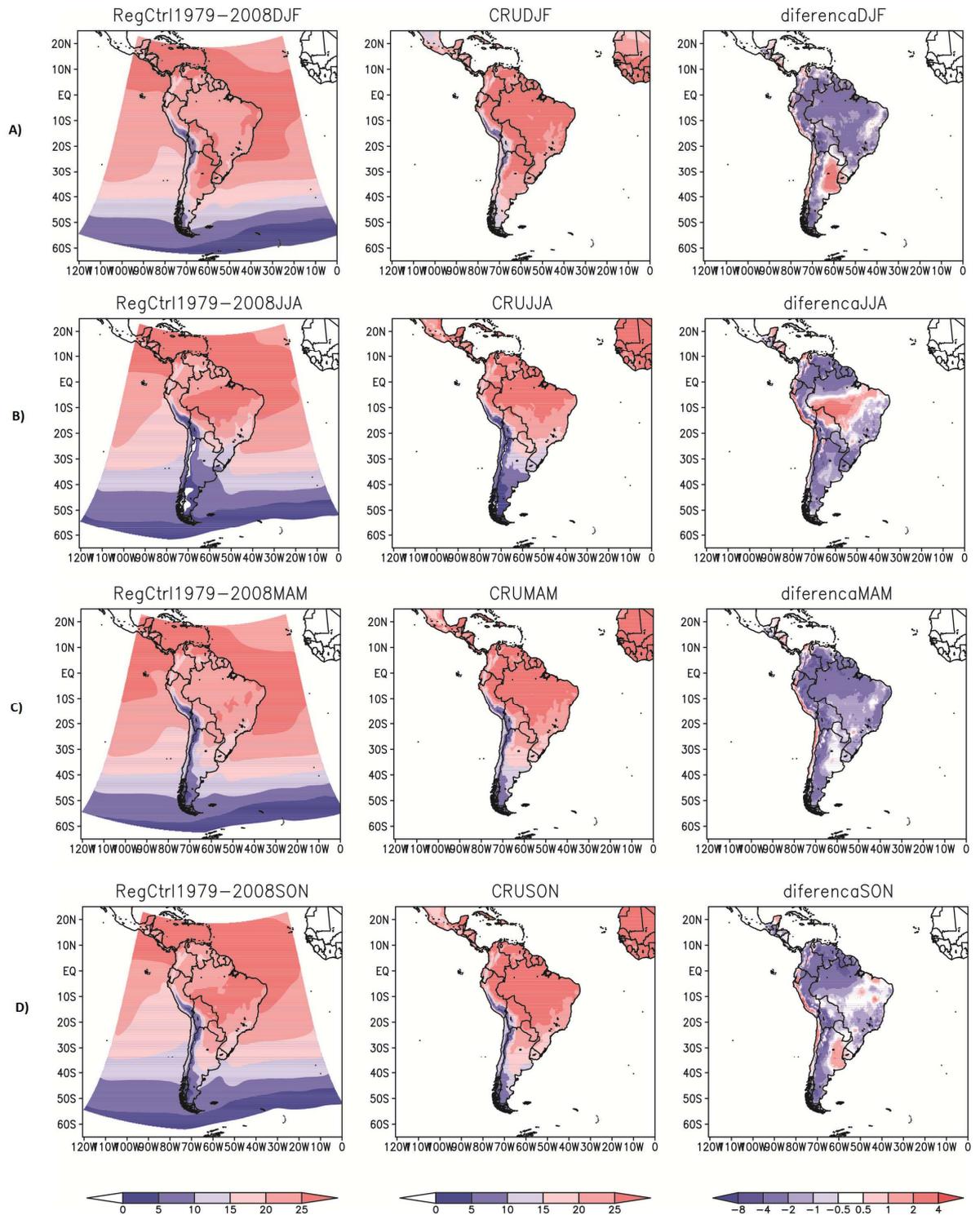


Figura 3.1.2.: Temperatura média ($^{\circ}\text{C}$) para o período de 1979 a 2009: (a) Verão (DJF) (b) Inverno (JJA) (c) Outono (MAM) (d) Primavera (SON) , onde as figuras da esquerda são para o RegCM4, centro CRU e direita diferença RegCM4-CRU

costa oeste da AS, nordeste da Argentina e Uruguai tem-se bias quente.

Na AS o RegCM4 subestima a temperatura na maioria das regiões, mas superestimativas também ocorreram no nordeste da Argentina na primavera e verão e em todas as estações na costa oeste. Apesar das diferenças na distribuição espacial de temperatura, as simulações climáticas com o RegCM4 apresentam padrões espaciais similares à climatologia observada da região.

Para analisar a evolução temporal da precipitação foram construídas séries temporais médias sazonais do CMAP e RegCM4. A partir destas médias calculou-se a correlação temporal e o bias para as regiões anteriormente definidas e para o período de 1979 a 2009.

A precipitação sobre a região LPB é subestimada pelo RegCM4 na maior parte dos anos quando comparado com a série temporal do CMAP em todas as estações do ano, mas nota-se no verão o menor bias seco de -0,45 mm/dia (figura 3.1.3a). Os maiores bias são encontrados no outono de -1,22 mm/dia e na primavera de -1,41 mm/dia (figuras 3.1.3c e 3.1.3d), isto mostra que nas estações de transição o modelo subestima mais a precipitação nessa região. A correlação temporal varia muito sobre a região da LPB (0,2 até 0,82), sendo a estação de verão com menor correlação em que o RegCM4 apresenta variação temporal de precipitação diferente do CMAP, mostrando em alguns anos fase oposta aos dados do CMAP.

Na região SDE o RegCM4 subestima a precipitação em comparação ao CMAP nas estações de verão, inverno e outono (figuras 3.1.3a, 3.1.3b e 3.1.3c), enquanto que na primavera (figura 3.1.3d) ocorre pequena superestimativa. Os menores bias ocorrem nas estações de verão e inverno (-0,16 e -0,2 mm/dia, respectivamente), já as correlações obtidas sobre a região SDE variam entre 0,29 até 0,53, revelando que as oscilações de precipitação do CMAP são melhores capturados no inverno com correlação de 0,53 do que no outono com correlação 0,29.

A precipitação sobre a região SDAR é superestimada pelo RegCM4 em comparação com o CMAP, na qual a chuva não supera os 3 mm/dia ao longo de toda a série para todas as estações (figuras 3.1.3a ate 3.1.3d). O bias para esta região é pequeno no verão e alto no inverno, já as correlações temporais são altas (0,49 até 0,72) indicando que a variação da precipitação interanual observada é capturada pelo RegCM4.

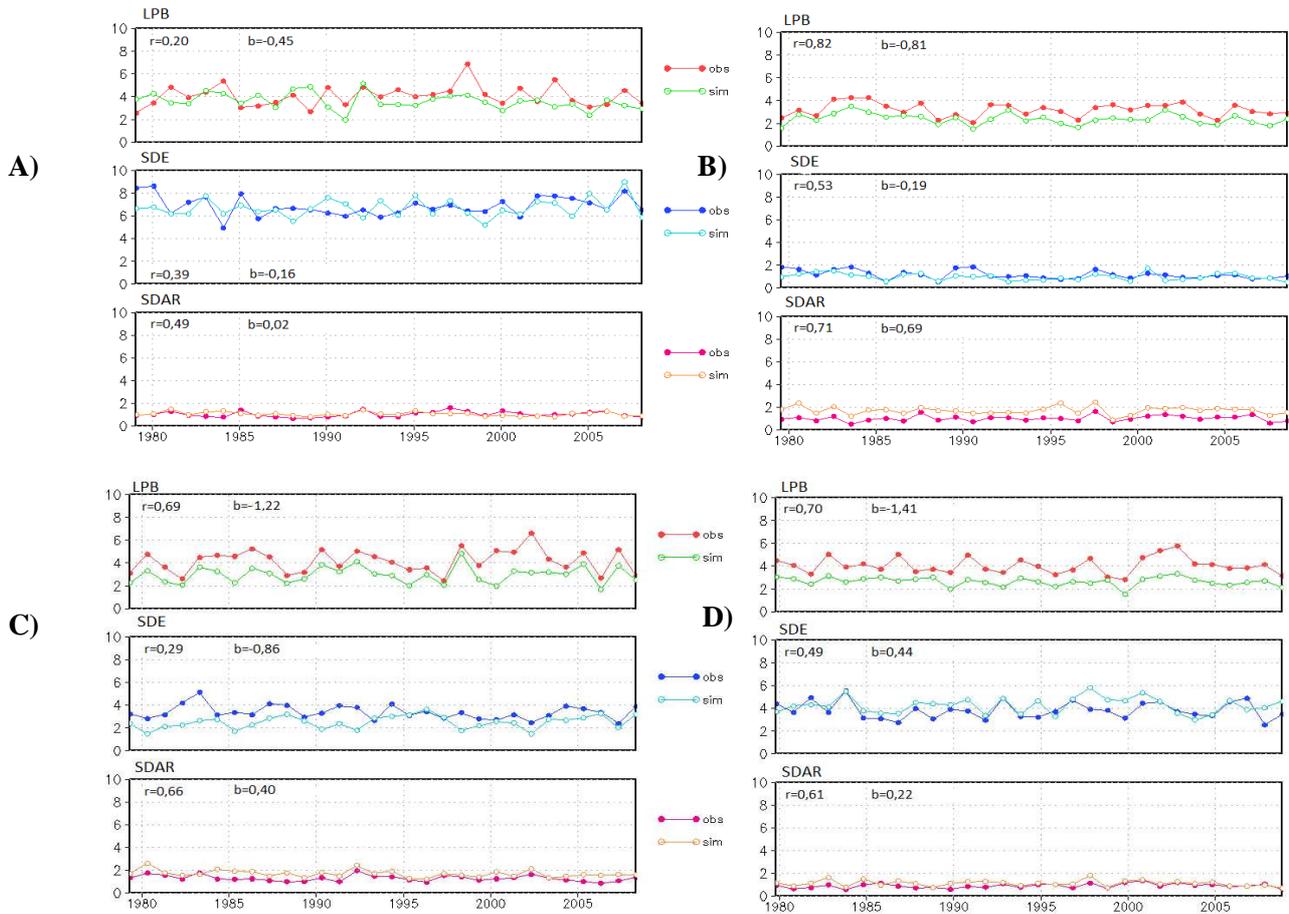


Figura 3.1.3.: Série temporal da precipitação para as três diferentes regiões selecionadas (a) Verão austral (DJF) (b) Inverno austral (JJA) (c) Outono austral (MAM) (d) Primavera austral (SON) simulada pelo RegCM4 e do CMAP.

De acordo com a figura 3.1.3 podemos observar que as simulações com o RegCM4 são representativas da climatologia da América do Sul.

4. FF sobre São Paulo e Rio Grande

4.1 Validação do Critério de identificação de FF

Esta seção apresenta a validação do critério de identificação de FF sobre as cidades de São Paulo, a partir de observações do IAG-USP, e Rio Grande, com observações da FURG-RS.

A tabela 4.1.1 apresenta o número de FF por estação do ano e total anual observado e simulado pelo RegCM4. Na tabela 4.1.1 o número total de passagens de FF no IAG-USP é subestimado pelo RegCM4 em aproximadamente -4%, similar ao que ocorre na FURG-RS também com subestimativa em $\sim -6\%$. Os maiores erros na simulação ocorrem no verão para as duas regiões de estudo, em que o RegCM4 subestima o número de passagens de FF no IAG-USP e FURG-RS em $\sim 21\%$ e $\sim 17\%$, respectivamente.

Tabela 4.1.1: Número de passagens de frentes frias simuladas pelo RegCM4 e observadas na FURG-RS (1991-2008) e IAG-USP (1979-2008) e o bias relativo (%).

	DJF	MAM	JJA	SON	TOTAL
FURG-RS	251	232	252	260	995
RegCM4	209	225	250	252	936
Bias (%)	-16,7	-3,0	-0,8	-3,1	-5,9

	DJF	MAM	JJA	SON	TOTAL
IAG-USP	296	334	351	387	1368
RegCM4	235	321	376	384	1316
Bias (%)	-20,6	-3,9	7,1	-0,8	-3,8

No inverno tem-se uma pequena subestimativa ($\sim 1\%$) do número de passagem de FF na FURG-RS, entretanto no IAG-USP ocorre superestimativa de aproximadamente 7%. Na primavera o RegCM4 subestima o número de FF nas duas cidades, nas quais na FURG-RS e IAG-USP as subestimativas são de aproximadamente 3% e 1%, respectivamente.

De acordo com a tabela 4.1.1 as FF são bem distribuídas ao longo das estações do ano, mas com número ligeiramente superior de FF sobre SP e RG ocorrendo na primavera. Este mesmo padrão foi verificado por Rodrigues et. al. (2004) que investigou FF no litoral de Santa Catarina.

A fim de analisar como o RegCM4 simula a variação local de variáveis próximas à superfície foram construídas as figuras 4.1.1 e 4.1.2 para o IAG-USP e para a FURG-RS, respectivamente, que apresentam as composições desde dois dias antes ($i-2$) até dois dias depois ($i+2$) da passagem da FF. Para o IAG-USP (figura 4.1.1) os padrões de variações em todas as séries temporais simuladas seguem os das observadas. Na figura 4.1.1a o vento meridional de norte pré-frontal é superestimado pelo RegCM4 nos dois dias anteriores à passagem da FF sobre SP. Neste período, o vento de norte se mantém praticamente constante, tanto na primavera como no inverno, com o vento de norte mais intenso simulado no inverno. Já no IAG-USP o vento de norte é fraco nos dois dias antes da FF. No dia da FF o vento de sul simulado é mais intenso que o observado nas duas estações do ano. As amplitudes simuladas pelo RegCM4 são maiores que as observadas, tanto na primavera quanto no inverno, com valores de vento meridional simulados no dia da FF sobre SP superiores a 2,0 m/s enquanto o observado no IAG-USP não ultrapassa 1,5 m/s. Nos dois dias depois da FF o RegCM4 continua superestimando o vento que agora é de sul e com tendência de diminuição, o que também ocorre na observação.

Quanto ao vento zonal (figura 4.1.1 b), dois dias antes da FF sobre SP, os ventos de leste na estação meteorológica do IAG-USP são menos intensos que os simulados pelo RegCM4, tanto na primavera quanto no inverno. Um dia antes da FF sobre SP tanto no RegCM4 quanto no IAG-USP os ventos são de oeste, com intensidade variando desde 0,3 até 0,6 m/s. No dia da FF o RegCM4 subestima o vento de leste na primavera ($\sim -0,4$ m/s) e no inverno mantém ventos de oeste fracos (0,2 m/s) diferindo dos dados da estação meteorológica (IAG-USP) onde o vento é de leste (-0,6 m/s). Nos dois dias depois da passagem da FF sobre SP o RegCM4 superestima o vento de leste no inverno e primavera, e a partir do dia da FF é simulada uma forte tendência de diminuição do vento de leste. Ao analisar em conjunto o vento meridional e zonal (figuras 4.1.1 a e b, respectivamente) verifica-se que a velocidade do vento em superfície é maior no RegCM4 em comparação com o IAG-USP.

A série temporal da temperatura do ar (figura 4.1.1 c) mostra que o padrão observado em todos os dias de atuação da FF no IAG-USP é simulado pelo RegCM4. No entanto, no inverno a temperatura é superestimada pelo RegCM4 em todos os cinco dias, já na primavera a diferença de temperatura simulada e observada não ultrapassa 0,5°C, com superestimativas nos dias que antecedem e no dia da FF. No RegCM4 é apresentada habilidade em simular tanto a fase quanto a intensidade da temperatura na primavera e no inverno.

A figura 4.1.1d mostra que existe uma queda de umidade relativa (UR) um dia antes

da passagem da FF sobre o IAG-USP em comparação com dois dias antes. Esta diminuição da UR está relacionada ao aumento de temperatura do ar (figura 4.1.1 c) um dia antes da FF. No RegCM4 na primavera esta diminuição praticamente não é simulada, pois a UR permanece constante nos dois dias anteriores à FF. Nos dois dias de pré-frontal a UR não ultrapassa os 78% tanto no campo simulado como no observado. A partir do dia da passagem da FF a UR sobe para valores superiores a 85% nas séries observada e simulada. Na primavera o RegCM4 superestima a UR desde o dia da FF até dois dias depois, enquanto no inverno é simulada uma pequena superestimativa de UR somente no dia da FF. Em geral, o RegCM4 simula o padrão da variação diária de UR, no entanto no inverno as subestimativas na pré-frontal são elevadas em comparação com o IAG-USP.

Na primavera a figura 4.1.1 e mostra que o RegCM4 superestima a precipitação em toda a série, exceto um dia antes da FF sobre SP. Ainda na primavera no dia da FF o RegCM4 simula a chuva com valor de aproximadamente 13 mm/dia, enquanto no CPC é observado o valor de aproximadamente 8 mm/dia. No inverno é mostrado menor volume de chuva em comparação com a primavera e o padrão é simulado pelo RegCM4.

A evolução temporal da pressão de superfície (figura 4.1.1 g) simulada segue a da estação do IAG-USP tanto no inverno como na primavera. A pressão diminui até o dia pré-frontal e aumenta desde o dia da FF até dois dias depois. Comparativamente, existe uma diferença sistemática de pressão de aproximadamente 40 hPa entre o RegCM4 e o IAG-USP que deve-se principalmente à diferença de altitude.

De maneira geral, os resultados mostrados na figura 4.1.1 são representativos da atuação das FF sobre SP, em que as principais características das variáveis analisadas na passagem de uma FF são capturadas pelo critério. De acordo com a figura 4.1.1 na pré-frontal são observados ventos predominantes de noroeste, aumento de consequente diminuição da UR, e queda de pressão de superfície. A partir do dia da FF, os ventos predominam de sudoeste, a temperatura diminui, a pressão de superfície aumenta gradativamente e a UR aumenta em resposta à disparada da precipitação sobre SP principalmente na primavera.

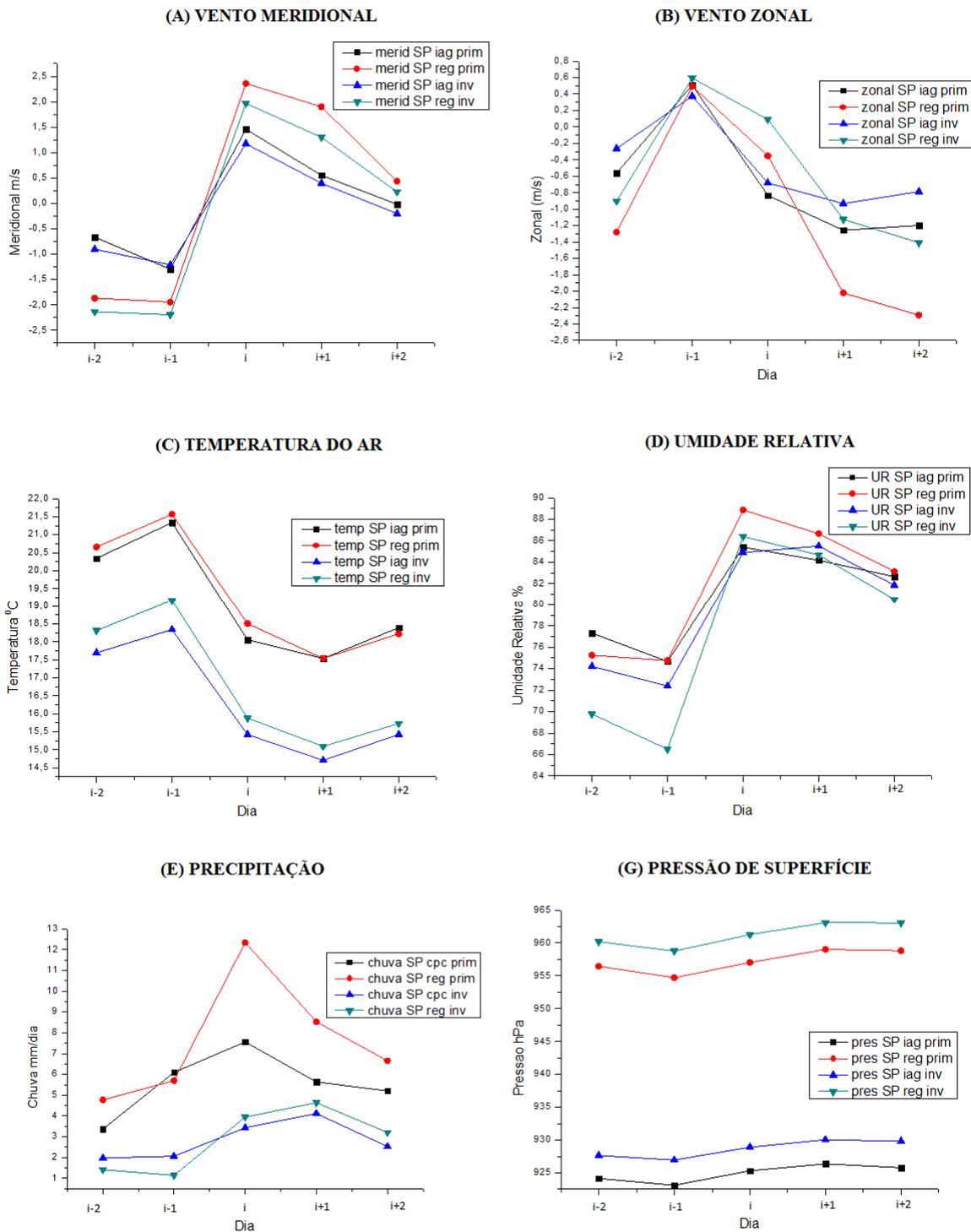


Figura 4.1.1.: Séries temporais das variáveis: vento meridional (a), vento zonal (b), temperatura do ar a 2 metros (c) e umidade relativa (d), precipitação (e), velocidade do vento (f) e pressão de superfície (g) desde dois antes (i-2) até dois dias depois (i+2) da passagem das FF no IAG-USP, precipitação observada no CPC e simulada pelo RegCM4 na primavera e inverno.

Sobre a FURG-RG, o vento meridional (figura 4.1.2 a) é de norte entre dois e um dia antes da FF tanto no inverno como na primavera. Nestes dois dias na FURG-RS é mostrada uma tendência de aumento do vento de norte, enquanto que no RegCM4 o vento de norte permanece praticamente constante. No dia da FF sobre RG o vento meridional muda de norte para sul tanto na observação como na simulação e os valores simulados são mais próximos dos observados em comparação com SP. Nos dois dias depois da FF sobre RG os dados simulados e observados mostram uma tendência de diminuição do vento de sul. O RegCM4 superestima a intensidade do vento neste período na primavera, mas no inverno a superestimativa ocorre somente no primeiro dia depois da FF.

A evolução no tempo do vento zonal (figura 4.1.2 b) na primavera mostra intensidades simuladas pelo RegCM4 similares às da FURG-RS, exceto um dia antes da FF onde o RegCM4 superestima a observação. O dia da FF na primavera é o único em toda a série em que o vento torna-se de oeste e este padrão é simulado pelo RegCM4. No inverno, o RegCM4 mostra que o vento de oeste predomina em toda a série temporal diferentemente dos dados da FURG-RS onde os ventos tornam-se de oeste somente a partir do dia da FF. As superestimativas pelo RegCM4 de intensidade do vento de oeste são grandes em todo o período, como, por exemplo, no dia da FF quando no RegCM4 o vento atinge 3,0 m/s e na FURG é de ~1,0 m/s.

A figura 4.1.2 c mostra que o padrão da série temporal de temperatura do ar observada, com aquecimento no dia anterior a FF sobre RG e resfriamento no dia e após a passagem da FF, é simulado pelo RegCM4 na primavera e inverno. Na primavera as diferenças entre RegCM4 e observação são pequenas. Ainda na primavera nota-se que o RegCM4 simula corretamente o aquecimento no dia anterior à FF e o resfriamento no dia depois da FF. No inverno existe uma subestimativa sistemática de temperatura do ar pelo RegCM4 em todo o período de análise, mas a fase é simulada.

Na umidade relativa (figura 4.1.2d) o RegCM4 subestima os valores observados em toda a série e nas duas estações do ano analisadas, sendo que na primavera as subestimativas são mais intensas, na qual a UR máxima simulada chega a até aproximadamente 76%. No inverno o RegCM4 simula corretamente a fase e a intensidade observada na FURG-RS.

Na figura 4.1.2e a precipitação simulada (RegCM4) está em fase com a observada (CPC), no entanto o RegCM4 subestima a intensidade da chuva na primavera e inverno. De acordo com os resultados, as FF contribuem com maior volume de precipitação no inverno do

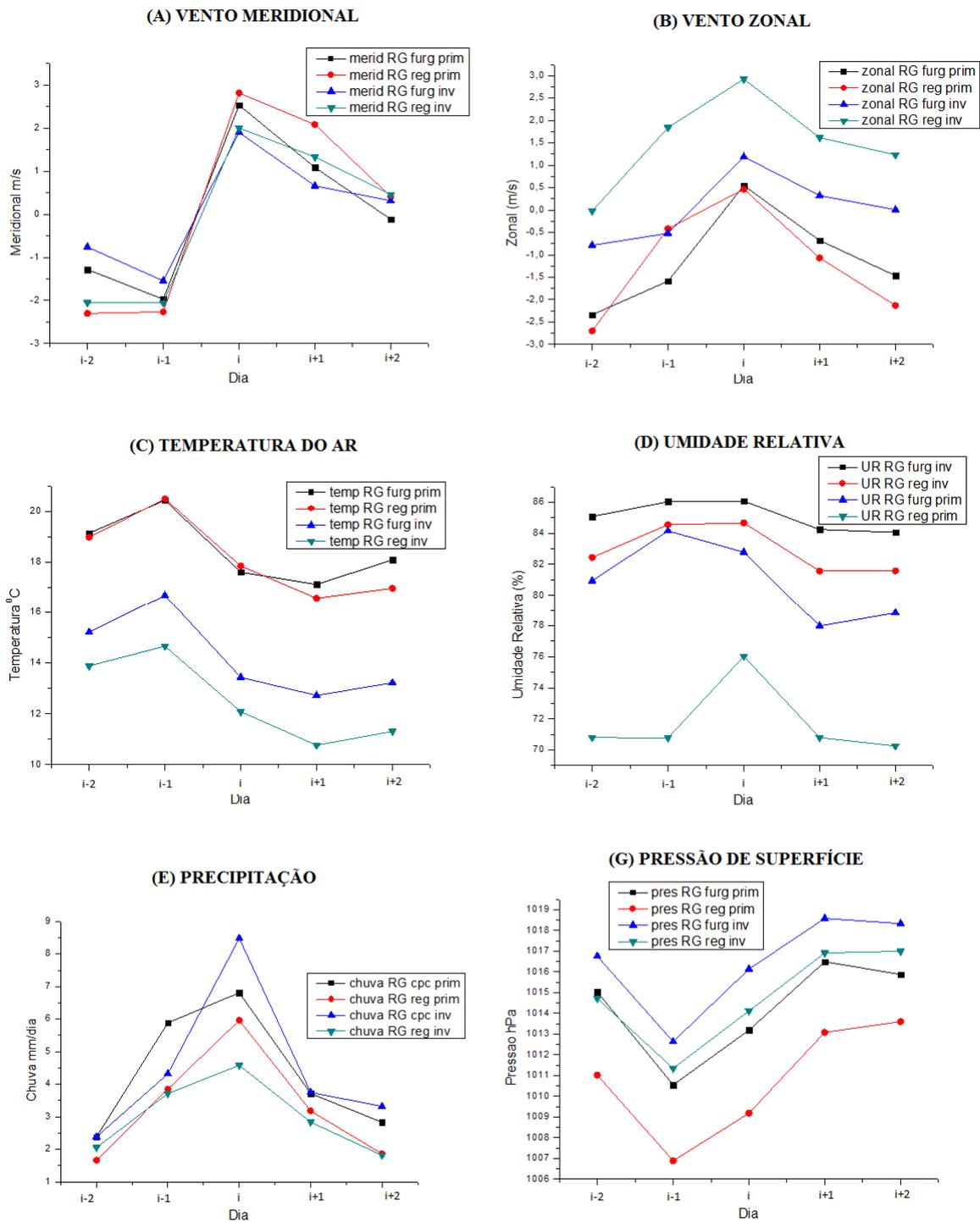


Figura 4.1.2.: Séries temporais das variáveis: vento meridional (a), vento zonal (b), temperatura do ar a 2 metros (c) e umidade relativa (d), precipitação (e), velocidade do vento (f) e pressão de superfície (g) desde dois antes (i-2) até dois dias depois (i+2) da passagem das FF na FURG-RS e simulada pelo RegCM4 na primavera e inverno.

que na primavera, sendo que no dia da FF sobre RG no inverno a chuva chega até aproximadamente a 9 mm/dia.

A pressão de superfície (figura 4.1.2g) mostra um mínimo um dia antes da FF sobre RG, que se deve à aproximação da zona frontal associada a um ciclone extratropical. Tanto na primavera quanto no inverno o RegCM4 subestima a pressão, enquanto o padrão de evolução no tempo simulado segue o observado. As maiores subestimativas ocorrem na primavera com diferenças de pressão entre FURG-RS e RegCM4 chegando a até 4 hPa. Esta subestimativa diminui no inverno para aproximadamente 2 hPa.

4.2 Composições RG

Para avaliar os padrões espaciais observados e simulados das variáveis meteorológicas foram construídas composições para o período de passagem da frente fria (FF), desde dois dias antes (d+2) até um dia depois (d+1), e também as anomalias associadas quanto campos médios. Isto permite verificar tanto os campos característicos associados às frentes frias (FF) fornecidos pela ERA-Interim ou CPC como os erros de simulação de cada variável pelo RegCM4. Serão apresentados os campos de pressão ao nível médio do mar, chuva, vento em níveis de pressão (850, 500 e 200 hPa) e umidade específica no nível de pressão de 850 hPa.

Os campos de anomalias foram construídos a partir da diferença entre o campo médio utilizando as datas de FF obtidas através do CFF de uma determinada estação do ano e o campo médio sazonal da mesma estação do ano. Para RG, são apresentadas composições desde dois dias antes da FF até um dia depois, omitindo-se as composições para dois dias depois da FF, pois estas possuem padrão similar às figuras referentes à um dia antes da FF obtidas para o CFF para SP.

Rio Grande: Inverno

Precipitação

A composição de anomalias de chuva para o inverno em RG dois dias antes da passagem da FF mostra no CPC um núcleo positivo de precipitação, entre 2,5 e 4 mm/dia, nas regiões desde o centro do Chile até o leste da Argentina, indicando que a FF ainda está ao sul de RG (**figura 4.2.1 a - b**). Ao mesmo tempo, tem-se uma área mais seca (anomalia negativa) no sul do Brasil, sul do Paraguai, noroeste do Uruguai e em uma pequena área no nordeste da Argentina. No RegCM4 a posição desta mesma região seca é similar ao CPC no sul do Brasil

e sul do Paraguai, com valores entre -1 e -2,5 mm/dia. Por outro lado, a região com mais chuva ao sul, isto é sobre o Chile, no RegCM4 apresenta núcleo com precipitação mais intensa (superiores a 7 mm/dia) em comparação com o CPC no qual a anomalia não ultrapassa 4 mm/dia, como mostra a diferença entre as anomalias na figura 4.2.1 a – b.

Um dia antes da passagem da FF (figura 4.2.1 c-d), o CPC indica um avanço da anomalia positiva de precipitação para norte atingindo o Uruguai e nordeste da Argentina, onde a anomalia de chuva não ultrapassa 2,5 mm/dia. Já a anomalia seca se encontra principalmente sobre a região sul do Brasil, com intensidade até -2,5 mm/dia. A precipitação também avança para norte no RegCM4, porém o modelo mostra uma área menor de anomalias negativas comparado ao CPC. No RegCM4 a maior intensidade negativa situa-se mais próxima do litoral sul do Brasil, enquanto no CPC adentra para oeste sobre o continente. Para as anomalias positivas de precipitação o RegCM4 mostra uma área maior de chuva (desde o leste da Argentina, passando pelo Uruguai e atingindo o sul do Brasil e Paraguai) comparada ao CPC.

No dia da passagem da FF (**figura 4.2.1 e - f**) o CPC indica uma área de anomalias positivas de precipitação sobre o Uruguai, centro-sul do Paraguai e no Rio Grande do Sul, com um núcleo de maior volume de chuva, variando entre 2,5 até 5,5 mm/dia, posicionado no sul do Rio Grande do Sul e Uruguai. O CPC posiciona uma área seca sobre os litorais do Paraná, São Paulo e Rio de Janeiro. Já o RegCM4 mostra a precipitação positiva sobre o Uruguai, regiões norte e nordeste da Argentina, Paraguai e Rio Grande do Sul, com o volume não ultrapassando 2,5 mm/dia. Da mesma maneira a área seca (anomalia seca) no RegCM4 está posicionada sobre o litoral das regiões sul e sudeste concordando com o CPC. Já a área seca no centro do Chile também concorda em posicionamento com o observado, mas sua intensidade é superestimada pelo RegCM4 chegando até -5,5 mm/dia.

Na figura 4.2.1 g - h, um dia após a passagem da FF sobre RG, o CPC mostra uma área de anomalia positiva de precipitação orientada noroeste-sudeste, desde a costa sul do Brasil até norte da Bolívia, com um núcleo entre 2,5 até 4 mm/dia sobre o centro-leste e norte do Rio Grande do Sul, incluindo RG onde foi utilizado o critério para identificação de FF. O RegCM4 posiciona a região de anomalia positiva de precipitação associada à FF deslocada para norte daquela do CPC, e com a intensidade menor do que no CPC. Já a área com anomalia negativa de precipitação está situada sobre o Uruguai e nordeste da Argentina no RegCM4, diferentemente do que ocorre no CPC onde a região seca situa-se no leste da

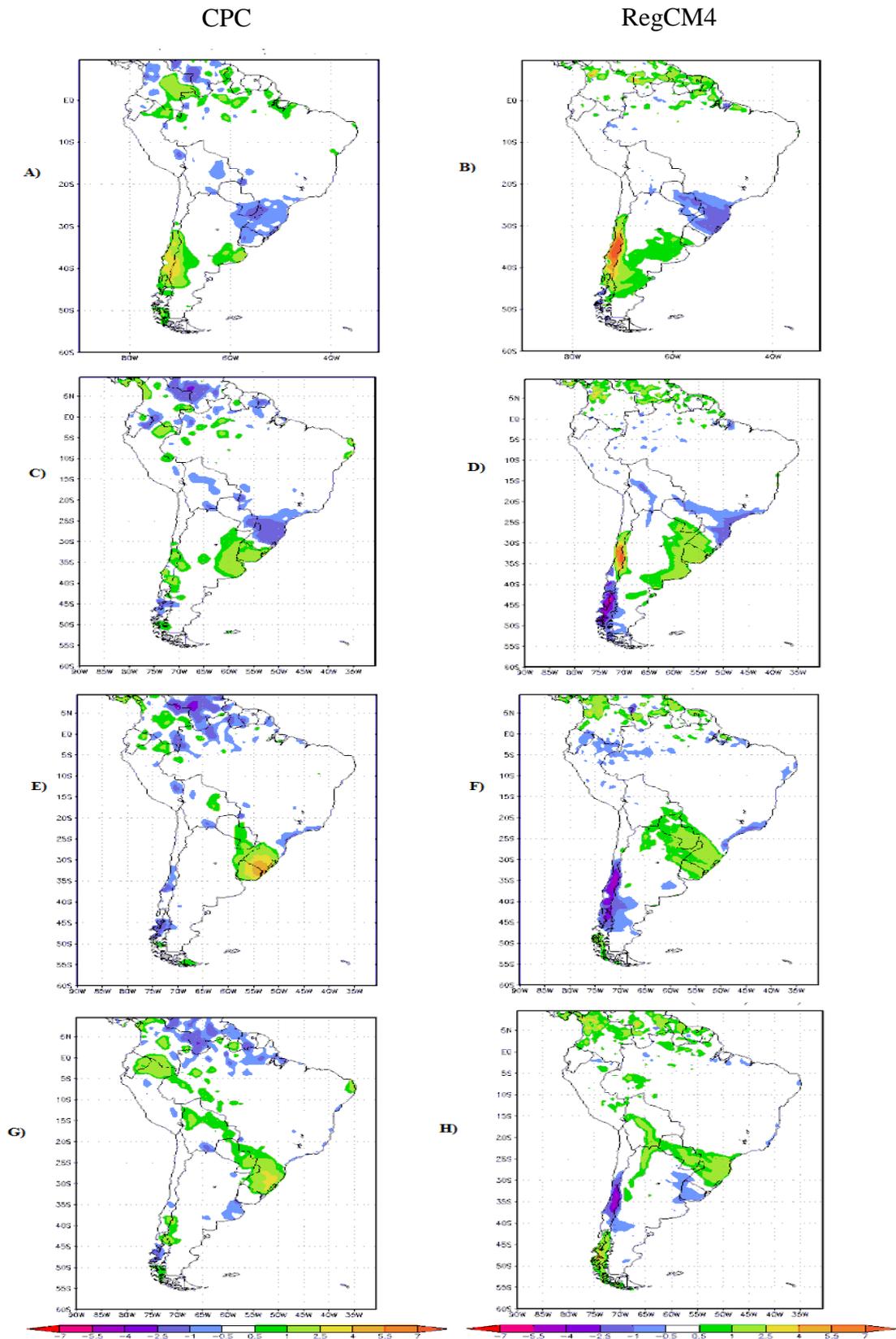


Figura 4.2.1. Anomalias de precipitação (mm/dia) no inverno para CFF aplicado na cidade de Rio Grande – RS no período de 1991 - 2009, coluna da esquerda estão as anomalias com dados do CPC e na coluna da direita anomalias no RegCM4. Os itens (a)-(b) correspondem ao dia menos dois, (c)-(d) dia menos um, (e)-(f) dia da passagem da FF e (g)-(h) dia mais um.

Argentina.

Temperatura

Nas composições de anomalias de temperatura do ar (figura 4.2.2 a – b), dois dias antes da passagem da FF a interface entre as anomalias frias e quentes situa-se no extremo sul da América do Sul na ERA-Interim. O RegCM4 simula esta interface ligeiramente deslocada para norte. Além disso, o modelo simula anomalias quentes mais intensas do que na ERA-Interim. Essa característica do modelo em adiantar a passagem da FF e de simular anomalias mais intensas do que na análise se repetem ao longo dos demais dias analisados. No dia da passagem das frentes em RG (figura 4.2.2 e – f), a interface entre as anomalias de temperatura encontra-se no Uruguai na ERA-Interim, enquanto já atingiu o RS no RegCM4.

