



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m18/2014/04.16.14.05-TDI

**CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA
REGIONAL DE PREVISÃO CLIMÁTICA SAZONAL
PARA A AMÉRICA DO SUL DURANTE O PERÍODO
MARÇO-MAIO**

Julliana Larise Mendonça Freire

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos Drs. Saulo Ribeiro de Freitas, e Caio Augusto dos Santos Coelho, aprovada em 16 de maio de 2014.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/3G5UGHP>

INPE
São José dos Campos
2014

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m18/2014/04.16.14.05-TDI

**CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA
REGIONAL DE PREVISÃO CLIMÁTICA SAZONAL
PARA A AMÉRICA DO SUL DURANTE O PERÍODO
MARÇO-MAIO**

Julliana Larise Mendonça Freire

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos Drs. Saulo Ribeiro de Freitas, e Caio Augusto dos Santos Coelho, aprovada em 16 de maio de 2014.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/3G5UGHP>

INPE
São José dos Campos
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Freire, Julliana Larise Mendonça.

F883c Calibração e avaliação de um sistema regional de previsão climática sazonal para a América do Sul durante o período março-maio / Julliana Larise Mendonça Freire. – São José dos Campos : INPE, 2014.

xxviii + 103 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m18/2014/04.16.14.05-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

Orientadores : Drs. Saulo Ribeiro de Freitas, e Caio Augusto dos Santos Coelho.

1. Calibração. 2. Downscaling. 3. Nordeste do Brasil. 4. Previsão sazonal. I.Título.

CDU 551.509.313.4(8)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Meteorologia

Dr. Dirceu Luis Herdies



Presidente / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Saulo Ribeiro de Freitas



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Caio Augusto dos Santos Coelho



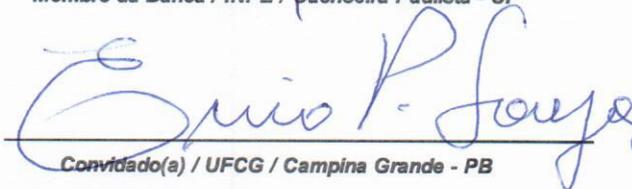
Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Silvio Nilo Figueroa Rivero



Membro da Banca / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Enio Pereira de Souza



Convidado(a) / UFCG / Campina Grande - PB

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

(x) unanimidade

Aluno (a): **Julliana Larise Mendonça Freire**

São José dos Campos, 16 de Maio de 2014

“A ciência nunca resolve um problema sem criar pelo menos dez outros”.

GEORGE BERNARD SHAW

*Com muito amor e carinho a meus pais
Julio Tavares Freire e Leda Mendonça Freire,
as minhas irmãs, DEDICO.*

AGRADECIMENTOS

A Deus.

A minha família pela paciência, amor, carinho, apoio e compreensão em todos os momentos.

Ao meu Orientador Dr. Saulo Freitas pela sua atenção e dedicação durante a elaboração desta pesquisa. Obrigada!

Ao meu Orientador Dr. Caio Coelho meus sinceros agradecimentos não somente pela contribuição científica dada durante todas as etapas desta pesquisa. Mas, pelos conselhos dados nos momentos difíceis que passei na chegada ao CPTEC que sem dúvida foram fundamentais para concluir mais uma etapa da minha vida acadêmica. Obrigada!

As minhas amigas Jeane Rafaela, Lidiane Borges, Dorinha Medeiros, Minella Martins e Fabiola Souza por tantas coisas boas e engraçadas que vivemos durante esses anos, que sem dúvida ficarão para sempre na minha memória.

Às equipes Alfa, Bravo e agregados (Carla, Mosefran, Maicon, Marlise, Tullius e Wendell) pelos ótimos momentos de descontração e alegria que passamos juntos.

À Marília Guedes e ao Diego Souza por toda atenção e carinho que sempre demonstraram.

Aos amigos de turma, em especial a Lais Santos, Daniela Rodrigues, Danielson Neves, Bruno Zanetti, Nicole Resende e Graziela Luzia pela companhia e por sempre estarem dispostos a ajudar.

Ao Paulo Kubota pela ajuda técnica e ensinamentos com o MCGA/CPTEC. E, ao Grupo de Modelagem da Atmosfera e Interfaces (GMAI) pelo suporte com o modelo BRAMS.

Ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), pela infraestrutura oferecida.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa de estudos oferecida durante o curso de mestrado.

RESUMO

As previsões climáticas sazonais têm contribuído efetivamente para o planejamento de atividades de diversos setores da sociedade, tais como, energia, agricultura e saúde. A necessidade de um maior detalhamento das previsões, através da diminuição da escala (ou aumento da resolução) espacial da informação climática, tem concentrado nos últimos anos esforços científicos em várias regiões do globo. A aplicação da técnica de redução de escala através da modelagem dinâmica regional, conhecida como *downscaling* dinâmico, vem sendo utilizada com esse objetivo. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo calibrar e avaliar a destreza do modelo regional atmosférico *Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System* (BRAMS) aninhado unidirecionalmente ao Modelo de Circulação Geral Atmosférico (MCGA) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) em prever a variabilidade climática dos padrões atmosféricos dominantes sobre a América do Sul (AS), para o trimestre março-abril-maio (MAM), que representa o pico da estação chuvosa da região Nordeste do Brasil (NEB) durante o período de 1979 a 2010. As previsões com o BRAMS foram produzidas utilizando um conjunto de 10 membros na resolução espacial de aproximadamente 30 km de latitude por 30 km de longitude, tendo como condições de contorno a temperatura da superfície do mar persistida e a umidade do solo climatológica. Este trabalho trata-se de uma iniciativa pioneira de avaliação sistemática e comparativa de um modelo global e um modelo regional para a América do Sul, ambos os modelos configurados em modo de previsão climática sazonal por conjunto (10 membros) rodados por um longo período (32 anos, 1979-2010), reproduzindo assim as mesmas condições encontradas no ambiente operacional de previsão climática. Após o processo de calibração, o modelo BRAMS conseguiu capturar o padrão de precipitação associada aos eventos climáticos extremos, como a redução (aumento) da precipitação principalmente no leste da região Norte e NEB e o aumento (redução) de precipitação na região Sul durante o evento de El Niño de 1983 (La Niña de 1989). Os resultados mostraram que através da técnica de *downscaling* o modelo regional BRAMS conseguiu reproduzir o padrão espacial da precipitação e temperatura e as principais características de circulação, durante o pico da estação chuvosa do NEB. As análises das composições de El Niño e La Niña mostraram que o modelo regional representou razoavelmente bem o padrão anômalo das variáveis estudadas quando comparado aos padrões observados. O uso do modelo regional BRAMS resultou em melhorias na previsão do sinal das anomalias de precipitação sobre os países da costa Oeste e Norte da AS (Bolívia, Peru, Colômbia e Venezuela), centro-leste da Argentina e sobre o Estado do Acre. Sobre a região Nordeste do Brasil ambos os modelos (BRAMS e MCGA) apresentaram desempenho semelhante nas previsões de anomalias de precipitação. As correlações de anomalia de temperatura utilizando o conjunto de previsões do BRAMS possuem valores mais expressivos do que as correlações resultantes do MCGA, principalmente sobre a região Norte do Brasil e sobre o Peru. Erros

sistemáticos foram verificados em algumas regiões da AS, associados as parametrizações físicas e condições iniciais e de contorno aqui utilizados, sugerindo a necessidade de realizar ajustes nas configurações e parametrizações do modelo em futuras versões para a melhoria da qualidade das previsões.

CALIBRATION AND EVALUATION OF A REGIONAL SEASONAL CLIMATE FORECAST SYSTEM FOR SUL AMERICA DURING THE MARCH-MAY PERIOD

ABSTRACT

Seasonal climate predictions have effectively contributed to activities planning in various societal sectors, such as energy, agriculture and health. The need for more detailed forecasts by increasing climate information spatial resolution has focused research efforts in various regions of the globe in recent years. The application of the downscaling technique through regional dynamic modeling, known as dynamical downscaling, has been used for this purpose. This study aims to calibrate and evaluate the skill of the regional model Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS) nested unidirectionally with the Atmospheric General Circulation Model (AGCM) of the Center for Weather Forecast and Climate Studies (CPTEC), in predicting climate variability of the dominant climate patterns over South America (SA). The study was performed for the March-April-May (MAM) period, which represents the peak of the rainy season in Northeast Brazil (NEB) during the period from 1979 to 2010. The predictions with the BRAMS were produced using a set of 10 members with spatial resolution of 30 km by 30 km in latitude and longitude, having the persisted sea surface temperatures and climatological soil moisture as boundary conditions. This work is a pioneering initiative performing a systematic comparative evaluation of a global model and a regional model for South America. Both models were configured in ensembles (10 members) seasonal climate forecast mode and integrated during a long period (32 years, 1979-2010), thus reproducing the same conditions found in the climate prediction operational environment. After the calibration process BRAMS was able to capture rainfall patterns associated to extreme climate events, such as the decrease (increase) in precipitation over the eastern portion of North region and over the Northeast region of Brazil, and increase (decrease) in precipitation over the Southern region of Brazil during the 1983 El Niño (1989 La Niña) event. The results showed that BRAMS was able to reproduce the spatial using the technique of downscaling the patterns precipitation and temperature and the main circulation features over South America, during the peak of NEB rainy season. El Niño and La Niña composite analyses showed that the regional model represented reasonably well the anomalous patterns of the studied variables when compared to the observed. The use of the regional model BRAMS resulted in improvements in precipitation anomaly forecast signal over of western and northern coast of SA (Bolivia, Peru, Colombia and Venezuela), over east-central Argentina and the over State of Acre over the Northeast region of Brazil both models (BRAMS and AGCM) showed similar performance

when forecasting precipitation anomalies. As for temperature anomaly forecast BRAMS showed higher performance, given by the correlation coefficient between forecast and observed anomalies over the period 1979-2010, than the AGCM, particularly over northern Brazil and Peru. Systematic forecast errors were found in some regions associated to the physical parameterizations and initial and boundary conditions used in this study suggesting the need for adjustments in the model configuration and parameterization in future model version with the aim of improving the quality of forecasts.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 3.1-Mapa do domínio do modelo e topografia (m) da América do Sul ..	30
Figura 3.2-Anomalias de TSM durante o trimestre MAM para composições de El Niño (a) e La Niña (b), cujos anos estão descritos na Tabela 3.2	34
Figura 4.1-Mapas de precipitação acumulada em 24 horas estimada via radar abordo do satélite TRMM (a) e prevista pelo modelo BRAMS (b)	38
Figura 4.2-Análise sinótica em 250 hPa para o dia 26 de junho de 2013 as 00Z..	39
Figura 4.3-Mapas de precipitação acumulada (mm) durante o trimestre MAM para a média climatológica (a), El Niño de 1983 (b) e La Niña de 1989(c)	42
Figura 4.4-Mapas de precipitação acumulada (mm) durante o trimestre MAM para o El Niño de 1983 (a) e La Niña de 1989 (b) prevista pelo modelo BRAMS	43
Figura 4.5-Mapas de precipitação acumulada (mm) durante o trimestre MAM para o El Niño de 1983 (a) e La Niña de 1989 (b) prevista pelo modelo BRAMS modificado	45
Figura 4.6-Mapas de precipitação acumulada (mm) durante o trimestre MAM para o El Niño de 1983 (a) e La Niña de 1989 (b) simulada pelo modelo BRAMS modificado	46
Figura 4.7-Mapas de precipitação acumulada (mm) durante o trimestre MAM para o El Niño de 1983 (a) e La Niña de 1989 (b) prevista pelo modelo MCGA/CPTEC com parametrização de convecção do tipo Kuo	48
Figura 4.8-Mapas de precipitação acumulada (mm) durante o trimestre MAM para o El Niño de 1983 (a) e La Niña de 1989 (b) prevista pelo modelo MCGA/CPTEC com parametrização de convecção do tipo Grell	48
Figura 4.9-Mapas de precipitação acumulada (mm) durante o trimestre MAM para o El Niño de 1983 (a) e La Niña de 1989 (b) prevista pelo modelo BRAMS modificado com CI do MCGA com convecção do tipo Grell	49
Figura 4.10-Mapas de precipitação acumulada (mm) durante o trimestre MAM para o El Niño de 1983 (a) e La Niña de 1989 (b) prevista pelo modelo BRAMS utilizando um filtro de ruídos sobre os Andes	51
Figura 5.1-Climatologia (1979-2010) da precipitação acumulada (mm) para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c).....	56
Figura 5.2-Composição dos eventos de El Niño para anomalia da precipitação acumulada (mm) para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c)	58
Figura 5.3-Composição dos eventos de La Niña para anomalia da precipitação acumulada (mm) para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c)	59

Figura 5.4-Climatologia (1979-2010) da temperatura média a 2metros (°C) para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c).....	61
Figura 5.5-Composição dos eventos de El Niño para anomalia da temperatura média (°C) para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c)	62
Figura 5.6-Composição dos eventos de La Niña para anomalia da temperatura média (°C) para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c)	62
Figura 5.7-Climatologia (1979-2010) da PNM média (hPa) para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c)	64
Figura 5.8-Composição dos eventos de El Niño para anomalia da PNM média (hPa) para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c).....	65
Figura 5.9-Composição dos eventos de La Niña para anomalia da PNM média (hPa) para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c).....	66
Figura 5.10-Climatologia (1979-2010) da circulação média em 850 hPa para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c), representada pelas linhas de corrente. A intensidade da circulação (m/s) é apresentada em cores azul.....	67
Figura 5.11-Composição dos eventos de El Niño para anomalia da circulação média em 850 hPa para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c), representada pelas linhas de corrente. A intensidade da circulação (m/s) é apresentada em cores azul	69
Figura 5.12-Composição dos eventos de La Niña para anomalia da circulação média em 850 hPa para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c), representada pelas linhas de corrente. A intensidade da circulação (m/s) é apresentada em cores azul.....	70
Figura 5.13-Climatologia (1979-2010) da circulação média em 200 hPa para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c), representada pelas linhas de corrente. A intensidade da circulação (m/s) é apresentada em cores azul	71
Figura 5.14-Composição dos eventos de El Niño para anomalia da circulação média em 200 hPa para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c), representada pelas linhas de corrente. A intensidade da circulação (m/s) é apresentada em cores azul	72
Figura 5.15-Composição dos eventos de La Niña para anomalia da circulação média em 200 hPa para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c), representada pelas	

linhas de corrente. A intensidade da circulação (m/s) é apresentada em cores azul.....	73
Figura 6.1-Coeficiente de correlação de Pearson entre as anomalias de precipitação acumulada observada e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (a) e BRAMS (b), para o trimestre MAM. Os valores de correlação acima de 0.35 são estatisticamente significante ao nível de 5%, segundo o teste t-Student. Os dados de precipitação observada foram fornecidos pelo CPC.....	78
Figura 6.2-Correlação entre as anomalias de precipitação observada e prevista pelo modelo MCGA/CPTEC com parametrização de convecção profunda do tipo KUO para o período de 1979-2008 do trimestre MAM. Os valores de correlação acima de 0.35 são estatisticamente significantes ao nível de 5%, segundo o teste t-Student. Os dados de precipitação observada foram fornecidos pelo CPC.....	78
Figura 6.3- REQM espacial entre a precipitação acumulada observada e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (a) e BRAMS (b), para o trimestre MAM.Os dados de precipitação observada foram fornecidos pelo CPC.....	80
Figura 6.4-Viés médio da precipitação acumulada (mm) prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (a) e BRAMS (b), para o trimestre MAM. Os dados de precipitação observada foram fornecidos pelo CPC.....	81
Figura 6.5-Coeficiente de correlação de Pearson entre as anomalias de temperatura média a 2 metros observada e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (a) e BRAMS (b), para o trimestre MAM. Os valores de correlação acima de 0.35 são estatisticamente significantes ao nível de 5%, segundo o teste t-Student. Os dados de temperatura observada foram fornecidos pelo ERA-interim.....	82
Figura 6.6-Correlação entre as anomalias de temperatura média a 2 metros observada e prevista pelo modelo MCGA/CPTEC com parametrização de convecção profunda do tipo KUO para o período de 1979-2008 do trimestre MAM. Os valores de correlação acima de 0.35 são estatisticamente significantes ao nível de 5%, segundo o teste t-Student. Os dados de temperatura observada foram fornecidos pelo ERA-interim.....	83
Figura 6.7- REQM espacial entre a temperatura média a 2 metros observada e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (a) e BRAMS (b), para o trimestre MAM. Os dados de temperatura observada foram fornecidos pelo ERA-interim.....	84
Figura 6.8-Viés médio da temperatura média a 2 metros (°C) prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (a) e BRAMS (b), para o trimestre MAM. Os dados de temperatura observada foram fornecidos pelo ERA-interim.....	85

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 - Resumo das principais características do experimento	31
Tabela 3.2 - Classificação dos anos de contrastes climáticos	34

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AB	Alta da Bolívia
AS	América do Sul
AST	Arakawa-Schubert
ASAS	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
ASPS	Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul
BRAMS	Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System
COLA	Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies
CC	Condição de Contorno
CI	Condição Inicial
CU	Convergência de Umidade
CCSR	Center for Climate Systems Research
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
CLP	Camada Limite Planetária
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CP	Coeficiente de Correlação de Pearson
CPC	Climate Prediction Center
DOE	Department of Energy
DJF	Dezembro, Janeiro e Fevereiro
ECHAM	European Center-Hamburg
ECMWF	European Center for Medium range Weather Forecasting
ENOS	El Niño/Oscilação Sul
EN	Ensemble
EtaClim	Eta Climático
FMA	Fevereiro, Março e Abril
FMAM	Fevereiro, Março, Abril e Maio
GAS	Grell, Arakawa-Schubert
GISS	Goddard Institute for Space Studies
GD	GRELL E DÉVÉNDYI
GF	GRELL e FREITAS

GFC	Grell, Fritsch-Chappell
GPCP	Global Precipitation Climatology Project
GPC	Grupo de Previsão de Clima
GPT	Grupo de Previsão do Tempo
GR	Grell
HadAM3H	Hadley Global Atmospheric Model
HadRM3P	Hadley Regional Atmospheric Model
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IOS	Índice de Oscilação Sul
JAS	Julho, Agosto e Setembro
JULES	Joint UK Land Environment Simulaton
JFM	Janeiro, Fevereiro e Março
KF	Kain Fritsch
LO	Low Level Omega
MAM	Março, Abril e Maio
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MCGA	Modelo de Circulação Geral Atmosférico
MCGOA	Modelo de Circulação Geral Acoplado Oceano-Atmosfera
MM5	Mesoscale Model 5
MCR	Modelo Climático Regional
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Center for Enviromental Prediction
NEB	Nordeste do Brasil
PNM	Pressão ao Nível Médio
RAMS	Regional Atmospheric Modeling System
RCM	Regional Climate Model
RegCM3	Regional Climate Model
RSM	Regional Spectral Model
REQM	Raiz do Erro Quadrático Médio
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
TSM	Temperatura da Superfície do Mar

VCAN	Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCPS	Zona de Convergência do Pacífico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE SÍMBOLOS

N	Número de anos
i	Cada ano
P_i	Valor previsto
O_i	Valor observado
\bar{P}	Média dos valores previstos
\bar{O}	Média dos valores observados
Σ	Somatório da série
mm	Milímetros
m/s	Metros por segundo
u	Componente zonal do vento
v	Componente meridional do vento
w	Componente vertical do vento
dx	Derivação na direção x
dy	Derivação na direção y
dz	Derivação na direção z

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1. Previsão climática sazonal	7
2.2. Modelagem climática regional sobre a América do Sul	10
2.2.1 Parametrizações físicas	12
2.2.2 Condição de contorno	14
2.2.3 Resolução horizontal	19
CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1. Descrição dos modelos	23
3.1.1 MCGA do CPTEC.....	24
3.1.2 Modelo regional BRAMS	25
3.2. Configuração do experimento.....	28
3.3. Descrição dos dados	32
3.4. Metodologia para avaliação das previsões.....	33
3.4.1 Análise subjetiva.....	33
3.4.2 Análise objetiva	34
CAPÍTULO 4 - CALIBRAÇÃO DO MODELO BRAMS	37
CAPÍTULO 5 - AVALIAÇÃO SUBJETIVA DOS PADRÕES ESPACIAIS PREVISTOS E OBSERVADOS	53
5.1. Precipitação.....	53
5.1.1 Padrões Climatológicos.....	53
5.1.2 Composições.....	56
5.2. Temperatura a 2 metros	59
5.2.1 Padrões Climatológicos.....	59
5.2.2 Composições.....	62
5.3. Pressão Atmosférica	62
5.3.1 Padrões Climatológicos.....	62
5.3.2 Composições.....	64
5.4. Circulação em 850 hPa	66
5.4.1 Padrões Climatológicos.....	66
5.4.2 Composições.....	68
5.5. Circulação em 200 hPa	70

5.5.1 Padrões Climatológicos.....	70
5.5.2 Composições.....	71
CAPÍTULO 6 -AVALIAÇÃO OBJETIVA DOS PADRÕES ESPACIAIS PREVISTOS E OBSERVADOS	75
6.1. Precipitação.....	75
6.2. Temperatura.....	81
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A previsão climática na escala de tempo sazonal (previsões para os próximos 1 a 6 meses) tem contribuído efetivamente para o planejamento de atividades de diversos setores da sociedade. As pesquisas da área de previsão climática vêm avançando para tentar atender as demandas da sociedade, que é afetada pela variabilidade climática em setores essenciais, tais como, energia, agricultura e saúde. A utilização eminente dos resultados das previsões climáticas nos setores citados tem exigido o desenvolvimento de técnicas ou métodos que aprimorem o prognóstico de variáveis nas escalas temporal e espacial.

A habilidade em prever anomalias climáticas na escala de tempo sazonal tem sua origem nas condições da superfície da terra e do oceano que apresentam variações lentas e podem influenciar o clima, tais como temperatura da superfície do mar (TSM), umidade do solo e cobertura de neve. Estas condições de contorno da superfície do planeta constituem a base para a previsão climática sazonal. Tais influências são menos dominantes em eventos meteorológicos diários, porém, se tornam perceptíveis em médias meteorológicas de longo prazo. As condições de superfície mais importantes que modulam a variabilidade do clima na escala de tempo sazonal são a TSM e a umidade do solo, sendo a primeira mais importante nas zonas tropicais. As previsões climáticas sazonais são mais bem sucedidas, apresentando maior destreza, nos trópicos devido a forte relação entre a TSM e as condições climáticas sazonais da região tropical (GODDARD et al., 2001). A variação temporal da TSM pode ser representada em modelos computacionais da atmosfera e do oceano, modelos os quais formam a base dinâmica para a previsão climática sazonal.

A previsão do fenômeno acoplado oceano-atmosfera El Niño/Oscilação Sul

(ENOS) é a mais bem sucedida em termos climáticos. A componente atmosférica desse fenômeno é representada pela Oscilação Sul, e pode ser quantificada pelo Índice de Oscilação Sul (IOS). Este índice representa a diferença de pressão ao nível do mar entre o Pacífico Central (Taiti) e o Pacífico Oeste (Darwin/Austrália). Valores negativos (positivos) elevados do IOS são indicadores da ocorrência de El Niño (La Niña).

El Niño e La Niña constituem a componente oceânica do fenômeno ENOS. As diferentes fases desses fenômenos climáticos de grande escala são caracterizadas por padrões anômalos de temperatura da superfície do mar no Oceano Pacífico, que ocorrem simultaneamente com anomalias de pressão em Taiti e Darwin. Esses fenômenos afetam a circulação atmosférica, resultando em anomalias pluviométricas em diversas regiões do globo terrestre, com secas em algumas regiões e inundações em outras (ROPELEWSKI; HALPERT 1986, 1989).

Os principais centros de previsão climática geram previsões em escalas sazonais, empregando uma variedade de métodos, incluindo os modelos dinâmicos (Modelos de Circulação Geral Atmosférico (MCGAs) e Acoplados oceano-atmosfera (MCGOA)), métodos estatísticos (regressão, técnicas multivariadas, redes neurais, entre outros) e análise dos especialistas. A combinação de todos esses métodos é uma tarefa importante do processo de previsão, possibilitando um aumento expressivo na capacidade prognóstica de anomalias climáticas de escala sazonal em diversas partes do globo (GODDARD et al., 2001). Nos métodos dinâmicos utilizam-se, os modelos de circulação geral da atmosfera (MCGA) forçados com TSM prevista por modelos estatísticos ou outros modelos dinâmicos, ou com a persistência da anomalia de TSM observada recentemente e também os MCGA acoplados oceano-atmosfera que preveem a evolução conjunta das condições oceânicas e do escoamento atmosférico.

Os MCGAs geralmente produzem as previsões climáticas em uma resolução

espacial não satisfatória para diversas aplicações, embora maiores resoluções espaciais (menor espaçamento de grade) já sejam possíveis para alguns MCGAs. A aplicação do MCGA em previsão climática (por exemplo, para os próximos 1 a 4 meses) tem sido limitada devido à resolução espacial ser insuficiente para fornecer informações em escala regional com detalhamento adequado (MENÉNDEZ et al., 2001; NICOLINI et al., 2002; MISRA et al., 2003; QIAN et al., 2003) especialmente em aplicações que exigem resolução mais refinada como, por exemplo, hidrologia e agricultura. Apesar dos sistemas de grande escala, responsáveis por grande parte da variabilidade da precipitação e temperatura, serem bem resolvidos pelos MCGA, os processos de escala subgrade associados à topografia, cobertura da superfície, processos convectivos úmidos, curvatura da costa dos continentes, que produzem padrões climáticos regionais, muitas vezes são inadequadamente capturados por estes modelos (NICOLINI et al., 2002). Com o objetivo de aprimorar a representação desses processos são utilizados os modelos climáticos regionais (MCR), que permitem resoluções mais finas.

Segundo Sen et al. (2004a,b) o interesse nos MCR deve-se à possibilidade de utilizar parametrizações físicas mais apropriadas para resolver processo de mesoescala e também à maior resolução espacial das previsões que estes modelos podem produzir, diminuindo potencialmente os erros encontrados nos MCGA associados a baixa resolução espacial.

Para prever com maior acurácia o clima sazonal, diversos pesquisadores utilizaram a técnica de "*downscaling*" dinâmico em diversas aplicações (MONCUNIL et al., 2002; SUN et al., 2005). Esta técnica tem como base o aninhamento de um modelo regional em um MCGA, ou seja, os dados previstos pelo MCGA são utilizados como condições iniciais e de contorno para os MCR (DICKINSON et al., 1989; GIORGI 1990; LIU et al., 1994), tendo como vantagem representar de forma mais detalhada as características regionais de topografia e superfície (QIAN et al., 2003; FRÍAS et al., 2005). Vários estudos acerca do uso desta técnica sugerem um melhor desempenho na simulação e

previsão de distribuição de precipitação local (NOBRE et al., 2001; SETH; ROJAS, 2003; SUN et al., 2005), embora estudos empregando uma comparação sistemática e compreensiva de previsões climáticas sazonais produzidas por MCGAs e MCRs sejam desconhecidos pelos autores.

Para a América do Sul (AS) ainda é desconhecido o desempenho do *Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System* (BRAMS) (FREITAS et al., 2009) para a previsão climática sazonal, com as condições iniciais fornecidas pelo MCGA do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). Apesar deste modelo estar sendo empregado com sucesso na previsão regional de tempo da atmosfera e da qualidade do ar, sua aplicação em previsão sazonal não foi ainda avaliada. Portanto, a aplicação da técnica torna-se uma ferramenta importante para o usuário utilizar a previsão climática em um nível mais compatível com o seu processo de tomada de decisão, dando maiores possibilidades de planejar futuras ações para minimizar os impactos socioeconômicos.

Face ao exposto, este trabalho tem como objetivo geral calibrar e avaliar a destreza do modelo regional BRAMS aninhado unidirecionalmente ao MCGA do CPTEC em prever a variabilidade climática dos padrões atmosféricos dominantes sobre a América do Sul, enfocando o trimestre março-abril-maio (MAM) que se trata do período de pico da estação chuvosa da região Nordeste do Brasil (NEB). Além disso, o trabalho objetiva propor ao CPTEC o desenvolvimento e implementação de um novo sistema de previsão climática sazonal para a AS. Para alcançar o objetivo principal deste trabalho, alguns objetivos específicos foram traçados e executados:

- Calibração do modelo regional para a previsão climática sazonal.
- Produção de previsões retrospectivas para o período de 1979 a 2010, para o trimestre MAM, para avaliar a destreza do modelo regional em reproduzir as condições climáticas observadas.

- Identificação de erros sistemáticos nas previsões geradas pelo BRAMS. Conhecendo esses erros pode-se avaliar o grau de acurácia das previsões futuras.
- Comparação da destreza do BRAMS com a destreza do MCGA do CPTEC para o período de 1979 a 2010.

Esta dissertação está dividida em sete capítulos: O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o estado-da-arte em previsão climática sazonal, suas características e aplicações. No Capítulo 3 é feita uma descrição dos dados e da metodologia implementada para configurar e executar os experimentos, assim como dos modelos global (MCGA/CPTEC) e regional (BRAMS). O Capítulo 4 descreve os procedimentos de calibração do modelo regional BRAMS para que o mesmo possa ser utilizado na escala de clima sazonal. Nos Capítulos 5 e 6 são apresentados os resultados das análises subjetivas e objetivas empregadas para avaliar a qualidade das previsões produzidas pelos modelos BRAMS e MCGA/CPTEC. As conclusões e sugestões para trabalho futuros são apresentadas no Capítulo 7.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão abordadas características gerais sobre previsão climática sazonal e a aplicação da técnica de *downscaling* sobre a América do Sul. Portanto, será elaborada uma revisão bibliográfica de vários trabalhos envolvendo as temáticas citadas.

