



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



**UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE PROBLEMAS
INVERSOS NA PARAMETRIZAÇÃO CONVECTIVA DO
MODELO CATT-BRAMS PARA SIMULAÇÃO DE
PRECIPITAÇÃO SOBRE A AMÉRICA DO SUL**

Ariane Frassoni dos Santos de Mattos

Tese de Doutorado em Meteorolo-
gia do INPE, orientada pelos Prof.
Drs. Saulo R. Freitas e Manoel A.
Gan

URL do documento original:

[<http://urlib.net/>](http://urlib.net/)

INPE
São José dos Campos
2013

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) 3945-6923/6921

Fax: (012) 3945-6919

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:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



**UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE PROBLEMAS
INVERSOS NA PARAMETRIZAÇÃO CONVECTIVA DO
MODELO CATT-BRAMS PARA SIMULAÇÃO DE
PRECIPITAÇÃO SOBRE A AMÉRICA DO SUL**

Ariane Frassoni dos Santos de Mattos

Tese de Doutorado em Meteorolo-
gia do INPE, orientada pelos Prof.
Drs. Saulo R. Freitas e Manoel A.
Gan

URL do documento original:

[<http://urlib.net/>](http://urlib.net/)

INPE
São José dos Campos
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Santos, Ariane.

Cutter Utilização da técnica de Problemas Inversos na parametrização convectiva do modelo CATT-BRAMS para simulação de precipitação sobre a América do Sul / Ariane Frassoni dos Santos de Mattos. – São José dos Campos : INPE, 2013.

xvii + 58 p. ; ()

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

Orientadores : Saulo R. Freitas e Manoel A. Gan.

1. Palavra chave. 2. Palavra chave 3. Palavra chave. 4. Palavra chave. 5. Palavra chave I. Título.

CDU 000.000

Copyright © 2013 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2013 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela força e perseverança concedidas. A Ele por guiar meus passos em meio às dificuldades impostas pela vida.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), pela oportunidade de continuar os estudos e também pela utilização de suas instalações e equipamentos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão da bolsa de doutorado (processo FAPESP número 2008/01983-0). À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e à Pós-graduação em Meteorologia do INPE (PGMet) pelos recursos financeiros concedidos ao longo do curso.

Às chefias do CPTEC/INPE pela oportunidade de desenvolver este trabalho juntamente com minhas obrigações profissionais, possibilitando alterações de horário, uso do espaço físico e suporte.

Aos membros da banca examinadora, pelas críticas e sugestões.

Aos professores do curso de Pós-Graduação em Meteorologia, pelos conhecimentos compartilhados. Em especial aos meus orientadores Dr. Saulo Ribeiro de Freitas e Manoel Alonso Gan, bem como ao colaborador de pesquisa, Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho, não só pela orientação durante a realização deste trabalho, mas também pela amizade, paciência e confiança.

À secretaria da PGMet, pelo profissionalismo e dedicação na realização das tarefas burocráticas referentes ao curso. Ao Cesar Oliveira e ao Serviço de Supercomputação e Suporte do CPTEC pelo suporte técnico nos diversos pedidos de ajuda. Aos secretários da Divisão de Modelagem e Desenvolvimento (DMD), Gilson de Paula e Glaucieli Lino, pela colaboração e palavras de apoio.

A todos os colegas da turma de 2008, e aos grandes amigos Enver Ramirez, Rosio Camayo, Gabriel Munchow, Demerval Moreira, Luiz Sapucci, pela amizade e apoio. Ao Grupo de Previsão Climática, na pessoa dos colegas Caio, Moacir, Diego, Mári, Ester, Dênis, Fabíola, Carlos Renato, pela ajuda, coleguismo e por permitirem em muitos momentos usufruir do meu tempo de trabalho em assuntos delacionados à tese de doutorado. A todos os colegas que de alguma maneira contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também a todos os integrantes do Grupo

de Modelagem da Atmosfera e Interfaces, pela contribuição para a elaboração deste trabalho.

Aos meus filhos Lara e João Pedro pelos sorrisos e abraços que me animaram em vários momentos desta etapa. À minha mãe Dione e aos meus sogros Manoel e Marlene, pelo apoio no cuidado da minha família, pelo carinho e motivação. Ao meu irmão Igor, minha cunhada Betina, meus tios Ademir, Julie, Eloy, Rozimeli e Genezi, pelo apoio e incentivo.

Agradeço especialmente ao colega, amigo e companheiro, meu esposo João Gerd, pela ajuda, paciência e amor dedicados em todo o decorrer do curso. Sem tua ajuda e abnegação em vários momentos desta etapa, este trabalho não teria sido desenvolvido.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo aperfeiçoar a qualidade das previsões numéricas de tempo do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), introduzindo o resultado da aplicação de um procedimento numérico que objetivamente define a melhor ponderação para os membros do *ensemble* da moderna parametrização de cumulus precipitantes do modelo. O método de otimização metaheurístico denominado Firefly (FY) foi utilizado para ponderar um conjunto de simulações de precipitação diárias obtidas a partir do modelo *Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System* (BRAMS) para a América do Sul. As características do verão do mês de janeiro dos anos de 2006, 2008 and 2010 foram analisadas. Considerou-se os membros do conjunto de simulações de precipitação geradas utilizando cinco diferentes opções de fechamento, representando diferentes formulações para o controle dinâmico da convecção (a modulação da convecção pelo ambiente de grande escala) em um esquema de parametrização convectiva profunda. Este metodologia possibilita combinar diferentes hipóteses para simular a precipitação, as taxas de aquecimento e umedecimento do ambiente devido à convecção. A ponderação de tais membros foi considerada como um problema inverso de estimação de parâmetros, visando gerar um conjunto de pesos associados à cada membro para compor a combinação dos fechamentos da parametrização convectiva. No método de otimização, assumiu-se uma função objetivo que minimiza a diferença entre o dado observado e simulado por meio da diferença quadrática entre os cinco campos de precipitação do modelo e o campo observado. A aplicação e validação da metodologia levou em consideração a utilização de campos de precipitação diários, definidos sobre a América do Sul e obtidos de técnicas de sensoriamento remoto combinadas a dados de estações meteorológicas convencionais. Os pesos foram obtidos para ponderar o fluxo de massa de cada membro (os quais estão diretamente relacionados com a precipitação) do conjunto de fechamentos. A metodologia de avaliação levou em consideração o cálculo de métricas estatísticas comumente utilizadas na análise de dados meteorológicos. Os resultados indicaram que o movimento vertical em baixos níveis é o principal mecanismo para a determinação do fluxo de massa e desenvolvimento da convecção, recebendo este o maior peso no processo de treinamento. A importância do movimento vertical e o papel da defasagem induzida pelo cálculo do fluxo de massa utilizando este fechamento, por calcular esta propriedade em um passo de tempo atual e posterior, e com isso simulando a atuação das correntes de ar descendentes na formação de novas células convectivas, teve maior importância frente aos fechamentos associados ao cálculo da energia potencial disponível para a convecção. O processo de treinamento produziu uma combinação tal que resultou em taxas mais realistas de aquecimento e secamento da coluna atmosférica. Com isso, a precipitação simulada foi melhor representada. Além disso, o desempenho do modelo em simular outras variáveis atmosféricas também foi notado. A representação da temperatura próximo à superfície, bem com os padrões de pressão ao nível médio do mar foram melhor representados em comparação com a versão atualmente utilizada do

modelo BRAMS. Entretanto, verificaram-se erros sistemáticos nos campos de vento, os quais não estão diretamente relacionados ao fechamento escolhido. É necessário melhor investigação a respeito da simulação da circulação em baixos níveis do modelo, fator este determinante para a geração de instabilidade em diversas áreas da América do Sul.

USE OF INVERSE PROBLEMS IN THE CUMULUS PARAMETERIZATION OF THE CATT-BRAMS TO SIMULATE PRECIPITATION OVER SOUTH AMERICA

ABSTRACT

In this work we consider an optimization problem applying the metaheuristic Firefly algorithm (FY) to weight an ensemble of rainfall forecasts from daily precipitation simulations with the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS) over South America. The summer characteristics of January 2006, 2008 and 2010 were performed using the atmospheric model Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS). The method is addressed as a parameter estimation problem to weight the ensemble of precipitation forecasts carried out using different options of the convective parameterization scheme. Ensemble simulations were performed using different choices of closures, representing different formulations of dynamic control (the modulation of convection by the environment) in a deep convection scheme. As a result, the precipitation forecasts can be combined in several ways, generating a numerical representation of precipitation and atmospheric heating and moistening rates. The purpose of this study was to generate a set of weights to compute a best combination of the hypothesis of the convective scheme. To minimize the difference between observed data and forecasted precipitation, the objective function was computed with the quadratic difference between five simulated precipitation fields and observation. The application and validation of the methodology is carried out using daily precipitation fields, defined over South America and obtained by merging remote sensing estimations with rain gauge observations and precipitation field estimated by the Tropical Rainfall Measuring Mission satellite. The quadratic difference between the model and observed data was used as the objective function to determine the best combination of the ensemble members to reproduce the observations. Weights were obtained using the firefly algorithm and the mass fluxes of each closure of the convective scheme were weighted generating a new set of mass fluxes. The validation of the methodology is carried out using classical statistical scores. The results indicate the low-level omega as the main physical component to weight the ensemble of closures. The importance of the vertical motion and the role of the time lag induced in the closure that relates the importance of the downdrafts to trigger new convective cells were highlighted in the high weighted parameters associated. The algorithm has produced the best combination of the weights, resulting in heating and drying rates more realistic and consequently precipitation simulations closest to the observations. In addition, it was observed better skill of the model in simulate meteorological variables, as temperature near surface and sea level pressure, as closest to the observation as compared with the old ensemble mean calculation. However, there were systematic errors in the low-level wind fields, which are not directly related to the chosen closure. Better research regarding the simulation of low level circulation model, an important issue for generating instability in many areas of South America is required.

LISTA DE FIGURAS

		<u>Pág.</u>
1	Precipitação acumulada no mês de janeiro de 2008.	2
2	Imagem do satélite GOES-10 do período: a) 14/01/2008 12:00 UTC, b) 14/01/2008 18:00 UTC, c) 15/01/2008 01:00 UTC, d) 15/01/2008 06:00 UTC, e) 15/01/2008 08:00 UTC, f) 15/01/2008 17:00 UTC, g) 16/01/2008 00:00 UTC, h) 16/01/2008 05:00 UTC, i) 16/01/2008 12:00 UTC, j) 16/01/2008 18:00 UTC, k) 16/01/2008 20:00 UTC, l) 17/01/2008 05:00 UTC, m) 17/01/2008 16:30 UTC, n) 17/01/2008 21:00 UTC, o) 17/01/2008 23:00 UTC, p) 18/01/2008 00:00 UTC, q) 18/01/2008 06:00 UTC, r) 18/01/2008 18:00 UTC, s) 19/01/2008 00:00 UTC, t) 19/01/2008 06:00 UTC, u) 19/01/2008 12:00 UTC. (Continua.)	6
2	Continua.	7
2	Continua.	8
2	Conclusão.	9
3	Diagrama Hövmöller da precipitação acumulada em 3h do período de 13 de janeiro às 12:00 UTC a 19 de janeiro às 12:00 UTC do ano de 2008 médio sobre a área que compreende a a) latitude de 10°S a 2,5°N e b) a longitude de 35°W a 55°W.	10
4	Idem à Figura 3, exceto que é a média sobre a área que compreende a) as longitudes de 45°W a 55° e b) as latitudes de 2,5°S a 2,5°N.	12
5	Diagrama Hövmöller da precipitação acumulada em 3h do período de 13 de janeiro às 12:00 UTC a 19 de janeiro às 12:00 UTC do ano de 2008 simulada pelo modelo BRAMS.	14
6	Idem à Figura 5, exceto que é a média sobre a área que compreende a latitude de 2,5°S a 2,5°N.	15
7	Movimento vertical médio sobre as longitudes de 35°W a 60°W e a) as latitudes de 0° a 5°N, b) 5°S a 0° e c) 10°S a 5°S obtidos das reanálises do NCEP/NCAR para o período de 13/01 às 12:00 UTC a 19/01 às 12:00 UTC, com frequência de 6h.	16
8	Idem à Figura 7, exceto que os painéis à direita são as simulações do modelo BRAMS utilizando o EN, e à esquerda utilizando o ENCDFY para o período de 13/01 às 12:00 UTC a 19/01 às 12:00 UTC, com frequência de 3h.	18

9	Campo de pressão ao NMM e vento (m/s) em 850 hPa das reanálises do NCEP/NCAR do período de 17 de janeiro às 12:00 UTC até 06:00 UTC do dia 18 de janeiro.	20
10	Pressão ao nível médio do mar (hPa) e vento (m/s) em 850 hPa simulados pelo BRAMS utilizando o fechamento ENCDFY, para o período de 17 de janeiro às 12:00 UTC a 18 de janeiro às 09:00 UTC.	22
11	Idem à Figura 10, exceto que foi utilizado o fechamento EN.	23
12	Campo de divergência de umidade ($10e^{-7}$ g/kg/s) e vento (m/s) em 925 hPa obtidos das reanálises do NCEP/NCAR do período de 17 de janeiro às 12:00 UTC até 06:00 UTC do dia 18 de janeiro.	25
13	Idem à Figura 12, exceto que simulado pelo BRAMS utilizando o fechamento EN. Aqui a divergência tem unidade de $10e^{-4}$ g/kg/s.	27
14	Idem à Figura 12, exceto que simulado pelo BRAMS utilizando o fechamento ENCDFY. Aqui a divergência tem unidade de $10e^{-4}$ g/kg/s.	28
15	Precipitação acumulada (mm) em 3h do TRMM sobre o nordeste do Brasil, do período de 15:00 UTC do dia 17 de janeiro a 12:00 UTC do dia 18 de janeiro.	31
16	Precipitação simulada pelo BRAMS utilizando o fechamento EN sobre o nordeste da América do Sul para o período de 15:00 UT do dia 17 a 12:00 UTC do dia 18 de janeiro de 2008.	32
17	Idem à Figura 16, exceto que foi utilizado o fechamento ENCDFY.	33
18	Precipitação acumulada (mm) em 3h estimada pelo TRMM sobre o sul da América do Sul, do período de 12:00 UTC do dia 16 de janeiro a 15:00 UTC do dia 17 de janeiro. (Continua.)	34
18	Conclusão.	35
19	Precipitação simulada pelo BRAMS utilizando o fechamento EN para o período de 12:00 UTC do dia 16 a 15:00 UTC do dia 17 de janeiro de 2008.	36
20	Idem à Figura 16, exceto pela utilização do fechamento ENCDFY.	38
21	Pressão ao nível médio do mar (hPa) e vento (m/s) em 850 hPa do período de 15 de janeiro de 2008 às 18:00 UTC até 17 de janeiro de 2008 às 12:00 UTC gerados a partir das reanálises do NCEP/NCAR.	40
22	Pressão ao nível médio do mar (hPa) e vento (m/s) em 3 mil metros de altura simulados pelo BRAMS utilizando o fechamento EN, do período de 17 de janeiro às 12:00 UTC a 18 de janeiro às 09:00 UTC.	42
23	Idem à Figura 16, exceto que é utilizando o fechamento ENCDFY.	43
24	Viés e RMS médios da precipitação (mm) sobre as áreas da Figura ??: a) e c) Nordeste e b) e d) Sul (Continua.)	45
24	Conclusão.	46

LISTA DE TABELAS

Pág.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

4DDA	–	<i>four-dimensional data assimilation</i>
ABE	–	<i>Available Buoyant Energy</i>
AFY	–	Segundo Experimento de Aplicação
AK	–	Anthes-Kno
ANEEL	–	Agência Nacional de Energia Elétrica
BM	–	Betts-Miller
BRAMS	–	<i>Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modeling System</i>
CA	–	Corrente Ascendente
CARMA	–	<i>Community Aerosol and Radiation Model for Atmospheres</i>
CAPE	–	<i>Convective Available Potential Energy</i>
CATT	–	<i>Coupled Aerosol and Tracer Transport</i>
CCM	–	Complexo Convectivo de Mesoescala
CD	–	Corrente Descendente
CERES	–	<i>Clouds and the Earth's Radiant Energy System</i>
CLA	–	Camada Limite Atmosférica
CLP	–	Camada Limite Planetária
COSMO	–	<i>Consortium for Small-Scale Modelling</i>
CPC	–	<i>Climate Prediction Center</i>
CPTEC	–	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CRM	–	<i>Cloud resolving models</i>
ECMWF	–	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
EMA	–	Estações Meteorológicas Automáticas
EN	–	<i>Ensemble</i>
EOF	–	<i>Empirical Orthogonal Functions</i>
ETS	–	<i>Equitable Threat Score</i>
FINEP	–	Financiadora de Estudos e Projetos
FAPESP	–	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FY	–	Algoritmo de Otimização Firefly
GARP	–	<i>Global Atmospheric Research Program</i>
GATE	–	<i>GARP Atlantic Tropical Experiment</i>
GD	–	Grell e Dévényi
GMS	–	<i>Geostationary Meteorological Satellite</i>
GOES	–	<i>Global Online Enrollment System</i>
GPCP	–	<i>Global Precipitation Climatology Project</i>
GR	–	Grell
GTS	–	<i>Global Communication System</i>
HL	–	Hora Local
INMET	–	Intituto Nacional de Meteorologia
INPE	–	Intituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IR	–	Infravermelho
JAN	–	Jato em Altos Níveis

JBN	– Jato em Baixos Níveis
JAXA	– <i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
KF	– Kain-Fritsch
LES	– <i>Large Eddy Simulations</i>
LFC	– (<i>Level of Free Convection</i>)
LO	– <i>Low-level Omega</i>
MCGA	– Modelo de Circulação Geral da Atmosfera
MCTI	– Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
METAR	– <i>Meteorological Aerodrome Report</i>
MM5	– Modelo de Mesoescala de Quinta Geração
MODIS	– <i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MPCA	– <i>Multiple Particle Collision Algorithm</i>
NASA	– <i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NCAR	– <i>National Center for Atmospheric Research</i>
NCEP	– <i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NCL	– Nível de Convecção Livre
NDVI	– <i>Normalized Difference Vegetative Index</i>
NEB	– Região Nordeste do Brasil
NOAA	– <i>National Oceanic and Atmospheric Organization</i>
PCD	– Plataforma de Coleta de Dados
PNTC	– Previsão Numérica de Tempo e Clima
PP	– Produto de Pesquisa
PR	– <i>Precipitation Radar</i>
PSO	– <i>Particle Swarm Optimization</i>
PSU	– <i>Pennsylvania State university</i>
QEC	– Quase Equilíbrio Convectivo
RADAMBRASIL	– Radar na Amazônia Brasil
RAMS	– <i>Regional Atmospheric Modeling System</i>
RMS	– Raíz do erro quadrático médio
ROLE	– Radiação de Onda Longa Emergente
RT	– <i>Real Time</i>
SMAS	– Sistema de Monção da América do Sul
TBR5	– <i>Terrestrial Biophysics and Remote Sensing</i>
TCI	– <i>TRMM Combined Instrument</i>
TKE	– <i>Turbulent Kinetic Energy</i>
TMI	– <i>Microwave Imager Precipitation</i>
TMPA	– <i>Multisatellite Precipitation Analysis</i>
TRMM	– <i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
TSM	– Temperatura da Superfície do Mar
VCAN	– Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
VFY	– Experimento de Validação
VIRS	– <i>TRMM Visible and Infrared Scanner</i>

WETAMC – *Wet Season Atmospheric Mesoscale Campaign*
ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
0.4 Estudo de caso	1
1 Considerações finais	49
1.1 Sugestões para trabalhos futuros	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

0.4 Estudo de caso

Com o objetivo de analisar o desempenho do modelo BRAMS utilizando o esquema de GD ponderado objetivamente, foi realizado o estudo do período de 13 a 19 de janeiro de 2008. Este período foi escolhido por abranger a ocorrência de diversos fenômenos de tempo associados à formação de intensa convecção sobre a América do Sul. De acordo com o Boletim Climanálise de janeiro de 2008 (CLIMANÁLISE, 2008), chuvas intensas observadas durante o mês estiveram associadas principalmente à atuação da Alta da Bolívia, à ocorrência de ZCAS e à formação de áreas de instabilidade em diversas áreas do continente. Especialmente entre os dias 13 e 19 de janeiro, eventos severos causaram transtornos à população das Regiões Sul e Sudeste do Brasil. Foram observadas linhas de instabilidade na costa norte/nordeste do continente e Brasil Central, Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) no sul da América do Sul e a passagem de um sistema frontal que causou chuvas intensas no Sul e Sudeste do Brasil.