Na ERA-Interim, as anomalias de temperatura em superfície (figura 4.2.2 c) são positivas sobre o norte do Uruguai, sul do Rio Grande do Sul, Paraguai e nordeste da Argentina (valores superiores a $2,5^{\circ}\text{C}$). Em geral estas anomalias se intensificaram em comparação com o dia anterior (figura 4.2.2 a), com a região de interface entre as áreas fria (pós-frontal) e quente (pré-frontal) situando-se no centro sul da Argentina na ERA-Interim.

No dia anterior à chegada da FF em RG, nota-se um avanço da interface entre as anomalias negativas e positivas de temperatura mais rápido para norte e um aumento do gradiente entre estas anomalias, no RegCM4 (figura 4.2.2 d) em comparação com a ERA-Interim (figura 4.2.2 c).

Tanto na ERA-Interim como no RegCM4 (figura 4.2.2 e – f) ao atingir RG a FF induz intensificação das anomalias negativas de temperatura devido ao avanço para leste-nordeste do anticiclone polar. No entanto, o RegCM4 superestima estas anomalias negativas que chegam até o limiar de $-2,5^{\circ}\text{C}$ e na ERA-Interim não ultrapassa $-1,5^{\circ}\text{C}$. A simulação também indica uma maior desintensificação da região de anomalias positivas ao norte de RG, entre 1 até $1,5^{\circ}\text{C}$, do que na Era-Interim onde estas anomalias permanecem intensas, ou seja, chegam até $2,5^{\circ}\text{C}$.

A figura 4.2.2 g – h que mostra as anomalias de temperatura um dia após a FF passar por RG na ERA-Interim as anomalias negativas na retaguarda variam de -1 até $-2,5^{\circ}\text{C}$ sobre o nordeste da Argentina e Uruguai. O RegCM4 superestima a área ocupada pela anomalia fria mais intensa (desde -1 até $-2,5^{\circ}\text{C}$). Neste dia, as anomalias positivas de temperatura na frente da FF perdem intensidade tanto na ERA-Interim (até $1,5^{\circ}\text{C}$) como no RegCM4. Em

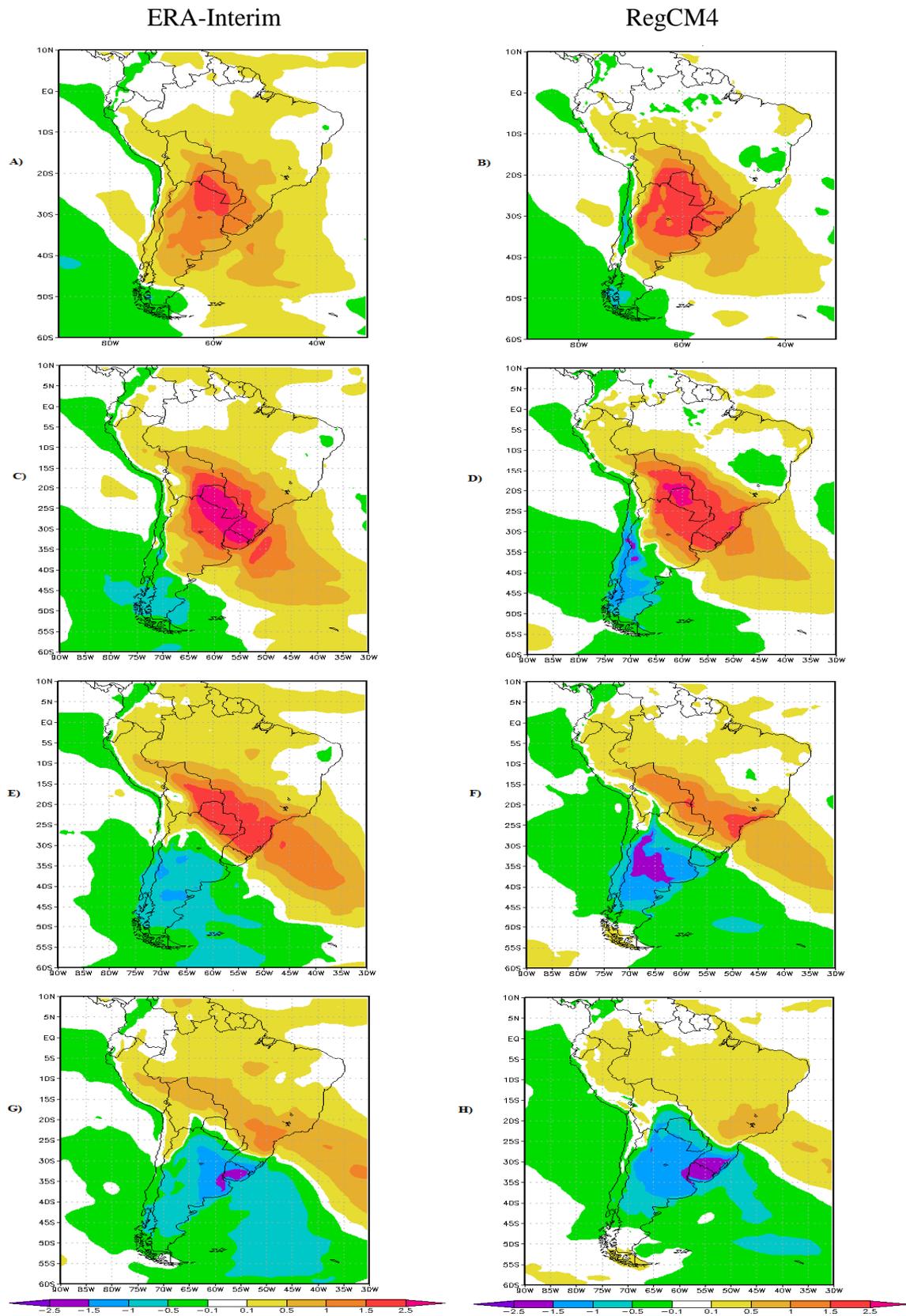


Figura 4.2.2. Idem à Figura 4.2.1, mas para anomalia de temperatura do ar (°C).

comparação com a ERA-Interim o RegCM4 continua avançando mais rapidamente para leste-nordeste a interface entre as anomalias negativas e positivas de temperatura.

Pressão

A figura 4.3 apresenta as composições para anomalias de pressão ao nível médio do mar durante o período de passagem da FF em RG. Na ERA-Interim o núcleo mais intenso de anomalias negativas de pressão (desde -4 até -6 hPa), que corresponde ao núcleo do ciclone extratropical, dois dias antes da passagem da FF situa-se no extremo sul da América do Sul (figura 4.2.3 a). Este padrão é similar no RegCM4, no entanto a área do núcleo mais intenso (entre -4 até -6 hPa) de anomalias negativas de pressão é superestimada pelo modelo. Além disso, o posicionamento destas anomalias negativas indica que a FF apresenta configuração bastante meridional sobre o centro-sul da Argentina. Com o passar dos dias, as anomalias negativas de pressão migram para leste-nordeste possibilitando a incursão de anomalias positivas de pressão em grande parte da América do Sul já no dia anterior ao da FF (figura 4.2.3 c). Em outras palavras, à medida que a FF fria desloca-se para nordeste, o anticiclone pós-frontal avança sobre o continente. As anomalias de pressão de superfície na ERA-Interim (figura 4.2.3 c) mostram que o ciclone avança para leste e as anomalias negativas se intensificam sobre o continente (desde -4 até -6 hPa) em uma vasta região compreendendo o Uruguai, leste-nordeste da Argentina, sul da Bolívia, noroeste do Paraguai e sul do Rio Grande do Sul. Esta maior intensidade das anomalias negativas de pressão (indicando um ciclone em superfície mais intenso) não implicou em grande impacto na precipitação, a qual não ultrapassa o limiar de anomalias positivas de 2,5 mm/dia no CPC (figura 4.2.1 c). Na anomalia de pressão simulada pelo RegCM4 (figura 4.2.4 d) o núcleo do ciclone está centrado em 40⁰S-40⁰W e é mais intenso (valores superiores a -6 hPa) do que o Era-Interim (figura 4.2.3 c). No entanto, sobre o continente as anomalias negativas de pressão são mais intensas na ERA-Interim do que no RegCM4, variando entre -4 até -6 hPa na área que compreende o sul do Rio Grande do Sul e Uruguai.

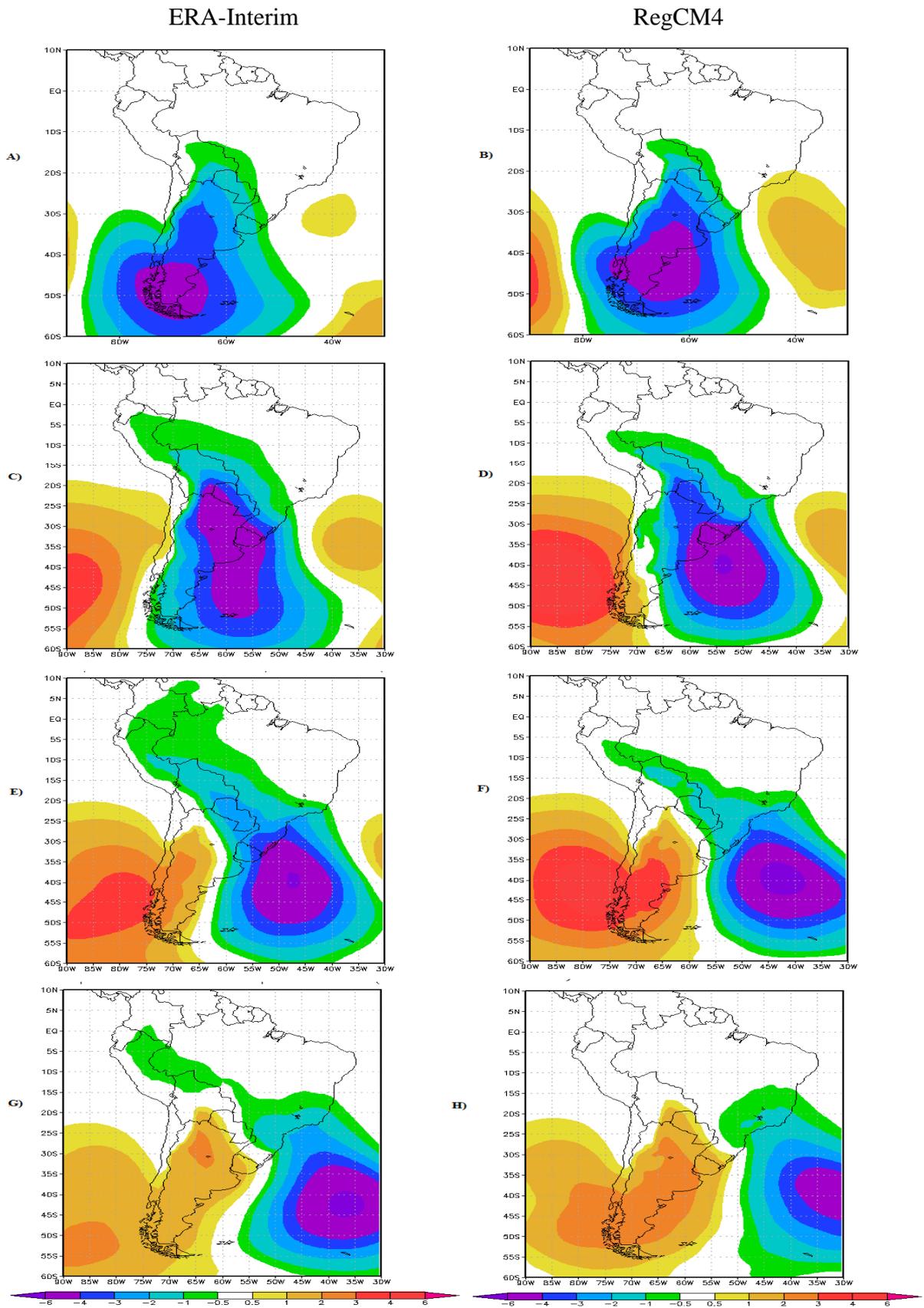


Figura 4.2.3. Idem à Figura 4.2.1, mas para anomalia de pressão em superfície (hPa).

Dessa forma, no dia da passagem da FF, as anomalias negativas de pressão estendem-se do sul da Amazônia para o Oceano Atlântico tanto na ERA-Interim quanto no RegCM4 (figura 4.2.3 e – f). As anomalias de pressão em superfície mostram que o núcleo do ciclone situa-se no oceano Atlântico Sul e é mais intenso no RegCM4 do que na ERA-Interim. Sobre o continente, principalmente na região com anomalia positiva de precipitação mais intensa no CPC do que no RegCM4 (figura 4.2.1 e – f), na ERA-Interim as anomalias negativas de pressão variam entre -2 e -4 hPa, enquanto no RegCM4 não ultrapassam -2 hPa (figura 4.2.1 f). Em adição, ressalta-se que no RegCM4 as anomalias negativas de pressão, associadas ao ciclone extratropical, estão ligeiramente deslocadas para leste em relação às da reanálise. A anomalia anticiclônica na retaguarda da FF ocupa maior área, praticamente todo o centro-sul da Argentina, e também é mais intensa no RegCM4 do que na ERA-Interim. Em síntese, no dia da FF tanto o ciclone como o anticiclone são mais intensos e avançaram mais para leste no RegCM4 do que na ERA-Interim.

Um dia após a FF passar por RG, as anomalias de pressão em superfície mostram que a área de anomalias negativas de pressão sobre o continente, assim como o centro do ciclone, são mais intensa no Era-Interim, do que no RegCM4 (figuras 4.2.3 g – h). Isto contribui para precipitação mais intensa no CPC (figura 4.2.1 g) comparado ao RegCM4 (figura 4.2.1 h). Em adição, as anomalias positivas de pressão atingem até o Uruguai na ERA-Interim, enquanto no RegCM4 já avançaram até o oeste do RS (figura 4.2.3 g – h). De maneira geral, tanto o ciclone como o anticiclone avançam mais rapidamente para leste no RegCM4 do que na ERA-Interim um dia após a FF passar por RG.

Vento em 850 hPa

Dois dias antes da FF atingir RG, o campo médio de vento em 850 hPa (figura 4.2.4 a – b) na ERA-Interim a magnitude do vento é mais intensa (desde 7 até 11 m/s) sobre o Paraguai, norte da Argentina e sul da Bolívia, região onde normalmente atua o jato de baixos níveis (JBN; Marengo et al., 2004). No RegCM4 esta mesma região a magnitude dos ventos não passaram de 9 m/s. Ainda no campo médio de vento em 850 hPa, a região de confluência dos ventos no leste da Argentina e Uruguai encontra-se deslocada para norte no RegCM4 comparada à ERA-Interim. O posicionamento do cavado e o escoamento em 850 hPa juntamente com os campos de precipitação, temperatura do ar e pressão em superfície indicam que a FF em superfície localiza-se sobre o centro da Argentina na ERA-Interim, e no RegCM4 a FF situa-se ligeiramente a leste desta.

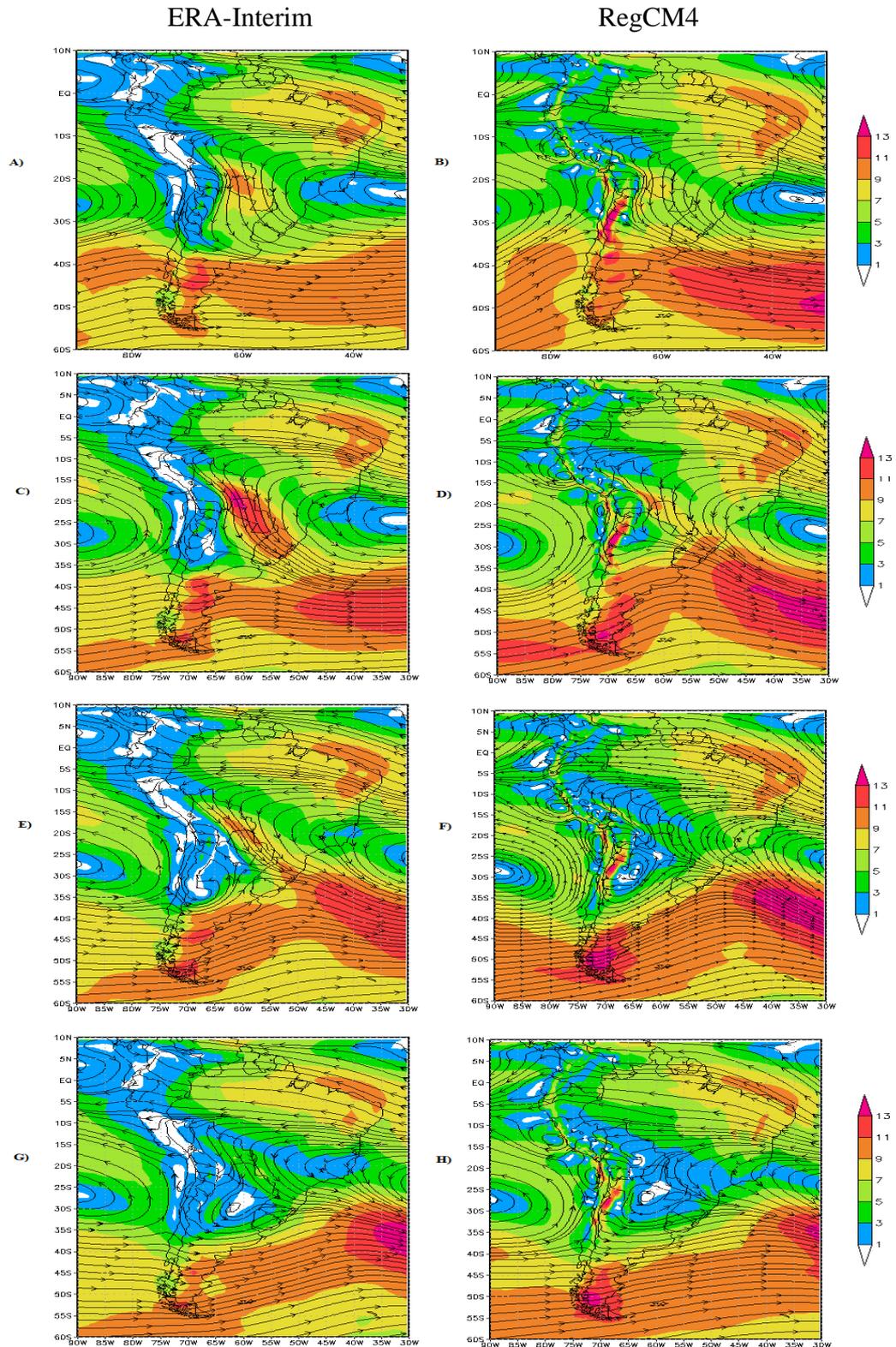


Figura 4.2.4. Campo médio de linhas de corrente e isotacas (sombreado em m/s) em 850 hPa no inverno para CFF aplicado na cidade de Rio Grande – RS no período de 1991 - 2009, coluna da esquerda estão os campos médios com dados da ERA-Interim e na coluna da direita campos médios no RegCM4. Os itens (a)-(b) correspondem ao dia menos dois, (c)-(d) dia menos um, (e)-(f) dia da passagem da FF e (g)-(h) dia mais um.

Na figura 4.2.4 c, a ERA-Interim mostra que na região de atuação do JBN de norte a magnitude do vento se intensifica (desde 7 até valores superiores a 13 m/s) em comparação com o dia anterior e desacelera a leste do cavado em 850 hPa no RG. O RegCM4 (figura 4.2.4 d) simula um padrão similar ao da ERA-Interim. No entanto o RegCM4 posiciona um cavado de onda mais longa sobre o leste da Argentina e Uruguai, diferentemente da ERA-Interim onde o cavado possui menor extensão leste-oeste e restringe-se ao leste da Argentina. Já o JBN simulado segue padrão similar da ERA-Interim, mas no RegCM4 a magnitude do vento chega somente no limiar de 11 m/s, ou seja, é mais fraco e ocupa menor área. De acordo com os padrões observados na precipitação, vento, temperatura do ar e pressão de superfície, a FF na ERA-Interim posiciona-se sobre o leste da Argentina e estende-se até o sul da Bolívia, noroeste do Paraguai e norte da Argentina. Já no RegCM4 a FF atinge o Uruguai, noroeste do Paraguai e sul da Bolívia, conforme mostrado para o dia anterior, a FF continua posicionada um pouco mais a norte no RegCM4 em comparação com a ERA-Interim.

Quando a FF chega à RG (figura 4.2.4 e – f) a confluência dos ventos está sobre RG na ERA-Interim e mais no norte no RegCM4. O cavado associado à região de confluência dos ventos posiciona-se sobre o Uruguai e nordeste da Argentina na ERA-Interim, enquanto que no RegCM4 o cavado está deslocado para norte. O JBN perde intensidade na ERA-Interim, na qual a magnitude dos ventos não ultrapassam o limiar de 11 m/s, já o RegCM4 não configura o JBN no dia da passagem da FF sobre RG, pois a magnitude do vento não ultrapassa 7 m/s.

Um dia após a passagem da FF sobre RG (figura 4.2.4 g – h) na ERA-Interim o JBN perde configuração, o anticiclone pós-frontal situa-se sobre o nordeste da Argentina e a região de confluência dos ventos associada à FF permanece praticamente estacionária sobre o Rio Grande do Sul, enquanto no RegCM4 esta região de confluência está posicionada sobre o sul de Santa Catarina. No nordeste da Argentina é mostrada uma alta pós-frontal tanto na ERA-Interim como no RegCM4. Este padrão de vento em 850 hPa em conjunto com a precipitação, pressão de superfície, temperatura do ar mostra que a FF esta atuando sobre a cidade de São Paulo na ERA-Interim, enquanto que no RegCM4 a FF atua sobre o Rio de Janeiro, este resultado mostra que a FF continua deslocada para norte no RegCM4 em relação a FF na ERA-Interim.

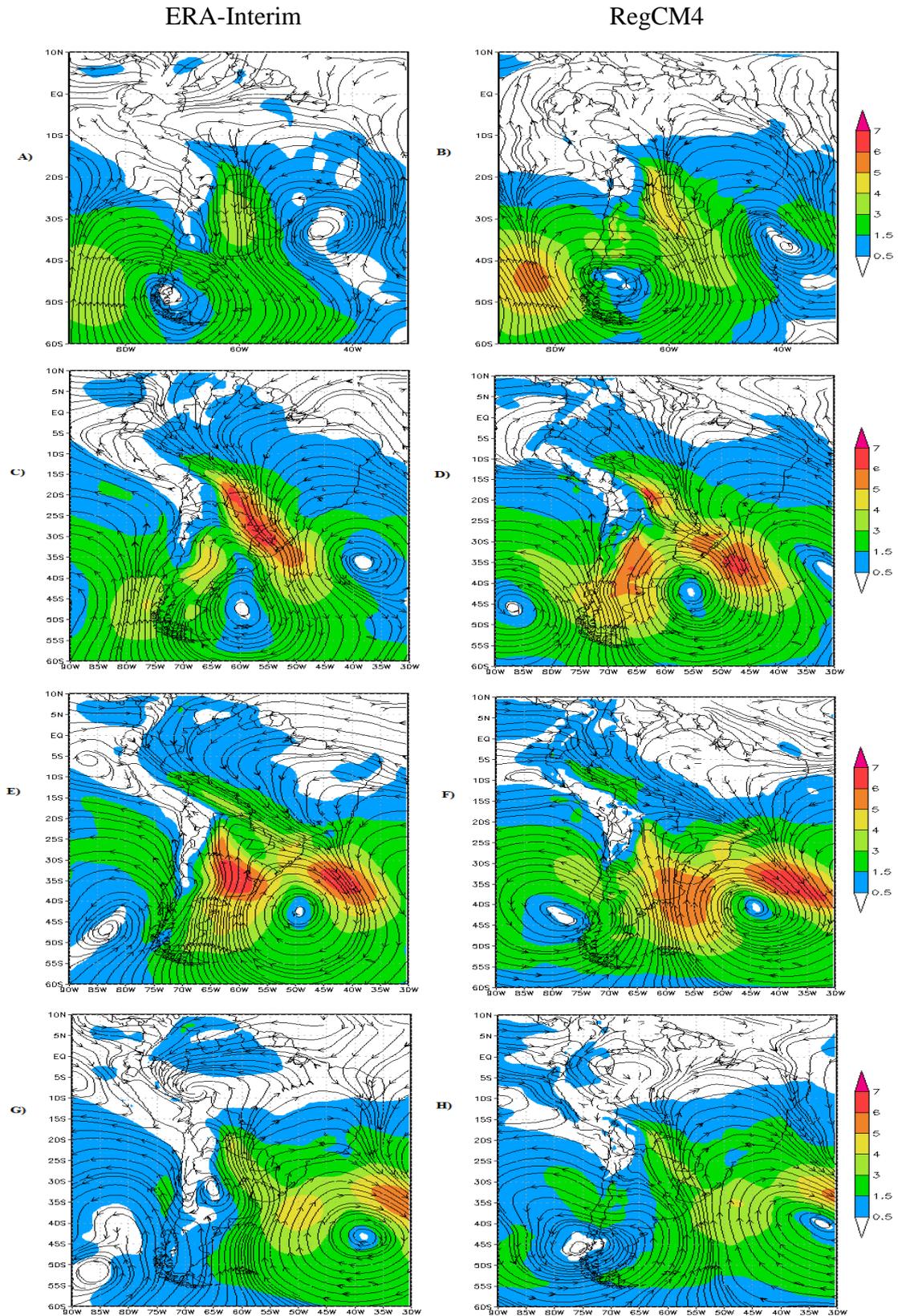


Figura 4.2.5. Anomalia de linhas de corrente e velocidade do vento (m/s) em 850 hPa no inverno para CFF aplicado na cidade de Rio Grande – RS no período de 1991 - 2009, coluna da esquerda estão as anomalias com dados da ERA-Interim e na coluna da direita anomalias do RegCM4. Os itens (a)-(b) correspondem ao dia menos dois, (c)-(d) dia menos um, (e)-(f) dia da passagem da FF e (g)-(h) dia mais um.

Anomalias Ventos em 850 hPa

Na ERA-Interim o posicionamento do ciclone no campo de anomalias de vento em 850 hPa sobre o sul da Argentina coincide com aquele das anomalias de pressão em superfície (figura 4.2.3 a – b). Dois dias antes da passagem da FF (figura 4.2.5 a – b), as anomalias de vento em 850 hPa mostram que nos campos observado e simulado o ciclone está posicionado sobre o sul da América do Sul. As anomalias de magnitude de vento mais intensas no RegCM4 situam-se a oeste-sudeste do ciclone, já o Era-Interim estas anomalias são mais fracas. No dia anterior a passagem da FF (figura 4.2.5 d) sobre a cidade de RG, o RegCM4 novamente superestima a intensidade da anomalia do vento à nordeste e noroeste da anomalia ciclônica. No dia da passagem da FF sobre RG (figura 4.2.5 e – f), tanto na ERA-Interim como no RegCM4, o JBN sobre a Bolívia se desintensifica em relação ao dia anterior.

A figura 4.2.5 c, que corresponde às anomalias de vento em 850 hPa na ERA-Interim no dia anterior a passagem da FF em RG, mostra magnitude das anomalias de vento mais intensas (desde 4 até 7 m/s) na região desde o sudeste da Bolívia até a costa do Uruguai e Rio Grande do Sul.

No dia da passagem da FF sobre RG (figura 4.2.5 e – f) tanto na Era-Interim como no RegCM4 desconfiguram a região de JBN comparado ao dia anterior. Nesta área, as anomalias de magnitude do vento no ERA-Interim não ultrapassam 4 m/s e são mais fracas ainda no RegCM4. Ainda nas áreas à leste - oeste do centro do ciclone sobre o oceano Atlântico as anomalias de magnitude do vento em 850 hPa se intensificam em comparação ao dia anterior na ERA-Interim. O RegCM4 simula intensidade equivalente à da reanálise no leste do ciclone, enquanto que no oeste a intensidade é subestimada.

Anomalia de umidade específica em 850 hPa

Nas anomalias de umidade específica (figura 4.2.6 a – b) é observado na ERA-Interim uma região úmida no centro norte da Argentina, centro do Chile, Uruguai, Paraguai e sudoeste do Rio Grande do Sul, chegando nesta região até o limiar de 9 g/kg. O RegCM4 simula um padrão similar ao da ERA-Interim, no entanto estende a região de anomalias positivas em direção ao oceano Atlântico Sul diferentemente do observado na ERA-Interim. Ainda dois dias antes da FF sobre RG, a ERA-Interim posiciona um núcleo seco sobre a região central do Brasil, já o RegCM4 simula esta região com predomínio de normalidade.

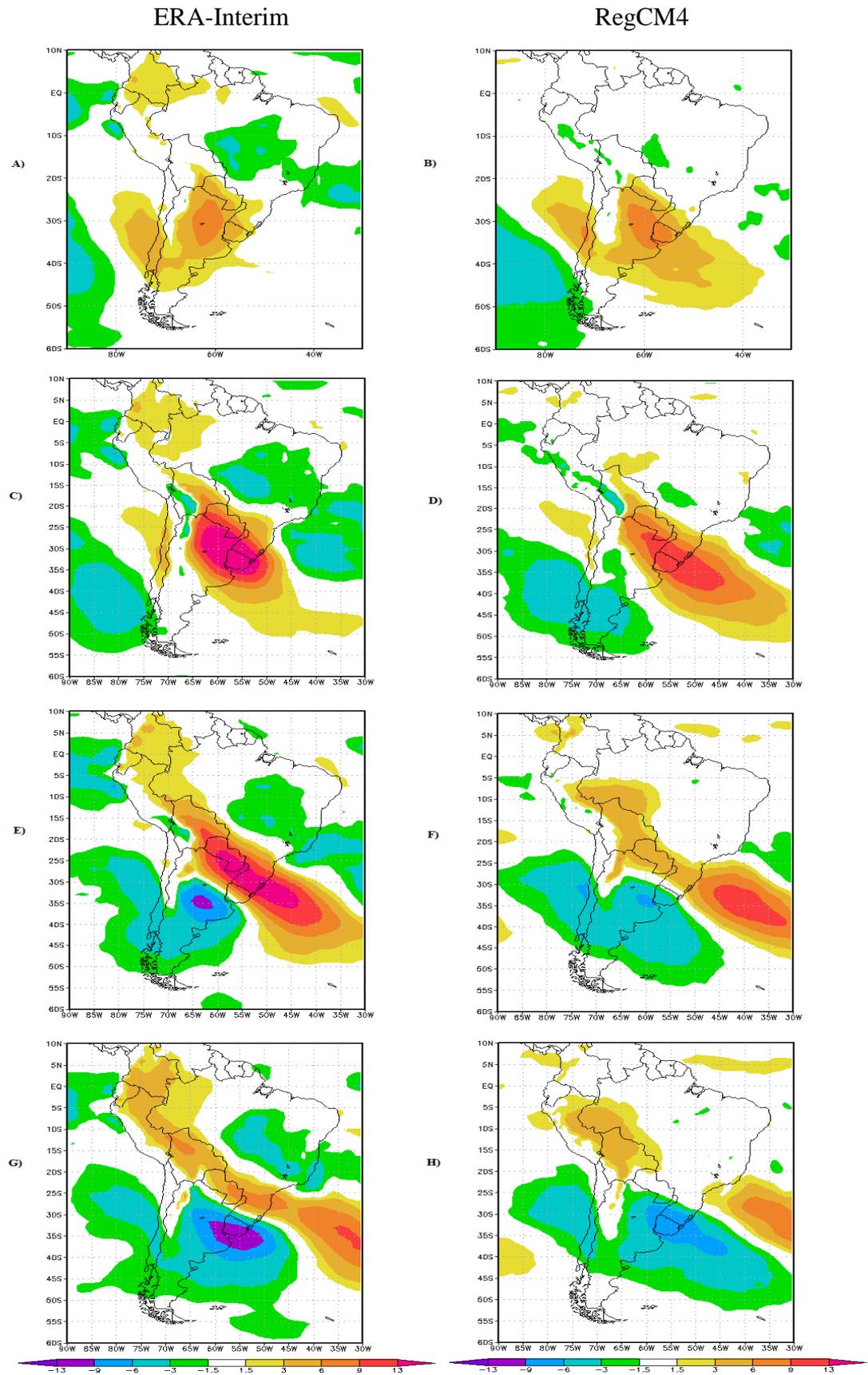


Figura 4.2.6. Idem à Figura 4.2.1, mas para unidade específica (g/kg) em 850 hPa.

Um dia antes da FF sobre RG (figura 4.2.6 c – d) as anomalias positivas de umidade específica avançam para norte e se intensificam na ERA-Interim, o núcleo úmido associado à FF posiciona-se sobre o Uruguai, nordeste da Argentina e sul do Rio Grande do Sul e chega a valores superiores a 13 g/kg. As anomalias negativas posicionadas a norte se intensificam comparada a dois dias antes da FF e o campo simulado segue na normalidade nessa região. O RegCM4 subestima a intensidade das anomalias positivas de umidade e ao sul da banda úmida é simulada região de anomalias negativas no sul da Argentina, região esta que não é observado na ERA-Interim.

No dia da FF sobre RG (figura 4.2.6 e – f) na ERA-Interim as anomalias positivas de umidade específica alongam-se mais zonal em comparação com o dia anterior e permanecem intensas (superiores a 13 g/kg) na região de atuação da FF. Por outro lado o RegCM4 aumenta a subestimativa dessas anomalias sobre o continente. Ao norte da banda úmida o RegCM4 continua subestimando as anomalias negativas mostradas na ERA-Interim, as anomalias negativas ao sul também são subestimadas pelo RegCM4 comparada à ERA-Interim.

Um dia depois da FF sobre RG (figura 4.2.6 g – h) as anomalias positivas de umidade específica na ERA-Interim avançam para norte e perdem intensidade. Estas anomalias positivas são observadas no norte do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e sul de São Paulo. No RegCM4 este padrão de anomalias positivas não é simulado sobre o sul do Brasil, já que uma situação de normalidade predomina sobre esta região. Ao norte da banda úmida na ERA-interim é observado que as anomalias negativas de umidade específica continuam atuando sobre a região central do Brasil, enquanto o RegCM4 continua simulando normalidade nesta região. As anomalias negativas ao sul da banda úmida avançam para norte e se intensificam na ERA-Interim (desde -1,5 até -13 g/kg). O RegCM4 avança estas anomalias mais para norte, chegando até o norte do Rio Grande do Sul, em relação a ERA-Interim que situa-se no sul do Rio Grande do Sul, estas anomalias negativas são subestimadas pelo RegCM4.

Vento em 200 hPa

A figura 4.2.7 a – b para dois dias antes da FF chegar a RG posiciona o jato em 200 hPa ao norte do ciclone em baixos níveis. Este jato é superestimado pelo RegCM4 (figura 4.2.7 b) que mostra velocidades no núcleo superiores a 40 m/s sobre o centro da Argentina, enquanto na ERA-Interim existe um pequeno núcleo com mais de 40m/s no centro do Chile.

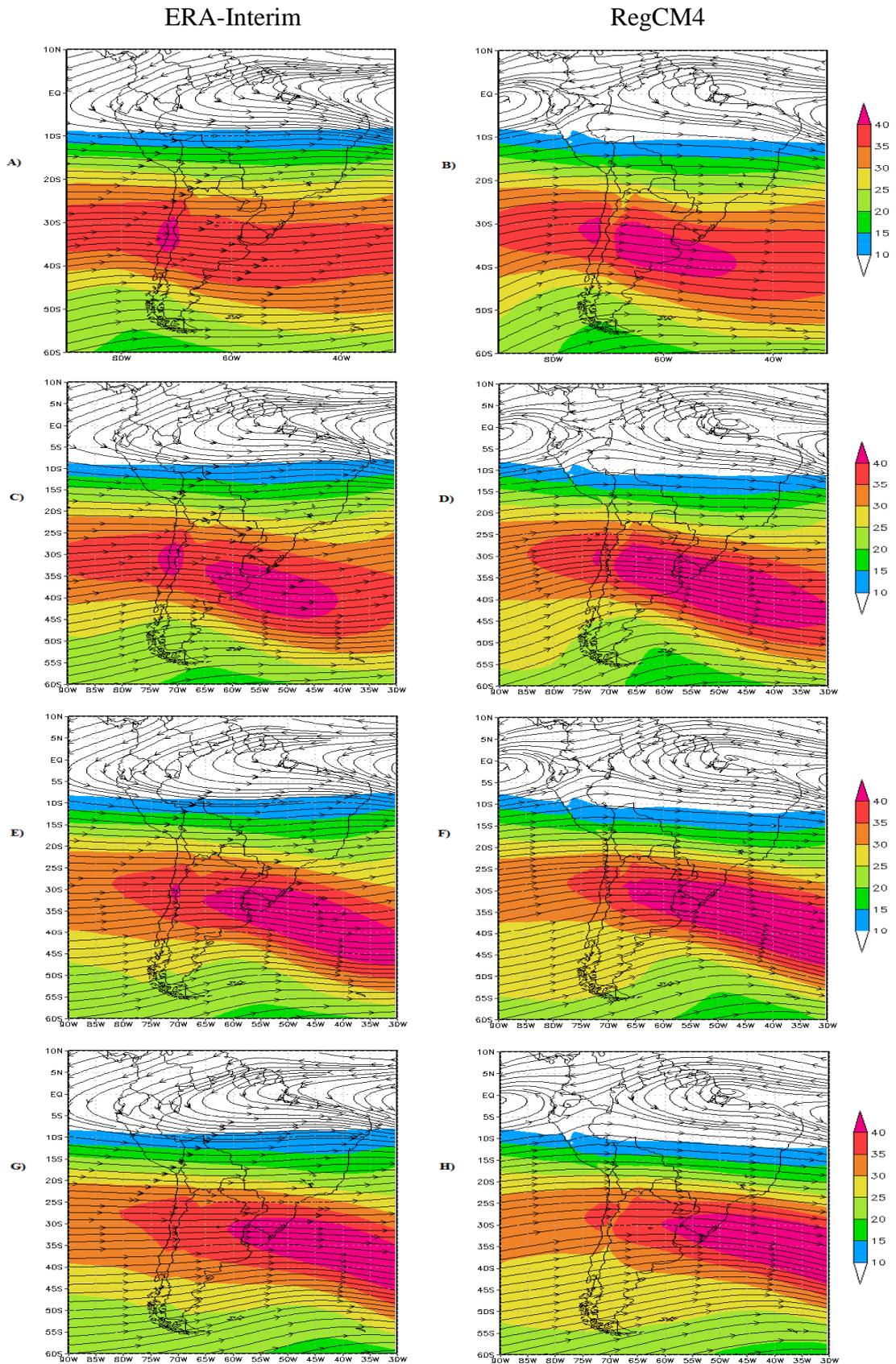


Figura 4.2.7. Idem à Figura 4.2.4, mas para o nível de 200 hPa.