2.1 Previsão climática sazonal

A previsão climática sazonal, também conhecida como previsão climática de longo prazo, fornece informações úteis sobre as condições climáticas médias esperadas para o período de 1 a 6 meses, distinguindo-se, desta forma, da previsão de tempo que fornece informações das condições atmosféricas para escalas de horas a dias. Portanto, as previsões sazonais são probabilísticas, com probabilidades que podem ser estimadas a partir de um conjunto de previsões obtidas de modelos climáticos, dinâmicos (global e regional) ou estatísticos.

As previsões de tempo são geralmente precisas em informar as características meteorológicas (temperatura, pressão, umidade e chuva) para os próximos 1 a 7 dias. A qualidade dessas previsões é melhor para os primeiros 1-2 dias, e à medida que o tempo de integração aumenta, ou seja, as previsões para os dias 3, 4, 5 ou mais a confiabilidade das previsões diminui. Embora não seja possível prever precisamente as mudanças meteorológicas diárias com mais de uma semana de antecedência (LORENZ, 1963), é possível fazer inferências sobre prováveis condições futuras, em média, para períodos de alguns meses. Em termos sazonais, não há nenhuma habilidade em prever o dia que uma dada localidade terá precipitação, tempestade, temperaturas extremas, passagens de sistemas frontais, entre outros fenômenos. No entanto, há habilidade em prever anomalias médias para períodos de 3 meses (escala

sazonal). Essa habilidade independe da escala de tempo diário dos fenômenos meteorológicos que irão se manifestar nesse período. A precipitação total, por exemplo, pode ser prevista a ser mais elevada do que a média climatológica devido a uma frequência maior, do normal esperado, de um padrão de circulação atmosférica específico, que é propício às chuvas em uma dada região.

Apesar da natureza caótica da atmosfera, previsões de longo prazo são possíveis porque a variabilidade da atmosfera na escala de tempo sazonal é modulada por variações lentas (CHARNEY; SHUKLA, 1981; SHUKLA, 1981; BRANKOVIC et al., 1994; CAVALCANTI et al., 2002). As principais componentes que influenciam os padrões climáticos são: TSM, umidade do solo e cobertura de neve. Sendo a TSM a mais importante, pois está associada ao ENOS.

A previsibilidade do fenômeno acoplado oceano-atmosfera ENOS é a mais conhecida em termos climáticos. O ENOS tem duas fases: a fase quente (chamados de episódios de El Niño) e a fase fria (chamados de episódios de La Niña) e tendem a se alternar entre períodos que variam, em média, de 2 a 7 anos (OLIVEIRA, 2001). A manutenção das condições de TSM anômala por alguns meses durante o ENOS gera padrões de circulação atmosférica capazes de produzir anomalias climáticas em regiões remotas do globo terrestre, através de teleconexões atmosféricas (WALLACE; GUTZLER, 1980; TRENBERTH, 1998).

A anomalia da TSM nos Oceanos Atlântico Tropical e Índico podem causar alterações na variabilidade climática sazonal. Como por exemplo, alteração da TSM no Oceano Índico está diretamente relacionada com a precipitação no leste da África tropical (ROCHA; SIMMONDS, 1997; GODDARD; GRAHAM, 1999) e a TSM no Atlântico Tropical afeta as chuvas da região Nordeste do Brasil (MOURA; SHUKLA, 1981). As variáveis: umidade do solo e a cobertura de neve também podem influenciar o clima sazonal (DOUVILLE; ROYER,

1996; DOUVILLE, 2003; DIRMEYER, 2003). Em suma, todos esses fatores que afetam a circulação atmosférica (TSM, cobertura de neve e umidade do solo) constituem a base para a previsão em longo prazo.

Para produzir previsões climáticas sazonais são utilizadas distintas ferramentas. Duas delas possuem base física, os modelos climáticos globais (SAHA et al., 2006; ANDERSON et al., 2007) e os modelos climáticos regionais (CHOU et al., 2005; SUN et al., 2005). As previsões climáticas sazonais produzidas pelos modelos dinâmicos baseiam-se em condições iniciais diferentes, essa técnica ajuda a amostrar os erros relacionados ao estado inicial da atmosfera, gerando um conjunto de previsões. Os modelos de base empírica que são os modelos estatísticos (WU et al., 1994; HASTENRATH et al., 2009), construídos através de observações do clima passado. Outra ferramenta é a combinação das previsões de modelos dinâmico e empírico (COELHO et al., 2006).

Os modelos dinâmicos têm algumas vantagens em relação aos modelos empíricos, uma delas trata-se da representação de processos físicos, como parametrização de convecção e radiação, com o objetivo de melhorar a qualidade das previsões. Outra vantagem encontra-se no fato de que tais modelos assumem a não estacionariedade do clima, enquanto que a maioria dos modelos empíricos assume a estacionariedade do clima. Porém, os modelos dinâmicos são computacionalmente mais caros em relação aos modelos empíricos. No entanto, a comunidade científica está se dedicando as melhorias dos processos físicos nos modelos dinâmicos para uma melhor representação das condições climáticas presentes e futuras.

As principais variáveis climáticas de interesse socioeconômico são: pressão atmosférica, temperatura do ar, precipitação e umidade do ar (JURY, 2008). Vários cientistas mostraram que há uma relação entre as variáveis climáticas e diversos setores sociais, econômicos e ambientais como: a produtividade de culturas (MARLETTO et al., 2005; CHALLINOR et al., 2005), produção de

energia (PALMER, 2002), saúde (MORSE et al., 2005; THOMSON et al., 2006; CECCATO et al., 2007; LIMA et al., 2008; LOWE et al., 2011) e a gestão de desastres (THOMSON et al., 1998; LUCIO et al., 2007). Essa relação serve como motivação para que a comunidade científica desenvolva pesquisas para a utilização da previsão climática sazonal no planejamento desses setores. Essas previsões climáticas sazonais que são divulgadas pelos órgãos de meteorologia, têm contribuído efetivamente para a redução nos danos materiais e nas mortes (YU et al., 2002).

Coelho e Costa (2010) discutiram sobre a necessidade de um sistema que possa integrar todas as informações das previsões climáticas sazonais visando melhorar a credibilidade das previsões nas áreas de aplicação. É necessário que as informações sejam adaptadas para que possam alimentar os modelos de aplicação, como: modelos de culturas, modelos hidrológicos, modelos de doenças ou modelos específicos que se tornem úteis a sociedade.

2.2 Modelagem climática regional sobre a América do Sul

Neste tópico é feita uma abordagem geral sobre os resultados de vários estudos que aplicaram a técnica de *downscaling* dinâmico para a previsão climática sazonal sobre a América do Sul. Essa técnica consiste no aninhamento unidirecional de um modelo regional em um MCGA e tem permitido uma melhor compreensão científica dos processos dinâmicos e físicos da atmosfera e dos oceanos.

Os MCGA e os MCGOA conseguem prever a variabilidade climática em baixa resolução horizontal o que impõe uma limitação desses modelos em estudos e aplicações de escala regional. Então, surgiu a necessidade de utilizar um modelo de área limitada com ênfase nos estudos climáticos regionais para obter uma melhor destreza das variáveis climáticas, sendo esta teoria proposta por Dickinson et al. (1989) e Giorgi (1990).

Segundo Costa (1997) o modelo de previsão climática do Centro de Previsão

de Tempo e Estudos Climáticos/*Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies* CPTEC/COLA conseguiu prever os principais sistemas que controlam o clima global e o padrão de precipitação associados a esses sistemas, como: a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), a Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Em seu estudo foi observado que o modelo superestimou a precipitação em regiões com relevo acentuado. Resultados semelhantes foram encontrados por Cavalcanti et al. (2002) em uma integração de 10 anos com o MCGA do CPTEC/COLA.

Utilizando o MCGA/COLA, para a previsão de anomalias de precipitação para o trimestre fevereiro-março-abril (FMA) sobre o Nordeste do Brasil (NEB), Misra (2006) observou que o modelo não apresentou bom desempenho em prever anomalias pluviométricas em anos normais, sem influência dos fenômenos climáticos El Niño e La Niña. Os erros sistemáticos encontrados nesse trabalho são consistentes com os estudados por Oyama (2006).

Os MCRs têm sido amplamente utilizados para previsões climáticas sazonais (DRUYAN et al., 2002; CHOU et al., 2005) com foco nos aspectos locais (topografia, tipo de solo e cobertura vegetal) que são melhor resolvidos pela dinâmica interna desses modelos. Esforços estão sendo feitos para o desenvolvimento de novos modelos e acoplamento das componentes que definem o clima, tais como, solo, vegetação, oceano e química da atmosfera (aerossóis). Assim, os MCRs tornam-se importantes para o processo de tomada de decisão já que em algumas regiões podem diminuir os erros sistemáticos dos MCGAs (SETH et al., 2007; NICOLINI et al., 2002). Por exemplo, durante o verão da América do Sul é comum os MCGAs superestimarem a precipitação no NEB e subestimarem na Amazônia (CAVALCANTI et al., 2002).

Ao longo dos anos, investigações foram feitas sobre o desempenho dos MCRs quanto à sensibilidade das parametrizações físicas (BOUGEAULT, 1997; GIORGI; SHIELDS, 1999; GALLUS, 1999), condições de contorno (GIORGI;

MARINUCCI, 1991) e resolução horizontal (NOBRE et al., 2001; NICOLINI et al., 2002). Estudos mostram que os MCRs capturam melhor as características climáticas em regiões distintas do globo com diferentes regimes climáticos, como na África (SUN et al., 1999; HUDSON et al., 2002), região das Monções Asiáticas (JI; VERNEKAR, 1997), Oceanos Pacífico Noroeste (LEUNG; GHAN, 1999), sudeste dos Estados Unidos (COCKE; LAROW, 2000) e América do Sul (CHOU et al., 2000; NOBRE et al., 2001).

2.2.1 Parametrizações Físicas

Neste tópico serão abordados trabalhos científicos sobre a influência dos processos úmidos nos resultados das simulações dos MCR. A parametrização dos processos úmidos nos modelos numéricos podem alterar o volume da precipitação sazonal simulada e sua distribuição espaço-temporal (GIORGI; SHIELDS, 1999; GIORGI; MEARNNS, 1999; DA ROCHA, 2012).

Utilizando o *Regional Climate Model* versão 3 (RegCM3), Martínez et al. (2006) simularam a precipitação na região do Caribe durante o trimestre julho-agosto-setembro (JAS) para dois domínios (50 e 25 km) com 3 diferentes esquemas de convecção cumulus. As parametrizações usadas foram o esquema Grell com fechamento Arakawa-Schubert (GAS) e Fritsch-Chappell (GFC) e o esquema Kuo. Os resultados mostraram que a precipitação sazonal simulada com o esquema GAS é mais próxima da observação, esse esquema também simulou bem o ciclo diurno associado à brisa marítima sobre Cuba. Os esquemas GFC e Kuo não foram satisfatórios em simular a chuva sazonal. Esses resultados concordam com os apresentados por Gallus (1999).

Machado (2008) investigou o desempenho de previsões sazonais do RegCM3 aninhado ao MCGA do CPTEC/COLA para o Brasil, aplicando as parametrizações de convecção disponível no modelo (Grell, Emanuel e Kuo, *ensemble*), durante 27 trimestres e em 8 áreas distintas. Em todas as áreas analisadas o RegCM3 com esquema Grell obteve melhores resultados, exceto na região Sul da Amazônia onde o CPTEC/COLA foi ligeiramente melhor para

prever a chuva sazonal. No entanto, o contrário foi obtido para previsões da temperatura do ar. Nas regiões Nordeste e Sudeste resultados satisfatórios para a previsão de temperatura do ar foram obtidos com esquema de convecção Emanuel e na região da Amazônia Leste com o esquema Kuo. Em suma, o experimento com convecção do tipo Grell e *ensemble* seriam melhores preditores da precipitação trimestral na maior parte do Brasil.

Souza et al. (2009) investigaram a variabilidade pluviométrica sazonal da Amazônia oriental, durante as estações de verão (DJF) e outono (MAM), utilizando o RegCM3. As simulações foram feitas para um período de 26 anos com domínio de 30 km e dois esquemas de parametrizações de convecção (Grell e MIT-Emanuel). Os resultados foram comparados com um novo conjunto de dados observados de uma ampla rede de estações pluviométricas. O RegCM3 apresentou erros sistemáticos relacionados a um viés seco do Amapá e norte/nordeste do Pará, usando ambos os esquemas convectivos. Portanto, o modelo não conseguiu representar realisticamente as características básicas da ZCIT. Os autores também investigaram a associação dos episódios de ENOS e as fases do dipolo do Atlântico intertropical com a precipitação sazonal e os resultados obtidos demonstram que o modelo conseguiu representar bem o padrão espacial das anomalias de chuva sazonal durante a atuação de cenários favoráveis, ou seja, condições de La Niña e dipolo negativo do Atlântico Sul. O mesmo teste de sensibilidade convectiva foi feito para o estado do Amapá com resolução espacial de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (~111km) e o esquema de MIT se mostrou razoavelmente melhor que o Grell. No entanto, ficaram evidentes erros na quantidade e posicionamento de alguns máximos de precipitação, quando comparados com dados observados (NEVES et al., 2011).

Alves et al. (2003) simularam a precipitação sazonal de fevereiro a maio (FMAM) para setor norte do NEB com 3 diferentes parametrizações de textura do solo, em dois anos de contrastes pluviométricos (o ano de 1983 seco e o ano de 1985 chuvoso). Para tal experimento foi aplicada a técnica de

downscaling dinâmico usando o *Regional Spectral Model* (RSM) aninhado ao modelo de circulação geral da atmosfera *European Center-Hamburg*, versão 4.5, (ECHAM4.5), desenvolvido pelo Instituto Max Planck de Meteorologia em Hamburgo, na Alemanha. O modelo ECHAM originou-se de uma versão inicial do modelo para estudos climáticos do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). Foi verificado que a física do modelo de solo do RSM não é sensível condição de contorno relativa ao tipo de solo a ser utilizado. A distribuição da precipitação simulada foi similar em todo o domínio do RSM para os 3 experimentos. O RSM apresentou menores erros que ECHAM4.5 em simular a precipitação sazonal no setor norte do NEB para o ano seco de 1983, já para o ano chuvoso de 1985 o ECHAM4.5 teve melhor desempenho. A configuração da ZCIT no Atlântico tropical foi melhor simulada pelo MCGA, o RSM subestimou a chuva observada em ambos os anos.

2.2.2 Condições de contorno

A condição de contorno mais importante para a previsão climática sazonal é a TSM, estudos a cerca da influência dessa variável em simular o clima, usando a técnica de *downscaling*, têm sido amplamente documentados.

Tanjura (1996) simulou o clima de verão (DJF) de 1990/1991 e 1991/1992 para analisar os principais sistemas climáticos sobre a AS. Foi realizado um *downscaling* dinâmico com o modelo Eta do NCEP e a simulação foi forçada por TSM climatológica. Os resultados mostraram que o modelo capturou bem a Alta da Bolívia (AB), o jato subtropical e a variabilidade da precipitação de grande escala. Comparando os resultados com dados de reanálises do NCEP/*National Center for Atmospheric Research* (NCAR) e análises do ECMWF foi possível verificar que a simulação superestimou a intensidade da circulação, que é resultado da dependência em relação à condição de contorno e suas parametrizações físicas. Em se tratando da distribuição da precipitação, verificou-se uma melhoria na simulação, exceto na região Amazônica, onde há

uma superestimativa quando comparada com as observações. Outro fator determinante para estimativa da precipitação é a presença dos Andes, o autor realizou experimentos com e sem a presença dos Andes e observou que os Andes são fundamentais para organização, em baixos níveis, da distribuição de calor latente da AB. Também foi verificado que com a ausência dos Andes não foram produzidas precipitações sobre o Sul da AS e não houve transporte de umidade da Amazônia para as latitudes altas. Os Andes não influenciaram na configuração da ZCAS.

Utilizando o modelo de área limitada Eta, Chou et al. (2000) avaliaram sua destreza em prever continuamente um mês sobre a AS e Oceanos adjacentes Atlântico e Pacífico. Os meses escolhidos foram agosto e novembro de 1997 representando as estações seca e chuvosa da AS, respectivamente. As condições de contorno laterais foram obtidas das saídas do MCGA do CPTEC/COLA e a resolução horizontal foi de 80 km. A TSM utilizada como condição de contorno para inicialização do modelo Eta foi obtida de observações médias semanais durante o primeiro dia da integração e mantida constante até o final da simulação, a variável de contorno umidade do solo também foi mantida constante. De modo geral, o modelo Eta mostrou um padrão de precipitação próximo das observações para o mês de agosto quando comparado ao MCGA. Para o mês que inicia a estação chuvosa sobre a AS, novembro, o modelo Eta representou de forma realística a precipitação quando comparada ao MCGA sobre o estado do Pará e região Sudeste do Brasil. Para a região do NEB, Amazônia e Região Centro-oeste, o MCGA do CPTEC/COLA apresentou melhores resultados, concordando com as observações. Portanto, o mês que representa a estação seca foi melhor simulado pelo modelo Eta em termos pluviométricos. Alves et al. (2000) também simularam estações de verão e inverno a fim de verificar o número de dias com precipitação e sua intensidade. Os resultados foram satisfatórios. Porém, o modelo Eta não conseguiu prever o posicionamento da ZCAS.

Em outro estudo sobre a América do Sul, Chou et al. (2005) avaliaram a qualidade da previsão da precipitação do modelo Eta de forma mensal e sazonal. A resolução usada foi 40 km, metade da usada em Chou et al. (2000) e Alves et al. (2000), com as condições iniciais também do MCGA do CPTEC. Ambos os modelos (global e regional) foram inicializados com TSM persistida, ou seja, no modo de previsão. Os resultados indicam que as previsões sazonais conseguiram descrever a precipitação associadas aos sistemas de grande escala. Para as previsões mensais, o modelo Eta capturou a variabilidade intrasazonal, com melhores resultados nas estações de transição. Entretanto, a redução do espaçamento da grade e os ajustes no modelo contribuíram para melhores resultados.

Druyan et al. (2002) avaliaram a previsão climática sazonal sobre o Brasil gerada pelo *Regional Climate Model* (RCM) do *Goddard Institute for Space Studies/Center for Climate Systems Research* (GISS/CCSR) aninhado ao MCGA do GISS. O estudo foi realizado para o trimestre MAM dos anos de 1985 e 1997, o RCM foi configurado com resolução horizontal de 50 km. A simulação foi avaliada sobre os efeitos das condições iniciais e de contorno. Foram feitos *downscaling* para experimentos com TSM persistida (persistência da anomalia de TSM do mês de fevereiro) e TSM observada, com condições iniciais do MCGA do GISS e com reanálises do NCEP. Os autores mostraram que embora o desempenho do RCM tenha apresentado melhor destreza que o MCGA, os resultados das previsões foram extremamente dependentes da condição de contorno. Os experimentos com TSM persistida para MAM de 1997 com ambas as condições iniciais não melhoraram a avaliação do campo pluviométrico com a inclusão da TSM observada. Os autores atribuíram esses erros como sendo gerado pelo MCGA. Entretanto, os experimentos citados conseguiram representar o padrão da precipitação assim como o campo da circulação atmosférica. Para o MAM de 1985 o MCGA superestimou um deslocamento da ZCIT para o Sul, que foi corrigido com o RCM usando o campo de TSM observada.

A fim de investigar as fases contrastantes do ENOS, Misra et al. (2002b) realizaram 3 experimentos para os meses do verão austral (JFM) sobre a AS. As simulações foram realizadas utilizando o RSM desenvolvido pelo NCEP, com a TSM sendo atualizada diariamente e a resolução horizontal de 80 km. A variabilidade da precipitação sobre a bacia do rio Amazonas, ZCIT, bacias do Oceano Atlântico e Pacífico e região sul da AS concordaram razoavelmente com as observações. Foi observado na simulação que o jato de baixos níveis é mais intenso no ano de 1998 (ano de El Niño) e menos em 1999 (ano de La Niña) (FERNANDEZ et al., 2006).

Alves et al. (2005) compararam os resultados de simulações de janeiro a maio (1971-2000) de um modelo regional (RSM) do NCEP aninhado a um MCGA (ECHAM4.5) com TSM observada, para a distribuição de precipitação do setor norte do NEB. Em algumas localidades o RSM obteve melhor desempenho e seus erros sistemáticos foram menores que o ECHAM4.5. Porém, de forma geral os resultados apresentados pelo RSM não conseguiu superar de forma expressiva a qualidade da simulação produzida pelo MCGA. Uma investigação a cerca da precipitação associada a ZCIT no Atlântico Tropical em anos normais, de El Niño e La Niña mostraram que quantitativamente o ECHAM4.5 teve melhor desempenho do que o modelo regional. O RSM simulou a ZCIT mais ao Sul da sua posição observada o que também foi observado por outros autores (MISRA et al., 2003).

Fernandez et al. (2006) investigaram a capacidade de dois MCRs, o RegCM3 do NCAR e versão climática do Eta do CPTEC (EtaClim), em simular a circulação quase-estacionária do verão sobre a AS. As condições iniciais foram obtidas das reanálises II do *National Center for Environmental Prediction - Department of Energy* NCEP/DOE e a TSM observada como contorno, a resolução foi de 80 km para uma simulação de 10 anos. Os modelos obtiveram desempenho similares. Mas em algumas áreas as previsões foram insatisfatórias. Este resultado pode indicar que a física e a dinâmica desses modelos precisam ser ajustadas, a fim de prognosticar com mais propriedade

diferentes regiões da AS. Comparando os resultados com dados de reanálises II do NCEP/DOE verificou-se que o modelo EtaClim simulou a circulação de altos e baixos níveis com desempenho ligeiramente superior ao RegCM3. O modelo RegCM3 simulou a AB mais ao sul e menos intensa que o observado e posicionou corretamente o vórtice do NEB, enquanto que o EtaClim deslocou o vórtice do NEB da sua posição original e intensificou sua circulação. Ambos simularam a variabilidade interanual durante situações de eventos extremos, subestimando a precipitação sobre grande parte da AS e superestimando na região dos Andes.

Cudra e da Rocha (2006) também utilizaram o RegCM3 para simular a variabilidade da precipitação, temperatura do ar e circulação de baixos níveis, durante o verão da região Sudeste do Brasil. Foram escolhidos para análise dois período de verão com características distintas, os anos de 1990 e 1998. As condições iniciais e de fronteira foram das reanálises do NCEP/DOE. A simulação dos padrões de variabilidade da precipitação foi consistente com as observações, para os dois verões. A anomalia da circulação e a temperatura do ar foram fisicamente coerentes com as anomalias sazonais da precipitação observada. Ainda aplicando o RegCM3, Cudra e da Rocha (2007) estudaram a sensibilidade das simulações com este modelo sobre as regiões Sul e Sudeste da AS em relação aos campos de TSM. Foram realizados experimentos com TSM observada e persistida. Os resultados evidenciaram que o impacto da TSM persistida apresenta pequena interferência na simulação sazonal da precipitação e temperatura do ar.

Alves (2007) avaliou a destreza do modelo climático *Hadley Centre Regional Atmospheric Model* (HadRM3P), em produzir projeções climáticas e identifica os principais padrões climatológicos sobre a região da AS e oceanos Adjacentes. O período da simulação foi de 1960-1990 com condições de iniciais e de contorno fornecidas pelo *Hadley Centre Global Atmospheric Model* (HadAM3P). Anos contrastantes foram selecionados para mostrar a influência das condições de TSM no clima local. Avaliando a sazonalidade, verificou-se

que o modelo conseguiu reproduzir razoavelmente a variabilidade espacial e temporal da precipitação e temperatura e as características da circulação de grande escala. No entanto, regionalmente observou-se erros sistemáticos que podem estar relacionados a física e dinâmica do modelo como também as condições de fronteira. Com por exemplo, o HadRM3P subestimou a precipitação na Amazônia e superestimou nos Andes.

Machado e da Rocha (2011) analisaram o impacto da regionalização de previsões climáticas sobre o Brasil utilizando o RegCM3 aninhado ao MCGA do CPTEC/COLA. Foram realizadas 27 previsões sazonais com TSM persistida e resolução horizontal de 60 km. Os resultados mostraram que os erros sistemáticos do MCGA são corrigidos pelo RegCM3, o posicionamento da chuva associada a ZCIT é corrigido pelo MCR, o que desloca no tempo a estação chuvosa no NEB contradizendo resultados encontrados por Misra et al. 2006. Assim, foi observado que o MCGA superestimou a precipitação trimestral observada e o RegCM3 forneceu maior correlação temporal para a simulação. Para a região Sudeste ambos os modelos apresentaram correlação temporal acima de 0,90 para a chuva e 0,84 para temperatura do ar. Na região Sul o MCR possui menor erro médio que o MCGA. No NEB, o MCR mostrou um coeficiente de eficiência positivo para a chuva.

2.2.3 Resolução Horizontal

Este tópico discute o impacto da resolução horizontal nos resultados das previsões dos modelos regionais, discutido em Gallus (1999), Nobre et al. (2001) e Martínez et al. (2006).

Nobre et al. (2001) estudaram a previsão sazonal da precipitação sobre o NEB com RSM aninhado ao ECHAM3, com três diferentes condições iniciais (3 membros) para o trimestre FMAM de 1999. O RSM foi configurado com resoluções de 80 km e 20 km, sendo que as saídas da grade de 80km foram usadas como dados de entrada para a simulação com 20km. Os resultados mostraram que a simulação do RSM-80 km obteve melhores resultados que a

RSM-20 km, comparando com a observação. É sugerido que as parametrizações de convecção e processos de superfície não estejam adequadas a essa resolução mais fina, como de acordo com os autores.

Seth e Rojas (2003) utilizaram o modelo regional RegCM, versão 2, para investigar as anomalias da circulação de grande escala conduzidas por diferentes campos de TSM e sua influência no campo da precipitação em dois anos contrastantes, 1983 (El Niño) e 1985 (La Niña) sobre a América do Sul e Atlântico adjacente. O MCR foi forçado com condições iniciais do NCEP e TSM observada, o período da simulação é de janeiro a maio que inclui o trimestre chuvoso do NEB fevereiro a maio. Em seus resultados o RegCM2 foi capaz de simular corretamente a precipitação dos anos contrastantes. Os autores ainda investigaram a sensibilidade do MCR ao tamanho do domínio (100 e 60 km), indicando que na região tropical da AS os MCRs precisam de domínio maior do que em latitudes médias. Na segunda parte desse trabalho o RegCM2 foi aninhado a um MCGA, as simulações também conseguiram capturar as características da circulação atmosférica e o total de chuva sazonal. Em relação ao primeiro trabalho foi possível notar que o RegCM2 melhorou a distribuição da chuva mensal, quando comparado aos dados observados. Expandindo o domínio da simulação foi verificado que MCR capturou a influência da TSM na precipitação do NEB. A ZCIT não foi simulada corretamente pelo MCGA mas, sua localização foi melhorada com a simulação do RegCM2.

Rojas (2006) utilizando o MM5 analisou a influência das altas resoluções horizontais na previsão sazonal da precipitação sobre regiões com topografia acentuada (cordilheira dos Andes). Os períodos simulados correspondem aos meses de maio a setembro de 1997 (chuvoso) e 1998 (seco), com resoluções horizontais de 135, 45 e 15 km. Os resultados mostraram que o modelo simulou razoavelmente o padrão de precipitação associados aos anos de contraste pluviométrico, superestimando a precipitação de 40 a 80%. Os autores enfatizaram que houve um ganho na simulação quando a resolução foi

reduzida para 45 km, sendo possível verificar características não observadas com a resolução de 135 km. Para 15 km não se observou informações adicionais sobre o clima, sugerindo que para estudos climáticos uma resolução de 40 km consiga capturar os padrões do clima regional.

De acordo com os resultados apresentados nesta revisão bibliográfica, fica evidente que ainda não se tem um modelo regional apropriado para a previsão climática sazonal sobre a América do Sul. Os modelos regionais ao longo dos anos têm apresentado melhorias significativas em algumas regiões. No entanto, em outras ainda é um desafio para a comunidade prever as anomalias do clima. Muitos dos erros sistemáticos associados aos MCRs devem-se a deficiências relacionadas as condições de contorno e as parametrizações dos processos de escala subgrade do modelo. De maneira que fica perceptível a necessidade de investigar a destreza de outros MCRs como também o avanço no desenvolvimento dos processos físicos.

CAPÍTULO 3

MATERIAL E MÉTODOS

Esta seção tem como objetivo fornecer uma descrição técnico-científica necessária para o desenvolvimento deste estudo. Inicialmente é feita uma descrição acerca dos modelos e dados utilizados. Em seguida é apresentada a metodologia usada para diagnosticar e avaliar as destrezas das previsões climáticas realizadas.

3.1 Descrição dos Modelos

O método utilizado na presente pesquisa foi a aplicação da técnica de *downscaling* dinâmico, que consiste no uso de um modelo regional (BRAMS) aninhado unidirecionalmente a um MCGA (no caso, o do CPTEC). Portanto, com a utilização do modelo regional BRAMS para prever as condições climáticas sobre o continente Sul Americano, aumentando-se o detalhamento espacial das previsões, com a expectativa de identificar melhoria na qualidade das previsões climáticas regionais sobre a América do Sul.

