



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2010/11.24.18.42-TDI

**IMPACTO DO USO DE RADIÂNCIA NA  
ASSIMILAÇÃO DE DADOS USANDO 4D-LETKF NA  
REGIÃO DA AMÉRICA DO SUL**

Maria das Dores da Silva Medeiros

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos Drs. Dirceu Luis Herdies, e José Antônio Aravéquia, aprovada em 06 de dezembro de 2010.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/38LHLTB>>

INPE  
São José dos Campos  
2011

**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:**

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

**Membros:**

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr<sup>a</sup> Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

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

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

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

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

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

**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:**

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2010/11.24.18.42-TDI

**IMPACTO DO USO DE RADIÂNCIA NA  
ASSIMILAÇÃO DE DADOS USANDO 4D-LETKF NA  
REGIÃO DA AMÉRICA DO SUL**

Maria das Dores da Silva Medeiros

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos Drs. Dirceu Luis Herdies, e José Antônio Aravéquia, aprovada em 06 de dezembro de 2010.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/38LHLTB>>

INPE  
São José dos Campos  
2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Medeiros, Maria das Dores da Silva.

M467i Impacto do uso de radiância na assimilação de dados usando 4D-LETKF na região da América do Sul / Maria das Dores da Silva Medeiros. – São José dos Campos : INPE, 2011.  
xxiv+113 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2010/11.24.18.42-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

Orientadores : Drs. Dirceu Luis Herdies, e José Antônio Aravéquia.

1. Assimilação de dados . 2. LETKF. 3.Radiância. 4. Dados de satélite. I.Título.

CDU 551.509.313.1 (8)

---

Copyright © 2011 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 © 2011 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.

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

**Dr. José Paulo Bonatti**



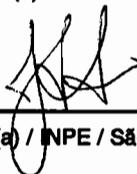
Presidente / INPE / Cachoeira Paulista - SP

**Dr. Dirceu Luis Herdles**



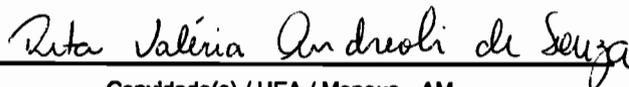
Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

**Dr. José Antônio Aravéquia**



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

**Dra. Rita Valéria Andreoli de Souza**



Convidado(a) / UEA / Manaus - AM

**Aluno (a): Maria das Dores da Silva Medeiros**

**São José dos Campos, 06 de dezembro de 2010**



*“Mestre não é aquele que ensina, mas aquele que, de repente, aprende...”*

*Guimarães Rosa*



*A quem me incentivou e colaborou para que esse sonho se tornasse realidade.*



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus em primeiro lugar por me permitir vencer mais esta etapa.

Na sequência há um grande número de pessoas a quem gostaria de agradecer pelo incentivo, apoio, compreensão, colaboração, motivação, e calorosa atenção que recebi nesta jornada.

Gostaria de agradecer à Risalba, Luziel, Luizinho, Emanuelli, João, Isabel, Ridênia, Felipe, Malu, Lucas e Leandro pelo amor incondicional e pelo apoio em todas as horas.

Gostaria de agradecer à grande amiga Viviane Silva que me motivou e me apoiou para que eu tomasse coragem de começar de novo.

Aos Mestres, Modesto, Sobrinho, e Cacilda que me motivaram e colaboraram nos meses que antecederam aos estudos de pós-graduação.

Aos amigos Rita, Segun, Zélia, Alessandra Adélia, amigos que me ajudaram e que estão sempre dispostos a me ajudar.

À Dra. Solange Souza, por toda colaboração, esclarecimentos e sugestões apresentadas, e também a todo Grupo de Assimilação de Dados (GDAD) do CPTEC.

Ao Paulo Kubota e Mônica Damião, pela colaboração e conhecimento compartilhados.

Aos colegas e amigos do INPE, pelo companheirismo, pela colaboração, pelo conhecimento compartilhado, pela amizade, e também pelos momentos de diversão. Em especial a Caroline Mourão, Gabriel, Carol Vidal, Isabel Porto,

Isabel Pilotto, Renata, Naiane, Daiana, Henri, Carlos Frederico, Ana Lia e muitos outros.

Ao professores Dr. José Antonio Aravéquia e Dr. Dirceu Luis Herdies, pela orientação, amizade e grande apoio na realização deste trabalho.

Às secretárias da Pós-Graduação em Meteorologia (PGMET), por toda a atenção dispensada.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, pela oportunidade de realização deste curso.

Ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações.

Aos membros da banca examinadora, pelas sugestões e comentários apresentados.

Enfim, a todos aqueles que de alguma forma participaram desta etapa da minha vida.

Muito Obrigada!

## RESUMO

O presente trabalho avalia o desempenho do novo sistema 4D-LETKF na assimilação de dados convencionais e dados de radiância de satélite. A assimilação é feita com 4D-LETKF acoplado ao Modelo Global do CPTEC, na resolução T126L28. Os dados de radiância assimilados foram obtidos através do sensor *Advanced Microwave Sounding Unit A* (AMSU-A) a bordo do satélite AQUA. A área de estudo compreende a América do Sul e o período estudado foi de 1 a 30 de junho de 2008. Foram realizados dois tipos de experimentos com o sistema 4D-LETKF/MCGA-CPTEC: o primeiro com assimilação somente de dados convencionais, e o segundo com assimilação de dados convencionais e dados de radiância do sensor AMSU-A. O principal objetivo dos experimentos é determinar o impacto da assimilação com a inclusão de radiância no sistema 4D-LETKF/MCGA. A partir das análises do 4D-LETKF/MCGA foram geradas 48 horas de previsões usando o modelo MCGA/CPTEC. A verificação das análises e previsões é feita usando as análises de alta resolução do NCEP como verdade para o estado da atmosfera. Adicionalmente, foi feita outra verificação, desta vez usando como verdade para o estado da atmosfera, as radiossondagens coletadas durante o Experimento Mini-BARCA/LBA. As análises e previsões usando o 4D-LETKF/MCGA-CPTEC são também comparadas ao sistema de assimilação GPSAS, operacional do CPTEC, cuja resolução é T213L42. Os resultados usando o 4D-LETKF/MCGA-CPTEC foram satisfatórios quando comparados às análises do NCEP. A assimilação de observações de radiância pelo sistema apresentou um ganho com redução dos erros não somente para as análises de temperatura, mas também para as análises das componentes horizontais do vento, principalmente a componente zonal. A redução dos erros também foi verificada para as previsões com redução dos erros para a temperatura e componente zonal do vento. As análises do 4D-LETKF/MCGA apresentaram erros menores que as análises do GPSAS para a variável vento em todos os níveis avaliados, apesar da menor resolução espacial do 4D-LETKF/MCGA em comparação ao GPSAS. Para a variável temperatura, os erros do experimento com assimilação de radiância foram menores que os erros do GPSAS em praticamente todos os níveis. Com relação à avaliação da temperatura usando as radiossondagem do Mini-BARCA, tanto as análises quanto as previsões do sistema 4D-LETKF/MCGA apresentaram concordância com os dados observados para as estações meteorológicas e período estudados.



# **IMPACT OF THE SATELLITE RADIANCE ASSIMILATION USING 4D-LETKF SYSTEM IN THE REGION OF SOUTH AMERICA**

## **ABSTRACT**

This study evaluates the performance of a new data assimilation system using the Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF) with the Atmospheric General Circulation Model (AGCM) of the CPTEC. This new data assimilation system has been assessed using data from NCEP analysis. Two types of experiments were performed with the system 4D-LETKF/MCGA-CPTEC: the first with only conventional data assimilation, and the second with conventional and data assimilation of radiance data from the AMSU-A sensor. The main objective of the experiments is to determine the impact of assimilation with the inclusion of radiation in the system 4D-LETKF/MCGA. Analysis of 4D-LETKF/MCGA were generated 48 hours of forecasts using the model AGCM/CPTEC. The verification of the analysis and forecasts are made using analysis of high resolution NCEP as true for the state of the atmosphere. Additionally, another evaluation was made, this time using as true for the state of the atmosphere, the rawinsonde data collected during the Experiment Mini-BARCA/LBA. Analyses and forecasts using 4D-LETKF/MCGA-CPTEC are also compared to the assimilation system GPSAS, operational CPTEC, whose resolution is T213L42. The results using the 4D-LETKF/MCGA-CPTEC were satisfactory when compared to the NCEP analysis. The radiance assimilation by the system showed a gain to reduce errors not only for the analysis of temperature, but also for analysis of horizontal wind components, mainly zonal. The reduction of errors was also verified the forecasts with error reduction for the temperature and zonal wind. Analyses of 4D-LETKF/MCGA had errors smaller than GPSAS analysis for variable wind at all levels assessed, despite the lower spatial resolution compared to 4D-LETKF/MCGA assimilation system. For the temperature, the errors of the experiment with assimilation of radiance were smaller than the errors of the assimilation system in most part of the levels. Regarding the assessment of the rawinsonde temperature using the Mini-BARCA, both analysis and forecast system 4D-LETKF/MCGA agreed with the observed data.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Ilustração com as diferentes regiões e sistemas atmosféricos da América do Sul. ....	16
Figura 2.2 - Recorte de imagem do satélite GOES-10, no canal infravermelho, mostrando a configuração de uma Linha de Instabilidade em 12/06/08 às 21:00 TMG. ....	18
Figura 3.1 - Distribuição espacial típica das observações de radiância do AMSU-A para os horários das 06 Z em (a) e 12 Z em (b), em 23 de junho de 2008. ....	22
Figura 3.2 - Distribuição espacial das estações meteorológicas do Experimento Mini-BARCA/LBA onde foram realizadas duas sondagens extras. Estações de Manaus (MN), Tabatinga (TB), Rio Branco (RB), Belém (BL) e Carolina (CR). ....	24
Figura 4.1 - Esquema mostrando que o 4D-LETKF encontra a combinação linear do conjunto de previsões que melhor se ajusta às observações durante a janela de assimilação $t_{n-1}$ até $t_n$ . ....	26
Figura 4.2 - Diagrama do sistema de assimilação 4D-LETKF. ....	28
Figura 4.3 - Diagrama das Funções Peso do sensor AMSU-A. ....	29
Figura 5.1 - Diferença entre o REQM da variável Temperatura (K) do ar entre o experimento LETKF_rad e o experimento LETKF_conv, para Análises em (a), (b) e (c) e 48 horas de Previsões em (d), (e), (f), para os níveis 250hPa, 500hPa e 850hPa, respectivamente. Os valores representam a média para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários 00, 06, 12 e 18Z, para as Análises; e média para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários 00 e 12Z, para Previsões. Diferença negativa mostra vantagem da inclusão dos dados de radiância. ....	45
Figura 5.2 - Secção transversal vertical média longitudinal na América do Sul do REQM da variável Temperatura (K) do ar do LETKF_rad menos REQM do LETKF_conv, média para o período de 06 a 30 de junho de 2008 para as Análises nos horários das 00Z, 06Z, 12Z e 18Z em (a), e média para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008 para 48 horas de Previsões nos horários das 00Z e 12Z em (b). ....	47
Figura 5.3 - Secção transversal vertical média longitudinal na América do Sul do REQM da variável Temperatura (K) do ar do LETKF_rad menos REQM do LETKF_conv, média para o período de 06 a 30 de junho de 2008 para as Análises nos horários das 00Z e 12Z em (a), e para os horários das 06Z e 18Z em (b). ....	47
Figura 5.4 - Diferença entre o REQM da variável umidade específica (g/kg) entre o experimento LETKF_rad e o experimento LETKF_conv, para Análises em (a) e 48 horas de Previsões em (b), para o nível 850hPa, respectivamente. Os valores representam a média para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários 00, 06, 12 e 18Z,	