O acumulado total mensal (Figura 1a) em grande parte do centro-norte do continente foi superior a 400 mm. Acumulados de precipitação superiores a 200 mm foram observados no oeste do Rio Grande do Sul, norte da Argentina e Paraguai. Em termos de anomalias de precipitação (figura não mostrada), ocorreram desvios superiores a 200 mm nestas regiões, além do oeste da Região Centro-Oeste e Bolívia. Somente entre os dias 14 a 19 de janeiro (Figura 1b), observou-se um máximo superior a 300 mm ao norte da Ilha de Marajó, no Pará, no oeste deste Estado, bem como no oeste do Amazonas. Também, a atuação de um SCM ocasionou acumulados superiores a 100 mm no norte da Argentina e oeste do Rio Grande do Sul.

De acordo com as imagens de satélite do período de 14 de janeiro às 12:00 UTC a 19 de janeiro às 12:00 UTC (Figura 2), observou-se a atuação da ZCIT, que contribuiu para a instabilidade na costa norte/nordeste da América do Sul. Também, difluência em altos níveis associada à Alta da Bolívia contribuiu dinamicamente para o disparo convectivo ao intensificar a convergência de umidade e massa em baixos níveis (figura não mostrada). A partir das 17:00 UTC do dia 15 de janeiro (Figura 2f) se observou a formação de uma forte área de convecção sobre o Oceano Atlântico Tropical, próximo ao Brasil, que atingiu seu estágio maduro às 05:00 UTC do dia 16 (Figura 2h) devido à presença da ZCIT. Os ventos alísios associados a este sistema contribuíram para a formação de aglomerados convectivos ao longo da costa do NEB e Pará.

A costa nordeste da América do sul sofre influência da interação entre as escalas local e grande escala (CAVALCANTI, 1982). A primeira está associada à forma-

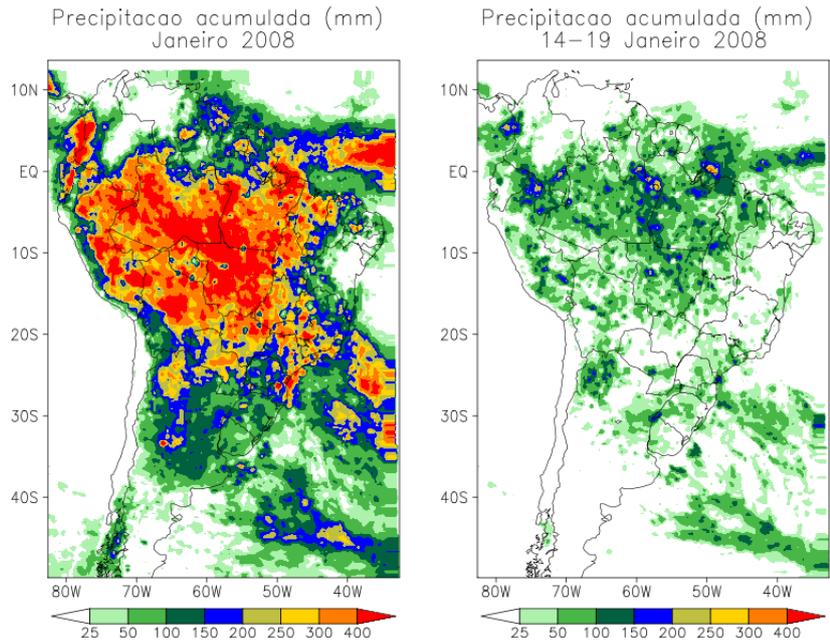


Figura 1 - Precipitação acumulada a) no mês de janeiro de 2008 e b) entre os dias 14 a 19 de janeiro de 2008.

ção de brisas marítimas em resposta ao gradiente horizontal de pressão, gerado pelo contraste térmico entre o continente e o oceano. Durante o dia, devido ao maior aquecimento da superfície do continente, ocorre o abaixamento da pressão, formando um gradiente entre o mar, com pressão relativamente maior que o continente, impulsionando o movimento do ar. Este movimento gera divergência e convergência em diferentes pontos, o que faz com que se estabeleça uma célula de circulação. Esta por sua vez provoca o aumento da intensidade do vento, diminuição da temperatura sobre o continente e aumentando a umidade ao longo da costa, resultado da brisa marítima. Neste processo, ocorre a ascensão do ar sobre o continente durante o dia e a formação de uma linha constituída de nuvens cumulus ao longo da costa. Este sistema, conhecido como Linha de Instabilidade (LI), pode se propagar por quilômetros continente adentro, principalmente para o interior da Bacia Amazônica, com velocidade média de até 60 km/h (RICKENBACH, 2004; COHEN et al., 2009). Na grande escala, a ZCIT tem papel fundamental para a formação da convecção ao longo da costa em forma de linhas. A convergência de massa e umidade devido à ZCIT altera a posição das LI, que aparecem com maior frequência nos períodos em que a ZCIT está mais organizada (CAVALCANTI, 1982). A interação entre a escala local e a grande escala se dá também pela influência da divergência associada à brisa marítima sobre a ZCIT, suprimindo a convecção próximo à costa, na área oceânica (CAVALCANTI, 1982). Também, a formação de distúrbios convecti-

vos ao longo da ZCIT estão associados à propagação de ondas (TULICH; KILADIS, 2012), as quais agem para redistribuir o calor latente liberado para as regiões mais secas (DIAS, 2010).

Nas imagens de satélite mostradas na Figura 2, é possível identificar a formação de LI's. Uma destas se formou entre o noroeste do Pará e a costa do Rio Grande do Norte, com extensão aproximada de 1770 km no dia 16 de janeiro às 18:00 UTC (Figura 2j). Seu ponto central foi identificado em aproximadamente 3°S e 44°W, de acordo com a análise subjetiva das imagens de satélite. O sistema avançou aproximadamente 100 km continente adentro, sendo caracterizado como uma Linha de Instabilidade Costeira (LIC), seguindo os critérios de Cohen (1989), que considera uma LIC aquela cujo ponto central se propaga até 170 km além da costa. A LI alcançou seu estágio maduro por volta das 20:00 UTC do dia 16 (Figura 2k). Seu ciclo de vida durou aproximadamente 4h.

A segunda LI se formou ao longo da costa norte/nordeste do Brasil, desde a Ilha de Marajó, no Pará, até o Ceará, com extensão aproximada de 1440 km e teve início em torno das 16:30 UTC do dia 17 de janeiro (Figura 2m). Tal sistema foi classificado como uma LI com Propagação do Tipo 1 (LIT1), de acordo com o critério de Cohen (1989). Para ser uma LIT1, seu ponto central deve se propagar entre 170 km e 400 km desde a costa, a partir do início de sua formação, até o período de dissipação. Esta classificação leva em consideração a distinção entre as LI que se propagam continente adentro daquelas que se dissipam em poucas horas, ainda próximo à costa (COHEN, 1989). A LIT1 alcançou sua fase madura por volta das 21:00 UTC (Figura 2n). A partir das 23:00 UTC (Figura 2o), a parte leste da LI começou a se dissipar, enquanto que a porção oeste do sistema manteve deslocamento para sudoeste, perdendo características de uma LI a partir das 00:00 UTC do dia 18 (Figura 2p), passando a um aglomerado intenso de convecção. Este novo sistema se propagou até a região central do Pará, fortalecendo aglomerados convectivos que já estavam em formação (Figura 2q) por meio das correntes descendentes tipicamente observadas na vanguarda destes sistemas. Parte de tais correntes de ar se espalham, formando a frente de rajada, causando convergência ao longo da frente.

A dissipação da LIT1 ocorreu por volta das 20:00 UTC (figura não mostrada), apresentando um ciclo de vida de 7 horas. Seu ponto central inicial esteve localizado em aproximadamente 1,5°S e 44,5°W e no final de seu ciclo em 4°S e 3,8°W, o que resultou em um deslocamento além da costa de 248 km e velocidade de propagação da ordem de 10 m/s. Molion e Kousky (1985) e Cohen (1989) indicaram que a

velocidade média de uma LIT1 é de aproximadamente 12 m/s a 16 m/s. Ressalta-se que o método de localização dos pontos centrais foi subjetivo, o que inseriu incertezas na localização exata do centro do sistema e demais características derivadas.

Ambas as LI identificadas estiveram associadas à atividade da ZCIT. De acordo com o Boletim Climanálise (CLIMANÁLISE, 2008), este sistema estava localizado próximo à sua posição climatológica (entre 2,5°N e o equador na porção mais próxima do continente sul-americano) durante o período analisado.

Além da formação das LI ao longo da costa norte/nordeste do continente, outros sistemas convectivos foram identificados durante o período analisado. Durante o mês de janeiro de 2008, cinco sistemas frontais atuaram no Brasil (CLIMANÁLISE, 2008). Um destes sistemas avançou pelo sul da América do Sul no dia 16 de janeiro, organizando intensa atividade convectiva no interior da Argentina, Uruguai e Região Sul do Brasil (Figuras 2g-2j). A frente fria deslocou-se até Florianópolis, em Santa Catarina, em direção ao Oceano Atlântico (Figura 2k). Conjuntamente, observou-se a formação de um intenso SCM sobre o noroeste da Argentina, sul da Bolívia e Paraguai (Figuras 2i-2l). O SCM teve um ciclo de vida de 23h, desde a sua formação até seu decaimento. A área de abrangência das nuvens com temperatura de brilho inferior -80°C foi de aproximadamente 20 mil km^2 , e perdurou por aproximadamente 8 horas. Sua fase madura foi alcançada no dia 17 às 05:00 UTC (Figura 2l).

Foi observado no interior da Região Centro-Oeste a formação de uma LI. Seu ciclo de vida teve início a partir da organização em linha de vários aglomerados convectivos, às 01:00 UTC do dia 15 de janeiro (Figura 2), avançando rapidamente sobre o Mato Grosso e atingindo seu estágio maduro entre as 06:00 UTC e 08:00 UTC (Figuras 2d-2e). Às 17:00 UTC (Figura 2f), o sistema dissipou completamente, apresentando um ciclo de vida de 15 horas.

Para analisar a propagação da precipitação que ocorreu na costa norte/nordeste do Brasil associada às LI, foi elaborado um diagrama Hovmöller (Figura 3) identificando a precipitação acumulada em 3h a partir do dia 13/01 às 12:00 UTC até o dia 19/01 às 12:00 UTC, com frequência de 3h, utilizando os dados do TRMM. A média entre a faixa de latitude de 2,5°N a 10°S foi calculada para analisar a propagação zonal entre 35°W e 55°W (Figura 3a). Também, calculou-se a precipitação média entre a faixa longitudinal de 35°W e 55°W para analisar a propagação meridional entre 2,5°N a 10°S. A região analisada compreende toda a área de abrangência das LI observada na imagem de satélite, e é mostrada na Figura 3c.

De 13 a 16 de janeiro, os núcleos de precipitação se propagaram predominantemente para leste (Figura 3a), devido ao escoamento em altos níveis associado à Alta da Bolívia. Embebido ao padrão dominante de propagação para leste, observa-se pequenos deslocamentos para oeste. Este padrão está associado à propagação de distúrbios de diferentes escalas. O padrão externo propaga-se para leste com velocidades da ordem de 6,4 m/s, enquanto que o padrão interno propaga-se para oeste com velocidades de aproximadamente 5 m/s. Em ambos os casos, as velocidades são menores do que o esperado para ondas inercio-gravidade. Chama a atenção o fato de que a precipitação cruza a linha equatorial, o que pode caracterizar uma onda mista Rossby-gravidade (MRG) (DIAS et al., 1983). Neste caso, a velocidade, da ordem de 6 m/s, é mais compatível. Na sequência, ao analisar a Figura (Figura 3a) entre os dias 16 e 17 de janeiro, observa-se um núcleo de precipitação com propagação para oeste com velocidades de 24,5 m/s (esta velocidade é bem consistente com uma onda inercio-gravidade) entre 42°W-38°W, encontrando o núcleo que cruza o equador. Estes se encontram em aproximadamente 45°W, e logo após, ficam em evidência núcleos se propagando para o sul e para o oeste (Figuras 3a-3b) em velocidades de aproximadamente 24 m/s para o oeste e de 6 m/s para o sul. A resultante das componentes da velocidade é uma linha inclinada com predomínio zonal da distribuição espacial (Figura 2n). Embora algumas das velocidades calculadas sejam inferiores às estimativas de velocidade de propagação das ondas inercio-gravidade, estudos relacionam a formação de LI à propagação de tais ondas acopladas convectivamente (TULICH; KILADIS, 2012).

Entre as 00:00 UTC do dia 16 (Figura 2g) às 00:00 UTC do dia 17 (figura não mostrada), verificou-se o predomínio da propagação da precipitação para leste devido à LIC, a qual gerou acumulados médios de 2 mm a 4 mm entre 38°W a 48°W (Figura 3a). Entre os dias 17 às 12:00 UTC e 18 às 12:00 UTC (Figura 3a), notou-se também propagação para leste de acumulados de 2 mm a 6 mm, com máximos no período noturno, devido à propagação da LIT1 desde 45°W até 55°W. Este sistema ativou a formação de novos aglomerados convectivos, que tiveram propagação para oeste entre o início da noite do dia 18 e início da noite do dia 19 (Figuras 2p-2t), entre 48°W a 50°W, gerando um máximo superior a 10 mm/3h no nordeste do Pará (Figura 3a).

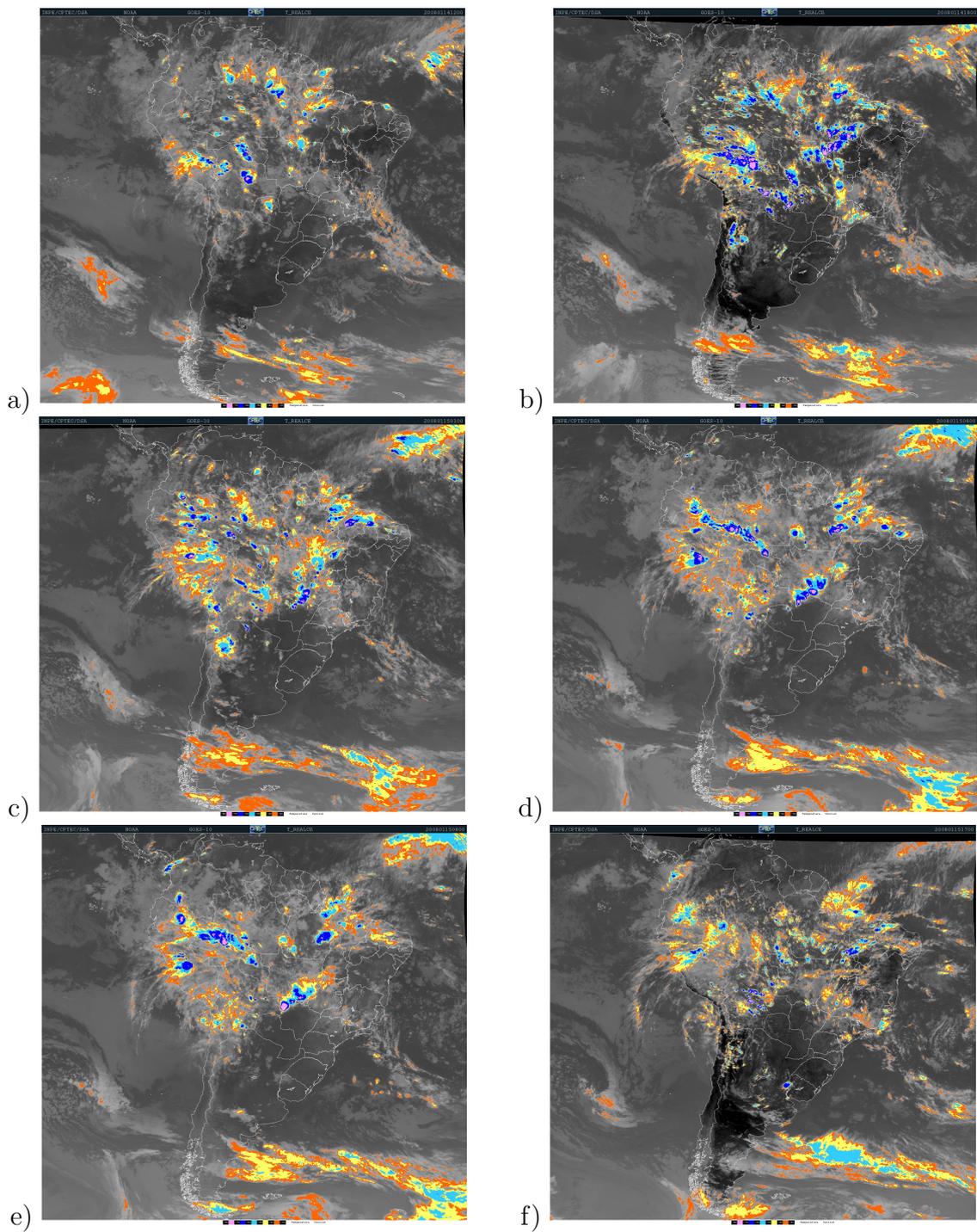


Figura 2 - Imagem do satélite GOES-10 do período: a) 14/01/2008 12:00 UTC, b) 14/01/2008 18:00 UTC, c) 15/01/2008 01:00 UTC, d) 15/01/2008 06:00 UTC, e) 15/01/2008 08:00 UTC, f) 15/01/2008 17:00 UTC, g) 16/01/2008 00:00 UTC, h) 16/01/2008 05:00 UTC, i) 16/01/2008 12:00 UTC, j) 16/01/2008 18:00 UTC, k) 16/01/2008 20:00 UTC, l) 17/01/2008 05:00 UTC, m) 17/01/2008 16:30 UTC, n) 17/01/2008 21:00 UTC, o) 17/01/2008 23:00 UTC, p) 18/01/2008 00:00 UTC, q) 18/01/2008 06:00 UTC, r) 18/01/2008 18:00 UTC, s) 19/01/2008 00:00 UTC, t) 19/01/2008 06:00 UTC, u) 19/01/2008 12:00 UTC. (Continua.)

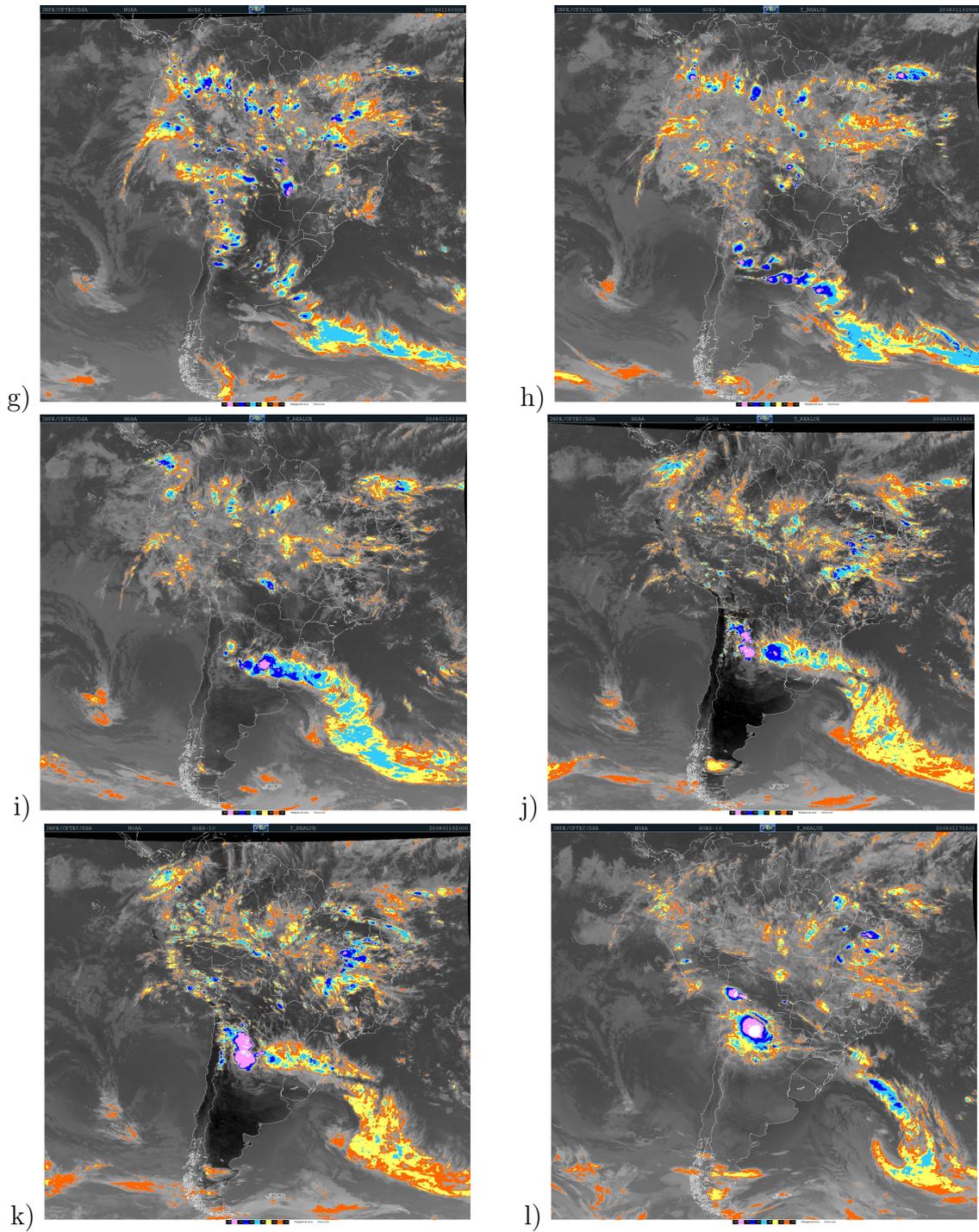


Figura 2 - Continua.