Para avaliar a habilidade deste método em reproduzir os aspectos característicos regionais do clima sobre a América do Sul, o modelo BRAMS foi integrado, de forma retrospectiva, para o período de janeiro a maio de 1979 a 2010 (32 anos), com um total de 10 membros (representando 10 condições iniciais distintas provenientes do MCGA do CPTEC para amostrar as incertezas associadas às previsões). Assim, para ambos os modelos MCGA/CPTEC e BRAMS foram produzidas um total de 320 rodadas de previsão (32anosx10membrosxano) cada uma por um período de ~4,5 meses (de meados de janeiro até o final de maio), utilizando um total de 720 (240) processadores o tempo gasto para rodar o modelo regional (global) para cada membro por ano é de aproximadamente 10 horas (3 horas). Os primeiros 15 dias (aproximadamente, dependerá do membro) de previsão durante janeiro

são considerados como período de ajuste de equilíbrio (*spin-up*) do modelo (ver seção 3.2 deste capítulo), sendo então previstas as condições climáticas nos próximos 4 meses de fevereiro a maio. Desta forma, um total de 640 rodadas (320 para cada um dos modelos) por um período de 4.5 meses foram produzidas e analisadas neste estudo, resultando em um total de 2880 (4,5mesesx640rodadas) meses de previsões (ou 240 anos). Estes números ilustram o volume expressivo de trabalho computacional exigido para avaliação de um sistema de previsão climática sazonal como proposto neste estudo.

3.1.1 MCGA do CPTEC

O MCGA em uso no CPTEC, para previsão de tempo e de clima sazonal, teve sua origem no *Center for Ocean, Land and Atmosphere Studies* (COLA) em 1988. Uma versão do modelo global do CPTEC foi colocada em operação em dezembro de 1998, denominada versão 2.0 CPTEC/COLA. Desde então, esse modelo tem sido constantemente atualizado, incluindo novas parametrizações físicas, dinâmica, melhorias no paralelismo e nova estrutura de codificação conforme o padrão Fortran 95, sendo atualmente conhecido como MCGA/CPTEC.

O MCGA que será utilizado neste trabalho tem a versão descrita em Bonatti (1996), cuja resolução é T062L28, em que T indica o tipo de truncamento espectral utilizado, denominado triangular, na onda zonal de número 62 e L refere-se ao número de camadas na vertical, neste caso, 28. A resolução horizontal do T62 é aproximadamente de $1,875^\circ \times 1,875^\circ$. Ainda segundo Bonatti (1996), o MCGA do CPTEC resolve as equações primitivas em coordenadas esféricas e na forma espectral. Para facilitar o tratamento espectral, as equações do movimento horizontal são transformadas nas equações da vorticidade e divergência. Portanto, as variáveis previstas pelo MCGA do CPTEC são: logaritmo da pressão à superfície, vorticidade e divergência do vento horizontal, temperatura virtual e umidade específica, além das obtidas a partir das parametrizações físicas (temperatura de superfície,

temperatura do interior do solo e do interior do dossel, umidade do solo, chuva, etc.). O MCGA do CPTEC parametriza os processos de escala sub-grade como a interação solo-vegetação-atmosfera, camada limite planetária (CLP), transferência radiativa na atmosfera, condensação de grande escala e convecção cumulus profunda e convecção rasa, além da difusão horizontal e vertical.

Para o presente estudo o estado atmosférico do MCGA foi iniciado com condições iniciais (análises) obtidas do NCEP/NCAR (KALNAY et al., 1996). Um total de 10 condições iniciais do mês de janeiro foram utilizadas para produzir um conjunto de previsões de 10 membros. A TSM persistida (neste caso a anomalia de TSM observada do mês de janeiro) foi usada como condição de contorno oceânico, a parametrização de convecção profunda utilizada no MCGA/CPTEC é do tipo Grell (GRELL; DÉVÉNDYI, 2002), a convecção rasa descrita em Tiedtke (1983). O esquema de radiação utilizado foi o Clirad (TARASOVA et al., 2006). Uma avaliação da climatologia deste modelo para diversas regiões do globo assim como detalhes técnicos adicionais são descritos em Cavalcanti et al. (2002).

3.1.2 Modelo Regional BRAMS

O *Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System* – BRAMS, na versão 5.0 atualmente em uso operacional no CPTEC, foi a ferramenta utilizada nesse estudo para gerar o *downscaling*. O BRAMS constitui-se em uma versão brasileira do *Regional Atmospheric Modeling System* – RAMS descrito por Pielke (1984); Pielke et al. (1992) e Walko et al. (1995), o qual foi desenvolvido com o objetivo de criar e aprimorar novos esquemas de parametrizações e atualizações voltadas para a região tropical e sub-tropical do Brasil.

O RAMS constitui-se num código numérico altamente versátil, podendo ser configurado para fazer simulações da circulação atmosférica em várias escalas de tempo e espaço, bem como diferentes resoluções horizontais e verticais. O

RAMS foi desenvolvido por cientistas da Universidade do Estado do Colorado, nos Estados Unidos da América. Na versão brasileira do RAMS, o BRAMS, há várias inovações e melhorias em termos de física e dinâmica, assim como qualidade do código e eficiência computacional (FREITAS et al., 2009).

O conjunto de equações dinâmicas e termodinâmicas que governam o movimento atmosférico utilizadas pelo BRAMS possui as características de ser não-hidrostática e compressível, que consistem em equações prognósticas para as variáveis de estado: componente zonal do vento (u), componente meridional do vento (v), componente vertical do vento (w), temperatura potencial de água líquida, função de Exner, razão de mistura de vapor d'água e hidrometeoros. Esse modelo é baseado em diferenças finitas e usa grade do tipo C de Arakawa (MESINGER; ARAKAWA, 1976). Neste esquema de grade, as variáveis termodinâmicas e de umidade são definidas no centro dos pontos de grade e suas componentes u , v , e w são resolvidas na direção $dx/2$, $dy/2$ e $dz/2$, respectivamente. A coordenada vertical usada pelo modelo é do tipo sigma- z , a qual acompanha o terreno na parte inferior e possui topo plano. Uma vantagem do BRAMS é que seu código permite o aninhamento múltiplo de grades, o que possibilita que as equações sejam resolvidas de forma mútua nas grades de diferentes resoluções. O aninhamento de grades proporciona uma alta resolução espacial em áreas selecionadas.

O BRAMS é usualmente aplicado para estudos de mesoescala, com finalidades diversas, que possui várias opções de parametrizações físicas incluídas no seu código. Atualmente, o modelo contém 7 parametrizações para tratamento da difusão turbulenta na camada limite planetária e dentro de nuvens, podendo tratar os coeficientes de difusividade de forma anisotrópica e isotrópica. Para transferência radiativa, 4 submodelos estão disponíveis, sendo um deles com tratamento explícito de água condensada e aerossóis (LONGO et al., 2006, ROSÁRIO et al., 2012). Microfísica de nuvens que segue o esquema descrito por Walko et al. (1995). Em termos de parametrização esta dissertação foi beneficiada com a incorporação do modelo de superfície *Joint*

UK Land Environment Simulaton (JULES, <http://www.jchmr.org/jules>) no BRAMS assim como descrito em (MOREIRA et al., 2013).

A parametrização de convecção rasa é descrita por Souza (1999) e existe uma adicional parametrização introduzida por Freitas et al., (2009) e descrita por GRELL e DÉVÉNDYI (2002, daqui em diante GD). O BRAMS conta uma nova extensão da parametrização GD, chamada G3-D, com novos fechamentos e formulações para o entranhamento lateral. Uma importante característica do esquema GD/G3-D é a possibilidade de usar diferentes fechamentos para o fluxo de massa na base da nuvem, uma combinação de todas através de simples média aritmética ou ainda uma combinação produzida por técnicas em otimização (SANTOS et al., 2012). Recentemente, Grell e Freitas (2013, GF) desenvolveram uma parametrização de convecção adequada para as escalas cinzas e acoplada com aerossóis. Os autores aplicam idéias originalmente desenvolvidas por Arakawa et al. (2011), fazendo com que a parametrização de convecção profunda possa ser aplicada em qualquer escala espacial, incluindo a escala cinza para convecção profunda (~ 2km a ~10 km). Efeitos de aerossóis são contabilizados através da dependência da autoconversão e evaporação com a quantidade de núcleos de condensação na base da nuvem.

Existem diversos tipos de fechamento para determinar a quantidade e a localização de convecção. No esquema GF são utilizados alguns fechamentos com o objetivo de determinar o fluxo de massa na base da nuvem. A versão atual do BRAMS dispõe dos seguintes fechamentos: Ensemble (EN), Grell (GR), Low Level Omega (LO), Convergência de Umidade (CU), Kain Fritsch (KF) e Arakawa-Schubert (AST).

Em termos de dinâmica, BRAMS possui um aperfeiçoamento no filtro de Asselin (usado no esquema *leapfrog* de integração temporal) descrito por Williams (2009). Este aperfeiçoamento mantém a ordem de acurácia do esquema de integração que é reduzida para primeira ordem quando se aplica o filtro de Asselin em sua forma original. O esquema de advecção de escalares

foi aperfeiçoado com a introdução de um esquema absolutamente monotônico com baixa difusão numérica (FREITAS et al., 2012) o que produz melhores padrões de transporte, principalmente em regiões com forte gradientes, como o caso de frentes frias e presença de nuvens.

3.2 Configuração do experimento

As forçantes, condição inicial (CI) e de contorno (CC) das variáveis atmosféricas prognósticas, de grande escala usadas para integrar o BRAMS foram obtidas de um conjunto de previsões de 10 membros do MCGA do CPTEC, para os meses de janeiro a maio de cada ano do período 1979 a 2010, sendo o foco deste trabalho o trimestre MAM, que representa o pico da estação chuvosa da região Nordeste do Brasil. As variáveis previstas pelo MCGA do CPTEC, ou seja, altura geopotencial, temperatura do ar, componentes meridional e zonal do vento e umidade relativa foram utilizadas para inicializar o modelo regional BRAMS, com entrada a cada 6 horas e resolução horizontal de $1,875^{\circ} \times 1,875^{\circ}$ (~ 200 km) de latitude e longitude.

Para o modo de previsão climática sazonal, a condição de contorno oceânica será a TSM persistida. A anomalia de TSM observada do primeiro mês da previsão (Janeiro) é persistida nos 4 meses seguinte. Essa mesma condição foi usada nas previsões do MCGA. No procedimento de persistência, a anomalia de TSM do mês de janeiro será somada às climatologias (1982-2006) de TSM de cada um dos meses de fevereiro a maio. Para confecção das anomalias e climatologia da TSM foram utilizados os dados produzidos por Reynolds et al. (2002), espaçados em uma grade de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ de latitude e longitude. A umidade do solo utilizada foi a climatologia de um período de 6 anos (1997-2002), proveniente das estimativas de umidade (GEVAERD; FREITAS, 2006) obtidas a partir dos dados de precipitação do *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP, http://precip.gsfc.nasa.gov/gpcp_daily_comb.html), com resolução espacial de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ de latitude e longitude e resolução temporal diária (HUFFMAN et al., 2001).

O espaçamento de grade do BRAMS foi de 30 km, centrada na latitude de 19°S e na longitude de 54,4°W e 42 níveis verticais, e o domínio compreende toda a AS e parte dos Oceanos Atlântico e Pacífico (60°S-20°N e 110°W-0°), Figura 1. É ideal que o domínio seja suficientemente grande para que o modelo possa desenvolver sua própria circulação regional (GIORGI; MEARMS, 1999; CHOU et al., 2005). A fim de obter a climatologia do modelo regional para o trimestre MAM, as previsões foram iniciadas às 12 UTC do primeiro dia de cada membro (correspondentes aos dias 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19 de Janeiro) e se estendem até o último dia do quinto mês, durante 32 anos (1979-2010). Os primeiros 18 dias (ou 17, 16, 15, 14, 13, 12, 11, 10 e 9 dias dependendo do primeiro dia de cada membro) de previsão foram considerados como de “*spin-up*” e excluídos das avaliações, sendo que para esses dias foi usada a condição de contorno oceânica (TSM) observada. É importante ressaltar que a previsão por conjunto (vários membros) geralmente ajuda a melhorar a previsibilidade climática, principalmente em anos de ENOS com intensidade forte (MOLTENI et al., 1996; BRANKOVIC; PALMER, 2000; LEUNG et al., 2004). Considerando que cada membro gere uma condição futura diferente, é esperado que o resultado do *ensemble* seja mais satisfatório do que a previsão de um só membro, assim, um conjunto de membros terá condições de melhor amostrar a futura variabilidade climática quando comparado com um único membro.

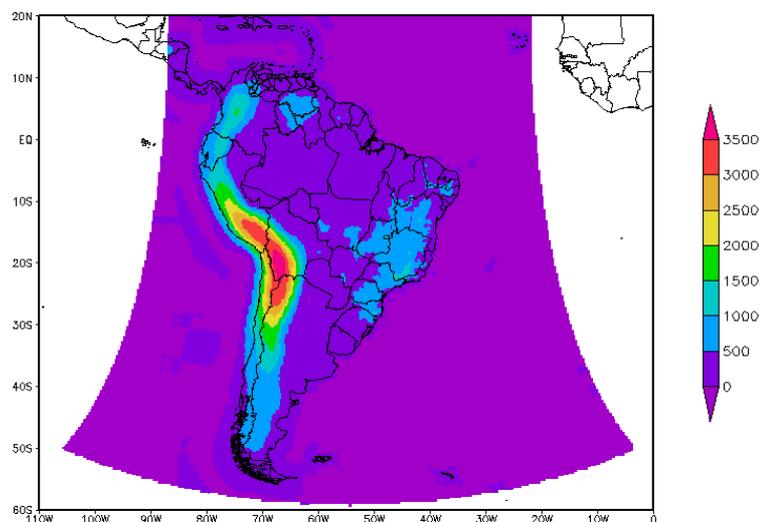


Figura 3.1 – Mapa do domínio do modelo e topografia (m) da América do Sul

Para previsão climática sazonal geralmente é escolhido um conjunto de CI separadas de 24 horas, a simplicidade da escolha é devida à previsibilidade ser principalmente função da CC e não do estado inicial (STERN; MIYAKODA, 1995). Cada membro representa um estado inicial distinto da atmosfera. O ideal seria um número ilimitado de condições iniciais para poder representar todos os estados possíveis da atmosfera. Entretanto, esta prática é inviável, pois para cada condição inicial seria necessário uma rodada do modelo. Na prática utiliza-se um número menor de integrações, para estimar de forma mais realística e computacionalmente viável os possíveis cenários associados ao clima e a evolução dinâmica-caótica da atmosfera (LORENZ 1963, 1965, 1969; COUTINHO, 1999). Neste trabalho, a escolha de 10 membros deve-se a disponibilidade das condições iniciais do MCGA e as limitações computacionais para rodar um grande número de membros.

As parametrizações adotadas para o experimento são: para transferência radiativa CARMA (descrita em LONGO et al., 2006); no processo de convecção profunda a parametrização é do tipo GF (GRELL; FREITAS, 2013) com fechamento *ensemble*, e para convecção rasa a descrito por Souza (1999); na difusão turbulenta o fechamento é de ordem 2.5 (MELLOR; YAMADA, 1982); a microfísica de nuvens segue o esquema descrito por Walko et al.(1995) com

prognóstico de 7 hidrometeoros e a inicialização da umidade do solo foi feita com estimativa diária descrita em Gevaerd e Freitas (2006). A Tabela 3.1 apresenta um resumo das principais características das rodadas realizadas para este estudo com o modelo BRAMS.

Tabela 3.1 – Resumo das principais características do experimento

Instante inicial	10 a 19 de Janeiro as 12:00 UTC (1979-2010)	
Instante final	31 de Maio as 18:00 UTC (1979-2010)	
Tempo de integração	3342 horas (~4,5 meses)	
Centro da grade	19°S e 54,4°W	
Resolução horizontal nominal	30 km	
Número de níveis verticais	42 níveis	
Dinâmica	Não-hidrostático	
Processos Físicos	Convecção profunda	GF (GRELL; FREITAS, 2013) com fechamento <i>ensemble</i>
	Convecção rasa	Descrita por Souza (1999)
	Difusão turbulenta	Fechamento é de ordem 2.5 (MELLOR; YAMADA, 1982)
	Radiação	CARMA (descrito por LONGO et al., 2006)
	Microfísica de nuvens	Descrita por Walko et al. (1995)
	Superfície	JULES (descrito por MOREIRA et al., 2013)

3.3 Descrição dos dados

Para a verificação da consistência dinâmica das previsões e caracterização dos padrões de circulação atmosférica sobre a AS foram utilizados dados mensais de reanálise do *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) desenvolvido pelo NCEP, para as variáveis pressão atmosférica, vento zonal e meridional nos altos (200 hPa) e baixos (850 hPa) níveis. Os dados de reanálise do CFSR/NCEP são o estado-da-arte em assimilação de dados globais (SAHA et al., 2010). Estes dados foram desenvolvidos com alta resolução para o período de 1979 a 2010, uma vez que o modelo atmosférico global usado para simular o conjunto de reanálise do NCEP possui resolução de aproximadamente 38 km com 64 níveis na vertical (T382L64). Este modelo possui espaçamento de grade de 0.25° entre as latitudes de 10S e 10N, aumentando gradualmente na direção dos pólos até 0.5° nas latitudes de 30N e 30S.

Para a variável temperatura do ar a 2 metros foram utilizados dados de reanálises do projeto Era-interim do ECMWF (DEE et al., 2011) que são uma extensão do projeto Era-40 (UPPALA et al., 2005) com alguns avanços na assimilação de dados, no uso de observações e na física do modelo. A resolução espacial do dado de temperatura é a mesma dos dados do CFSR ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$).

Os dados usados para validar a precipitação sazonal prevista pelo modelo numérico foram dados de precipitação do *Climate Prediction Center* (CPC) descritos em Chen e Xie (2008) com resolução horizontal de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ de latitude e longitude. O CPC é considerado um conjunto de dados de referência e já foi avaliado para estudos de modelagem climática (SILVA et al., 2007). Esses dados são baseados principalmente em dados diários de chuva observada interpolados pelo método de interpolação ótima (GANDIM, 1965).

3.4 Metodologia para avaliação das previsões

As previsões foram avaliadas de forma subjetiva e objetiva para os campos médios trimestrais das variáveis de interesse deste estudo: precipitação, pressão atmosférica, temperatura do ar, vento zonal e meridional nos altos (200hPa) e baixos (850hPa) níveis. O desempenho das previsões do modelo regional foi investigado em todo o domínio da América do Sul.

3.4.1 Análise Subjetiva

Na primeira etapa desta avaliação, os resultados foram analisados de forma subjetiva. Os campos médios trimestrais das variáveis de precipitação, pressão ao nível médio (PNM), temperatura do ar e circulação atmosférica de altos (200hPa) e baixos (850hPa) níveis para MAM de 1979 a 2010 foram comparados com os dados observados do CPC e com a reanálise do CFRS/NCEP e ERA-interim. Essa comparação tem por objetivo avaliar o desempenho do MCGA/CPTEC e do BRAMS em prever alguns padrões climáticos sazonais sobre a AS como: o posicionamento e a intensidade dos jatos subtropicais e dos Anticiclones Subtropicais do Atlântico Sul (ASAS) e do Pacífico Sul (ASPS).

Mapas climatológicos das variáveis de interesse deste estudo foram construídos para comparação com as climatologias do MCGA/CPTEC e das observações. Com isso, será possível definir um novo pacote climatológico de previsões climáticas sazonais numéricas para que possam ser úteis em trabalhos futuros.

Os anos de contrastes climáticos El Niño e La Niña ocorridos durante o período 1979-2010 também foram analisados através da comparação dos padrões previstos pelo modelo regional com os padrões observados. Os anos de El Niño e La Niña (Tabela 3.4) foram selecionados com base nos dados de anomalia de TSM na região do Niño 3.4 para o trimestre MAM, disponível no CPC do NCEP. Foram realizadas análises de compostos condicionados a

manifestação de episódios El Niño (La Niña) através da comparação da média das previsões produzidas pelo modelo regional, pelo modelo global e pelas observações. A Figura 3.2 ilustra as anomalias de TSM dos compostos selecionados na tabela 3.4, para o trimestre MAM. São observadas anomalias negativas (positivas) de TSM no Pacífico equatorial central e leste com núcleos máximos de $-1,5$ a $-2,0^{\circ}\text{C}$ ($1,0$ a $1,5^{\circ}\text{C}$) caracterizando a atuação do fenômeno La Niña (El Niño).

Tabela 3.2 – Classificação dos anos de contrastes climáticos

Anos de El Niño	1983, 1987, 1992, 1998 e 2010
Anos de La Niña	1985, 1989, 1999, 2000 e 2008

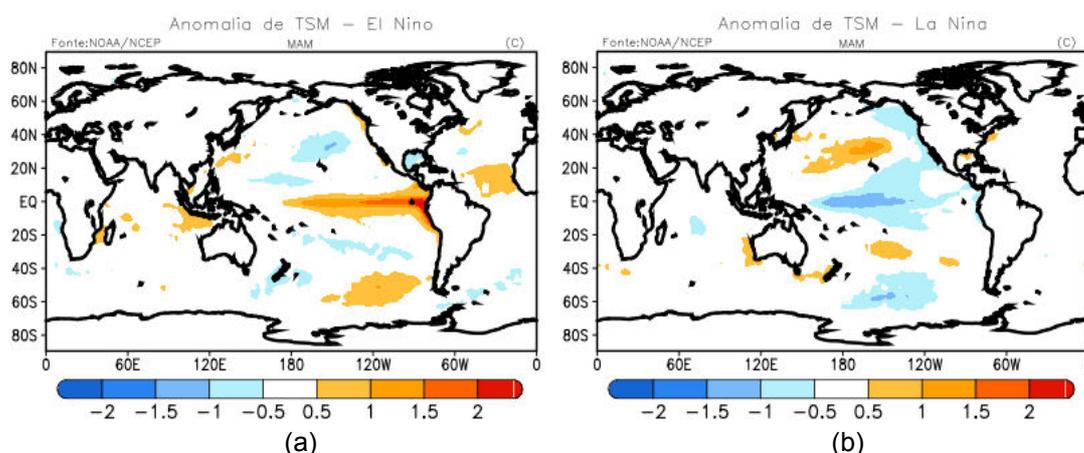


Figura 3.2 – Anomalias de TSM durante o trimestre MAM para composições de El Niño (a) e La Niña (b), cujos anos estão descritos na Tabela 3.2

3.4.2 Análise Objetiva

Para avaliação das previsões numéricas propostas no escopo deste trabalho, foi realizada uma análise objetiva comparando as previsões do modelo BRAMS com a observação, assim como com as previsões do MCGA/CPTEC. O desempenho da modelagem dinâmica das previsões climáticas sazonais foi quantificado através do cálculo de índices estatísticos.

O uso de uma só medida de qualidade pode ser inadequado para estimar o desempenho de modelos numéricos (WEBER et al., 1982). Entretanto, a utilização de diversos índices estatísticos tem sido um método mais coerente para tal abordagem (SILVA, 2007). Para avaliar a destreza do experimento em prever as variáveis precipitação e temperatura do ar, foram calculados três índices estatísticos:

- Viés – É a média das diferenças entre a variável prevista e a observada, usado para identificar erro sistemático nas previsões. Esta métrica permite verificar se o modelo subestima ou superestima os valores médios das previsões. O viés pode assumir qualquer valor real, sendo que quanto mais próximo de zero menor é o erro sistemático.

$$V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)$$

Em que P_i é o valor previsto no ano i , O_i é o valor observado no ano i e N é o número de anos previstos e observados (32 anos).

- Coeficiente de Correlação de Pearson (CP) – dado pela razão entre a covariância e o produto dos desvios padrão entre as previsões e observações. A CP é um índice muito utilizado para avaliar o grau de destreza entre os valores previstos e observados. Quanto mais positivo (negativo) for o valor da correlação, maior (menor) será a força da associação entre as anomalias previstas e observadas. Valores positivos de CP indicam associação positiva entre as anomalias previstas e observadas. Ou seja, nestas condições, para a maioria dos anos avaliados, o sinal da anomalia prevista tem o mesmo sinal da anomalia observada. A CP varia de -1 a 1.

$$CP = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 (O_i - \bar{O})^2}}$$

Em que \bar{P} é a média dos valores previstos e \bar{O} é a média dos valores observados.

- Raiz do erro quadrático médio (REQM) – É utilizado para estimar a magnitude do erro das previsões. Quanto menor (próximo de zero) for o REQM melhor é a habilidade do modelo em realizar previsões.

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}$$

CAPÍTULO 4

CALIBRAÇÃO DO MODELO BRAMS

Neste capítulo são apresentadas informações sobre o uso do modelo BRAMS atualmente calibrado para a escala de tempo (previsões para até 7 dias) bem como os procedimentos de calibração para que o mesmo possa ter desempenho útil na escala de clima sazonal. Alguns testes de parametrizações físicas (tais como turbulência na camada limite planetária, convecção, radiação e superfície), influência da condição inicial e um filtro de ruídos numéricos sobre a região dos Andes foram realizados a fim de obter uma versão a qual pudesse representar o clima de forma mais realística possível. Todos os testes foram realizados para dois episódios de extremos climáticos um ano de El Niño (1983) e um ano de La Niña (1989), durante o trimestre MAM que é a proposta deste trabalho. Ambos os episódios foram classificados como fortes (www.cptec.inpe.br/enos).

A ocorrência ou não de chuva e sua intensidade é uma das principais preocupações da sociedade tanto na escala de tempo quanto de clima (SANTOS, 2010). Portanto, a previsão da variável precipitação é prioridade nos modelos numéricos. Com o objetivo de melhorar cada vez mais a previsão dessa variável, o CPTEC vem avançando em suas pesquisas e desenvolvimentos científicos com modelo BRAMS e atualmente está com sua versão 5.0 em uso operacional para previsão de tempo.

A versão 5.0 do BRAMS gera previsões numéricas com resolução espacial de 5km, enquanto que a versão anterior realizava previsões com resolução espacial de 20km. O BRAMS utiliza a formulação não-hidrostática, que representa com maior precisão processos físicos de menor escala como, por exemplo, o desenvolvimento e a dissipação de nuvens (chuva). Como mencionado no Capítulo 3, outros avanços nas parametrizações físicas e na

dinâmica do modelo também foram realizados, como, por exemplo, as parametrizações de convecção GF/G3-D.

A Figura 4.1 mostra os mapas de precipitação estimada pelo satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM, Fig. 4.1a) e prevista com o BRAMS 5km (Fig. 4.1b), para 24 horas. As setas vermelhas indicam as duas localidades onde o modelo conseguiu prever com êxito os acumulados de precipitação estimada. Verifica-se na análise sinótica em 250 hPa do dia 26 de junho de 2013 as 00Z (Fig. 4.2) a atuação de um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN, 38°S/57°W) sobre o leste da Argentina e Sul do Uruguai (GPT/CPTEC/INPE,2013). Portanto, fica evidente que o modelo conseguiu reproduzir o padrão de precipitação associada a esse sistema. Sobre a região Norte da AS e Atlântico Norte, observa-se que o modelo também conseguiu capturar o posicionamento e intensidade da precipitação associada com ZCIT.

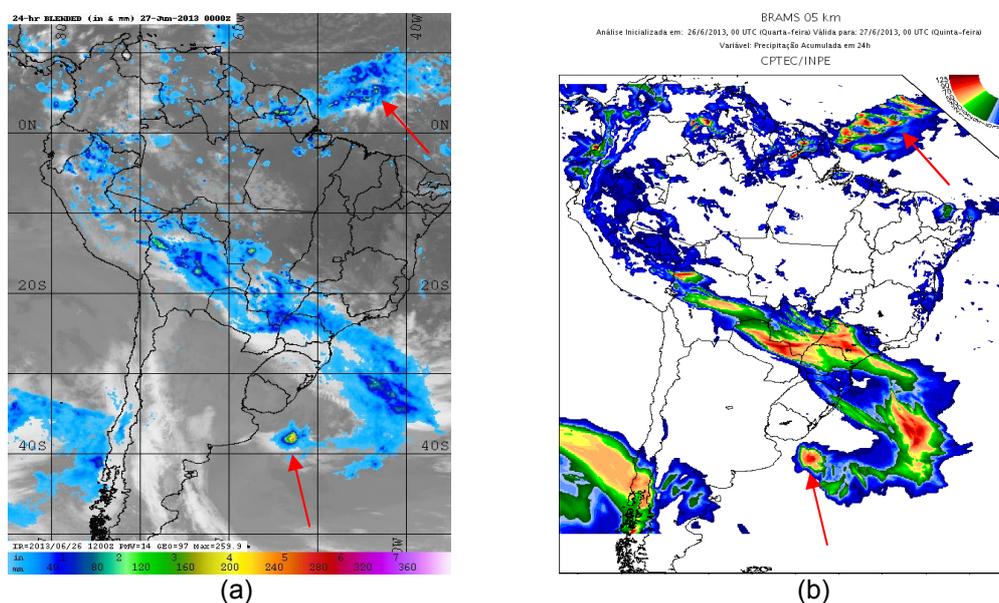


Figura 4.1 - Mapas de precipitação acumulada em 24 horas estimada via radar abordo do satélite TRMM (a) e prevista pelo modelo BRAMS (b). Fonte: CPTEC/INPE

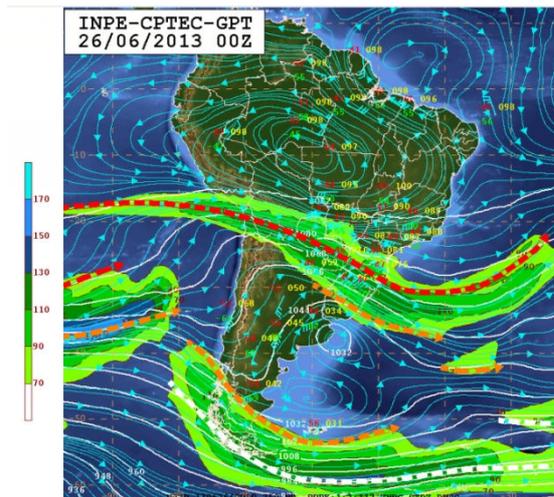


Figura 4.2 - Análise sinótica em 250 hPa para o dia 26 de junho de 2013 às 00Z. Fonte: GPT/CPTEC/INPE

A importância da qualidade e confiabilidade das previsões climáticas sazonais no âmbito socioeconômico, como discutido no Capítulo 2, vislumbrou-se a possibilidade de poder contribuir com mais uma ferramenta numérica para este prognóstico. Para tal, é necessário antes calibrar o modelo BRAMS para a previsão climática nestas escalas temporais, visto que, operacionalmente esta versão vem sendo usado apenas para previsão de tempo em escala de horas a dias.