	para as Análises; e média para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários 00 e 12Z, para Previsões. Diferença negativa mostra vantagem da inclusão dos dados de radiância. ....	49
Figura 5.5	- Secção transversal vertical média longitudinal na América do Sul do REQM da variável umidade específica (g/kg) do LETKF_rad menos REQM do LETKF_conv, média para o período de 06 a 30 de junho de 2008 para as Análises nos horários das 00Z e 12Z em (a), e para os horários das 06Z e 18Z em (b). ....	49
Figura 5.6	- Diferença entre o REQM da componente zonal do vento (m/s) entre o experimento LETKF_rad e o experimento LETKF_conv, para Análises em (a), (b) e (c) e 48 horas de Previsões em (d), (e), (f), para os níveis 250hPa, 500hPa e 850hPa, respectivamente. Os valores representam a média para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários 00, 06, 12 e 18Z, para as Análises; e média para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários 00 e 12Z, para Previsões. Diferença negativa mostra vantagem da inclusão dos dados de radiância. ....	52
Figura 5.7	- Secção transversal vertical média longitudinal na América do Sul do REQM da componente zonal do vento (m/s) do LETKF_rad menos REQM do LETKF_conv, média para o período de 06 a 30 de junho de 2008 para as Análises nos horários das 00Z, 06Z, 12Z e 18Z em (a), e média para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008 para 48 horas de Previsões nos horários das 00Z e 12Z em (b). ....	53
Figura 5.8	- Secção transversal vertical média longitudinal na América do Sul do REQM da componente zonal do vento (m/s) do LETKF_rad menos REQM do LETKF_conv, média para o período de 06 a 30 de junho de 2008 para as Análises nos horários das 00Z e 12Z em (a), e para os horários das 06Z e 18Z em (b). ....	53
Figura 5.9	- Diferença entre o REQM da componente meridional do vento (m/s) entre o experimento LETKF_rad e o experimento LETKF_conv, para Análises em (a), (b) e (c) e 48 horas de Previsões em (d), (e), (f), para os níveis 250hPa, 500hPa e 850hPa, respectivamente. Os valores representam a média para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários 00, 06, 12 e 18Z, para as Análises; e média para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários 00 e 12Z, para Previsões. Diferença negativa mostra vantagem da inclusão dos dados de radiância. ....	56
Figura 5.10	- Secção transversal vertical média longitudinal na América do Sul do REQM da componente meridional do vento (m/s) do LETKF_rad menos REQM do LETKF_conv, média para o período de 06 a 30 de junho de 2008 para as Análises nos horários das 00Z, 06Z, 12Z e 18Z em (a), e média para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008 para 48 horas de Previsões nos horários das 00Z e 12Z em (b). ....	57

Figura 5.11 - Secção transversal vertical média longitudinal na América do Sul do REQM da componente meridional do vento (m/s) do LETKF_rad menos REQM do LETKF_conv, média para o período de 06 a 30 de junho de 2008 para as Análises nos horários das 00Z e 12Z em (a), e para os horários das 06Z e 18Z em (b).....	57
Figura 5.12 - REQM e viés das análises em (a) e (b), e REQM e viés de 48 horas de previsões em (c) e (d), respectivamente, para temperatura (K) do ar, média na América do Sul para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários 00 e 12Z, para as análises, e média para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008 para previsões, horários 00 e 12Z. LETKF_conv na cor azul, LETKF_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde. ....	59
Figura 5.13 - Série temporal do REQM para análises da temperatura (K) do ar, nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), média na América do Sul para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários das 00 e 12Z. LETKF_conv na cor azul, LETKF_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde. ....	61
Figura 5.14 - Série temporal do viés para análises da temperatura (K) do ar, nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), média na América do Sul para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários das 00 e 12Z. LETKF_conv na cor azul, LETKF_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde. ....	62
Figura 5.15 - Série temporal do REQM para 48 horas de previsões da temperatura (K) do ar, nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), média na América do Sul para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários 00 e 12 Z. LETKF_conv na cor azul, LETKF_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde. ....	63
Figura 5.16 - Série temporal do viés para 48 horas de previsões da temperatura (K) do ar, nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), média na América do Sul para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários 00 e 12Z. LETKF_conv na cor azul, LETKF_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde. ....	64
Figura 5.17 - REQM e viés das análises em (a) e (b), e REQM e viés de 48 horas de previsões em (c) e (d), respectivamente, para umidade específica (g/kg), média na América do Sul para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários 00 e 12Z, para as análises, e média para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008 para previsões, horários 00 e 12Z. LETKF_conv na cor azul, LETKF_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde. ....	66
Figura 5.18 - Série temporal do REQM para análises da umidade específica (g/kg), no nível de 850hPa, média na América do Sul para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários das 00 e 12Z. LETKF_conv na cor azul, LETKF_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde.....	68
Figura 5.19 - Série temporal do viés para análises da umidade específica (g/kg), no nível de 850hPa, média na América do Sul para o	

período de 06 a 30 de junho de 2008, horários das 00 e 12Z. LETKF_conv na cor azul, LETKF_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde.....	68
Figura 5.20 - Série temporal do REQM para 48 horas de previsões da umidade específica (g/kg), no nível 850hPa, média na América do Sul para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários 00 e 12Z. LETKF_conv na cor azul, LETKF_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde. ....	69
Figura 5.21 - Série temporal do viés para 48 horas de previsões da umidade específica (g/kg), no nível 850hPa, média na América do Sul para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários 00 e 12Z. LETKF_conv na cor azul, LETKF_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde.....	69
Figura 5.22 - REQM e viés das análises em (a) e (b), e REQM e viés de 48 horas de previsões em (c) e (d), respectivamente, para componente zonal do vento (m/s), média na América do Sul para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários 00 e 12Z, para as análises, e média para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008 para previsões, horários 00 e 12Z. LETKF_conv na cor azul, LETKF_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde.....	72
Figura 5.23 - Série temporal do REQM para análises da componente zonal do vento (m/s), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), média na América do Sul para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários das 00 e 12Z. LETKF_conv na cor azul, LETKF_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde. ....	73
Figura 5.24 - Série temporal do viés para análises da componente zonal do vento (m/s), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), média na América do Sul para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários das 00 e 12Z. LETKF_conv na cor azul, LETKF_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde. ....	74
Figura 5.25 - Série temporal do REQM para 48 horas de previsões da componente zonal do vento (m/s), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), média na América do Sul para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários 00 e 12 Z. LETKF_conv na cor azul, LETKF_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde. ....	75
Figura 5.26 - Série temporal do viés para 48 horas de previsões da componente zonal do vento (m/s), no nível 850hPa, média na América do Sul para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários 00 e 12Z. LETKF_conv na cor azul, LETKF_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde. ....	76
Figura 5.27 - REQM e viés das análises em (a) e (b), e REQM e viés de 48 horas de previsões em (c) e (d), respectivamente, para componente meridional do vento (m/s), média na América do Sul para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários 00 e 12Z, para as análises, e média para o período de 08 de junho a 02 de	

	julho de 2008 para previsões, horários 00 e 12Z. LETKF_conv na cor azul, LETKF_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde. ....	78
Figura 5.28	- Série temporal do REQM para análises da componente meridional do vento (m/s), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), média na América do Sul para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários das 00 e 12Z. LETKF_conv na cor azul, LETKF_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde. ....	79
Figura 5.29	- Série temporal do viés para análises da componente meridional do vento (m/s), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), média na América do Sul para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários das 00 e 12Z. LETKF_conv na cor azul, LETKF_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde. ....	80
Figura 5.30	- Série temporal do REQM para 48 horas de previsões da componente meridional do vento (m/s), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), média na América do Sul para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários 00 e 12 Z. LETKF_conv na cor azul, LETKF_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde. ....	81
Figura 5.31	- Série temporal do viés para 48 horas de previsões da componente meridional do vento (m/s), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), média na América do Sul para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários 00 e 12 Z. LETKF_conv na cor azul, LETKF_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde. ....	82
Figura 6.1	- Série temporal da variável temperatura do ar (°C), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), para análises do 4D-LETKF, análises do GPSAS e radiossondagens próximas a estação meteorológica de Carolina (CR), para o período de 06 até 30 de junho de 2008. ....	86
Figura 6.2	- Série temporal da variável temperatura do ar (°C), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), para análises do 4D-LETKF, análises do GPSAS e radiossondagens próximas a estação meteorológica de Rio Branco (RB), para o período de 06 até 30 de junho de 2008. ....	87
Figura 6.3	- Série temporal da variável temperatura do ar (°C), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), para análises do 4D-LETKF, análises do GPSAS e radiossondagens próximas a estação meteorológica de Tabatinga (TB), para o período de 06 até 30 de junho de 2008. ....	88
Figura 6.4	- Série temporal da variável temperatura do ar (°C), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), para análises do 4D-LETKF, análises do GPSAS e radiossondagens próximas a estação meteorológica de Belém (BL), para o período de 06 até 30 de junho de 2008. ....	89
Figura 6.5	- Série temporal da variável temperatura do ar (°C), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), para análises do 4D-LETKF,	

análises do GPSAS e radiossondagens próximas a estação meteorológica de Manaus (AM), para o período de 06 até 30 de junho de 2008.....	90
Figura 6.6 - Série temporal da variável temperatura do ar (°C), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), para 48 horas de previsões do MCGA/4D-LETKF, previsões do GPSAS, e radiossondagens da estação de Carolina (CR), no período de 09 até 30 de junho de 2008. ....	91
Figura 6.7 - Série temporal da variável temperatura do ar (°C), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), para 48 horas de previsões do MCGA/4D-LETKF, previsões do GPSAS, e radiossondagens próximas a estação de Rio Branco (RB), no período de 09 até 30 de junho de 2008.....	92
Figura 6.8 - Série temporal da variável temperatura do ar (°C), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), para 48 horas de previsões do MCGA/4D-LETKF, previsões do GPSAS, e radiossondagens próximas a estação de Tabatinga (TB), no período de 09 até 30 de junho de 2008.....	93
Figura C.1 – Recorte de imagem com realce do satélite GOES-10, com destaque para a região que compreende a estação de Carolina-MA, onde se observa a dissipação de nebulosidade, entre os dias 10, 11 e 12 de junho de 2008 as 00 (esquerda) 12 (direita) Z.....	111
Figura C.2 – Recorte de imagem com realce do satélite GOES-10, com destaque para a região que compreende a estação de Carolina-MA, onde se observa a dissipação de nebulosidade, entre os dias 14, 15 e 16 de junho de 2008 as 00 (esquerda) 12 (direita) Z.....	112

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

AIRS	Atmospheric Infrared Sounder
AMSU-A	Advanced Microwave Sounding Unit Version A
ATOVS	Advanced Tiros Operational Vertical Sounder
BARCA	Balço Atmosférico Regional do Carbono na Amazônia
CI	Condição Inicial
CINDACTA	Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
COLA	Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CRTM	Community Radiative Transfer Model
CTW	Cloud Track Wind
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EnKF	Ensemble Kalman Filter
ESA	Agência Espacial Européia
EOS	Earth Observing System
EUMETSAT	Organização Européia de Satélites Meteorológicos
GPS	Global Navigation System
GPSAS	Global Physical-space Statistical Analysis System
HIRS	High Resolution Infra Red Radiation Sounder
HSB	Humidity Sounder for Brazil
HS	Hemisfério Sul
IASI	Infrared Atmospheric Sounding Interferometer
JCSDA	Joint Center for Satellite Data Assimilation/National Oceanic