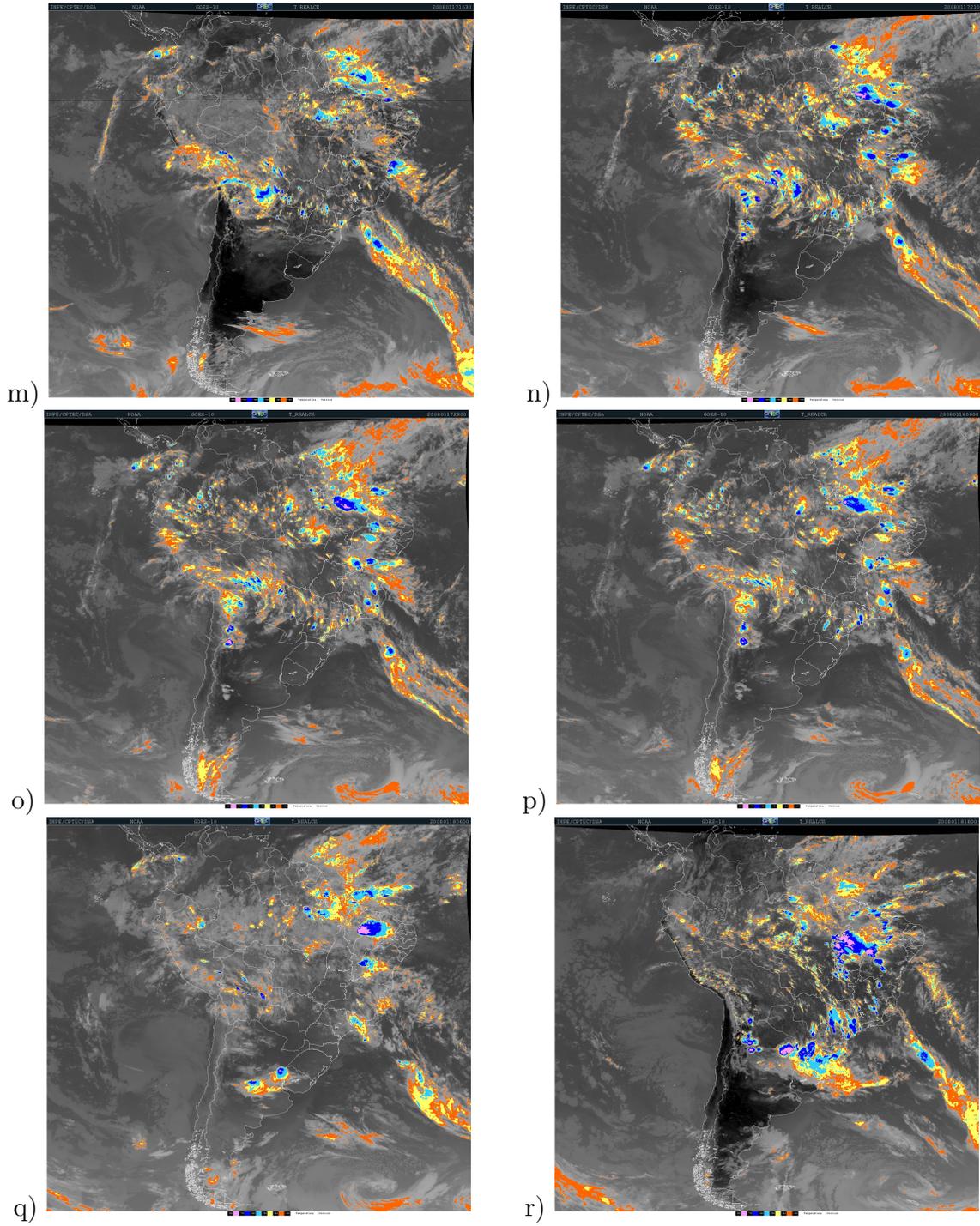


Figura 2 - Continua.

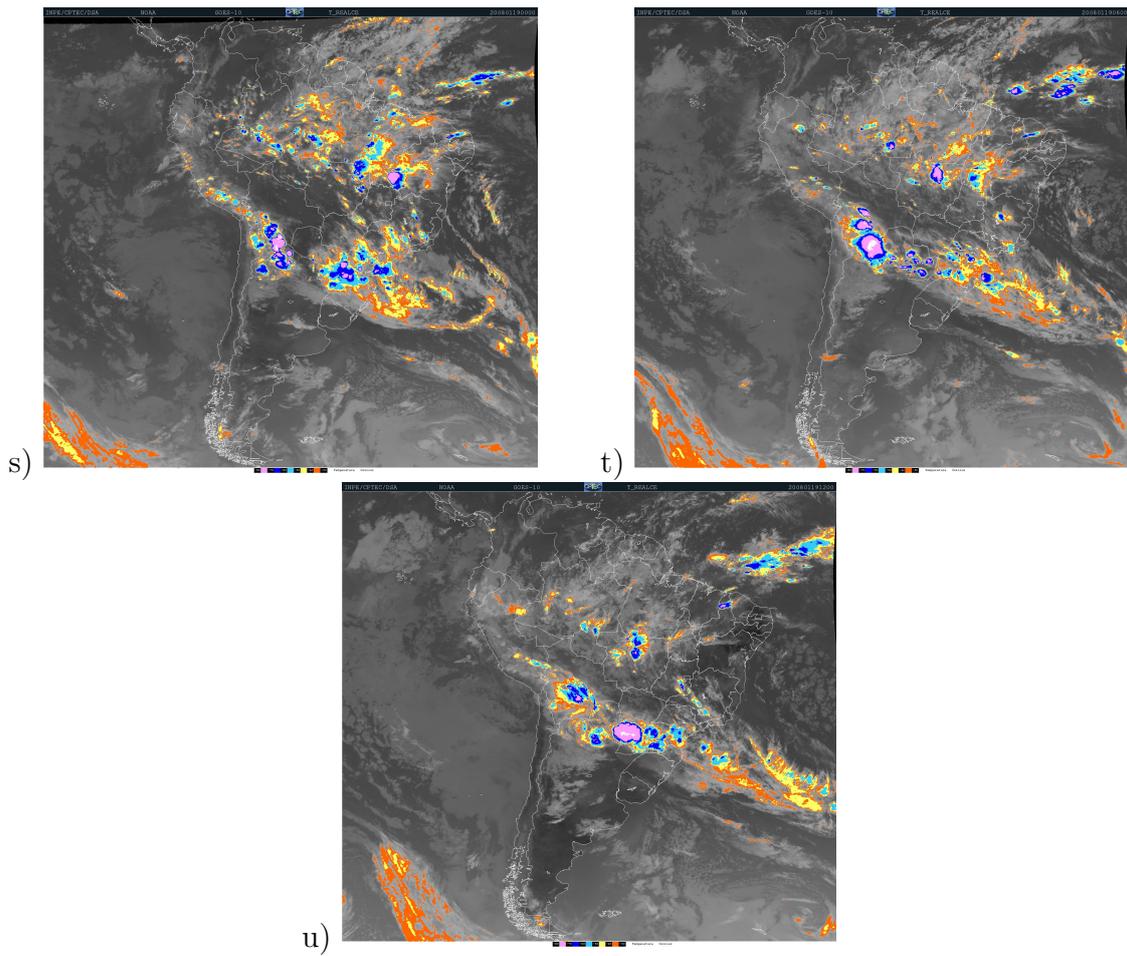


Figura 2 - Conclusão.

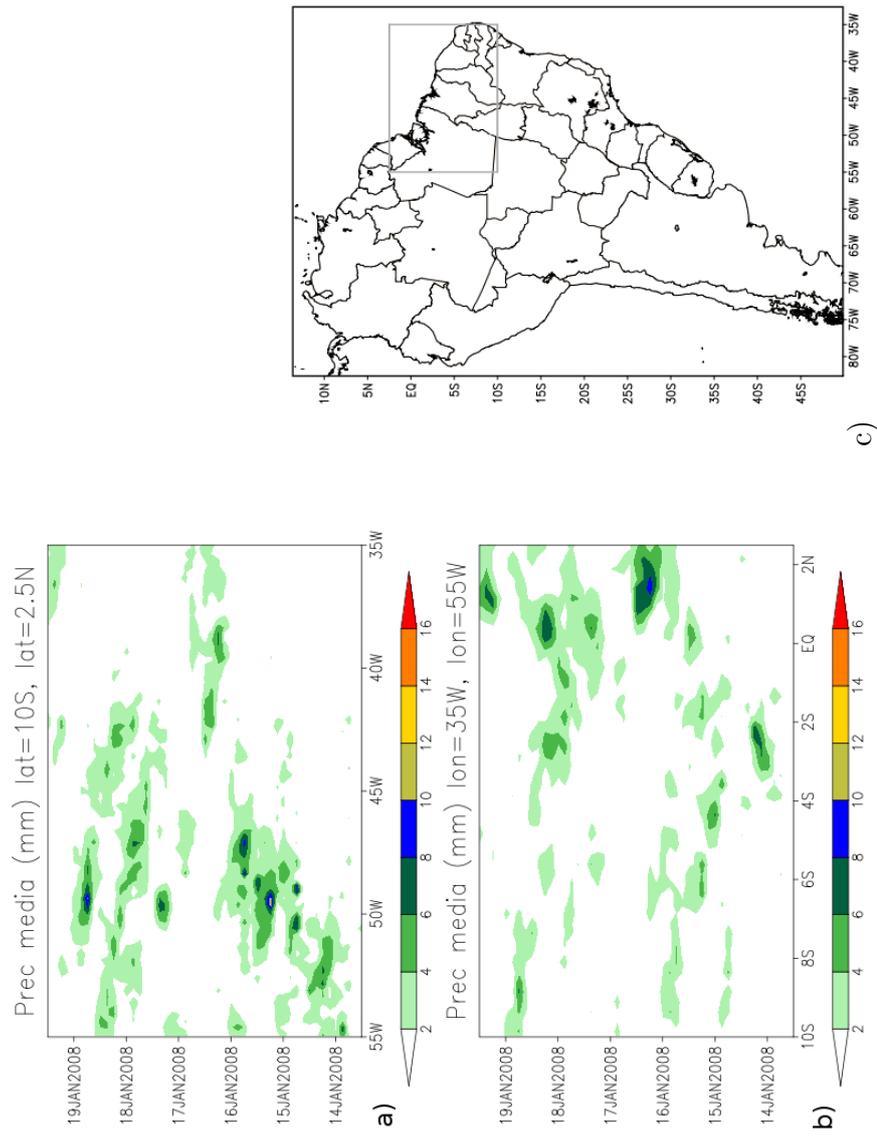


Figura 3 - Diagrama Hövmöller da precipitação acumulada em 3h do período de 13 de janeiro às 12:00 UTC a 19 de janeiro às 12:00 UTC do ano de 2008 médio sobre a área que compreende a a) latitude de 10°S a 2, 5°N e b) a longitude de 35°W a 55°W.

O Diagrama Hövmöller da média sobre as longitudes de 45°W a 55°W (Figura 4a) e sobre as latitudes de 2,5°S a 2,5°N (Figura 4b) contribuiu para ressaltar as características observadas na Figura 3 por abrangerem uma área menor no cálculo da média. A análise iniciou-se no dia 13 às 12:00 UTC até o dia 19 às 12:00 UTC. Observa-se que na Figura 4a, a precipitação mais intensa ocorreu no final da noite do dia 13 e início da manhã do dia 14, com acumulado em 3h de 12 mm, tendo um pequeno deslocamento para norte com velocidades de 4,6 m/s. No mesmo período, um núcleo de precipitação vindo de leste com velocidade de 12 m/s, intensificou-se logo após o cruzamento com o núcleo vindo do sul. O mesmo mecanismo aparenta se repetir entre os dias 15 e 16 de janeiro e nos dias 17 a 19 de janeiro. Para o núcleo entre 15 e 17, a velocidade é de aproximadamente 10,2 m/s. A propagação para o sul não é evidente na precipitação, contribuindo para uma rápida dissipação da LIC ao atingir o continente, como se observa na imagem de satélite (Figura 2k). Para os dias 17 a 19 de janeiro, as velocidades calculadas foram de 14 m/s para oeste e 12,5 m/s para o sul, de maneira similar aos casos anteriormente analisados, e esta configuração resultou na LIT1. Uma diferença em relação aos casos anteriormente analisados é para os núcleos que partem de 12:00 UTC do dia 17. Há um núcleo se propagando para o norte, relativamente intenso, mas com velocidades menores (10,2 m/s) do que o núcleo que é disparado para o sul (12,5 m/s). Entre uma das teorias que podem ser utilizadas para explicar as interações entre ondas podem se mencionar os fenômenos de ressonância (RAUPP et al., 2008; RAUPP et al., 2011).

A análise do modelo BRAMS para o período correspondente ao estudo de caso foi compreendido na avaliação mostrada na Seção ???. O modelo utilizando o ENCDFY teve desempenho inferior àquele observado nas Regiões Centro-Oeste e Sudeste em comparação às Regiões Nordeste e Sul, devido a estas regiões não apresentarem um ciclo diurno bem marcado durante o mês de janeiro. Porém, foi verificado na análise do ciclo diurno da precipitação (Seção ??) que a nova versão melhorou a superestimativa gerada utilizando o EN principalmente no NEB. No presente estudo de caso, avaliou-se a simulação da precipitação e de outras variáveis meteorológicas para o prazo de até 120h de integração.

Tendo em vista que o ano de 2008 foi mais convectivamente ativo, ou seja, foi um ano com precipitação mais intensa que no ano de 2006, a ponderação m_b para um ano com estas características utilizando um período com características mais fracas comprometeu a qualidade das simulações. Os anos de 2006 e 2010 foram anos com características convectivas parecidas, e por isso os resultados das análises destes períodos indicaram melhorias mais importantes do que aquelas observadas para o

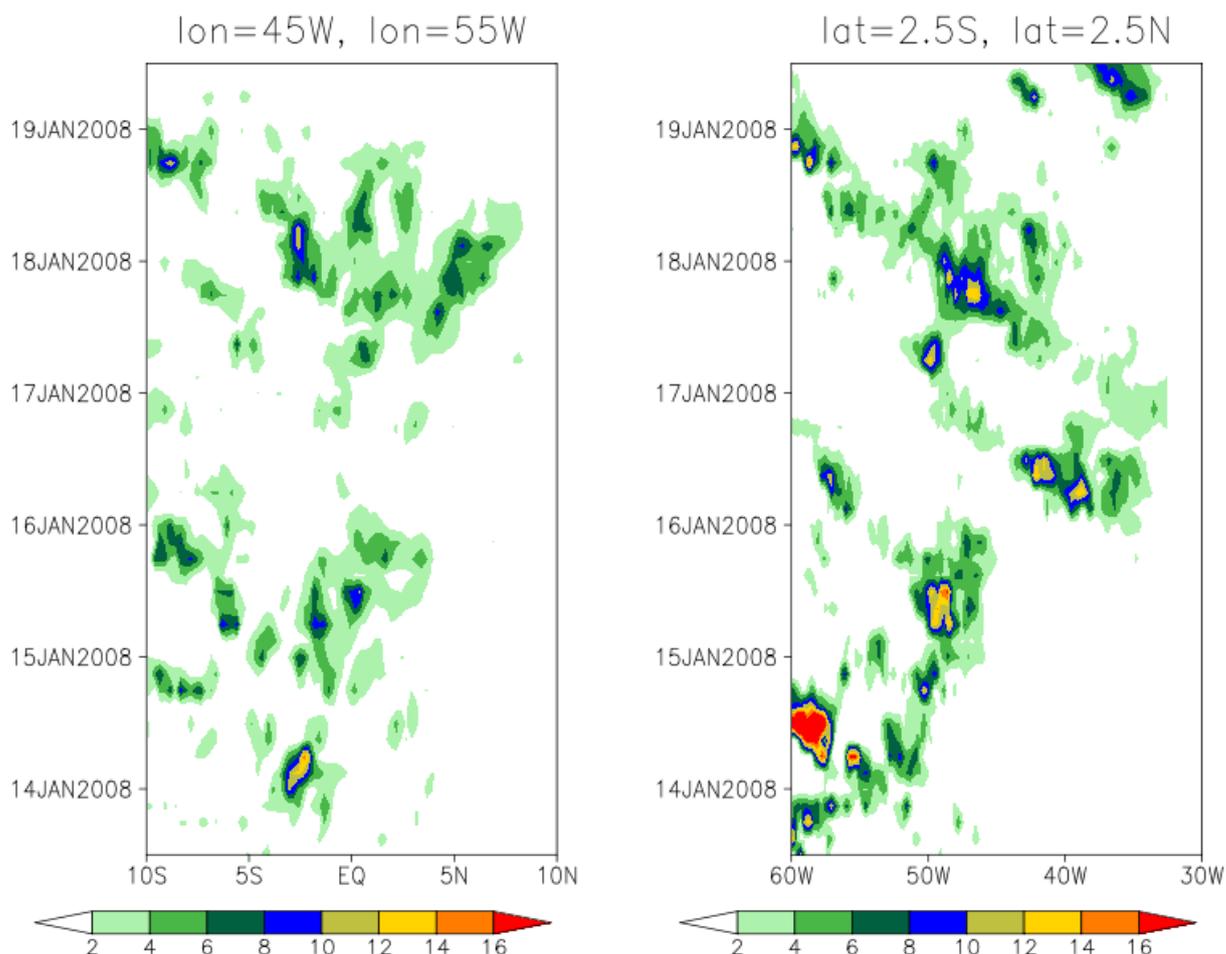


Figura 4 - Idem à Figura 3, exceto que é a média sobre a área que compreende as longitudes de 45°W a 55° e as latitudes de W 2,5°S a 2,5°N.

ano de 2008, como visto na Seção ???. Pode-se verificar que mesmo com resultados inferiores na simulação de precipitação de janeiro de 2008 em comparação com os anos de 2006 e 2010, os impactos da utilização do ENCDFY foram muito positivos, observando-se a melhoria dos índices estatísticos da avaliação das variáveis.

As simulações do modelo BRAMS geraram subestimativa dos núcleos de precipitação observada, e por isso, foi necessário alterar a escala de cores para que os padrões de propagação pudessem ser analisados. Este resultado era esperado, já que foi também verificado no ciclo diurno médio de janeiro de 2008, discutido na Seção ??.

Na média meridional (Figura 5), equivalente à Figura 4a, nota-se que o BRAMS com o fechamento EN (Figura 5a) subestimou os núcleos mais intensos de precipitação e superestimou a precipitação onde não foi observada no campo do TRMM. O modelo gerou propagação para sul sistematicamente desde o equador até 10°S a partir do dia

13 às 12:00 UTC até o dia 19 às 06:00 UTC (Figura 5b). Também gerou deslocamento da precipitação do equador até 7°N (deslocamento para norte) entre o dia 14 e dia 18 (velocidade de propagação da ordem de 2 m/s). Em comparação com o ENCDFY (Figura 5b), verifica-se que este mostra maior realismo em relação ao TRMM. O ENCDFY melhora a representação da fase, indicando velocidades mais consistentes com as observadas. Entre as 21:00 UTC do dia 14 e 00:00 UTC do dia 16, o ENCDFY gerou a propagação dos núcleos de precipitação do equador até 10°S com velocidade de 9,6 m/s, enquanto que o observado teve velocidade de 13,8 m/s, enquanto que o EN não simulou esta propagação. Por outro lado, o ENCDFY gera núcleos de pouca intensidade vindos do sul e cruzando o equador. O acomplamento entre os núcleos do sul e de norte foram importantes para a propagação da LIT1. Já o BRAMS não simulou a propagação deste sistema. Isto pode estar associado com uma deficiência do modelo na representação das ondas MRG.