Alguns processos físicos, tais como radiação, turbulência, nuvens, fluxos de superfície e outros, não são resolvidos pelos modelos e precisam ser parametrizados, ou seja, seus efeitos sobre a grande escala devem ser representados estatisticamente. Os modelos necessitam de diferentes níveis de complexidade física que estão relacionados com as escalas envolvidas como, por exemplo: tempo, clima ou projeções climáticas de longo prazo.

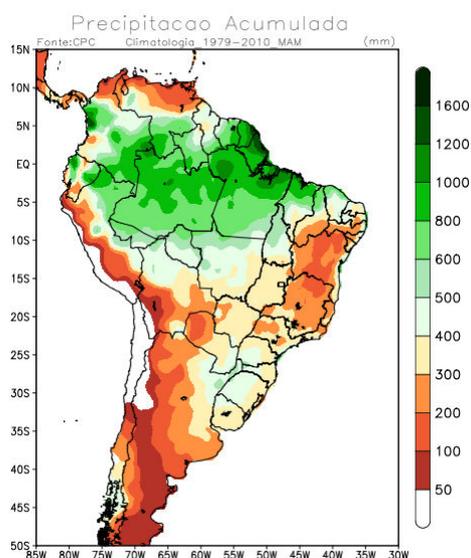
Dentre os processos físicos mais importantes para a previsão do clima destacam-se a radiação solar incidente, a mudança na cobertura vegetal, os fluxos de superfície, corpos d'água, TSM, dentro outros (MONCUNILL et al., 2002). Com isso, é necessário verificar e realizar ajustes nas parametrizações utilizadas no BRAMS 5.0 para sua versão climática. Neste intuito, vários testes foram feitos para obter uma versão que pudesse representar de forma

minimamente satisfatória a evolução climática da atmosfera desenvolvida pelo modelo BRAMS. A configuração das rodadas apresentadas aqui é a mesma descrita no Capítulo 3, que também foi utilizada na obtenção dos resultados finais deste trabalho. Porém, para reduzir o volume de processamento computacional, nesta fase do trabalho apenas um membro (CI do dia 13 de janeiro) foi utilizado para simular e prever os anos propostos. Entretanto, após realizar a calibração do modelo, para a avaliação histórica da destreza das previsões do modelo calibrado para o período de 1979-2010 foi gerado um conjunto de 10 membros de previsão para cada ano, cujos resultados são apresentados no Capítulo 5.

Na Figura 4.3 são apresentados os mapas da climatologia de precipitação observada (média no período de 1979-2010) e da precipitação acumulada nos anos de 1983 e 1989, para o trimestre MAM. Climatologicamente (Fig. 4.3a), este trimestre caracteriza-se pelos elevados totais pluviométricos, em torno de 1600 mm sobre a região Norte e setor norte da região Nordeste do Brasil devido ao deslocamento anual da ZCIT. Sobre a região Sul do Brasil e na costa leste do NEB, são observados totais da ordem de 400 mm, em razão da circulação de brisa que adveceta umidade do oceano para o continente. No interior do NEB são observados reduzidos volumes de precipitação caracterizando o clima semiárido dessa região, com acumulados de precipitação inferior a 400 mm. O extremo norte da AS também apresenta déficit de precipitação. As regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, Bolívia e Paraguai apresentam uma diminuição gradativa da precipitação representando o término da sua estação chuvosa compreendida entre os meses de dezembro a fevereiro. A precipitação nessa região durante o trimestre MAM deve-se principalmente a sistemas sinóticos oriundos da região Sul da AS que conseguem atingir latitudes mais ao Norte, com algumas diferenças na intensidade dos sistemas. A região Sul do Brasil, Uruguai e norte/nordeste da Argentina possui um regime de chuva espacialmente uniforme durante MAM,

verificam-se acumulados da ordem de até 600 mm, sendo a maior parte dessa precipitação associada à passagem de sistemas frontais.

Na Figura 4.3b observa-se o padrão da distribuição de precipitação sobre a AS durante um evento de El Niño que é caracterizado por apresentar precipitação reduzida no setor norte e leste da Amazônia e norte do NEB e aumento da precipitação na costa oeste da AS, região Sul do Brasil e setor nordeste da Argentina. Para o ano de Lã Niña (Fig. 4.3c) verifica-se um padrão inverso em relação à distribuição da precipitação. Com redução de precipitação sobre grande parte da região sul do Brasil e aumento de precipitação principalmente no Norte e Nordeste do Brasil. As anomalias de precipitação para os anos de extremos climáticos foram discutidas no Capítulo 5, onde é possível verificar com mais detalhes a diferença na distribuição da precipitação sobre a AS.



(a)

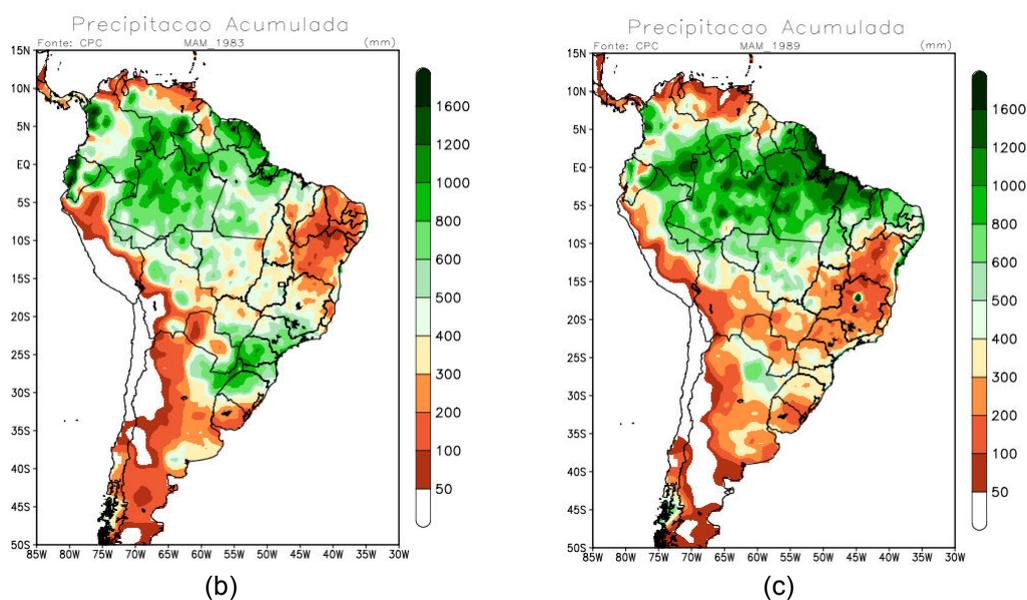


Figura 4.3 - Mapas da precipitação acumulada (mm) durante o trimestre MAM para média climatológica (a), El Niño de 1983 (b) e La Niña de 1989 (c). Os dados de precipitação foram fornecidos pelo CPC (CHEN; XIE, 2008)

Nas previsões e simulações com o modelo BRAMS para fins de calibração inicialmente foi utilizado o mesmo código fonte usado para gerar as previsões de tempo operacional do CPTEC/INPE. Porém, algumas alterações foram feitas na tentativa de adequar as previsões para o modo climático. A grade do modelo foi alterada de 5km para 30 km, devido, principalmente ao caráter climático da simulação não exigir, a princípio, esse detalhamento de grade (5km) e as limitações computacionais. A parametrização de convecção profunda foi alterada de GD/G3-D para GF que foi recentemente desenvolvida para escalas de 1 a 100 km.

A Figura 4.4 mostra os mapas de precipitação acumulada (mm) para os eventos de El Niño de 1983 e La Niña de 1989, previstos pelo modelo BRAMS. Observa-se que o modelo subestima a precipitação observada (Fig. 4.3b e 4.3c) em praticamente todo o território brasileiro, em ambos os anos. Na costa oeste da AS, entre a Colômbia e extremo norte do Chile, o modelo BRAMS superestima a observação. Desta forma, o resultado da previsão não foi satisfatório ao utilizar o código fonte da previsão de tempo apenas com as modificações acima descritas. Assim, observou-se a necessidade de investigar

onde o modelo estava divergindo seus resultados com os dados observados para tentar calibrar as parametrizações físicas e melhorar seu desempenho. E, com isso, poder inferir sobre a capacidade do modelo regional BRAMS em realizar previsões de clima.

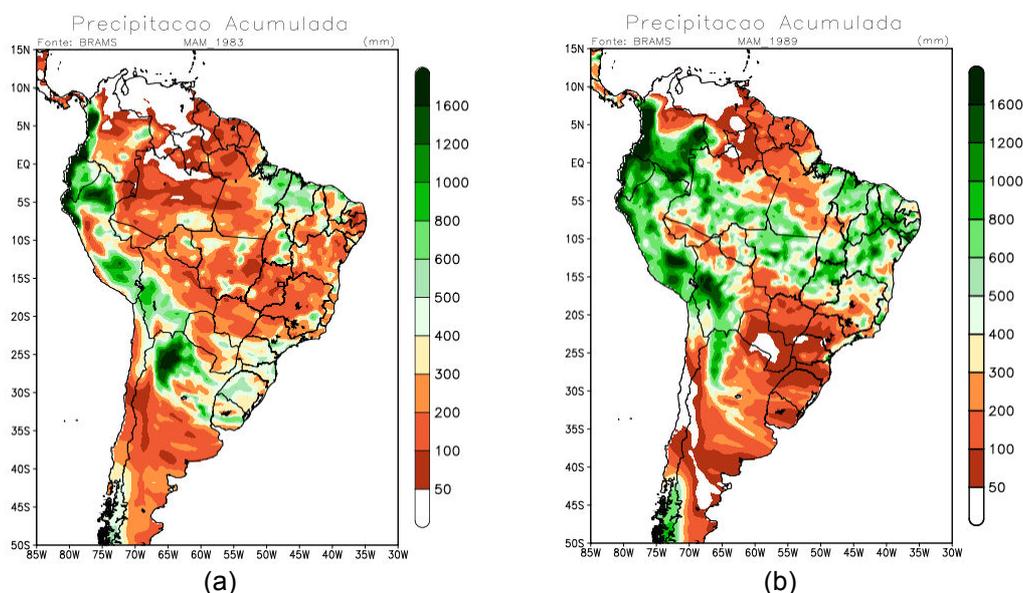


Figura 4.4 - Mapas da precipitação acumulada (mm) durante o trimestre MAM para o El Niño de 1983 (a) e La Niña de 1989 (b) prevista pelo modelo BRAMS

Partindo do código que gerou os resultados da Figura 4.4, foram feitos testes modificando a configuração física do modelo BRAMS para tentar entender o porquê da ausência de precipitação sobre a AS nas previsões feitas pelo modelo. A primeira mudança foi feita na parametrização de radiação na qual, foi introduzida uma fração de cobertura de nuvens da ordem de 20%. Na versão original, este parâmetro não era considerado. Na forma anterior, o modelo apresentava um déficit de radiação solar incidente em superfície produzindo uma atmosfera excessivamente fria e estável em baixos níveis, com forte impacto no balanço de radiação. Visto que a radiação solar é um dos principais processos físicos quando se trata de previsão de clima, esta precisa ser bem resolvida pelo modelo a fim de contribuir com maior acurácia na representação das condições climáticas observadas. Outras configurações

também foram adotadas, o coeficiente de *nudging* (relaxação Newtoniana) para temperatura e umidade foram reduzidos de 1 para 0.6, deixando o modelo mais livre para calcular/prognosticar essas variáveis. No caso da pressão, o valor foi alterado de 1 para 4 impondo ao modelo maior consistência neste parâmetro com as análises usadas como condição inicial. A turbulência escolhida nesta previsão foi a originalmente desenvolvida por Mellor e Yamada (1974) e não foi usada a opção de advecção monotônica, custosa do ponto de vista computacional para a escala de previsão aqui utilizada. E por fim, foi usada uma parametrização convectiva recém desenvolvida que apresenta um comportamento suave na transição de escalas, incluindo a escala cinza da convecção profunda. Esta ainda inclui efeitos de aerossóis que são contabilizados através da dependência da autoconversão e evaporação com a quantidade de núcleos de condensação na base da nuvem, apesar desta opção não ser aplicada no presente estudo.

Os mapas da Figura 4.5 mostram a precipitação acumulada (mm) utilizando uma versão calibrada do modelo BRAMS para previsão climática sazonal, cujas modificações foram citadas no parágrafo anterior. Para o ano de El Niño (Fig. 4.5a) é possível observar que o modelo consegue capturar o padrão de precipitação associado a esse evento, com a redução da precipitação principalmente no leste da região Norte e NEB e o aumento de precipitação na região Sul. Na Figura 4.5b, o padrão de precipitação inverso referente ao evento de La Niña também é verificado. Em ambos os anos o modelo tendem a subestimar a precipitação nas regiões Norte, principalmente na Amazônia, e Sul do Brasil e a superestimar em praticamente toda a região Nordeste. Esses resultados concordam com os obtidos por Seth e Rojas (2003).

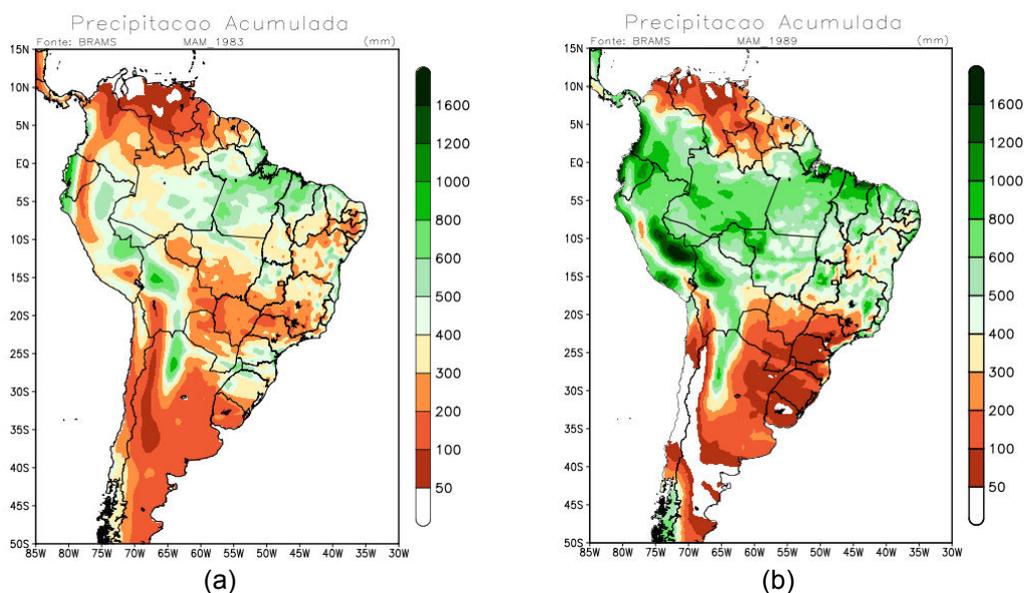


Figura 4.5 - Mapas da precipitação acumulada (mm) durante o trimestre MAM para o El Niño de 1983 (a) e La Niña de 1989 (b) prevista pelo modelo BRAMS modificado

Até o momento os mapas de precipitação acima são resultados do modelo regional no modo de previsão, na qual, as CI são as previsões do MCGA do CPTEC e a TSM é persistida. Para tentar estudar com mais detalhes os processos físicos inseridos no BRAMS foi feita uma simulação, com CI (reanalysis do NCEP) e como CC a TSM observada para o período de estudo. As condições iniciais e de fronteira fornecem informações sobre a estrutura atmosférica que orientam os sistemas sinóticos e após essa fase o modelo simula as circulações geradas pelas forçantes locais (topografia) e/ou embebidas nos sistemas de grande escala. Portanto e em princípio, quanto maior a qualidade dos dados iniciais e de contorno melhor será o resultado da simulação.

A finalidade dessa simulação é verificar a habilidade do modelo em reproduzir informações climáticas em alta resolução baseada apenas na sua física interna e diante dos resultados encontrados poder sugerir novas mudanças na configuração do modelo, visando gerar um produto com maior

acurácia e confiabilidade, principalmente para os processos de tomada de decisão.

A Figura 4.6 mostra os mapas de precipitação acumulada (mm) utilizando a CI e CC observada para ambos os eventos climáticos extremos. Observa-se que a simulação (Fig. 4.6a) apresentou melhores resultados sobre a região Norte da AS, principalmente sobre os Estados do Amazonas e Mato Grosso, quando comparado com os resultados da previsão do modelo regional (Fig. 4.5a). Para as regiões Nordeste e Sul do Brasil o inverso foi verificado, a previsão do modelo regional para o ano de El Niño (Fig. 4.5a) foi mais coerente com a observação (Fig. 4.3b) do que a simulação (Fig. 4.6a). Para o ano de 1989 a simulação do modelo regional (Fig. 4.6b) esteve mais próxima da observação (Fig. 4.3c) do que a previsão do modelo (Fig. 4.5b). Para ambos os anos, tanto a previsão do modelo como a simulação, o modelo superestimou a precipitação sobre os Andes.

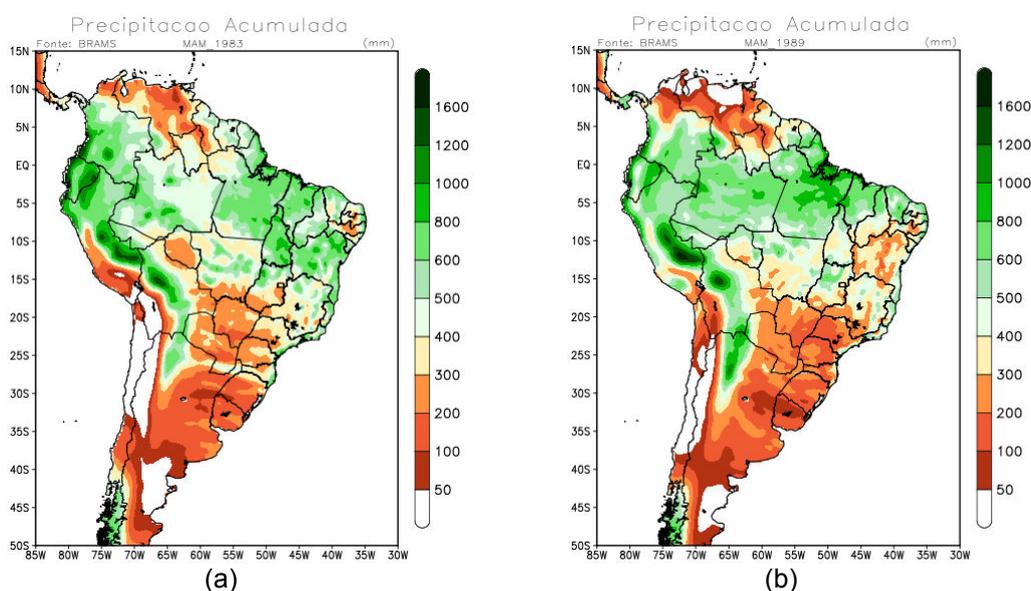


Figura 4.6 - Mapas da precipitação acumulada (mm) durante o trimestre MAM para o El Niño de 1983 (a) e La Niña de 1989 (b) simulada pelo modelo BRAMS modificado

A partir dos resultados apresentados na Figura 4.6, observou-se a necessidade de estudar o impacto da condição inicial do MCGA/CPTEC produzidas com diferentes representações de parametrizações de convecção profunda nas previsões climáticas de eventos extremos com o BRAMS. As previsões do modelo global (Fig. 4.7), que até o momento alimentaram o modelo regional, utilizaram como parametrização de convecção profunda o esquema de Kuo (1974). Este esquema baseia-se fundamentalmente na convergência de umidade de grande escala. Porém tem como desvantagem a não representação das correntes descendentes em escala convectiva e processos de mesoescala. O MCGA também foi rodado como a parametrização do tipo Grell (GRELL; DÉVÉNDYI, 2002) (Fig. 4.8) para gerar CI para o modelo regional (Fig. 4.9). O esquema Grell inclui efeitos de correntes descendentes e se baseia em somente um tipo de nuvem com entranhamento pré-estabelecido. O fechamento para definição da intensidade do processo convectivo (em termo de fluxo de massa na base da nuvem) se baseia na hipótese de quase-equilíbrio (ARAKAWA; SCHUBERT, 1974). Os testes de parametrização de convecção profunda no MCGA/CPTEC foram realizados para tentar identificar qual o tipo de parametrização apresenta melhor resultado para as previsões climáticas sobre a AS com o modelo BRAMS.

As Figuras 4.7a e 4.8a mostram os mapas de precipitação acumulada (mm) para o ano de 1983 (El Niño) prevista pelo MCGA do CPTEC com parametrização do tipo Kuo e Grell, respectivamente. É possível notar que o modelo global com parametrização do tipo Grell (Fig. 4.8a) apresentou melhores resultados em toda a AS, exceto na região central do Brasil onde superestima os acumulados de precipitação observados (Fig. 4.3a). Para o ano de La Niña (Fig. 4.7b e 4.8b) a previsão do modelo global do CPTEC também apresenta melhores resultados com a parametrização do tipo Grell do que com a Kuo. Porém, o modelo global Grell subestimou a precipitação observada (Fig. 4.3b) nas regiões Sul, Sudeste e no setor sul do NEB e, de forma mais intensa, no extremo norte da Argentina.

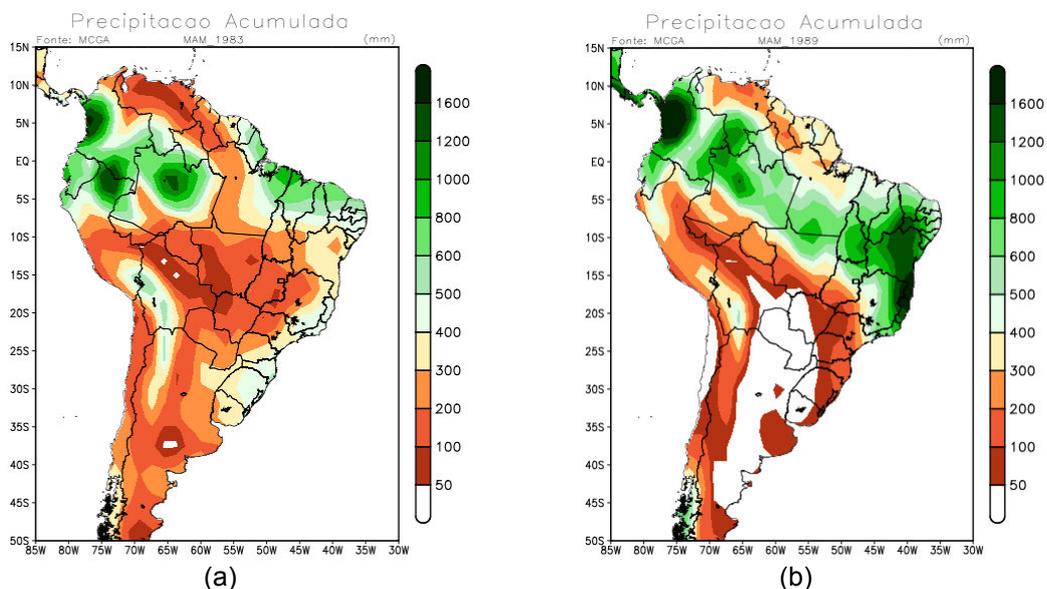


Figura 4.7 - Mapas da precipitação acumulada (mm) durante o trimestre MAM para o El Niño de 1983 (a) e La Niña de 1989 (b) prevista pelo modelo MCGA/CPTEC com parametrização de convecção do tipo Kuo

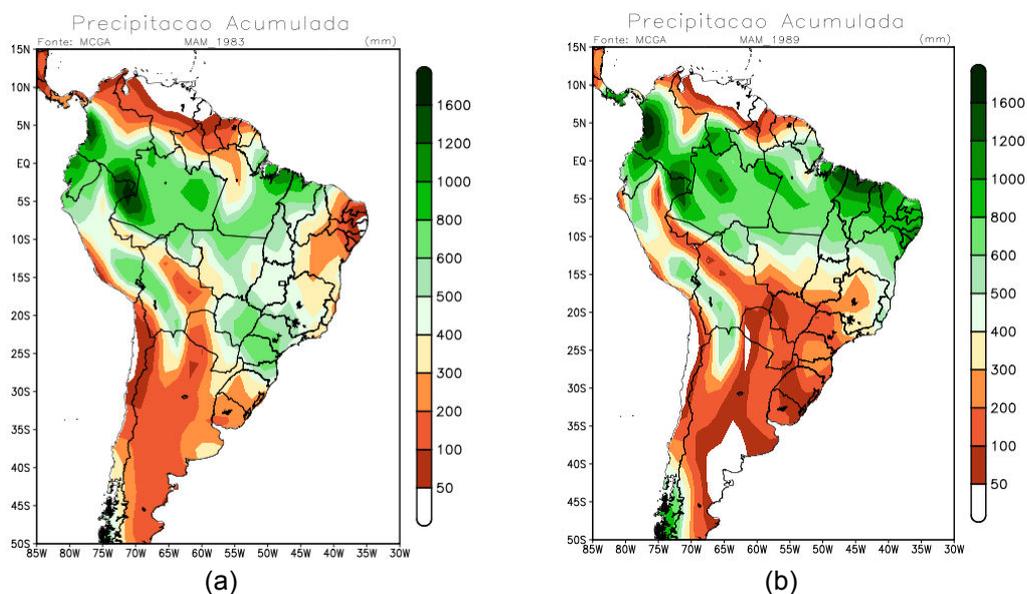
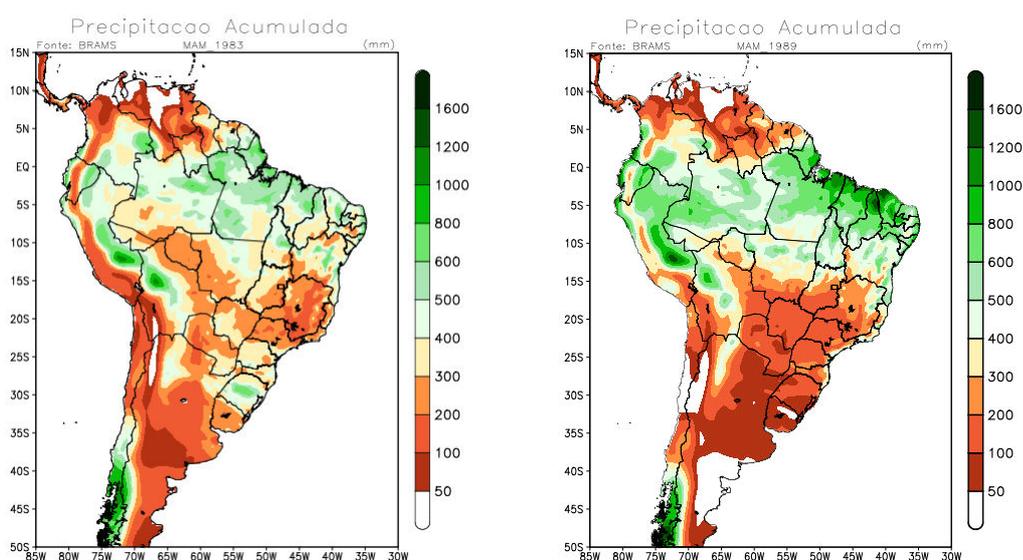


Figura 4.8 - Mapas da precipitação acumulada (mm) durante o trimestre MAM para o El Niño de 1983 (a) e La Niña de 1989 (b) prevista pelo modelo MCGA/CPTEC com parametrização de convecção do tipo Grell

Comparando os resultados do modelo regional, sobre a influência da CI do MCGA com diferentes parametrizações de convecção (Fig. 4.5 e 4.9), com os

mapas de precipitação observada (Fig. 4.3) verifica-se que para o ano de El Niño (1983) a previsão utilizando o esquema Grell (Fig. 4.9a) apresenta resultados razoavelmente melhores no setor norte e leste da Amazônia e semelhante ao resultado anterior sobre o NEB. Na região Sul a previsão utilizando a CI com esquema Kuo (Fig. 4.5a) apresentou resultados mais satisfatórios. Para o ano de La Niña (1989) o esquema Kuo (Fig. 4.5b) apresentou melhores resultados sobre toda região Norte da AS, já no setor Sul do NEB e região Sudeste o esquema Grell (Fig. 4.9b) apresentou resultados mais próximos dos observados. Na região Sul do Brasil ambos os esquemas subestimaram a precipitação observada.



(a)

(b)

Figura 4.9 - Mapas da precipitação acumulada (mm) durante o trimestre MAM para o El Niño de 1983 (a) e La Niña de 1989 (b) prevista pelo modelo BRAMS modificado com CI do MCGA com convecção do tipo GRELL

O MCGA do CPTEC apresenta uma superestimativa de precipitação sobre os Andes. Esse comportamento pode estar relacionado a erros numéricos na representação da topografia desta região (FIGUEROA, 1999) que por sua vez vai ocasionar erros nos processos convectivos (OYAMA, 2006). Esse erro

segue para o modelo regional, que também tem dificuldade em representar a topografia sobre os Andes e, também possui superestimativas sobre estas áreas. Para tentar minimizar esse problema foi construído um filtro na parametrização de convecção do BRAMS sobre a região dos Andes na qual, o parâmetro CAPMAX, que determina a função gatilho da parametrização, foi reduzido de 75 hPa para 2 hPa, inibindo fortemente a ocorrência de precipitação espúria sobre esta região.