	Atmospheric Administration
LBA	Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia
LIA	Linhas de Instabilidade que ocorrem na Amazônia
LEKF	Local Ensemble Kalman Filter
LETKF	Local Ensemble Transform Kalman Filter
4D-LETKF	Versão quadridimensional do LETKF
METOP	Meteorological Operational Satellite Programme
MCGA	Modelo de Circulação Geral Atmosférico
MTR	Modelo de Transferência Radiativa
MRF	Medium Range Forecasting Model
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
Operador-H	Operador observação
PNT	Previsão Numérica de Tempo
PSAS	Physical-space Statistical Analysis System
REQM	Raiz do Erro Quadrático Médio
RPSAS	Regional Physical-space Statistical Analysis System
TIROS	Television infrared Observation Satellite
TOVS	Television Infrared Observation Satellite (TIROS) Operational Vertical Sounder
UMD	Universidade de Maryland
VAD	Vertical Azimuth Display
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....1</b>
1.1.	Objetivo .....4
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....7</b>
2.1.	Dados de satélites .....7
2.2.	Assimilação de dados usando EnKF .....12
2.2.1.	Filtro de Kalman Local por Conjunto - LEKF .....13
2.2.2.	Transformada do Filtro de Kalman por Conjunto - ETKF .....13
2.2.3.	Transformada do Filtro de Kalman Local por Conjunto - LETKF .....13
2.3.	Região de estudo .....15
<b>3</b>	<b>DADOS .....21</b>
3.1.	Observações Meteorológicas Convencionais .....21
3.2.	Observações de Radiância do AMSU-A .....21
3.3.	Observações de Radiossondagens do Mini-BARCA/LBA .....23
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....25</b>
4.1.	O sistema 4D-LETKF .....25
4.2.	Componentes do sistema 4D-LETKF/MCGA .....26
4.2.1.	O Modelo de Circulação Geral Atmosférico - MCGA .....29
4.2.2.	O Modelo de Transferência Radiativa - CRTM .....30
4.3.	Descrição do procedimento de assimilação pelo 4D-LETKF .....32
4.3.1.	Assimilação de observações convencionais .....33
4.3.2.	Assimilação de observações de radiância .....36
4.4.	Descrição dos Experimentos .....39
4.5.	Avaliação dos Resultados .....40
<b>5</b>	<b>IMPACTO DA ASSIMILAÇÃO DE RADIÂNCIA .....43</b>
5.1.	Impacto no 4D-LETKF/MCGA .....43
5.1.1	Temperatura .....43
5.1.2.	Umidade específica .....48
5.1.3	Componente zonal do vento .....50
5.1.4	Componente meridional do vento .....51
5.2.	4D-LETKF x GPSAS .....54
5.2.1	Temperatura .....55
5.2.2	Umidade específica .....65

5.2.3.	Componente zonal do vento.....	70
5.2.4.	Componente meridional do vento.....	77
<b>6</b>	<b>AVALIAÇÃO DURANTE O EXPERIMENTO DE CAMPO Mini-BARCA.....</b>	<b>83</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>95</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>99</b>
	<b>APÊNDICE A - Modelo de Circulação Geral Atmosférico do CPTEC.....</b>	<b>107</b>
	<b>APÊNDICE B - Parâmetros de localização usados no 4D-LETKF .....</b>	<b>109</b>
	<b>APÊNDICE C - Imagens de Satélites.....</b>	<b>111</b>
	<b>APÊNDICE D - Global Physical-space Statistical Assimilation System .....</b>	<b>113</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Assimilação de dados é uma técnica através da qual dados observacionais são combinados com previsões (de curto prazo) de um modelo numérico para produzir uma representação “ótima” do estado da atmosfera. A assimilação, portanto, combina o estado da atmosfera anteriormente previsto (por uma previsão de curto prazo normalmente de 6 horas, conhecida como *first guess*) com dados observacionais recentes, para produzir um estado atmosférico estimado e atualizado (análise) e que pode ser usado como condição inicial a partir da qual se gera uma nova previsão (KALNAY, 2003). Para Lorenc (1986) a determinação da condição inicial é um dos maiores e mais importantes problemas associados à Previsão Numérica de Tempo (PNT).

O avanço na qualidade das previsões numéricas e na caracterização física e dinâmica dos fenômenos de tempo está ligado em grande parte à capacidade do sistema de assimilação em determinar o estado da atmosfera no instante inicial. Entretanto, como grande parte do domínio dos modelos de PNT não é coberta por observações convencionais, a inclusão de medidas de satélite se torna essencial. As observações provenientes de satélite, que foram durante algum tempo o principal contribuinte de informações sobre o Hemisfério Sul, devido à escassez de dados convencionais nessa região, são consideradas atualmente como fonte primária de informações para modelos de PNT para todo o globo (ZAPOTOCNY *et al.*; 2005). Este fato está relacionado à melhoria dos produtos de satélite, associada aos avanços nos instrumentos e nos sistemas de pré-processamento, bem como ao crescente desenvolvimento e aperfeiçoamento dos sistemas de assimilação de dados.

Em particular no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), vários avanços foram realizados no que diz respeito à inclusão de novas observações no sistema de assimilação de dados, principalmente, àquelas relacionadas às informações estimadas por satélites (CINTRA *et al.*, 2005;

SAPUCCI *et al.* 2006; FERREIRA e ARAVÉQUIA, 2006; ANDREOLI *et al.*, 2008). Dentre esses estudos, Andreoli *et al.*, 2008 mostraram que a inclusão dos perfis atmosféricos inferidos pelo sistema de sondagem do satélite AQUA, composto pelos sensores *Atmospheric Infrared Sounder* e *Advanced Microwave Sounding Unit* (AIRS/AMSU), no sistema de assimilação/previsão aponta para uma melhora tanto nos campos de análises quanto nos de previsões, principalmente, em regiões onde o número de observações convencionais é baixo. Este resultado indicou o considerável potencial das sondagens AIRS/AMSU para melhorar a qualidade das análises e previsões de tempo de médio prazo geradas no CPTEC.

Todavia, os satélites não medem as variáveis de estado dos modelos, mas sim radiância. A assimilação de radiância pode ser feita de duas formas (JOINER e DA SILVA, 1998): uma que assimila os perfis atmosféricos estimados (inferidos) pelo processo de recuperação (*retrieval*), e a outra que envolve a assimilação direta. Na assimilação direta é necessário extrair a informação útil das medidas de satélite expressando o estado do modelo nos termos de radiância e para isso faz-se necessário o uso de um modelo de transferência radiativa no sistema de assimilação de dados.

Embora nos últimos anos um progresso considerável na recuperação de perfis atmosféricos obtidos a partir de dados de satélites tenha sido alcançado, foi a assimilação direta de radiância que representou um imenso avanço na assimilação de dados tanto no hemisfério norte quanto no hemisfério sul (KALNAY, 2003). Contudo, nem todos os sistemas de assimilação estão preparados para assimilar diretamente radiância, a exemplo do sistema *Physical-space Statistical Assimilation System* (PSAS) do CPTEC, em operação tanto para o modelo de previsão de tempo regional (chamado RPSAS) quanto para o modelo global (chamado GPSAS).

Um sistema com o qual é possível assimilar perfis recuperados, assim como assimilar as radiâncias de forma direta é o “Transformada do Filtro de Kalman Local por Conjunto”, conhecido pela sigla LETKF, do inglês *Local Ensemble Transform Kalman Filter*. O LETKF é um método avançado de assimilação de dados desenvolvido pelo grupo *Weather and Chaos* da Universidade de Maryland (UMD) nos Estados Unidos. O sistema incorpora previsão por conjunto e assimilação de dados através do uso de Filtro de Kalman. O LETKF resolve a análise localmente em cada ponto de grade do modelo, reduzindo assim a dimensão do problema e tornando o método viável para implementação operacional.

De acordo com Herdies *et al.* (2007), em meados de 2004, o CPTEC firmou um acordo de colaboração com o grupo de modelagem atmosférica da UMD, para desenvolvimento conjunto do seu novo sistema de assimilação de dados: o LETKF, que será o sistema operacional do CPTEC, e substituirá o PSAS. Uma das principais vantagens do LETKF quando comparado ao PSAS é a possibilidade da assimilação direta de radiância. Uma das principais metas do Grupo de Assimilação de Dados do CPTEC, segundo Herdies *et al.* (2007), é a de utilizar o LETKF em modo mais amplo, ou seja, utilizar o mesmo sistema para a assimilação de dados atmosféricos, oceânicos e de superfície, para os diversos modelos em operação no CPTEC.

Nesse contexto, este trabalho estuda o impacto da assimilação direta de radiância de satélite do sensor AMSU-A no sistema de assimilação de última geração 4D-LETKF (versão quadridimensional), a ser o sistema operacional do CPTEC. O 4D-LETKF foi executado em conjunto com o Modelo de Circulação Geral Atmosférico (MCGA) do CPTEC.

A área de estudo escolhida compreende a América do Sul (seção 2.4), pois além de ser uma região com baixa densidade de dados convencionais, é também uma região de interesse para o CPTEC. A escolha dessa região

possibilitou também o estudo na área que compreende a Amazônia Legal, onde foi possível fazer uma validação dos dados. A validação dos dados foi feita com radiossondagens do Experimento Mini-BARCA/LBA (seção 3.3) ocorrido em junho de 2008. O período de estudo foi definido como sendo o mesmo do Experimento Mini-BARCA.

Adicionalmente ao estudo da inclusão de radiância no 4D-LETKF/MCGA, fez-se uma comparação das análises e previsões obtidas a partir desse sistema com análises e previsões do GPSAS, disponibilizadas pelo CPTEC. Essa comparação possibilitou verificar o desempenho do 4D-LETKF/MCGA em relação ao sistema operacional do CPTEC.

### **1.1. Objetivo**

O objetivo principal deste trabalho é estudar o impacto da assimilação direta de radiância no sistema de assimilação/previsão 4D-LETKF/MCGA (resolução T126L28), no ambiente pré-operacional do CPTEC, na região da América do Sul, para a melhor especificação da análise com relação às observações. Espera-se com isso produzir condições iniciais mais próximas das observações e assim melhorar a previsão de tempo. Além disso, faz-se uma comparação entre o novo sistema de assimilação do CPTEC e o sistema atualmente em operação.

Desta forma, os objetivos específicos deste estudo são:

- 1) Avaliar o impacto da assimilação direta de radiância no 4D-LETKF/MCGA, buscando verificar de que forma a inclusão desses dados interferem na qualidade das análises e das previsões;

- 2) Comparar análises e previsões obtidas através do sistema 4D-LETKF/MCGA com análises e previsões do GPSAS disponibilizadas pelo CPTEC;
- 3) Avaliar os resultados em comparação com observações de radiossondagens do Experimento Mini-BARCA/LBA.

A Revisão Bibliográfica sobre o tema é apresentada no Capítulo 2. O conjunto de dados usado neste estudo é descrito no Capítulo 3. A metodologia para configurar e executar os experimentos, bem como avaliar os resultados é apresentada no Capítulo 4. Resultados são descritos e discutidos nos Capítulos 5 e 6, e finalmente, as Conclusões e sugestões de trabalhos futuros encontram-se no Capítulo 7.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma breve Revisão Bibliográfica sobre o uso das medidas de satélites, tanto de perfis recuperados quanto de radiância, na assimilação de dados, em particular usando o sistema LETKF. Apresenta-se também uma revisão sobre o uso de Filtros de Kalman por Conjunto, e uma descrição da área de estudo.