A análise da média zonal da precipitação do modelo (Figura 6) evidenciou que ambas as versões do modelo têm deficiência na propagação no sentido meridional, o que pode também estar associado à deficiência na representação das ondas MRG, já que este mecanismo pode ter sido importante na propagação mais rápida no sentido meridional.

O movimento vertical (ω) simulado pelo modelo BRAMS para três diferentes faixas no norte do Brasil médios sobre 35°W a 60°W (Figura 8) foi comparado com o mesmo campo das reanálises do NCEP/NCAR (Figura 7). Apesar de ω não ser uma boa aproximação para as regiões tropicais, pois é derivado das equações do balanço quasi-geostrófico, o campo de ω desde a superfície até a alta troposfera foi aqui utilizado para analisar os movimentos verticais predominantes em cada experimento. As reanálises possuem resolução dez vezes menor do que aquela utilizada nas simulações, mas é possível ter uma visão do padrão de grande escala dominante sobre as faixas analisadas. O campo de ω da reanálise ilustra a predominância de movimento vertical ascendente (valores negativos em lilás) na região do Oceano Atlântico tropical (entre 0° a 5°N). Este padrão destaca a região onde a ZCIT estava ativa. Verificou-se que o padrão dominante ao sul também foi de movimentos verticais ascendentes em ambas as faixas de latitude e se estendendo até a alta troposfera.

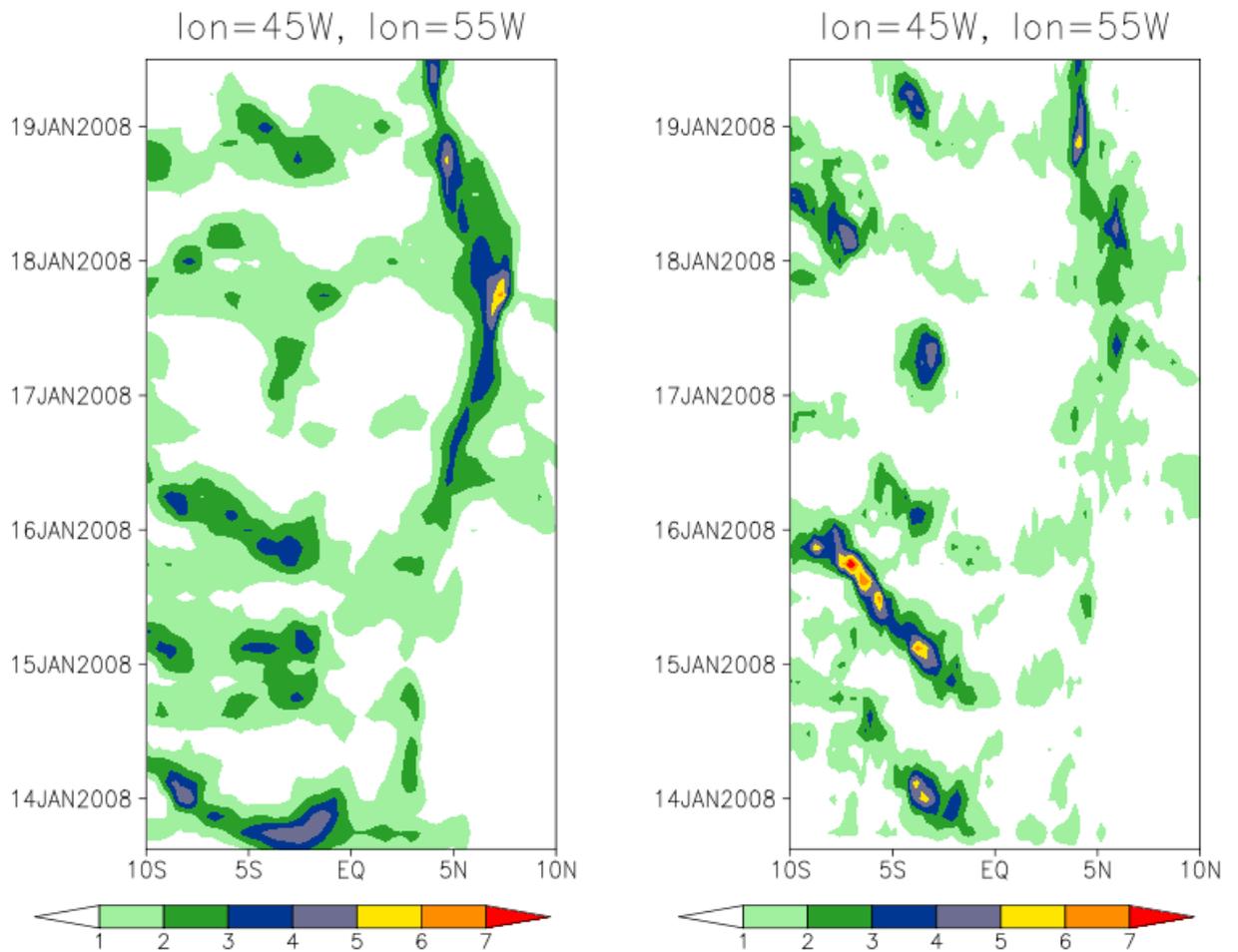


Figura 5 - Diagrama Hövmöller da precipitação acumulada em 3h do período de 13 de janeiro às 12:00 UTC a 19 de janeiro às 12:00 UTC do ano de 2008 simulada pelo modelo BRAMS, média sobre a área que compreende a longitude de 55°W a 45°W: a) simulação utilizando o EN e b) utilizando o ENCDFY.

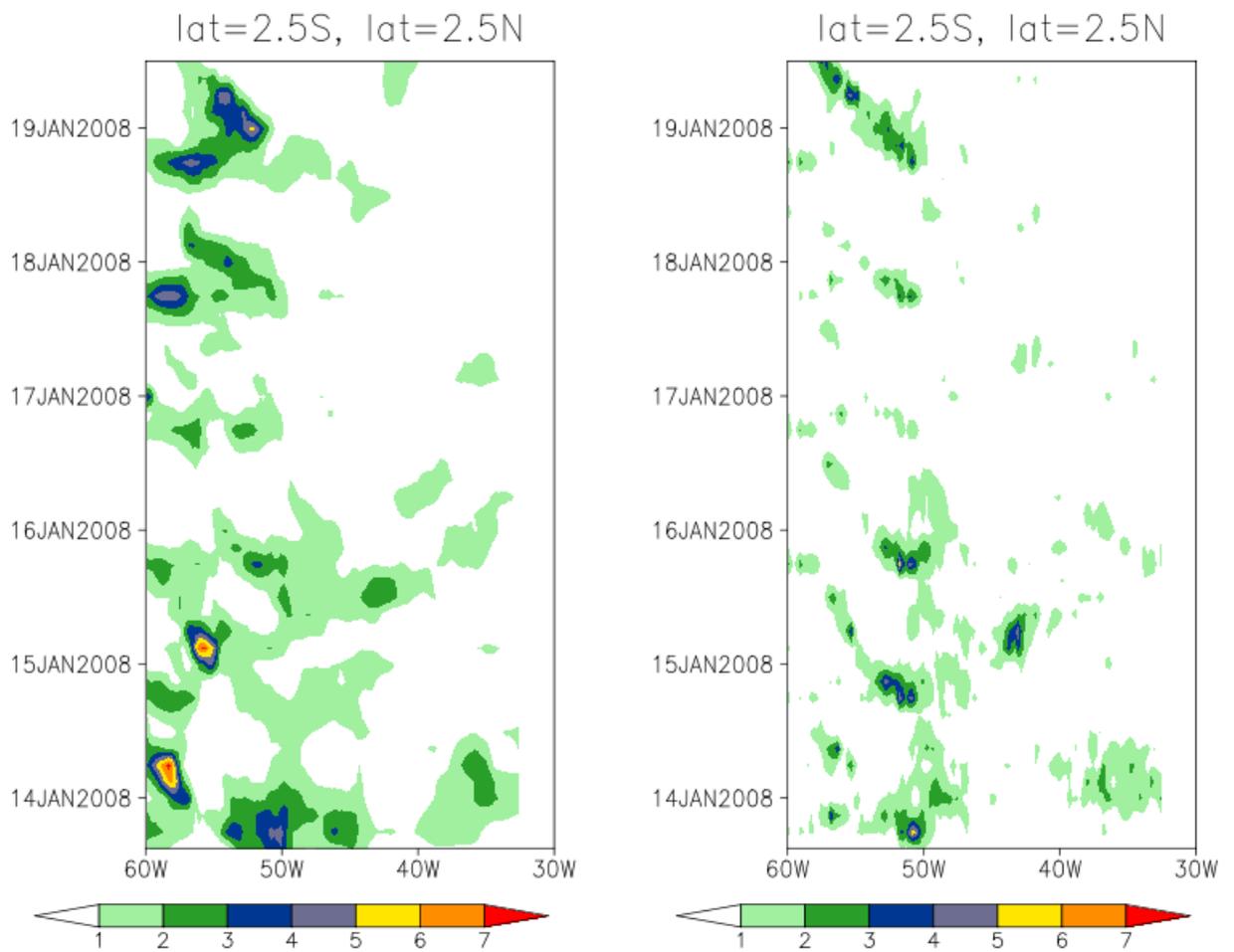


Figura 6 - Idem à Figura 5, exceto que é a média sobre a área que compreende a latitude de 2,5°S a 2,5°N.

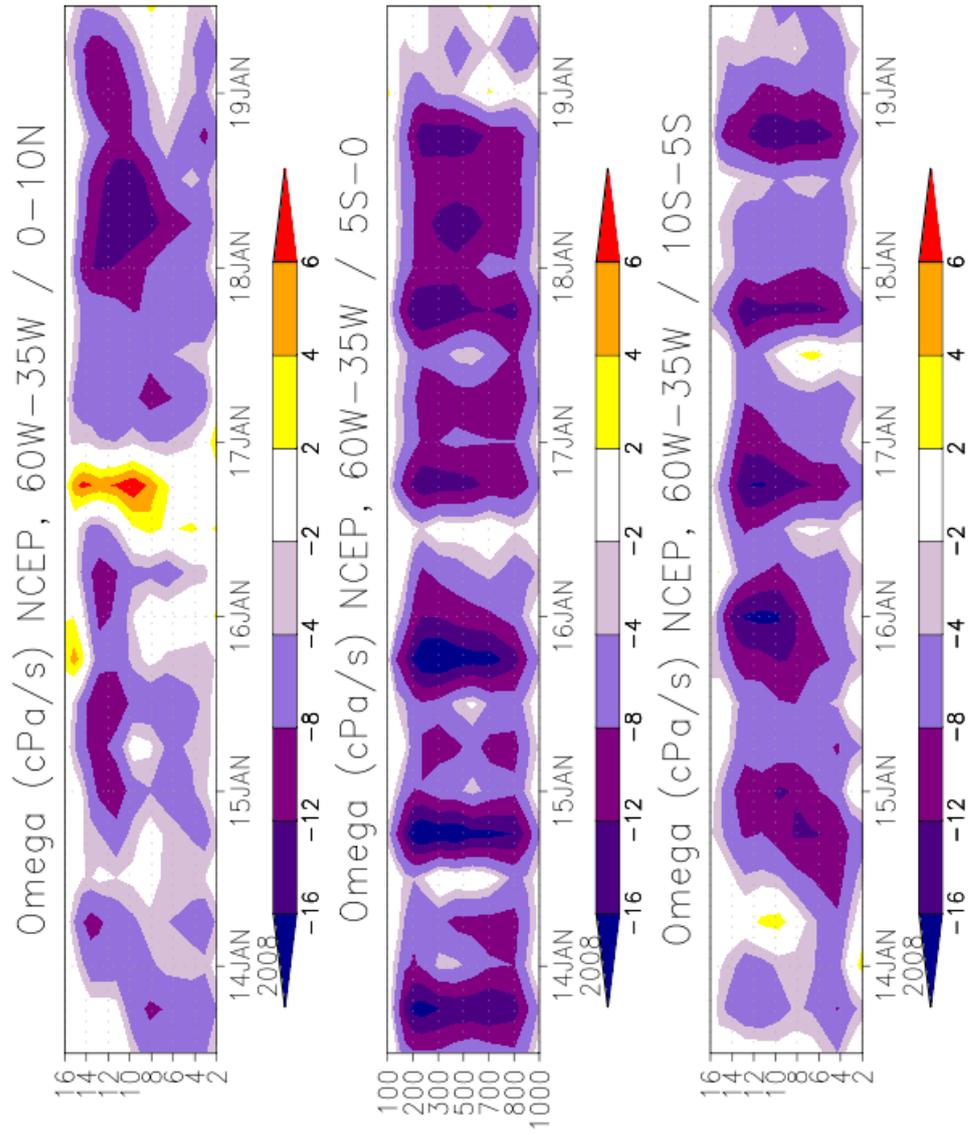


Figura 7 - Movimento vertical médio sobre as longitudes de 35°W a 60°W e a) as latitudes de 0° a 5°N, b) 5°S a 0° e c) 10°S a 5°S obtidos das reanálises do NCEP/NCAR para o período de 13/01 às 12:00 UTC a 19/01 às 12:00 UTC, com frequência de 6h.

O modelo BRAMS reproduziu de forma satisfatória os padrões verticais observados. Porém, comparando o EN (Figura 8a) com o ENCDFY (Figura 8b), verificou-se no segundo redução na intensidade dos movimentos verticais ascendentes nas faixas de latitude de 0° a 5°N e 5°S a 0° . Na faixa de 10°S e 5°S , apesar de ter enfraquecido no início do período, manteve um padrão de fortes movimentos verticais entre os dias 15 a 18. No modelo utilizando o EN, os movimentos verticais ascendentes são mais intensos pois o saldo de calor latente liberado na atmosfera é maior, o que intensifica o movimento subsidente compensatório. Conseqüentemente, a pressão próximo à superfície é menor, a convergência em baixos níveis é mais intensa e a divergência em altos níveis também. Movimentos verticais ascendentes excessivos observados no EN contribuíram para a ocorrência de pontos de grade com precipitação que não existiu. Porém, a inatividade de precipitação não está relacionada aos fechamentos, visto que em ambas as versões do modelo, a intensidade da precipitação foi excessivamente subestimada em relação à observada.

Tendo em vista que o ENCDFY foi ponderado principalmente pelo LO, que determina m_b por meio de ω , verifica-se que os pesos agiram para reduzir os movimentos verticais excessivos. Porém, o enfraquecimento de ω está associado com o período de treinamento utilizado.

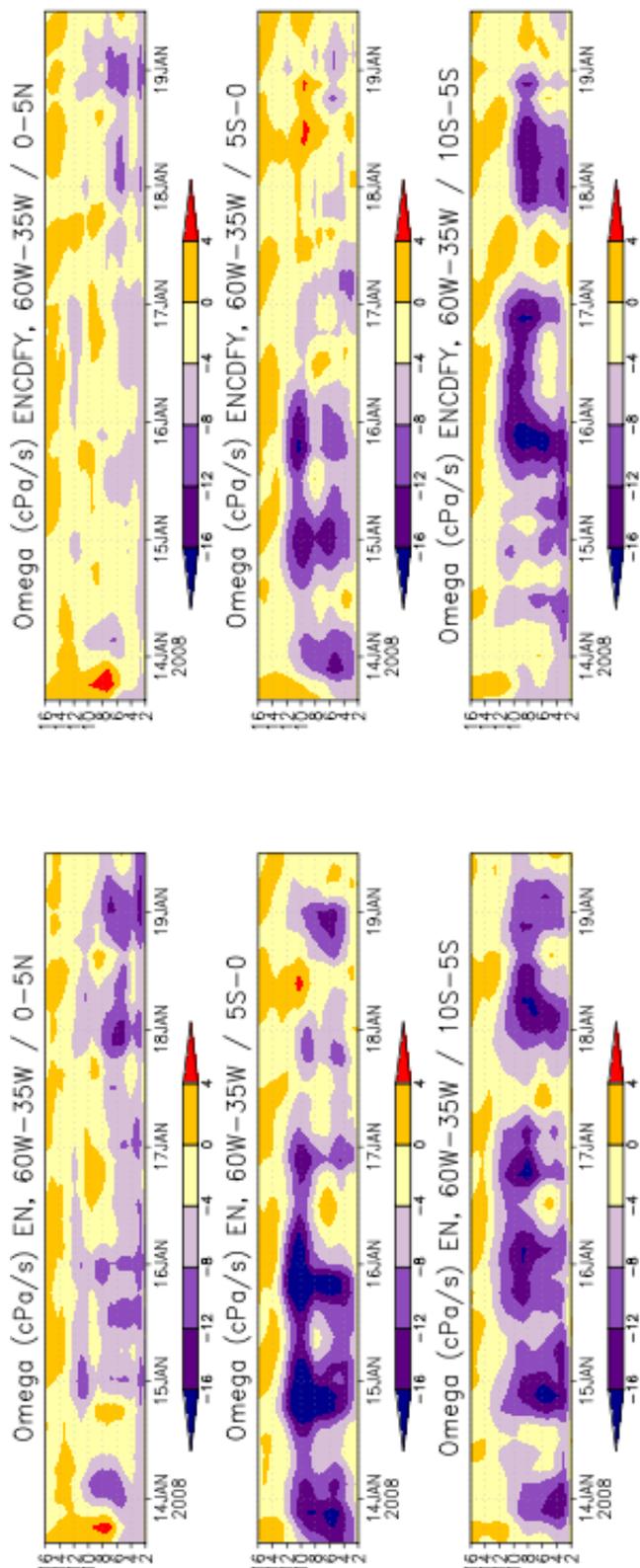


Figura 8 - Ítem à Figura 7, exceto que os painéis à direita são as simulações do modelo BRAMS utilizando o EN, e à esquerda utilizando o ENCDFY para o período de 13/01 às 12:00 UTC a 19/01 às 12:00 UTC, com frequência de 3h.

O campo de pressão ao nível médio do mar e do vento em 850 hPa ao longo do período de ocorrência da LIT1, associado ao padrão de ventos em 850 hPa na região analisada, gerados a partir das reanálises do NCEP/NCAR é mostrado na Figura 9. Às 12:00 UTC (Figura 9a), quando a maior intensidade da convecção se encontrava sobre o Oceano Atlântico, verificou-se o predomínio da circulação anticiclônica em baixos níveis paralela à costa nordeste, com o predomínio de pressões mais altas, típica desta época do ano. Os ventos mais intensos foram observados na região onde a ZCIT estava ativa, com intensa convecção. No horário das 18:00 UTC (Figura 9b), quando a LIT1 já estava formada sobre a costa, houve a intensificação dos ventos, associado ao maior gradiente de pressão, devido à formação de uma baixa pressão sobre o Piauí e Ceará. O escoamento de nordeste vindo do Oceano Atlântico adentrou o continente, que ficou mais intenso principalmente sobre o Pará. A confluência dos ventos em baixos níveis nesta área contribuiu para a intensificação da convecção e da propagação das células mais intensas para a porção central do Pará. O predomínio do escoamento direcionado para o Pará contribuiu para o enfraquecimento da atividade convectiva da porção direita da LIT1, e favoreceu a intensificação da convecção sobre o Pará.

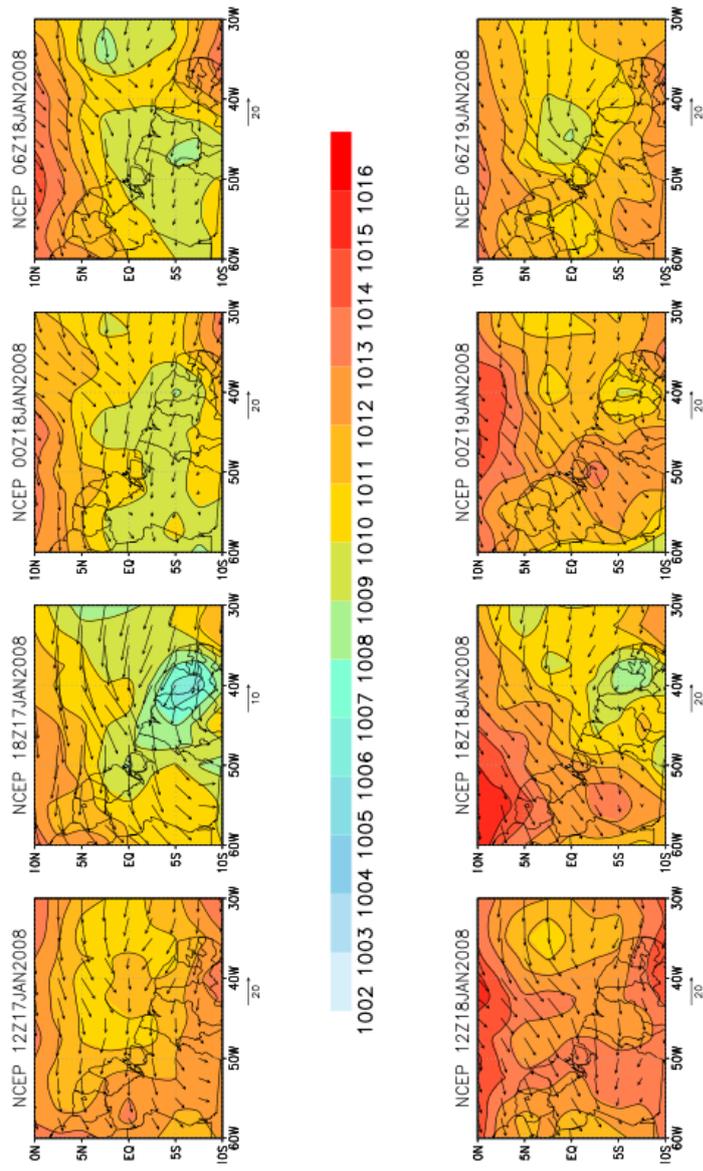


Figura 9 - Campo de pressão ao NMM e vento (m/s) em 850 hPa das reanálises do NCEP/NCAR do período de 17 de janeiro às 12:00 UTC até 06:00 UTC do dia 18 de janeiro.