Na Figura 4.10a,b observa-se os mapas de precipitação acumulada (mm) para o ano de 1983 (El Niño) e 1989 (La Niña) prevista pelo modelo BRAMS utilizando o filtro de ruídos sobre os Andes, respectivamente. Comparando os resultados encontrados com os mapas da Figura 4.9 verifica-se que para ambos os anos a precipitação foi suavizada sobre os Andes, principalmente próximo entre as latitudes de 15°S e 35°S e longitude de 70°W e 65°W. Porém, a aplicação do filtro afetou a distribuição da precipitação em outras áreas da AS. Para o ano de 1983, Figura 4.10a, o modelo subestimou a precipitação observada (Fig. 4.3b) e a prevista com o modelo sem o filtro (Fig. 4.9a) sobre a Amazônia, região Sul da AS e parte do Sudeste do Brasil e superestimou no NEB.

No ano de La Niña as conclusões são semelhantes, exceto no sudoeste da Amazônia onde o modelo com filtro (Fig. 4.10b) superestimou a precipitação observada (Fig. 4.3c) e prevista com o modelo sem filtro (Fig. 4.9b). Portanto, os resultados da aplicação do filtro não foram satisfatórios para esse experimento. Como o problema não está relacionado a convecção (redução do CAPMAX) é provável que o problema das ondas de precipitação espúria sobre a região dos Andes esteja na representação da topografia.

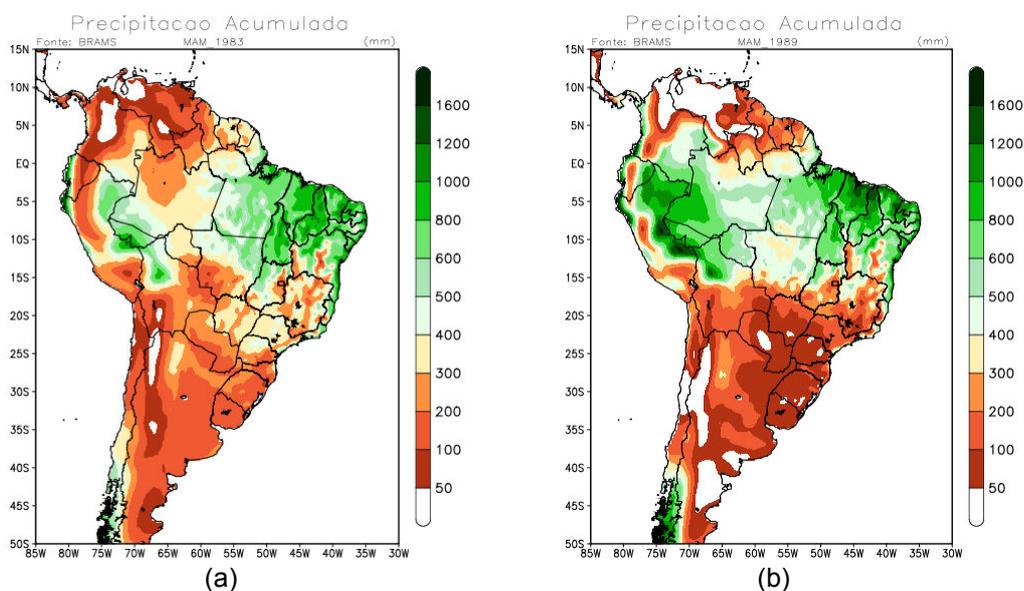


Figura 4.10 - Mapas da precipitação acumulada (mm) durante o trimestre MAM para o El Niño de 1983 (a) e La Niña de 1989 (b) prevista pelo modelo BRAMS utilizando um filtro de ruídos sobre os Andes

Em suma, os resultados das previsões do modelo regional não foram satisfatórios ao utilizar o código fonte da previsão de tempo. Porém, quando inserida as mudanças físicas na radiação solar e convecção profunda o modelo consegue capturar os padrões de precipitação associada os eventos climáticos extremos, como a redução (aumento) da precipitação principalmente no leste da região Norte e NEB e o aumento (redução) de precipitação na região Sul para o ano e El Niño (La Niña).

Para a segunda etapa deste trabalho, descrita no Capítulo 3, o MCGA foi configurado com o esquema grell, em função dos resultados dos experimentos de calibração, para gerar as condições iniciais necessárias para alimentar o modelo regional. Resultados de outros experimentos também foram levados em consideração durante o processo de tomada de decisão. Outro ponto importante e poder comparar o *skill* do modelo global utilizando o esquema Kuo (atualmente utilizado operacionalmente) com o esquema Grell investigado no presente estudo.

CAPÍTULO 5

AVALIAÇÃO SUBJETIVA DOS PADRÕES ESPACIAIS PREVISTOS E OBSERVADOS

Neste Capítulo será apresentada uma análise sobre os aspectos gerais dos padrões climatológicos e dos compostos (médias para anos de El Niño e La Niña) sazonais das variáveis precipitação, temperatura do ar (a 2 metros acima da superfície), pressão atmosférica e circulação em altos (200 hPa) e baixos (850 hPa) níveis observados, bem como os mapas previstos pelo modelo global (MCGA/CPTEC) e pelo modelo regional (BRAMS), para o trimestre MAM de 1979-2010 sobre a AS. Cada ano é representado pela média dos 10 membros de previsão gerados pelos modelos. A discussão visa identificar alguns padrões climáticos sazonais sobre a AS como: o posicionamento e a intensidade dos jatos subtropicais e dos Anticiclones Subtropicais do Atlântico Sul (ASAS) e do Pacífico Sul (ASPS), assim como a influência da manifestação de episódios El Niño (La Niña) sobre esses padrões.

5.1 Precipitação

5.1.1 Padrões Climatológicos

A região Nordeste do Brasil apresenta baixos índices pluviométricos quando comparada com outras regiões do Brasil, e sua estação chuvosa restringe-se a poucos meses (fevereiro a maio). Uma vez que o pico máximo da estação chuvosa do setor norte da região NEB ocorre no trimestre MAM, a principal motivação desta pesquisa é avaliar a capacidade dos modelos MCGA/CPTEC e BRAMS em representar o comportamento dos padrões climatológicos de precipitação desta estação, bem como estudar a influência do fenômeno ENOS sobre estes padrões, o qual, como documentado na literatura, provoca alterações na circulação geral da atmosfera, afetando a variabilidade pluviométrica dessas regiões.

A Figura 5.1 mostra os mapas climatológicos da precipitação observada e prevista pelos modelos global e regional para o outono (MAM) no período de 1979 a 2010. A climatologia da precipitação observada (Fig. 5.1a) evidencia valores máximos sobre a região Norte da AS e sobre o setor norte de região Nordeste do Brasil, com totais pluviométricos da ordem de até 1600 mm. Esses elevados totais pluviométricos deve-se a atuação direta da ZCIT, que é o principal sistema meteorológico indutor de chuvas nestas regiões, e possui uma variação sazonal alcançando sua posição mais ao sul no período de fevereiro a abril (em aproximadamente 4°S no Oceano Atlântico – HASTENRATH, 1991). No interior do NEB são observados reduzidos volumes de precipitação caracterizando o clima semiárido dessa região, com acumulados de precipitação inferior a 400 mm. Na costa leste do NEB são observados totais pluviométricos reduzidos, em torno de 300 a 500 mm, quando comparados com o setor norte do NEB. A precipitação do leste do NEB deve-se a circulação de brisa marítima que advecta umidade para o continente. O extremo norte da AS também apresenta reduzidos índices pluviométricos, com acumulados da ordem de 300 mm.

As regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, Bolívia e Paraguai apresentam reduzidos índices pluviométricos com acumulados da ordem de 400 mm, representando o término da estação chuvosa destas regiões, compreendida entre os meses de dezembro a fevereiro. A precipitação nestas regiões durante o trimestre MAM deve-se, principalmente, a entrada de sistemas sinóticos oriundos da região Sul da AS que conseguem atingir latitudes mais ao norte. A região Sul do Brasil, Uruguai e norte/nordeste da Argentina possui um regime de chuva bastante uniforme durante o ano. Durante o período MAM esta região apresenta acumulados de chuva da ordem de 500 mm, sendo que a maior parte desta precipitação está associada à passagem de sistemas frontais.

A Figura 5.1b mostra a climatologia da precipitação prevista pelo modelo global MCGA do CPTEC. Comparando o padrão observado (Fig. 5.1a) com o padrão previsto (Fig. 5.1b) é possível notar que o modelo reproduz o padrão de

precipitação observado adequadamente em praticamente todo o domínio da AS. Entretanto, em algumas regiões foi observado que o modelo superestimou ou subestimou os valores observados. No extremo norte da AS, na região Norte do Brasil e no setor norte do NEB, o modelo conseguiu capturar bem a distribuição da precipitação observada. Para o interior do NEB, região semiárida, verifica-se que o modelo superestimou a precipitação observada em até 200 mm. No oeste da região Sul do Brasil (Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná) e setor nordeste da Argentina o inverso foi verificado, ou seja, o MCGA subestimou os valores observados. Sobre a região dos Andes notam-se acumulados de precipitação não realísticos (reveja discussão no Capítulo 4 sobre as razões deste comportamento), onde ambos os modelos superestimam os valores observados. As demais regiões apresentam um padrão de precipitação semelhante ao observado. Os resultados do MCGA, aqui apresentados, estão de acordo com os apresentados em Cavalcanti et al. (2002).

Comparando a climatologia da precipitação prevista pelo modelo regional BRAMS (Fig. 5.1c) com a observada (Fig. 5.1a) verifica-se que o modelo conseguiu capturar o principal sinal de precipitação, ou seja, mais chuvoso no Norte e mais seco no Sul. Porém, teve deficiência em reproduzir os totais de precipitação acumulada, subestimando os valores observados sobre a região Norte da AS e setor norte do NEB, da ordem de 200 a 400 mm. Sobre a região Sul, Sudeste e Centro-oeste do Brasil o modelo regional teve dificuldade em reproduzir a precipitação, subestimando a mesma com valores próximos de 300 mm. No interior do NEB e centro norte de Minas Gerais observou-se superestimativa moderada com relação à precipitação observada. Os resultados obtidos com o modelo regional, aqui apresentados, estão de acordo com outros já apresentados por Alves et al. (2005), Oyama (2006) e Alves (2007). De forma geral, pode-se ressaltar que os padrões de precipitação espacial climatológico durante o trimestre MAM previsto pelos modelos atmosféricos (MCGA e BRAMS) conseguem representar razoavelmente bem a

observação, embora sejam notadas subestimativas ou superestimativas em algumas regiões, conforme descrito acima.

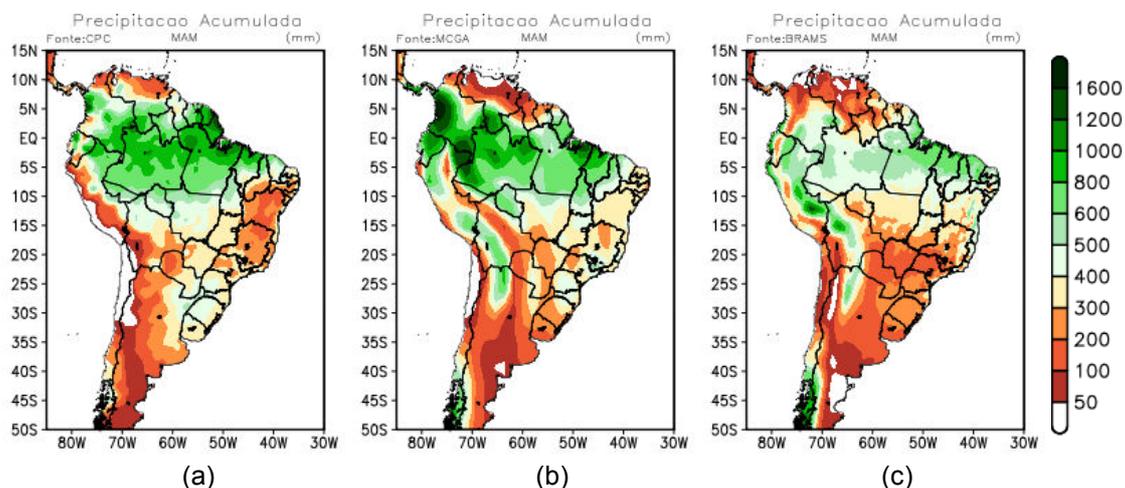


Figura 5.1 - Climatologia (1979-2010) da precipitação acumulada (mm) para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c)

5.1.2 Composições

Nesta seção serão apresentados os mapas de composições médias das anomalias de precipitação acumulada em escala sazonal observada e previstas pelos modelos MCGA e BRAMS. Anomalias positivas (negativa) estão associadas a excesso (redução) de precipitação. Estas anomalias estão relacionadas a episódios do fenômeno ENOS (anos de El Niño e de La Niña), cujas anomalias de TSM média e os eventos selecionados foram descritos no Capítulo 3.

Sabe-se que as regiões tropical e subtropical da AS são diretamente influenciadas por fenômenos climáticos, tais como o ENOS, devido às interações oceano-atmosfera de grande escala na região do Oceano Pacífico Tropical, que por sua vez provocam mudanças na circulação geral da atmosfera. Tais mudanças podem conduzir a anomalias climáticas tais como: secas, inundações e temperaturas elevadas em diversas regiões do globo terrestre (ROPELEWSKI; HALPERT, 1989).

A Figura 5.2a e 5.3a mostram os mapas das composições das anomalias de precipitação acumulada observada para eventos de El Niño e La Niña, respectivamente. Para a composição de El Niño (média de 5 eventos, identificados anteriormente no Capítulo 3) verifica-se um déficit de precipitação sobre a região Norte do Brasil e no setor norte do NEB, com anomalias negativas de até -300 mm (Fig. 5.2a). Esta observação está coerente com vários estudos sobre os impactos do El Niño onde, a célula de Walker muda seu posicionamento climatológico e inibi a atuação da ZCIT (OLIVEIRA, 2001; AMBRIZZI et al., 2004). Para a região Sul do Brasil e extremo nordeste da Argentina o padrão de precipitação é inverso, com anomalias positivas entre 100 e 300 mm (Fig. 5.2a).

Com relação à composição de eventos de La Niña sabe-se que este evento é favorável ao aumento de precipitação na região Norte e Nordeste do Brasil, principalmente pela intensificação da célula de Walker que tem um ramo ascendente sobre estas regiões (AMBRIZZI et al., 2004), e redução na região Sul. Este padrão fica evidenciado na Figura 5.3a, com anomalias positivas de precipitação no Norte e Nordeste do Brasil (~100 a 300 mm) e anomalias levemente negativas em parte do setor oeste da região Sul do Brasil, principalmente sobre os Estados de Santa Catarina e Paraná.

Ambos os modelos, global e regional, foram consistentes com a observação em prever o sinal das anomalias de precipitação referentes aos compostos de El Niño e La Niña. A Figura 5.2c ilustra que, durante os anos de El Niño, na região Sul do Brasil as anomalias de precipitação previstas pelo modelo BRAMS estão posicionadas mais próximas as observadas (Fig. 5.2a) do que as anomalias previstas com o MCGA/CPTEC (Fig. 5.2b). No entanto, o modelo regional subestima a intensidade das anomalias. Para as regiões Norte e Nordeste do Brasil o MCGA mostrou-se mais consistente com o padrão observado.

A Figura 5.3, apresenta as composições para anos de La Niña. Sobre a região

Norte do Brasil, principalmente sobre o estado do Pará, os modelos não conseguiram prever o sinal positivo da distribuição anômala de precipitação. Na região Sul da AS ambos os modelos superestimaram a área e a intensidade das anomalias negativas. Comparando-se as composições para os anos de La Niña do modelo global (Fig. 5.3b) e do modelo regional (Fig. 5.3c) com o padrão observado (Fig. 5.3a) verifica-se que o modelo regional capturou melhor a distribuição espacial da precipitação, particularmente sobre a região Nordeste do Brasil. Pode-se notar que os modelos dinâmicos-atmosféricos respondem de forma satisfatória a condições de contorno oceânica (TSM) a que foram submetidos.

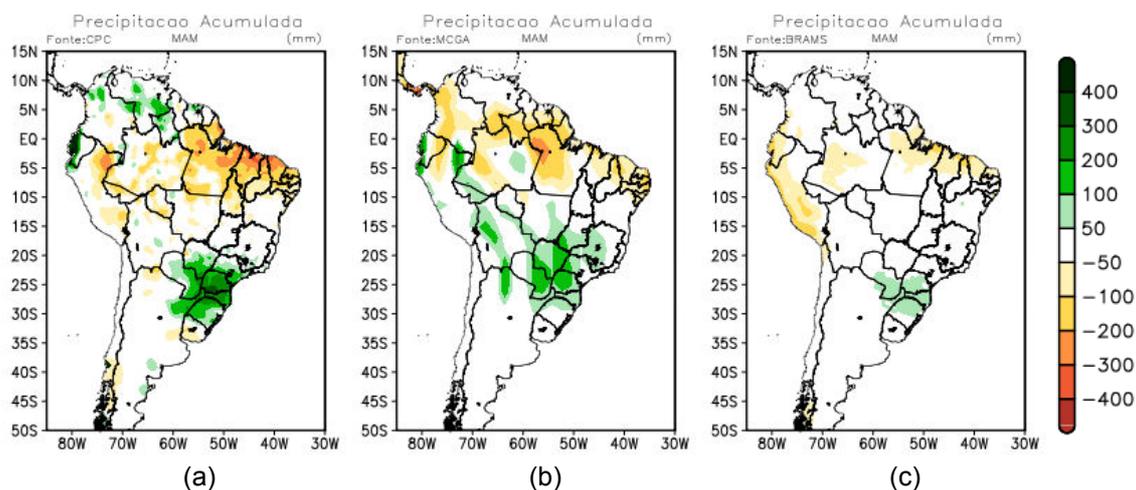


Figura 5.2 - Composição dos eventos de El Niño para anomalia de precipitação acumulada (mm) para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c)

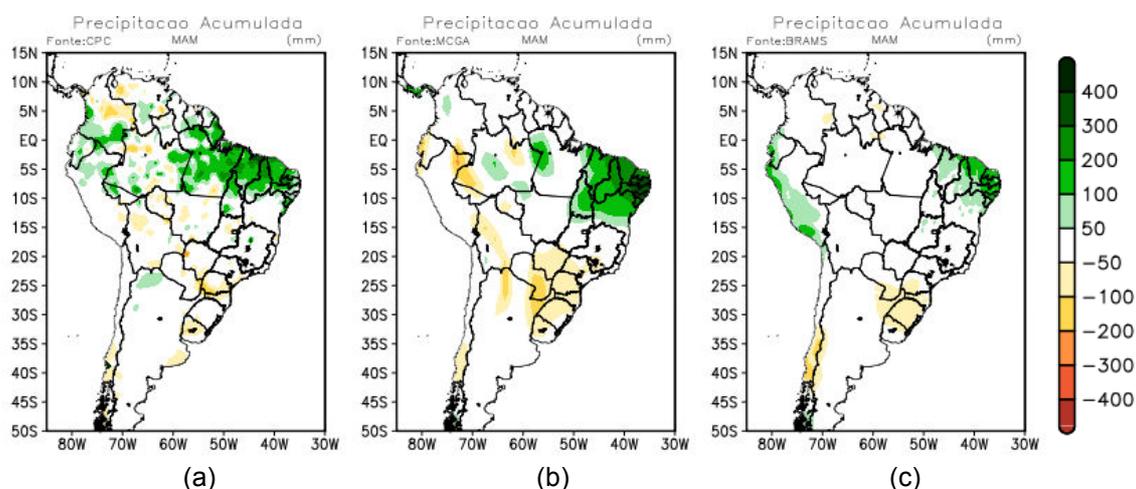


Figura 5.3 - Composição dos eventos de La Niña para anomalia da precipitação acumulada (mm) para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c)

5.2 Temperatura a 2 metros

5.2.1 Padrões Climatológicos

A temperatura possui pouca variabilidade sazonal durante o ano nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, caracterizando o clima destas regiões como tropical e quente. No trimestre MAM as temperaturas são homogêneas nestas regiões. No sul da Bahia e sudoeste do Acre e Rondônia a penetração de massas de ar relativamente fria afeta a variabilidade da temperatura durante o outono. Estes sistemas são mais frequentes no inverno, porém também são observados no outono.

Nas regiões Sul da AS, Sudeste e parte da região Centro-Oeste do Brasil, as temperaturas tornam-se mais amenas devido principalmente a entrada de massas de ar frio. Com maior frequência de nevoeiros e registros de geadas (ou friagem) em locais serranos das regiões sudeste e sul do Brasil. No decorrer do ano essas regiões possuem maior variabilidade térmica do que as regiões Norte e Nordeste do Brasil.

A Figura 5.4 ilustra os mapas climatológicos da temperatura média observada e prevista pelos modelos global e regional para o período de outono (MAM) de

1979 a 2010. Na climatologia (Fig. 5.4a) é possível identificar altos valores de temperatura sobre região Norte da AS e Nordeste e Centro-Oeste do Brasil, com temperatura média da ordem de 24 e 28°C. No interior do NEB e extremo norte da Venezuela são observadas as temperatura mais alta (~28 a 30°). Na região Sudeste do Brasil e em parte da região Centro-Oeste a temperatura média observada esta da ordem de 20 a 24°C. Abaixo do paralelo de 30°S as temperatura são mais a amenas com valores entre 10° e 20°C. Nos Andes são observados baixos valores de temperatura que são consistentes com a altura da orografia da região (~ 6 a 8°C).

A Figura 5.4b mostra a climatologia da temperatura média a 2 metros prevista pelo modelo global MCGA do CPTEC. Pode-se verificar que o modelo conseguiu reproduzir o padrão de temperatura de mais quente (frio) no Norte (Sul) da AS. No entanto, o modelo subestima a temperatura observada (Fig. 5.4a) na maior parte do NEB, em até 4°C, e superestima sobre algumas áreas dos estados do Pará e do Amazonas (~2°C). Na região sudeste do Brasil há subestimativa do modelo global com intensidade em torno de 2°C. Nas demais regiões as previsões do modelo mostraram-se próximas aos valores observados.

As previsões do modelo regional para a temperatura média na AS (Fig. 5.4c) subestimaram os valores observados (Fig. 5.4a) em praticamente todo o território, com intensidade variando de 2 a 4°C. Apenas sobre estados do Amazonas o modelo reproduziu com êxito os valores observados. Em suma, ambos os modelos conseguiram prever razoavelmente bem o padrão de temperatura média para o trimestre de outono.

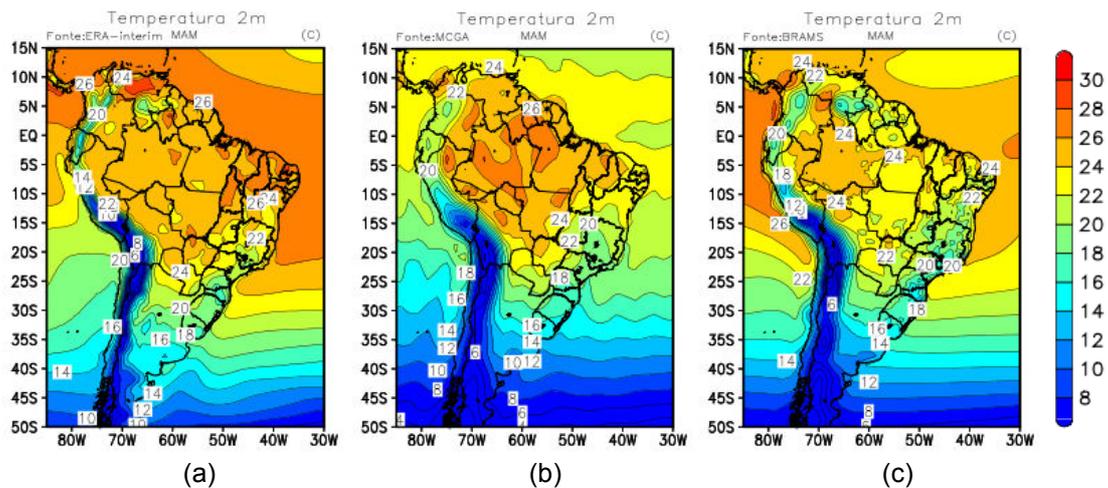


Figura 5.4 - Climatologia (1979-2010) da temperatura média a 2 metros ($^{\circ}\text{C}$) para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c)

5.2.2 Composições

Analisando as composições da anomalia de temperatura média a 2 metros (Fig. 5.5) pode-se notar que em anos de eventos El Niño (Fig. 5.5a) são observadas anomalias positivas sobre as regiões Norte e Nordeste do Brasil e negativas em parte da região Sul da AS. Em anos de La Niña (Fig. 5.6a) observam-se anomalias levemente negativas em parte do NEB e em áreas isoladas sobre o centro-oeste e sul do Brasil.

Nos mapas das Figuras 5.5b e 5.5c, verifica-se que para anos El Niño o padrão espacial é razoavelmente bem representado tanto no modelo global, quanto no regional. Entretanto, é notável a subestimativa das temperaturas com relação aos valores observados em particular para o modelo regional. Para a composição de La Niña (Fig. 5.6b e 5.6c) os modelos não representaram bem as anomalias de temperatura média, principalmente em termos de localização, como nos eventos quentes (El Niño). Ambos os modelos são mais sensíveis a episódios de El Niño concordando com resultados encontrados por Alves (2007).

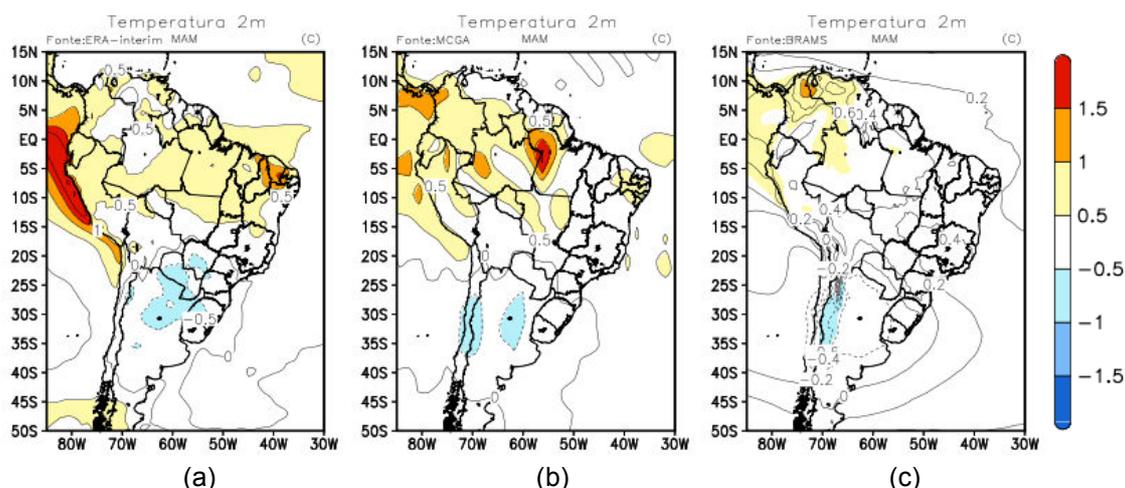


Figura 5.5 - Composição dos eventos de El Niño para anomalia da temperatura média (°C) para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c)

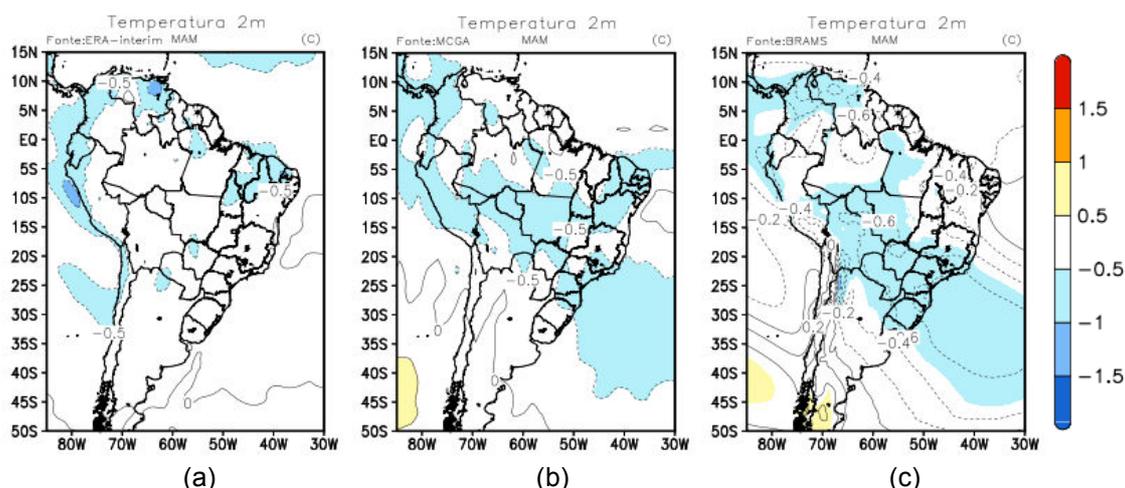


Figura 5.6 - Composição dos eventos de La Niña para anomalia da temperatura média (°C) para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c)

5.3 Pressão Atmosférica

5.3.1 Padrões Climatológicos

A pressão atmosférica está diretamente ligada à temperatura e a altitude. Com o aumento da temperatura o ar torna-se menos denso e sobe, diminuindo a

pressão sobre a superfície, formando uma zona de baixa pressão atmosférica (receptora de ventos). Já temperaturas mais baixas o ar fica mais denso, formando uma área de alta pressão (emissora de ventos). Quanto maior for a altitude, menor será a pressão atmosférica, pois o ar torna-se rarefeito em altitudes maiores. A diferença entre pressões atmosféricas modulam os padrões de ventos.