### 2.1. Dados de satélites

As observações de satélites são consideradas atualmente como fonte primária de informações para modelos de PNT para todo o globo. (ZAPOTOCNY *et al.*, 2005). Pelo menos duas questões estão relacionadas a esse fato: uma primeira diz respeito à melhoria dos produtos de satélites, associada aos avanços nos instrumentos e nos sistemas de pré-processamento. A exemplo, pode-se citar satélites como o AQUA e o MeTOP que levam a bordo sensores de alta resolução espectral com milhares de canais. Esses sensores disponibilizam perfis de temperatura e umidade com uma alta precisão.

O satélite americano AQUA do projeto EOS (*Earth Observing System*) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), lançado em 2002, conta com um sistema de sondagem avançado (Aumann *et al.*, 2003), composto pelos sensores *Atmospheric Infrared Sounder* (AIRS) e *Advanced Microwave Sounding Unit* (AMSU). O AQUA incorpora os avanços dos sensores AMSU do NOAA além dos avanços providos pelo AIRS com relação ao *High Resolution Infrared Radiation Sounder* (HIRS), que dispõe de apenas 20 canais no infravermelho. Com 2.378 canais do sondador AIRS tem-se um aumento significativo na quantidade de informação sobre a atmosfera.

A bordo do satélite MeTOP, desenvolvido no âmbito de um programa conjunto entre a Agência Espacial Européia (ESA) e a Organização Européia de

Satélites Meteorológicos (EUMESAT), lançado em 2006, encontra-se o *Infrared Atmospheric Sounding Interferometer* (IASI), um sensor com alta resolução espectral no infravermelho que possui 8.461 canais espectrais. O IASI fornece dados para meteorologia operacional e organizações de pesquisa atmosférica, que são usados para recuperar perfis verticais de temperatura e umidade da mais alta qualidade do que aqueles atualmente obtidos pelos sondadores *TIROS Operational Vertical Sounder* (TOVS). O IASI foi projetado para medir o espectro da atmosfera no infravermelho e com alto nível de acurácia. (CNES, 2009).

Uma segunda questão relacionada ao uso de dados de satélites como fonte primária de informações para modelos de PNT é o crescente desenvolvimento e aperfeiçoamento dos sistemas de assimilação de dados. Conforme comentado anteriormente, dentro do processo de assimilação, o uso de dados de satélites pode ser realizado de duas maneiras: uma que assimila os perfis atmosféricos estimados pelo processo de recuperação (*retrievals*), e outra que envolve a assimilação direta de radiância.

Os perfis atmosféricos estimados pelo processo de recuperação são baseados em radiâncias emergentes provenientes da superfície e da atmosfera que atingem os sensores a bordo do satélite. As variáveis a serem determinadas são obtidas a partir de métodos de inversão da Equação de Transferência Radiativa (ETR). Nesse caso, os valores dos perfis de temperatura e umidade, por exemplo, não podem ser consideradas medidas, mas sim valores de perfis estimados devido ao método indireto de obtenção.

Nos últimos anos alcançou-se um progresso considerável na recuperação de perfis atmosféricos obtidos a partir de dados de satélites. (SOUZA *et al*, 2006b). A acurácia desses perfis recuperados depende da acurácia das observações, das funções de transmitância atmosférica prescritas, dos algoritmos utilizados em condições atmosféricas com nuvens, e de algoritmos

de inversão. Avaliar o nível de qualidade destes perfis é de grande importância para a PNT, principalmente em regiões com escassez de dados convencionais, como por exemplo, no Hemisfério Sul. Nesse sentido vários estudos vêm sendo feitos com intuito de validar os algoritmos de recuperação e fornecer guias de como atenuar as discrepâncias desses perfis. Alguns desses estudos de avaliação dos perfis recuperados obtidos do satélite AQUA são citados a seguir.

Divakarla *et al.* (2006) avaliaram perfis recuperados de temperatura e umidade obtidos a partir dos sensores AIRS/AMSU, do AQUA, utilizando dados de radiossondagens. Embora o estudo tenha sido feito no globo, a maioria das radiossondagens estavam localizadas principalmente no oeste da Europa e costa oeste dos EUA. Os resultados revelaram que os perfis recuperados apresentaram uma boa concordância quando comparados às radiossondagens, ou seja, erro médio quadrático de 1 K por camadas de 1 km para perfis de temperatura, e 15% por camadas de 2 km para o vapor de água na troposfera.

Souza *et al.* (2006b) compararam sondagens obtidas do sistema AIRS/AMSU (AQUA), na região de Natal-RN, e encontraram valores de erro médio quadrático de 1 K para perfis de temperatura, exceto próximo à superfície e acima de 200 hPa onde houve uma ligeira degradação. Para perfis de umidade, os maiores erros médios quadráticos foram encontrados próximos à superfície, com valores próximos de 1,2 g/kg. Os resultados do estudo mostraram uma boa concordância entre os perfis de temperatura e de umidade, com erros médios quadráticos similares aos encontrados sobre regiões continentais por Divakarla *et al.* (2006).

Souza *et al.* (2006a) compararam sondagens obtidas do sistema AIRS/AMSU (AQUA) para diferentes regiões na América do Sul. As comparações revelaram uma boa concordância entre os perfis de temperatura, com um erro médio

quadrático similar ao encontrado sobre regiões continentais por Fetzer *et al.* (2005). Os maiores erros próximo à superfície revelaram a dificuldade de inferir perfis nessa camada, e podem estar associados à heterogeneidade da superfície. Com relação aos perfis de umidade, verificou-se que o modelo de inversão subestima a umidade e que os erros médios quadráticos encontrados atingiram valores ligeiramente superiores 2 g/kg próximo à superfície.

A assimilação de perfis recuperados é um processo de ajuste no qual as observações dos satélites são usadas para modificar um perfil de estimativa inicial, que pode ser climatologia ou um perfil de previsão de modelo, de tal forma que o perfil ajustado (recuperado) é, dentro da metodologia utilizada, aquele que reflete as radiâncias utilizadas no processo de ajuste (ARAVÉQUIA, comunicação pessoal). Li *et al.* (2007) avaliaram o impacto da adição de perfis recuperados de temperatura do sensor AIRS usando o 4D-LETKF e concluíram que os perfis recuperados tiveram um impacto positivo consistente na análise e previsão, encontrados não somente no campo da temperatura mas igualmente em outras variáveis. O impacto positivo foi maior no Hemisfério Sul mas ainda significativo no Hemisfério Norte. A extensão quadridimensional (4D) permitiu a assimilação de observações de satélite exatamente no horário da observação.

Conforme mencionado anteriormente, as medidas provenientes dos satélites não são as variáveis de estado dos modelos, mas sim radiâncias. As radiâncias são medidas em determinadas bandas espectrais, a partir de detectores independentes genericamente denominados de canais. A radiância medida é relacionada as variáveis atmosféricas geofísicas (temperatura, umidade, ozônio, etc.) através da equação de transferência radiativa. Quando uma onda eletromagnética de radiância percorre a atmosfera terrestre, interage de diversas formas com os constituintes atmosféricos, o que acarreta efeitos de absorção e espalhamento. A equação de transferência radiativa é uma formulação matemática utilizada para contabilizar esses efeitos.

A inclusão de radiâncias num sistema de assimilação de dados resulta em um significativo incremento no volume total de dados, e espera-se com isso uma melhora significativa na qualidade final das análises. Para Kalnay (2003), a assimilação direta de radiância representou um imenso avanço na assimilação de dados tanto no Hemisfério Norte como no Hemisfério Sul.

A assimilação de radiância usando Filtros de Kalman por Conjunto (EnKF) é relativamente um novo campo de estudo (MIYOSHI e SATO, 2007). Uma descrição teórica para o tratamento de um operador observação (Operador-H) não-linear é encontrado em Hunt (2005), por exemplo. Mas um estudo pioneiro na assimilação de dados de radiância de satélite usando Filtros de Kalman por Conjunto com observações perturbadas é encontrado em Houtekamer *et al.* (2005), que assimilou somente canais do AMSU-A .

Resultados iniciais apresentados por Aravéquia (2008), usando 4D-LETKF para assimilar diretamente radiâncias do AIRS, demonstraram que a assimilação dessas medidas diretas tem impacto positivo para previsão sobre a América do Sul. O autor sugere que a utilização de muitos canais e outros sensores pode apresentar um impacto ainda melhor sobre a diminuição dos erros da previsão com o sistema de assimilação LETKF.

Recentemente Aravéquia *et al.* (2009) e Miyoshi e Sato (2007) avaliaram o desempenho do LETKF na assimilação direta de radiâncias empregando técnicas de localização e correção de bias. Os estudos têm objetivo de extrair informações úteis sobre o estado atmosférico, especialmente em regiões onde as observações de satélite são as fontes primárias.

## 2.2. Assimilação de dados usando EnKF

Em 1960 Rudolph E. Kalman publicou seu famoso artigo descrevendo um processo recursivo para solucionar problemas lineares relacionados à filtragem de dados discretos. Tal processo ficou conhecido posteriormente como Filtro de Kalman (KALMAN,1960). O Filtro de Kalman é essencialmente um conjunto de equações matemáticas que constitui um processo recursivo eficiente de estimação, uma vez que o erro quadrático é minimizado. Através da observação de uma variável, outra variável (não observável) pode ser estimada eficientemente. Desde a sua introdução, filtros de Kalman têm sido usados em diversas áreas tais como Engenharia, Estatística, Economia, Navegação, Assimilação de Dados, etc. Na literatura é possível encontrar vasto material sobre o Filtro de Kalman e suas diversas aplicações (KALMAN, 1960; GELB, 1974; MAYBECK, 1979; LEWIS, 1986; JACOBS, 1993; GREWAL e ANDREWS, 2001; WELCH e BISHOP, 2006).

Na área de Assimilação de Dados, Filtros de Kalman usando conjunto - EnKF, do inglês *Ensemble Kalman Filter* (EVENSEN, 1994; HOUTEKAMER e MITCHELL, 1998), estão entre os métodos mais avançados. Recentemente vários grupos de pesquisa vêm projetando EnKF's mais eficientes computacionalmente e testes com observações da atmosfera real tem obtido resultados satisfatórios (HOUTEKAMER *et al.*, 2005; WHITAKER *et al.* 2004, 2008; SZUNYOGH *et al.*, 2008; MIYOSHI e SATO, 2007; MIYOSHI e YAMANE, 2007; TORN e HAKIM, 2008; BONAVITA *et al.*, 2008). Os resultados evidenciam que esses EnKF's mais eficientes computacionalmente podem ser uma alternativa às técnicas variacionais operacionais usadas na PNT.

Neste trabalho usa-se um esquema eficiente de Assimilação de Dados da família dos EnKF's desenvolvido pelo grupo *Weather and Chaos* da Universidade de Maryland (UMD). O algoritmo combina elementos do Filtro de Kalman Local por conjunto - LEKF, do inglês, *Local Ensemble Kalman Filter* e

do Filtro de Kalman Transformado por conjunto - ETKF, do inglês *Ensemble Transform Kalman Filter*.