As duas versões do modelo não simularam a intensificação do gradiente de pressão no dia 17 às 18:00 UTC, e simularam uma baixa pressão muito fraca a oeste do Ceará. A pressão do ENCDFY (Figura 10) esteve em geral mais intensa que a pressão do EN (Figura 11). Em termos de circulação, não se observou diferenças importantes entre as duas versões. Ambos simularam os ventos em 3 mil metros de altura praticamente paralelo à costa do NEB. Esta característica foi fundamental para a geração de fraca precipitação do modelo e a deficiente propagação da LIT1 continente adentro. A ausência de ventos perpendiculares ao longo da costa do NEB desfavoreceu o transporte de umidade vindo do Oceano Atlântico, contribuindo para a desintensificação da LIT1. O modelo, em suas duas versões não simulou corretamente a intensidade e direção do escoamento em baixos níveis, fator este determinante para a propagação das LI.

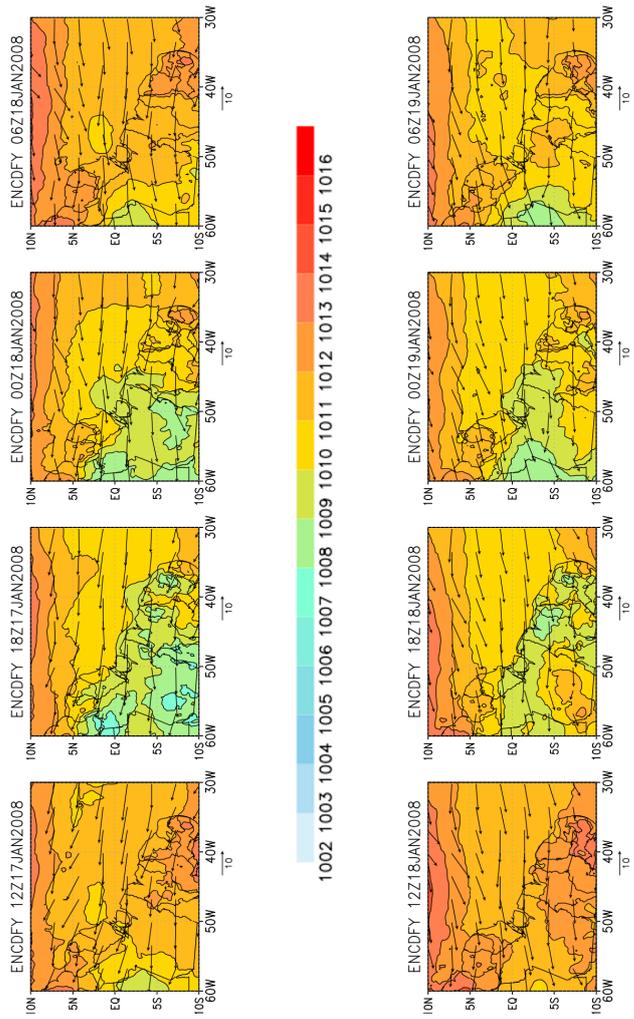


Figura 10 - Pressão ao nível médio do mar (hPa) e vento (m/s) em 850 hPa simulados pelo BRAMS utilizando o fechamento ENCDFY, para o período de 17 de janeiro às 12:00 UTC a 18 de janeiro às 09:00 UTC.

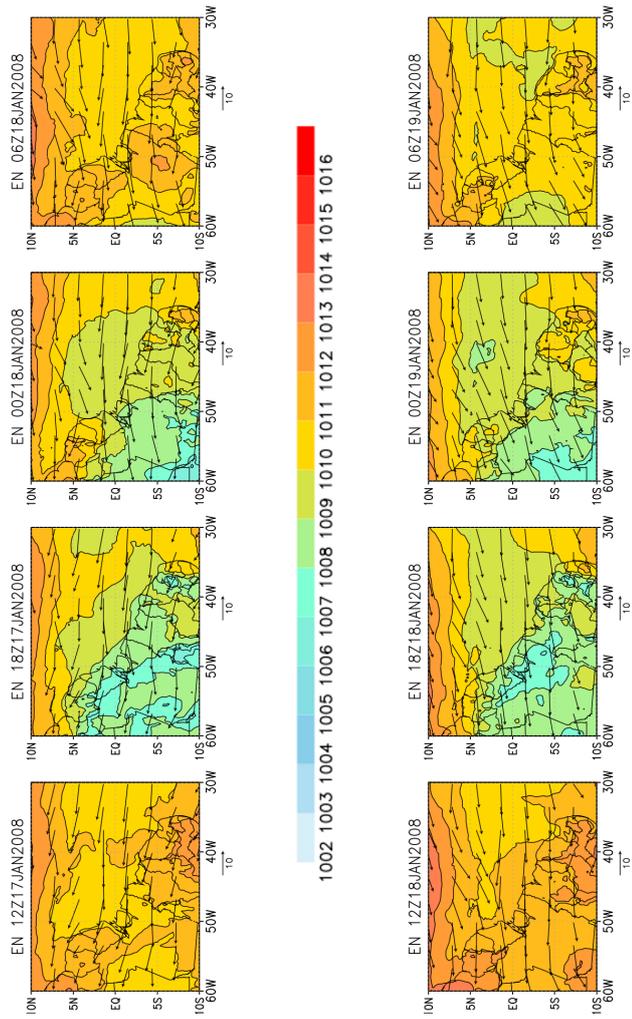


Figura 11 - Idem à Figura 10, exceto que foi utilizado o fechamento EN.

O campo de divergência de umidade e vento em 925 hPa ao longo do período de ocorrência da LIT1 é mostrado na Figura 12. O escoamento é predominantemente de nordeste e perpendicular à costa sobre a região de maior convecção, associado à circulação anticiclônica dos alísios, em conjunto com máximos de convergência de umidade (divergência negativa). Aliado ao movimento vertical ascendente verificado na Figura 7, foram-se condições favoráveis para a ascensão do ar em conjunto com a circulação de brisa, ocasionando a formação de nuvens cumulus ao longo da costa. Entre as 12:00 UTC do dia 17 e as 18:00 UTC do dia 18 (Figuras 12a-12f), maiores valores de convergência de umidade e confluência do vento foram observados sobre o Amapá e norte do Pará, contribuindo para a dissipação da convecção sobre a costa do Maranhão até o Ceará, e favorecendo a propagação da convecção pela Bacia Amazônica.

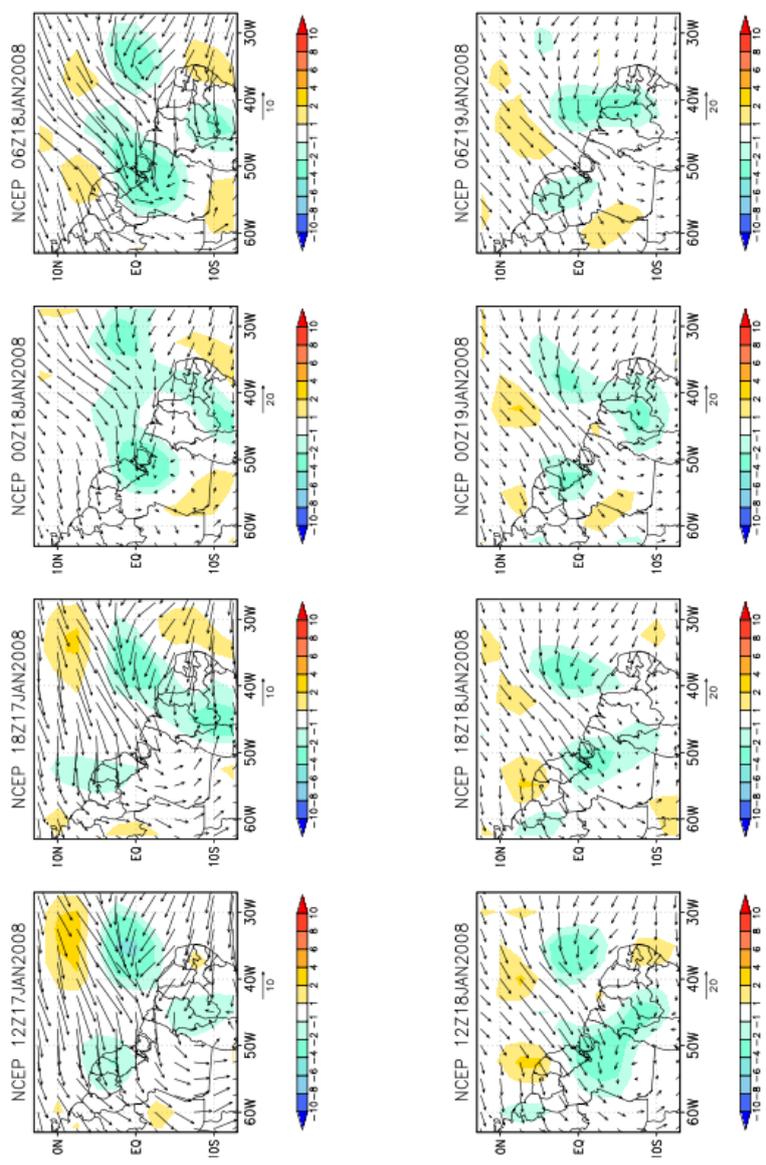


Figura 12 - Campo de divergência de umidade ($10e^{-7}$ g/kg/s) e vento (m/s) em 925 hPa obtidos das reanálises do NCEP/NCAR do período de 17 de janeiro às 12:00 UTC até 06:00 UTC do dia 18 de janeiro.

A simulação da divergência em 925 hPa identificou deficiência em ambas as versões do modelo. O escoamento de nordeste associado aos ventos alísios foi subestimado, além de não ter sido perpendicular à costa às 12:00 UTC do dia 17 (Figuras 13 e 14), como observado nas reanálises do NCEP/NCAR (Figura 12a). Além disso, neste horário, foi observado divergência de umidade e não convergência sobre o Amapá e nordeste do Pará, em ambas as versões do modelo. Verificou-se convergência mais intensa ao longo da costa, desde o Amapá até o Ceará simulada pelo ENCDFY no dia 17 às 18:00 UTC. Em geral, o EN gerou mais áreas com divergência de umidade nas regiões ao longo da costa onde se esperava convergência de umidade, fator este que inibiu o disparo da convecção. Apesar de o ENCDFY ter apresentado áreas de convergência de umidade favoráveis à formação de nebulosidade, os movimentos verticais simulados mais fracos não contribuíram para o desenvolvimento da convecção, além dos ventos mais fracos ao longo da costa.

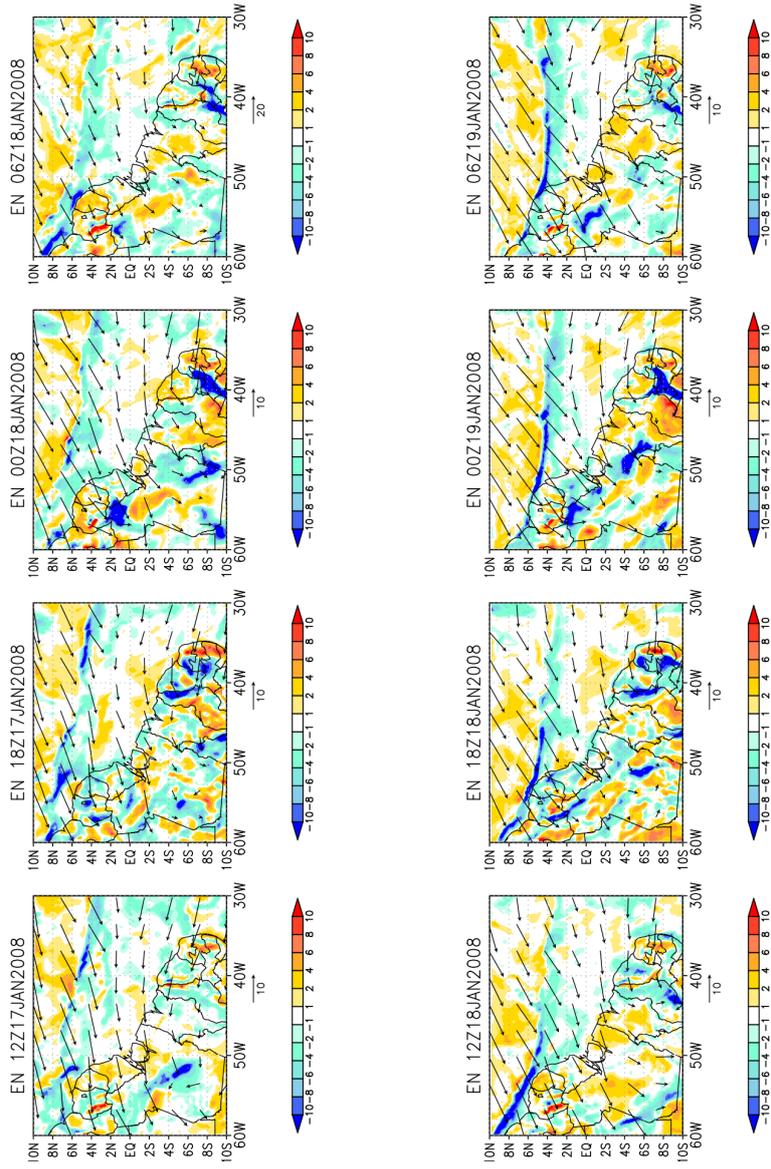


Figura 13 - Idem à Figura 12, exceto que simulado pelo BRAMS utilizando o fechamento EN. Aqui a divergência tem unidade de $10e^{-4}$ g/kg/s.

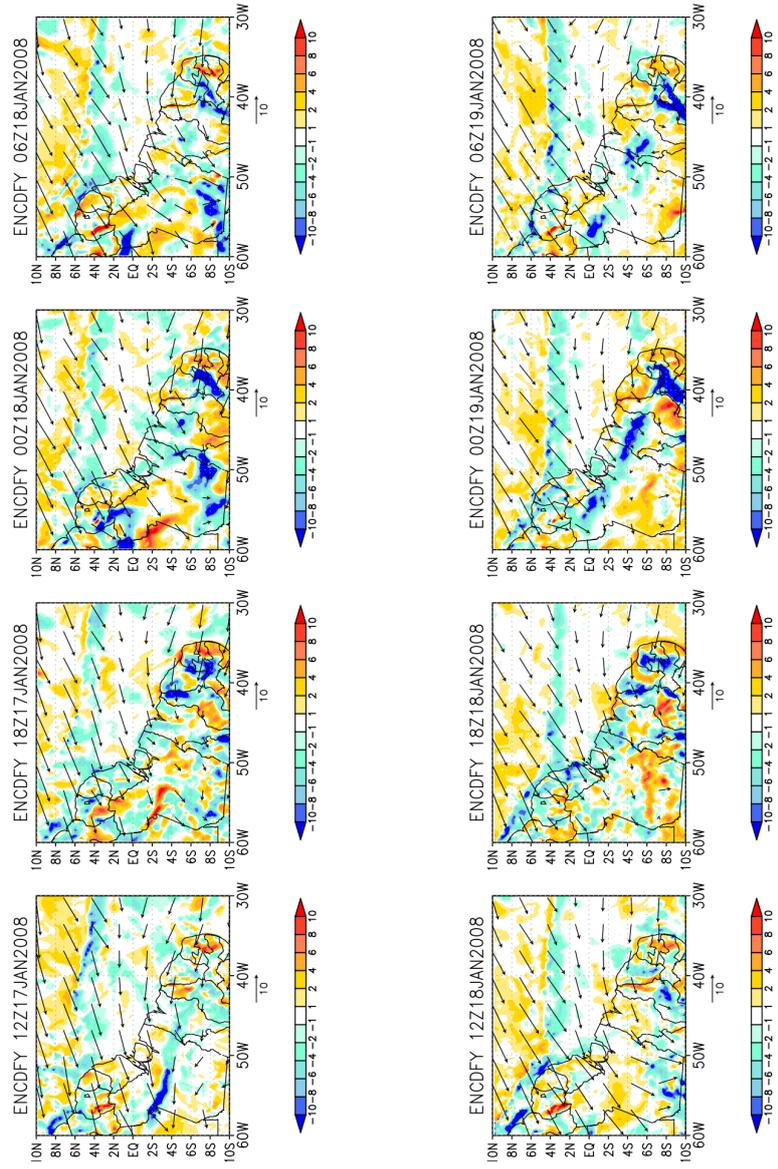


Figura 14 - Idem à Figura 12, exceto que simulado pelo BRAMS utilizando o fechamento ENCDFY. Aqui a divergência tem unidade de $10e^{-4}$ g/kg/s.

A evolução da precipitação do TRMM ao longo dos dias 17 e 18, período este da ocorrência da LIT1, é mostrada na Figura 15. Entre as 15:00 UTC e as 18:00 UTC do dia 17 (Figuras 15a e 15b, respectivamente) a precipitação foi mais intensa na região adjacente à costa e sobre o Oceano, devido à atividade da ZCIT. Nestas áreas, observou-se núcleos de precipitação acumulada em 3h da ordem de até 40 mm. A partir das 21:00 UTC surgiu precipitação mais intensa sobre o continente em forma de linha até as 00:00 UTC do dia 18 (Figuras 15c-15d). A partir das 03:00 UTC (Figura 15e), a precipitação mais intensa foi observada sobre o nordeste do Pará, que se propagou rapidamente para o interior do Estado entre as 06:00 UTC e 12:00 UTC (Figuras 15f-15h). Intensos núcleos de precipitação também foram observados entre o oeste do Maranhão e centro-norte do Piauí, associados à ativação da convecção devido à propagação da LIT1.

O modelo BRAMS utilizando o EN espalhou chuva leve em boa parte da área analisada no dia 17 entre as 15:00 UTC e as 21:00 UTC (Figuras 16a-16c). Às 21:00 UTC do dia 17 (Figura 16c), um núcleo intenso de precipitação foi simulado ao norte do Tocantins, onde o EN simulou uma área de baixa pressão relativa e ventos de leste em 850 hPa intensos. Entre as 03:00 UTC e as 06:00 UTC (Figuras 16e-16f), houve a propagação deste núcleo para o centro do Pará, que a partir das 09:00 UTC (Figura 16g) se desintensificou. Em contraste, o ENCDFY, apesar de ter subestimado a chuva observada, reduziu a superestimativa da precipitação leve indicada pelo EN, principalmente entre as 15:00 UTC e as 21:00 UTC do dia 17 (Figuras 17a-17c). A característica principal do ENCDFY, assim como a do EN, foi de gerar descolamento dos núcleos de precipitação no sudeste do Pará, onde não foi observado. Este padrão esteve associado às deficiências nos campos de circulação em baixos níveis identificados. Entretanto, no dia 18 às 09:00 UTC verificou-se sobre o Maranhão núcleos intensos de precipitação estimados pelo TRMM (Figura 15g), que não foram simulados pelo EN (Figura 16g). Porém, o ENCDFY reproduziu núcleos de precipitação nesta área, apesar de fracos se comparados ao observado (Figura 17g).