Em relação ao posicionamento e intensidade do ASAS e ASPS, o período MAM representa uma transição onde, os anticiclones estão se intensificando e adentrando para o continente. Estes sistemas são centros de alta pressão semipermanentes devido à existência de movimentos subsidentes da célula de Hadley.

Na Figura 5.7 são apresentados os mapas climatológicos da pressão ao nível médio do mar média observada e prevista pelos modelos MCGA e BRAMS. Na climatologia de PNM observada (Fig. 5.7a) nota-se uma área de baixa pressão envolvendo toda a região Norte e parte do centro-oeste e Nordeste do Brasil, com valores de pressão da ordem de 1010 e 1012 hPa. O ASAS envolve parte da região Sul da AS e Sudeste do Brasil com valores de PNM da ordem de 1014 hPa. O centro deste sistema está posicionado em aproximadamente 30°W com intensidade da ordem de 1016 hPa. O Centro do ASPS é observado bem próximo da costa oeste da AS (~90°W) com intensidade de 1018 hPa.

A Figura 5.7b mostra a previsão do padrão climatológico da PNM média do modelo global MCGA do CPTEC. Verifica-se que o modelo superestima em quase todo o território Sul Americano a PNM, com intensidade entre 2 e 4 hPa. Na região sobre influência do ASAS e ASPS o modelo global não reproduziu bem a intensidade do sistema, superestimando a mesma em até 4 hPa. A Figura 5.7c mostra que o modelo regional consegue capturar bem o padrão da PNM média sobre a AS. Porém, subestima os valores observados em aproximadamente 2 hPa sobre o oeste da Amazônia, Colômbia e setor norte do Peru. Com relação a intensidade e posicionamento do ASAS e ASPS o modelo

BRAMS apresentou resultados mais próximos aos observados (Fig. 5.7a). Para a análise da PNM média o modelo regional mostrou-se mais consistente, com o padrão espacial mais próximo ao observado do que o modelo global, em praticamente toda a AS.

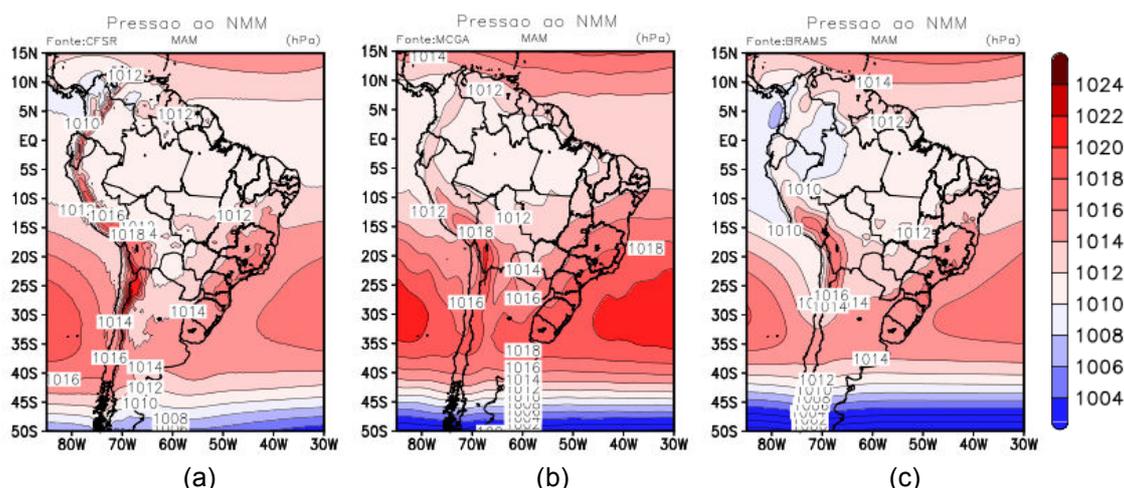


Figura 5.7 - Climatologia (1979-2010) da PNM média (hPa) para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c)

5.3.2 Composições

O mapa da Figura 5.8 ilustra as composições das anomalias de PNM durante eventos de El Niño observados e previstos pelos modelos global e regional. Verifica-se uma anomalia negativa de PNM média (Fig. 5.8a) sobre quase todo o domínio, com intensidade da ordem de -0.6 a -0.8 hPa sobre a região Norte e setor oeste do NEB. Outro núcleo de intensidade da anomalia mais relevante é observado sobre o leste da região Sul (~ -0.6 hPa). Para anos de La Niña (Fig. 5.9a), observa-se anomalia positivas sobre o norte da Amazônia e Argentina, e anomalias negativas sobre o setor leste e sul da região Nordeste e região Sudeste. As análises de PNM estão consistentes com os compostos de anomalia de temperatura média observada (Fig. 5.5a e 5.6a) onde, temperaturas mais altas correspondem a núcleos de PNM baixa e valores

baixos de temperatura a núcleos de alta pressão.

Para compostos de El Niño a previsão da PNM média foi bem representadas por ambos os modelos atmosféricos (Fig. 5.8b,c). O modelo global subestimou a área e intensidade da anomalia com relação a observação (Fig. 5.8b). O mesmo pode ser verificado na previsão do modelo regional (Fig. 5.8c), porém a intensidade do núcleo anômalo do ASAS foi superestimada em -0.4 hPa pelo MCGA enquanto que na previsão do modelo regional esta superestimativa é da ordem de -0.2 hPa.

O comportamento das anomalias previstas de PNM para os eventos La Niña também são consistentes com a observação (Fig. 5.9). Entretanto, ambos os modelos superestimam a extensão da área e a intensidade dos núcleos das anomalias positivas e negativas de PNM. O MCGA apresenta um padrão espacial mais próximo do observados sobre setor norte da região Norte e sobre o Sul da AS. Sobre o NEB e Sudeste do Brasil o MCGA melhor representa a área de atuação da anomalia e o BRAMS representa melhor a intensidade desta anomalia.

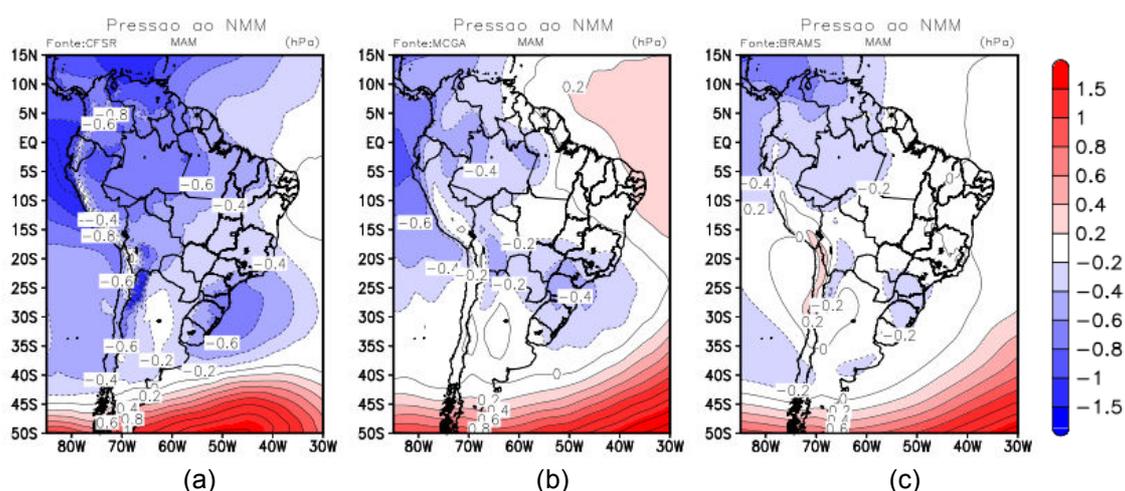


Figura 5.8 - Composição dos eventos de El Niño para anomalia da PNM média (hPa) para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c)

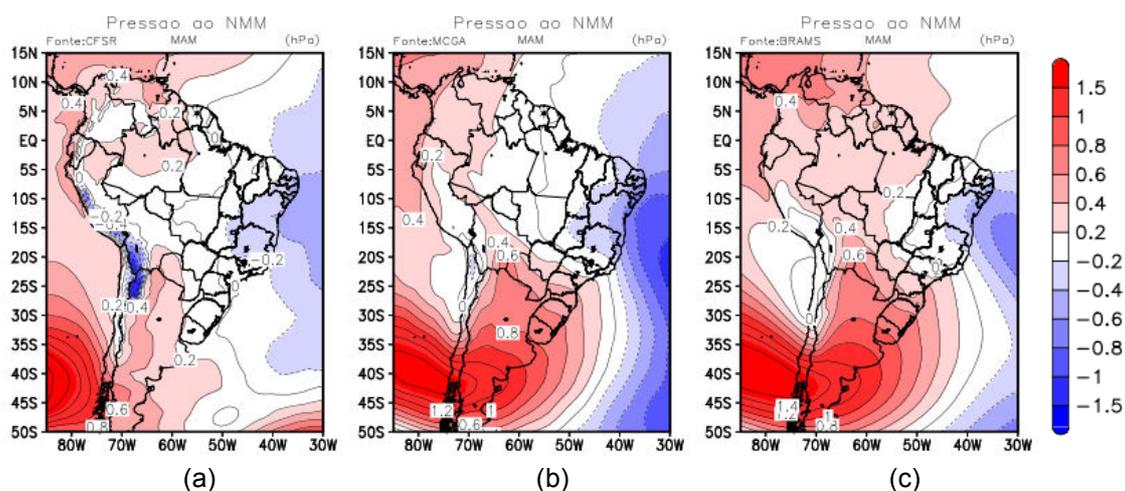


Figura 5.9 - Composição dos eventos de La Niña para anomalia da PNM média (hPa) para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c)

5.4 Circulação em 850 hPa

5.4.1 Padrões Climatológicos

Os mapas com a climatologia da circulação em baixos níveis (850 hPa), bem como os mapas da previsão, usando os modelos citados anteriormente, são apresentados na Figura 5.10. No mapa da climatologia observada (Fig. 5.10a) nota-se a concordância entre a circulação em 850 hPa e o mapa de pressão atmosférica (Fig. 5.7a), estando representada uma circulação anticiclônica sobre as áreas de alta pressão da ASAS e ASPS. Nas regiões Norte e Nordeste do Brasil observa-se a confluência dos ventos alísios (ou ventos de leste) com intensidade entre 5 m/s e 10 m/s, que também estão associados ao posicionamento da ZCIT. À leste dos Andes, onde atua o Jato de Baixos Níveis (JBN), a intensidade do vento também varia entre 5 m/s e 10 m/s. O trimestre MAM não apresenta alta frequência dos JBN e a sua intensidade é reduzida, sendo na estação de inverno que os JBN encontram-se mais intensos, e na de verão os JBN são mais frequentes.

Comparando as Figuras da climatologia observada (Fig. 5.10a) com a

climatologia da previsão usando o modelo global (Fig. 5.10b), nota-se que há uma relevante concordância entre a observação e a previsão do modelo global. No entanto, o modelo superestima a intensidade do vento no interior do NEB e setor norte da América do Sul. A circulação meridional (JBN) a leste dos Andes foi razoavelmente bem representada pelo modelo global. A intensidade dos ventos de oeste, em latitudes altas, foi superestimada em relação ao mapa da climatologia observada abaixo do paralelo de 40°S (Fig. 5.10a) em torno de 5 m/s.

O modelo regional BRAMS conseguiu prever melhor a magnitude dos ventos de leste sobre a porção norte e nordeste da AS, comparando com os resultados do modelo global. Porém, ainda é verificada uma pequena área no Norte do Brasil onde o modelo superestima a magnitude dos ventos. A circulação anticiclônica do ASAS e ASPS foram bem representadas em ambos os modelos. Nas altas latitudes onde são observados os ventos de oeste, o modelo regional apresentou o mesmo padrão de superestimativa da intensidade e localização notada no modelo global. Em relação à climatologia observada (Fig. 5.10a), pode-se dizer que a circulação no nível de 850 hPa foi bem representada pelos modelos numéricos aqui avaliados (Fig. 5.10b,c).

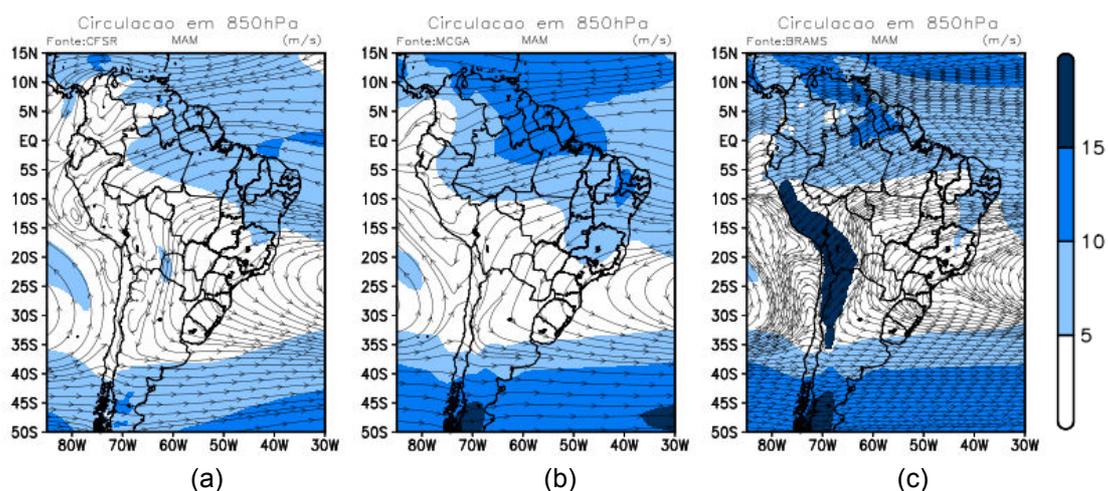


Figura 5.10 - Climatologia (1979-2010) da circulação média em 850 hPa para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c),

representada pelas linhas de corrente. A intensidade da circulação (m/s) é apresentada em cores azul

5.4.2 Composições

A Figura 5.11a mostra a anomalia observada da circulação em 850 hPa para compostos de El Niño. Sobre o setor norte do NEB nota-se uma circulação anômala de leste, adquirindo componente de sul sobre o norte da AS, atuando como um sumidouro de umidade do Atlântico equatorial em direção a latitudes altas no Atlântico tropical norte, o que está de acordo com a Figura 5.2a, onde observam-se anomalias negativas de precipitação sobre o Norte e Nordeste do Brasil e positivas sobre o Norte da América do Sul. Na região Sul do Brasil observa-se um canal de circulação mais intensa atuando desde a região noroeste da AS até a região sul/sudeste do Brasil e noroeste da Argentina onde predomina anomalia ciclônica de circulação, atuando como uma fonte de umidade proveniente da Amazônia para esta região. Na climatologia observada da precipitação (Fig. 5.2a) sobre o oeste dos Estados da região Sul do Brasil é verificado uma anomalia positiva de precipitação o que se faz coerente com a anomalia de circulação ciclônica durante eventos El Niño (Fig. 5.11a).

Na anomalia observada da composição de La Niña (Fig. 5.12a) verifica-se o padrão inverso ao mapa da anomalia da composição de El Niño (Fig. 5.11a). Sobre a região Norte do Brasil e setor norte do NEB, nota-se uma circulação anômala inicialmente com componente de norte, adquirindo componente de oeste sobre a região do NEB, atuando como fonte de umidade sobre estas regiões. Já sobre a região Sul do Brasil a circulação de noroeste que advecta umidade da Amazônia para esta região está mais enfraquecida uma vez que são notadas anomalias de sudoeste desde o Sul do Brasil até o oeste da região Norte do Brasil. Este padrão anômalo da circulação esta coerente com a Figura 5.3a referente ao mapa da anomalia de precipitação para compostos de La Niña que mostra anomalias positivas de precipitação sobre parte da região

norte do NEB e ligeiro déficit de precipitação sobre a região Sul do Brasil.

Comparando os resultados obtidos com as previsões numéricas dos modelos global (Fig. 5.11b e 5.12b) e regional (Fig. 5.11c e 5.12c) com os dados observados (Fig. 5.11a e 5.12a) é possível notar que ambos representaram bem o padrão observado. No entanto, para composições de El Niño o modelo regional (Fig. 5.11c) se mostrou melhor em representar a intensidade da circulação, principalmente sobre a região Norte da AS. Na região Sul da AS o MCGA/CPTEC capturou melhor o posicionamento da anomalia da circulação. Nos mapas de composições de La Niña (Fig. 5.12b e 5.12c), ambos os modelos superestimaram a intensidade da anomalia da circulação.

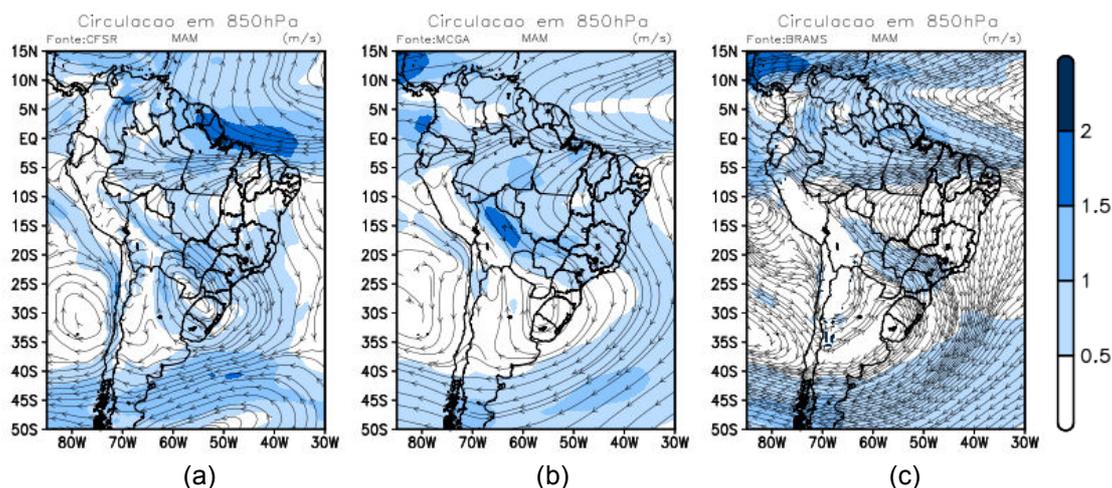


Figura 5.11 - Composição dos eventos de El Niño para anomalia da circulação média em 850 hPa para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c), representada pelas linhas de corrente. A intensidade da circulação (m/s) é apresentada em cores azul

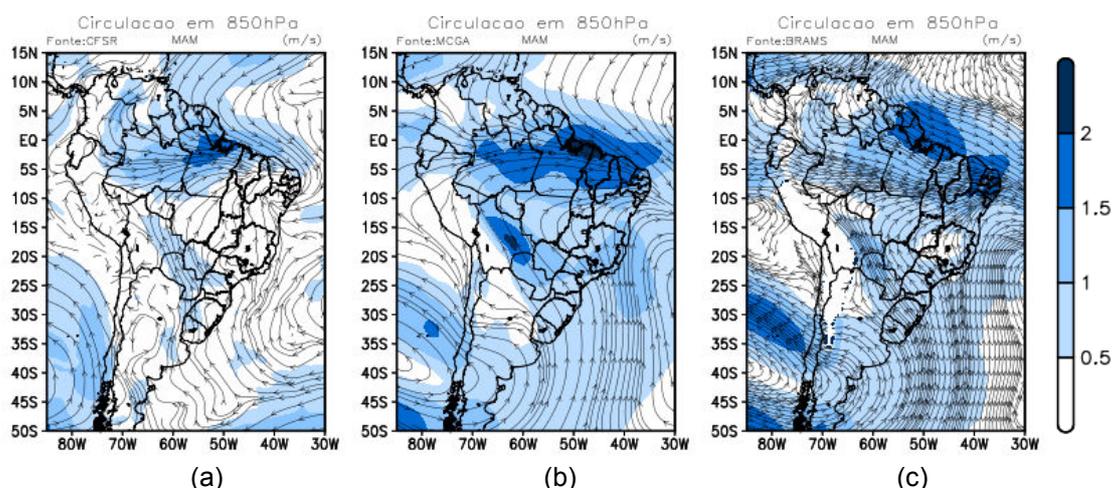


Figura 5.12 - Composição dos eventos de La Niña para anomalia da circulação média em 850 hPa para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c), representada pelas linhas de corrente. A intensidade da circulação (m/s) é apresentada em cores azul

5.5 Circulação em 200 hPa

5.5.1 Padrões Climatológicos

Nos altos níveis atmosféricos (200 hPa) é possível identificar a atuação da corrente de jato (polar e subtropical), que é a região onde a componente do vento zonal atinge valores máximos. Climatologicamente, a corrente de jato polar encontra-se entre as latitudes de 35°S e 70°S e o jato subtropical geralmente está localizado entre as latitudes de 20°S e 35°S. Na Figura 5.13a, referente a climatologia observada da circulação em altos níveis, observa-se uma circulação anticiclônica sobre o centro norte da AS, essa circulação é denominada Alta da Bolívia que apresenta maior intensidade no período de verão. Abaixo da latitude de 25°S é possível observar a atuação da corrente de jato subtropical que possui intensidade entre 30 e 40 m/s posicionado sobre o sul da AS e Oceano Atlântico (em torno de 30°S).

As Figuras 5.13b e 5.13c mostram os padrões climatológicos previstos pelos modelos global e regional, respectivamente. As previsões dos modelos são

consistentes entre si, porém ambos os modelos superestimam a intensidade e o posicionamento da corrente de jato subtropical. Os modelos também não conseguiram representar a circulação da AB.

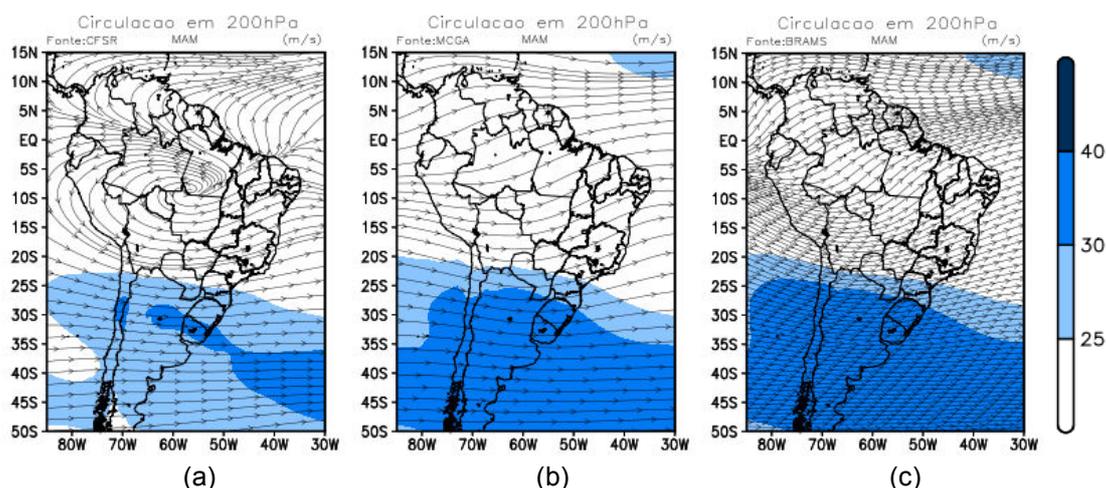


Figura 5.13 - Climatologia (1979-2010) da circulação média em 200 hPa para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTec (b) e BRAMS (c), representada pelas linhas de corrente. A intensidade da circulação (m/s) é apresentada em cores azul

5.5.2 Composições

De acordo com a literatura, os padrões da circulação durante os episódios ENOS apresentam uma grande variabilidade entre os eventos. No entanto, algumas características são comuns aos jatos subtropicais, tais como jatos mais intensos que a normalidade durante episódios de El Niño e mais enfraquecidos do que o normal durante anos de La Niña, podendo ser observado nas Figuras 5.14a e 5.15a, respectivamente.

É possível observar uma sucessão alternada de ciclones e anticiclones na costa leste e oeste da AS (Fig. 5.14a e 5.15a), na forma de trem de onda de Rossby. As ondas de Rossby são geradas devido a presença de uma fonte de calor anômala no Pacífico equatorial central e oeste. Resultados semelhantes foram encontrados por Coelho (2001) ao analisar outros eventos de El Niño e de La Niña. As anomalias de precipitação (Fig. 5.2a e 5.3a) resultam de

alterações de características de circulações climáticas já existentes na atmosfera, as quais influenciam o padrão de chuvas em regiões específicas.

Para composições de El Niño ambos os modelos conseguem capturar a intensidade e posicionamento da corrente de jato subtropical. Entretanto, não conseguem representar bem o posicionamento dos pares de ciclone e anticiclones em torno da AS. Nos compostos de La Niña o modelo regional superestima a intensidade do jato subtropical. Com relação aos resultados dos episódios de La Niña aqui estudados, o MCGA mostrou resultados mais próximos dos observados.

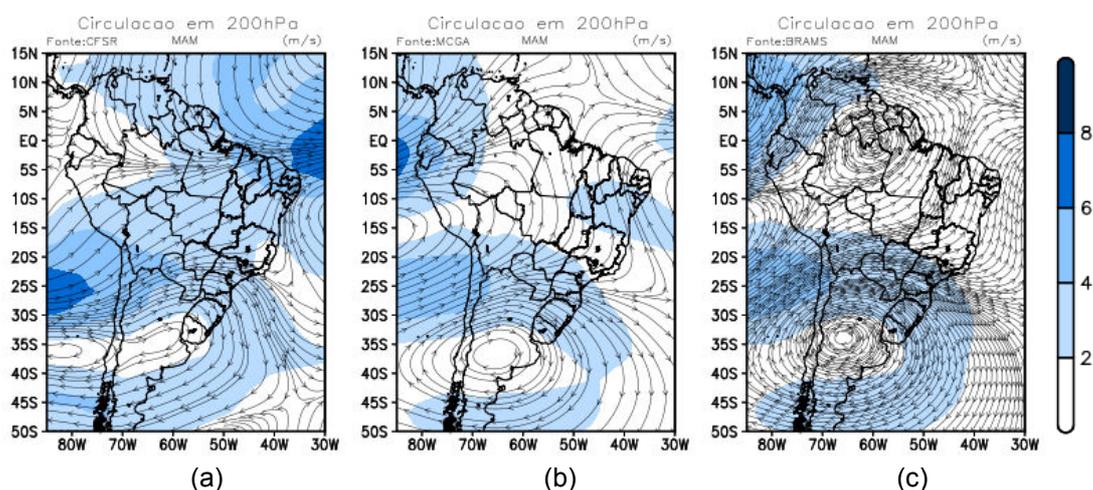


Figura 5.14 - Composição dos eventos de El Niño para anomalia da circulação média em 200 hPa para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c), representada pelas linhas de corrente. A intensidade da circulação (m/s) é apresentada em cores azul

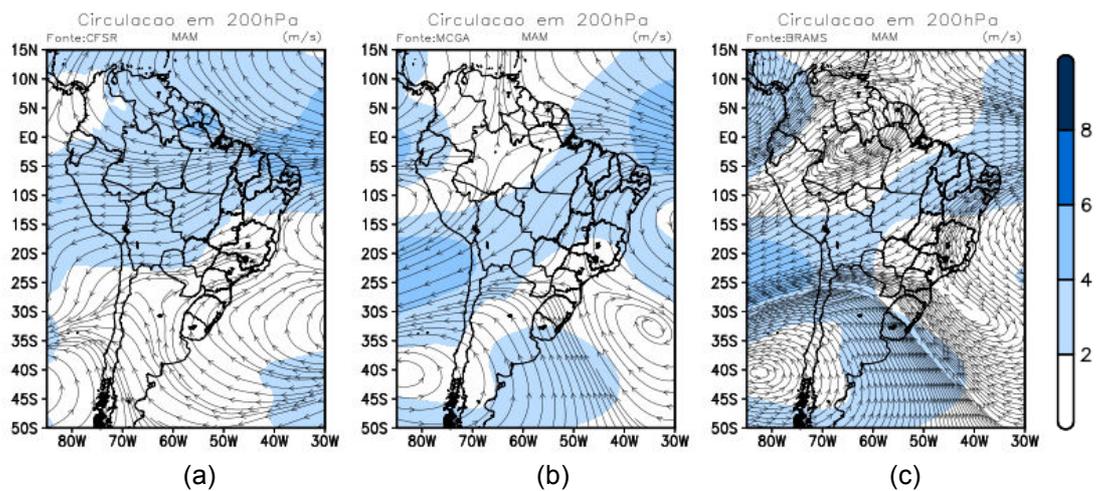


Figura 5.15 - Composição dos eventos de La Niña para anomalia da circulação média em 200 hPa para o trimestre MAM observada (a) e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (b) e BRAMS (c), representada pelas linhas de corrente. A intensidade da circulação (m/s) é apresentada em cores azul

CAPÍTULO 6

AVALIAÇÃO OBJETIVA DOS PADRÕES ESPACIAIS PREVISTOS E OBSERVADOS

Neste capítulo será apresentada uma análise objetiva comparando as previsões do modelo BRAMS com a análise observacional, assim como com as previsões do MCGA/CPTEC. O desempenho da modelagem dinâmica das previsões climáticas sazonais, para as variáveis precipitação e temperatura, foi quantificado através do cálculo dos índices estatísticos correlação de Pearson, REQM e viés. Cada ano da série temporal (1979-2010) utilizado no cálculo dos índices é representado pela média dos 10 membros previstos pelos modelos.