O campo médio em 200 hPa (figura 4.2.7 c) mostra intensificação no núcleo de jato na ERA-Interim, o qual posiciona-se sobre o leste da Argentina e Uruguai, com a magnitude do vento ultrapassando 40 m/s. O mesmo padrão é simulado pelo RegCM4 na figura 4.2.7 d, onde ocorre intensificação do núcleo de jato. No entanto, a magnitude de vento superiores a 40 m/s são simulados em área maior que na ERA-Interim.

A figura 4.2.7 e – f mostra que o posicionamento do jato é bem representado pelo RegCM4, enquanto que a magnitude do vento simuladas continuam superestimando a da ERA-Interim. O jato ganha uma orientação mais meridional nos campos simulado e observado, com o ciclone em superfície posicionado à sul do jato, enquanto a FF em superfície situa-se ao norte o núcleo de jato.

Um dia depois da passagem da FF sobre RG o núcleo de jato em 200 hPa continua sendo bem representado pelo RegCM4 (figura 4.2.7 g – h), ou seja, mantém-se posicionado ao sul da FF em superfície situada sobre São Paulo na ERA-Interim (figura 4.2.3 g) e no Rio de Janeiro no RegCM4 (figura 4.2.3 h) prosseguindo pelo oceano Atlântico.

Anomalias de vento em 500 hPa

As anomalias de vento em médios níveis (figura 4.2.8 a – b) mostram que o ciclone está inclinado para oeste com a altura em comparação com as anomalias de vento em baixos níveis (figura 4.2.5 a – b). Dessa maneira se caracteriza o estágio baroclínico onde a energia potencial está disponível para continuar intensificando o sistema. As anomalias de magnitude de vento são superestimadas pelo RegCM4 comparado ao ERA-Interim nos dois níveis. Tanto os ciclones como os anticiclones simulados estão posicionados um pouco mais para leste concordando com os resultados em baixos níveis (figura 4.2.5 a – b).

Nas figuras 4.2.8 d que corresponde as anomalias de vento em médios níveis, o RegCM4 simula corretamente o padrão de anomalias da Era-Interim, isto é, anomalias ciclônicas no centro da Argentina e anticiclônicas próximo ao sul do Brasil. No entanto, o posicionamento destes sistemas situa-se a leste no RegCM4 comparado à ERA-Interim. Notadamente as anomalias de magnitude do vento estão mais intensos que no Era-Interim.

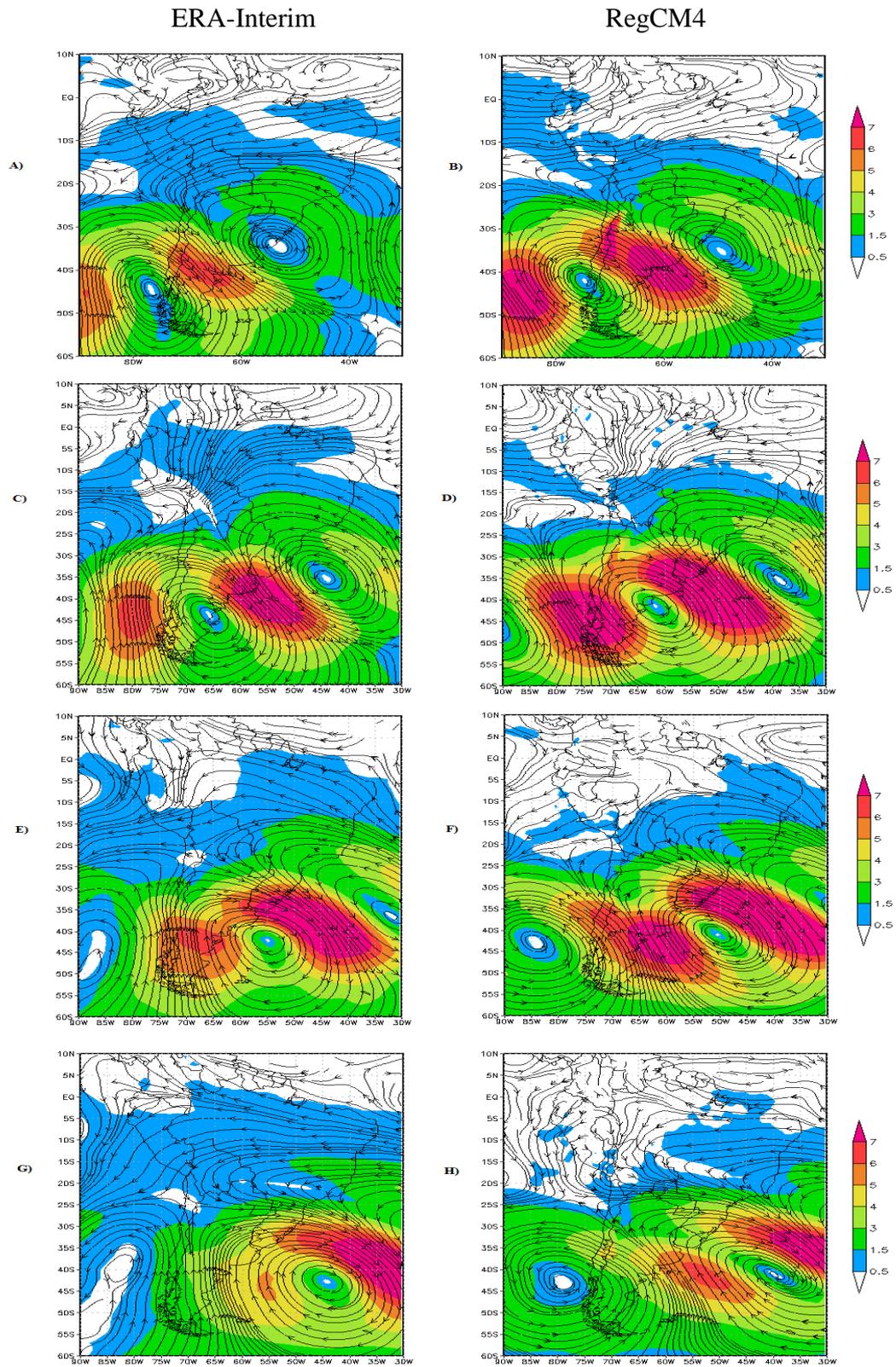


Figura 4.2.8. Idem à Figura 4.2.5, mas para o nível de 500 hPa.

As anomalias de vento em médios níveis (figura 4.2.8 e – f) mostra que o ciclone se posiciona na costa da região leste da Argentina mantendo a baroclinia do sistema. É possível observar também que o RegCM4 simula corretamente a posição do ciclone neste nível, no entanto continua superestimando as anomalias de magnitude do vento a oeste e nordeste do ciclone.

Síntese sobre a atuação da FF em RG

Nas composições, dois dias antes da frente atingir RG o ciclone extratropical, associado à FF no sul da América do Sul, induz sobre o sul do Chile anomalias positivas de precipitação (figura 4.2.1 a – b). Nos campos de vento em médios níveis e a pressão em superfície mostram que o vento é de oeste sobre Chile, uma configuração que força as massas de ar sobre o oceano Pacífico Sul a ascender próximo dos Andes provocando chuvas sobre a região. No RegCM4 a anomalia de precipitação é intensa (superior a 7 mm/dia) indicando que este mecanismo precipitante é mais intenso do que no CPC, onde as anomalias positivas sobre o centro-sul do Chile não ultrapassam os 4 mm/dia.

A atuação do JBN no inverno mostra um papel importante na manutenção da precipitação sobre a região frontal. No setor pré-frontal um dia antes da FF atingir RG, com o JBN intenso no ERA-Interim (figura 4.2.4 c) e na presença de anomalias positivas de umidade específica (figura 4.2.6 c) criam-se condições para ascensão do ar e formação de nuvens na área de desaceleração deste jato. Isto intensifica no CPC as anomalias positivas de precipitação (figura 4.2.1 e) sobre a região de FF no dia de sua passagem sobre RG. No RegCM4 as anomalias de umidade específica na região do JBN (figura 4.2.6 d) não ultrapassam os 9 g/kg, tal comportamento impacta na intensidade da precipitação no dia da passagem da FF sobre RG, ou seja, as anomalias positivas de precipitação são mais fracas que no CPC (não ultrapassam o limiar de 2,5 mm/dia - figura 4.2.1 f). Esta situação é reforçada pelo campo médio de vento em 850 hPa no RegCM4 (figura 4.2.4 d) no dia anterior a passagem da FF em RG, que simula um JBN (ventos máximos com magnitude inferior a 9 m/s) muito mais fraco do que a ERA-Interim. Em consequência a convergência também é menor na região de desaceleração do JBN no RegCM4, não favorecendo fortes movimentos ascendentes e formação de nuvens e chuva.

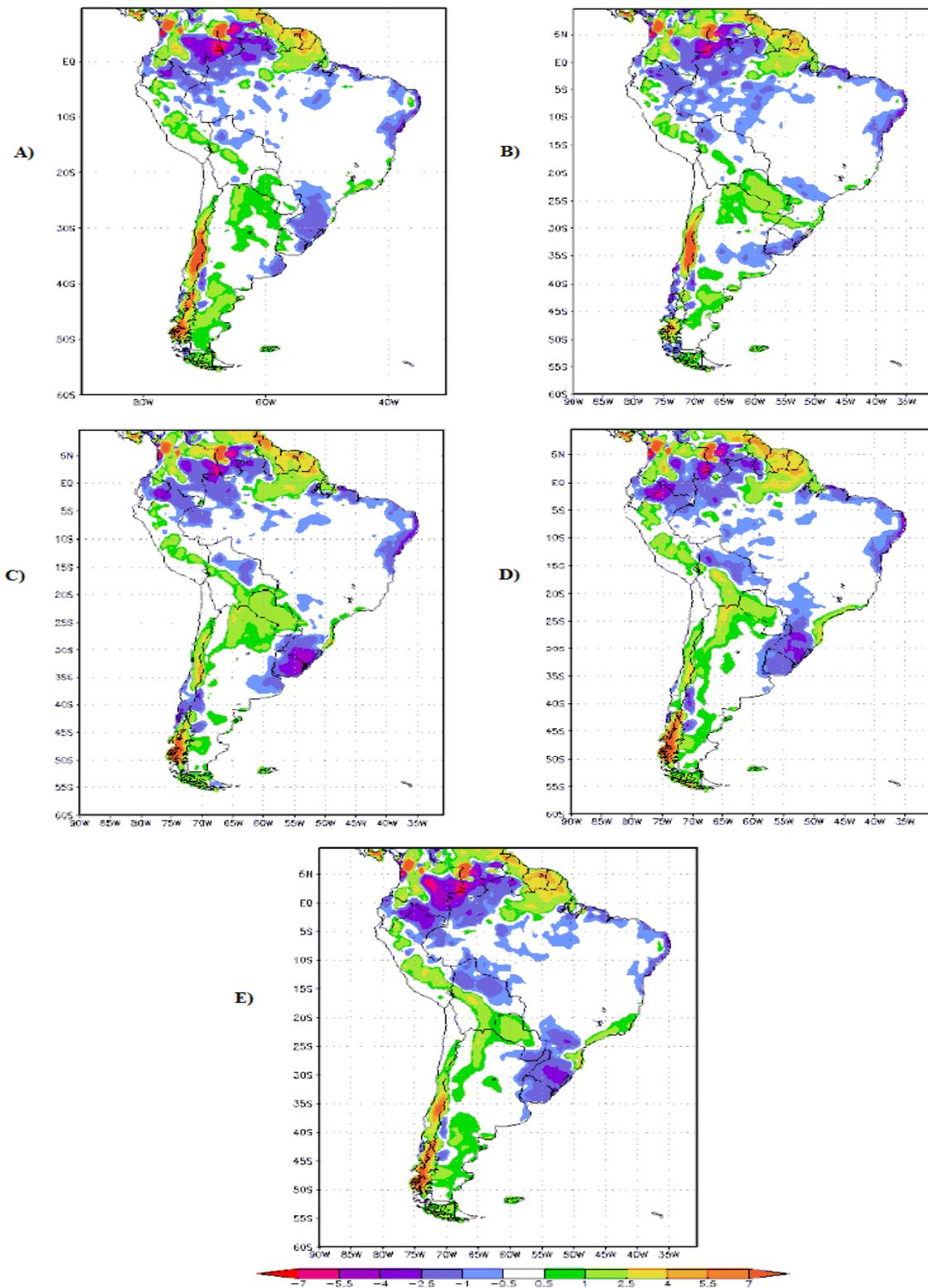


Figura 4.2.9. Diferença da média de precipitação entre RegCM4 e CPC no inverno nos dias da passagem das FF aplicando o CFF na cidade de Rio Grande-RS no período de 1991-2009. (a) Dois dias antes da passagem da FF, (b) um dia antes da passagem da FF, (c) dia da passagem da FF, (d) um dia depois da passagem da FF e (e) dois dias depois da passagem da FF.

O campo médio de vento em 850 hPa no dia da FF em RG (figura 4.2.4 e – f) mostra a importância dinâmica associada a passagem das FF sobre a América do Sul. Um dia antes, o JBN no Era-Interim é mais intenso e proporciona maior convergência de umidade na região de anomalias positivas de precipitação (sobre o Uruguai e sul do Rio Grande do Sul). Comparativamente, a anomalia positiva de chuva no CPC é maior que o simulado pelo RegCM4, onde o JBN não está bem representado. Ainda no campo médio de vento em 850 hPa no dia da FF, a configuração de JBN no RegCM4 é totalmente ausente, com velocidades no núcleo do jato não ultrapassando 5 m/s, enquanto na Era-Interim situa-se entre 7-11 m/s. Isto contribui para maior transporte de umidade para região de precipitação entre o dia e o dia depois da passagem da FF sobre RG. Além disso, a região de confluência dos ventos ocorre sobre o centro do Rio Grande do Sul na ERA-Interim, enquanto no RegCM4 esta posiciona-se ao norte do Estado. Estes resultados mostram que o RegCM4 continua indicando um deslocamento mais rápido da FF para norte do que a Era-Interim. Para completar essa análise, a figura 4.2.6 e – f mostra estas anomalias mais intensas na ERA-Interim em todo o continente que no RegCM4. A região central do Brasil, que na época de inverno encontra-se mais seca, na simulação possui anomalias positivas de umidade específica no dia da passagem da FF sobre RG mais fracas que na Era-Interim.

Segundo Cavalcanti e Kousky 2009, as anomalias de temperatura para passagem de FF em 30^oS, 52,5^oW, um ponto à nordeste de RG, mostra que os padrões de anomalias de temperatura em 925 hPa (período de 1979 a 1995) é similar ao obtido neste trabalho. No dia da FF na posição utilizada pelos autores, a interface entre anomalias quentes e frias posiciona-se à sul da FF, este mesmo padrão é observado nas anomalias na figura 4.2.2 e – f. Os mesmo autores mostraram que nas anomalias de geopotencial em 500 hPa, o núcleo de anomalias negativas (associado ao ciclone extratropical) posicionam-se no centro - leste da Argentina e oceano Atlântico Sul adjacente, configuração esta que concorda com o padrão observado nas anomalias de vento em 500 hPa (figura 4.2.8 e – f).

Um dia depois da passagem da FF sobre RG na ERA-Interim tem-se uma região com anomalias negativas de umidade específica em 850 hPa (figura 4.2.6 g) mais intensa no leste da Argentina, Uruguai e Oceano Atlântico adjacente (desde -6 até -13 g/kg). Isto ocorre na região de reversão na direção dos ventos de norte para de sul, a qual caracteriza-se por ar frio e seco de características polares. Esta região seca coincide com a de anomalias negativas de precipitação sobre o leste da Argentina (figura 4.2.1 g). As anomalias de vento em médios e baixos níveis (figura 4.2.8 g – h e figura 4.2.5 g – h, respectivamente) mostram que a posição

do ciclone simulado pelo RegCM4 é semelhante à Era-Interim, mas as anomalias de magnitude do vento continuam sendo superestimadas pelo RegCM4. Comparando as anomalias de vento nestes dois níveis, nota-se que o sistema continua baroclínico pois o ciclone em altos níveis ainda está posicionado a oeste do ciclone em 850 hPa. Esta condição de baroclínia do sistema é mantida em todos os dias estudados.

De maneira geral, (**figura 4.2.1 a-h**) o RegCM4 posiciona corretamente a região de anomalias positivas e negativas de precipitação, no entanto o núcleo de precipitação associado às FF situa-se ligeiramente ao norte daquele obtido com as composições do CPC. Ainda na região mais úmida, a simulação superestima a precipitação somente na região central do Chile (**figura 4.2.9 a**), momento em que o ciclone atua sobre esta região e dois dias antes da FF atingir RG. Na bacia do Prata, região que é um dos focos do estudo, o RegCM4 mostra uma forte subestimativa de precipitação desde dois dias antes até um dia depois da passagem da FF sobre RG. Esta subestimativa torna-se mais evidente através da diferença entre RegCM4 e CPC mostrado nas composições de precipitação da figura 4.2.9.

Dois e um dia antes de chegar a RG, a figura 4.2.9 a indica que a FF encontra-se no centro-sul da Argentina provocando precipitação nessa região e no Chile e o RegCM4 superestima a precipitação do CPC. Entretanto, existe uma subestimativa pelo RegCM4 na região sul do Brasil, leste do Uruguai e da Argentina. Um dia antes da FF chegar a RG (figura 4.2.9 b) essa subestimativa está posicionada no centro-leste da Argentina, sul do Uruguai e sudeste do Rio Grande do Sul.

No dia da passagem da FF sobre RG (**figura 4.2.9 c**) o RegCM4 posiciona uma área mais seca na região que compreende o leste da Argentina, Uruguai e sul do Brasil, tendo nessa região um bias seco de até -5,5 mm/dia. Uma área de bias úmido, entre de 0,5 até 2,5 mm/dia, situa-se na região que compreende o Paraguai, norte da Argentina, centro da Bolívia e Peru, já na área que vai do litoral de Santa Catarina até o litoral norte de São Paulo o RegCM4 superestima a precipitação entre 0,5 até 2,5 mm/dia.

O primeiro dia após a passagem da FF sobre RG (**figura 4.2.9 d**) mostra a persistência de subestimativa de precipitação pelo RegCM4 sobre o Uruguai e sul do Rio Grande do Sul, e o aumento desta área para norte chegando até o centro-oeste do Brasil. Em outra área que vai do litoral de Santa Catarina até o litoral norte de São Paulo o RegCM4 apresenta uma intensificação da superestimativa de chuva. Já à noroeste (sobre o centro-norte do Paraguai, norte da Argentina e centro da Bolívia) da área onde o RegCM4 mostra um bias seco nota-se um bias úmido ligeiramente mais intenso em comparação com o dia anterior (figura 4.2.9 c), variando de +0,5 até +5,5 mm/dia.

Um padrão similar ao do dia anterior é encontrado dois dias depois da passagem da FF sobre RG (**figura 4.2.9 e**), ou seja, a área de bias seco continua posicionada no leste da Bacia do Prata. No litoral desde Santa Catarina até o do norte de São Paulo, no norte do Paraguai, centro da Bolívia e norte da Argentina o RegCM4 mantém as superestimativas de chuva comparado ao CPC.

O bias seco nas composições sobre a bacia do Prata fica evidente na sequência da figura 4.2.9 desde dois dias antes até dois dias depois a FF sobre RG. Por outro lado, neste mesmo período um bias úmido ocorre na área que compreende o norte da Argentina, Paraguai e centro da Bolívia, e também na regiões central-sul do Chile. Nesta última área, o RegCM4 mostra uma forte superestimativa do volume de chuva. Ainda na Figura 4.2.9 o RegCM4, desde o dia da passagem da FF (**figura 4.2.9 c**) até um dia depois (**figura 4.2.9 d**), superestima a precipitação desde a costa de Santa Catarina até a costa do Rio de Janeiro.

Nas anomalias de vento em 850 e 500 hPa (figura 4.2.5 e 4.2.8, respectivamente) pode-se observar que o ciclone extratropical avança mais rapidamente no RegCM4 em comparação com a ERA-Interim. Este padrão é observado na figura 4.2.5 e – f (anomalias de vento em 850 hPa), na qual mostra o ciclone extratropical simulado posicionado mais a leste ($\sim 44^{\circ}\text{W}$ e $\sim 40^{\circ}\text{S}$) em comparação com a ERA-Interim ($\sim 49^{\circ}\text{W}$ e $\sim 43^{\circ}\text{S}$). Esta condição também é observado nas anomalias de vento em 500 hPa (figura 4.2.8 e – f), em que o RegCM4 avança mais rapidamente o ciclone para norte.

Rio Grande: Primavera

Precipitação

As anomalias de precipitação na primavera usando o CFF sobre RG mostram que para dois dias antes da FF (**figura 4.2.10 a – b**) o RegCM4 posiciona as anomalias positivas de precipitação no centro-sul do Chile, leste e nordeste da Argentina (entre 0,5 até 5,5 mm/dia). Já no CPC estas anomalias positivas ocupam uma região menor do que no RegCM4 sobre centro-sul do Chile e área similar à do modelo no nordeste da Argentina (desde 0,5 até 4 mm/dia). Na primavera o RegCM4 também superestima a área e intensidade da anomalia positiva de precipitação sobre o Chile e sul da Argentina, e subestima a intensidade do núcleo de anomalias positivas (entre 1,0-2,5 mm/dia) no nordeste da Argentina comparado ao CPC (entre 2,5-4,0 mm/dia). Nesta situação pré-frontal, o CPC mostra uma área com anomalias

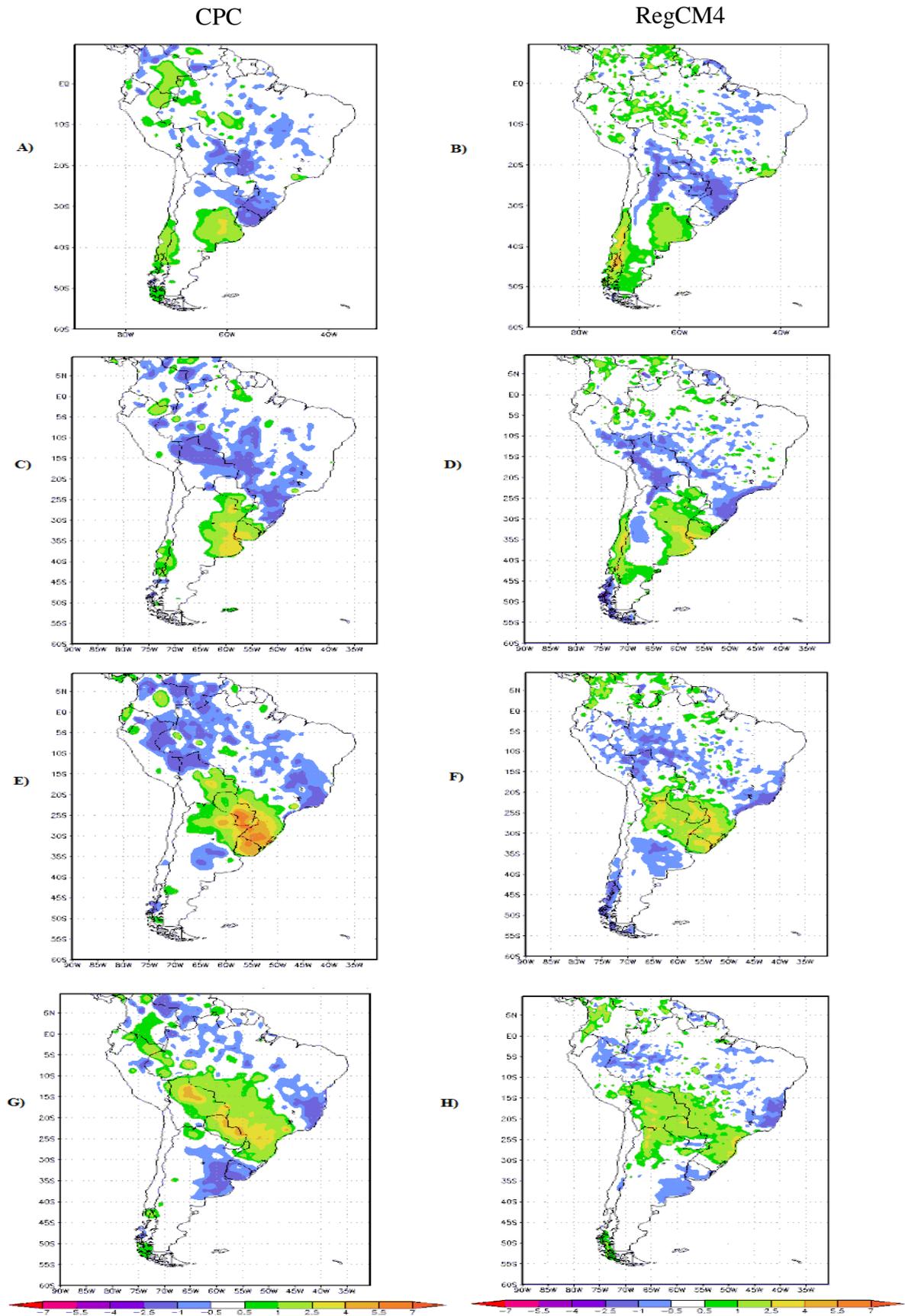


Figura 4.2.10. Idem à Figura 4.2.1, mas para a primavera.

negativas de precipitação no Uruguai, nordeste-norte da Argentina, Rio Grande do Sul, prosseguindo para o oeste do centro-oeste do Brasil e leste da Bolívia. Por sua vez, o RegCM4 estende desde o litoral da região sul do Brasil, passando pelo Paraguai e chegando até a região central da Bolívia as anomalias negativas de chuva na situação pré-frontal. Tanto no campo simulado como no observado estas anomalias negativas não ultrapassam o limiar de -2,5 mm/dia.

O padrão espacial de anomalias positivas/negativas de precipitação de dois dias antes se desloca para norte um dia antes da FF atingir RG como indica a figura 4.2.10 c – d. No CPC uma área contínua com anomalias negativas (entre -0,5 até -2,5 mm/dia) orientada noroeste/sudeste ocupa desde o litoral do sul do Brasil até o centro-norte da Bolívia e sul norte do Brasil. No RegCM4 simula esta região mais seca possui menor intensidade e apresenta descontinuidade espacial comparado com o CPC. A área de anomalias positivas de precipitação situa-se ao sul de RG ocupando o nordeste-leste da Argentina e Uruguai, região similar à simulada pelo RegCM4. No entanto, no CPC o núcleo de anomalia positiva é mais intenso (2,5-4,0 mm/dia) do que o RegCM4. O RegCM4 simula anomalias positivas de precipitação na região central do Chile e centro-sul da Argentina não são observadas no CPC, onde nota-se somente um pequeno núcleo negativo no centro-sul do Chile.

No dia da passagem da FF sobre RG na primavera (**figura 4.2.10 e – f**), é observado no CPC que a área de anomalias positivas de precipitação avançou para norte e se intensificou (desde 0,5 até 7 mm/dia) comparado ao dia anterior (Figura 4.2.10 c). O núcleo de anomalia positiva mais intenso, com valores superiores a 4 mm/dia, posiciona-se sobre o sul do Paraguai, Uruguai e Rio Grande do Sul. Nesta região, o RegCM4 mostra também anomalia positiva de precipitação, mas com intensidade que não ultrapassa o limiar de 4 mm/dia, ou seja, menor do que no CPC. A área de anomalias negativas de precipitação, posicionada a sul da banda de anomalias positivas, cobre o região centro-leste da Argentina no CPC e ocupa uma área ligeiramente maior na simulação mas com mesma intensidade do CPC (-0,5 até -2,5 mm/dia). Outra área seca, ao norte da banda de anomalias positivas, orienta-se noroeste/sudeste desde o litoral do Rio de Janeiro até oeste do Peru no CPC. O RegCM4 mostra este mesmo posicionamento e orientação desta área seca, mas nota-se que é menos contínua no espaço do que no CPC.

A anomalia de chuva positiva continua avançando para norte e se expande em área como mostram as composições para um dia depois da passagem da FF sobre RG na figura 4.2.10 (g) – (h). No CPC esta área se estende do litoral do sul do Brasil, centro-oeste do Brasil até o norte da Bolívia, com maior intensidade sobre Santa Catarina, sul do Mato

Grosso do Sul e Bolívia (desde 2,5 até 5,5 mm/dia). O RegCM4 posiciona corretamente a esta anomalia positiva de precipitação observada no CPC. No entanto, o RegCM4 subestima (valores inferiores a 2,5 mm/dia) a intensidade do núcleo destas anomalias comparado ao CPC. Ao norte e ao sul da anomalia positiva de chuva tanto o CPC como o RegCM4 indicam bandas de anomalias negativas de precipitação.

As anomalias negativas ao norte da banda de precipitação são mais intensas na primavera do que no inverno, isto é uma resposta as anomalias positivas mais intensas provocando subsidência de compensação também mais intensa a norte da FF em comparação com o inverno.

Temperatura

A figura 4.2.11 a – b mostra com orientação noroeste/sudeste a interface entre as anomalias negativas e positivas de temperatura posicionada mais ao norte no RegCM4, sobre a região central da Argentina, comparada à Era-Interim, situada um pouco mais ao sul, dois dias antes de atingir RG. (no inverno este padrão também é observado). Ainda nas anomalias de temperatura, comparado à Era-Interim o RegCM4 superestima as anomalias positivas de temperatura, já as anomalias negativas no sul da América do Sul possui intensidade similar à da Era-Interim.

A interface de anomalias de temperatura (figura 4.2.11 c – d) continua marchando para norte e se intensificam comparado ao dia anterior tanto no campo simulado como observado um dia antes de atingir RG. Esta interface situa-se sobre o centro-norte da Argentina em ambos ERA-Interim e RegCM4, com um pequeno deslocamento mais para norte no RegCM4 indicando que a FF se propaga mais rapidamente na simulação. As anomalias positivas ultrapassam o limiar de 2,5°C e as negativas ao sul estão entre -1,5 até -2,5°C. Neste caso, o RegCM4 superestima a área das anomalias negativas de temperatura mais intensas sobre o centro-sul da Argentina.

No dia que a FF chega a RG, tanto na Era-Interim como no RegCM4 as anomalias positivas de temperatura enfraquecem, variando entre 1,5 até 2,5°C, e situam-se ao norte de RG ocupando grande parte do Brasil (figura 4.2.11 e – f). A invasão do ar frio pós-frontal ocupa toda Argentina como indicam as anomalias negativas de temperatura. No RegCM4 estas anomalias negativas são corretamente simuladas tanto em termos de padrão espacial quanto na intensidade (desde -0,1 até -2,5°C). A região de interface entre as regiões de

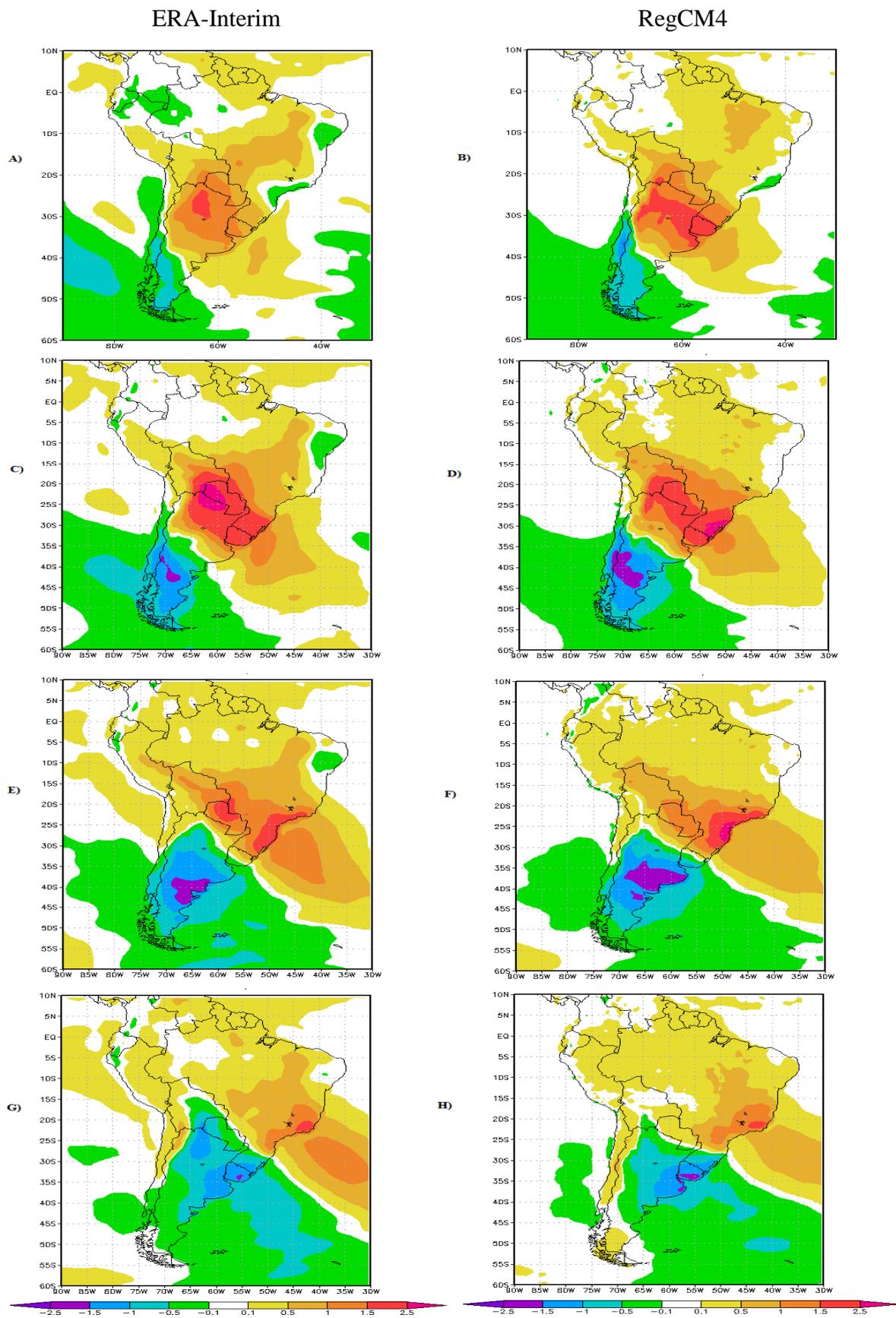


Figura 4.2.11. Idem à Figura 4.2.2, mas para a primavera.

anomalias frias e quentes avança um pouco mais rapidamente para norte no RegCM4 em comparação com a ERA-Interim. No dia da passagem da FF sobre RG na ERA-Interim esta interface no inverno (figura 4.2.2 e) dá um salto de aproximadamente 10° de latitude e assim fazendo com que situe-se a mesma posição que a interface na primavera na Era-Interim.

As anomalias de temperatura (figura 4.2.11 g – h) indicam que os valores positivos e negativos perdem intensidade tanto na ERA-Interim como no RegCM4, contudo o padrão é simulado pelo RegCM4. No setor oeste da América do Sul, a região de anomalias negativas na Era-Interim avança mais para norte e ultrapassa aquela simulada no RegCM4.

Nos dois dias antes da passagem da FF sobre RG (figura 4.2.11 a – d) as anomalias de temperatura mostram que a interface entre anomalias positivas e negativas situa-se mais a norte na primavera do que no inverno (figura 4.2.2 a – d). A partir do dia da passagem da FF sobre RG esta interface tem seu movimento para norte desacelerado na primavera, dessa maneira no inverno situa-se em posição similar à da primavera.

Pressão

Na situação pré-frontal de dois dias antes, na figura 4.2.12 a – b que corresponde às anomalias de pressão de superfície, o RegCM4 posiciona as anomalias negativas, com a FF situada na parte central desta anomalia, de pressão em região similar à da Era-Interim. No entanto superestima a intensidade destas anomalias negativas de pressão, com o núcleo mais intenso ultrapassando o limiar de -6 hPa, enquanto que na ERA-Interim este núcleo atinge máximo de -4 hPa. Também as anomalias positivas à leste são mais intensas no RegCM4 do que na Era-Interim.

Um dia antes da FF atingir RG (figura 4.2.12 c – d), o RegCM4 simula a anomalia ciclônica mais intensa que na Era-Interim. No entanto, enquanto na ERA-Interim posiciona anomalias negativas de pressão mais intensas (desde -4 até -6 hPa) sobre o continente (nordeste da Argentina), na simulação estas situam-se sobre o Oceano (sudeste do Uruguai).