### **2.2.1. Filtro de Kalman Local por Conjunto - LEKF**

O LEKF (OTT *et al.* 2002, 2004) é um filtro da família dos EnKF's de raiz quadrada. A idéia básica do LEKF é fazer a análise em cada ponto de grade simultaneamente, usando as variáveis do estado do modelo e todas as observações em uma região centrada em cada ponto de grade. Uma vez que separa toda a grade global em trechos locais (do inglês *local patches*) e independentes, o LEKF apresenta a importante vantagem de eficiência na arquitetura computacional massivamente em paralelo.

### **2.2.2. Transformada do Filtro de Kalman por Conjunto - ETKF**

O ETKF (BISHOP *et al.*, 2001), semelhante a outros filtros de Kalman, possui uma estrutura para assimilar observações e também para estimar o efeito das observações sobre a covariância do erro de previsão. Entretanto, difere de outros EnKF's porque usa uma transformação do conjunto e uma normalização para obter rapidamente a matriz de covariância do erro da previsão associada a uma implantação particular dos recursos observacionais.

### **2.2.3. Transformada do Filtro de Kalman Local por Conjunto - LETKF**

Aplicando a abordagem do ETKF no LEKF, Hunt (2005) e Hunt *et al.* (2007) propuseram uma atualização eficiente do LEKF. O método foi chamado de *Local Ensemble Transform Kalman Filter* (HUNT, 2005; HUNT *et al.* 2007) e combina as principais vantagens do ETKF e LEKF. Similar ao ETKF, todos os cálculos das matrizes no LETKF são feitos usando um conjunto de

perturbações do *background* como vetores base e, similar ao LEKF, o LETKF apresenta a importante vantagem de eficiência na arquitetura computacional em paralelo.

O LETKF foi testado usando observações simuladas num cenário de modelo perfeito (HARLIM e HUNT, 2005; LIU *et al.*, 2008) e usando observações reais da atmosfera (LI *et al.*, 2007; MIYOSHI e SATO, 2007; SZUNYOGH *et al.*, 2008; WHITAKER *et al.*, 2008). Harlim e Hunt (2005) obtiveram resultados comparáveis ao LEKF. Liu *et al.* (2008) obtiveram resultados com o LETKF muito melhores que aqueles usando o 3DVAR para um cenário de modelo perfeito. Com dados reais, o LETKF mostrou-se superior em relação ao *Statistical Spectral Interpolation* (SSI) operacional do NCEP (SZUNYOGH *et al.*, 2008) quando aplicado ao modelo GFS do NCEP na resolução T62L28, e verificado em relação as análises do NCEP T254L64 usando todas as observações operacionais disponíveis.

Ao contrário de outros esquemas de raiz quadrada que resolvem as equações do filtro de Kalman no espaço da observação (ANDERSON, 2001; BISHOP *et al.*, 2001), o LETKF resolve as equações localmente no espaço do modelo, desta forma, o LETKF tem a vantagem de poder utilizar computação massivamente em paralelo, além de ser mais eficiente ao assimilar observações de satélites, que podem ser em número muito maior do que o número de graus de liberdade no modelo.

Outra vantagem em relação a muitos esquemas de uso geral, que usam uma matriz de covariância do erro da previsão fixa, é que o LETKF calcula a covariância do erro da previsão usando o conjunto de estados do modelo e atualiza a covariância em cada ciclo de assimilação. Por causa dessa atualização em cada etapa, o LETKF pode representar mais adequadamente os erros do dia, permitindo uma solução mais adequada para cada região. Além da vantagem de assimilar diretamente radiância, o sistema LETKF não

exige o adjunto nem o modelo tangente linear, necessários na assimilação dessas observações no sistema variacional 4DVAR, por exemplo.

A próxima seção faz uma descrição da região e período de estudo deste trabalho.

### **2.3. Região de estudo**

As porções de terras e continentes localizadas no Hemisfério Sul são menores do que as porções de mares e oceanos. Esta situação é contrária ao que ocorre no Hemisfério Norte. Nesta parte, a cobertura de radiossondagens e de equipamentos de monitoramento atmosférico sobre os continentes é muito maior e eficaz. Sobre o Hemisfério Sul, este tipo de situação implica que a proporção de dados de satélites sobre as observações convencionais é muito maior que para o Hemisfério Norte. Portanto espera-se um impacto importante com assimilação de dados de radiância em regiões localizadas nessa área do globo.

A América do Sul está situada entre o Oceano Atlântico e Oceano Pacífico, e meridionalmente entre as latitudes de 10°N e 60°S. Sobre a América do Sul atuam diversos tipos de sistemas atmosféricos, dentre eles, pode-se citar: a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Jatos de Baixos e Altos Níveis, Alta da Bolívia e a Baixa do Chaco. Além disso, massas de ar e frentes atmosféricas entram e saem com frequência do continente. O deserto do Atacama, a cordilheira dos Andes, a floresta Amazônica e o Nordeste brasileiro são exemplos dos diferentes tipos de climas e regiões presentes na América do Sul. A Figura 2.2 ilustra as diferentes regiões e alguns desses sistemas atmosféricos atuantes nessa região. Características desses sistemas são apontadas a seguir.

De acordo com Silva Dias (2006), características básicas da ZCIT incluem a convergência em baixos níveis dos ventos alísios de Nordeste e de Sudeste provocando uma banda de nebulosidade aproximadamente zonal, com chuvas intensas, e com marcante deslocamento sazonal. Com relação às Frentes, o efeito mais marcante desse sistema ocorre na estação seca quando a massa fria na retaguarda da frente pode provocar quedas significativas de temperatura denominadas localmente de friagens. Muitas vezes essas frentes são precedidas por chuvas e associadas a eventos de frio intenso, freqüentemente com geadas, nas regiões sul e sudeste do Brasil. No entanto, durante a estação chuvosa também ocorrem impactos de frentes no sentido de organizar uma banda de precipitação que se estende desde a Amazônia até o Oceano Atlântico Sul. Nas ocasiões, durante a estação chuvosa, em que essa banda fica estacionária por mais de quatro dias, recebe o nome de ZCAS.

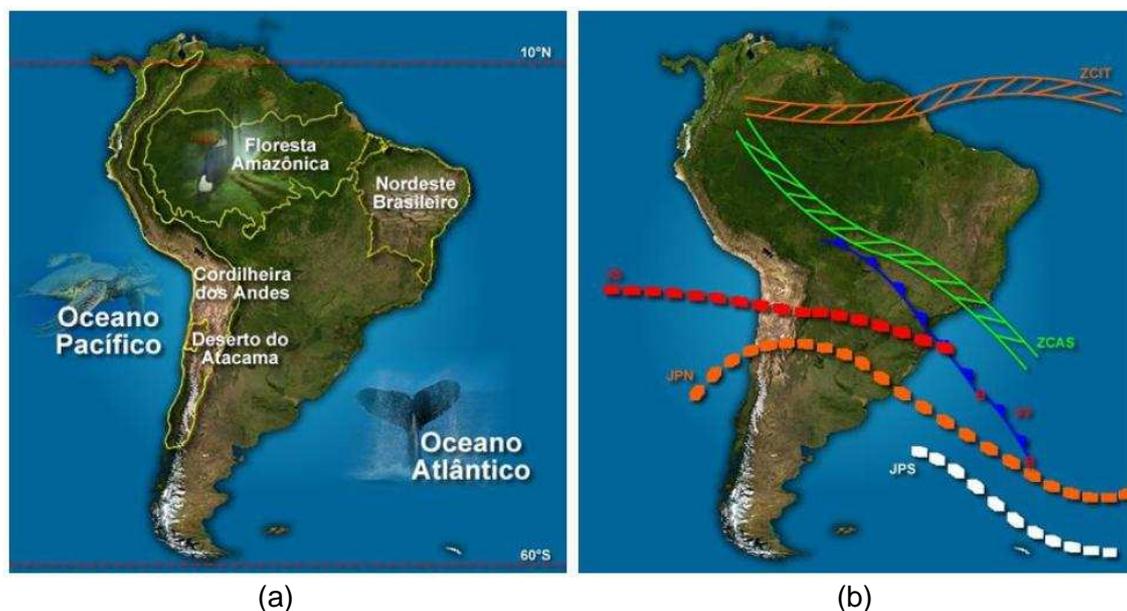


Figura 2.1 - Ilustração com as diferentes regiões e sistemas atmosféricos da América do Sul.

Fonte: Bastarz (2010).

As Linhas de Instabilidade que ocorrem na Amazônia (LIA) são responsáveis pela formação de chuvas próximo à costa litorânea dos estados do Pará e Amapá, bem como de precipitação na Amazônia Central, durante a estação

seca (FISCH *et al.*, 1996). Estudos preliminares (COHEN *et al.*, 1989) mostraram que as LIA são um dos sistemas atmosféricos atuantes na área leste do Pará e que contribuem com 45% da chuva que cai durante o período chuvoso.

De acordo com estudo de Cohen *et al.* (1989), o comprimento e a largura médios das LIA é de aproximadamente 1.500 km e 170 km, respectivamente, sendo que os meses com maior frequência de ocorrência é entre abril e agosto. Devido a suas dimensões as LIA são facilmente observadas nas imagens de satélites.

A Figura 2.2 mostra uma Linha de Instabilidade que se configurou no dia 12 de junho de 2008 que atingiu a região da Amazônia, quando também foi notada uma maior atuação da ZCIT adjacente à costa norte do Brasil e ocorrência de chuva na região. De acordo com Silva Dias (2006), as LIA tem sua organização forçada por um jato de baixos níveis de leste associado a perturbações de baixa troposfera no Atlântico, eventualmente constituídas pelas ondas de leste.

Os jatos de baixos níveis que ocorrem a leste dos Andes funcionam como um modulador do tempo e clima e influenciam no padrão de circulação regional, dessa forma, afetam a chuva e produtividade agrícola na região de saída do jato, no norte da Argentina, Paraguai e sul e sudeste do Brasil.

A América do Sul possui uma característica muito particular de apresentar o desenvolvimento de um anticiclone em altos níveis (200 hPa), durante os meses de verão, associado com a forte convecção da região Amazônica. Este anticiclone foi denominado de Alta da Bolívia, pois se situa sobre a região do altiplano boliviano. Durante a época de inverno, ocorre o enfraquecimento da Alta da Bolívia, com o seu completo desaparecimento. A localização geográfica da Alta da Bolívia possui variação intra-sazonal e inter-anual, associado com a convecção na Amazônia. Essa atividade convectiva associada possui um ciclo

anual de migração SE/NW, partindo da região Amazônica durante o trimestre DJF e deslocando-se até a América Central durante o trimestre JJA. (FISCH *et al.*, 1996).



12/06/08 21:00 TMG

Figura 2.2 - Recorte de imagem do satélite GOES-10, no canal infravermelho, mostrando a configuração de uma Linha de Instabilidade em 12/06/08 às 21:00 TMG.

Fonte: Boletim Climanálise (2008)

Uma vez que será feita uma validação dos resultados desse trabalho na região da Amazônia Legal, com radiossondagens do Experimento Mini-BARCA, descrito no próximo Capítulo, apresenta-se a seguir um resumo dos principais sistemas meteorológicos que atingiram essa região no período de junho de 2008. As informações foram obtidas através do Boletim Climanálise (2008).

Durante junho de 2008, as chuvas foram reduzidas na maior parte do interior do Brasil. Entretanto, no extremo norte da Região Norte do Brasil ocorreram os maiores totais de precipitação associados principalmente à atuação da ZCIT. As massas de ar frio estiveram associadas à ocorrência de dois episódios de friagem, um deles ocorridos no sul da Região Norte.