A precipitação estimada pelo TRMM para a região sul da América do Sul é mostrada na Figura 18. Nota-se a intensa precipitação associada ao sistema frontal sobre o Uruguai e Argentina, com acumulados em 3h de até 20 mm às 12:00 UTC do dia 16 (Figura 18a). A precipitação se intensificou às 15:00 (Figura 18b) principalmente no nordeste da Argentina e extremo oeste do Rio Grande do Sul, onde se observaram acumulados em 3h superiores a 40 mm. A partir das 18:00 UTC (Figura 18c) o sistema se desintensificou sobre o continente, se deslocando para o Oceano Atlântico. Pequenos núcleos intensos de precipitação puderam ser observados no norte da Ar-

gentina, associados à formação do SCM. Às 21:00 UTC a precipitação se intensificou nesta área, quando foram observados acumulados superiores a 50 mm em 3h (Figura 18d). Associado ao sistema frontal, foi observada ocorrência de chuvas intensas no leste de Santa Catarina (Figura 18d). Os acumulados associados ao SCM podem ter sido superestimados, tendo em vista que a temperatura do topo das nuvens neste período era inferior a -80°C . A precipitação se manteve intensa até as 03:00 UTC (Figura 18f), conjuntamente com a ocorrência de núcleos de precipitação no sul da Bolívia. Às 06:00 UTC (Figura 18g) houve um enfraquecimento da precipitação e às 09:00 UTC (Figura 18h) observou-se que acumulados intensos, tendo em vista a desestabilização da atmosfera com o início do aquecimento superficial nas primeiras horas da manhã. A partir das 12:00 UTC (Figura 18i) o SCM enfraqueceu e os volumes de precipitação reduziram.

O modelo BRAMS utilizando o fechamento EN subestimou a precipitação estimada pelo TRMM, tanto a associada com o sistema frontal quanto devido à ocorrência do SCM ao norte da Argentina (Figura 19). Volumes muito baixos àqueles observados foram simulados ao longo do sistema frontal e ao norte da Argentina. Além disso, o modelo teve a tendência de simular precipitação que não ocorreu sobre o sul da Região Centro-Oeste do Brasil e sul da Bolívia. Em nenhum dos horários de máxima ocorrência da precipitação associada ao SCM, o EN simulou precipitação.

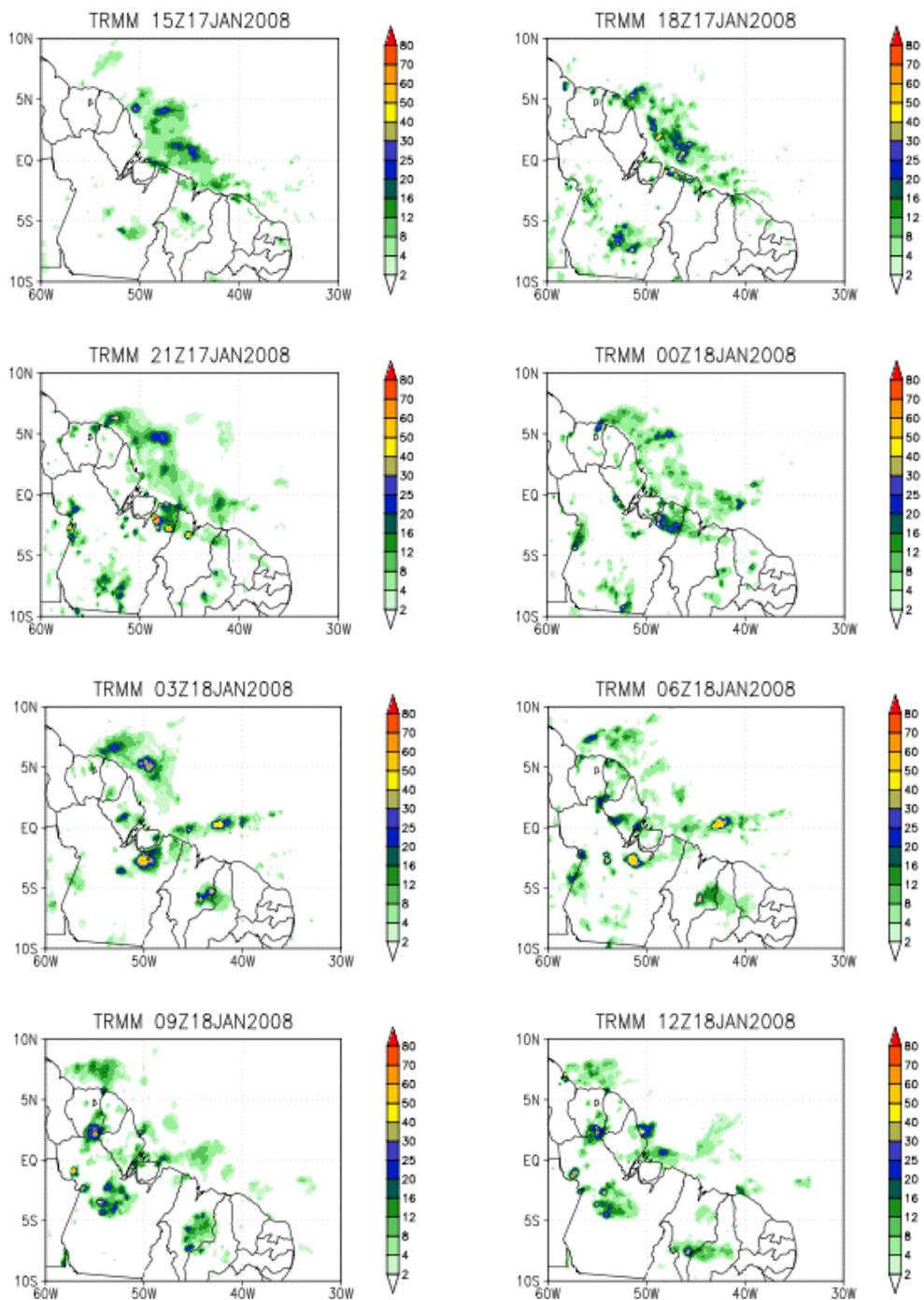


Figura 15 - Precipitação acumulada (mm) em 3h do TRMM sobre o nordeste do Brasil, do período de 15:00 UTC do dia 17 de janeiro a 12:00 UTC do dia 18 de janeiro.

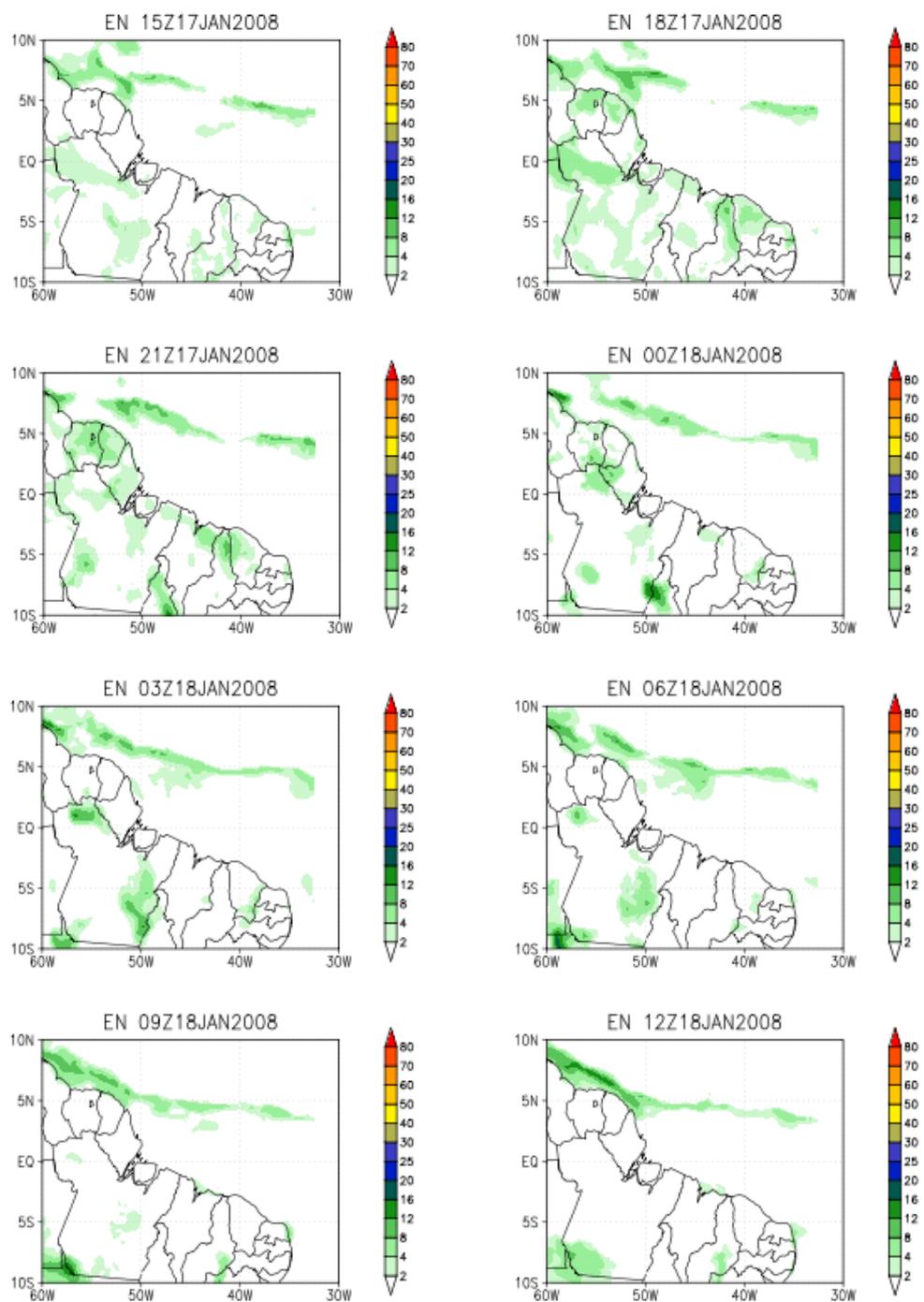


Figura 16 - Precipitação simulada pelo BRAMS utilizando o fechamento EN sobre o nordeste da América do Sul para o período de 15:00 UT do dia 17 a 12:00 UTC do dia 18 de janeiro de 2008.

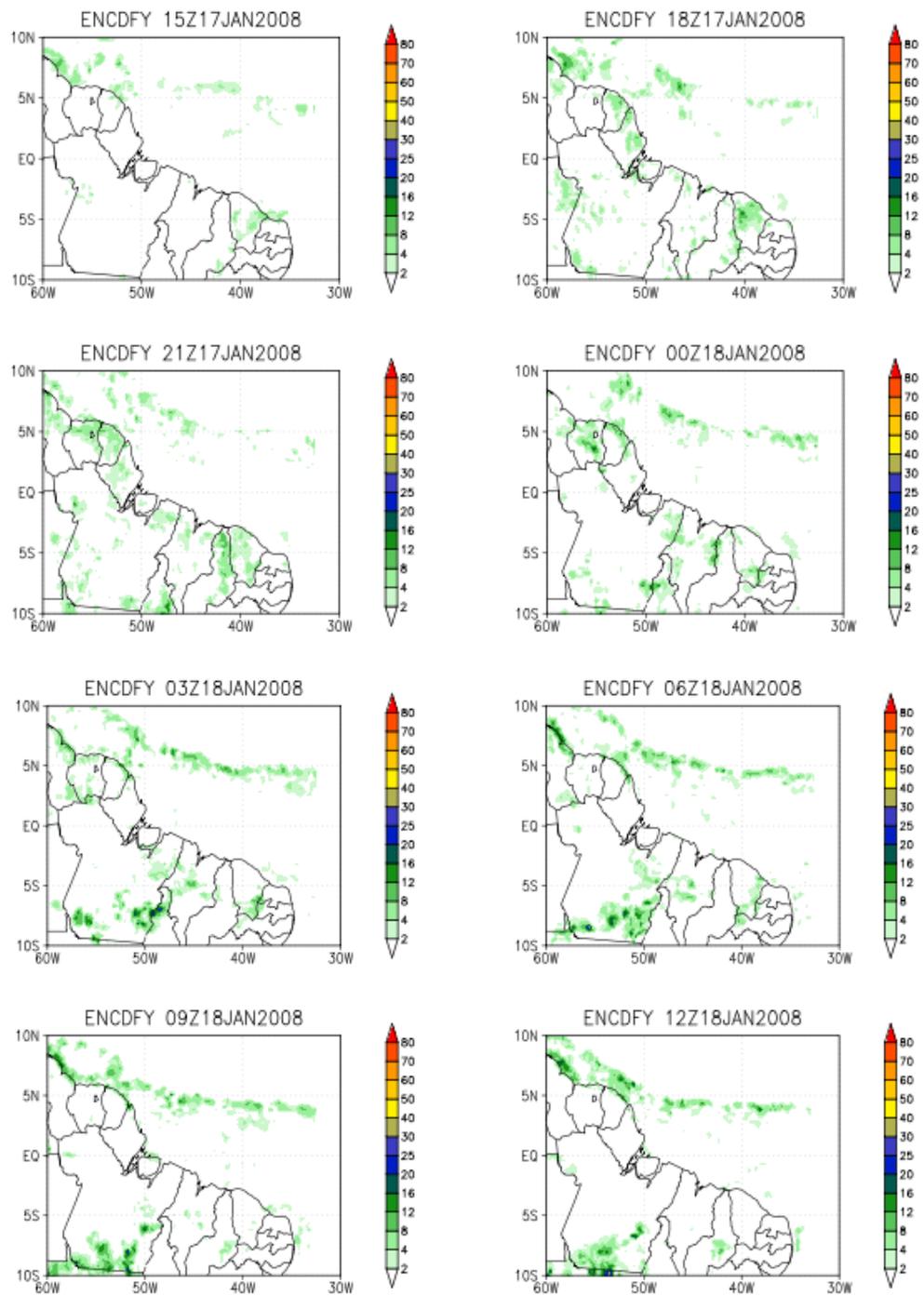


Figura 17 - Idem à Figura 16, exceto que foi utilizado o fechamento ENCDFY.

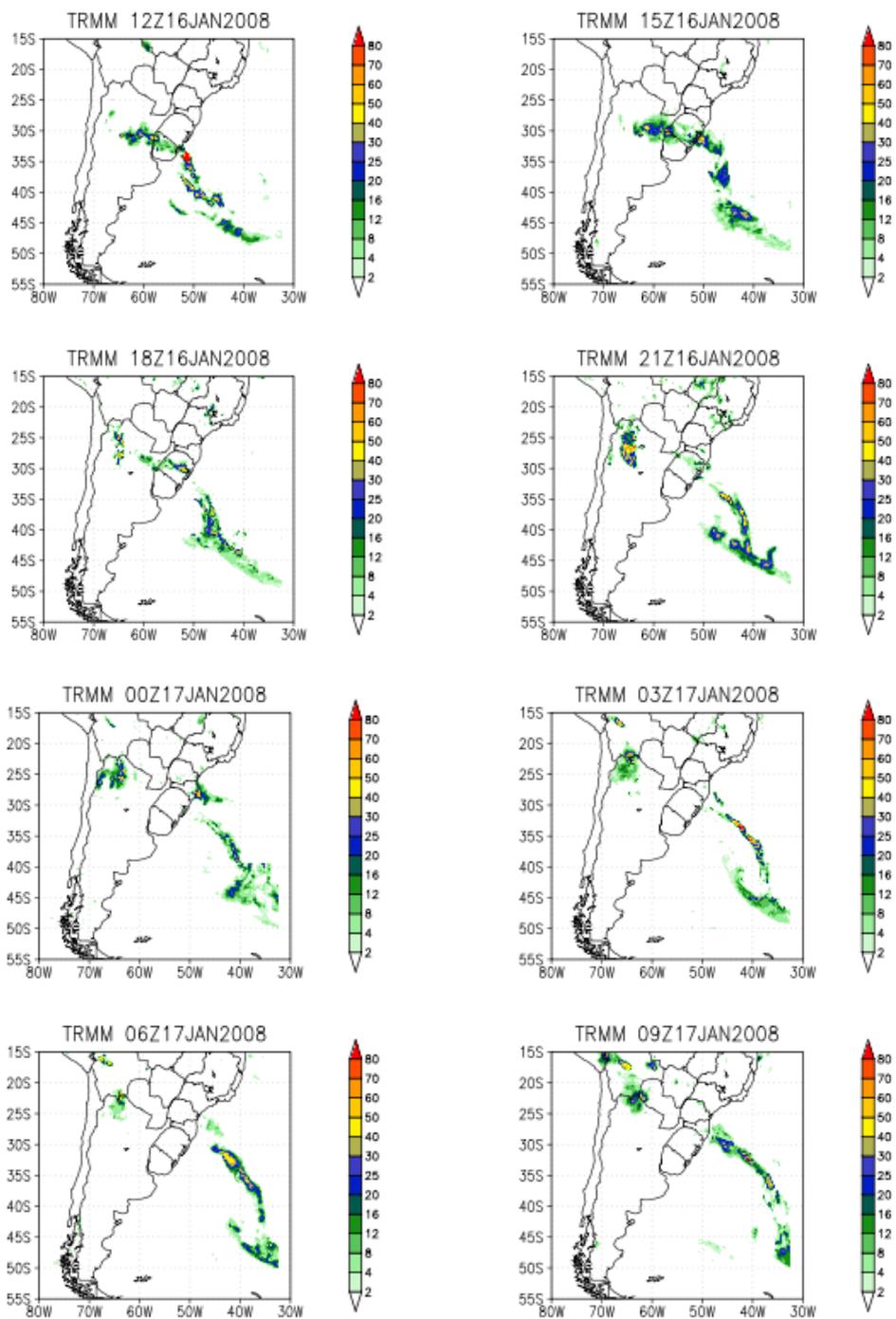


Figura 18 - Precipitação acumulada (mm) em 3h estimada pelo TRMM sobre o sul da América do Sul, do período de 12:00 UTC do dia 16 de janeiro a 15:00 UTC do dia 17 de janeiro. (Continua.)

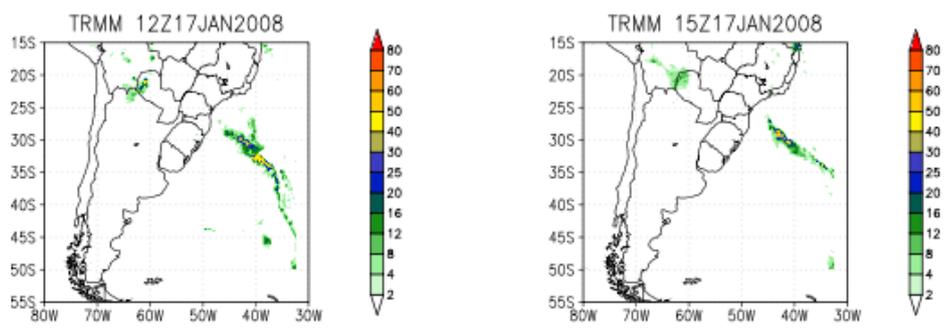


Figura 18 - Conclusão.

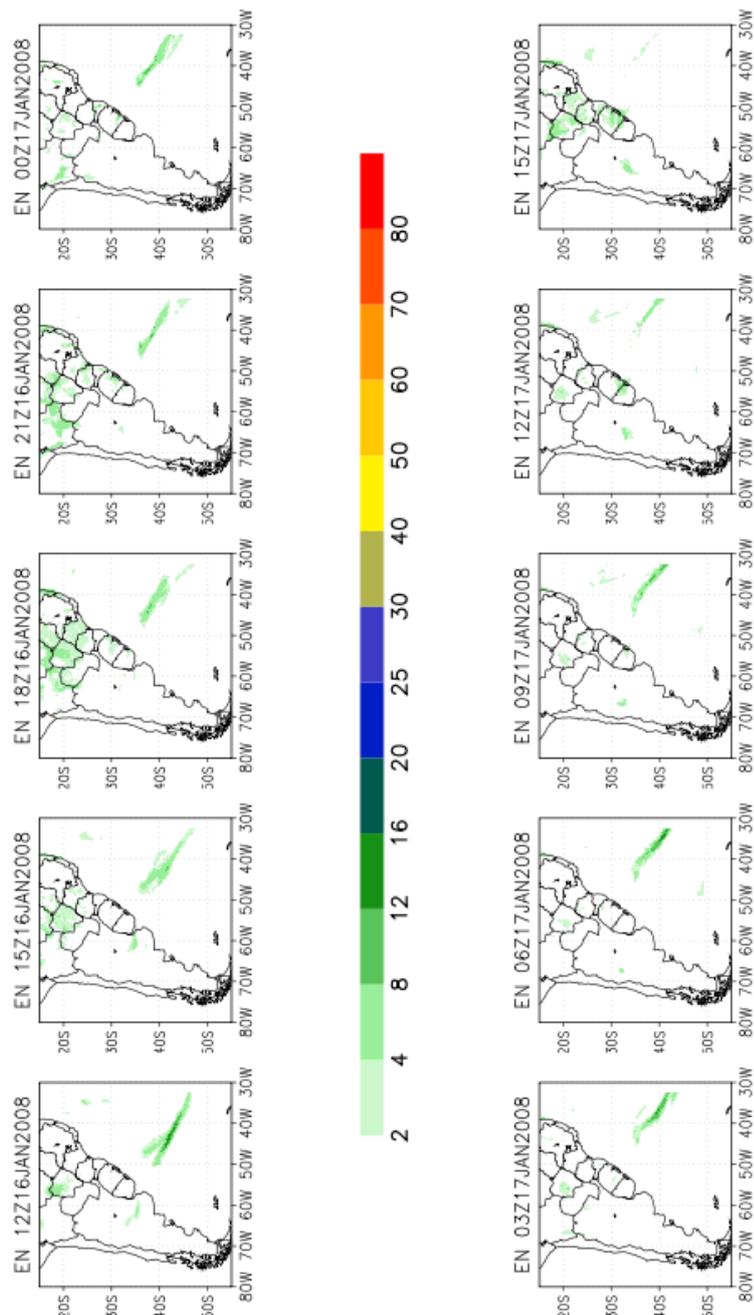


Figura 19 - Precipitação simulada pelo BRAMS utilizando o fechamento EN para o período de 12:00 UTC do dia 16 a 15:00 UTC do dia 17 de janeiro de 2008.