A figura 4.2.12 e – f, dia da passagem da FF sobre RG, mostra que o RegCM4 continua superestimando as anomalias negativas de pressão no núcleo do ciclone, ultrapassando o limiar de -6 hPa sobre o oceano. Mas sobre continente a Era-Interim (figura 4.2.12 e) continua indicando anomalias negativas mais intensas (entre -1 até -4 hPa) do que o RegCM4 (figura 4.12 f). Assim como um dia antes, no dia da FF em RG a anomalia

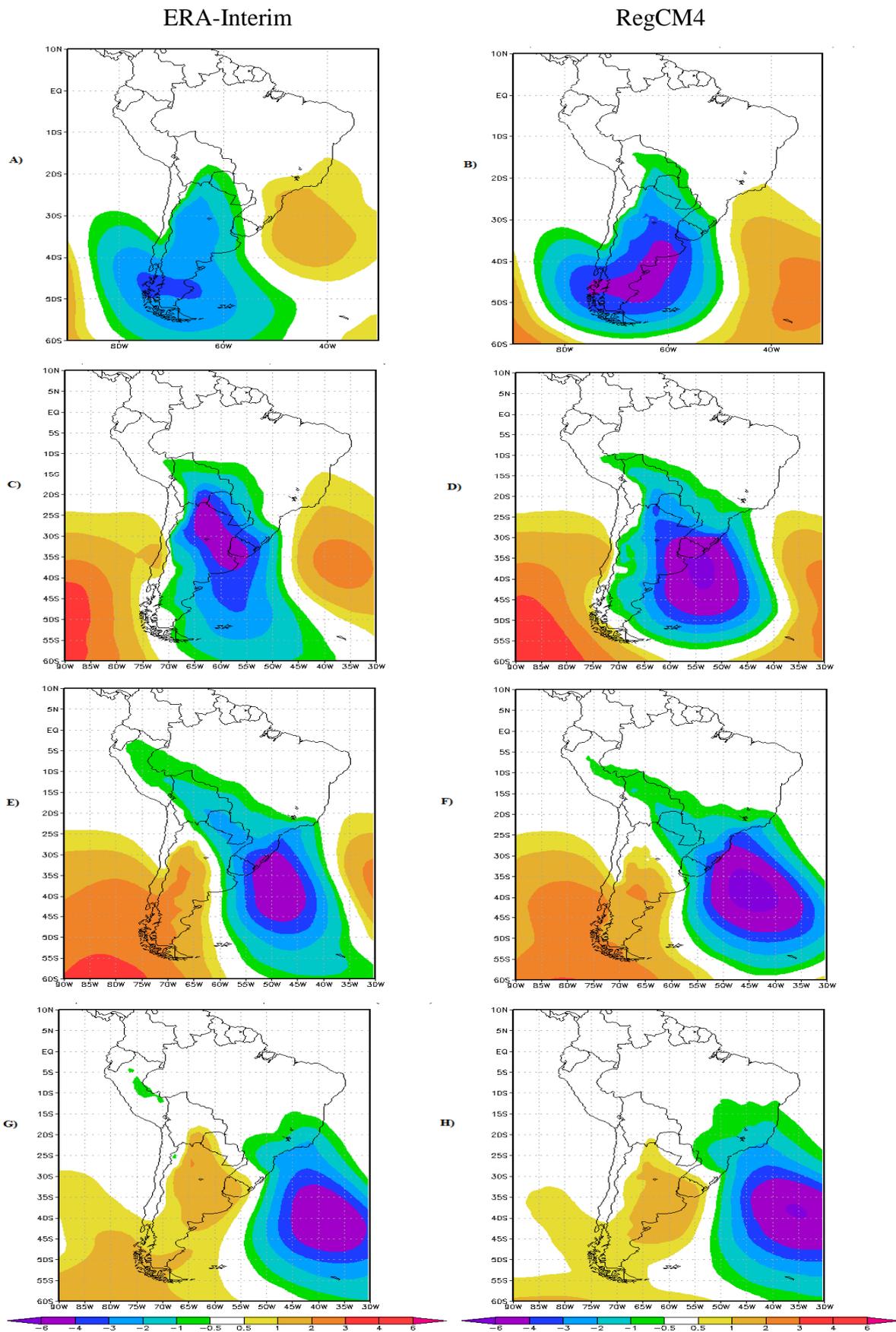


Figura 4.2.12. Idem à Figura 4.2.3, mas para a primavera.

anticiclônica na retaguarda da FF (situada ao sul) é mais intenso e ocupa maior área no RegCM4 do que na Era-Interim.

Um dia depois da passagem da FF por RG (figura 4.2.12 g-h) as anomalias negativas de pressão enfraquecem sobre o continente, tanto na ERA-Interim quanto no RegCM4 o anticiclone na retaguarda atua sobre toda Argentina e parte do sul do Brasil.

Vento em 850 hPa

A figura 4.2.13 a – b, que é corresponde ao campo médio de vento em 850 hPa, mostra um cavado com eixo sobre o centro-sul do Chile e uma região de confluência dos ventos à leste deste. Neste dia, a FF na ERA-Interim se posiciona sobre o centro-sul da América do Sul. No RegCM4 o cavado possui posição similar ao da Era-Interim, mas a região de confluência dos ventos está deslocada ligeiramente para leste comparada à Era-Interim. Um fraco JBN pré-frontal está orientando meridionalmente e situa-se sobre o norte da Argentina nos campos observado e simulado. No entanto, é muito mais fraco no RegCM4 do que na Era-Interim. A partir dos padrões espaciais de vento em 850 hPa, anomalias de precipitação, temperatura do ar e pressão de superfície é possível identificar a FF na ERA-Interim posicionada sobre o centro-sul da Argentina, com orientação bastante meridional (norte/sul), enquanto no RegCM4 está deslocada ligeiramente para leste mas também orientada meridionalmente.

No dia anterior ao de atingir RG (figura 4.2.13 c – d) é observado na ERA-Interim a intensificação do JBN sobre a região sudeste da Bolívia e Paraguai, com magnitude variando de 5-13 m/s. No RegCM4 na região de atuação do JBN os ventos não ultrapassam 11 m/s. No inverno o campo médio de vento em 850 hPa (figura 4.2.4 c) mostra que o vento no JBN é mais intenso do que na primavera. Na ERA-Interim a FF posiciona-se sobre o norte-leste da Argentina, já o RegCM4 simula a FF sobre o Uruguai e nordeste da Argentina, indicando assim que o RegCM4 também adianta a passagem da FF em relação a ERA-Interim.

O campo médio de vento em 850 hPa (figura 4.2.13 e – f) mostra na ERA-Interim que a região de confluência dos ventos posiciona-se sobre RG, sugerindo que a FF situa-se nessa região. No RegCM4 a região de confluência dos ventos fica posicionada na divisa entre o Rio Grande do Sul e Santa Catarina, indicando que a FF simulada continua mais a norte em comparação com a observada. A atuação do JBN na primavera continua sendo menos intensa no dia da passagem da FF sobre RG em comparação com o inverno (figura 4.2.4 e – f) nos

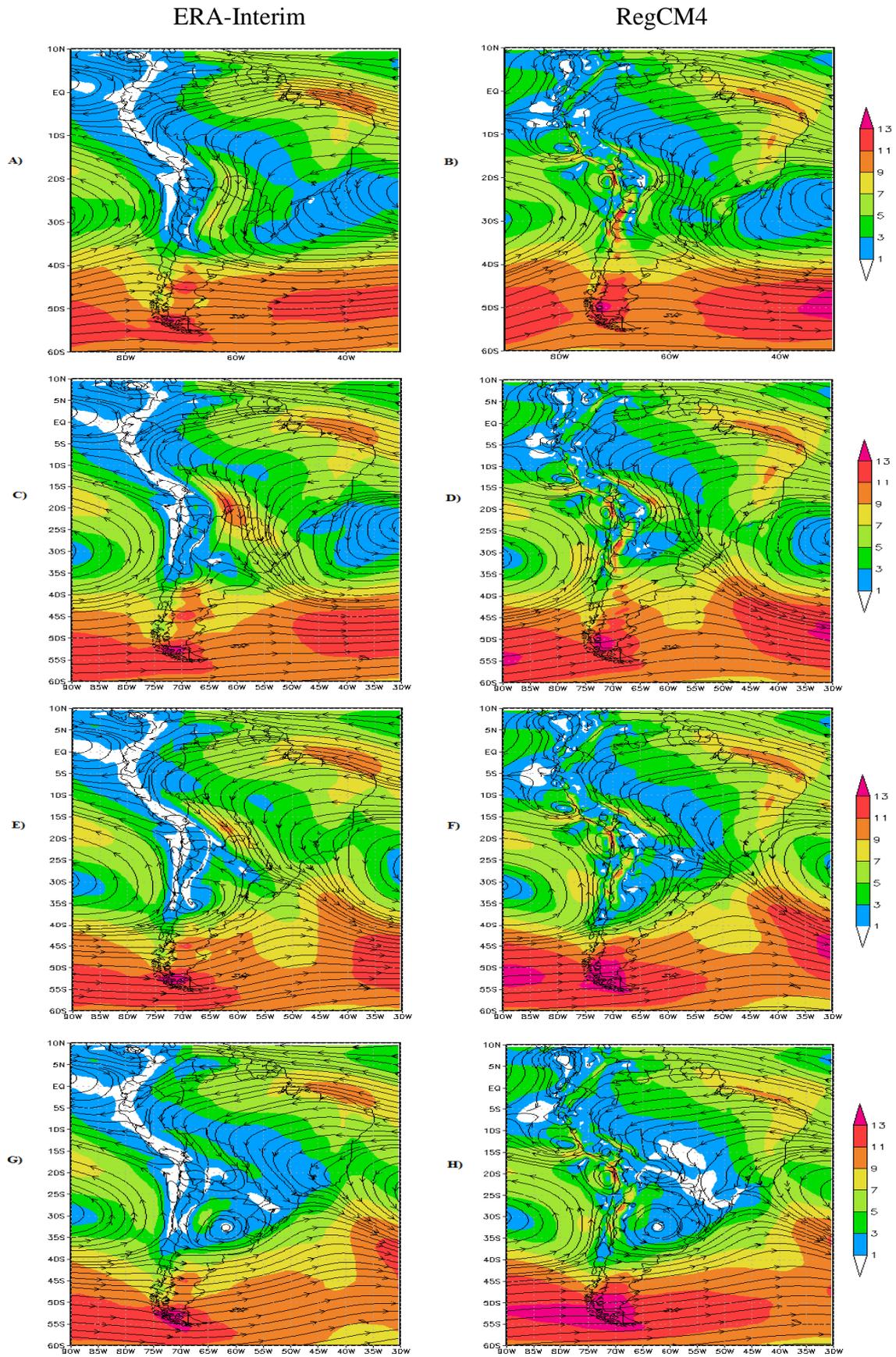


Figura 4.2.13. Idem à Figura 4.2.4, mas para primavera.

campos observado e simulado.

Na figura 4.2.13 g – h o anticiclone pós-frontal está presente no centro norte da Argentina tanto no RegCM4 como no Era-Interim. A região de confluência dos ventos passa a atuar sobre São Paulo na ERA-Interim. Este padrão na confluência dos ventos não é simulado no RegCM4. Considerando, o padrão de vento observado e simulado em conjunto com a pressão de superfície, temperatura do ar e precipitação indica que a FF em superfície atua sobre o sul de São Paulo na ERA-Interim, enquanto que no RegCM4 já se encontra sobre o Rio de Janeiro. É importante ressaltar que depois da passagem da FF sobre RG sua extensão continental diminui, limitando sua atuação à faixa leste do Brasil e oceano.

Anomalias de Vento em 850 hPa

As anomalias de vento em 850 hPa (figura 4.2.14 a – b) mostram que tanto na ERA-Interim como o RegCM4 o ciclone extratropical está posicionado sobre o sul da América do Sul dois dias antes da FF chegar a RG, concordando com as anomalias de pressão de superfície (figura 4.2.12 a – b). As anomalias de vento de norte no leste do ciclone, bem como as de sul à oeste, simuladas são mais intensas comparadas à Era-Interim. No setor leste, a ERA-Interim posiciona o anticiclone sobre o oceano Atlântico Sul em $\sim 45^{\circ}\text{W}-35^{\circ}\text{S}$, mas o RegCM4 simula o anticiclone a leste em $\sim 35^{\circ}\text{W}-45^{\circ}\text{S}$.

Um dia antes da passagem da FF sobre RG (figura 4.2.14 c – d) as anomalias de magnitude do vento na região do JBN aumentou na Era-Interim (entre 4 até 7 m/s), este aumento também ocorreu no inverno (figura 4.2.5 c). Na primavera, assim como no inverno, o RegCM4 continua não simulando corretamente esta região com anomalias de vento de noroeste intensos sobre o continente.

A figura 4.2.14 e – f mostra que nos setores oeste e leste do ciclone extratropical as anomalias de magnitude do vento de sul e noroeste continuam se intensificando no dia que a FF atinge RG.

No dia depois da passagem da FF sobre RG (figura 4.2.14 g – h) o ciclone simulado está deslocado para nordeste no RegCM4 (aproximadamente $40^{\circ}\text{S}-35^{\circ}\text{W}$) em comparação com a Era-Interim (aproximadamente $42^{\circ}\text{S}-40^{\circ}\text{W}$).

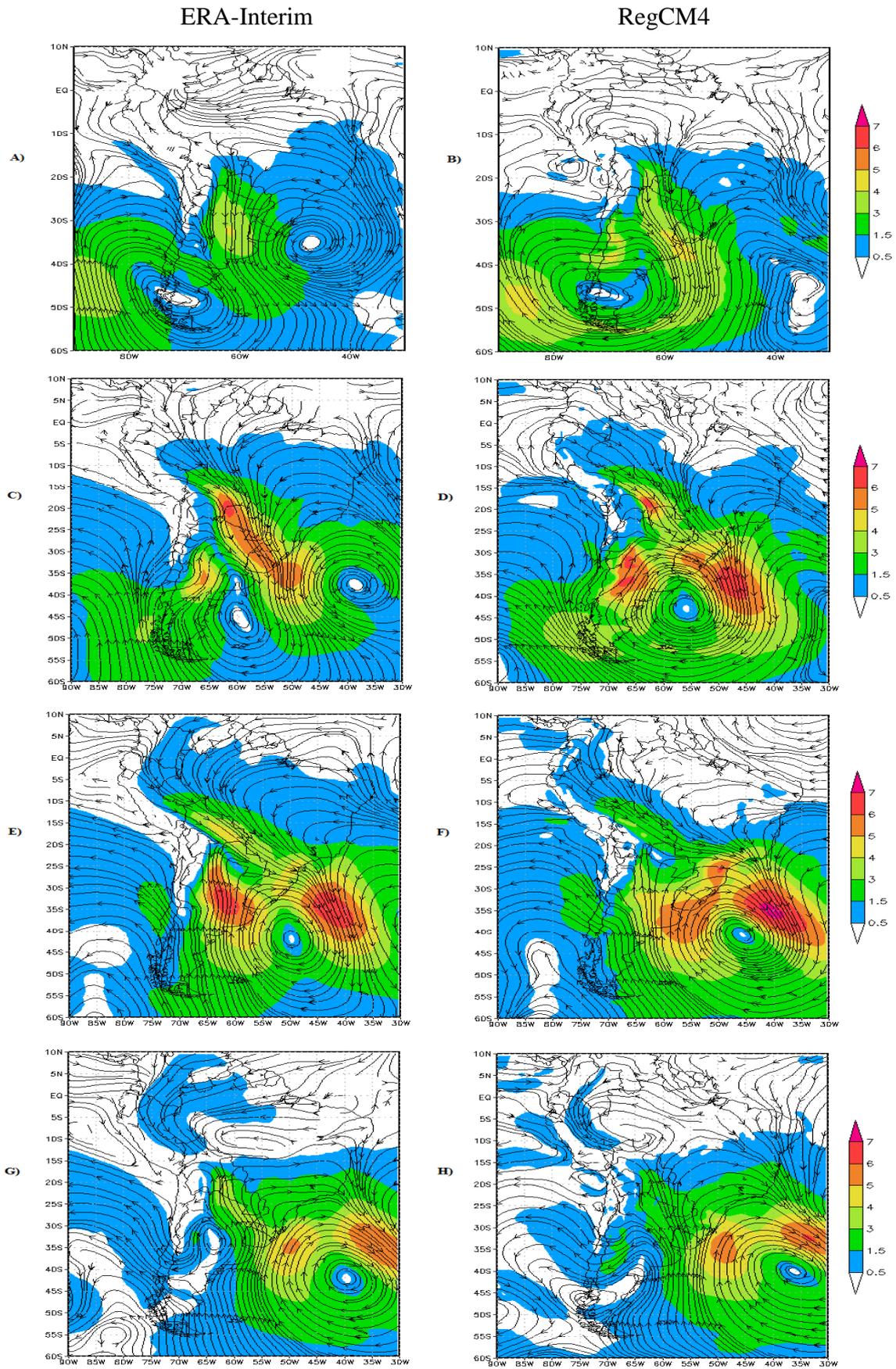


Figura 4.2.14. Idem à Figura 4.2.5, mas para a primavera.

Anomalia de umidade específica em 850 hPa

Dois dias antes da FF sobre RG (figura 4.2.15 a – b) na ERA-Interim é observado sobre o leste de nordeste da Argentina, sul do Paraguai e centro do Chile anomalias positivas de umidade específica (desde 1,5 até 9 g/kg), este padrão é simulado pelo RegCM4, no entanto o mesmo superestima estas anomalias chegando a valores superiores a 13 g/kg.

A figura 4.2.15 c – d na ERA-Interim as anomalias positivas de umidade específica associadas ao sistema frontal intensificam-se (chegando a valores superiores a 13 g/kg) e move-se para norte. O núcleo de anomalias positivas superiores a 13 g/kg se posiciona sobre o Uruguai, nordeste da Argentina, sul do Paraguai, sudoeste do Rio Grande do Sul e oceano Atlântico Sul, já o RegCM4 posiciona um núcleo com estas anomalias intensas sobre uma pequena região no nordeste da Argentina, Uruguai e oceano Atlântico Sul. As anomalias negativas a norte da FF permanecem intensas na ERA-Interim e subestimadas no RegCM4. Ao sul da FF as anomalias avançaram para até o centro-sul da Argentina (desde -1,5 até -9 g/kg), no RegCM4 estas anomalias foram superestimadas chegando até o limiar de -13 g/kg.

No dia da FF (figura 4.2.15 e – f) as anomalias positivas de umidade específica posicionam-se sobre o Uruguai, nordeste da Argentina, Paraguai, Bolívia e nas regiões Sul, Sudeste e Centro-oeste (desde 1,5 até valores superiores a 13 g/kg), no RegCM4 as anomalias positivas são posicionadas concordando com o campo observado, entretanto sobre o continente estas anomalias são subestimadas chegando até 13 g/kg.

Um dia depois da FF sobre RG (figura 4.2.15 g – h) as anomalias positivas de umidade específica associadas à FF avançam para norte, estas anomalias perdem intensidade na ERA-Interim chegando a um valor máximo sobre o continente de 13 g/kg, já o RegCM4 segue subestimando estas anomalias positivas sobre o continente, na qual simula valores inferiores a 6 g/kg. Na ERA-Interim as anomalias negativas ao sul não se intensificam (desde -1,5 até -13 g/kg), mas agora ocupam uma região maior. O RegCM4 continua seguindo o padrão de subestimativas de anomalias negativas de umidade específica tanto a norte quanto a sul da FF.

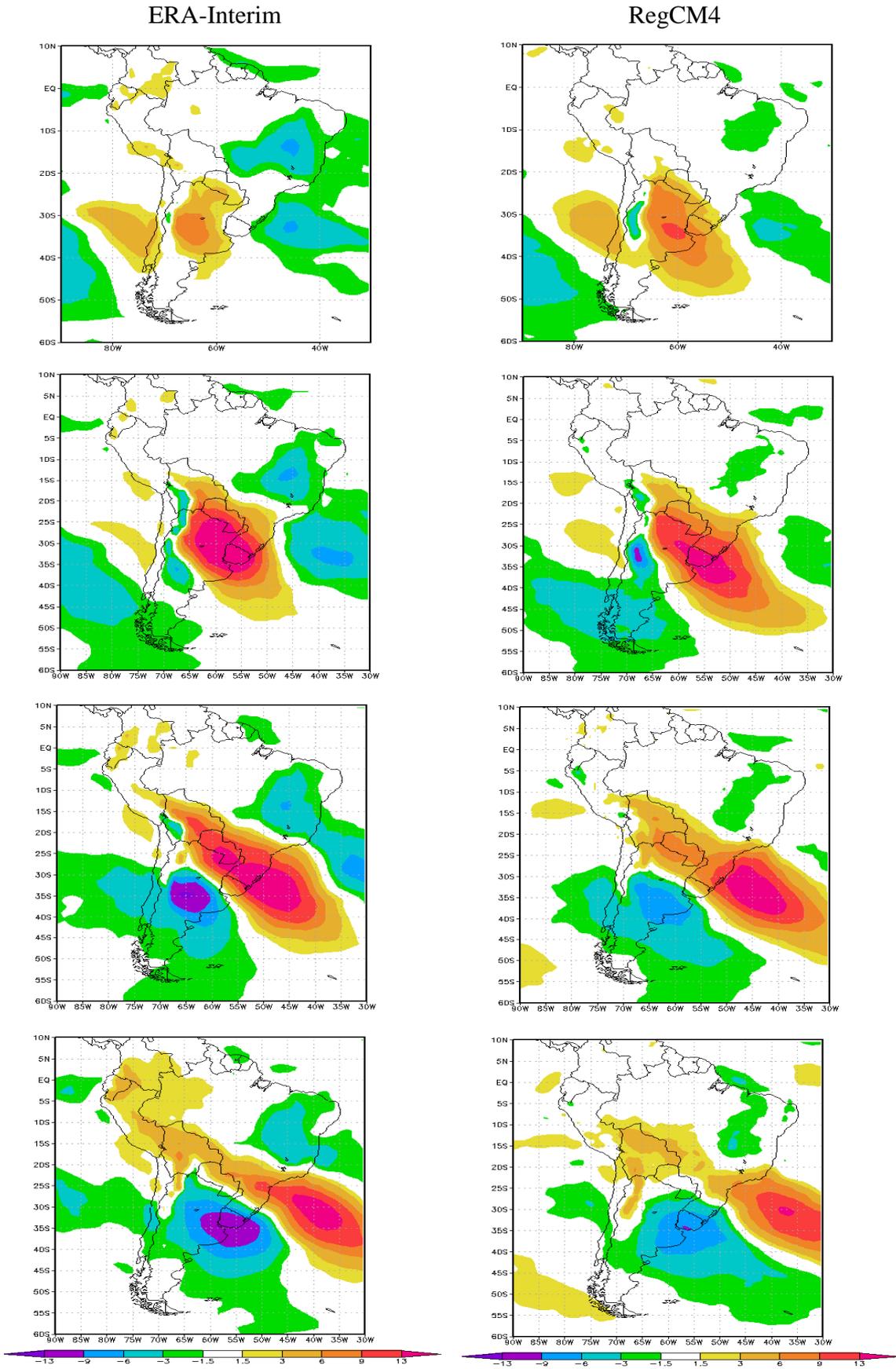


Figura 4.2.15. Idem à Figura 4.2.6, mas para primavera.

Vento em 200 hPa

O campo médio dos ventos em 200 hPa (figura 4.2.16 a – b) mostra que o jato de altos níveis é simulado pelo RegCM4, assim como o cavado de onda longa sobre o Oceano Pacífico (em aproximadamente 80°W). O núcleo do jato situa-se ao norte do ciclone extratropical em baixos níveis (figura 4.2.13 a – b) em ambos no campo simulado e observado.

Um dia antes da passagem da FF sobre RG (figura 4.2.16 c – d) o padrão do jato simulado pelo RegCM4 é semelhante ao da Era-Interim. No entanto, o RegCM4 superestima a velocidade do vento no núcleo do jato com magnitude do vento superior a 40 m/s. Como no dia anterior, o núcleo de jato posiciona-se à norte do ciclone extratropical em superfície (figura 4.2.12 c – d) tanto no RegCM4 quanto na ERA-Interim.

Na figura 4.2.16 e – f o RegCM4 continua simulando corretamente o cavado de onda longa, a intensidade e o posicionamento do jato em altos níveis. Neste dia a FF em superfície posicionada desde o Paraguai, passando por RG e seguindo pelo oceano, cruza desde o setor noroeste até o sudeste do jato em altos níveis.

Um dia depois da passagem da FF sobre RG (4.2.16 g – h) o RegCM4 simula o padrão observado na ERA-Interim para o escoamento em altos níveis. No entanto, nota-se um pequeno deslocamento para leste na região de maior velocidade no RegCM4 comparado à ERA-Interim.

Anomalia de vento em 500 hPa

Nas anomalias dos ventos em médios níveis (figura 4.2.17 a – b), dois dias antes de chegar a RG, indicam que o ciclone neste nível situa-se à oeste com relação aquele nas anomalias de vento em 850 hPa (figura 4.2.13 a – b). Isto indica a estrutura baroclínica do sistema, que mostra a disponibilidade energia potencial disponível para continuar se desenvolvendo nos dias seguintes. Ainda nestas anomalias, o RegCM4 simula corretamente o posicionamento do ciclone no oceano Pacífico, mas as anomalias de magnitude de vento são superestimadas pelo mesmo. Este padrão se mantém nas próximas 24 horas como mostra a figura 4.2.17 c – d.

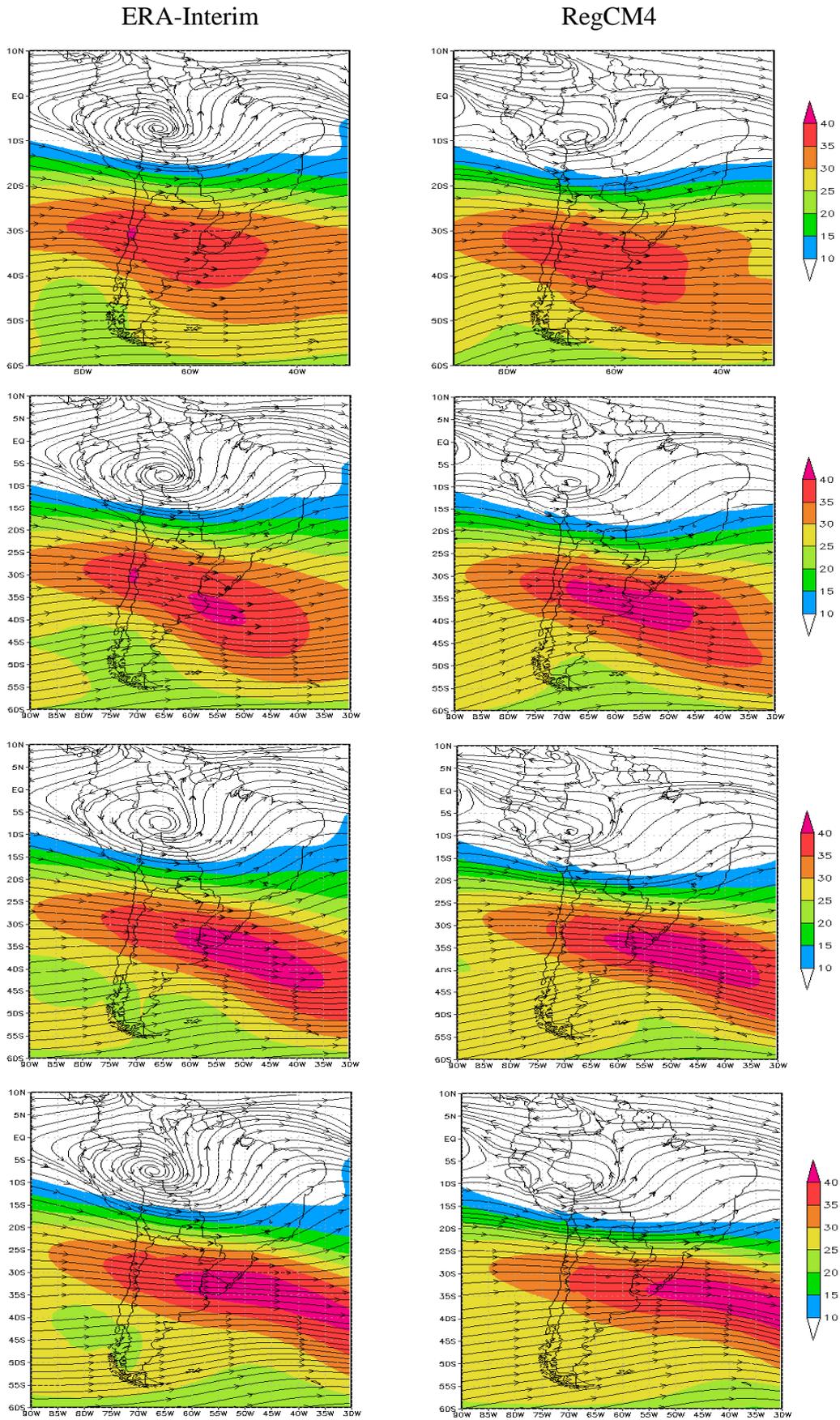


Figura 4.2.16. Idem à Figura 4.2.7, mas para primavera.

No dia da passagem da FF sobre RG (figura 4.2.17 e – f) o sistema continua inclinado para oeste com a altura e as anomalias de magnitude de continuam sendo superestimadas pelo RegCM4 em 500 hPa.

Um dia depois da passagem da FF sobre RG (figura 4.2.17 g – h) a posição relativa do ciclone mostra que o sistema continua baroclínico. No nordeste do ciclone tanto na ERA-Interim como no RegCM4 a intensificação das anomalias de magnitude do vento persistem.

Síntese sobre a atuação da FF em RG

Dois dias antes da passagem da FF sobre RG o ciclone encontra-se sobre o sul da Argentina, conforme é mostrado nas anomalias de pressão de superfície (figura 4.2.12 a – b). Esta configuração provoca ventos de oeste na costa oeste do centro sul do Chile como pode ser visto nas anomalias de vento em 850 hPa (figura 4.2.13 a – b). Este vento é obrigado a subir a cadeia de montanha dos Andes fazendo com que sejam observadas anomalias positivas de precipitação na região (figura 4.2.10 a – b). No RegCM4 estas anomalias positivas de precipitação, muito em virtude do mesmo simular o ciclone extratropical mais intenso (conforme o campo de anomalias de pressão em superfície e vento em 850 hPa), provoca chuvas mais intensas no centro-sul do Chile.

Ainda dois dias antes da FF sobre RG, as anomalias negativas de pressão associadas ao ciclone extratropical são menos intensas na primavera (figura 4.2.12 a – b) do que no inverno (figura 4.2.3 a – b). Esta maior intensidade representa maior precipitação no centro-sul do Chile no inverno na ERA-Interim, desde 1 até 4 mm/dia (figura 4.2.1 a), do que na primavera que não ultrapassa 2,5 mm/dia (figura 4.2.10 a). Quando essa comparação entre inverno e primavera é realizada no RegCM4 (figura 4.2.1 b e figura 4.2.10 b, respectivamente) a diferença na intensidade da precipitação no centro-sul do Chile é ainda maior, indicando que nesta região o modelo simula chuva excessiva em função da associação da forçante sinótica (ciclone) e a barreira topográfica. No campo médio de vento em 850 hPa (figura 4.2.14 a – b), os ventos de norte orientados meridionalmente transportam umidade para o leste da Argentina tanto no campo observado como no simulado. Esta configuração da suporte para a precipitação nessa região (figura 4.2.10 a – b).

As anomalias de pressão de superfície um dia antes da FF sobre RG (figura 4.2.12 c) mostram um aprofundamento das anomalias negativas sobre a Argentina e Uruguai na ERA-Interim. Esta região de anomalias ciclônicas mais intensas coincide com o posicionamento das

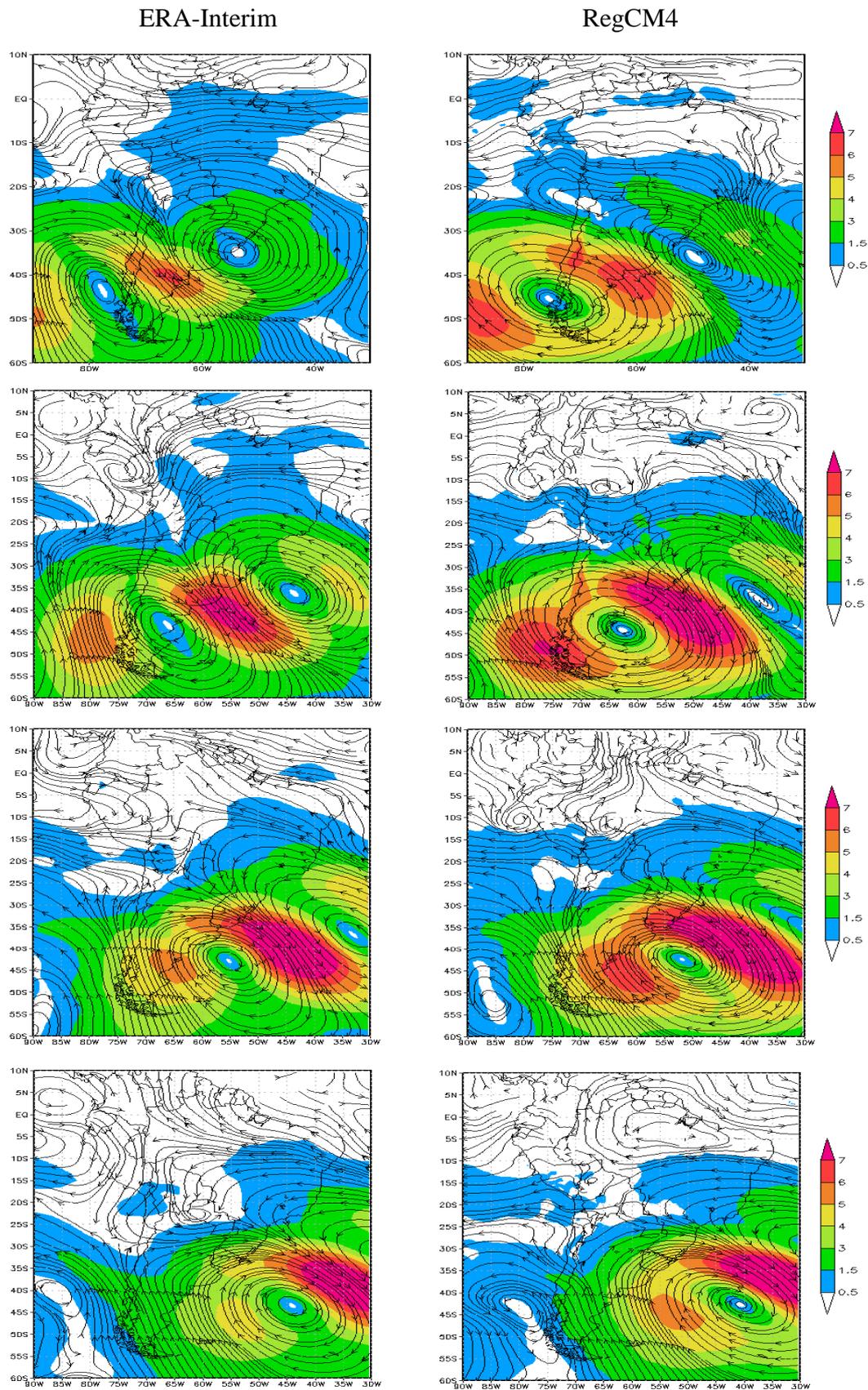


Figura 4.2.17. Idem à Figura 4.2.8, mas para a primavera.

anomalias positivas de precipitação (figura 4.2.10 c). O campo médio de vento em 850 hPa na ERA-Interim (figura 4.2.14 c) indica que o JBN se configura sobre o sul da Bolívia e Paraguai, menos intenso que no inverno (figura 4.2.4 c). No entanto, a maior disponibilidade de umidade na região ao norte (Amazônica, Bolívia e Paraguai) em 850 hPa (Anexo 1) fornece o suporte necessário para que as anomalias positivas de precipitação sejam mais intensas na primavera que no inverno (figura 4.2.1 c).

O RegCM4 simula as anomalias positivas de precipitação (figura 4.2.10 d) no leste e nordeste da Argentina e Uruguai concordando na intensidade e posicionamento com o CPC. Esta região na simulação coincide com as anomalias negativas de pressão (figura 4.2.12 d), a qual posiciona o centro do ciclone extratropical sobre a costa do Uruguai e Argentina. O campo médio de vento em 850 hPa (figura 4.2.14 c – d) mostra na região do JBN que o RegCM4 subestima a magnitude dos ventos com relação a ERA-Interim. No centro-sul do Chile o RegCM4 (figura 4.2.10 d) simula precipitação mais intensa que no CPC (figura 4.2.10 c). Isto se deve aos ventos de oeste mais intensos sobre a região, como indicam as anomalias e campo médio de vento em 850 hPa (figura 4.2.13 d e figura 4.2.14 d, respectivamente).

No dia da FF sobre RG a configuração do vento em 850 hPa contribui para a intensificação das anomalias positivas de precipitação sobre o Uruguai, leste e nordeste da Argentina, Paraguai e Rio Grande do Sul no CPC (figura 4.2.10 e). Na ERA-Interim o sistema se propaga para leste e o ciclone extratropical situa-se sobre o oceano Atlântico Sul nas anomalias de pressão (figura 4.2.12 e) e a FF associada a este se estende até a Bolívia. Nota-se que grande parte das anomalias positivas de precipitação ocorrem na região de pós-frontal. No campo médio de vento em 850 hPa na ERA-Interim (figura 4.2.14 e) o JBN perde intensidade em comparação com o dia anterior, muito embora continue fazendo o transporte de umidade da Amazônia. Ainda no campo médio de vento em 850 hPa na ERA-Interim é observado o estabelecimento de um anticiclone no centro oeste da Argentina, contribuindo para que ar mais seco seja advectado para o Uruguai e nordeste da Argentina. Este mecanismo somado à menor disponibilidade de umidade na região do anticiclone (Anexo 2) e com o avanço da FF para norte faz com que a precipitação sobre essa região enfraqueça.