As chuvas estiveram associadas à formação de Linhas de Instabilidade e à atuação da ZCIT adjacente à costa norte da Região Norte do Brasil, onde se destacou a chuva acumulada em Belém-PA (80,1 mm), no dia 14. O calor e a umidade também proporcionaram a formação de áreas de instabilidade e a ocorrência de chuvas intensas, como as registradas em Manaus-AM nos dias 12 e 27, iguais a 62 mm e 84,8 mm, respectivamente. De modo geral, os totais mensais de precipitação excederam à climatologia apenas no norte da Região Norte, em especial no nordeste do Pará, onde os desvios positivos atingiram 300 mm.

Seis massas de ar frio atuaram no Brasil no decorrer do mês de junho. De modo geral, apresentaram uma trajetória continental causando geadas e declínio acentuado de temperatura, em particular na Região Sul. Neste mês, registraram-se dois episódios de friagem, uma no sul da Região Norte e outra no oeste do Mato Grosso.

Nos dias 16 e 17 de junho, um anticiclone associado a uma massa de ar frio, com trajetória continental atuou nas Regiões Sul, Centro-Oeste, sul da Região Norte e parte da Região Sudeste. Em Vilhena-RO, a temperatura mínima declinou aproximadamente 6 °C, passando de 18,8 °C no dia 16 para 13,1 °C no dia 17, caracterizando o primeiro episódio de friagem. Outra massa de ar frio atuou no oeste da Região Sul no dia 21, deslocando-se, posteriormente, para a Região Centro-Oeste e sul da Região Norte, onde se registrou o segundo episódio de friagem.

A atividade convectiva foi bastante reduzida no interior do Brasil durante o mês de junho. Na 1ª, 2ª e 3ª pênadas, pode-se notar uma maior convecção no norte da Região Norte e próximo à costa norte da Região Nordeste, decorrente principalmente do posicionamento da ZCIT e da formação de aglomerado de nuvens associados à propagação de distúrbios de leste. A ZCIT atuou preferencialmente ao sul de sua posição climatológica no decorrer do mês de

junho, e neste mês, esta configuração da ZCIT pode explicar parte das anomalias positivas de precipitação no extremo norte da Região Norte do Brasil.

Quanto as Linhas de Instabilidade, estas acompanharam o deslocamento meridional da ZCIT, posicionando-se entre as Guianas e o norte do Maranhão durante a primeira quinzena e entre as Guianas e o norte do Pará na segunda quinzena. No total as Linhas de Instabilidade estiveram bem caracterizadas em dezessete episódios. Destacou-se aquela que se configurou no dia 12 (Figura 2.2), quando também foi notada uma maior atuação da ZCIT adjacente à costa norte do Brasil e ocorrência de chuva.

### 3 DADOS

A seguir são descritos os dados usados na assimilação (pelo sistema 4D-LETKF/MCGA), assim como os dados usados para verificação e validação dos resultados das análises e previsões.

#### 3.1. Observações Meteorológicas Convencionais

Os dados convencionais assimilados pelo 4D-LETKF incluem observações de: pressão, temperatura, umidade e ventos de superfície e ar superior. De acordo com Souza *et al.* (2010) essas observações são provenientes de estações de superfície, bóias, navios e plataformas oceânicas, além de radiossondas, aviões e balões piloto. Informações de vento foram obtidas a partir de satélites usando o método *Cloud Track Wind* (CTW) e *Quikscat* sobre os oceanos, e os perfis verticais são obtidos de radares a partir da rede NPN e azimute vertical (*Vertical Azimuth Display* - VAD) de NEXRAD. Antes de utilizadas no sistema de assimilação as observações passaram por um pré-processamento.

#### 3.2. Observações de Radiância do AMSU-A

O sensor *Advanced Microwave Sounding Unit A* (AMSU-A) é um radiômetro de microondas que opera na frequência entre 23 e 89 GHz. Encontra-se a bordo do satélite de órbita quase-polar AQUA da NASA. Tipicamente, uma órbita do satélite AQUA cobre diferentes regiões do globo, os horários das passagens sobre o Brasil são entre 03 - 06Z e entre 15 - 18Z. A Figura 3.1 mostra a distribuição espacial das observações de radiância do AMSU-A, efetivamente assimiladas neste trabalho, nos horários das 06 e 12Z, em 15 de junho de 2008.

As informações descritas a seguir encontram-se no *AMSU Instrument Guide* (NASA, 2010). O sensor AMSU consiste de duas unidades físicas separadas, os sensores AMSU-A1 e AMSU-A2. O sensor fornece medidas que permitem

obter os perfis de temperatura até uma altura de 40 km e tem capacidade de realizar sondagens em condições de nebulosidade. O AMSU-A tem 15 canais, sendo 12 desenvolvidos para sondagem de temperatura e 3 para sondagem do vapor d'água na atmosfera. Os canais 3 a 14 no AMSU-A estão situados na banda de absorção do oxigênio (50-60 GHz) e são utilizados para realizar sondagem atmosférica de temperatura. O canal 1 (localizado numa linha de absorção do vapor d'água, 23,8 GHz) é usado para obter estimativa do total de vapor d'água na coluna atmosférica (água precipitável). O canal 2 (em 31 GHz) é usado para indicar presença de água líquida. O canal 15 (89 GHz) é usado para indicar precipitação, usando o fato de que o gelo dispersa mais a radiação do que absorve ou emite. A dimensão da imagem do sensor AMSU-A varia de um círculo com 13,5 km de diâmetro no nadir (na vertical, abaixo do satélite) para uma elipse de 41,0 por 22,4 km nas extremidades.

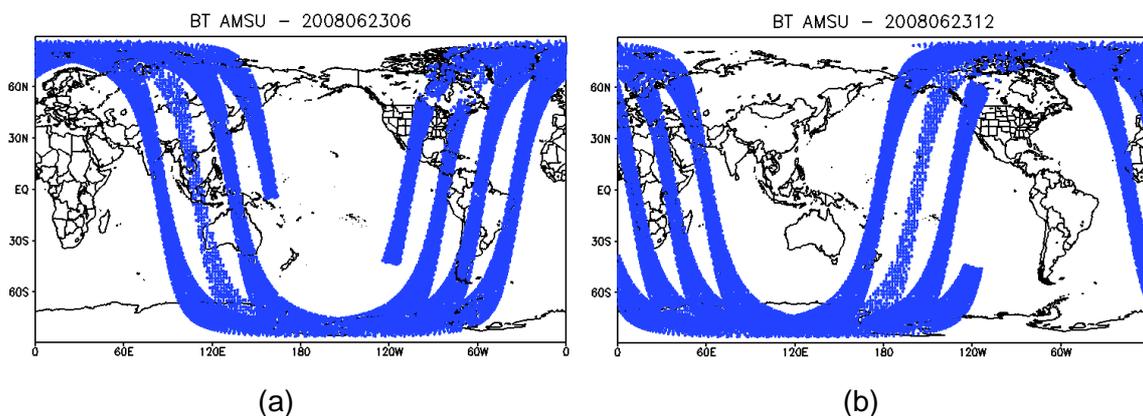


Figura 3.1 - Distribuição espacial típica das observações de radiância do AMSU-A para os horários das 06 Z em (a) e 12 Z em (b), em 23 de junho de 2008.

### **3.3. Observações de Radiossondagens do Mini-BARCA/LBA**

O Experimento BARCA (Balanço Atmosférico Regional do Carbono na Amazônia) faz parte de uma campanha que visa responder a uma das questões científicas do LBA (*Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia*) sobre o funcionamento da Amazônia como uma entidade regional. No período de 09 a 30 de junho de 2008, foi realizado a primeira etapa do Experimento, denominado Mini-BARCA (MASTER/LBA, 2008). O Mini-BARCA contou com a colaboração de várias Instituições de Pesquisa Nacionais (INPE, CTA, UFGA, UFAC, UEA, USP) e Centros Operacionais de Meteorologia (SIPAM, CINDACTA IV, INMET).

Durante o Mini-BARCA foram coletados dados de radiossondagem em 11 estações de ar superior englobando a Amazônia, bem como a aquisição de imagens e produtos de radares meteorológicos. A rede de ar superior do CINDACTA IV (composto de 11 estações de radiossondagem) na Amazônia, aliado a estação de radiossondagem do INMET em Carolina-MA, foi utilizada, com sondagens diárias as 00 e 12Z. Nas seguintes estações foram realizadas 2 sondagens extras (as 06 e 18Z): Manaus-AM, Tabatinga-AM, Rio Branco-AC, Belém-PA e Carolina-MA (Figura 3.2).

No período do Experimento ocorreu muita atividade convectiva na região. De acordo com Silva Dias (2008), em junho, época do ano de final da estação chuvosa na região, foram registrados diversos sistemas convectivos, associados a valores significativos de precipitação superiores 25 mm no acumulado de 24 h, na região de Manaus, em 18/06/08, e no período de 22 a 26/06 ocorreu a passagem de uma friagem na região, com queda de temperatura de até 8 °C no Sul de Rondônia podendo ser observada inclusive até a região de Tabatinga (extremo oeste da Bacia Amazônica), com queda de até 4 °C.



## 4 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia do trabalho. São descritos: o sistema de assimilação, os experimentos realizados, bem como a verificação e validação dos resultados.

### 4.1. O sistema 4D-LETKF

No sistema de assimilação de dados LETKF, as observações são assimiladas para atualizar apenas a média do conjunto, enquanto que as perturbações do conjunto são atualizadas transformando a previsão das perturbações através de uma matriz de transformação, introduzida por Bishop *et al.* (2001). A covariância do erro da análise no espaço do conjunto tem dimensão  $k$  por  $k$ , (neste trabalho  $k=20$  membros), muito menor que a dimensão do modelo e número de observações. Assim, o LETKF executa a inversa da matriz no espaço dos membros do conjunto de previsões, o que reduz significativamente o custo computacional. Além disso, as perturbações do conjunto de previsões são atualizadas a cada passo de tempo da análise, portanto a covariância do erro da previsão é dependente do fluxo.

Na versão tridimensional do LETKF ou 3D-LETKF (KALNAY *et al.*, 2007; HARLIM e HUNT, 2007) as observações assíncronas são comparadas ao *background* válido para o horário da análise. Enquanto que na versão quadrimensional do LETKF, ou 4D-LETKF (KALNAY *et al.*, 2007; HARLIM e HUNT, 2007; HUNT *et al.*, 2007), as observações assíncronas são comparadas com o *background* válido para o horário da observação.

Conforme Hunt *et al.* (2007), para assimilar essas observações, o 4D-LETKF encontra a combinação linear das trajetórias do conjunto de previsões que melhor se ajuste às observações, feitas dentro da janela da assimilação entre os tempos de análise. A Figura 4.1 ilustra como isso pode ser feito. Essa

característica do 4D-LETKF é importante para assimilação de dados de satélite, como radiância por exemplo, que estão disponíveis em intervalos muito mais frequentes que informações convencionais. O algoritmo do 3D-LETKF é o mesmo para o 4D-LETKF, a diferença é que na versão 4D as observações são feitas no intervalo que inclui o tempo da análise e o operador-H (operador observação) é avaliado no tempo da observação. A versão usada para assimilação dos dados neste trabalho foi a 4D-LETKF.