O ENCDFY (Figura 20) apresentou desempenho superior à versão do modelo utilizando o fechamento EN. No dia 16 às 12:00 UTC (Figura 20a), o modelo atrasou a precipitação observada associada ao sistema frontal, mas simulou chuva mais intensa se comparado ao EN. Às 21:00 UTC (Figura 20d), embora menos intenso que o observado, o padrão de precipitação simulado pelo ENCDFY foi superior ao EN. O primeiro simulou precipitação acumulada em 3h da ordem de 8 mm no noroeste da Argentina, muito próximo da posição da precipitação estimada pelo TRMM. Padrão de precipitação muito mais fraco que o do TRMM foi observado nos horários subsequentes, mas notou-se que o disparo convectivo foi mais eficiente, já que observou-se a geração de precipitação em vários pontos ao norte da Argentina. Uma característica importante do ENCDFY foi a tendência de reduzir a precipitação simulada pelo EN em áreas onde não foi observada. Isto foi verificado principalmente no horário das 15:00 UTC do dia 17 (Figura 20j), quando o EN simulou precipitação leve em grande parte da Região Sudeste e sul da Região Centro Oeste, enquanto que o ENCDFY eliminou esta deficiência consideravelmente.

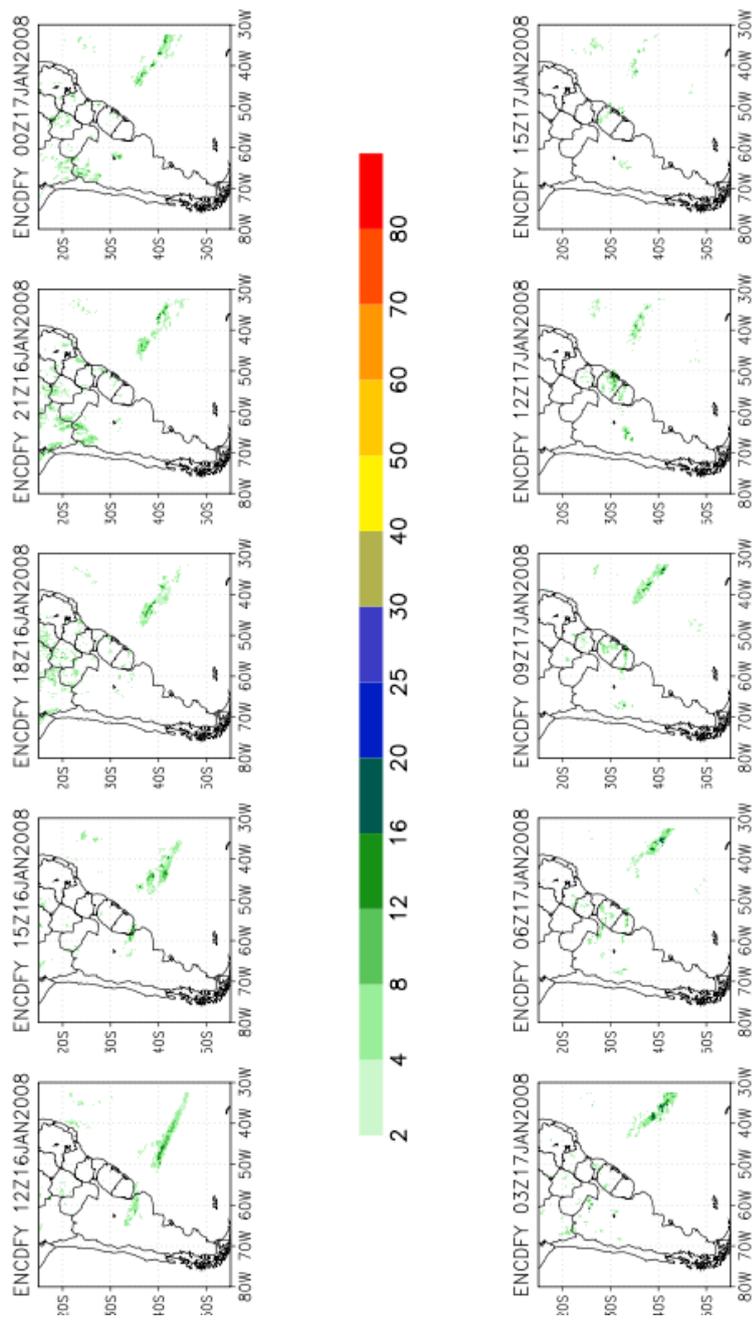


Figura 20 - Idem à Figura 16, exceto pela utilização do fechamento ENCDFY.

É comum a formação de SCM ao norte da Argentina e Sul do Brasil estarem associados à presença de um JBN a leste da Cordilheira dos Andes (SANTOS, 2006; SALIO et al., 2007). Entretanto, o sistema analisado não esteve associado ao um JBN de acordo com os critérios de Bonner (1968). Porém, várias características típicas da ocorrência de um JBN foram identificadas. A presença da baixa do Chaco ao norte da Argentina, o predomínio de ventos de norte desde as 18:00 UTC do dia 15 de janeiro (Figura 21a) até as 12:00 UTC do dia 16 de janeiro (Figura 21d). Verificou-se que durante este período houve uma ciclogênese no Oceano Atlântico Sul, fator este que contribuiu para acelerar os ventos de norte. Em 200 hPa notou-se uma intensa corrente de jato zonal com núcleo de vento máximo (NVM) de 50 m/s na porção central da Argentina (figura não mostrada). A presença do NVM favorece a intensificação da convergência de massa em baixos níveis devido à circulação direta existente na entrada do jato, tendo em vista que a região de entrada equatorial da corrente de jato gera divergência na alta troposfera.

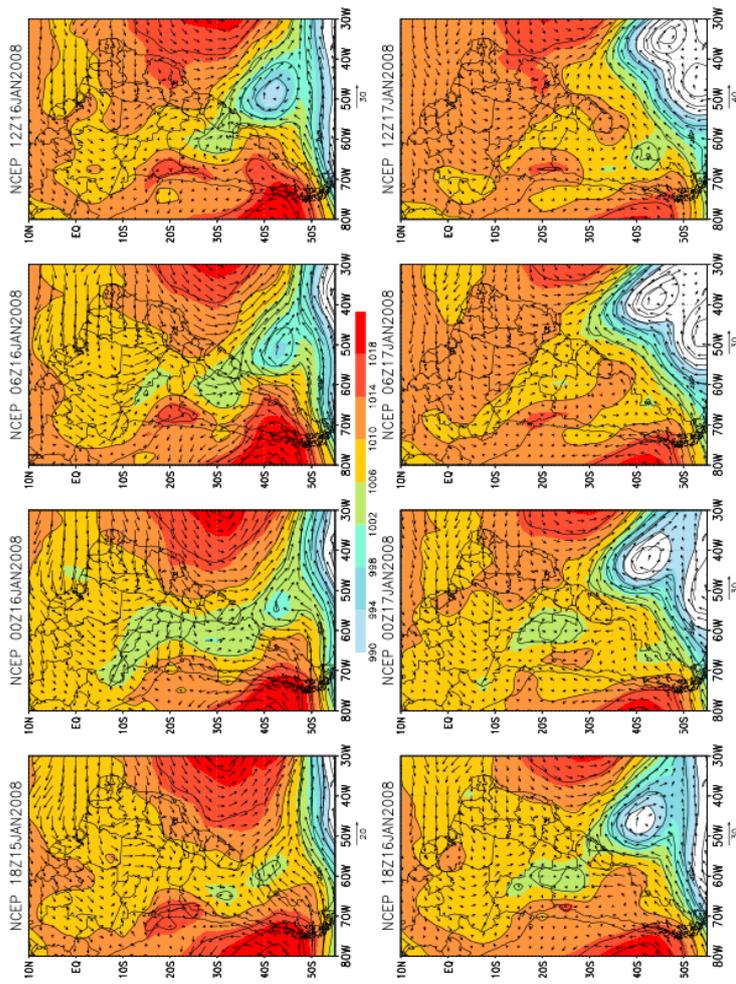


Figura 21 - Pressão ao nível médio do mar (hPa) e vento (m/s) em 850 hPa do período de 15 de janeiro de 2008 às 18:00 UTC até 17 de janeiro de 2008 às 12:00 UTC gerados a partir das reanálises do NCEP/NCAR.

Ambas as versões do modelo BRAMS simularam o padrão de circulação de baixos níveis de forma insatisfatória. A simulação da baixa do Chaco foi superestimada ao longo dos horários de simulação, porém, os campos de vento não responderam de acordo. Houve subestimativa do vento de norte sobre a região central da América do Sul, e ao norte da Argentina, onde se observou ventos de norte intensos nas reanálises do NCEP/NCAR, o modelo indicou ventos muito mais fracos em todo o período analisado. A ciclogênese não foi representada pelas versões do modelo. Em altos níveis, ambas as versões do modelo simularam de forma satisfatória o posicionamento da corrente de jato. Entretanto, verificou-se nas análises do NCEP/NCAR um padrão de forte difluência na saída do sistema, cujo padrão simulado foi mais fraco. Também, os ventos associados à circulação da Alta da Bolívia foram fortemente subestimados pelo modelo BRAMS (figura não mostrada).

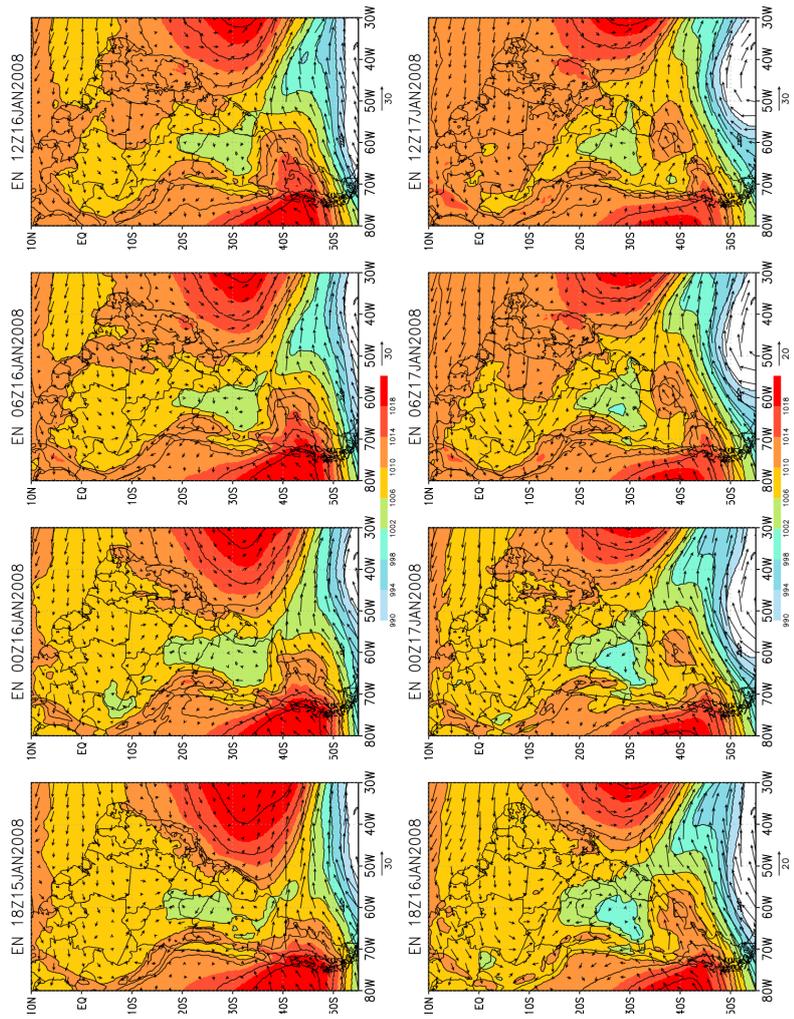


Figura 22 - Pressão ao nível médio do mar (hPa) e vento (m/s) em 3 mil metros de altura simulados pelo BRAMS utilizando o fechamento EN, do período de 17 de janeiro às 12:00 UTC a 18 de janeiro às 09:00 UTC.

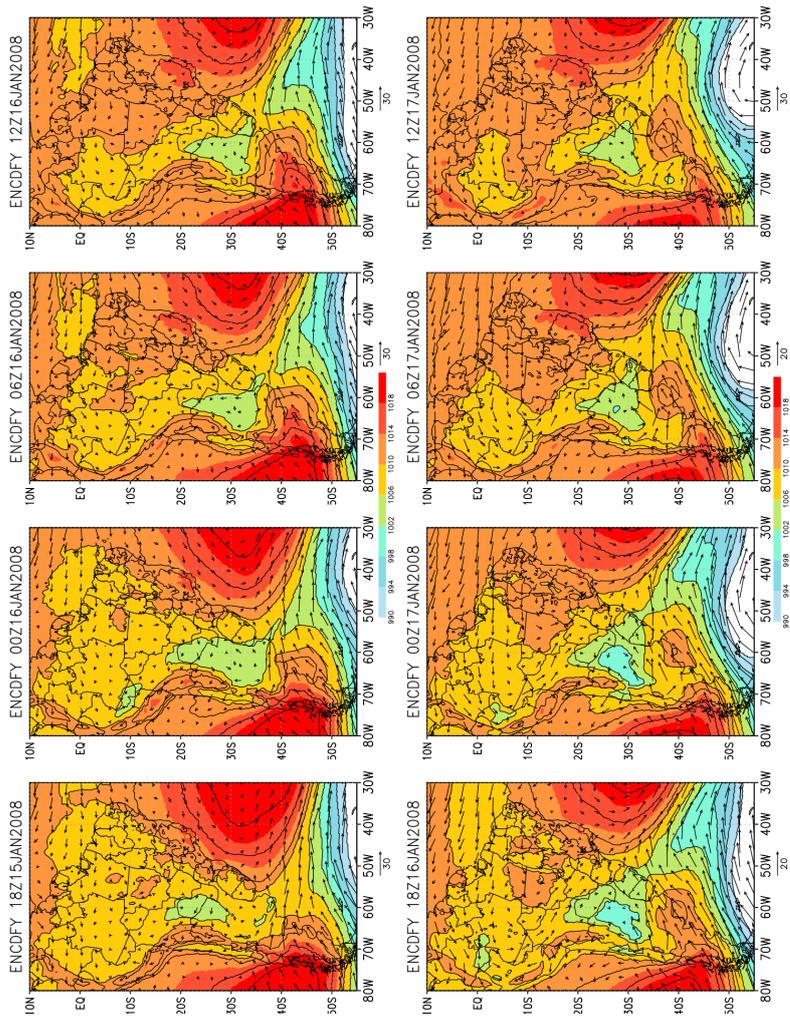
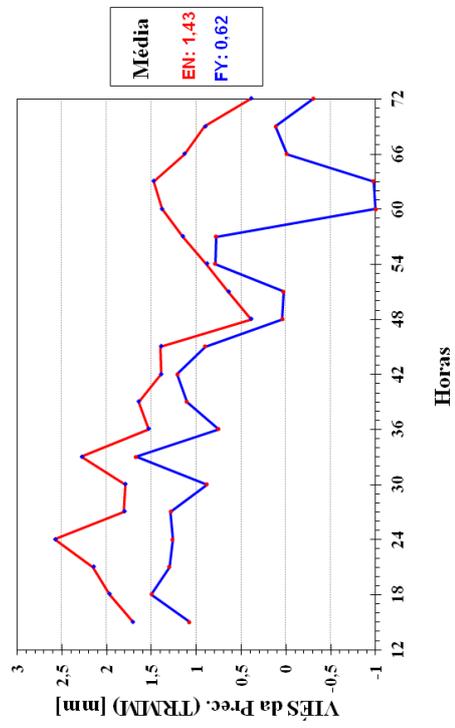


Figura 23 - Idem à Figura 16, exceto que é utilizando o fechamento ENCDFY.

O viésM e o RMS da precipitação para as Regiões Nordeste e Sul indicadas na Figura ?? são mostrados na Figura 24. A característica do ENCDFY de reduzir a tendência do EN de superestimar a precipitação foi evidenciada pelo viésM (Figuras 24a e 24b). O movimento vertical mais intenso simulado pelo EN manteve mais áreas convectivamente ativas, e m_b mais intenso contribuiu para o disparo da convecção excessiva. A análise do RMS destacou que a maior deficiência do ENCDFY sobre a Região Nordeste é nas primeiras horas de simulação, pois há maior variabilidade no padrão do índice, embora os valores tenham sido os menores. Isso porque nesse período inicial, ocorreu menor quantidade de precipitação em ambos os casos. Para a Região Sul, o mínimo de RMS, muito próximo de zero, ocorreu nos horários em que o EN havia previsto chuva em excesso e o ENCDFY praticamente eliminou o viés positivo do EN. Para ambos os sistemas analisados, a precipitação associada é quase que totalmente convectiva. A resolução utilizada do modelo não é capaz de resolver todos os processos associados à formação da convecção, acarretando em uma simulação fraca do ambiente saturado associado à formação dos sistemas.

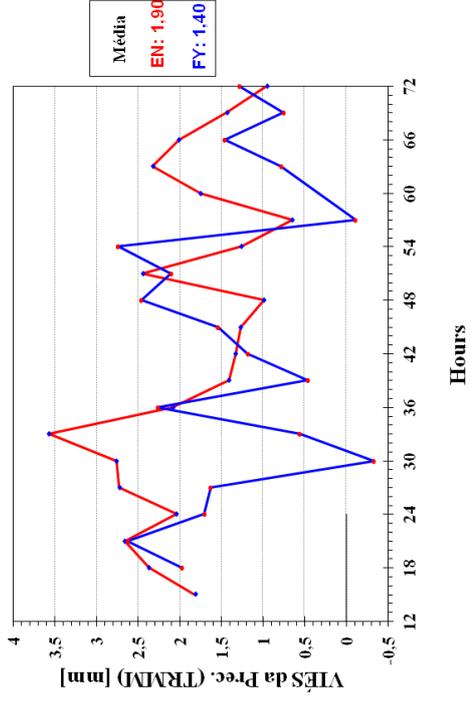
O fato de o modelo simular os campos de vento mais fracos do que eles realmente foram observados contribuiu para a geração de um ambiente menos instável, já que o mecanismo de transporte de umidade e calor das regiões fonte para a região de formação dos sistemas não foi eficiente. A alteração de m_b pelo ENCDFY não causou impacto importante nos campos de vento.