No campo médio de vento em 850 hPa (figura 4.2.14 g – h; um dia depois da FF) o anticiclone presente no centro norte da Argentina tanto no RegCM4 como na ERA-Interim, mostram que o giro anti-horário transporta ar de regiões com umidade menor para as zona de atuação da FF. Esta configuração contribui para a diminuição das anomalias positivas de

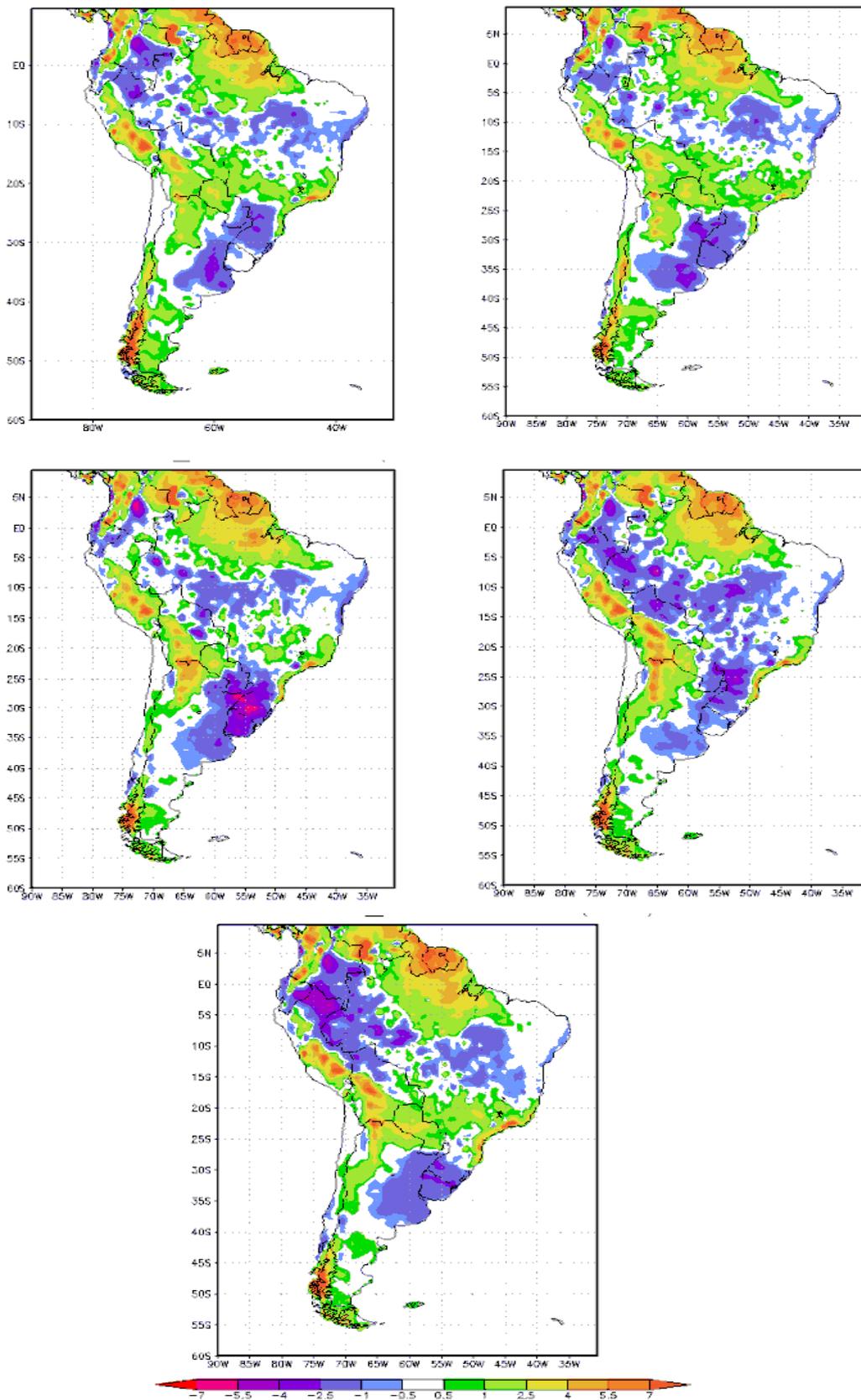


Figura 4.2.18. Idem à Figura 4.2.9, mas para a primavera.

precipitação um dia depois da FF sobre RG (figura 4.2.10 g – h). Nas anomalias de vento em 850 hPa (figura 4.2.13 e – f) o RegCM4 continua avançando mais rapidamente para leste o ciclone extratropical em comparação com a ERA-Interim, no dia da FF o centro do ciclone no campo observado é posicionado em aproximadamente $49^{\circ}\text{W}/41^{\circ}\text{S}$ e no campo simulado é posicionado mais a leste ($\sim 45^{\circ}\text{W}/40^{\circ}\text{S}$). Isto mostra que o RegCM4 também avança o sistema mais rapidamente para leste na primavera, já que este padrão é observado no inverno.

A primavera diferentemente do inverno apresenta anomalias positivas de precipitação elevadas, constatado em todos os dias de atuação da FF na primavera nas anomalias de precipitação para a cidade de Rio Grande – RS (figuras 4.2.1 e 4.2.10). Isto se deve a maior irradiância solar chegando ao hemisfério Sul na primavera, que esta ligada diretamente a direção predominante dos alísios que nessa estação costumeiramente vem de noroeste e adentram na região norte da América do Sul e são canalizados a leste dos Andes (JBN) chegando a região Sul e Sudeste do Brasil, e também a atuação da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), a qual esta mais afasta da costa leste do continente Sulamericano posicionando-se no setor central do oceano Atlântico Sul. Este posicionamento ASAS contribui para o transporte de umidade proveniente dessa região oceânica para o continente, com isso as condições importantes para que ocorram anomalias positivas de precipitação mais intensas associadas as FF na primavera em comparação com o inverno estão descritas.

De maneira geral, o RegCM4 simula corretamente as anomalias de precipitação em comparação com o CPC (figura 4.2.10 a – h), tanto as anomalias positivas quanto as negativas. No entanto novamente o RegCM4 superestima a precipitação sobre o centro-sul do Chile em todos os dias em que a FF atua sobre a região. Analisando a série de figuras nota-se que o RegCM4 subestima a precipitação na região da bacia do Prata, esta subestimativa é mostrada na figura 4.2.18 a – e, a qual corresponde à diferença entre RegCM4 e CPC.

Dois dias antes da passagem da FF em RG nota-se uma região de bias seco sobre o leste da Argentina, noroeste do Uruguai, sudeste do Paraguai e sul do sul do Brasil (Na figura 4.2.18 a). Por outro lado, o RegCM4 superestima a precipitação sobre a área em que a FF está atuando, isto é, no centro-sul do Chile e sul da Argentina e também na área desde o litoral do sudeste do Brasil, passando pelo norte da Argentina até o sul da Bolívia.

No dia anterior à passagem da FF sobre RG na primavera (figura 4.2.18 b) a área de bias seco no RegCM4 novamente situa-se sobre as regiões leste-nordeste da Argentina, Uruguai, sul do Paraguai e sul da região Sul do Brasil. Nota-se ainda um bias úmido no sul da

Argentina e no centro-sul do Chile. Uma outra área de superestimativa de precipitação estende-se do litoral da região sudeste até o norte do Peru.

Na figura 4.2.18 c, que corresponde ao dia da passagem da FF em RG, a área de bias seco no RegCM4 mantém a mesma posição que no dia anterior, mas o bias seco é maior e chega até -7 mm/dia. Um área de bias úmido se estende do litoral de Santa Catarina até o litoral do Espírito Santo, com valores de bias positivo entre 0,5 até mais de 7,0 mm/dia. Outra região que mostra elevado bias úmido é o norte do Paraguai, norte-noroeste da Argentina, no sudoeste da Bolívia e centro-sul do Peru.

No primeiro dia após a passagem da FF sobre RG (figura 4.2.18 d) o bias seco posiciona-se sobre o leste da Argentina, norte do Uruguai, sul do Paraguai e na região sul do Brasil (desde -0,5 até -5,5 mm/dia). Outra área que é observado bias úmido vai da região noroeste da Argentina passando pelo noroeste do Paraguai e Bolívia até o Peru.

A figura 4.2.18 a – e indicam que no RegCM4 o bias seco na região da Bacia do Prata persiste em todos os dias analisados na primavera. Em contrapartida, o RegCM4 mostra um bias úmido, em todos os dias da passagem da FF, sobre a região litorânea que vai de Santa Catarina até o Espírito Santo (desde 0,5 até valores superiores a 7 mm/dia). Outra região que o RegCM4 superestima a precipitação é a área desde o litoral sudeste do Brasil passando pelo norte do Paraguai, norte da Argentina, Bolívia e Peru. Entretanto essa área de superestimativa de precipitação perde configuração no dia e um dia após a passagem da FF, exatamente nos dias em que a subestimativa sobre a bacia do Prata se intensifica.

4.3 Composições SP

Nos compostos para SP as figuras são apresentadas da mesma maneira que para RG, exceto por não serem mostradas as figuras de dois dias antes da FF que são similares às figuras para um dia antes da FF em RG.

São Paulo: Inverno

Precipitação

Na figura 4.3.1a, um dia antes da FF em SP, é observado no CPC uma área de anomalias positivas de precipitação desde o Uruguai, região sul até centro-oeste do Brasil, com o núcleo mais intenso de precipitação (3,5- 6 mm/dia) situado no Rio Grande do Sul e nordeste do Uruguai. As anomalias negativas de precipitação ocorrem no centro-sul do Chile. Na figura 4.3.1b o RegCM4 posiciona as anomalias de precipitação em regiões similares às

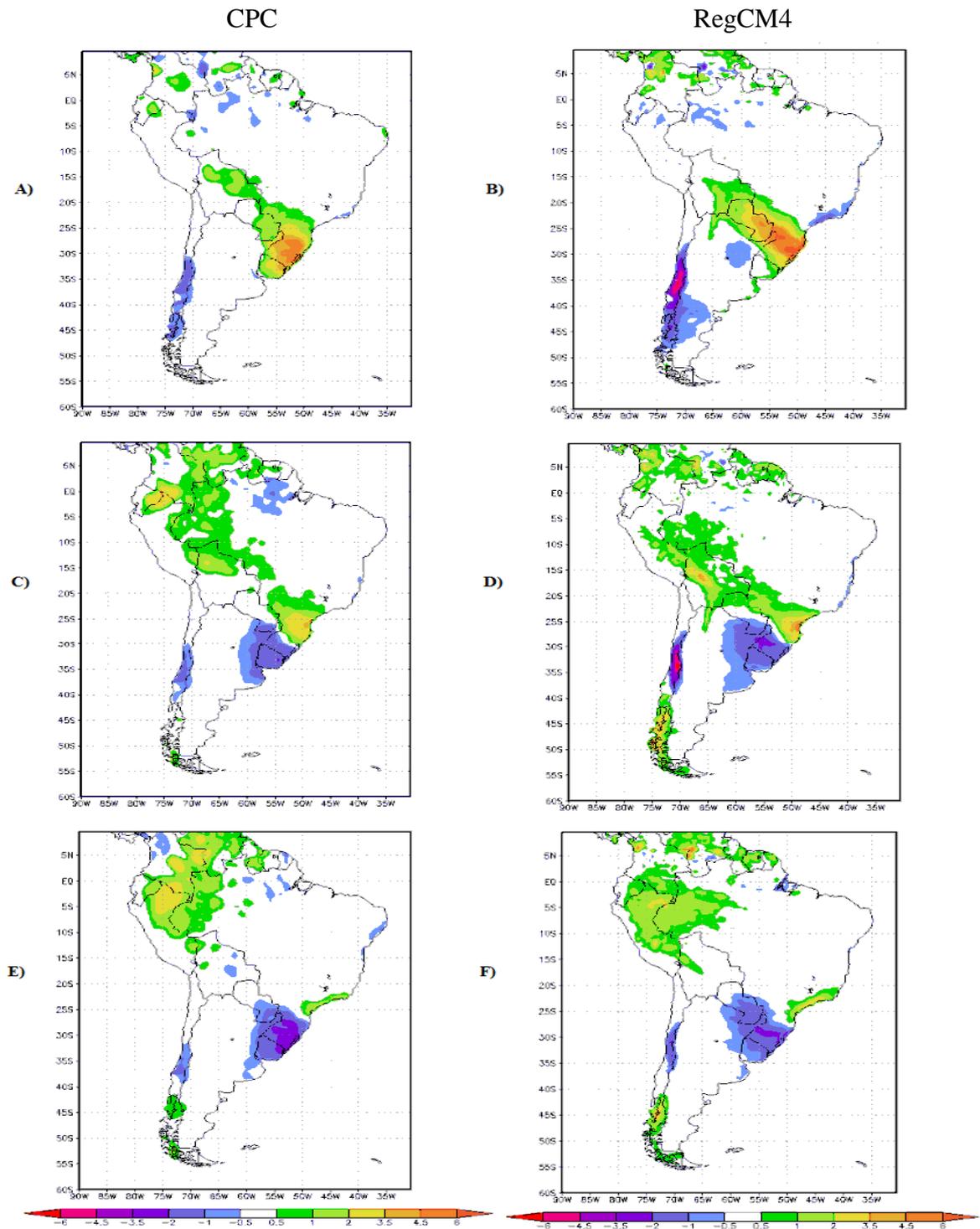


Figura 4.3.1. Anomalia da variável precipitação no inverno para CFF aplicado na cidade de São Paulo – SP no período de 1979 - 2009, coluna da esquerda estão as anomalias com dados do CPC e na coluna da direita anomalias do RegCM4. Os itens (a)-(b) correspondem ao dia menos um, (c)-(d) dia da passagem da FF e (e)-(f) dia mais um.

do CPC. No entanto, existem algumas diferenças entre RegCM4 e CPC, como por exemplo, (a) ausência de anomalias positivas de chuva sobre o Uruguai na simulação; (b) as anomalias positivas (superiores a 2 mm/dia) simuladas alongam-se até o norte do Paraguai no RegCM4 diferindo do CPC que posiciona as anomalias mais intensas no sul do Brasil e nordeste do Uruguai. O RegCM4 simula uma maior área que o CPC com anomalias negativas de precipitação mais ao sul (centro-sul do Chile e oeste da Argentina).

No dia da FF sobre SP (**figuras 4.3.1 c – d**) as anomalias positivas de chuva avançaram para norte no CPC, esta banda de anomalia positiva atinge até o norte da América do Sul. O RegCM4 simula esta banda em região similar à do CPC, mas o RegCM4 superestima a intensidade principalmente nos litorais do Paraná e norte de Santa Catarina. A área de anomalias negativas de precipitação são simuladas pelo RegCM4 também em posições similares às do CPC, mas com maior intensidade do que no CPC principalmente no Chile e sudoeste do Rio Grande do Sul.

Um dia depois da FF sobre SP (**figuras 4.3.1 e – f**) o CPC posiciona as anomalias positivas de precipitação (entre 0,5 e 2 mm/dia) sobre o litoral, desde o Paraná até o Rio de Janeiro. O RegCM4 posiciona corretamente esta área de anomalias positivas, embora um pouco mais intensa (0,5 até 3,5 mm/dia) que no CPC. Nesta análise, nota-se também uma área de anomalias negativas de precipitação sobre entre Uruguai e o Rio Grande do Sul (desde -0,5 até -3,5 mm/dia), padrão que é também simulado pelo RegCM4 em uma área ligeiramente maior do que no CPC.

Temperatura

No dia pré-frontal, na Era-Interim (figura 4.3.2 a) a região de interface entre as áreas quente e fria está posicionada sobre o sul do Rio Grande do Sul, centro do Paraguai e sul da Bolívia. Na figura 4.3.2b, o RegCM4 mostra que o padrão é simulado, no entanto os núcleos mais intensos de anomalias positivas e negativas são superestimados.

Quando a FF chega a SP (figuras 4.3.2 c – d), anomalias negativas de temperatura na retaguarda se intensificam, enquanto as anomalias positivas perdem intensidade tanto no campo simulado como na ERA-Interim. O padrão é simulado pelo RegCM4 e a interface entre as anomalias positivas e negativas é observada novamente mais a norte no RegCM4 comparada com à ERA-Interim.

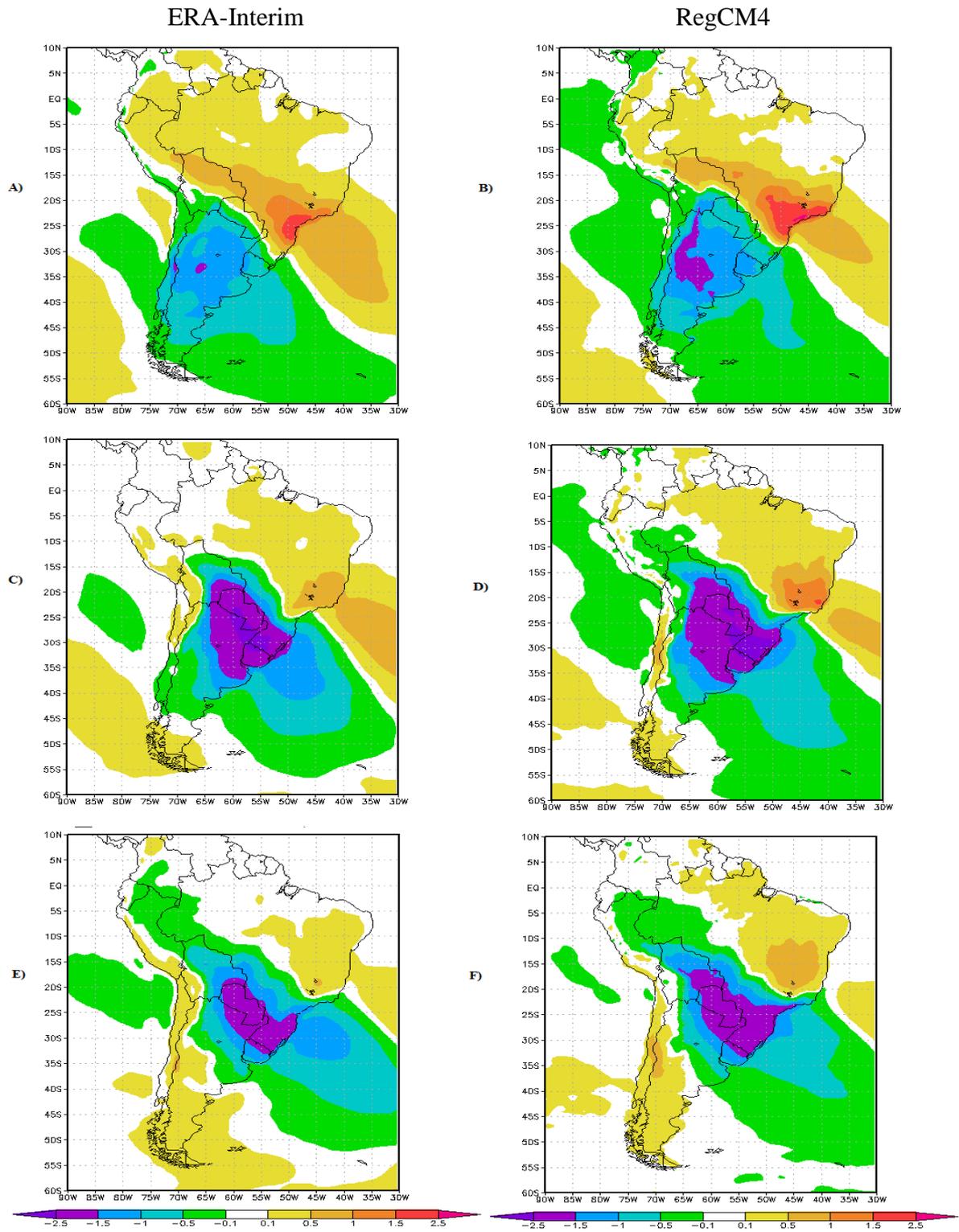


Figura 4.3.2. Idem à Figura 4.3.1, mas para anomalias de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$).

Um dia depois da FF sobre SP (figura 4.3.2 e – f) os gradientes de temperatura perdem intensidade, no entanto a região de anomalias negativas continua intensa no Era-Interim e RegCM4.

Pressão

Na Era-Interim e RegCM4 (figuras 4.3.3 a-b) um dia antes da FF chegar em SP tem-se uma região de anomalias negativas de pressão, desde o sudeste da América do Sul até norte do Peru, e o centro do ciclone extratropical em superfície está posicionado sobre o oceano Atlântico Sul, em aproximadamente $45^{\circ}\text{W}-35^{\circ}\text{S}$. No entanto, o RegCM4 superestima a área com anomalias mais intensas e sobre o continente simula padrão/intensidade similar à Era-Interim. As anomalias positivas na ERA-Interim atuam sobre praticamente toda a Argentina e centro sul do Chile com valores superiores 6 hPa.

No dia que a FF está sobre SP (figuras 4.3.3 c – d) a ERA-Interim mostra avanço para norte das anomalias positivas de pressão em uma grande área de valores variando entre 3 e 6 hPa, e esta área é menor no RegCM4. Sobre o continente as anomalias negativas perdem força nos dois campos e nesse dia na região com precipitação existe um maior predomínio de normalidade de pressão.

A figura 4.3.3 e – f mostra que na ERA-Interim sobre o continente, o ciclone extratropical não atua mais dando lugar ao anticiclone. O RegCM4 o anticiclone predomina sobre o continente, concordando com a ERA-Interim, mas são simuladas ainda anomalias negativas de pressão sobre a Bahia e norte de Minas Gerais.

Vento em 850 hPa

Um dia antes da passagem da FF sobre SP a figura 4.3.4 a mostra que a confluência dos ventos situa-se sobre o Estado de Santa Catarina. O cavado observado sobre o Uruguai e Rio Grande do Sul, associado a confluência dos ventos amplificou em comparação com o dia anterior (Anexo 3), e o seu posicionamento contribui para intensificar a precipitação na região. Na figura 4.3.4 b, o RegCM4 simula o cavado em posição similar à ERA-Interim e também se amplificou comparado ao dia anterior. De acordo com os padrões observados na precipitação, vento, temperatura do ar e pressão, no RegCM4 a FF está sobre o sul do Estado de São Paulo passando pelo centro-norte do Mato Grosso do Sul, enquanto na ERA-Interim situa-se ligeiramente ao sul (sobre o Estado do Paraná passando pelo sul do Mato Grosso do Sul).

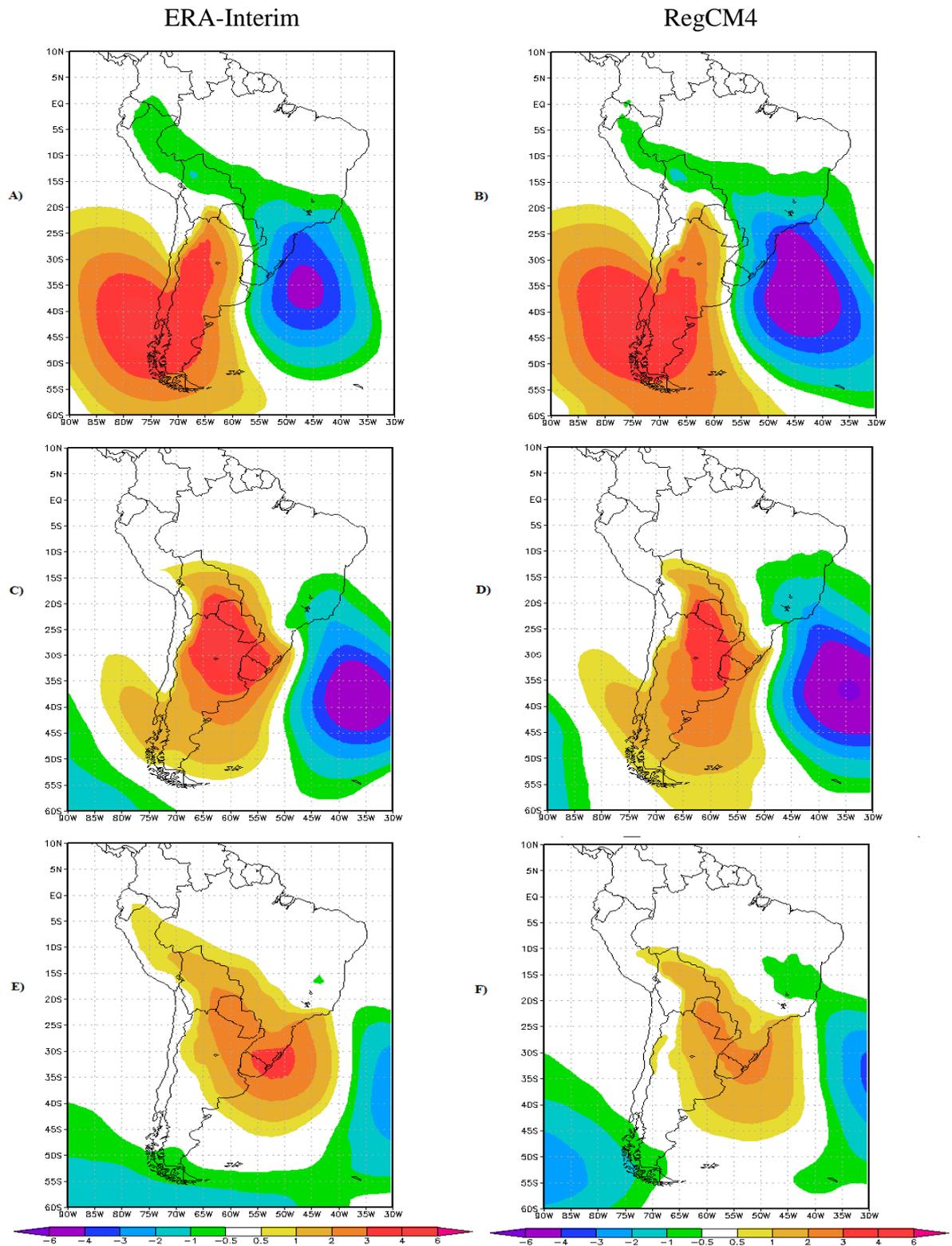


Figura 4.3.3. Idem à Figura 4.3.1, mas para anomalias de pressão em superfície (hPa)

Nas figura 4.3.4 c – d que corresponde ao dia da FF sobre SP, o padrão que se observa na ERA-Interim é simulado corretamente pelo RegCM4, ou seja, a alta pós-frontal situa-se no nordeste da Argentina e o cavado está centrado em $\sim 43^{\circ}\text{W}$. O anticiclone pós-frontal observado no noroeste da Argentina está posicionado também nessa região no RegCM4.

Um dia depois da FF sobre SP (figura 4.3.4 e – f) o cavado observado sobre o oceano Atlântico Sul no dia da FF perde amplificação tanto na ERA-Interim quanto no RegCM4. Sobre o continente predomina o giro anticiclônico nos dois campos. Este padrão de vento em 850 hPa em conjunto com a precipitação, pressão de superfície, temperatura do ar mostra na ERA-Interim e RegCM4 a FF não atua mais sobre o continente.

Anomalias Ventos em 850 hPa

A figura 4.3.5 a mostra que o ciclone movimenta-se para leste na ERA-Interim e no setor à oeste do ciclone as anomalias de magnitude do vento se intensificam, ultrapassando 7 m/s. O RegCM4 (figura 4.3.5 b) superestima a intensidade das anomalias de vento no setor oeste do ciclone (desde 5 até 7 m/s).

Quando a FF sobre SP (figura 4.3.5 c – d) nota-se na ERA-Interim um pequeno centro de anticiclone sobre o nordeste da Argentina e uma grande região de giro anticiclônica ao sul. O RegCM4 posiciona o núcleo do anticiclone na costa sudeste da Argentina, mas não simula o pequeno centro anticiclônico ao norte. Na região de atuação do JBN a ERA-Interim apresenta anomalias de magnitude do vento de nordeste, desde 4 até valores superiores a 7 m/s, que no RegCM4 se apresenta com magnitudes menores.

Na figura 4.3.5 e – f o padrão do campo observado na ERA-Interim é simulado pelo RegCM4, tendo o anticiclone sobre o Uruguai e o centro do ciclone extratropical fora do domínio mostrado. A intensidade das anomalias de magnitude do vento diminui e a atuação do ciclone sobre o continente neste dia é pequena.

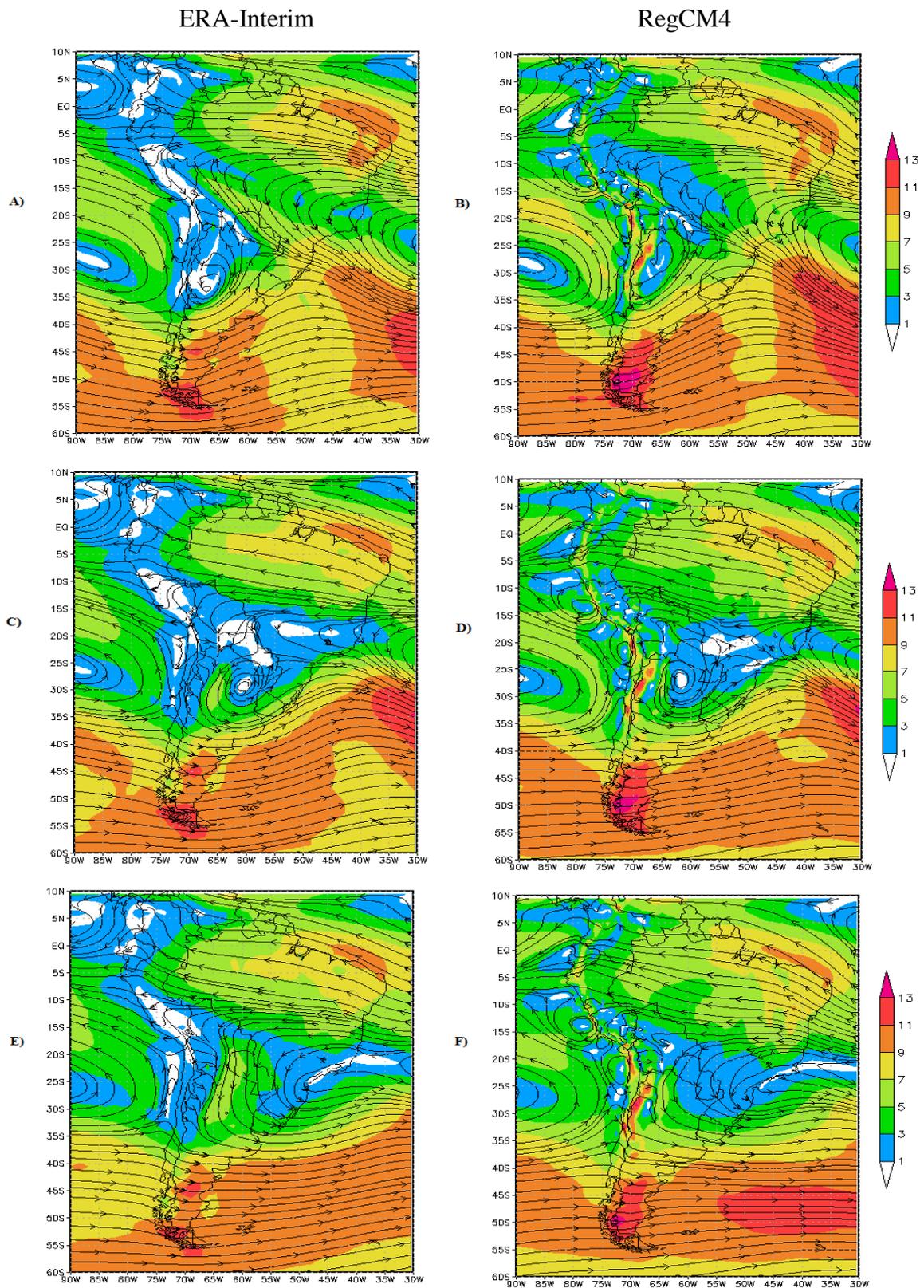


Figura 4.3.4. Campo médio de linhas de corrente e isotacas (sombreada em m/s) em 850 hPa no inverno para CFF aplicado na cidade de São Paulo – SP no período de 1979 - 2009, coluna da esquerda estão os campos com dados da ERA-Interim e na coluna da direita campos do RegCM4. Os itens (a)-(b) correspondem ao dia menos um, (c)-(d) dia da passagem da FF e (e)-(f) dia mais um.

Anomalias de umidade específica em 850 hPa

Um dia antes da FF sobre SP (figura 4.3.6 a - b) a ERA-Interim posiciona anomalias positivas de umidade específica sobre a região sul do Brasil que se estendem até a Bolívia, enquanto anomalias negativas (associadas ao avanço de um anticiclone pós-frontal) são observadas sobre a Argentina. Este padrão é simulado pelo RegCM4, no entanto sobre o continente o ReCM4 é mais seco em comparação com a ERA-Interim. Sobre o Oceano Atlântico Sul o RegCM4 superestima as anomalias positivas mostradas pela ERA-Interim.

A FF ao chegar a SP desloca as anomalias positivas de umidade específica para norte, cobrindo desde o litoral de São Paulo até o leste do Equador, tanto na ERA-Interim como no RegCM4 (figuras 4.3.6 c - d). As anomalias negativas ao sul ocupam área similar no RegCM4 e ERA-Interim, mas são subestimadas pelo RegCM4.

Nas figuras 4.3.6 e - f observa-se na ERA-Interim a des-configuração da banda de anomalias positivas, ficando agora posicionadas sobre uma pequena faixa leste do sudeste do Brasil. As anomalias negativas de umidade específica permanecem praticamente na mesma região do dia anterior na ERA-Interim e RegCM4 mas perdem intensidade.

Vento em 200 hPa

O núcleo do jato encontra-se orientado leste-oeste na ERA-Interim e RegCM4, com a entrada do mesmo sobre o nordeste da Argentina e imediações, e o cavado de onda longa associado à passagem da FF tem seu eixo localizado em $\sim 57^{\circ}\text{W}$ um dia antes FF chegar em SP (figuras 4.3.7 a - b). Uma diferença é que RegCM4 superestima a magnitude do vento na região do núcleo do jato.

No dia da FF sobre SP (figuras 4.3.7 c - d) mostra que a área do núcleo de jato (velocidades acima de 40 m/s) diminui sobre o continente tanto na ERA-Interim quanto no RegCM4.

Um dia depois da FF sobre SP (figuras 4.3.7 e - f) o jato em altos níveis enfraquece sobre o continente e torna-se mais zonal no RegCM4 e Era-Interim em comparação com os dias anteriores, indicando que o sistema não atua mais com a mesma intensidade dos dias anteriores.

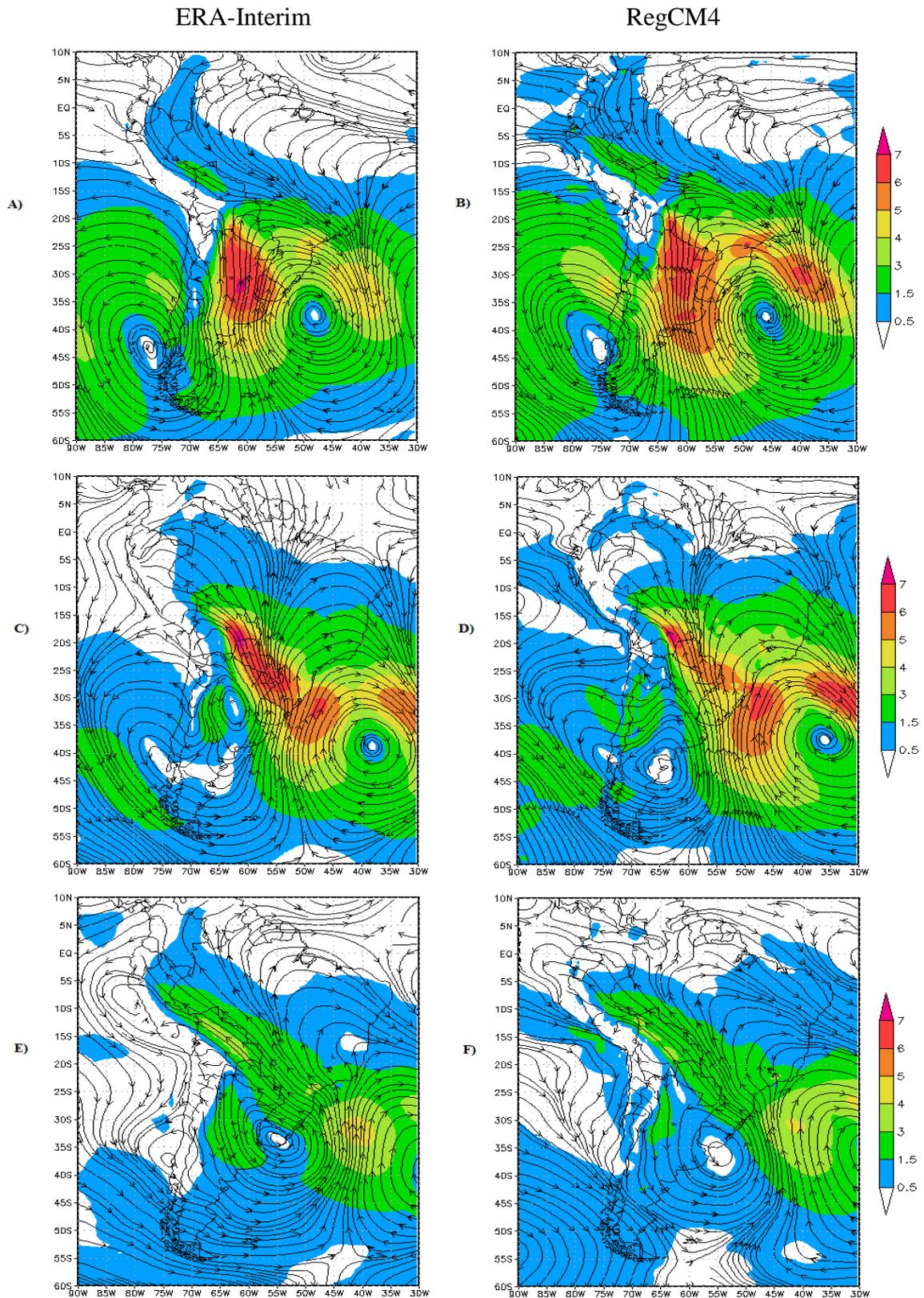


Figura 4.3.5. Anomalia de linha de corrente e velocidade do vento (m/s) em 850 hPa no inverno para CFF aplicado na cidade de São Paulo – SP no período de 1979 - 2009, coluna da esquerda estão as anomalias com dados da ERA-Interim e na coluna da direita anomalias do RegCM4. Os itens (a)-(b) correspondem ao dia menos um, (c)-(d) dia da passagem da FF e (e)-(f) dia mais um.