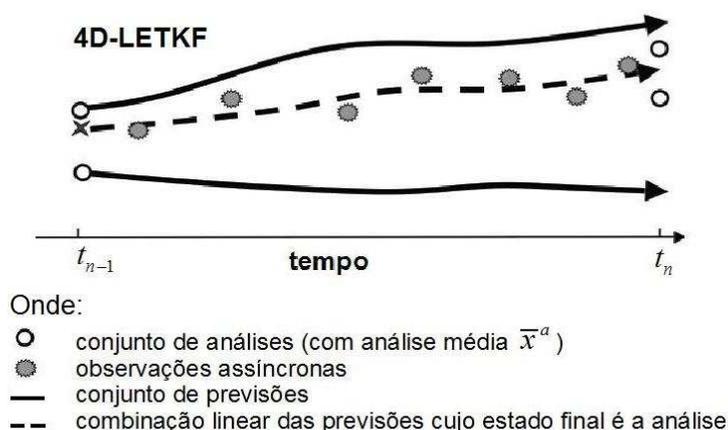


Figura 4.1 - Esquema mostrando que o 4D-LETKF encontra a combinação linear do conjunto de previsões que melhor se ajusta às observações durante a janela de assimilação  $t_{n-1}$  até  $t_n$ .

Fonte: Adaptado de Kalnay *et al.* (2007).

## 4.2. Componentes do sistema 4D-LETKF/MCGA

O 4D-LETKF foi executado utilizando um conjunto composto de 20 membros ( $k=20$  membros). No primeiro passo de tempo a estimativa inicial foi obtida das 20 saídas do modelo global do CPTEC (T126L28), correspondente aos quatro horários sinóticos do período de 01 a 05 de junho de 2008.

O sistema 4D-LETKF rodou em conjunto com o modelo global MCGA do CPTEC (seção 4.2.1). O ciclo da assimilação foi executado a cada 6 horas de modo que foram geradas análises diárias nos horários padrões sinóticos (00, 06, 12 e 18Z). O modelo de transferência radiativa incorporado ao 4D-LETKF para assimilação direta de radiância foi o modelo direto CRTM (seção 4.2.2). As simulações numéricas são realizadas com saídas a cada 6h, porém nas nove primeiras as saídas são horárias devido ao uso da versão 4D-LETKF.

A Figura 4.2 apresenta um diagrama do sistema de assimilação 4D-LETKF. Inicialmente são geradas as condições iniciais dentro do processo cíclico do MCGA e 4D-LETKF. O 4D-LETKF recebe as observações e um conjunto de estimativas iniciais produzida pelo modelo de previsão. A partir dessas informações o 4D-LETKF gera os campos de análise e um conjunto de condições iniciais. O MCGA, por sua vez, usa as condições iniciais geradas pelo 4D-LETKF para realizar a previsão por conjunto, da qual são obtidas as estimativas iniciais para o próximo ciclo de assimilação.

No caso da adição de observações de radiância o procedimento é o seguinte: as radiância simuladas para os membros do conjunto de previsões são obtidas com a aplicação do CRTM aos perfis das previsões. Esses perfis de entrada são dados a partir da previsão de 6 horas do conjunto das previsões iniciadas da análise do 4D-LETKF. O operador-H para dados de satélite, criado a partir do modelo CRTM, produz as radiância do *first guess* de cada membro do conjunto do modelo de previsão. Com isso o 4D-LETKF usa a diferença entre as radiâncias simuladas e a observação do satélite para calcular os pesos do Filtro de Kalman.

As observações de radiância foram simuladas com base nos dados de um subconjunto de temperaturas de brilho do AMSU-A Nível 1B (WON, 2008), que contém temperaturas de brilho geolocaladas e calibradas em graus Kelvin para 15 canais na região do microondas. A informação compreende todas as órbitas

do satélite AQUA em escala global, em conjuntos diários de 240 arquivos (120 no período matutino e 120 no período noturno).

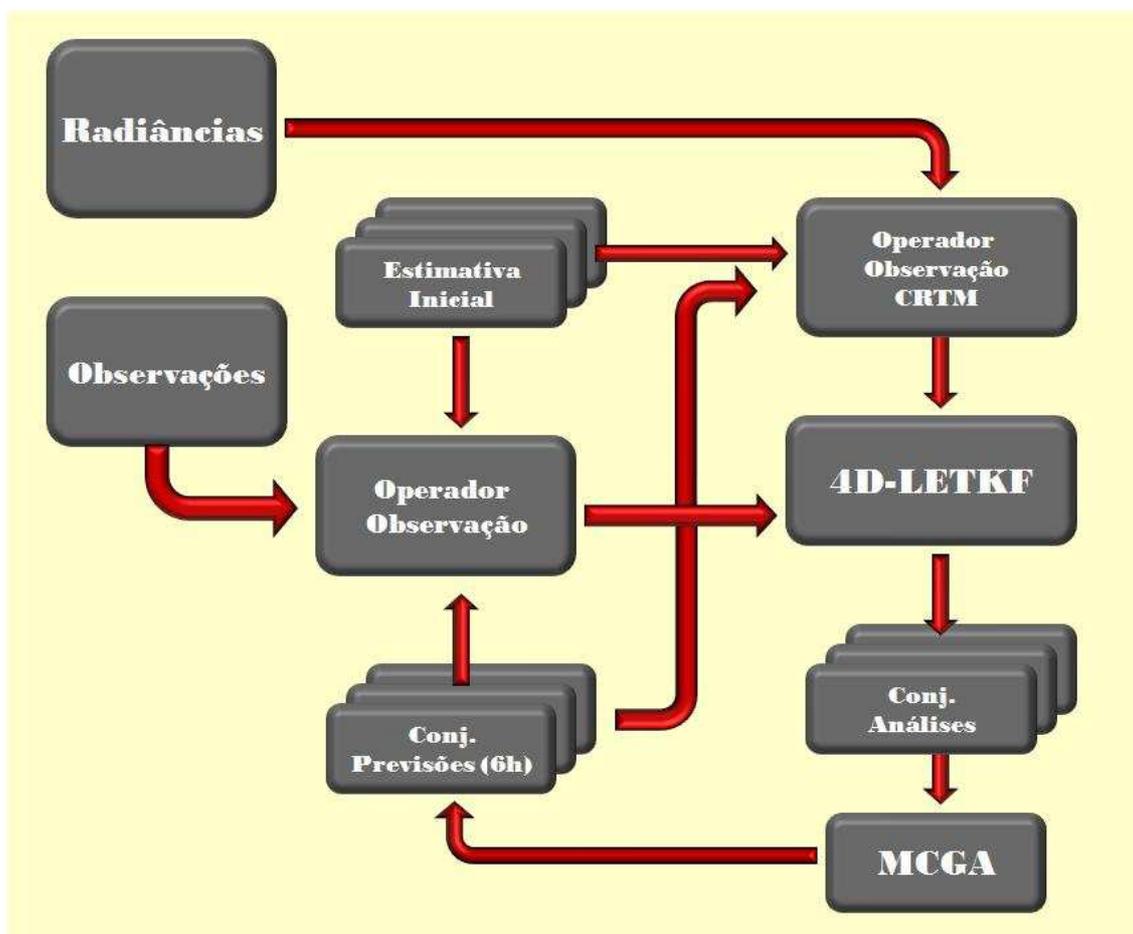


Figura 4.2 - Diagrama do sistema de assimilação 4D-LETKF.

Apenas 8 dos 15 canais do AMSU-A foram assimilados, evitando-se canais com forte sensibilidade à superfície (canais 1, 2, 4 e 15) e canais com máximo na função peso fora do domínio de previsão do modelo (12, 13 e 14). A Figura 4.3 apresenta um diagrama das Funções Peso do sensor AMSU-A.

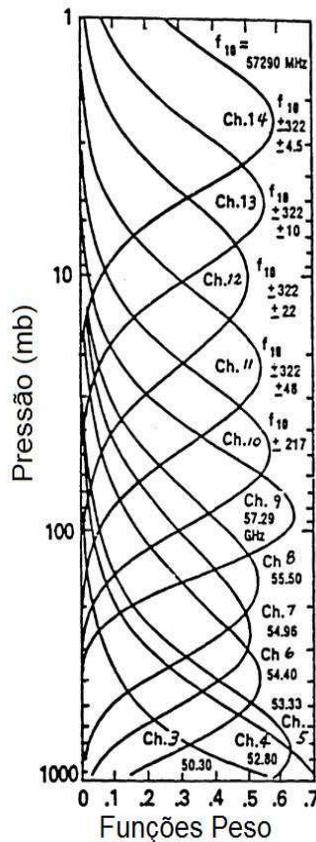


Figura 4.3 - Diagrama das Funções Peso do sensor AMSU-A.  
 Fonte: Adaptado de NASA (2010).

#### 4.2.1. O Modelo de Circulação Geral Atmosférico - MCGA

Os sistemas de assimilação dependem de um modelo de previsão para gerar campos de previsões curtas, os *first guess*. Esse modelo precisa ser o mais realístico possível. Neste trabalho o 4D-LETKF rodou em conjunto com o Modelo de Circulação Geral Atmosférico (MCGA) do CPTEC na resolução T126L28. Essa foi a versão disponibilizada para uso na ocasião desse estudo.

Na sigla T126L28, o T126 significa truncamento triangular na onda zonal de número 126, que corresponde a aproximadamente 100 km na horizontal, e o L28 significa 28 camadas em coordenada sigma na vertical. As previsões

utilizando o MCGA-T126L28 apresentam-se em grade gaussiana com 384 por 192 pontos (latitude por longitude) na horizontal e 28 níveis sigma na vertical.

Detalhes sobre o modelo MCGA/CPTEC e principais processos físicos incluídos podem ser encontrado em Panetta *et al.* (2007), Tomita *et al.* (2006), Cavalcanti *et al.* (2002), e Bonatti, (1996). Um breve resumo do MCGA/CPTEC bem como as parametrizações do modelo usadas nas simulações deste trabalho podem ser encontrados no Apêndice A.

#### **4.2.2. O Modelo de Transferência Radiativa - CRTM**

O principal componente para a assimilação direta de radiância é a incorporação de um Modelo de Transferência Radiativa (MTR) no sistema de assimilação de dados como parte do operador-H. Atualmente MTR's rápidos tem possibilitado a assimilação direta de radiância não só para condições atmosféricas de céu limpo, como também em condições de nuvens e precipitação.

Para sistemas de assimilação de dados operacionais, as características distintas de cada MTR podem vir a ser combinadas em versões mais refinadas levando em conta o espalhamento (*scattering*), tendo as vantagens de velocidade e acurácia em relação às soluções de referência, a eficiência do armazenamento de coeficientes, a inclusão de Jacobianos, e potencial desenvolvimento de futuros instrumentos.

A partir de um MTR (usado como operador-H para os dados de satélite) é possível simular radiância e temperatura de brilho para cada perfil vertical e características da superfície do *first guess*. Usa-se também o operador para obter os erros com relação à medida de satélite. Neste trabalho utiliza-se o modelo direto de transferência radiativa CRTM (*Community Radiative Transfer Model*), implementado no 4D-LETKF por Aravéquia (2008), para simular as radiâncias do AMSU-A, e avaliar as diferenças entre as simulações e os dados

observados pelo satélite. O CRTM é disponibilizado pelo JCSDA/NOAA (*Joint Center for Satellite Data Assimilation/National Oceanic Atmospheric Administration*).

O CRTM simula radiâncias na faixa do microondas e infravermelho observadas pelos instrumentos a bordo dos satélites para um determinado estado da atmosfera e superfície da Terra. Esta versão do CRTM inclui componentes que calculam a absorção de gases, absorção e espalhamento de radiação por hidrometeoros e aerossóis, e emissão e reflexão da radiação por oceano, terra, neve e superfícies de gelo. Todos estes resultados são então utilizados para realizar a transferência radiativa acurada para simular radiâncias observadas pelos satélites.