6.1 Precipitação

Como mencionado anteriormente, neste trabalho foram utilizados três índices estatísticos, correlação de Pearson, REQM e viés. Estas métricas estão descritas no Capítulo 3. O uso desses três índices visa avaliar o desempenho dos modelos aqui estudados, uma vez que o uso de uma única métrica pode ser inadequado para estimar a habilidade de modelos numéricos de previsão em reproduzir as condições observadas (WEBER et al., 1982). Além disso, as lacunas existentes em cada índice podem ser preenchidas com o uso de outro índice. O cálculo dos índices estatísticos foi realizado para cada ponto de grade através da série temporal dos 32 trimestres de previsões referentes ao período de 1979 a 2010 dos modelos BRAMS e MCGA/CPTEC.

O grau de associação do sinal das anomalias de precipitação previstas e observadas foi avaliado com base no cálculo da correlação de Pearson. Este índice estatístico é utilizado para avaliar a destreza (desempenho) do modelo em capturar o sinal das anomalias previstas no mesmo sentido (ou contrário)

das observações. Os mapas da CP para o modelo global MCGA/CPTEC e regional BRAMS são mostrados nas Figuras 6.1a e 6.1b, respectivamente.

Analisando o mapa de CP calculado usando as anomalias de precipitação acumulada observada e prevista pelo modelo MCGA/CPTEC para a série temporal de 1979 a 2010, durante o trimestre MAM (Fig. 6.1a), observa-se, sobre a região de interesse desta pesquisa (NEB), valores positivos de CP com valores acima do limiar de 0.6, exceto sobre o Estado da Bahia, onde o modelo não apresentou boa destreza com valores de CP da ordem de -0.2 e 0.2. Os altos valores de CP indicam que o sinal das anomalias de precipitação prevista pelo MCGA/CPTEC acompanha o mesmo sinal das anomalias de precipitação observada. Para a região Sul do Brasil o modelo apresentou boa destreza apenas sobre os Estados de Santa Catarina e Paraná, com valores na faixa de 0.4 a 0.6. Sobre o centro norte do Mato Grosso do Sul, parte do Estado de São Paulo e extremo norte do Paraguai, também foram verificados valores positivos de CP entre 0.4 e 0.6. No restante da AS os valores de CP foram reduzidos quando comparados aos descritos acima, indicando que a habilidade das condições climáticas dessas regiões é muito inferior a das regiões descritas acima.

Analisando as correlações de anomalias de precipitação com a previsão do modelo BRAMS através do índice de CP (Fig. 6.2b), observa-se que o modelo regional apresentou um padrão de CP semelhante ao modelo global em praticamente todo o continente Sul Americano. Porém, em algumas localidades o modelo regional conseguiu capturar melhor o sinal das anomalias, como por exemplo, sobre os países da costa Oeste e Norte da AS (Bolívia, Peru, Colômbia e Venezuela). Sobre o Brasil, o modelo BRAMS apresentou melhoria com aumento da correlação sobre o Estado do Acre. Enquanto o modelo global mostrou uma CP negativa nestas regiões o modelo regional apresentou CP positiva. Sobre o centro-leste da Argentina o modelo regional reproduziu melhor o detalhamento das anomalias de precipitação prevista, nestas regiões

foram observadas correlações positivas com valores entre os limiares de 0.2 e 0.6.

Ambos os modelos apresentaram boa destreza (Fig. 6.1) em basicamente duas áreas sobre a AS, setor norte do NEB e região Sul do Brasil. Como observado nas Figuras 5.2 e 5.3, a precipitação sobre estas áreas é modulada pelas manifestações dos Episódios de El Niño (Fig. 5.2) e La Niña (Fig. 5.3). Portanto, a destreza das previsões de anomalias de precipitação está associada a habilidade dos modelos em reproduzir as teleconexões de ENOS.

A Figura 6.2 mostra a correlação das anomalias de precipitação observada e prevista pelo MCGA/CPTEC, com parametrização de convecção Kuo. Atualmente esta é a versão do modelo utilizada para previsões climáticas no CPTEC/INPE, cujo desempenho é dado pela CP representada na Figura 6.2. Comparando os mapas de correlação do modelo global de diferentes versões e parametrizações de convecção profunda, é possível notar que a versão do MCGA/CPTEC utilizado nesta pesquisa (Fig. 6.1a) apresentou, em geral, melhores resultados, particularmente sobre o NEB do que a versão atualmente em uso operacional no CPTEC/INPE (Fig. 6.2). Pode-se destacar o extremo norte do NEB como a região onde, observaram-se maiores valores do índice de CP (Fig. 6.1a) quando comparado com a versão em uso operacional no CPTEC/INPE (Fig. 6.2). Para o trimestre MAM esta região é uma das mais importantes por representar o período chuvoso da região Nordeste do Brasil.

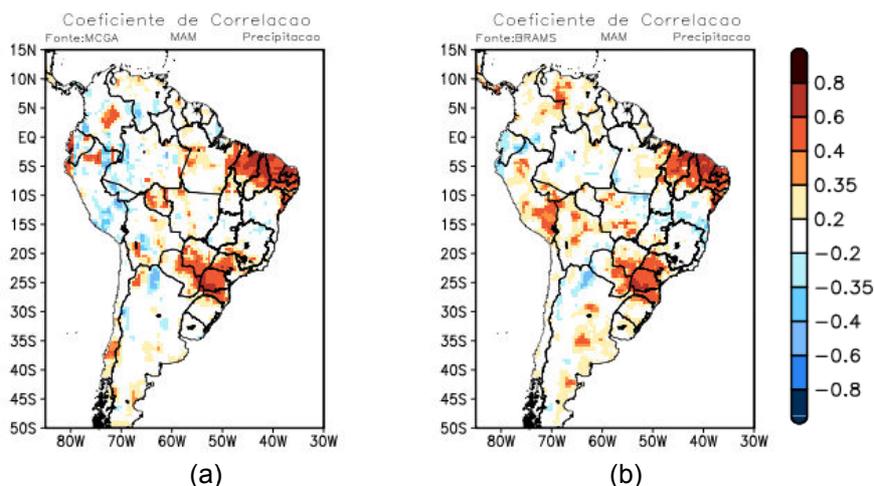


Figura 6.1 - Coeficiente de correlação de Pearson entre as anomalias de precipitação acumulada observada e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (a) e BRAMS (b), para o trimestre MAM. Os valores de correlação acima de 0.35 são estatisticamente significantes ao nível de 5%, segundo o teste t-Student. Os dados de precipitação observada foram fornecidos pelo CPC (CHEN; XIE, 2008)

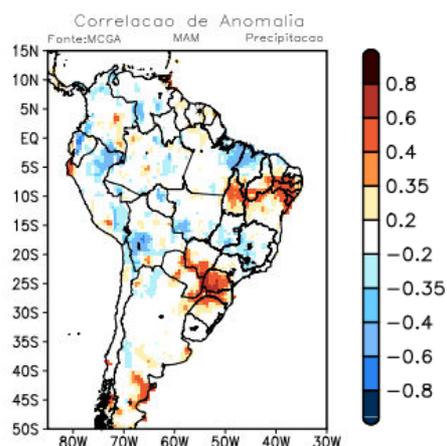


Figura 6.2 - Correlação entre as anomalias de precipitação observada e prevista pelo MCGA/CPTEC com parametrização de convecção profunda do tipo KUO para o período de 1979-2008 do trimestre MAM. Os valores de correlação acima de 0.35 são estatisticamente significantes ao nível de 5%, segundo o teste t-Student. Os dados de precipitação observada foram fornecidos pelo CPC (CHEN; XIE, 2008)

A métrica raiz do erro quadrático médio (REQM) é utilizada para estimar a magnitude do erro das previsões e é mais sensível a valores extremos da série. Quanto menor (próximo de zero) for a REQM melhor é a habilidade do modelo

em realizar previsões, ou seja, mais próximas as previsões estão das observações.

Na Figura 6.3 são apresentados os mapas com a distribuição espacial do REQM entre a precipitação observada e a precipitação prevista pelos modelos global e regional. Observa-se, os valores mais altos do índice REQM são visto sobre a região Norte e costa Oeste da AS e sobre a região dos Andes (Fig. 6.3a). Sobre as regiões Centro-Oeste e Sudeste do Brasil e parte do NEB são observados os menores valores do índice REQM (~100-200 mm). No centro-sul da Argentina foi verificado valores da REQM abaixo de 100 mm. Na região do NEB os valores da REQM ficaram entre os limiares de 150 e 300 mm (Fig. 6.3a).

Na Figura 6.3b, observa-se a REQM da variável precipitação do modelo regional. A REQM do modelo BRAMS (Fig. 6.3b) apresentou um padrão semelhante ao obtido para o MCGA/CPTEC (Fig. 6.3a). No entanto, o BRAMS apresentou maiores erros sobre a região Norte da AS, Oeste da região Sul do Brasil e nordeste da Argentina. Este índice, em termos médios, indica que o MCGA/CPTEC aproxima-se mais da observação do que o BRAMS, em particular sobre o norte da América do Sul e na região do Estado do Amazonas.

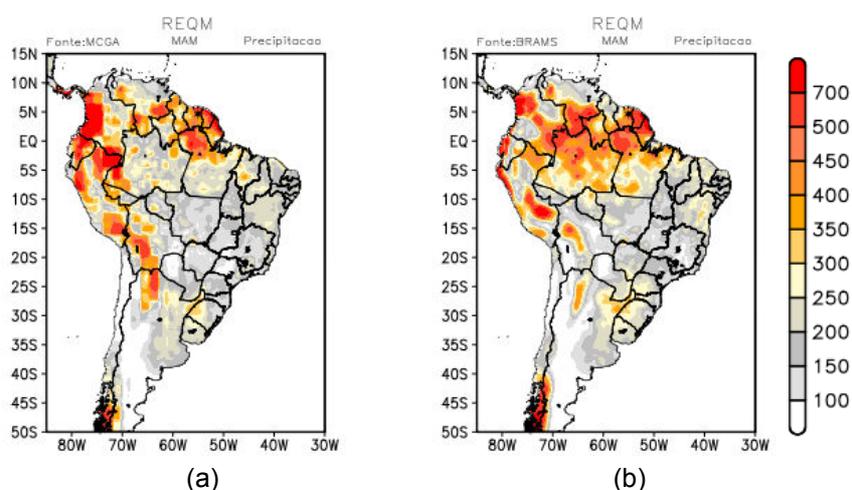


Figura 6.3 - REQM espacial entre a precipitação acumulada observada e a prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (a) e BRAMS (b), para o trimestre MAM. Os dados de precipitação observada foram fornecidos pelo CPC (CHEN; XIE, 2008)

O cálculo do índice viés, utilizado para analisar erros sistemáticos das previsões, permite verificar onde o modelo subestima ou superestima os valores médios das previsões. Quanto mais próximo de zero for o viés, menor será o erro sistemático da previsão. Neste trabalho, foi calculado o viés médio (diferença entre a média prevista e observada) para os 32 trimestres de 1979 a 2010 previstos por ambos os modelos atmosféricos em relação aos dados observados de precipitação acumulada.

A Figura 6.4 mostra o viés médio da precipitação acumulada (mm) prevista pelos modelos global e regional. Pode-se destacar, na Figura 6.4a, um viés entre -100 e 50 mm sobre o extremo norte e costa leste do NEB. Na maior parte do NEB, assim como, no interior do mesmo é observado um viés úmido (valores positivos) de precipitação com desvios entre 100 e 300 mm. Este viés úmido pode estar relacionado a erros no posicionamento da ZCIT que geralmente são encontrados em modelos de baixa resolução (MCGA/CPTEC) e podem justificar a superestimativa da precipitação nesta região (OYAMA, 2006). No extremo noroeste do Pará e extremo norte da AS verificou-se um viés seco (valores negativos) acima de -400 mm indicando subestimativa de precipitação do modelo global em relação a observação. No Rio Grande do Sul, Uruguai e nos setores norte e nordeste da Argentina o modelo também subestima a precipitação observada. Sobre os Andes observa-se um viés úmido de precipitação devido a ondas espúrias de precipitação observada sobre esta região, discutida anteriormente no Capítulo 4.

No mapa do viés médio referente às previsões do modelo regional (Fig. 6.4b) é possível identificar áreas homogêneas de viés seco e úmido. Em toda a região norte da AS o modelo regional subestima a precipitação observada com valores acima de 300 mm negativos. Estes resultados são consistentes com os

obtidos por Fernandez et al. (2006), Alves (2007) e Seth et al. (2007). O mesmo é observado sobre parte da região Centro-Oeste e Sudeste, região Sul do Brasil e centro-nordeste da Argentina. Porém, os valores subestimados então entre os limiares de -150 e -300 mm. Já a região Nordeste do Brasil apresentou um viés úmido de precipitação, com valores entre 100 e 300 mm.

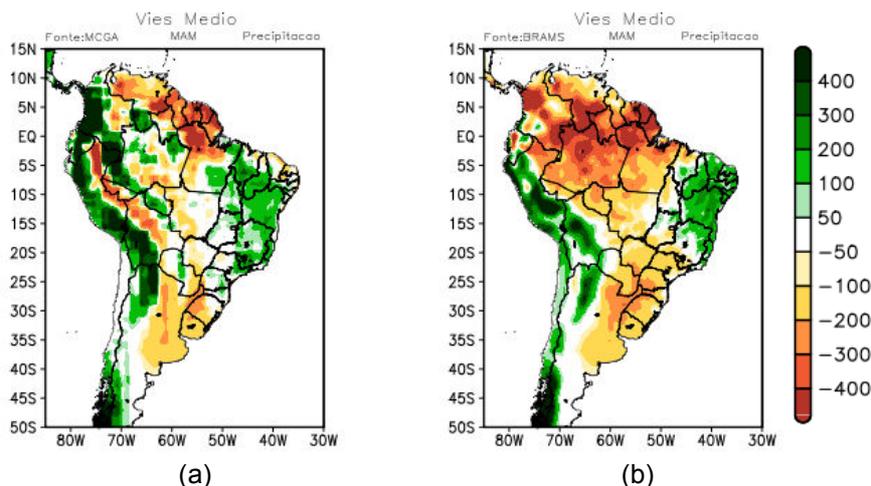


Figura 6.4 - Viés médio da precipitação acumulada (mm) prevista pelo modelo MCGA/CPTEC (a) e BRAMS (b), para o trimestre MAM. Os dados de precipitação observada foram fornecidos pelo CPC (CHEN; XIE, 2008)

6.2 Temperatura

Na Figura 6.5, são apresentados os mapas de correlação entre as anomalias de temperatura média a 2 metros observada e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC e BRAMS para a série temporal de 1979 a 2010, durante o trimestre MAM. Observa-se nos mapas de correlação do modelo global (Fig. 6.5a) e regional (Fig. 6.5b) um padrão uniforme em praticamente todas as regiões, com correlações positivas e acima de 0.6. A CP de ambos os modelos apresentam maiores valores sobre a região tropical. Esses altos valores de CP podem ser atribuídos à pouca variabilidade temporal das temperaturas nestas regiões. Para o Sul da AS, ambos os mapas apresentaram valores baixos de correlação sugerindo que devido a maior variabilidade climática as temperaturas em altas latitudes são mais difíceis de ser previstas.

Comparando os mapas de CP, é possível notar que as correlações de anomalia de temperatura utilizando o conjunto de previsões do BRAMS (Fig. 6.4b) possuem, em geral, valores superiores as correlações do MCGA (Fig. 6.4a) sobre a região Norte do Brasil e o Peru. Em algumas localidades verificam-se valores acima de 0.8 como, por exemplo, sobre extremo noroeste do Maranhão e região central do Piauí.

A Figura 6.6 mostra a correlação das anomalias de temperatura observada e prevista pelo MCGA/CPTEC (convecção tipo KUO) atualmente utilizado para a previsão operacional. Comparando o mapa de correlação do modelo global (Fig. 6.6) com a versão do MCGA/CPTEC (Fig. 6.5a) aqui utilizado, nota-se em algumas áreas, resultados mais satisfatórios do que a versão atualmente em uso operacional. Pode-se destacar o extremo norte do NEB e o Estado do Amazonas como as regiões onde, observou-se um maior ganho de correlação com relação a versão em uso operacional no CPTEC/INPE.

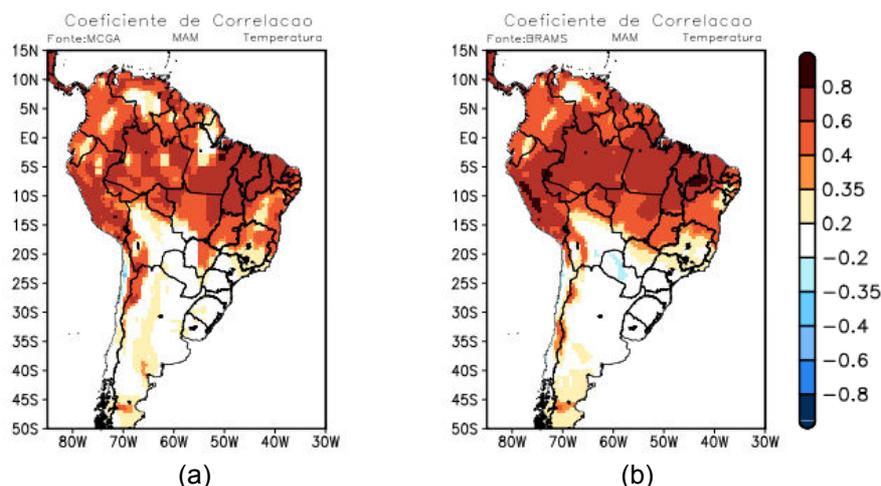


Figura 6.5 - Coeficiente de correlação Pearson entre as anomalias de temperatura média a 2 metros observada e prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (a) e BRAMS (b), para o trimestre MAM. Os valores de correlação acima de 0.35 são estatisticamente significantes ao nível de 5%, segundo o teste t-Student. Os dados de temperatura observada foram fornecidos pelo ERA-interim (DEE et al., 2011)

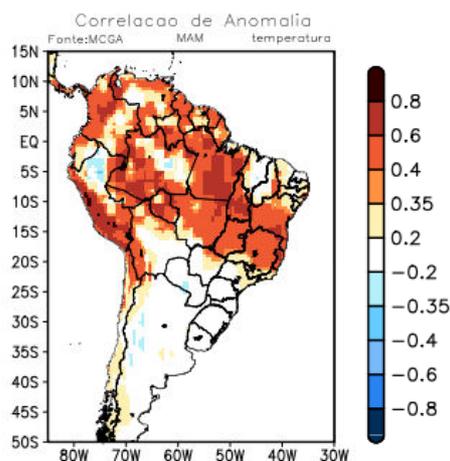


Figura 6.6 - Correlação entre as anomalias de temperatura média a 2 metros observadas e prevista pelo MCGA/CPTEC com parametrização de convecção profunda do tipo KUO para o período de 1979-2008 do trimestre MAM. Os valores de correlação acima de 0.35 são estatisticamente significantes ao nível de 5%, segundo o teste t-Student. Os dados de temperatura observada foram fornecidos pelo ERA-interim (DEE et al., 2011)

A Figura 6.7 mostra os mapas da distribuição espacial do índice REQM entre a temperatura observada e a temperatura prevista pelos modelos global MCGA/CPTEC e regional BRAMS. Observa-se concordância entre os mapas de correlação de Pearson (Fig. 6.4a,b) e os mapas da REQM (Fig. 6.7a,b), as regiões que apresentaram maiores erros também são as regiões com menor coeficiente de correlação. Na Figura 6.7a, pode-se destacar que os maiores erros estão sobre o interior do NEB, costa Oeste e região Sul da AS, com valores acima de 3°C. Nas demais áreas a REQM apresentam valores entre o limiar de 0.5 e 1.5°C.

A REQM do modelo BRAMS (Fig. 6.7b) apresentou um padrão semelhante ao obtido para o MCGA/CPTEC (Fig. 6.7a). Entretanto, o BRAMS apresentou maiores erros sobre o interior da região Nordeste e região Sudeste do Brasil. Sobre a Amazônia onde, foram observados os maiores valores de CP (> 0.6), nota-se os menores valores de REQM.

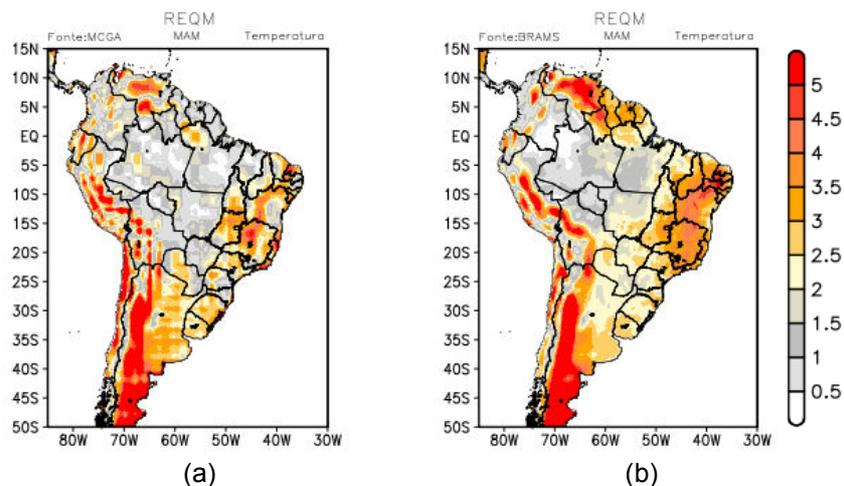


Figura 6.7 - REQM espacial entre a temperatura média a 2 metros observada e a prevista pelos modelos MCGA/CPTEC (a) e BRAMS (b), para o trimestre MAM. Os dados de temperatura observada foram fornecidos pelo ERA-interim (DEE et al., 2011)

A Figura 6.8 mostra o viés médio da temperatura média a 2 metros ($^{\circ}\text{C}$) prevista pelos modelos global MCGA/CPTEC e regional BRAMS. Observa-se, no mapa do viés médio referente ao MCGA/CPTEC (Fig. 6.8a), uma superestimativa da temperatura em praticamente toda a região Norte da AS com valores entre 2 e 4°C . Nas demais áreas do continente Sul Americano o modelo global subestima a temperatura observada. Sobre os Andes são verificados desvios negativos da ordem de -8°C .

Para o mapa do viés médio das previsões do modelo regional (Fig. 6.8b), nota-se que o modelo subestima a temperatura em toda a AS com exceção apenas de algumas áreas isoladas na costa Oeste. Os maiores valores do desvio da temperatura são verificados sobre os Andes e no interior do NEB com valores acima de -4°C . Os menores desvios foram observados sobre a região Norte que são coerentes com os mapas de CP e REQM que apresentam valores máximos e mínimos, respectivamente.

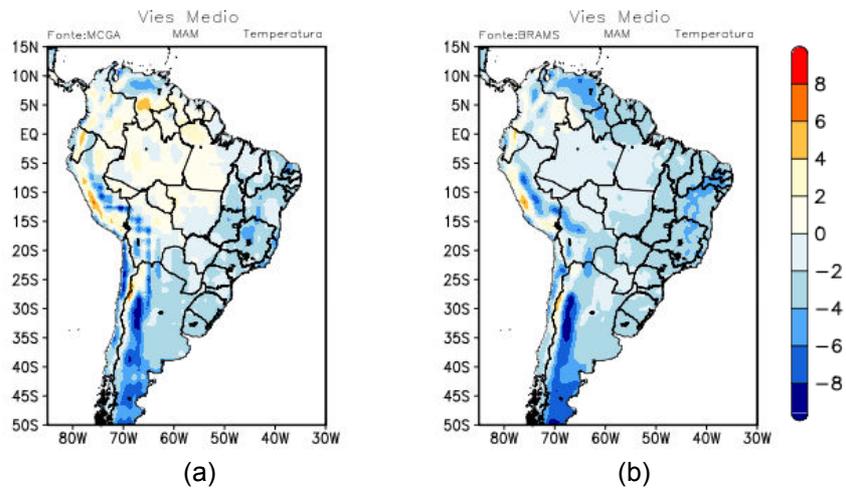


Figura 6.8 - Viés médio da temperatura média a 2 metros ($^{\circ}\text{C}$) prevista pelo modelo MCGA/CPTEC (a) e BRAMS (a), para o trimestre MAM. Os dados de temperatura observada foram fornecidos pelo ERA-interim (DEE et al., 2011)

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este trabalho representa uma contribuição aos estudos de modelagem climática sazonal com ênfase na estação chuvosa na região Nordeste do Brasil. O objetivo principal do trabalho foi o de calibrar e avaliar a destreza do modelo regional BRAMS aninhado unidirecionalmente ao modelo global MCGA do CPTEC em prever a variabilidade climática dos padrões atmosféricos dominantes sobre a América do Sul, para o trimestre MAM de 1979 a 2010. As previsões com o BRAMS foram produzidas na resolução espacial de 30 km, tendo como condições de contorno a temperatura da superfície do mar persistida e a umidade do solo climatológica. Para cada ano desde 1979 a 2010 foram gerados um conjunto de 10 membros de previsão.

Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que:

Para atingir os objetivos desta pesquisa foi necessário calibrar o modelo BRAMS para que o mesmo pudesse atuar na escala de clima sazonal, visto que, atualmente o modelo está calibrado para a escala de tempo (previsões para até 7 dias). O processo de calibração foi realizado para dois episódios de extremos climáticos um ano de El Niño (1983) e um ano de La Niña (1989), durante o trimestre MAM que é o foco deste trabalho. Após o processo de calibração, o modelo BRAMS conseguiu reproduzir o padrão de precipitação associado a esses dois eventos climáticos extremos, como a redução (aumento) da precipitação principalmente no leste da região Norte e NEB e o aumento (redução) de precipitação na região Sul para o ano e 1983 (1989).

Após o processo de calibração foi investigado o desempenho do modelo global e do modelo regional em reproduzir aspectos gerais dos padrões climatológicos e dos padrões espaciais anômalos dos compostos sazonais para anos de El

Niño e La Niña das variáveis precipitação temperatura do ar (2 metros), pressão atmosférica e circulação em altos (200 hPa) e baixos (850 hPa) níveis. Um resultado em comum a todas estas variáveis foi que os padrões espaciais gerados pelo modelo global foram similares aos resultados gerados pelo modelo regional.

De forma geral, pode-se ressaltar que os padrões de precipitação espacial climatológico durante o trimestre MAM previsto pelos modelos atmosféricos conseguem representar razoavelmente bem a observação, embora sejam notadas subestimativas e superestimativas em algumas regiões. Em particular notou-se a subestimativa da precipitação na região Norte (principalmente na Amazônia) e também sobre a região Sul, e a superestimativa de precipitação sobre o NEB e região dos Andes. Estes resultados concordam com os encontrados em estudos anteriores para modelos globais (CAVALCANTI et al., 2002) e regionais (SETH e ROJAS,2003; FERNANDEZ et al., 2003; SUN et al., 2006; ALVES , 2007).

Ambos os modelos conseguiram reproduzir realisticamente bem o sinal das anomalias de precipitação para os episódios de El Niño e La Niña. Durante os episódios de El Niño o modelo regional BRAMS reproduziu melhor o posicionamento das anomalias positivas e negativas. No entanto, em termos de intensidade da anomalia de precipitação os resultados do MCGA foram mais satisfatórios. Para os casos de La Niña o modelo regional capturou melhor a distribuição espacial da precipitação, principalmente sobre o NEB.

De maneira geral, observa-se que os modelos conseguiram reproduzir razoavelmente bem o padrão espacial climatológico de temperaturas mais quentes (frias) no Norte (Sul) da AS. Porém, na região equatorial, onde se observa uma maior uniformidade nos valores da temperatura, o modelo regional subestima os valores de temperatura observada. Já o MCGA reproduziu melhor os valores de temperatura observados em toda a região tropical, exceto sobre o NEB onde o modelo subestimou a temperatura. Com

relação às composições, para eventos de La Niña os modelos não representam bem as anomalias de temperatura média, subestimando a mesma. Em anos de episódios El Niño, o padrão espacial é razoavelmente bem representado tanto no modelo global, quanto no regional. Entretanto, é notável a subestimativa das temperaturas com relação aos valores observados em particular para o modelo regional.

Em relação ao posicionamento e intensidade do ASAS e ASPS o modelo regional mostrou-se mais consistente com o padrão espacial mais próximo ao observado do que o modelo global em praticamente toda a AS. Na composição dos episódios quentes o MCGA/CPTEC capturou melhor o sinal da anomalia de PNM, porém superestimou a área e a intensidade da anomalia com relação a observação. Ambos os modelos superestimam a extensão da área e a intensidade dos núcleos das anomalias positivas e negativas de PNM nos compostos de La Niña.

Em relação à climatologia observada, pode-se dizer que a circulação no nível de 850 hPa foi bem representada pelos modelos numéricos avaliados. Sobre o setor norte do Brasil ambos os modelos superestimam a magnitude dos ventos. O modelo regional reproduziu melhor a magnitude dos ventos de leste sobre a região Norte e Nordeste do Brasil. Ambos os modelos representaram bem o padrão observado. No entanto, para composições de El Niño o modelo regional se mostrou melhor em representar a intensidade da circulação, principalmente sobre a região Norte da AS. Na região Sul da AS o MCGA/CPTEC capturou melhor o posicionamento da anomalia da circulação. Nos mapas de composições de La Niña, ambos os modelos superestimaram a intensidade da anomalia da circulação.