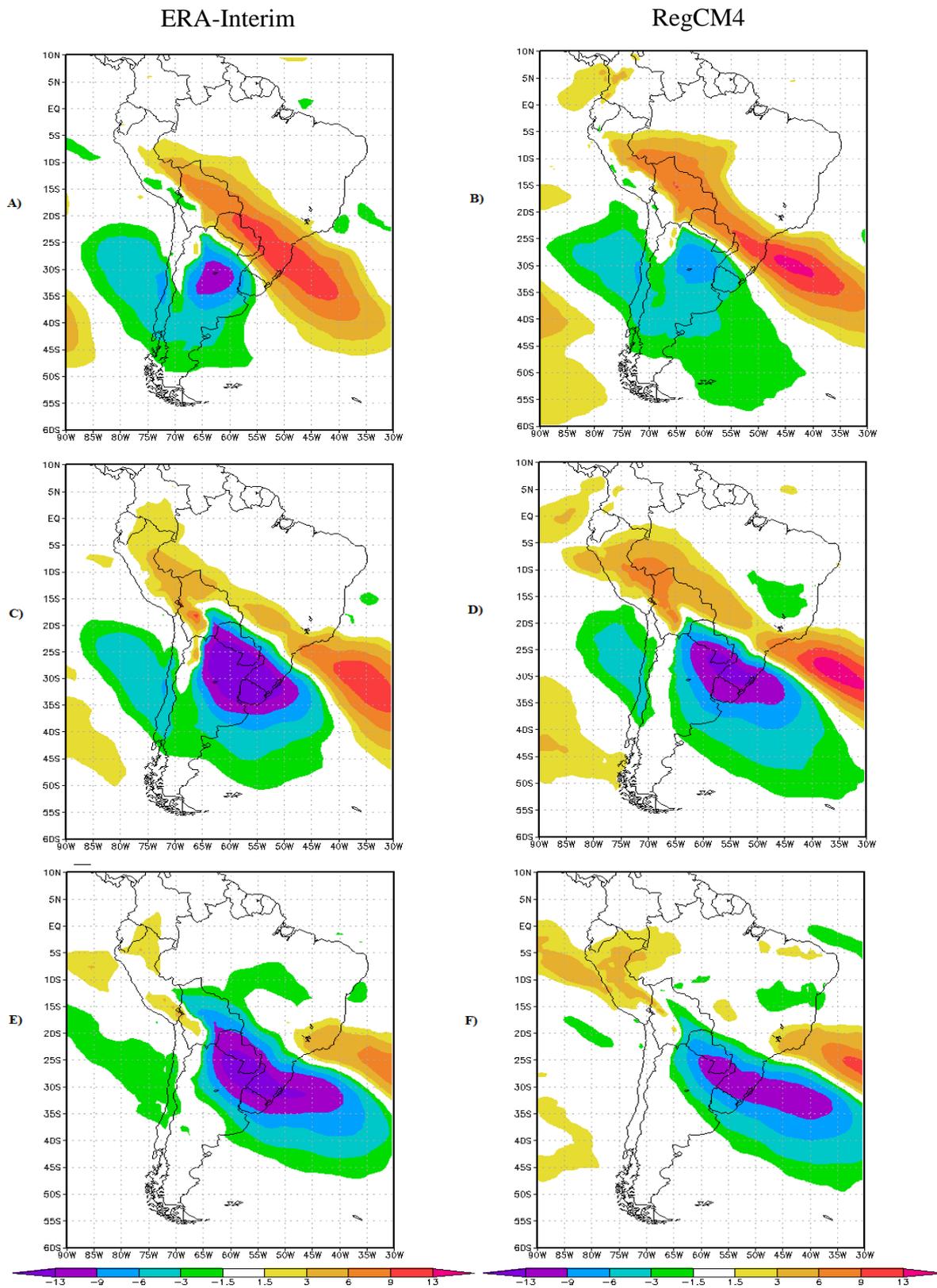


Figura 4.3.6. Idem à Figura 4.3.1, mas para umidade específica (g/kg) em 850 hPa.

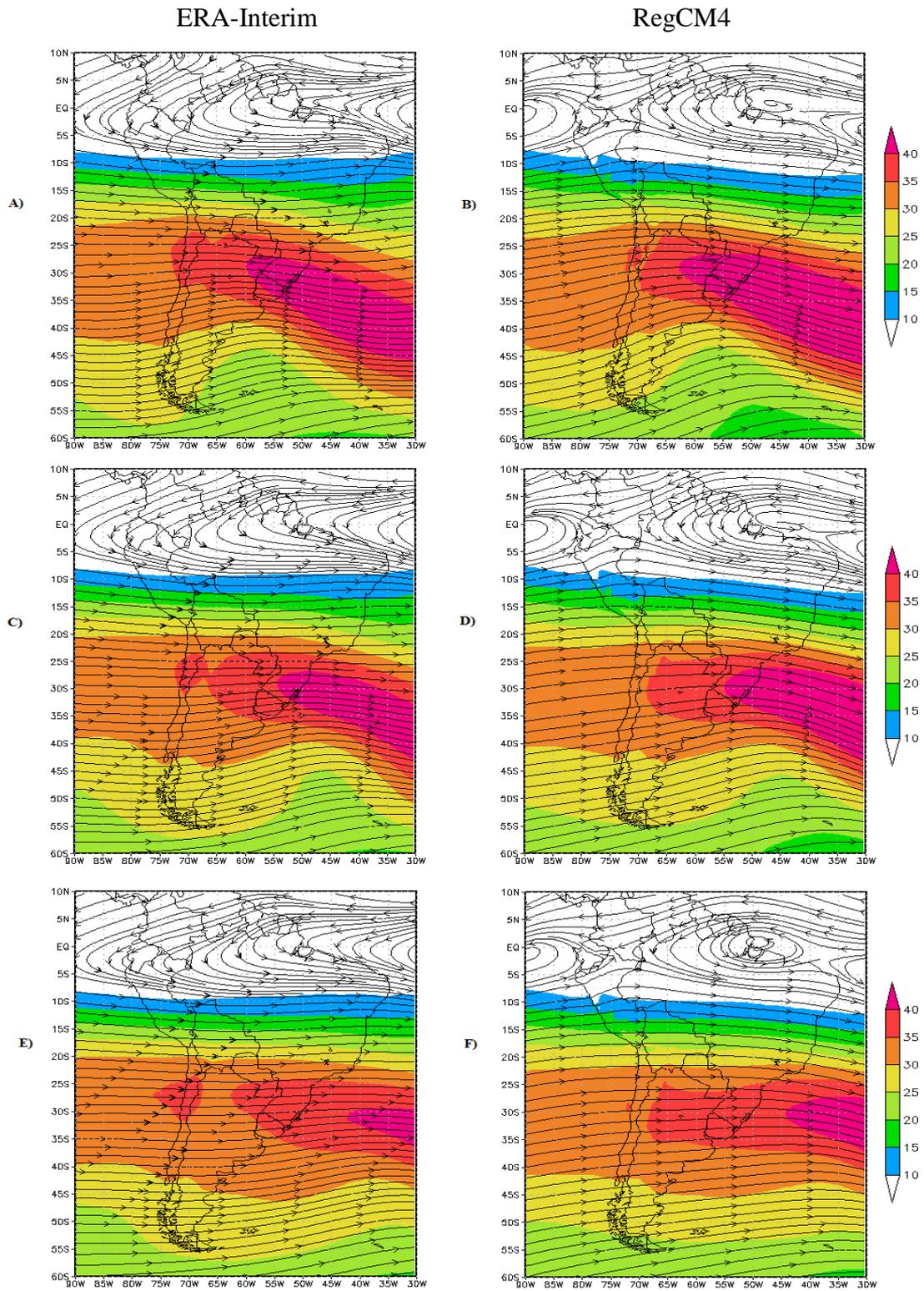


Figura 4.3.7. Idem à Figura 4.3.4, mas para o nível de 200 hPa.

Anomalias de vento em 500 hPa

Um dia antes da FF sobre SP (figura 4.3.8 a) a ERA-Interim mostra o ciclone extratropical em 500 hPa posicionado a oeste do ciclone em superfície, indicando que na média quando as FF estão posicionadas sobre Santa Catarina o sistema apresenta estrutura baroclínico. O RegCM4 (figura 4.3.8 b) posiciona corretamente o ciclone em 500 hPa em comparação com a ERA-Interim, no entanto o RegCM4 superestima as anomalias de magnitude de vento.

O sistema continua baroclinico e as anomalias de magnitude do vento continuam sendo superestimadas pelo RegCM4 no dia da FF sobre SP (figuras 4.3.8 e – f).

Síntese sobre a atuação da FF em SP

Dois dias antes da FF sobre SP (anexo 3) o JBN está configurado na ERA-Interim (entre 7 - 13 m/s), mas no RegCM4 na região do JBN não ultrapassa 11 m/s, ou seja, o JBN simulado é mais fraco como ocorreu também no inverno para RG (figura 4.2.4 a – h). Neste dia o RegCM4 superestima as anomalias positivas de chuva sobre o norte da Argentina e Paraguai, mas apresenta subestimativa no Uruguai, no sudeste e norte do sul do Brasil, a qual se estende irregularmente até no norte da Bolívia (figura 4.3.9a).

À medida que a FF aproxima-se de SP (um dia antes), na ERA-Interim nota-se enfraquecimento do JBN que em conjunto com avanço de um anticiclone no centro-oeste da Argentina induz a reversão dos ventos de norte para de sul, levando ar polar mais seco para região de atuação da banda de precipitação. Isto contribui para reduzir a intensidade da chuva. Diferentemente da ERA-Interim, no RegCM4 o JBN não está configurado e isto impacta na intensidade das anomalias positivas de precipitação no dia da passagem da FF em SP que perdem intensidade. O padrão das anomalias de pressão de superfície (figuras 4.3.3 a – b) sobre o continente na ERA-Interim é muito semelhante ao simulado no RegCM4, mas no Oceano Atlântico Sul o ciclone extratropical é mais profundo no RegCM4 que na ERA-Interim. Padrão similar ao que ocorre no inverno para FFs em RG. No entanto sobre o continente o campo simulado mostra em toda a série as anomalias negativas de pressão menos intensas em comparação com a ERA-Interim. Em termos de erros de previsão, um dia antes

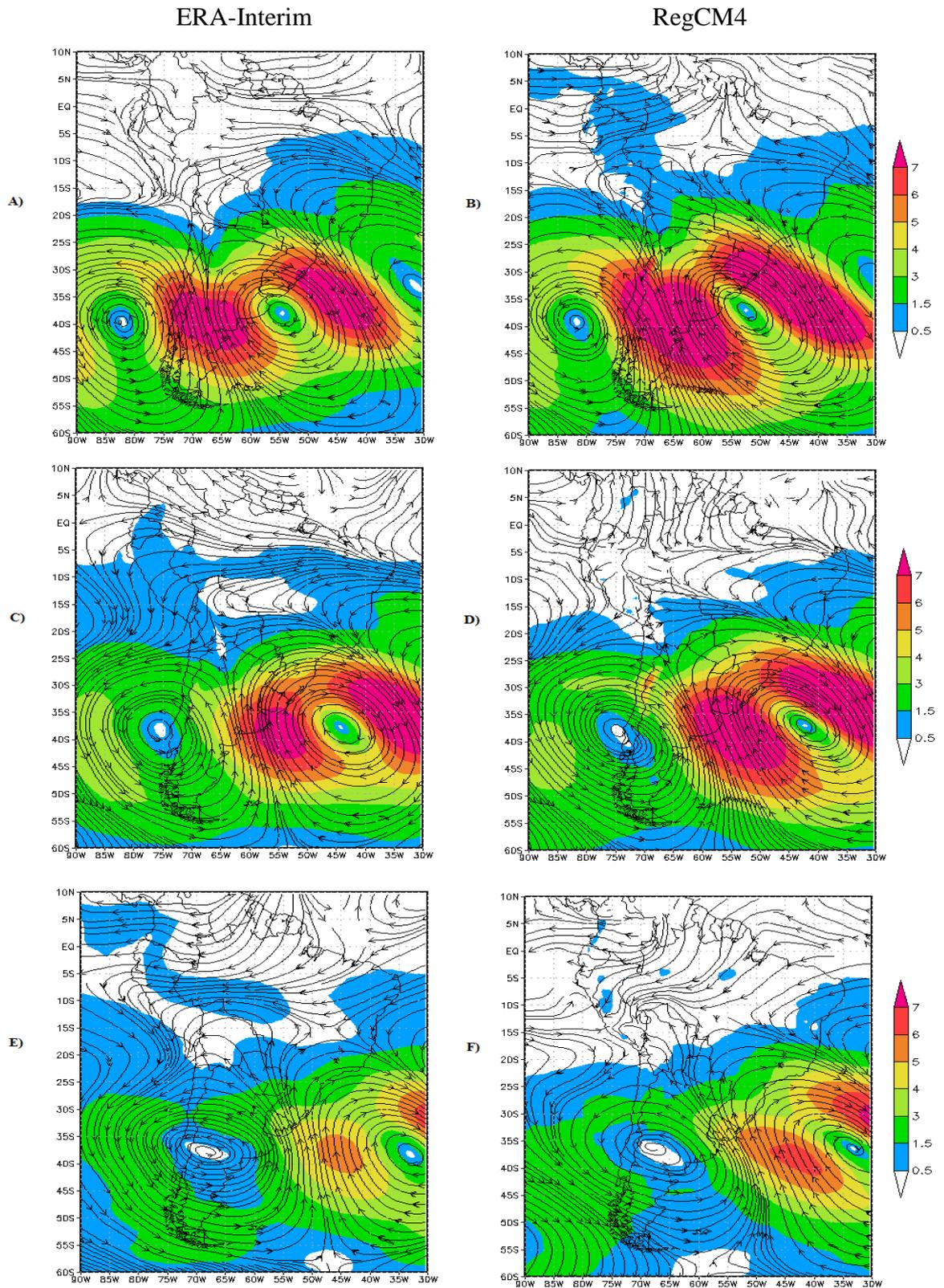


Figura 4.3.8. Idem à Figura 4.3.5, mas para o nível de 500 hPa.

da passagem da FF sobre SP (**figura 4.3.9 b**) o RegCM4 subestima a chuva sobre o Uruguai que agora chegam no sul do Rio Grande do Sul (desde -0,5 até -5,5 mm/dia). A área de superestimativa, no oeste da Bacia do Prata sofre aprofundamento principalmente no centro do Paraguai, atinge no RegCM4 até 5,5 mm/dia.

No dia da FF em SP as anomalias positivas de precipitação perdem intensidade no CPC e no RegCM4, desde que as anomalias negativas de pressão se desintensificaram sobre o continente (figuras 4.3.3 c – d) e o vento em 850 hPa (figuras 4.3.5 c – d e figuras 4.3.4 c – d, respectivamente) mostra vento de sul sobre a região de atuação das anomalias positivas de precipitação tanto no campo observado como simulado. Neste dia a área de subestimativa de precipitação pelo RegCM4 avança para norte e posiciona-se sobre a região sul do Brasil (desde -0,5 até -4 mm/dia; **figura 4.3.9 c**). Um bias úmido é encontrado sobre o litoral, desde Santa Catarina até o Rio de Janeiro (variando desde 0,5 até 4 mm/dia) e uma outra área de superestimativa de precipitação situa-se sobre o norte do Paraguai, estendendo-se até o centro do Peru passando pela Bolívia.

No inverno, um dia depois da FF sobre SP anomalias positivas de pressão de superfície (figuras 4.3.3 e – f), associada ao avanço do anticiclone pós-frontal, predominam sobre o continente. Com isso contribuem para as anomalias negativas de precipitação (figuras 4.3.1 e – f) sobre o Rio Grande do Sul, Uruguai e nordeste da Argentina, e anomalias positivas concentram-se no litoral do Paraná e sudeste do Brasil. Isto deve-se a atuação do anticiclone pós-frontal que mantém ventos de sudeste soprando em direção à costa como mostrado nas anomalias de vento em 850 hPa (figuras 4.3.5 e – f). A figura 4.3.9d, que apresenta o erros de previsão no primeiro dia depois da FF sobre SP, mostra que no RegCM4 a área de subestimativa de chuva perde força na região Sul do Brasil de modo que se concentra no centro do Rio Grande do Sul e sul do Paraguai. Comparado ao dia anterior, a região de bias úmido no oeste da Bacia do Prata (norte do Paraguai variando desde 0,5 até 1 mm/dia) se desintensifica. A área de superestimativa de precipitação na costa das regiões sul e sudeste é mantida, mas se estende mais ao norte chegando até o norte do Rio de Janeiro. As superestimativas pelo RegCM4 de chuva no centro da Bolívia, Peru, norte e sul da Argentina e Chile mantêm-se em posições semelhantes às do dia anterior.

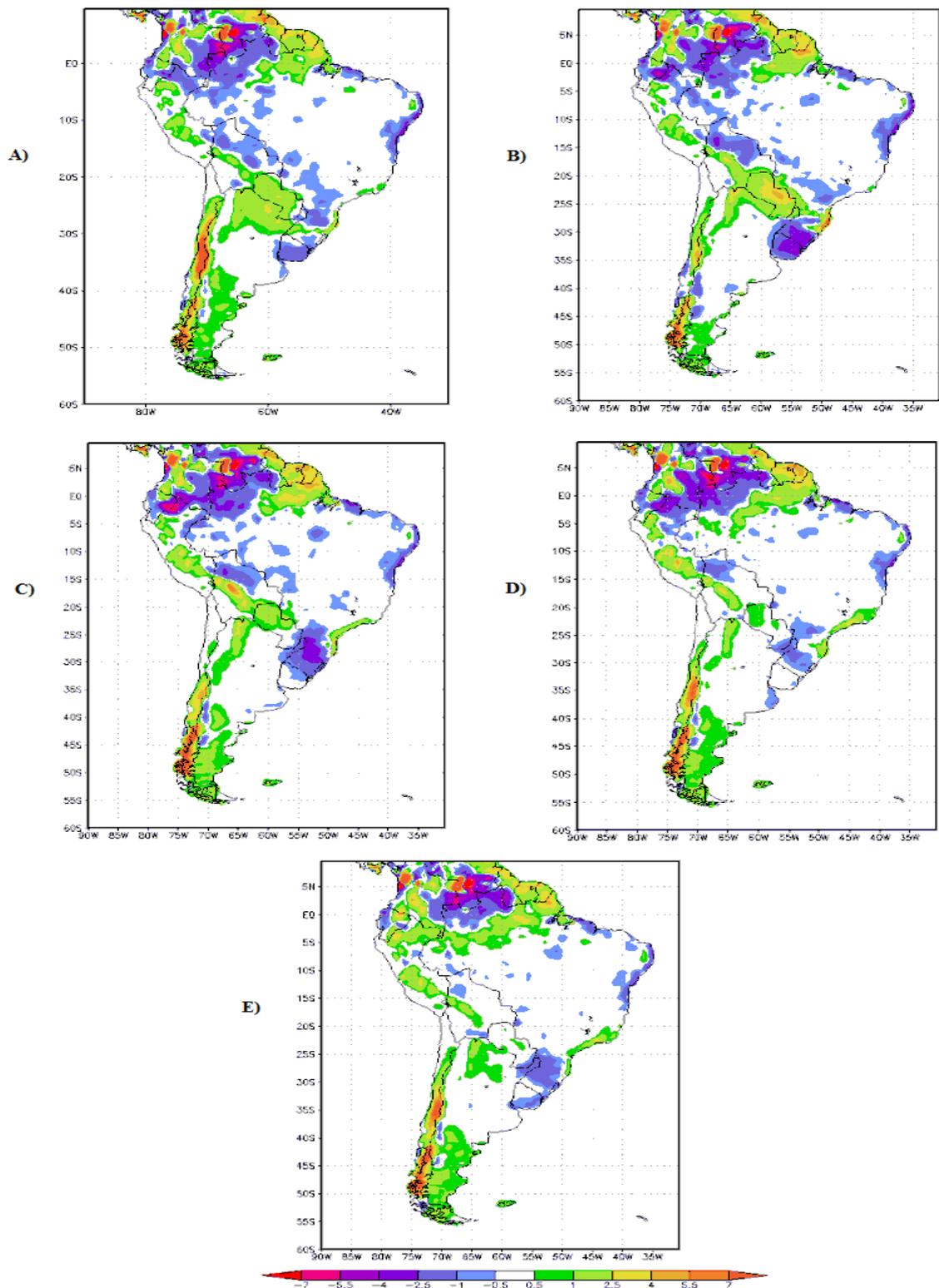


Figura 4.3.9. Diferença da média de precipitação entre RegCM4 e CPC no inverno nos dias da passagem das FF aplicando o CFF na cidade de São Paulo-SP no período de 1979-2009. (a) Dois dias antes da passagem da FF, (b) um dia antes da passagem da FF, (c) dia da passagem da FF, (d) um dia depois da passagem da FF e (e) dois dias depois da passagem da FF.

Dois dias depois da FF sobre SP as anomalias positivas de precipitação (Anexo 5) sobre o Brasil não são mais observadas, mostrando que na média os sistemas frontais no inverno após passarem pelo Estado de São Paulo deixam de provocar precipitação sobre o país. Neste dia (**figura 4.3.9 e**) a subestimativa de precipitação pelo RegCM4 permanece sobre o Rio Grande do Sul. As áreas com bias úmido permanecem nas mesmas posições do dia anterior.

De maneira geral, a figura 4.3.9 indica que o RegCM4 subestima a precipitação principalmente no sudeste da Bacia do Prata (Rio Grande do Sul e Uruguai) em todos os dias analisados. Enquanto a região oeste da Bacia do Prata e litoral de Santa Catarina, Paraná, São Paulo e Rio de Janeiro o RegCM4 apresenta superestimativas (desde 0,5 até valores superiores a 7 mm/dia). No Chile o RegCM4 também indica fortes superestimativas (superiores a 7 mm/dia). Por outro lado, o RegCM4 mostra bias seco, desde de 2 dias antes até 2 dias depois da passagem da FF sobre SP, na costa leste da região nordeste do Brasil. Enquanto que nas regiões centrais do Pernambuco e Paraíba o RegCM4 superestima a precipitação entre 0,5 até 2,5 mm/dia.

São Paulo: Primavera

Precipitação

Nas figuras 4.3.10 a – b, que correspondem ao dia anterior à passagem da FF sobre SP, o CPC mostra um núcleo de anomalias positivas de precipitação sobre o Rio Grande do Sul, ultrapassando o limiar de 6 mm/dia. Ainda no CPC é observada uma área de precipitação ao redor desse núcleo mais intenso sobre o Uruguai, centro-sul do Paraguai, leste da Bolívia, restante da região sul e do centro-oeste do Brasil. O RegCM4 adianta ligeiramente a movimentação da FF para norte, logo a banda de anomalia positiva chuva simulada situa-se ligeiramente ao norte daquela do o CPC. A anomalia negativa de precipitação, localizada ao norte da FF, se encontra mais intensa no RegCM4, estas anomalias negativas mais intensas são uma resposta as anomalias positivas mais intensas, como visto na primavera para o CFF aplicado em RG, em que se configura nesta região de subsidência de compensação. No setor pós-frontal, o CPC posiciona anomalias negativas de precipitação no leste da Argentina, enquanto no RegCM4 estas anomalias situam-se no nordeste da Argentina e sul do Chile.

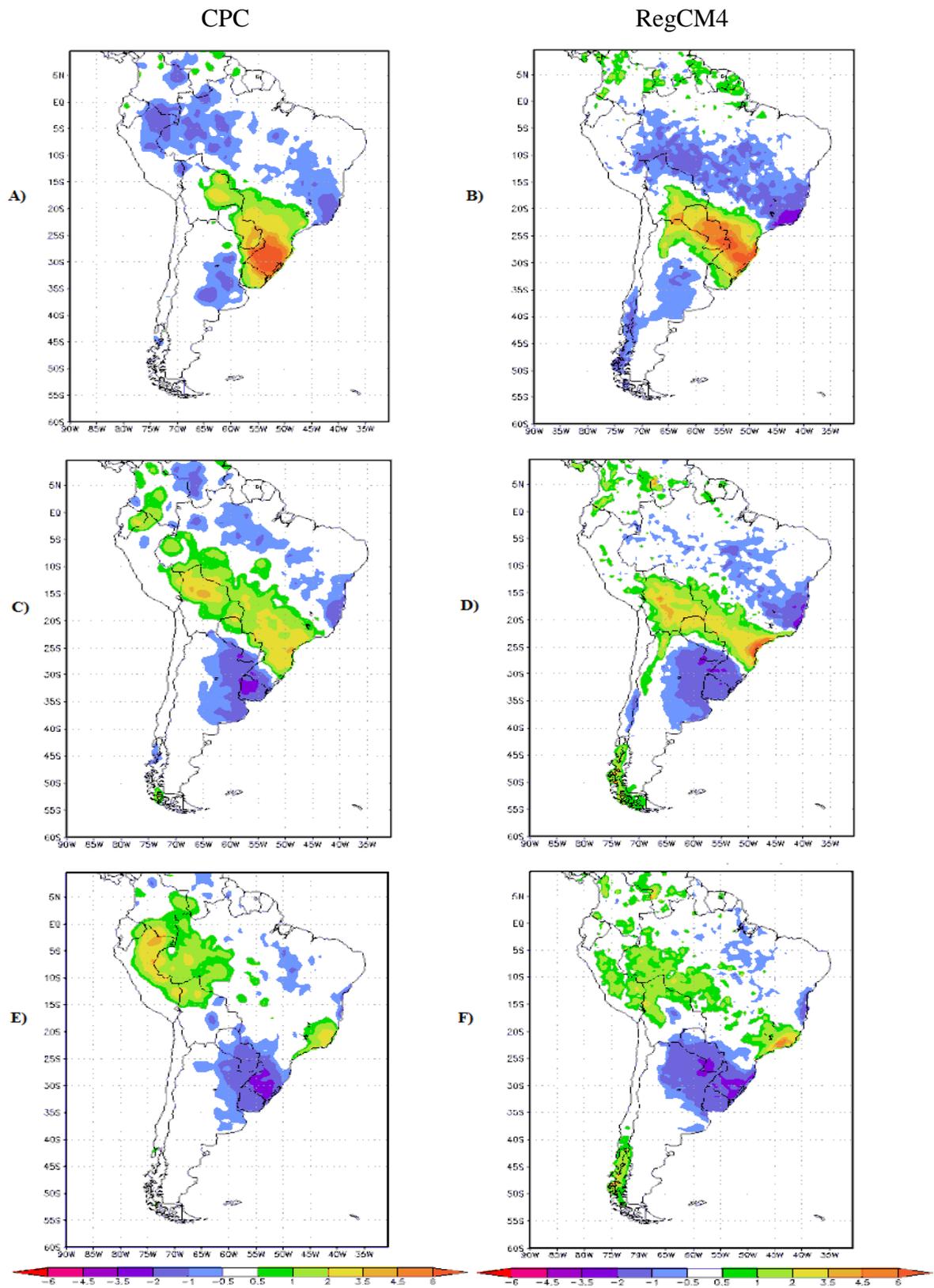


Figura 4.3.10. Idem à Figura 4.3.1, mas para a primavera.

No dia da FF sobre SP (**figuras 4.3.10 c – d**) o CPC mostra a banda, com orientação noroeste/sudeste, de anomalias positivas de precipitação se alongando desde o sul-sudeste até o sul do norte do Brasil. Na cidade de São Paulo é observado anomalia de precipitação variando entre 2 até 3,5 mm/dia. Da mesma maneira, o RegCM4 apresenta o mesmo alongamento da banda noroeste/sudeste precipitação, mas com maior anomalia de chuva no litoral de São Paulo. Isto indica que RegCM4 continua superestimando as anomalias de precipitação nessa região em comparação com o inverno (figura 4.3.1 b). Ao norte e ao sul da FF, CPC e RegCM4 posicionam áreas de anomalias negativas de precipitação que avançam para norte mas mantêm o mesmo padrão do dia anterior.

Após a passagem da FF sobre a cidade de São Paulo (**figuras 4.3.10 e – f**) a banda de anomalia positiva de precipitação perde configuração no CPC, mostrando dois núcleos distintos um sobre o litoral do sudeste e outro no norte do Brasil. O RegCM4 simula uma banda mais contínua no espaço do que o CPC com anomalia positiva de precipitação, desde litoral o sudeste do até o norte do Brasil e partes do Peru, Equador e Colômbia. A área de anomalias negativas de precipitação na pós-frontal atinge o centro do Paraguai e parte do sul do Brasil no CPC concordando com o RegCM4.

Temperatura

Desde um dia antes até um dia depois, as anomalias de temperatura positivas à norte e negativas ao sul da ERA-Interim e simuladas pelo RegCM4 mostram padrão espacial similar como indica a Figura 4.3.11. Destaca-se que as anomalias positivas mais fortes na ERA-Interim situam-se no leste do sudeste do Brasil (figuras 4.3.11 a-c-e) o que também é simulado pelo RegCM4 (figura 4.3.11 b-d-f), mas com o RegCM4 simulando estas anomalias quentes com mais intensidade do que a ERA-Interim. Também as anomalias negativas de temperatura ao sul são mais intensas no RegCM4 do que na ERA-Interim.

Nota-se ainda que um dia antes da FF atingir SP (figuras 4.3.11 a - b) o RegCM4 simula a interface entre anomalias quente e fria mais ao norte do que mostra a ERA-Interim. Este adiantamento para norte da interface ar quente/frio ocorre também no dia da FF sobre SP

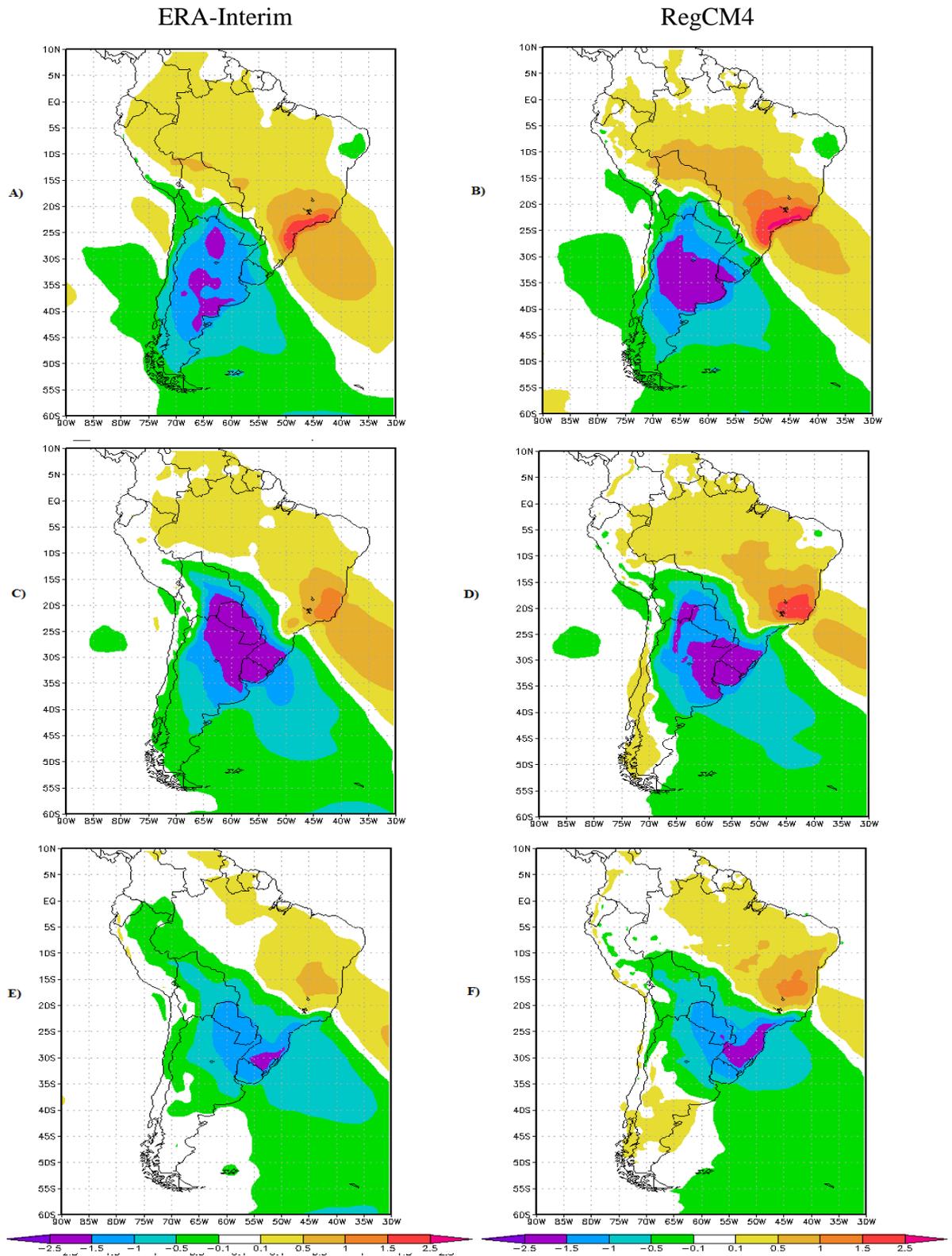


Figura 4.3.11. Idem à Figura 4.3.2, mas para primavera.

(figuras 4.3.11 c – d). Neste dia as anomalias positivas de temperatura ar perdem intensidade tanto na ERA- Interim como no RegCM4, enquanto as anomalias negativas se intensificam apenas na ERA-Interim.

Pressão

A Figura 4.3.12 apresenta a anomalia de pressão desde um dia antes até um dia depois da passagem da FF em SP. Nota-se predomínio de anomalias ciclônicas sobre o centro-sudeste do Brasil e oceano adjacente acompanhadas ao sul por anomalias anticiclônicas tanto na ERA-Interim como no RegCM4. Como ocorreu também no inverno, na primavera o RegCM4 simula anomalia ciclônica sobre o oceano mais intensa do que a ERA-Interim tanto um dia antes como no dia da FF em SP (figuras 4.3.12a-d).

No dia anterior à FF em SP, o centro do ciclone na ERA-Interim tem posição semelhante à simulada pelo RegCM4. As anomalias ciclônicas sobre o continente neste dia são mais fracas no RegCM4 do que na ERA-Interim.

No dia da FF sobre SP (figura 4.3.12 c – d) as anomalias negativas de pressão atuam no sudeste do Brasil e oceano adjacente tanto na ERA-Interim como no RegCM4. Comparando com o dia anterior, as anomalias positivas se intensificam sobre o norte da Argentina na ERA-Interim e RegCM4, mas são mais fracas no RegCM4.

O núcleo do ciclone extratropical ultrapassa os 30°W , tanto na ERA-Interim como no RegCM4 um dia depois da FF sobre SP (figura 4.3.12 e – f), com anomalias negativas sobre Minas Gerais, leste do nordeste do Brasil e oceano. As anomalias positivas de pressão continuam sendo subestimadas pelo RegCM4.

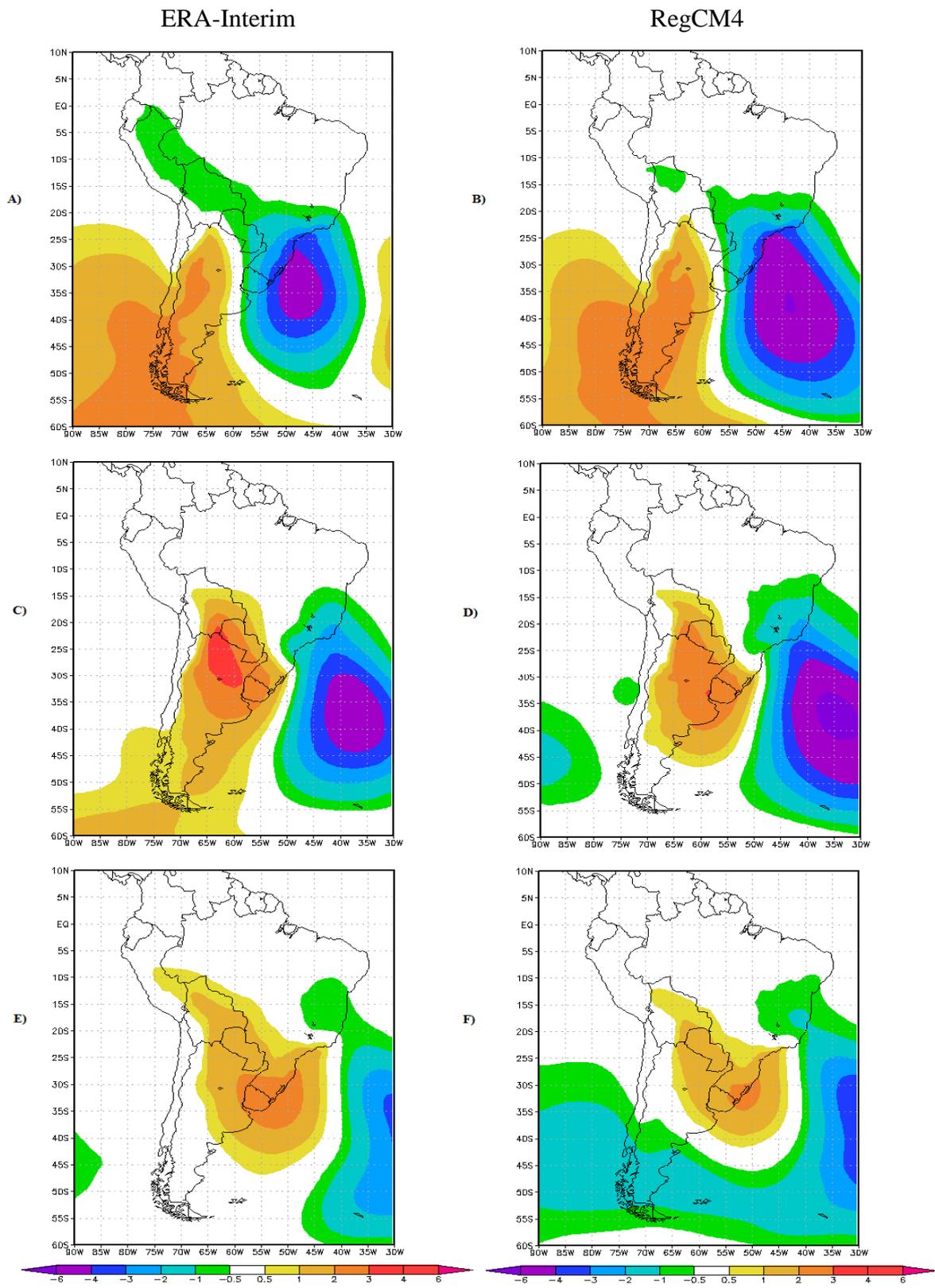


Figura 4.3.12. Idem à Figura 4.3.3, mas para a primavera.