Média NE em: [Previsões iniciadas entre 13/01/2008 a 13/01/2008] e [18 METAR + 0 PCDs do INMET]



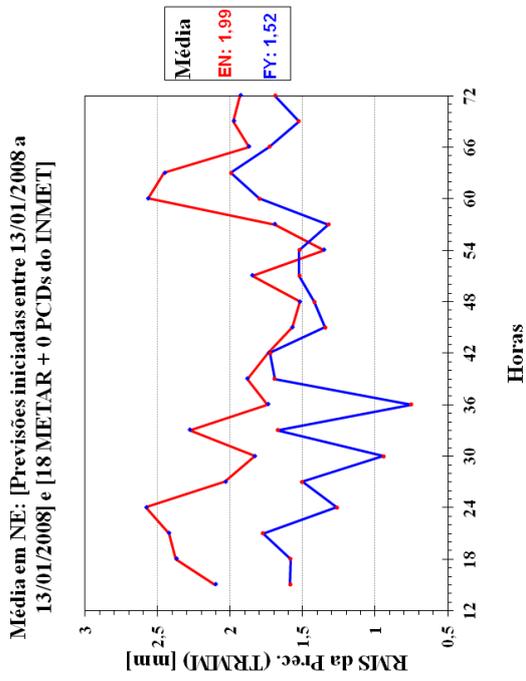
a)

Média em Sul: [Previsões iniciadas entre 13/01/2008 a 13/01/2008] e [17 METAR + 0 PCDs do INMET]

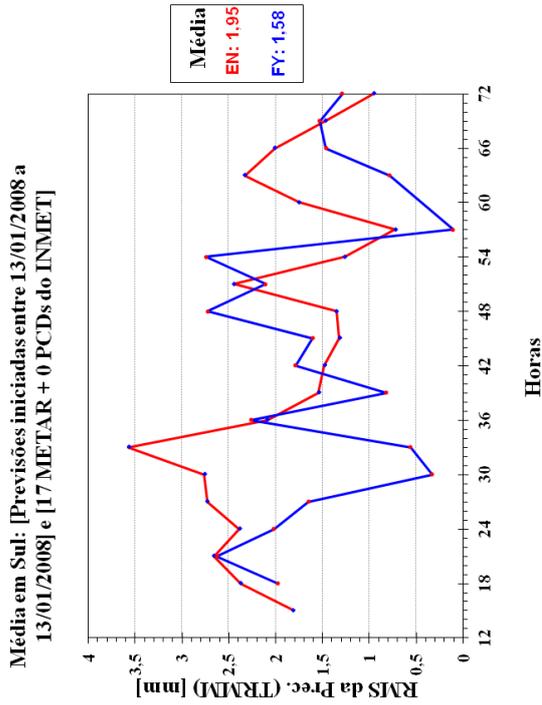


b)

Figura 24 - Viés e RMS médios da precipitação (mm) sobre as áreas da Figura ?? : a) e c) Nordeste e b) e d) Sul (Continua).



c)



d)

Figura 24 - Conclusão.

Em termos de pressão e temperatura (figuras não mostradas), o EN tem a tendência de simular pressões mais baixas, já que também simula mais áreas convectivamente ativas. Maior m_b induz a convergência em baixos níveis e movimentos ascendentes mais intensos, gerando o abaixamento da pressão. Como o ENCDFY reduziu as áreas convectivamente ativas, é esperado que a pressão se torne mais elevada, ao reduzir também a convergência em baixos níveis. Em relação às temperaturas, o ENCDFY reduziu a tendência do EN de apresentar viés negativo na Região Nordeste, tendo em vista que há o aumento do fluxo de calor sensível. Menor nebulosidade e pressões maiores, maior a irradiância, o que favorece o aumento das temperaturas. Na Região Sul, não se observou mudança importante nas temperaturas.

1 Considerações finais

O presente trabalho fez uso de métodos de problemas inversos como ferramenta para contribuir para a melhoria da representação numérica da precipitação sobre a América do Sul pelo o modelo regional BRAMS. O modelo, que dispõe, entre diversas funcionalidades, do esquema de parametrização convectiva de GD, a qual possui flexibilidade e várias opções de escolha de variantes no controle estático e fechamentos para a equação de fluxo de massa. Entretanto, a falta de um método objetivo para ponderar os membros do conjunto do esquema de GD limitava a utilização desta metodologia, inserindo subjetividade nos critérios de escolha dos melhores parâmetros a serem utilizados. O presente trabalho contribuiu para identificar a melhor combinação entre os cinco fechamentos disponíveis, gerando um conjunto melhor combinado para um caso de verão. A utilização do algoritmo de otimização Firefly levou a um conjunto de pesos associados ao padrão de precipitação observado para o mês de janeiro de diferentes anos. O mês de janeiro é tipicamente um período com intensa atividade convectiva em grande parte da América do Sul e representa bem os padrões de precipitação mais intensos observados durante o período de verão.

Os resultados obtidos a partir da simulação da precipitação de janeiro de 2006 utilizando cinco diferentes fechamentos para gerar um novo conjunto de 5 membros de precipitação sugerem que a estimativa de parâmetros utilizando o Firefly é um método robusto para treinar parametrizações estocásticas utilizadas em modelos numéricos. Esta metodologia é inovadora ao utilizar as observações como informações *a priori* para gerar um conjunto de pesos a ser aplicado aos membros de um conjunto de parametrizações físicas.

Além de contribuir para a melhoria da simulação da precipitação sobre toda a América do Sul, o desenvolvimento do trabalho inseriu outras duas aplicações importantes no processo de melhoria dos produtos de previsão numérica do BRAMS. A aplicação dos resultados da resolução do problema inverso possibilitou aplicar o método para corrigir o viés das simulações de precipitação por meio da reconstrução do campo de precipitação a partir de um conjunto de diferentes simulações e a observação. É sabido que a correção dos erros associados é importante para a aplicação em outras frentes de pesquisa, como na utilização em modelos hidrológicos e modelos agrometeorológicos, os quais utilizam dados de modelos atmosféricos como dados de entrada para a geração de outros produtos dependentes da disponibilidade de água na superfície.

Outro problema inerente a todos os modelos numéricos, tanto de previsão de tempo

como de clima, é a deficiente representação do ciclo diurno da precipitação, principalmente nas regiões tropicais. Ainda devido à necessidade de utilizar modelos que representam, por meio de parametrizações, os processos físicos associados às nuvens e convecção, e conseqüentemente a representação da precipitação, observam-se erros sistemáticos nos modelos numéricos, principalmente em relação à representação correta dos perfis de aquecimento e secagem da atmosfera. Normalmente, os modelos simulam o aquecimento máximo horas antes do que realmente ocorre na natureza, gerando simulações de precipitação também adiantadas. Neste trabalho, a ponderação objetiva dos fechamentos da parametrização convectiva de GD contribuiu para alterar o ciclo diurno de aquecimento e secagem devido à convecção, de modo que o modelo passou a simular os máximos três horas depois do que era simulado com a versão operacional do modelo BRAMS. Esta alteração do máximo de aquecimento contribuiu para a simulação do pico de máxima precipitação nos setores noroeste e central da América do Sul mais próxima da realidade durante o mês de janeiro. Tais regiões são tipicamente caracterizadas pela ocorrência de sistemas convectivos precipitantes que causam eventos severos de tempo.

O conjunto de parâmetros associados aos fechamentos da parametrização convectiva de GD apontou o mecanismo dinâmico associado ao fechamento LO como o principal responsável pela ponderação do fluxo de massa na base de uma nuvem convectiva, contrariando a ideia de que os fechamentos que consideram a CAPE como principal forçante para a intensidade da convecção têm maior peso. Por definição, a convecção é governada pela flutuabilidade, e por isso é esperado que a intensidade da convecção seja dependente da quantidade de flutuabilidade que age no fluxo convectivo (YANO et al., 2012). O mecanismo associado ao fechamento LO considera o movimento vertical como responsável pelo fluxo de massa na base da nuvem. Além disso, esta hipótese simula o tempo de defasagem entre uma corrente ascendente e descendente, representando o mecanismo de manutenção da convecção pelo disparo de novas células a partir do ar frio que forma a frente de rajada na CLP.

Apesar da precipitação ser diretamente proporcional ao fluxo de massa na base da nuvem, as melhorias do ciclo diurno de aquecimento, secagem e da precipitação não foram satisfatórias para o sul e nordeste da América do Sul. Para o sul do continente, uma das razões pode estar associada à utilização da própria precipitação na formulação do modelo inverso. Assumindo tais dados como entrada para o modelo, assumiu-se que a precipitação é uma boa medida para a convecção em qualquer região. Entretanto, de acordo com Yano et al. (2012), utilizar a precipitação como

medida da atividade convectiva pode ser questionada, devido ao controle exercido pelos processos de escala sinótica dominantes nesta região.

A partir do estudo de caso realizado para o período de 13 a 19 de janeiro de 2008, verificou-se que os diferentes padrões de precipitação que ocorrem ano a ano em função da variabilidade natural do clima têm forte influência na resposta do modelo À ponderação do fluxo de massa dos diferentes fechamentos. isto porque o treinamento realizado para o ano de 2006 levou em consideração um período em que foram observados déficits de precipitação em algumas regiões da América do Sul. A utilização dos pesos para janeiro de 2006 não permitiu o aumento da convecção e resultante precipitação mais próxima da realidade. Entretanto, em comparação com a versão operacional do modelo BRAMS, notou-se melhorias consideráveis na simulação da precipitação e de variáveis meteorológicas comumente utilizadas, como temperatura do ar e do ponto de orvalho próximos à superfície e pressão ao nível médio do mar.

A análise da propagação de linhas de instabilidade durante o mês de janeiro de 2008 possibilitou identificar padrões importantes relacionando à interação de distúrbios de diferentes escalas de tempo. Verificou-se um possível acoplamento entre ondas mistas Rossby-gravidade, que se propagaram de sul em direção ao equador, e ao cruzar esta linha, interagem com ondas do tipo inercio-gravidade e contribuem para a intensificação da precipitação. O modelo BRAMS não reproduziu de forma satisfatória a propagação para norte, evidenciando uma possível deficiência do modelo em simular as ondas mistas Rossby-gravidade. Porém, a utilização dos pesos mostrou maior realismo com o campo de precipitação do TRMM em comparação do a versão operacional. Os fracos ventos alísios simulados pelo modelo também desfavoreceram a convergência de umidade ao longo da costa nordeste da América do Sul, fator este que também contribuiu para a deficiência na simulação das linhas de instabilidade formadas ao longo da costa. Estes são os principais motivos para a deficiência do método sobre o setor nordeste verificado na análise do ciclo diurno da precipitação.

Apesar das deficiências apontadas, os ganhos no desempenho do modelo em simular a precipitação, temperatura do ar e do ponto de orvalho a 2 metros e pressão ao nível médio do mar foram evidenciados pela melhoria substancial dos índices estatísticos calculados. A raiz do erro quadrático médio com a remoção do viés apontou erros inerentes ao modelo BRAMS que não estão associados à escolha de um fechamento específico. É necessário um investigação mais profunda para identificar tais erros, tarefa esta difícil, tendo em vista a complexidade dos processos representados pelas diversas componentes do sistema acoplado superfície-atmosfera.

A correta representação dos processos físicos associados à CLP, bem como das interações entre a superfície e a atmosfera têm forte impacto no desenvolvimento da atividade convectiva. Um dos grandes problemas da modelagem numérica da atmosfera é representar o acoplamento entre estes processos, o desenvolvimento da convecção rasa e a transição para a convecção profunda. Portanto, melhorar a representação da atividade convectiva não é suficiente, sendo necessário o aperfeiçoamento de todas as componentes de um modelo numérico. Nesse sentido, o modelo BRAMS está constantemente em evolução, e a inserção de novas metodologias para melhor representação dos processos físicos associados à atmosfera e suas diversas interações com as superfícies adjacentes é uma rotina comum dentro do Grupo de Modelagem da Atmosfera e Interfaces do CPTEC/INPE. Recentemente, trabalhos vêm sendo realizados com o objetivo de melhor representar os efeitos dos processos associados à CLP (Santos e Silva, 2009a; Santos e Silva et al., 2012), a atualização do modelo de superfície acoplado ao BRAMS (MOREIRA et al., 2013a; MOREIRA, 2013b), mudanças na dinâmica do modelo (FREITAS et al., 2011) e uma nova abordagem para a própria parametrização convectiva do modelo (GRELL; FREITAS, 2013). Esta nova implementação pode ser utilizada em alta resolução, bem como em diferentes resoluções de grade. O esquema, baseado na abordagem estocástica de Grell e Dévényi (2002) considera a difusão da subsidência para os pontos de grade adjacentes. Tal abordagem também se beneficiará do presente trabalho a partir da implementação dos campos de pesos aplicados aos diferentes fechamentos disponíveis no esquema de parametrização. Estes diversos esforços em conjunto contribuem para um modelo numérico mais próximo da realidade, sempre buscando a melhoria do produto final a ser disponibilizado para o usuário.

1.1 Sugestões para trabalhos futuros

Tendo em vista a contínua melhoria do modelo BRAMS a fim de buscar a melhor representação da precipitação sobre a América do Sul, faz-se necessário a realização de trabalhos futuros, principalmente para avaliar o método desenvolvido no presente trabalho para outros períodos aqui não avaliados.

- Avaliar a aplicação da metodologia para outros períodos do ano, como por exemplo, para o período de máxima ocorrência de precipitação na Região Nordeste do Brasil, cuja estação chuvosa ocorre entre fevereiro e maio;
- Em se tratando de poluição do ar, os cumulus atuam transportando contaminantes atmosféricos dentro da CLP para a troposfera livre. Ao mesmo tempo em que contribuem para a redução dos níveis de poluição, favore-

cem o transporte a longas distâncias. Dentro desta aplicação, o presente trabalho também beneficia a modelagem da poluição do ar realizada no CPTEC/INPE utilizando o modelo CATT-BRAMS. Sugere-se a avaliação do impacto da implementação da ponderação dos fechamentos da parametrização de GD no transporte de constituintes químicos de baixos níveis para altos níveis da atmosfera. Também, é importante verificar o efeito reificador do CO₂, abordado no trabalho de [Moreira \(2013b\)](#). O ciclo diurno deste constituinte consiste do acúmulo maior próximo à superfície durante a noite, devido à respiração das plantas, e uma diminuição durante o dia, devido aos processos fotossintéticos ([MOREIRA, 2013b](#)) e também devido ao transporte realizado de baixos para altos níveis devido à convecção. A correta representação da atividade cumulus no horário próximo ao realmente observado contribuirá para a representação mais realista do transporte de CO₂ verticalmente;

- Sugere-se outra abordagem para o processo de treinamento com o intuito de gerar um conjunto de pesos associados ao papel das ondas mistas Rossby-gravidade, as quais sugerem ter forte impacto no desenvolvimento da convecção na costa nordeste da América do Sul e que não é bem representada pelo modelo BRAMS. Assim, a partir da filtragem das ondas mistas Rossby-gravidade, sugere-se realizar uma análise de regressão entre tais ondas e a precipitação estimada pelo TRMM, buscando obter os padrões de precipitação associados às ondas. A partir deste novo campo de precipitação, realizar o treinamento com a utilização do algoritmo *Firefly*, na tentativa de melhorar a ponderação do fluxo de massa de cara fechamento da parametrização convectiva;
- Uma vez implementada operacionalmente, a metodologia desenvolvida poderá ser aplicada aos esquemas de parametrização de convecção de outros modelos numéricos, como o MCGA/CPTEC ([BONATTI, 1996](#); [ARAVÉ-QUIA; QUADRO, 2003](#)) e o modelo regional Eta ([MESINGER et al., 1988](#));
- A aplicação da metodologia para o BRAMS em escala convectiva (5 km), fazendo uso do novo formalismo sugerido por [Grell e Freitas \(2013\)](#);
- Treinamento e validação do algoritmo *Firefly* para a América do Norte, utilizando o modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF), em colaboração com o Dr. Georg Grell, da NOAA;

- Aplicar a função disparo da convecção implementada por Santos e Silva (2009a), Santos e Silva et al. (2012) para identificar o impacto dos fluxos de calor sensível e latente no disparo da atividade convectiva utilizando o fechamento ENCDFY;
- Utilizar a versão com o novo modelo de superfície implementado por Moreira et al. (2013a), Moreira (2013b), com o objetivo de identificar o impacto das mudanças nos processos de interação superfície-atmosfera em conjunto com o novo fechamento ponderado objetivamente;

Sabe-se que a maior incerteza de modelos hidrológicos de previsão de vazões reside na baixa habilidade dos modelos numéricos em prever corretamente a precipitação, variável de estado dos referidos modelos. Os resultados obtidos com a aplicação da técnica para fins de correção de viés contribuirá para a utilização das simulações de precipitação como entrada para modelos hidrológicos de previsão de vazão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAVÉQUIA, J. A.; QUADRO, M. F. L. **Aspectos gerais da previsão numérica de tempo e clima**. São José dos Campos, 2003. INPE-10211-PUD/135.
- BONATTI, J. P. Modelo de circulação geral atmosférico do cptec. In: **Climanálise, Boletim de Monitoramento e Análise Climática**. São José dos Campos: INPE/CPTEC, 1996. Climanálise Especial de 10 anos.
- BONNER, W. D. Climatology of the low level jet. **Monthly Weather Review**, v. 96, n. 12, p. 833–850, 1968.
- CAVALCANTI, I. F. A. **Um estudo sobre interações entre sistemas de circulação de escala sinótica e circulações locais**. 139 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Feb. 1982. INPE-2494-TDL/097.
- CLIMANÁLISE. **Climanálise: Boletim de Monitoramento e Análise Climática**. São José dos Campos, v. 23, n. 1, Jan. 2008.
- COHEN, J. C. P. **Um estudo observacional de Linhas de Instabilidade na Amazônia**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1989.
- COHEN, J. C. P.; CAVALCANTI, I. F. A.; BRAGA, R. H. M.; NETO, L. A. S. Tempo e clima no brasil. In: _____. Cavalcanti, i. f. a and nelson jesus ferreira and maria gertrudes alvarez justisilva and silva dias, m. a. f. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. v. 1, n. 1, cap. Linhas de Instabilidade na Costa N-NE da America do Sul, p. 75–93.
- DIAS, J. F. da S. **Interactions between Large Scale Atmospheric flows and Moist Convection**. Tese (Doctor of Philosophy) — Department of Mathematics, New York University, New York, 2010.
- DIAS, P. L. S.; SCHUBERT, W. H.; DEMARIA, M. Large-scale response of the tropical atmosphere to transient convection. **J. Atmos. Sci.**, v. 40, p. 2689–2707, 1983.
- 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. **J. Adv. Model. Earth Syst.**, v. 3, p. M01001–26pp, 2011.

GRELL, G. A.; DÉVÉNYI, D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. **Geophys. Res. Lett.**, v. 29, p. 38(1)–38(4), 2002.

GRELL, G. A.; FREITAS, S. R. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. **Atmos. Chem. Phys. Discuss.**, v. 13, p. 23845–23893, 2013.

MESINGER, F.; JANJIC, Z. I.; NICKOVIC, S.; GAVRILOV, D.; DEAVEN, D. G. The step-mountain coordinate: model description and performance for cases of alpine lee cyclogenesis and for a case of an appalachian redevelopment. **Monthly Weather Review**, v. 116, p. 1493–1518, 1988.

MOLION, L. C. B.; KOUSKY, V. E. **Climatologia da dinâmica da troposfera tropical sobre a Amazônia**. São José dos Campos, 1985.

MOREIRA, D. S. **Simulação numérica do ciclo do carbono na Amazônia**. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013b.

MOREIRA, D. S.; FREITAS, S. R.; BONATTI, J. P.; MERCADO, L. M.; ROSÁRIO, N. M. E.; LONGO, K. M.; MILLER, J. B.; GLOOR, M.; GATTI, L. V. 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**, v. 6, n. 4, p. 1243–1259, 2013a. Disponível em: <http://www.geosci-model-dev.net/6/1243/2013/>.

RAUPP, C. F.; DIAS, P. L. S.; TABAK, E. G.; MILEWSKI, P. Resonant wave interactions in the equatorial waveguide. **J. Atmos. Sci.**, v. 65, p. 3398–3418, 2008.

_____. The family of anisotropically scaled equatorial waves. **J. Adv. Model Earth Syst.**, v. 3, p. M122002–12pp, 2011.

RICKENBACH, T. M. Nocturnal cloud systems and the diurnal variation of clouds and rainfall in southwestern amazonia. **Mon. Wea. Rev.**, v. 5, p. 1201–1219, 2004.

SALIO, P.; NICOLINI, M.; ZIPSER, E. J. Mesoscale convective systems over southeastern south america and their relationship with the south american low-level jet. **Mon. Weather Rev**, v. 135, p. 1290–1309, 2007.

SANTOS, A. F. d. **Padrões sinóticos de circulação atmosférica associados ao jato em baixos níveis a leste da Cordilheira ds Andes, na América do Sul**. 252 p. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006-06-21 2006. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/07.24.19.18>. Acesso em: 23 jul. 2013.

Santos e Silva, C. M. **Simulando o ciclo diário da precipitação sobre a Bacia Amazônica durante a estação chuvosa**. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009a.

Santos e Silva, C. M.; FREITAS, S. R. de; GIELOW, R. Numerical simulation of the diurnal cycle of rainfall in sw amazon basin during the 1999 rainy season: the role of convective trigger function. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 109, p. 473, 2012.

TULICH, S. N.; KILADIS, G. N. Squall lines and convectively coupled gravity waves in the tropics: why do most cloud systems propagate westward? **J. Atmos. Sci.**, v. 69, p. 2995–3012, 2012.

YANO, J.-I.; BISTER, M.; FUCHS, Z.; GERARD, L.; PHILLIPS, V.; BARKIDIJA, S.; PIRIOU, J.-M. Phenomenology of convection-parameterization closure. **Atmos. Chem. Phys. Discuss.**, v. 12, p. 25743–25789, 2012.