Nos altos níveis (200 hPa) as previsões dos modelos são consistentes entre si, porém ambos os modelos superestimam a intensidade e o posicionamento da corrente de jato subtropical e também não conseguem representar a circulação da Alta da Bolívia. Para composições de El Niño ambos os modelos

conseguem capturar a intensidade e o posicionamento da corrente de jato subtropical. Entretanto, não conseguem representar bem o posicionamento dos pares de ciclone e anticiclones em torno da AS. Nos compostos de La Niña o modelo regional superestimou a intensidade do jato subtropical. Com relação aos resultados para os episódios de La Niña, o MCGA apresentou resultados mais próximos dos observados.

A análise da destreza das previsões climáticas sazonais dos modelos MCGA/CPTEC e BRAMS destacou resultados importantes para grande parte da AS. Os valores de CP mais expressivos, em ambos os modelos, foram observados sobre o setor norte do NEB e região Sul do Brasil, com valores de CP superior ao limiar de 0.6 e desvios da REQM relativamente baixos. Estas regiões de maior destreza são conhecidas por serem influenciadas pelas teleconexões associadas ao fenômeno ENOS. Assim os resultados aqui encontrados sugerem que os modelos utilizados conseguem reproduzir tais teleconexões. No entanto, em algumas localidades o modelo regional conseguiu capturar melhor o sinal das anomalias quando comparado ao modelo global, como por exemplo, sobre os países da costa Oeste e Norte da AS (Bolívia, Peru, Colômbia e Venezuela), apresentando sobre essas regiões valores de CP superiores aos do modelo global. Sobre o Brasil, o modelo BRAMS apresentou melhor correlação no Estado do Acre quando comparados ao modelo global.

Os modelos atmosféricos superestimaram a precipitação sobre o NEB e subestimaram sobre a região Norte e Sul da AS. De maneira geral, é possível notar que o MCGA/CPTEC apresentou os menores valores do viés na maior parte das regiões da AS quando comparado ao modelo regional BRAMS.

Para a temperatura, observou-se nas correlações do modelo global e regional um padrão uniforme em praticamente todas as regiões, com correlações positivas e acima de 0.6. A CP de ambos os modelos apresentaram os maiores valores sobre as regiões tropicais. Para o Sul da AS, ambos os mapas

mostraram valores baixos de correlação. Entretanto, as correlações de anomalia de temperatura utilizando o conjunto de previsões do BRAMS possuem valores mais expressivos do que a CP do MCGA sobre a região Norte do Brasil e o Peru.

Os maiores desvios da REQM previstos pelo MCGA/CPTEC foram observados sobre o interior do NEB, costa Oeste e região Sul da AS, com valores acima de 3 °C. Nas demais áreas a REQM apresentam valores entre o limiar de 0.5 e 1.5 °C. A REQM do modelo BRAMS apresentou um padrão semelhante ao obtido para o MCGA/CPTEC. Entretanto, o BRAMS apresentou erros mais expressivos sobre o interior da região Nordeste e região Sudeste do Brasil. Sobre a Amazônia onde, foram observados os maiores valores de CP (> 0.6), nota-se os menores valores de REQM em ambos os modelos.

Observa-se que ambos os modelos apresentam erros sistemáticos de subestimar as temperaturas na maior parte da AS. Apenas sobre a região Norte o MCGA superestimou levemente a temperatura observada. Os maiores valores do desvio da temperatura são verificados sobre os Andes e no interior do NEB com valores acima de -4°C. Os menores desvios foram observados sobre a região Norte do Brasil que são coerentes com os mapas de CP e REQM que apresentam valores máximos e mínimos, respectivamente.

Portanto, os resultados obtidos no presente trabalho mostraram que o modelo BRAMS é capaz reproduzir os principais padrões espaciais e anômalos das principais variáveis climáticas de interesse social indicando sua viabilidade de utilização nas tarefas operacionais de previsão climática sazonal em escala regional. No entanto, ainda há a necessidade de ajustes nas configurações e parametrizações utilizadas pelo modelo, para poder corrigir os erros sistemáticos aqui identificados.

Sugere-se que para trabalhos futuros as seguintes investigações:

- Reproduzir o mesmo experimento para as demais estações do ano, a fim de estudar a variabilidade sazonal do modelo BRAMS.
- Estudar o impacto de outros esquemas de parametrização de convecção e radiação para tentar encontrar um conjunto ideal e melhorado de parametrizações para a escala de clima, com o objetivo de minimizar os erros sistemáticos encontrados na presente pesquisa.
- Estudar o impacto do uso da umidade do solo mais realística no modelo regional representando condições mais próximas às observadas, em comparação ao uso da umidade do solo climatológica.
- Estudar o impacto de diferentes condições iniciais e de contorno. Como, por exemplo, utilizar TSM prevista ao invés de persistida, e uso de CI de maior resolução espacial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, L. M. **Simulações da variabilidade do clima presente sobre a América do sul utilizando um modelo climático regional**. Dissertação (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São Jose dos Campos, 2007. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/06.13.12.59>>. Acesso em: 21 maio 2014.
- ALVES, J. M. B. et al. Uma avaliação preliminar de simulações climáticas de um modelo regional espectral aninhado em um modelo global (echam4.5) sobre o setor norte da região nordeste do Brasil (1971-2000). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n.2, p.191-206, 2005.
- ALVES, J. M.B. et al. Uma aplicação da técnica de downscaling dinâmico no setor norte da Região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.18, n.2, p.161-180, 2003.
- ALVES, L. M.; MELO, A. B. C.; CHOU, S. C.; NOBRE, P. Estudo comparativo entre a precipitação sazonal simulada pelo modelo eta e observada sobre o Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro (RJ). **Anais...** 2000. P.1029-1035. CD-ROM. (INPE-10156-PRE/5684).
- AMBRIZZI, T.; De SOUZA, E. B.; PULWARTY, R. S. The Hadley and Walker regional circulations and associated ENSO impacts on the South American seasonal rainfall. In: Henry F. Diaz; Raymond S. Bradley (Org.). **The Hadley circulation: Present, Past and Future**. 1 ed, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, p. 203-235, 2004.
- ANDERSON, D. et al. Development of the ECMWF seasonal forecast system 3. **European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Tech. Rep**, v. 503, p. 58, 2007.
- ARAKAWA, A.; SCHUBERT, W. H. Interaction of a Cumulus Cloud Ensemble with the Large-Scale Environment, Part I. **Journal of Atmospheric Sciences**, 31, 674–701, 1974.
- ARAKAWA, A., JUNG, J.-H., and WU, C.-M.: Toward unification of the multiscale modeling of the atmosphere. **Atmospheric Chemistry Physics**, 11, 3731, 2011.
- BONATTI, J. P. Modelo de circulação geral atmosférico do CPTEC. **Climanálise Especial, edição comemorativa de**, v. 10, 1996. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/>> . Acesso em: 20 setembro 2012.

BOUGEAULT, P. Physical parameterizations for limited Area Models: Some current problems and issues. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 63, n. 1-2, p. 71-88, 1997.

BRANKOVIC, C.; PALMER T. N. Seasonal skill and predictability of ECMWF PROVOST ensembles. **Quarterly Journal Royal Meteorological Society**, v. 126, p. 2035-2067, 2000.

BRANKOVIC, C.; PALMER, T. N.; FERRANTI, L. Predictability of seasonal atmospheric variations. **Journal of Climate**, v. 7, p. 217-237, 1994.

CAVALCANTI, I. F. A. et al. Global climatological features in a simulation using the CPTEC-COLA AGCM. **Journal of Climate**, v. 15, n. 21, p. 2965-2988, 2002.

CECCATO, P. et al. Malaria stratification, climate, and epidemic early warning in Eritrea. **American Journal of Tropical Medicine and Hygiene**, v. 77, n. 6, p. 61-68, 2007.

COCKE, S.; LAROW, T. E. Seasonal Predictions Using a Regional Spectral Model Embedded within a Coupled Ocean–Atmosphere Model. **Monthly Weather Review**, v. 128, n.3, p.689-708, 2000.

COELHO, C. A. S.; COSTA, S. Challenges for integrating seasonal climate forecasts in user applications. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 2, n. 5, p. 317-325, 2010.

COELHO, C. A. S.; STEPHENSON, D. B.; BALMASEDA, M.; DOBLAS-REYES, F. J.; VAN OLDENBORGH, G. J. Towards an Integrated Seasonal Forecasting System for South America. **Journal of Climate**, v. 19, p. 3704-3721, 2006.

COSTA, P. N. F. **Verificação do modelo de circulação geral da atmosfera do CPTEC/COLA: ciclo hidrológico e processos de superfície**. 1997. 83p. (INPE-12273-TDI/984). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1997. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1913/2005/05.06.17.45>>. Acesso em: 21 maio 2014.

COUTINHO, M. M. **Previsão por conjuntos utilizando perturbações baseadas em componentes principais**. São José dos Campos, 1999. 136p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999.

CUDRA, S. V.; DA ROCHA, R. P. Sensitivity of regional climatic simulation over Southeastern South America to SST specification during austral summer. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 6, p. 793-804, 2007.

CUADRA, S. V.; ROCHA, R. P. Simulação numérica do clima de verão sobre o Brasil e sua variabilidade. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.2, p.271-282, 2006.

CHALLINOR, A. J.; SLINGO, J. M.; WHEELER, T. R.; DOBLAS-REYES, F. J. Probability simulations of crop yield over western India using the DEMETER seasonal hindcast ensembles. **Tellus**, v. 57, p. 498-512, 2005.

CHARNEY, J. G.; SHUKLA, J. Predictability of monsoons. **Monsoon Dynamics**, p. 99-109, 1981.

CHEN, M.; XIE, P. CPC precipitation working group. CPC Unified Gauge-based Analysis of Global Daily Precipitation, Western Pacific Geophysics Meeting, Cairns, Australia, 2008.

CHOU, S. C.; BUSTAMANTE, J. F.; GOMES, J. L. Evaluation of Eta model seasonal precipitation forecasts over South America. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 12, n. 4, p. 537-555, 2005.

CHOU, S. C.; NUNES, A. M. B.; CAVALCANTI, I. F. A. Extended range forecasts over South America using the regional ETA model. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, p. 10147-10160, 2000.

DA ROCHA, R. P. et al. Effects of RegCM3 parameterizations on simulated rainy season over South America. **Climate Research**, v. 2, p. 253, 2012.

DEE, D. P. et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Bulletin of American Meteorological Society**, v. 137, p. 553-597, 2011.

DICKINSON, R. E.; ERRICO, R. M.; GIORGI, F.; BATES, G. T. A regional climate model for the western United States. **Climatic Change**, v. 15, n. 3, p. 383-422, 1989.

DIRMEYER, P. A. The role of the land surface background state in climate predictability. **Journal of Hydrometeorology**, v. 4, p. 599-610, 2003.

DOUVILLE, H. Assessing the influence of soil moisture on seasonal climate variability with AGCMs. **Journal of Hydrometeorology**, v. 4, p. 1044-1066, 2003

DOUVILLE, H.; ROYER, J.-F. Sensitivity of the Asian summer monsoon to anomalous Eurasian snow cover within the Météo-France GCM. **Climate Dynamics**, v. 12, p. 449-466, 1996.

DRUYAN, L. M.; FULAKEZA, M.; LONERGAN, P. Dynamic downscaling of Seasonal Climate Predictions over Brazil. **Journal of Climate**, v. 15, n. 23, p. 3411-3426, 2002.

FERNANDEZ, J. P. R.; FRANCHITO, S. H.; RAO, V. B. Simulation of the summer circulation over South America by two regional climate models. Part I: Mean climatology. **Theoretical and applied climatology**, v. 86, n. 1-4, p. 247-260, 2006.

FIGUEROA, S. N. **Estudo dos sistemas de circulação de verão sobre a América do sul e suas simulações com modelos numéricos**. 1997-08 181 p. (INPE-7121-TDI/672). Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos, 1997. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/1999/06.15.09.40>>. Acesso em: 21 maio 2014.

FREITAS, S. R.; RODRIGUES, L.F.; LONGO, K.M.; PANETTA, J. Impact of a monotonic advection scheme with low numerical diffusion on transport modeling of emissions from biomass burning. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 4, p. M01001, 2012.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; SILVA DIAS, M. A. F. et al. The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS) – Part 1: Model description and evaluation. **Atmospheric Chemistry Physics**, v. 9, p. 2843-2861, 2009.

FRÍAS, M. D.; FERNÁNDEZ, J.; SÁENZ, J.; PUEBLA, C.-R. Operational predictability of monthly average maximum temperature over the Iberian Peninsula using DEMETER simulation and downscaling. **Tellus**, v. 57, p.448-463, 2005.

GALLUS, J. R.; WILLIAM, A. Eta simulations of three extreme precipitation events: Sensitivity to resolution and convective parameterization. **Weather and forecasting**, v. 14, n. 3, p. 405-426, 1999.

GANDIN, L. S. **Objective analysis of meteorological fields**. Jerusalem: Israel program for scientific translations, 1965.

GEVAERD, R.; FREITAS, S. R. Estimativa operacional da umidade do solo para iniciação de modelos de previsão numérica da atmosfera parte i: descrição da metodologia e validação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.3, p. 1-15, 2006.

GIORGI, F.; MEARN, L. O. Introduction to special section: Regional climate modeling revisited. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 104, n. D6, p. 6335-6352, 1999.

GIORGI, F.; SHIELDS, C. Tests of precipitation parameterizations available in latest version of NCAR regional climate model (RegCM) over continental United States. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. D6, p.6353-6375, 1999.

GIORGI, F.; MARINUCCI, M. R. Validation of a regional atmospheric model over Europe: Sensitivity of wintertime and summertime simulations to selected physics parameterizations and lower boundary conditions. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 117, n. 502, p. 1171-1206, 1991.

GIORGI, F. Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. **Journal of Climate**, v. 3, n. 9, p. 941-963, 1990.

GODDARD, L.; MASON, S. J.; ZEBIAK, S. E.; ROPELEWSKI, C. F.; BASHER, R.; CANE, M. A. Current approaches to seasonal-to-interannual climate predictions. **International Journal of Climatology**, v. 21, p. 1111-1152, 2001.

GODDARD, L.; GRAHAM, N. E. The importance of the Indian ocean for simulating rainfall anomalies over eastern and southern Africa. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, p. 19099-19116, 1999.

GRELL, G. A.; FREITAS, S. R. A scale and aerosol aware stochastic convective parametrization for weather and air quality modeling. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussion**, v.13, p. 23845-23893, 2013.

GRELL, G. A.; DÉVÉNYI, D. A new approach to parameterizing convection using ensemble and data assimilation techniques. **Geophysical Research Letters**.v.29, p.1693, 2002.

HASTENRATH, S.; SUN, L.; MOURA, A. D. Climate prediction for Brazil's Nordeste by empirical and numerical modeling methods. **International Journal of Climatology**, v. 29, n. 6, p. 921-926, 2009.

HASTENRATH, S. **Climate Dynamics of the Tropics**. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1991. 488p.

HUDSON, D. A.; JONES, R. G. Regional climate model simulations of present-day and future climates of southern Africa. **Hadley Centre Technical Note**, v. 39, p. 41, 2002.

HUFFMAN, G.J. et al. Global precipitation at one degree daily resolution from multi satellite observations. **Journal of Hydrometeorology**, v. 2, p. 36-50, 2001.

JI, Y.; VERNEKAR, A. Simulation of the Asian summer Monsoons of 1987 and 1988 with a Regional Model nested in a global MCGA. **Journal of Climate**, v.10, p.1965-1979, 1997.

JURY, M.R. Climate influence on dengue epidemics in Puerto Rico. **International Journal of Environmental Health Research**, v. 18, p. 323-334, 2008.

KALNAY, E. et al. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, n. 3, p. 437-471, 1996.

KUO, H. L. Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large-scale flow. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 31, p.1232-1240, 1974.

- LEUNG, L. R.; QIAN, Y.; BIAN, X. D.; WASHINGTON, W.M.; HAN, J. G.; ROADS, J. O. Mid-Century Ensemble Regional Climate Change Scenarios for the Western United States. **Climate Change**, v. 62, p.75-113, 2004.
- LEUNG, L. R.; GHAN, S. J. Pacific Northwest Climate Sensitivity Simulated by a Regional Climate Model Driven by a GCM. Part I: Control Simulations. **Journal of Climate**, v.12, p.2010-2030, 1999.
- LIMA, A. E.; FIRMINO, N. L. J.; GOMES FILHO, F. M. A relação da previsão da precipitação pluviométrica e casos de dengue nos estados de alagoas e Paraíba nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, n. 3, p. 264-269, 2008.
- LIU, Y.; GIORGI, F.; WASHINGTON, W. M. Simulation of summer monsoon climate over east Asia with an NCAR Regional Climate Model. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 10, p. 2331-2348, 1994.
- LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; DIAS, M. A. S.; DIAS, P. L.S; RODRIGUES, L. F. Numerical modeling of the biomass-burning aerosol direct radiative effects on the thermodynamics structure of the atmosphere and convective precipitation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOUTHERN HEMISPHERE METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY (ICSHMO),8., 2006, Foz do Iguaçu. **Proceedings...** São José dos Campos: INPE, 2006. p. 283-289.
- LORENZ, E. N. The predictability of a flow which possesses many scales of motion. **Tellus**, v. 21, p. 289-307, 1969.
- LORENZ, E. N. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. **Tellus**, v. 17, p. 321-333, 1965.
- LORENZ, E. N. Deterministic non periodic flow. **Journal of the Atmospheric sciences**, v. 20, p. 130–141, 1963.
- LOWE, RACHEL et al. Spatio-temporal modeling of climate-sensitive disease risk: Towards an early warning system for dengue in Brazil. **Computers & Geosciences**, v. 37, n. 3, p. 371-381, 2011.
- LUCIO, F.; MUIANGA, A.; MULLER, M. Flood management in Mozambique. **Climate Risk Management in Africa: Learning from Practice**, p. 15-30, 2007.
- MACHADO, R. D.; ROCHA, R. R. Previsões climáticas sazonais sobre o Brasil: avaliação do regcm3 aninhado no modelo global CPTEC/COLA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.1, p.121-136, 2011.
- MACHADO, R. D. **Avaliação de previsões climáticas sazonais sobre o Brasil e a dependência na parametrização de convecção**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - USP, São Paulo, 2008.

MARLETTO, V.; ZINONI, F.; CRISCUOLO, L.; FONTANA, G.; MARCHESI, S. Evaluation of downscaled DEMETER multi-model ensemble seasonal hindcasts in northern Italy by means of a model of wheat growth and soil water balance. **Tellus**, v. 57, p. 488-497, 2005.

MARTÍNEZ-CASTRO, D.etal. Sensitivity studies of the RegCM-3 simulation of summer precipitation, temperature and local wind field in the Caribbean Region. **Theoretical and Applied Climatology**, v.86, p.5-22, 2006.

MELLOR, G.L.; YAMADA, T. Development of a turbulence closure model geophysical fluid problems. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v.20, p.851-857, 1982.

MELLOR, G. L.; YAMADA, T. A Hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. **Journal of Atmospheric Sciences**, 31, 1791-1806, 1974.

MENÉNDEZ, C.G.; SAULO, A.C.; LI, Z.-X. Simulation of South American wintertime climate with a nesting system. **Climate Dynamics**, v. 17, p. 219-231, 2001.

MESINGER, F.; ARAKAWA, A. Numerical Methods Used in Atmospheric Models. **GARP Publications Series**, N° 17, Volume I, 62p, 1976.

MISRA, V. Understanding the predictability of seasonal precipitation over northeast Brazil. **Tellus**, v .58A, p. 307-319, 2006.

MISRA, V.; DIRMEYER, A.P.; KIRTMAN, B.P. Dynamic Downscaling of Seasonal Simulation over South American. **Journal of Climate**, v.16, p.103-117, 2003.

MISRA, V. et al. Regional simulation of interannual variability over South America. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D20, p. LBA 3-1-LBA 3-16, 2002b.

MOLTENI, F.; BUIZZA, R.; PALMER, T. N.; PETROLIAGIS, T. The ECMWF Ensemble Prediction System: Methodology and Validation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 122, p. 73-119, 1996.

MONCUNIL, D. F. et al. Uma breve descrição do sistema de previsão climática regionalizada (Downscaling Dinâmico) implantado na FUNCEME. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., Foz do Iguaçu, Brasil. **Anais...** 2002. v. 1, p. 1291-1296. CD- ROM. (INPE-9505-PRE/5158). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1915/2005/04.13.17.28>>. Acesso em: 17 abr. 2013).

MOREIRA, D. S. et al. Coupling between the JULES land-surface scheme and the CCATT-BRAMS atmospheric chemistry model (JULES-CCATT-BRAMS1.0): applications to numerical weather forecasting and the CO2 budget in South

America. **Geoscientific Model Development Discussions**, v. 6, p. 453-494, 2013.

MORSE, A. P.; DOBLAS-REYES, F. J.; HOSHEN, M. B.; HAGEDORN, R.; PALMER, T. N. A forecast quality assessment of an end-to-end probabilistic multi-model seasonal forecast system using a malaria model. **Tellus**, v. 57, p. 464-475, 2005.

MOURA, A. D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: observations, theory and numerical experiments with general circulation model. **Journal Atmospheric Sciences**, v. 38, p. 2653-2675, 1981.

NEVES, D. G.; CUNHA, A. C.; SOUZA, E. B.; BARRETO, N. J. C. Modelagem climática regional durante dois anos de extremos de precipitação sobre o estado do Amapá: teste de sensibilidade aos esquemas convectivos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.4, p.569-578, 2011.

NICOLINI, M.; SALIO, P.; KATZFEY, J.J.; MCGREGOR, J.L. January and July regional climate simulation over South American. **Journal of Geophysical Research**, v.107, p. 4637, 2002.

NOBRE, P.; A. D. MOURA.; L. SUN. Dynamical downscaling of seasonal climate prediction over northeast Brazil with ECHAM3 and NCEP'S Regional Spectral Model at IRI. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.82, p.2787-2796, 2001.

OLIVEIRA, G. S. **O El Niño e Você** - o fenômeno climático. Cachoeira Paulista - SP: Transtec Editorial, 1999. 116 p. ISBN 85-85417-12-9. (INPE-11501-RPQ/788).

OYAMA, M. D. Erros sistemáticos no clima da região tropical da América do Sul simulado pelo modelo regional MM5 em baixa resolução horizontal. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 1, p. 118-133, 2006.

PALMER, T. N. The economic value of ensemble forecasts as a tool for risk assessment: From days to decades. **Quarterly Journal Royal Meteorological Society**, v. 128, p. 747-774, 2002.

PIELKE, R. A. et al. A comprehensive meteorological modeling system –RAMS. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 49, p. 69-91, 1992.

PIELKE, R. A. **Mesoscale meteorological modeling**. Orlando, FL: Academic Press. 1984. 612p.

QIAN, J.-H.; SETH, A.; STEPHEN, Z. Reinitialized versus Continuous Simulation for Regional Climate Downscaling. **Monthly Weather Review**, v.131, p.2857-2874, 2003.

REYNOLDS, R. W.; RAYNER, N. A.; SMITH, T. M.; STOCKES, D. C.; WANG, W. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. **Journal of Climate**, v. 15, p. 1609-1625, 2002.

ROCHA, A.; SIMMONDS, I. Interannual variability of south-eastern African summer rainfall. Part I: Relationships with air-sea interaction processes. **International Journal of Climatology**, v. 17, p. 235-265, 1997.

ROJAS, M. Multiply Nested Regional Climate Simulation for Southern South America: Sensitivity to Model Resolution. **Monthly Weather Review**, v. 134, n. 8, p. 2208- 2223, 2006.

ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. Precipitation patterns associated with high index phase of Southern Oscillation. **Journal of Climate**, v. 2, n. 3, p. 268–284, 1989.

ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. North American precipitation and temperature patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation (ENSO). **Monthly Weather Review**, v. 114, n. 12, p. 2352-2362, 1986.

ROSÁRIO, N. E.; LONGO, K. M.; FREITAS, S.; YAMASOE, M. A.; FONSECA, R. M. Modeling South America regional smoke plume: aerosol optical depth variability and shortwave surface forcing. **Atmospheric Chemistry Physics Discuss**, v. 12, p. 17465-17501, 2012.

SANTOS, A. F. et al. A parametric study for firefly algorithm by solving an inverse problem for precipitation field estimation. In: International Symposium on Uncertainty Quantification and Stochastic Modeling (Uncertainties 2012), 1., 2012, Maresias, SP. **Proceedings...** 2012.

SANTOS, A. F. et al. Análise de sensibilidade das simulações de precipitação convectiva do modelo BRAMS às melhorias na parametrização de cumulus. CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16., 2010, Belém – PA. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMET, 2010.

SAHA, S. et al. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 91, p. 1015–1057, 2010.

SAHA, S. et al. The NCEP Climate Forecast System. **Journal of Climate**, v. 19, p. 3483-3517, 2006.

SEN, O.L.; WANG, Y.; WANG, B. Impact of Indochina deforestation on the East-Asian summer monsoon. **Journal of Climate**, v. 17, p. 1366-1380, 2004a.

SEN, O.L.; WANG, Y.; WANG, B. Re-greening the desertification lands in northern China: Implications from a regional climate model experiment. **Journal of Meteorological Society of Japan**, v.82, n. 6, p. 1679-1693, 2004b.

- SETH, A.; RAUSCHER, S.A.; CAMARGO, S. J.; et al. RegCM3 regional climatology for South America using reanalysis and ECHAM global model driving fields. **Climate Dynamics**, v. 28.p. 461–480, 2007.
- SETH, A.; ROJAS, M. Simulation and sensitivity in a nested modeling system for South American. Part I: Reanalyses boundary forcing. **Jornal of Climate**, v.16, p. 2437-2453, 2003.
- SILVA, S. B. V., KOUSKY, E. V., SHI, W., HIGGINS, W. An Improved Grided Historical Daily Precipitation Analysis for Brazil. **Journal Hydrometeorology**, v. 8, p. 848-861, 2007.
- SOUZA, E. B. et al. Precipitação sazonal sobre a Amazônia oriental no período chuvoso: Observações e simulações regionais com o RegCM3. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.2, p.111-124, 2009.
- SOUZA, E. P. **Estudo teórico e numérico da relação entre convecção e superfícies heterogêneas na região amazônica**. 1999. 121 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- SUN, L.; MONCUNILL, D. F.; LI, H.; MOURA, A. D.; SOUZA FILHO, F. A. Climate downscaling over northeast Brazil using NCEP RSM97. **Journal of Climate**, v.18, n. 4, p.551-567, 2005.
- SUN, L.; SEMAZZI, F. H. M.; GIORGI, F.; OGALLO, L. Application of the NCAR regional climate model to eastern Africa: 1- Simulation of the short rains of 1988. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. D6, p. 6529-6548, 1999.
- SHUKLA, J. Dynamical predictability of monthly means. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 38, p.2547-2572, 1981.
- STERN, W.; MYAKODA, K. Feasibility of seasonal forecast inferred from multiple GCM simulations. **Journal of Climate**, v. 8, p. 1071-1085, 1995.
- TANAJURA, C. A. S. **Modeling and analysis of the South American summer climate**. 1996. Tese (Doutorado em Meteorologia) - University of Maryland, College Park Maryland, 1996.
- TARASOVA, T. A.; FERNANDEZ, J. P. R.; PISNICHENKO, I. A.; MARENGO, J. A.; CEBALLOS, J. C.; BOTTINO, M. J. Impact of New Solar Radiation Parameterization in the Eta Model on the Simulation of Summer Climate over South America. **J. Appl. Meteor. Climatol.**, 45, 318-333, 2006.
- TIEDTKE, M. The sensitivity of the time mean large scale flow to cumulus convection in the ECMWF model. **Workshop on Convection in Large Scale Numerical Models**. ECMWF, 297-316, 1983.

TRENBERTH, K. E. Development and forecasts of the 1997/98 El Niño: CLIVAR scientific issues. **CLIVAR Exchanges**, v. 3, p. 4-14, 1998. Disponível em: <<http://www.clivar.org>>. Acesso em: 17 abril 2013.

THOMSON, M. C. et al. Malaria early warnings based on seasonal climate forecasts from multi-model ensembles. **Nature**, v. 439, n. 7076, p. 576-579, 2006.

THOMSON, A.; JENDEN, P.; EDWARD, J. C. **Information, Risk and Disaster Preparedness: responses to the 1997 El Niño Event**. London: SOA Sahel: Department for International Development, 1998. ESCOR Research Report AG1215.

UPPALA, S. M. et al. The ERA-40 re-analysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, n. 612, v. 131, p. 2961-3012, 2005.

WALKO, R. L.; TREMBACK, J. C.; HERTENSTEIN, R. F. A. **RAMS—The regional atmospheric modeling system**, version 3b, user's guide. Fort Collins, CO: ASTER Division, Mission Research Corporation, 1995.

WALLACE, J. M.; GUTZLER, D. S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. **Monthly Weather Review**, v. 109, p. 785-812, 1980.

WEBER, A. H.; BUCKNER, M. R.; WEBER, J. H. Statistical Performance of Several Mesoscale Atmospheric Dispersion Models. **Journal of Applied Meteorology**, v. 21, p. 1633-1644, 1982.

WILLIAMS, P. D. A proposed modification to the Robert-Asselin time filter. **Monthly Weather Review**, v. 137, p. 2538-2546, 2009.

WU, DENG-HUA; ANDERSON, T. L. D.; DAVEY, K. M. ENSO prediction experiments using a simple ocean-atmosphere model. **Tellus**, v. 46A, p. 465-480, 1994.

YU, Z. et al. Evaluation of basin-scale hydrologic response to a multi-storm simulation. **Journal of Hydrology**, v. 257, p. 212-225, 2002.