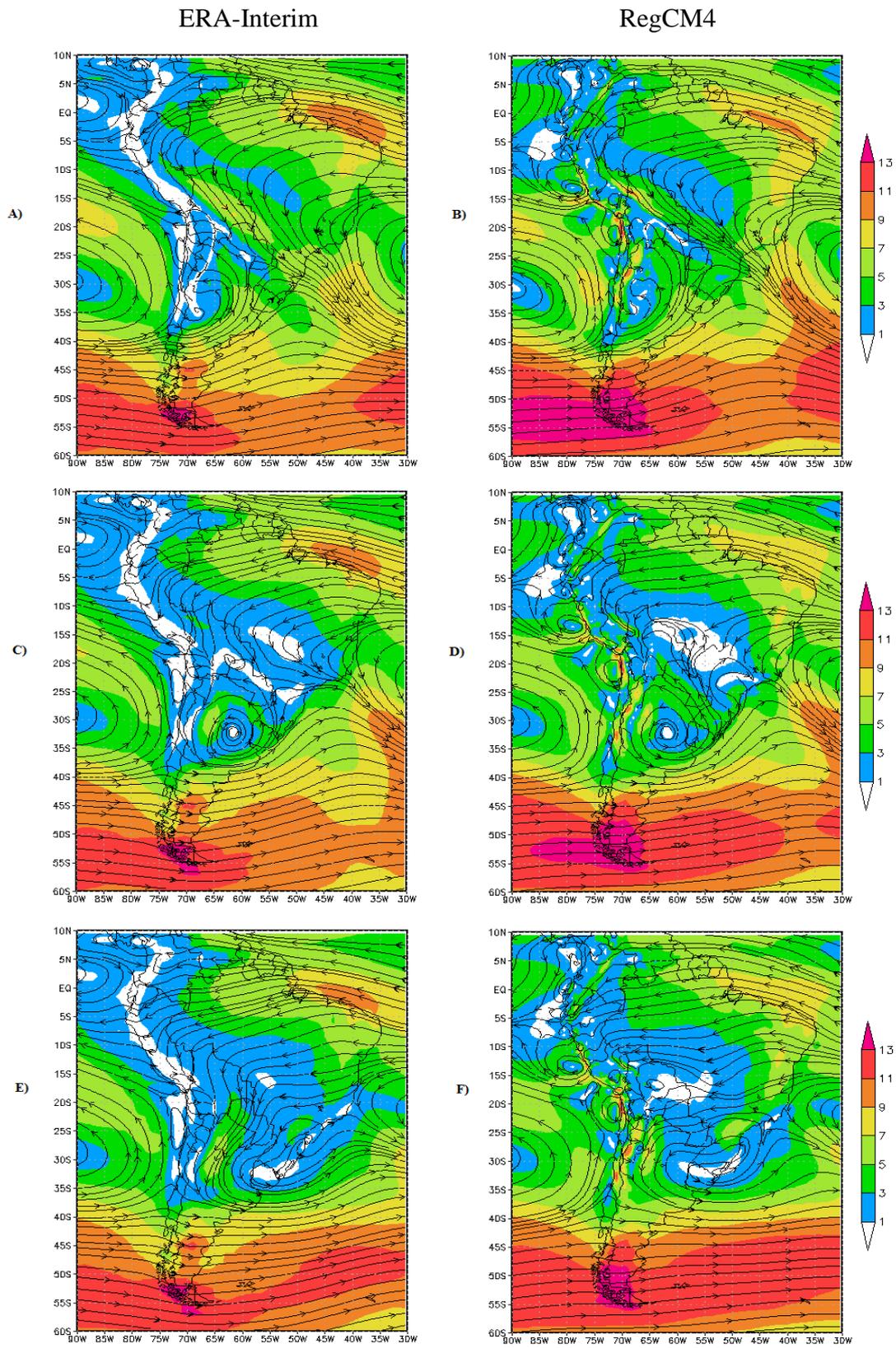


Figura 4.3.13. Idem à Figura 4.3.4, mas para primavera.

Vento em 850 hPa

Na região do JBN em 850 hPa, situado sobre o centro/sudeste do Brasil, a magnitude dos ventos não ultrapassa os 7 m/s na ERA-Interim um dia antes da FF sobre SP (figura 4.3.13 a). Comparando com dois dias antes (anexo 6) nota-se um enfraquecimento do JBN, que chegou a apresentar o limiar de 11 m/s. No RegCM4 este mesmo padrão é simulado, ou seja, o JBN enfraquece um dia antes da FF em SP. Ainda nas figuras 4.3.13 a – b, na ERA-Interim e RegCM4 o cavado associado a FF situa-se sobre o Uruguai e Rio Grande do Sul. Uma região de giro anticiclônico sobre o oeste da Argentina observada na ERA-Interim também é simulada pelo RegCM4. De acordo com os campos de precipitação, temperatura do ar em superfície, pressão de superfície e vento em baixos níveis a FF na ERA-Interim situa-se em Santa Catarina, Paraná, Mato Grosso do Sul, Bolívia e Acre.

No dia da FF sobre SP (figura 4.3.13 c – d) o JBN perde configuração tanto na ERA-Interim como no RegCM4 e a magnitude dos ventos nessa região não ultrapassa o limiar dos 3 m/s. O cavado avança para leste, atuando sobre o oceano Atlântico Sul adjacente nos campos observado e simulado. A região de confluência dos ventos situa-se sobre São Paulo e Rio de Janeiro na ERA-Interim e sobre o Rio de Janeiro no RegCM4.

Um dia depois da FF sobre SP (figura 4.3.13 e – f) a região de confluência dos ventos associada a FF não atua mais sobre o continente nos campos observado e simulado, a alta pós-frontal avança para leste e seu centro fica posicionado sobre o Uruguai e Rio Grande do Sul na ERA-Interim e no RegCM4.

Anomalias Ventos em 850 hPa

A figura 4.3.14 a – b mostra que na ERA-Interim o centro do ciclone extratropical fica posicionado sobre o oceano Atlântico Sul ($\sim 50^{\circ}\text{W}$ e $\sim 38^{\circ}\text{S}$), enquanto que no RegCM4 este ciclone é simulado mais a leste e com superestimativa na magnitude do vento sobre a região de atuação do mesmo. Na ERA-Interim é observada sobre o oceano Pacífico Sul uma região de giro anticiclônico, já no RegCM4 é simulado o centro do anticiclone próximo a costa no sul do Chile.

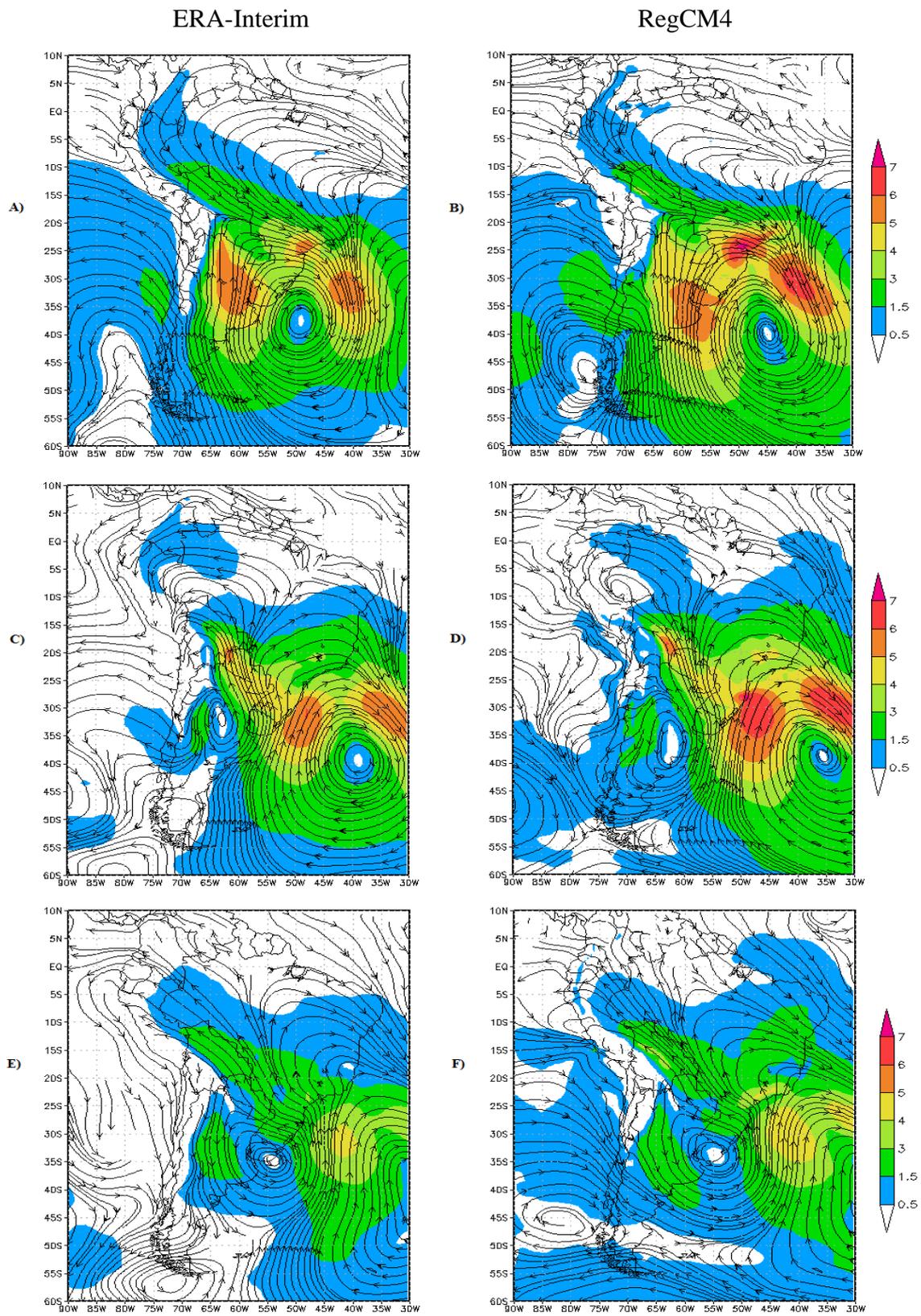


Figura 4.3.14. Idem à Figura 4.3.5, mas para a primavera.

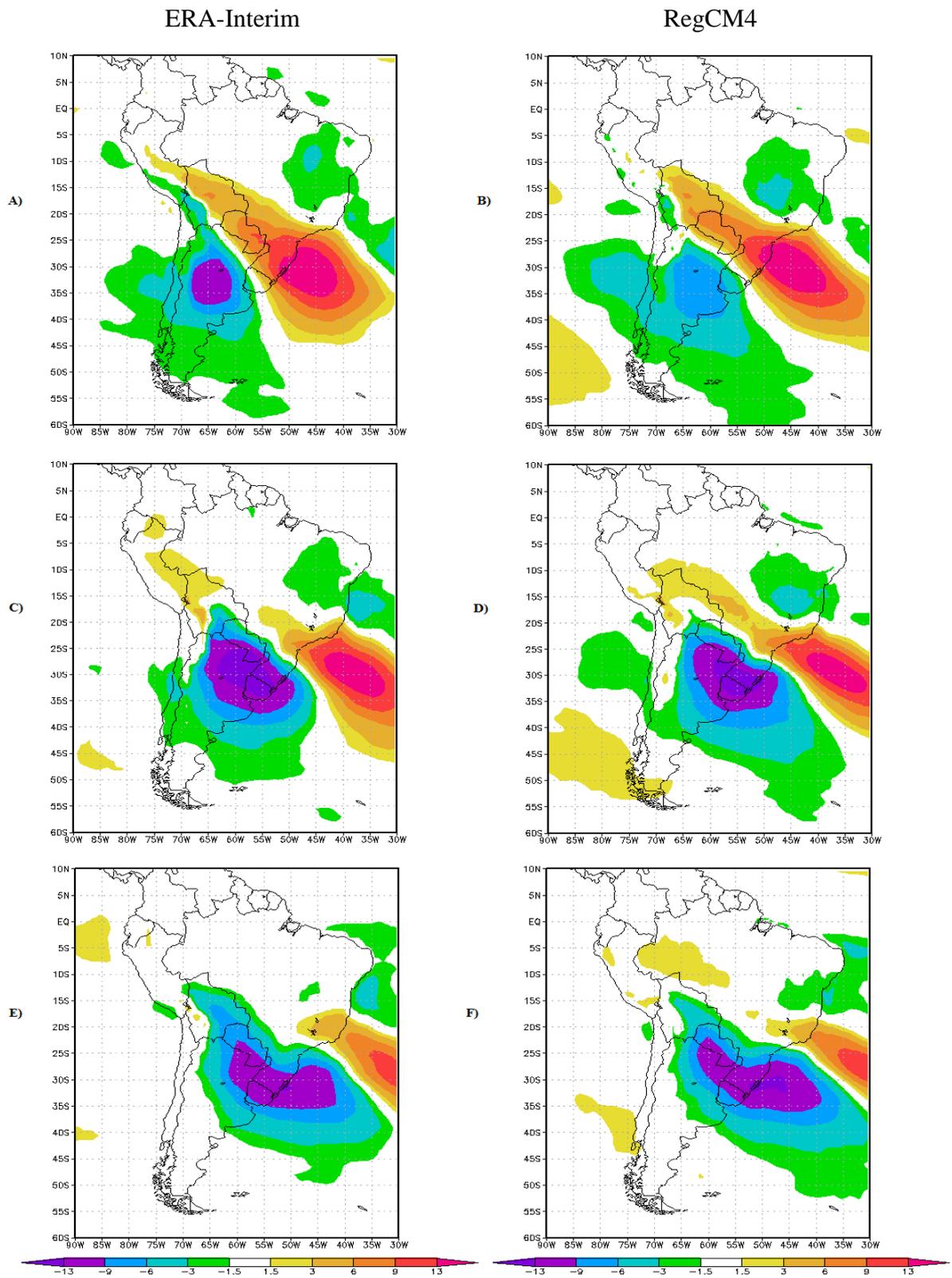


Figura 4.3.15. Idem à Figura 4.3.6, mas para primavera.

No dia da FF sobre SP (figura 4.3.14 c – d) as anomalias de magnitude do vento se mantem intensas tanto na ERA-Interim quanto no RegCM4. O anticiclone atua sobre uma área maior no RegCM4 no leste da Argentina, enquanto na ERA-Interim o mesmo atua sobre o nordeste da Argentina.

Anomalias de umidade específica em 850 hPa

No dia pré-frontal, a figura 4.3.15a mostra que anomalias positivas de umidade específica coincidem com as anomalias positivas de precipitação na ERA-Interim (figura 4.3.10 a), com anomalias positivas mais intensas situadas no sul do Brasil, na qual o RegCM4 simula esta característica. As anomalias negativas de umidade específica sobre o centro da Argentina associadas ao anticiclone, centrado no Oceano Pacífico Sul (figura 4.3.12 a-b), são mais intensas na ERA-Interim do que no RegCM4.

No dia da FF sobre SP (figura 4.3.15 c – d) as anomalias negativas de umidade intensificam-se tanto na ERA-Interim quanto no RegCM4, nas quais estas anomalias chegam a mostrar valores inferiores a -13 g/kg nos campos simulado e observado. O RegCM4 superestima as anomalias positivas sobre o continente (desde 1,5 até 9 g/kg), enquanto que na ERA-Interim estas anomalias atuam principalmente sobre o sudeste do Brasil.

Um dia depois da FF sobre SP é observado na ERA-Interim e RegCM4 que a atuação da FF sobre o Brasil se restringe aos Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo.

Vento em 200 hPa

Nas figuras 4.3.16 a – f o RegCM4 simula padrão semelhante ao da ERA-Interim, ou seja, posiciona o jato e o cavado de onda longa corretamente. No entanto, subestima a intensidade do núcleo de jato no dia e um dia depois da FF.

Anomalias de vento em 500 hPa

Um dia antes da FF sobre SP (figura 4.3.17 a – b) o ciclone extratropical situa-se sobre o Oceano Atlântico Sul, próximo à costa leste da Argentina, já no RegCM4 este ciclone posiciona-se mais a leste ($\sim 50^{\circ}\text{W}$ e $\sim 40^{\circ}\text{S}$). As anomalias de magnitude do vento simuladas

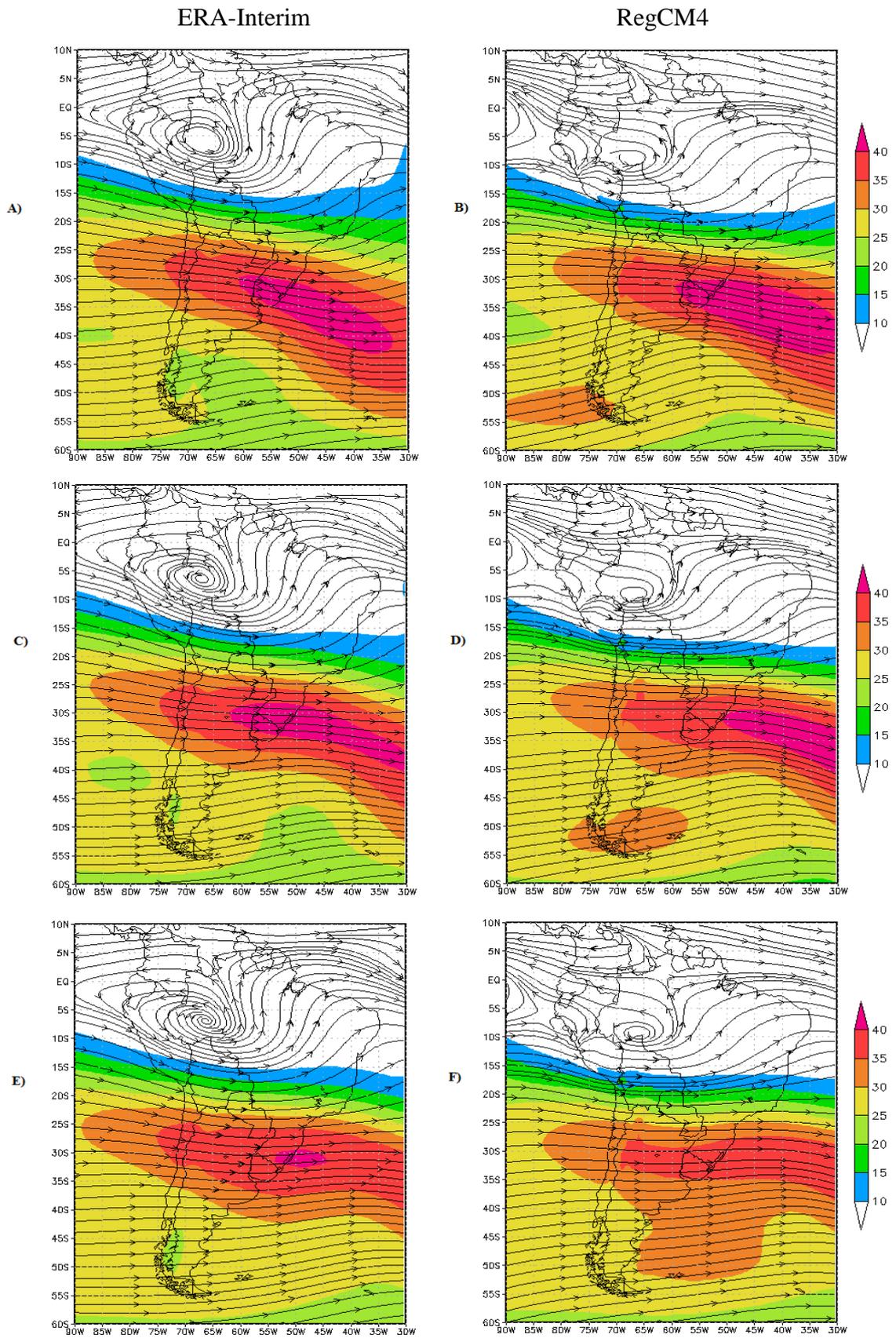


Figura 4.3.16. Idem à Figura 4.3.7, mas para primavera.

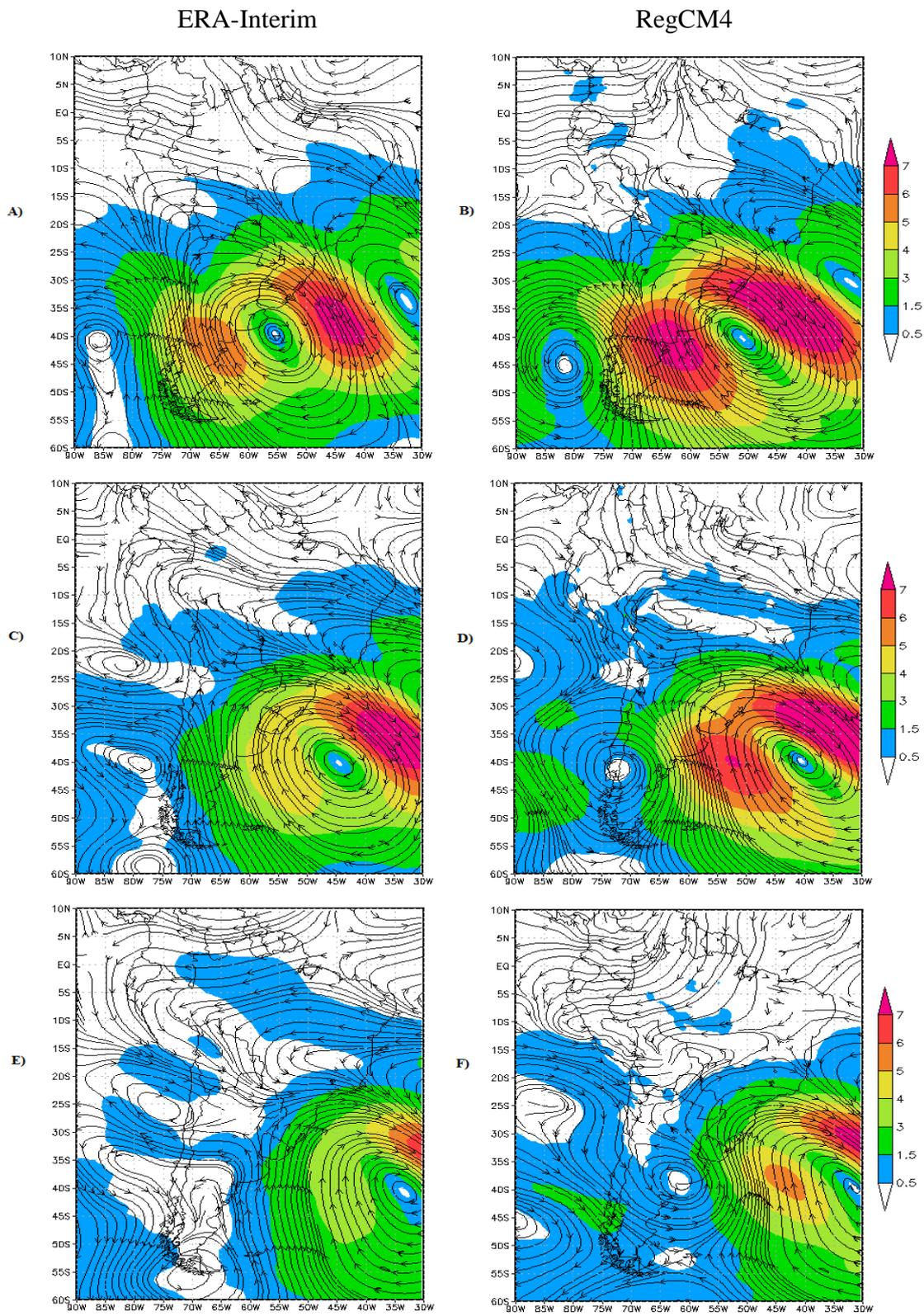


Figura 4.3.17. Idem à Figura 4.3.8, mas para a primavera.

são mais intensas (desde 5 até valores superiores a 7 m/s) do que na ERA-Interim (somente ultrapassam o limiar dos 7 m/s a leste do centro do ciclone extratropical).

No dia da FF sobre SP (figura 4.3.17 c – d) o ciclone avança para leste na ERA-Interim e RegCM4, mas na simulação continua avançando mais rapidamente e as anomalias de magnitude do vento são mais intensas do que na ERA-Interim. Estas características persistem até um dia após a FF passar por SP (figuras 4.3.17 e-f).

Síntese sobre a atuação da FF em SP – Primavera

Dois dias antes da FF sobre SP as anomalias positivas de precipitação estão posicionadas sobre o nordeste da Argentina, Uruguai, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraguai na ERAInterim (Anexo 7), este mesmo padrão é simulado pelo RegCM4. A figura 4.3.18 (a) mostra que o RegCM4 apresenta bias seco no sul e centro do Brasil e regiões mais úmidas sobre o extremo norte do Brasil e no litoral do sul/sudeste do Brasil. A região da Bacia do Prata predomina bias seco no sul-leste e úmido no oeste (Paraguai, norte da Argentina, sudoeste da Bolívia).

Um dia antes da FF sobre SP as anomalias de precipitação não avançam muito para norte, mas se intensificam, chegando a valores superiores a 6 mm/dia, tanto no CPC quanto no RegCM4. Este padrão de anomalias positivas de precipitação mais intensas tem suporte na atuação do JBN no dia anterior (Anexo 6), já no campo médio de vento em 850 hPa um dia antes (figuras 4.3.16 a – b) diminui a intensidade da magnitude do vento nos dois campos. Ainda um dia antes da FF sobre SP, as anomalias negativas de pressão de superfície (figura 4.3.12 a – b) enfraquecem sobre o continente, no entanto sobre o oceano Atlântico Sul, onde situa-se o ciclone extratropical as anomalias negativas continuam intensas. No dia pré-frontal, a chuva (figura 4.3.18 b) apresenta padrão similar ao dia anterior, no entanto nota-se a intensificação do bias seco no RegCM4 sobre o sudeste da Bacia do Prata. No oeste da Bacia do Prata e no litoral norte do Rio Grande do Sul e Santa Catarina o bias úmido se intensifica (atingindo valores superiores a 7 mm/dia) comparado com o dia anterior.

No dia da FF sobre SP (figura 4.3.12 c – d) as anomalias positivas de precipitação perdem intensidade na ERA-Interim e RegCM4, no entanto nos dois campos estas anomalias se alongam até o norte da

Bolívia, passando pelo Brasil central. Esta configuração concorda com as anomalias negativas de precipitação (figuras 4.3.11 c – d) e de umidade específica (figuras 4.3.15 c – d) nas regiões de atuação do anticiclone. A atuação deste anticiclone, ao sul da região com precipitação, contribui para a advecção de ar mais seco de regiões polares e também para a diminuição da umidade. No dia da passagem da FF sobre SP (figura 4.3.18 c) o padrão espacial de super/subestimativa de chuva pelo RegCM4 sofre poucas alterações em relação ao dia anterior. No entanto com o avanço da FF para norte, o núcleo com maior superestimativa (superior a 7 mm/dia) aumenta de área e se posiciona sobre o litoral desde o Paraná até Rio de Janeiro. Já o bias úmido sobre o norte do Paraguai, norte da Argentina, centro-sul da Bolívia e Peru permanece estacionário. A área de subestimativa sobre o sul do Brasil, nordeste da Argentina e Uruguai perde intensidade comparada ao dia anterior a passagem da FF sobre São Paulo.

Um dia depois da FF a banda de anomalias de precipitação (figura 4.3.11 e – f) se desconfigura nos dois campos em resposta aos padrões observados em baixos, médios e altos níveis do dia anterior. Com o avanço do ciclone extratropical e anticiclone pós-frontal para leste (figura 4.3.12 e – f) é esperado que a incursão de ar mais denso e frio (Anexo2) de latitudes mais altas continue sobre a região onde as anomalias de precipitação atuavam, contribuindo para que a precipitação diminua drasticamente sobre o continente (Anexo 8).

Na figura 4.3.18 d, de um dia depois da FF sobre SP, o RegCM4 mostra um bias úmido que se estende do litoral das regiões sul e sudeste do Brasil, passando pelo centro-oeste, até o Peru. O bias seco, presente na região sudeste a América do Sul nos dias anteriores, permanece posicionado nesta região, no entanto a intensidade diminuiu comparado ao dia da passagem da FF em SP.

Para dois dias depois da passagem da FF por SP (figura 4.3.18 e) o padrão do dia anterior permanece praticamente o mesmo, onde o RegCM4 continua mostrando bias seco sobre o nordeste da Argentina, Uruguai e sul do Brasil e superestimando sobre o sudeste e centro-oeste do Brasil.

De maneira geral, na passagem das FF sobre SP na primavera (figura 4.3.18 a – e) o RegCM4 subestima a precipitação no leste e sul da bacia do Prata, enquanto que no oeste os resultados mostram que o modelo superestima a precipitação. O bias seco observado no sudoeste e sul da região Norte, região Centro-Oeste e Nordeste do Brasil permaneceu estacionário em todos os dias de atuação da FF.

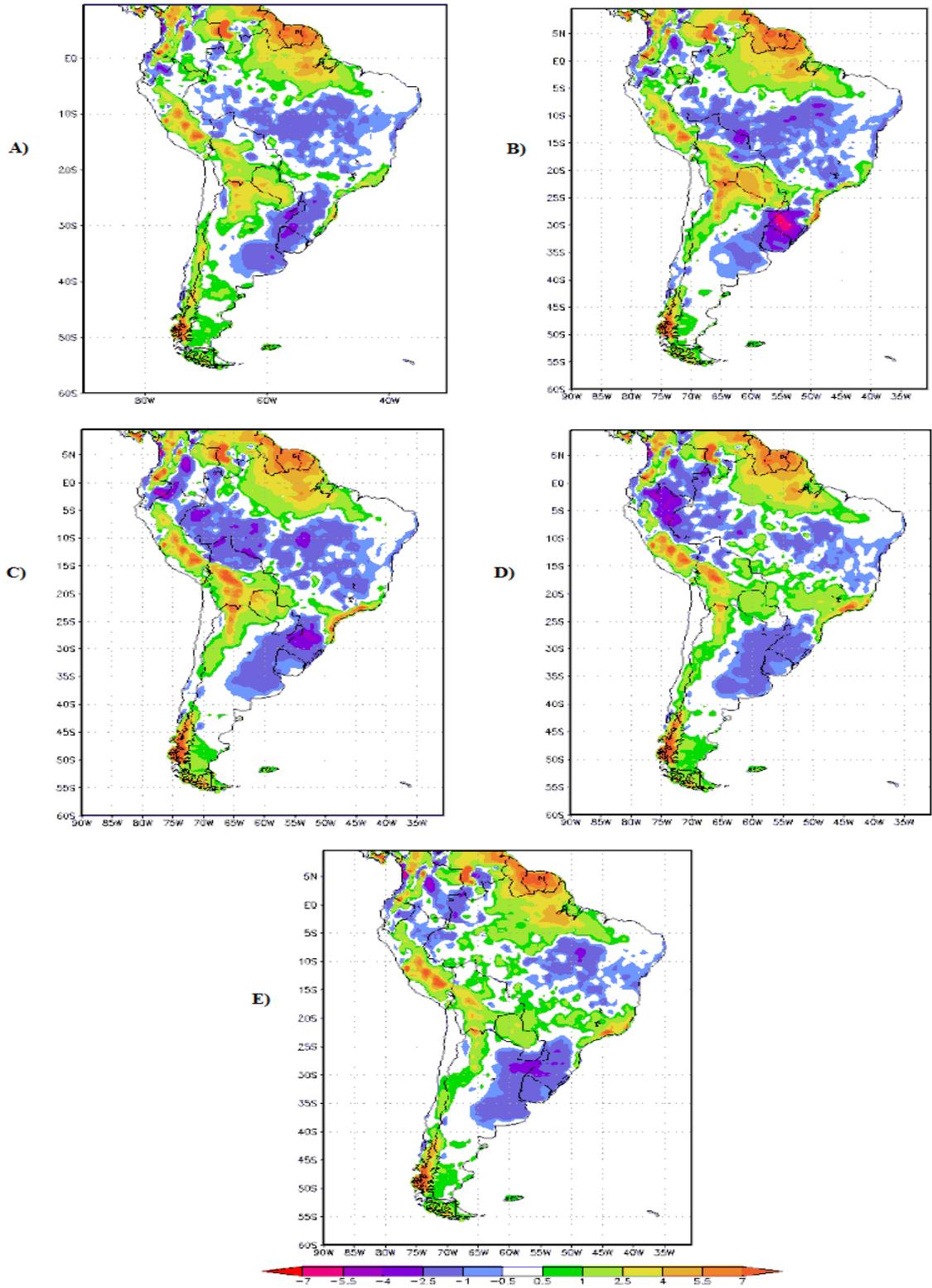


Figura 4.3.18. Idem à Figura 4.3.9, mas para a primavera.

5. Conclusões e trabalhos futuros

Este trabalho avaliou o desempenho do modelo RegCM4 em simular a climatologia das condições sinóticas e termodinâmicas associadas a passagem de FF. As simulações utilizadas para estudar o clima presente, para um período de 30 anos (1979-2009), foram forçadas nas bordas com dados de reanálise da ERA-Interim. Os resultados destas simulações foram comparados com dados de reanálise da ERA-Interim, CRU, CMAP e CPC.

As comparações entre análise e modelo, através dos campos espaciais sazonais, foram feitas utilizando precipitação e temperatura do CMAP e CRU, respectivamente. Os resultados indicam que o RegCM4 simula o posicionamento da ZCIT similar ao do CMAP, no entanto subestima sistematicamente o volume de chuva nas regiões de atuação da mesma, exceto na costa norte do Brasil no verão. Nesta estação do ano, o posicionamento das ZCAS simulada também é semelhante ao CMAP, embora a área com chuva mais intensa no seu ramo oceânico não esteja bem definida. Comparado ao CMAP, tanto no oceano quanto no continente o RegCM4 subestima a taxa de precipitação nestas regiões de atuação da ZCAS.

Os campos espaciais de temperatura mostram que, de modo geral, a simulação é sistematicamente mais fria sobre a América do Sul, com algumas exceções que dependem da estação do ano, como por exemplo, o bias quente sobre o nordeste da Argentina e Uruguai no verão e na primavera. Esta região e estações do ano coincidem com as de subestimativas de precipitação pelo RegCM4. A partir disso, é possível que esta subestimativa de chuva deva-se à menor cobertura de nuvens, com conseqüente aumento da temperatura e bias quente no RegCM4. Mas este processo não é notado em outras regiões, como por exemplo, sobre o centro-oeste do Brasil no verão onde se nota ao mesmo tempo subestimativa de chuva e temperatura.

As séries temporais de precipitação em áreas específicas (LPB, SDE e SDAR) indica que apesar de apresentar valores de bias elevados no inverno e na primavera na Bacia do Prata, e correlação temporal baixa no verão na LPB e no outono na SDE, as simulações do RegCM4 representam a climatologia observada na América do Sul. A forte subestimativa de chuva durante o inverno e primavera sugere a necessidade de entender como o RegCM4 simula as frentes frias (FF) na maior parte da Bacia do Prata, já que possuem forte controle na climatologia desta área.

Utilizando critério objetivo de identificação de FF, o número total de passagens de FF sobre São Paulo e Rio Grande é simulado pelo RegCM4, já que os desvios relativos totais não

ultrapassam de 6% nas duas regiões. Os maiores erros ocorrem no verão, em que o critério encontra um número de passagens de FF no RegCM4 relativamente menor, fornecendo subestimativa de ~-20% no IAG-USP. No inverno o número de passagens de FF identificado na FURG-RS apresenta desvio relativo de ~-1%, mostrando que o RegCM4 possui um erro muito pequeno para a frequência de FF.

No IAG-USP a superestimava do número de FF é mais elevado (~7%) do que na FURG-RS no inverno, já no verão no IAG-USP a subestimativa segue elevada (~-20%). Na primavera o RegCM4 continua representativo da climatologia de passagens de FF sobre IAG-USP, em que o desvio relativo de -3% é baixo. Em termos de evolução temporal das variáveis no período de passagem da FF (desde dois dias antes até dois dias depois).

As séries temporais mostram que, tanto na primavera como no inverno, as variações diárias (desde dois dias antes até dois dias depois) associadas à passagem das FF observadas no IAG-USP são corretamente simuladas pelo RegCM4. A partir destes resultados, verifica-se que na primavera o vento meridional é mais intenso e a pressão de superfície é mais baixa, isto indica que as FF que atuam sobre SP são mais intensas levando a uma maior taxa precipitação comparado com o inverno.

A variação temporal das variáveis meteorológicas simuladas pelo RegCM4 mostra a primavera com vento meridional mais intenso e a pressão de superfície mais baixa em comparação com o inverno nos dias de atuação da FF sobre RG. No Rio Grande do Sul a climatologia da precipitação é praticamente constante em todo o ano. Contudo, o critério aplicado representa a climatologia de FF sobre as duas cidades onde as composições evidenciam que o RegCM4 simula os campos espaciais meteorológicos observados na atuação das FF.

Nas anomalias, um dia antes da FF atingir SP as anomalias positivas de precipitação são mais intensas no RegCM4 do que na ERA-Interim. Este padrão de anomalias mais intensas está associado a dinâmica, sobretudo ao JBN em 850 hPa que atua intensamente principalmente na ERA-Interim dois dias antes da FF sobre SP.

A atuação do JBN em 850 hPa tem papel fundamental no transporte de umidade para a intensificação da precipitação na região Sul do Brasil. Sua atuação é maior principalmente quando a FF está sobre esta região, resultando em maior taxa de precipitação nos próximos dias de atuação da FF. No inverno este jato é mais intenso em comparação com a primavera no critério aplicado tanto para RG como SP.

Na pressão de superfície as anomalias negativas são mais intensas sobre o continente na ERA-Interim em comparação com o RegCM4, mostrando assim que o abaixamento da

pressão na ERA-Interim contribui para as anomalias positivas de precipitação mais intensas quando comparadas com o RegCM4. Por outro lado, o RegCM4 desloca as anomalias negativas de pressão para o Oceano Atlântico Sul, ou seja, para próximo da parte central do ciclone extratropical associado à FF. Isto ocorre no RegCM4 tanto no inverno como na primavera para SP e RG. Apesar da porção central do ciclone simulado ser mais intensa isto não se reflete em um maior volume de precipitação sobre o continente como mostra as anomalias de precipitação observada.

Para o critério aplicado sobre RG as anomalias de umidade específica em 850 hPa mostram que tanto no inverno como na primavera as anomalias positivas são mais intensas na ERA-Interim, este padrão se reflete nas anomalias de precipitação, na qual é observado o CPC com anomalias positivas de precipitação mais intensas em comparação com o RegCM4. Por outro lado, para o critério aplicado para SP mostra que as anomalias positivas de umidade específica são simuladas com a mesma intensidade que na ERA-Interim, isto tem impacto nas anomalias de precipitação, na qual as intensidades das anomalias positivas de precipitação são simuladas com intensidades similares pelo RegCM4 para SP tanto na primavera como no inverno. Uma hipótese para essa melhor representação da precipitação simulada pelo RegCM4 para SP seja por conta do período maior (1979 - 2009) de dados comparados. Comparativamente, nota-se que o RegCM4 tende a deslocar para nordeste o padrão espacial de anomalias associadas às FF com velocidade ligeiramente maior que na Era-Interim.

Em altos e médios níveis para as FF em RG e SP o RegCM4 superestima a intensidade do vento na região de jato no inverno e primavera. O posicionamento da baixa pressão nas anomalias de vento nestes dois níveis comparado com a pressão em superfície indica que o sistema encontra-se baroclínico em praticamente todo o período de atuação das FF sobre as duas cidades. De maneira geral os campos meteorológicos simulados pelo RegCM4 e a dinâmica associada a passagem do sistema também estão de acordo com as análises.

O campo de diferença de precipitação entre RegCM4 e análise mostra que em SP e RG uma região de subestimativa permanece posicionada, em praticamente todos os dias (desde dois dias antes até dois dias depois), sobre o nordeste da Argentina, Uruguai e sul do Brasil. Este padrão mostra que o RegCM4 subestima a precipitação sobre o centro-leste da Bacia do Prata durante as passagens das FF e isto explica, pelo menos em parte, a subestimativa da chuva sazonal pelo RegCM4 nesta região. As parametrizações de precipitação (convectiva e de grande escala) utilizadas na simulação podem também contribuir para este erro e seria um ponto a ser melhorado no modelo.

Uma questão a ser abordada em trabalhos futuros seria investigar o perfil vertical de

algumas variáveis meteorológicas durante a atuação das FF, como por exemplo o perfil vertical de temperatura, umidade específica, altura geopotencial e vento. Realizar novas simulações com outras parametrizações de precipitação pode também contribuir para verificar se esta mudança melhora ou não a simulação da precipitação durante a atuação de FF.

Investigar mais a fundo quais mecanismos propiciam o aumento de precipitação sobre o Uruguai, Paraguai, Nordeste da Argentina e Rio Grande do Sul, quando a FF esta sobre RG. A distribuição e intensidade da precipitação nesta região não é simulada corretamente pelo RegCM4, desta maneira estudos mais aprofundados se fazem necessários para identificar esta fonte de erro observada neste trabalho.

As FF avançam mais rapidamente no RegCM4 em comparação com a ERA-Interim, e portanto uma investigação sobre por qual motivo isso ocorre nas simulações é um ponto para trabalhos futuros.

O JBN é uma importante fonte de umidade para as áreas de precipitação na região sudeste da AS devido as FF, contudo é simulado menos intenso a leste dos Andes tanto em RG como SP. Melhores simulações de vento e umidade específica em 850 hPa aumentariam a capacidade do modelo climático em simular a precipitação no sudeste da AS na presença de FF.

6 Referencias

- Andrade, K. M. Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul. 2005. 185f. (INPE-14056-TDI-1067). Dissertação (Mestrado em Meteorologia).
- Anthes, R.A., 1977: A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model. *Mon. Wea. Rev.*, 117 1423-1438.
- Bjerknes, J., 1919: On the Structure of Moving Cyclones. *Geof. Publ.*, 1 (2), 1-8.
- Bjerknes, J.; H. Solberg, 1922: Life Cycle of Cyclones and the Polar Front Theory of Atmospheric Circulation. *Geof. Publ.*, 3 (1), 3-18.
- Brohan, P.; Kennedy, J. J.; Harris, I.; Tett, B. F. S.; Jones, D. P. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850. *JGR*, doi 10.1029-2005JD006548.
- Chou, S. C. Tanajura, C. A. S.; Xue, Y.; Nobre, C. A. 2002: Validation of the Research, v. 107, n. D20, p. doi: 10.1029-2000JD000270, Oct. 2002. 34, 37.
- CUADRA, Santiago Vianna; da Rocha, Rosmeri Porfírio. Simulação Numérica do Clima de Verão Sobre o Sudeste do Brasil e sua Variabilidade. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 21, p. 271-282, 2006.
- CUADRA, Santiago Vianna; da Rocha, Rosmeri Porfírio. Sensitivity of regional climatic simulation over Southeastern South America to SST specification during austral summer. *International Journal of Climatology JCR*, v. 27, p. 793-804, 2007.
- DAMETTO, Guilherme ; da Rocha, Rosmeri P. Características climáticas dos sistemas frontais na cidade de São Paulo. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006, Florianópolis. *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia*. Rio de Janeiro: SBMet, 2006. v. 1. p. 1-6.
- Da Rocha, Rosmeri P.; Morales, Carlos A.; Cuadra, Santiago V., Ambrizzi, Tércio. Precipitation diurnal cycle and summer climatology assessment over South America: An evaluation of Regional Climate Model version 3 simulations. *Journal of Geophysical Research JCR*, v. 114, p. D10108, 2009.
- Da Rocha, Rosmeri P.; Cuadra, S. V.; Reboita, M. S.; Kruger, L. F.; Ambrizzi, T., Krusche, N. Effects of RegCM3 parameterizations on simulated rainy season over South America. *Climate Research JCR*, v. 52, p. 253-265, 2012.
- Da Silva, M. C. L., R. P. Da Rocha, R. Y. Ynoue, 2010. Climatic simulations of the eastern Andes low-level jet and its dependency on convective parameterizations. *Meteorology and atmospheric physics*, 108, 9-27.

- Dickinson, R.E., R.M., Errico, F, Giorgi, and G.T. Bates, 1989: A regional climate model for the western United States. *Climatic Change*, 15, 383-422.
- Emanuel KA, Zivkovic-Rothman M (1999) Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models. *J Atmos Sci* 56:1766-1782.
- Ferreira, A. S.; Gan, A. M. Intraseasonal variability in the South American monsoon system. *Atmos. Sci. Let.* 12: 253-260 (2011).
- Gan, M. A.; B. V., Rao, 1991: Surface cyclogenesis over South America. *Mon. Wea. Rev.*, 119, 293-302.
- Giorgi, F., 1990: On the simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *Journal of Climate.*, 3, 941-963. Giorgi, F., M.R. Marinucci, and G. Visconti, 1990: Use of a limited area model nested in a general circulation model for regional climate simulation over Europe. *Journal of Geophysical Research*, 95, 18,413-18,431.
- Giorgi, F., and G. T. Bates, 1989: On the climatological skill of a regional model over complex terrain. *Monthly Weather Review*, 117; 2325-2337.
- Giorgi, F. and L. O. Mearns, 1991: Approaches to the simulation of regional climate change: a review. *Rev. Geophys.*, 29, 191-216.
- 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, Francisco R, Pal JS (2003) Effects of a sub-grid scale topography and landuse scheme on surface climate and hydrology. I. Effects of temperature and water vapor disaggregation. *J Hydrometeorol* 4:317-333.
- Giorgi F, Jones C, Asrar G (2009) Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *WMO Bull* 58:175-183.
- Giorgi F, Coppola E, Solmon F, Mariotti L, Sylla B M, Bi X, Elguindi N, Diro T G, Nair V, Giuliani G, Turuncoglu U U, Cozzini S, Guttler I, O'Brien A T, Tawfik B A, Shalaby A, Zakey S A, Steiner L A, Stordal F, Sloan C L, Brankovic C. RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Clim Res* vol. 52: 7-29, 2012.
- Grell, G. A., 1993: Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Mon. Wea. Rev.* 121, 764-787.
- Grell, G. A., J. Dudhia, and D. R. Stauffer. 1994: A Description of the fifth generation Penn State/MCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Technical Note, CAR/TN- 398+STR,

121 pp.

- Holtstag, A. A. M., E. I. F. de Bruijn. and H. L. Pan. 1990: A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting. *Mon. Wea. Re.*, US, 1561-1575.
- Horel, J. D.; Pechmann, J. B.; Hahmann, A. N.; Gleiser, J. E. 1994: Simulations of the Amazon basin circulation with a regional model. *Journal of Climate*, v.7, n. 1, p. 56-71, 1994.
- Hoskins, B. J.; K. I. Hodges, 2005: A New on Southern Hemisphere Storm Tracks. *J. Climate*, 18, 4108-4129.
- JUSTI DA SILVA, M. G. A.; SILVA DIAS, M. A. F.; A Estatística dos Transientes na América do Sul.. In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2000. Anais em CDROM, 2000., 2000.
- JUSTI DA SILVA, M. G. A.; SILVA DIAS, M. A. F. A frequência de fenômenos meteorológicos na América do Sul: uma climatologia. In: XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2002, Foz do iguaçu. Anais do Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2002.
- Kiehl, J. T.; Hack, J. J.; Bonan, G. B.; Boville, B. A.; Briegleb, B. P.; Williamson, D. L.; Rasch, P. J. .Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3). NCAR-TN-42+STR – NCAR TECHNICAL NOTE. September 1996.
- KODAMA, Y.-M. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ), Part I: Characteristics of subtropical frontal zones. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, v. 70, p. 813-835, 1992.
- Kousky, V.E.; Elias, M. *Meteorologia Sinótica. Parte I.* São José dos Campos, INPE, 1982, 107 p. (INPE-2605-MD-021).
- Kruger, L. F.. *Projeções Climáticas das Ciclogêneses no Atlântico Sul utilizando os Modelos HadAM3 e RegCM3.* 2009. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo.
- Kruger, L.F.; Da Rocha, Rosmeri Porfírio; Reboita, Michelle Simões; Ambrizzi, T. . RegCM3 nested in HadAM3 scenarios A2 and B2: projected changes in extratropical cyclogenesis, temperature and precipitation over the South Atlantic Ocean. *Climatic Change JCR*, v. 113, p. 599-621, 2012.
- Llopart, Marta Pereira. *Impacto da representação solo-planta-atmosfera em simulações climáticas regionais para a América do Sul.* 2014. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo.
- Machado, R. D. ; Da Rocha, R. P. . Evaluation of seasonal forecasts over the northeast of Brazil using the RegCM3. 2009. (Apresentação de Trabalho-Conferência ou palestra).
- Marengo, J. A.; SOARES, W. R.; SAULO, C.; NICOLINI, M. *Climatology of the Low-Level*

Jet East of the Andes as Derived from NCEP-NCAR Reanalyses: Characteristics and Temporal Variability. *Journal of Climate*, v. 17, n. 12, p. 2261-2280, 2004.

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.; 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.

Oliveira, A. S. Interações entre sistemas frontais na América do Sul e a convecção da Amazônia. 115 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – INPE, São José dos Campos, 1986.

Pal JS, Small E, Eltahir E (2000) Simulation of regional-scale water and energy budgets: representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM. *J Geophys Res* 105:29579-29594.

Pal JS, Giorgi F, Bi X, Elguindi N and others (2007) Regional climate modeling for the developing world: the ICTP RegCM3 and RegCNET. *Bull Am Meteorol Soc* 88: 1395-1409.

Reboita, M. S.; Da Rocha, R. P.; Ambrizzi, Tércio. . Padrões Atmosféricos Associados às Ciclôgeneses na Costa Leste da América do Sul. In: XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2008, São Paulo. *A Meteorologia e as Cidades*, 2008.

REBOITA, M. S.; Ambrizzi, T.; Da Rocha. Relationship between the Southern Annular Mode and Southern Hemisphere Atmospheric Systems. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 24, p. 48-55, 2009.

Reboita, Michelle Simões; DA ROCHA, R. P.; Kruger, L.F.. O Clima da América do Sul e do Oceano Atlântico Sul (1975-1989) simulado pelo RegCM3 aninhado ao ECHAM. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010, Belém. *XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 2010.

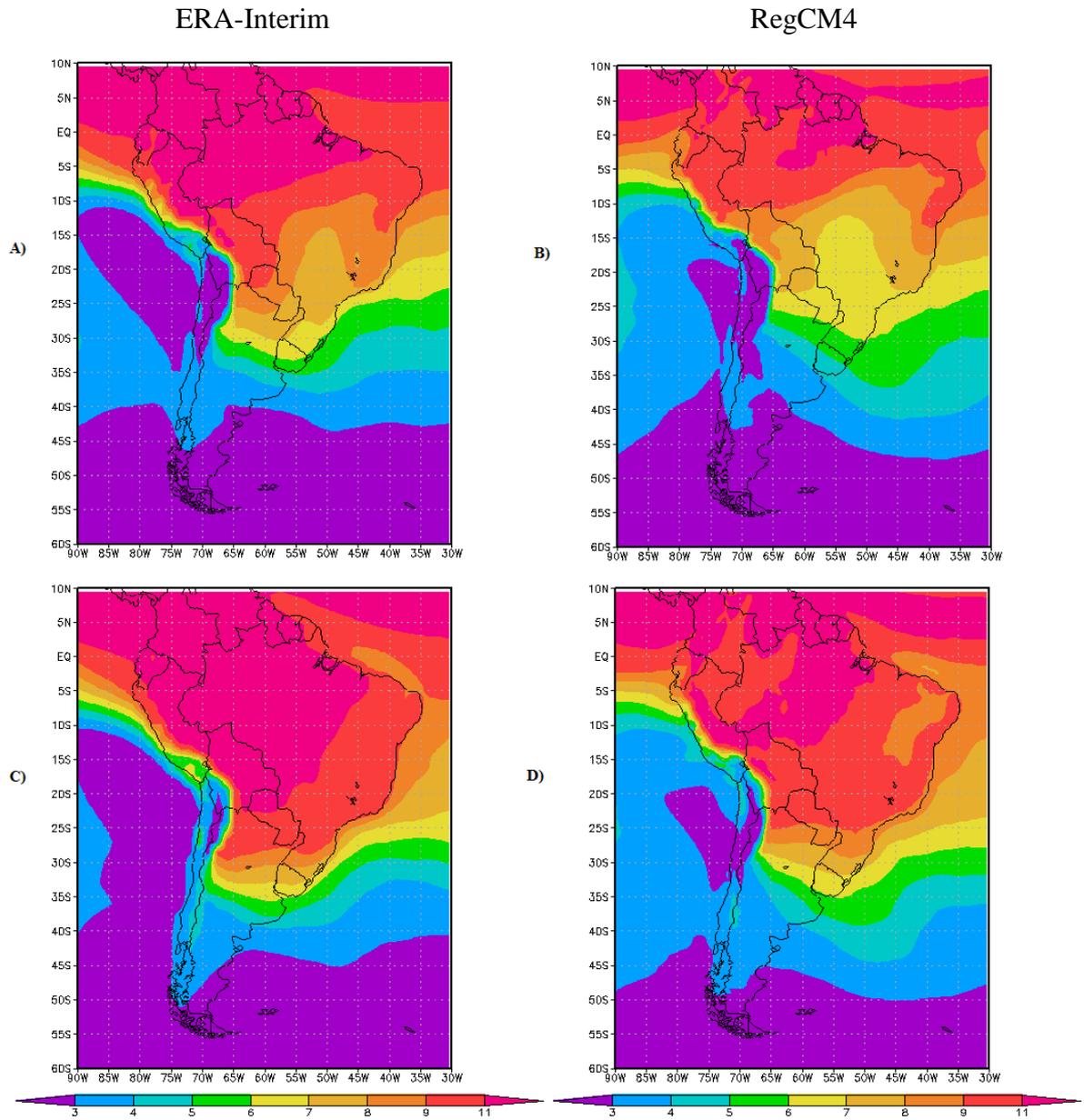
Reboita, Michelle Simões ; Nieto, Raquel ; Gimeno, Luis, DA ROCHA ; Ambrizzi, Tércio ; Garreaud, Rene ; Krüger, Luiz Fernando . Climatological features of cutoff low systems in the Southern Hemisphere. *Journal of Geophysical Research JRC* , v. 115, p. D17104, 2010.

Reboita, Michelle Simões; Da Rocha; Ambrizzi, Tércio; Sugahara, Shigetoshi. South Atlantic Ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (RegCM3). *Climate Dynamics JRC*, v. 35, p. 1331-1347, 2010.

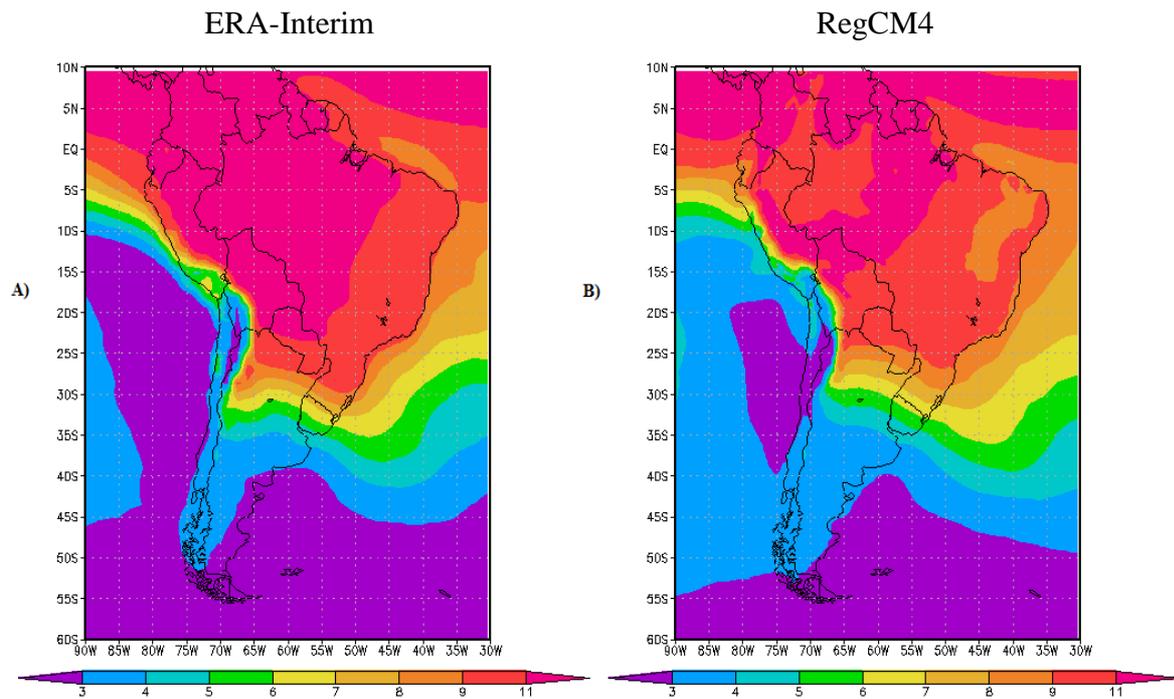
Rodrigues, G. L. M.; Franco, D.; Sugahara, S.; Climatologia de Frentes Frias no litoral de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geofísica* (2004) 22(2): 135-151.

- Satyamurty, P.; Nobre, C. A.; Silva Dias, P.L. South America. *Meteorology of the Southern Hemisphere*, v. 27, n. 49, p.119 -139, 1998.
- 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.
- Simmons A, Uppala S, Dee D, Kobayashi S (2007) ERA-Interim: new ECMWF reanalysis products from 1989 on-wards. *ECMWF Newsl* 110:25-35.
- Sinclair, M. R. A climatology of cyclogenesis for the Southern Hemisphere. *Monthly Weather Review*, v. 123, p. 1601-1619,1995.
- Sinclair, M. R., 1997: Objective Identification of Cyclones and Their Circulation Intensity, and Climatology. *Weather and Forecasting*, 12, 595-612.
- Solman, S.; Sanchez, E. ; Samuelson, P. ; Berebery, H. R.; Berbery, E. H. ; Recca-Remedio, A. ; Da Rocha, R. P. ; Chou, S. ; Li, L. . CLARIS LPB WP5: Regional Climate Change assessments for La Plata Basin. *Exchanges (Hamburg. Print)*, v. 16, p. 19-21, 2011.
- Solman S, Sanchez E, Samuelsson P, da Rocha R. P., Li L., Marengo J., Pessacq N. L., Remedio A. R. C., Chou S. C., Berbery H., Le Treut H., de Castro M., Jacob D. (2013) Evaluation of an ensemble of regional climate model simulations over South America driven by the ERA-Interim reanalysis: model performance and uncertainties. *Clim Dyn* 41:1139-1157 DOI 10.1007-s00382-013-1667-2
- Sun, L.; Moncunill, D. F.; Li, H.; Moura, A. D.; Filho, F. de A. de S. 2005: Climate Downscaling over Nordeste, Brazil, Using the RSM97. *J. Climate*, v. 18, p. 551-567, 2005.
- 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: Na investigation of the SACZ with extended simulations of the atmospheric model RAMS. *Rev. Bras. Meteor.*, 17, 83-91,2002.
- J.M. Wallace and P. V. Hobbs. *Atmospheric science: An introductory survey*. Academic Press New York). 1977. Pq. Xvii, 467, 229 figs., 15 tables.

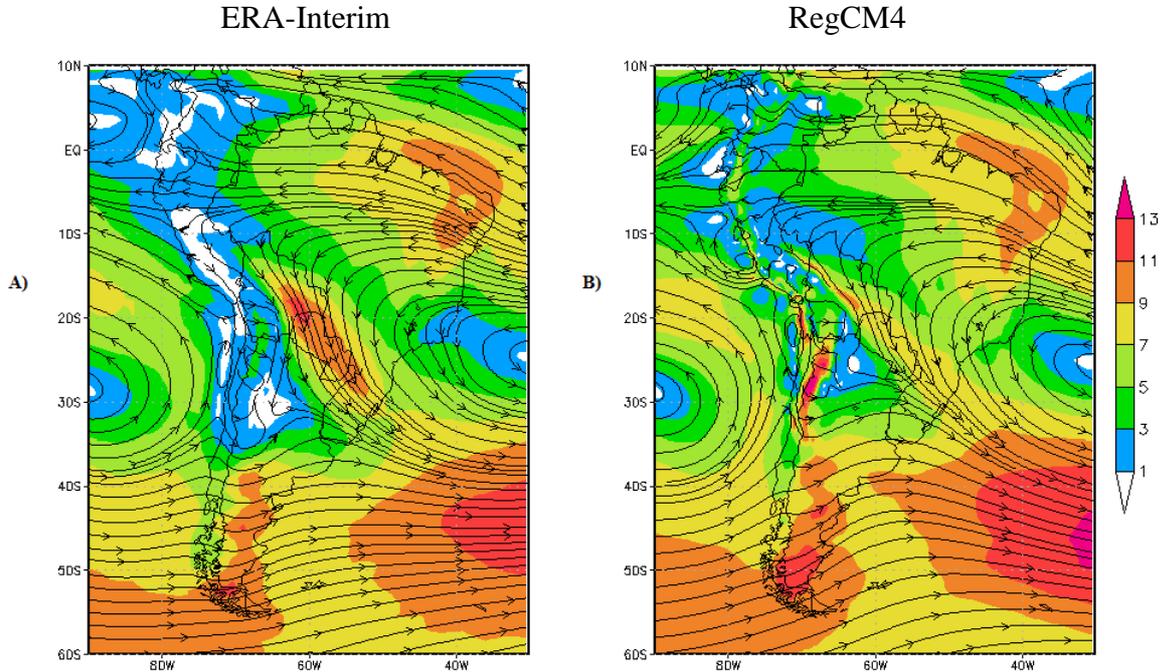
7 Apêndice



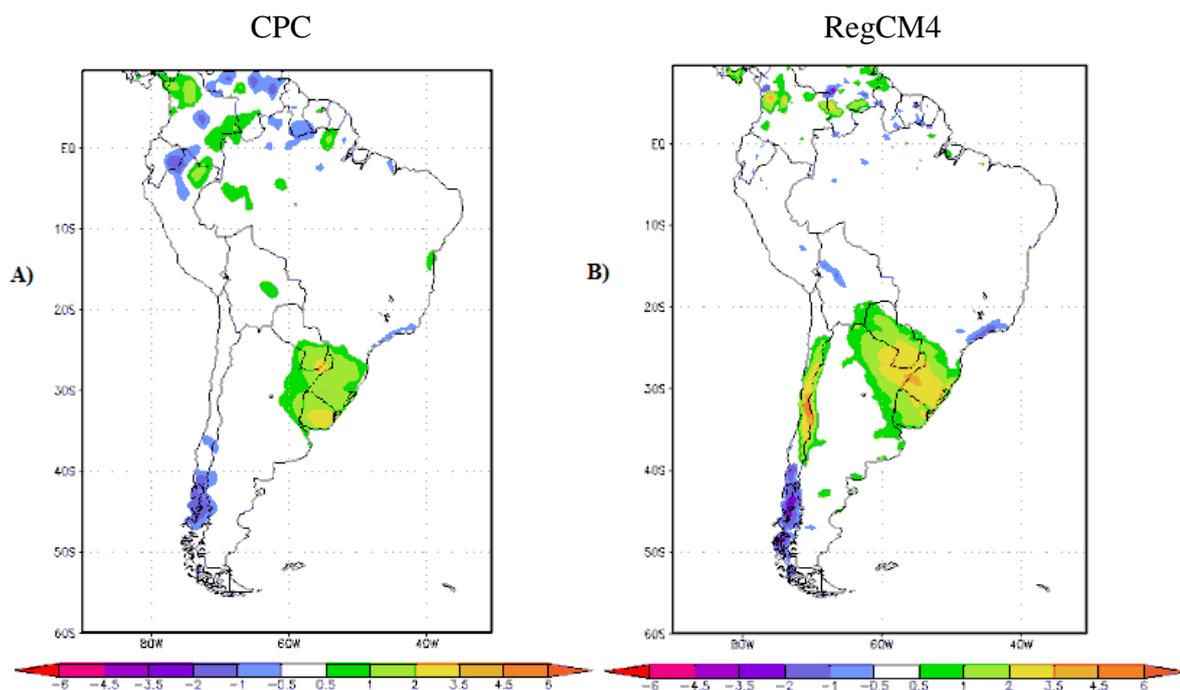
Anexo 1: Campo médio de umidade específica em 850 hPa para CFF aplicado no inverno na cidade de Rio Grande – RS um dia antes da FF no período de 1991 – 2009, coluna da esquerda estão os campos médios com dados da ERA-Interim e na coluna da direita os campos médios do RegCM4. Os itens (a)-(b) inverno, (c)-(d) primavera.



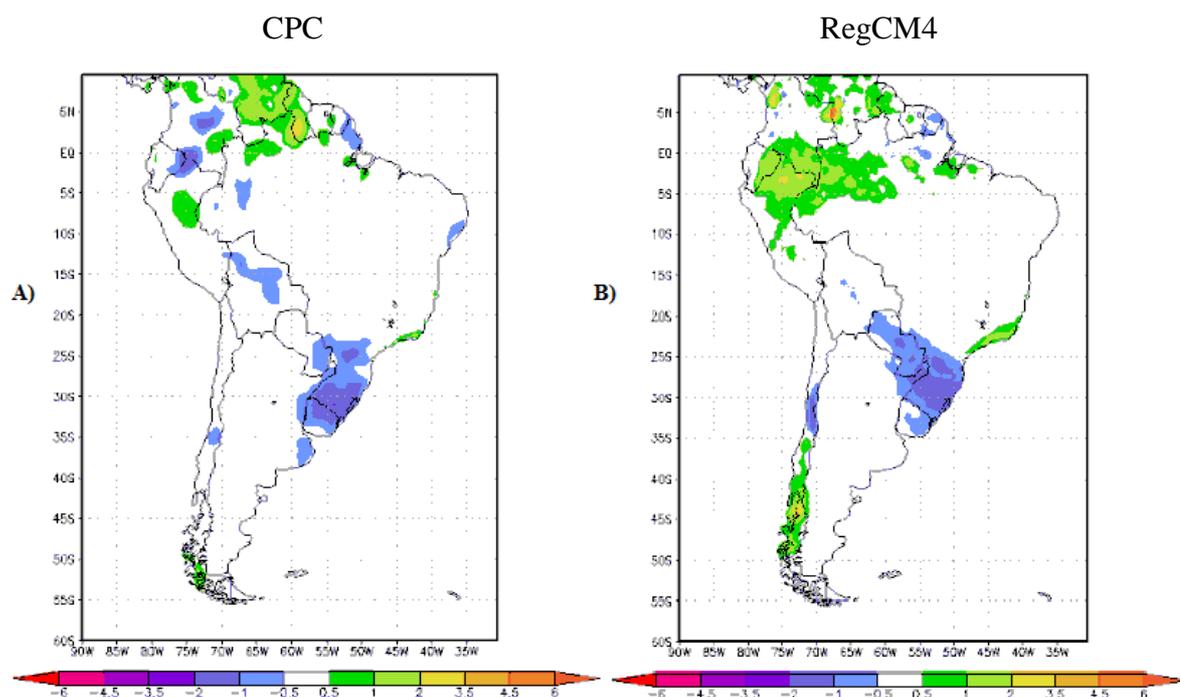
Anexo 2: Idem ao Anexo 1, mas somente para primavera e no dia da FF.



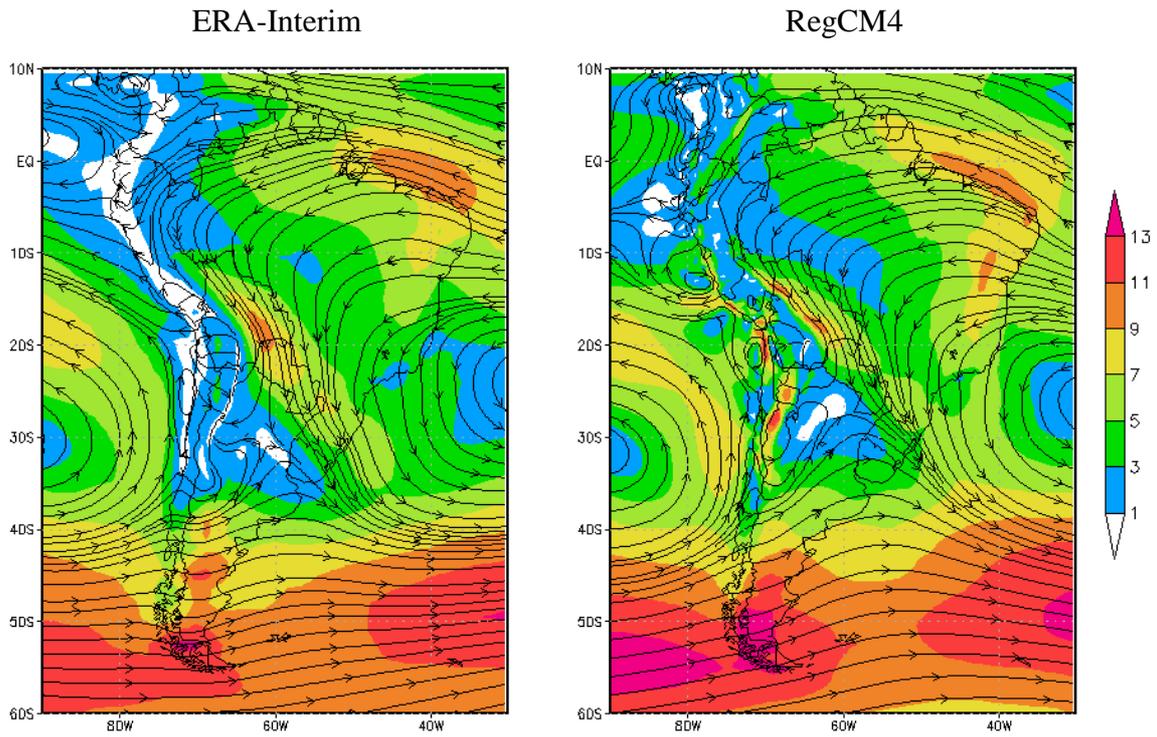
Anexo 3: Campo médio de linhas de corrente e isotacas (sombreado em m/s) no inverno para CFF aplicado na cidade de São Paulo – SP no período de 1979 - 2009, coluna da esquerda estão os campos com dados da ERA-Interim e na coluna da direita campos do RegCM4. Os itens (a)-(b) correspondem a dois dias antes da FF.



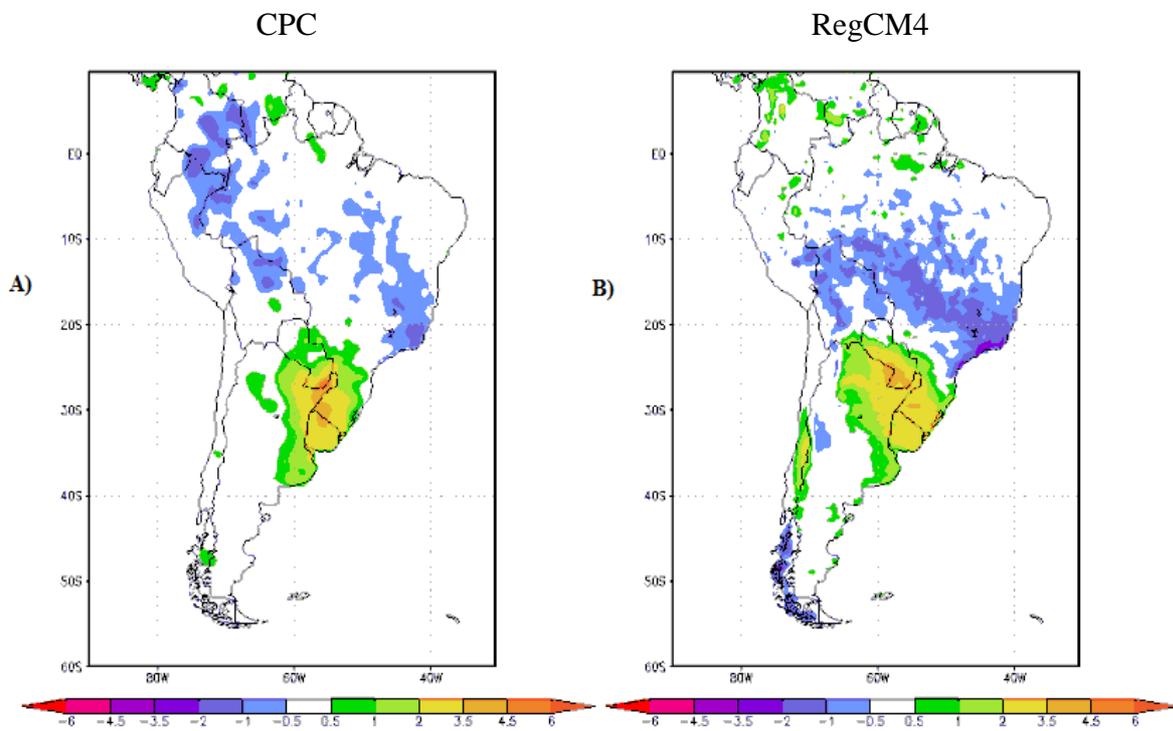
Anexo 4. Anomalias de precipitação (mm/dia) no inverno para CFF aplicado na cidade de São Paulo – SP no período de 1979 - 2009, coluna da esquerda estão as anomalias com dados do CPC e na coluna da direita anomalias do RegCM4. Dois dias antes da FF sobre SP.



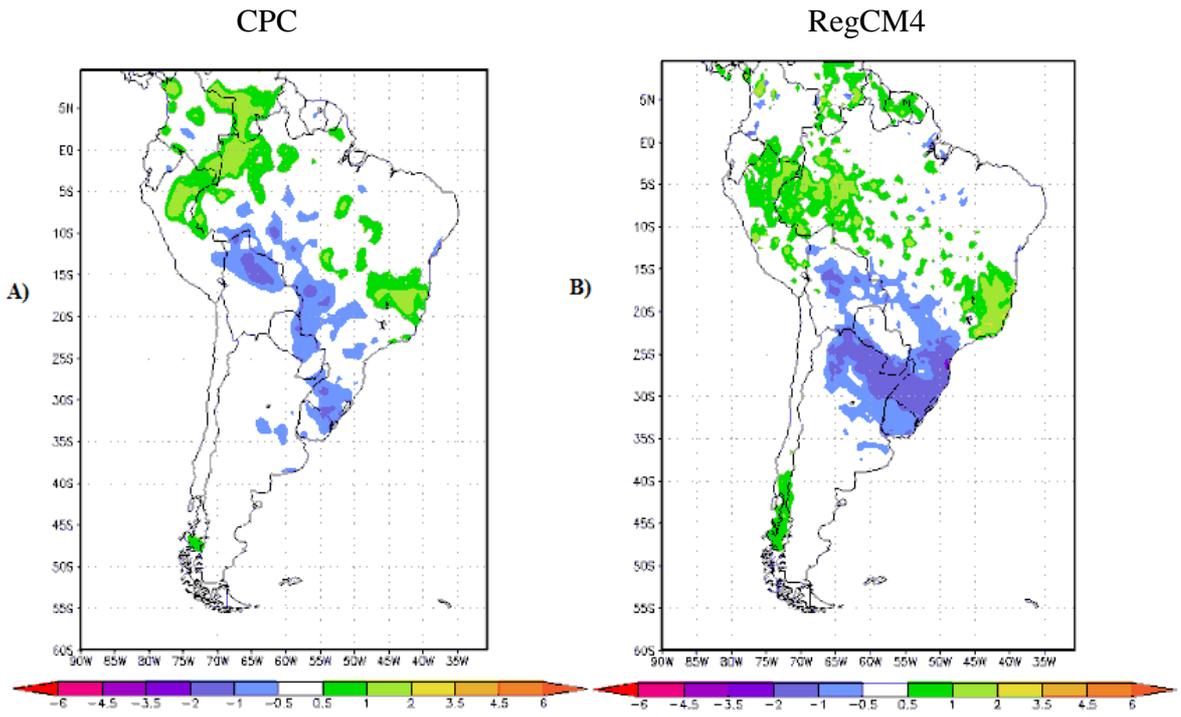
Anexo 5. Idem ao Anexo 4, mas para dois dias depois da FF sobre SP.



Anexo 6: Idem ao Anexo 3, mas para a primavera.



Anexo 7: Idem ao Anexo 4, mas para a primavera.



Anexo 8. Idem ao anexo 7, mas para dois dias depois da FF.