A simulação da transferência radiativa atmosférica envolve uma série de processos físicos, por conta disso um dos objetivos principais da estrutura do CRTM é proporcionar o desenvolvimento de modelos para esses processos independentemente de qualquer outro (HAN *et al.*, 2005). Resumidamente os componentes dos processos de transferência radiativa considerado pelo CRTM são divididos em quatro categorias principais:

1. Absorção de radiação pelos constituintes gasosos da atmosfera,
2. Absorção e espalhamento de radiação por nuvens e aerossóis,
3. Superfície de emissão de radiação e de interação de superfície com subsidência de radiação atmosférica, e
4. Solução da equação de transferência radiativa.

Detalhes sobre os componentes dos processos de transferência radiativa considerados pelo CRTM podem ser encontrados em Han *et al.* (2005).

### 4.3. Descrição do procedimento de assimilação pelo 4D-LETKF

O procedimento de assimilação de dados pelo sistema 4D-LETKF, para assimilação de observações convencionais, assim como observações de radiâncias de satélite, é resumidamente descrito a seguir e segue a metodologia usada por Aravéquia *et al.* (2009).

Os dados de entrada do algoritmo 4D-LETKF são: o vetor observação  $y_n^o$  e um conjunto de  $K$  análises  $x_{n-1}^{a(k)}$ ,  $k=1,2,\dots,3,K$  de análises prévias no tempo  $t_{n-1}$ . O 4D-LETKF consiste de um passo de previsão e um passo de atualização do estado. No passo da previsão, cada membro do conjunto é integrado no tempo, usando os membros do conjunto de análises como condição inicial, para obter um conjunto das trajetórias das previsões do *background*. Neste trabalho, os 20 membros ( $k=20$ ) do conjunto do *background* são trajetórias de previsões curtas de 6 horas, começando na previsão de 3 horas e terminando na previsão de 9 horas.

No passo da atualização do estado, o 4D-LETKF obtém as componentes dos vetores das análises  $x^a$  independentemente para cada ponto de grade. Define-se um vetor de estado local  $x_\ell$  que é composto pelas variáveis do modelo em cada ponto de grade local  $\ell$ . O 4D-LETKF gera um conjunto de  $K$  membros de análises locais  $x_\ell^{a(k)}$ ,  $k=1,2,\dots,3,K$ , a partir do cálculo do conjunto de “vetores pesos”  $w^{a(k)}$ ,  $k=1,2,\dots,3,K$ , tal que:

$$x_\ell^{a(k)} = \bar{x}_\ell^b + X_\ell^b w_\ell^{a(k)} \quad (4.1)$$

Onde:  $\bar{x}_\ell^b$  é a média do conjunto de vetores de estado local do *background*  $x_\ell^{b(k)}$ ,  $k=1,2,\dots,3,K$ ; e  $X_\ell^b$  é a matriz de perturbações do conjunto do *background* cuja  $k$ -ésima coluna é dada por  $[x^{b(k)} - \bar{x}^b]$ . A barra indica média do conjunto.

A melhor estimativa do estado no local  $\ell$  é a média do conjunto de análises:

$$x_\ell^a = \bar{x}_\ell^b + X_\ell^b \bar{w}_\ell^a \quad (4.2)$$

Os membros do conjunto global de análises  $x^{a(k)}$ , e a análise global  $x^a$ , são obtidos pela coleção de análises locais  $x_\ell^{a(k)}$  e  $\bar{x}_\ell^a$ , para toda localização  $\ell$ .

#### 4.3.1. Assimilação de observações convencionais

De acordo com Aravéquia *et al.* (2009), para observações convencionais, os vetores peso  $w_\ell^a, k=1,2,\dots,3,K$ , e o vetor peso médio correspondente  $\bar{w}_\ell^a$ , são calculados da seguinte forma:

1. Define-se o operador-H (operador observação).

Nas duas dimensões horizontais, o operador-H é um simples interpolador bilinear. Desde que a coordenada vertical do MCGA do CPTEC é a coordenada sigma ( $\sigma$ ) e a posição vertical das observações é dada em níveis de pressão, a interpolação vertical para uma dada observação é realizada em três etapas:

- (a) Calcula-se a pressão em cada nível- $\sigma$ , na localização horizontal da observação, através da multiplicação de  $\sigma$  pela pressão à superfície do *background* interpolado para a localização da observação.

- (b) Define-se 28 camadas  $\sigma$ , cada uma delimitada por um par de níveis  $\sigma$  (a camada mais baixa é definida pela superfície do modelo e o mais baixo nível  $\sigma$ ).
  - (c) Encontra-se a camada  $\sigma$  que contém a observação e interpola-se linearmente o logaritmo da pressão para o local da observação usando valores de pressão nos dois níveis  $\sigma$  que delimitam a camada.
2. Aplica-se o operador-H (definido no passo anterior) a cada membro do conjunto das trajetórias do *background* para obter um conjunto  $y^{b(k)}$  de valores de observações locais previstas pelo modelo.
- A média do conjunto  $\bar{y}^b$  é calculada e a matriz  $Y^b$  é construída fazendo suas colunas serem os vetores obtidos subtraindo-se  $\bar{y}^b$  de cada membro do conjunto  $y^{b(k)}$ ,  $k = 1, 2, \dots, 3, K$ .

3. Executa-se a localização.

Para cada localização (ponto de grade)  $\ell$ , as observações que têm informações úteis sobre o estado atmosférico, em cada ponto de grade  $\ell$ , são selecionadas para assimilação. As observações selecionadas formam o vetor observação  $y_\ell^o$ . Os parâmetros de localização usados neste trabalho foram os seguintes:

- (a) na direção horizontal, as observações foram consideradas num raio de  $800km$  na vizinhança da localização (ponto de grade)  $\ell$ . A influência das observações é limitada como função do raio  $r$  até o ponto de grade.
- (b) Na direção vertical, as observações foram consideradas de uma camada ao redor de  $\ell$ . A profundidade da camada é de 0,35 de altura entre os níveis de escala do modelo 1 e 15 (abaixo de  $\sigma = 0,37205$ ), e, a partir do nível 15, a profundidade aumenta

gradualmente com a altura até atingir duas escalas de altura no topo da atmosfera (definido por  $\sigma = 0,00273$ ). As observações de pressão à superfície são também consideradas na região horizontal local, quando o estado é analisado em um ponto de grade do modelo, que está ao nível ou abaixo do nível 15 do modelo.

- (c) Os componentes da pressão à superfície do vetor de estado são tratados diferentemente dos outros componentes. Para obter a análise da pressão à superfície na localização  $\ell$ , usa-se todas as observações de pressão a partir de um raio de  $800km$  de  $\ell$  e todas as observações de temperatura e vento de um raio de  $800km$  de  $\ell$  entre os níveis 2 ( $\sigma = 0,98208$ ) e 5 ( $\sigma = 0,91592$ ) do modelo. Como para todos os tipos de observação, a influência das observações à superfície é limitada dentro de um raio de  $500km$ .

Informações sobre os parâmetros de localização usados neste trabalho podem ser encontrados também no Apêndice B.

4. Calcula-se o vetor peso  $\bar{w}_\ell^a$ :

$$\bar{w}_\ell^a = \tilde{P}_\ell^a (Y_\ell^b)^T R_\ell^{-1} (y_\ell^o - y_\ell^b) \quad (4.3)$$

$$\tilde{P}_\ell^a = \left[ (k-1) I / \rho + (Y_\ell^b)^T R_\ell^{-1} (Y_\ell^b) \right]^{-1} \quad (4.4)$$

Onde:  $\tilde{P}^a$  é a matriz de covariância dos erros da análise;  $R$  é a matriz de covariância dos erros das observações;  $I$  é a matriz identidade; e  $\rho \geq 1$  é um fator multiplicativo de covariância denominado “inflation”.

5. Calcula-se a matriz  $W_\ell^a$  :

$$W_\ell^a = \left[ (k-1)\tilde{P}_\ell^a \right]^{1/2} \quad (4.5)$$

6. Adiciona-se o vetor peso  $\bar{w}_\ell^a$  a cada linha de  $W_\ell^a$ . As colunas da matriz resultante são os membros do conjunto de vetores peso  $\bar{w}_\ell^{a(k)}$ ,  $k = 1, 2, \dots, 3, K$ .

#### 4.3.2. Assimilação de observações de radiância

O procedimento para assimilação de observações de radiância é mais complicado do que o procedimento para assimilação de dados convencionais. A fonte primária da complexidade adicional está no operador-H, que em vez de um simples interpolador, é um modelo de transferência radiativa. Conforme comentado anteriormente o modelo de transferência radiativa usado neste trabalho é o CRTM.

De acordo com Aravéquia *et al.* (2009), na assimilação direta de radiância necessita-se considerar duas importantes questões: a primeira questão diz respeito ao viés (*bias*) das observações pois um modelo de transferência radiativa é sujeito a grande viés. A segunda questão a ser considerada é a natureza não local do operador-H. Em contraste ao caso das observações convencionais, onde o operador-H para uma dada observação depende somente do estado do modelo na vizinhança do ponto de grade, a saída do CRTM depende da coluna atmosférica inteira do modelo atmosférico na localização horizontal da observação. Isso sugere que a componente vertical da estratégia de localização, descrita no passo 3 da seção 4.3.1 seja modificada para a assimilação direta de radiância.

A estratégia de seleção de dados para assimilação de radiância usada neste trabalho segue a metodologia usada por Aravéquia *et al.* (2009) e sugerida por Fertig *et al.* (2007, 2009), que é baseada numa função peso vertical  $w_\ell$ , calculada pelo CRTM para cada observação de radiância em todos os níveis do modelo  $\ell = 1, 2, \dots, 3, L$ . Dessa forma os principais passos para assimilação das observações de radiância de satélites adotando as mudanças sugeridas são resumidamente descritos a seguir:

1. Define-se o operador-H criado a partir do CRTM.
2. Aplica-se o operador-H, definido no item anterior, a cada membro do conjunto de trajetórias do *background* para obter um conjunto  $\hat{y}^{b(k)}$ ,  $k = 1, 2, \dots, 3, K$ , de valores de observações locais de radiância.
3. Selecionam-se as observações de radiância que formam as componentes  $\hat{y}_\ell^o$  do vetor  $y_\ell^o$  nos diferentes pontos de grade  $\ell$ .

Os passos 4 a 6 do algoritmo 4D-LETKF descritos na seção 4.3.1 que fornecem os pesos  $w_\ell^{a(k)}$  para o cálculo das análises do vetor de estado local ampliado são os mesmos para as observações convencionais. O vetor de estado local ampliado  $z_\ell^{a(k)}$  é dado pela seguinte equação:

$$z_\ell^{a(k)} = \bar{z}_\ell^b + Z_\ell^b w_\ell^{a(k)} \quad (4.6)$$

As componentes do estado da análise  $x^{a(k)}$  de  $z^{a(k)}$ , são obtidas da mesma maneira como descrito anteriormente, ou seja, armazenando as componentes do vetor de estado  $x_\ell^{a(k)}$  das análises do vetor de estado local aumentado  $z_\ell^{a(k)}$  para toda localização  $\ell$ .

Entretanto, um procedimento diferente é necessário para obter o conjunto de parâmetros do viés da análise global  $\beta^{a(k)}$ ,  $k = 1, 2, \dots, 3, K$ , das componentes do viés  $\beta_\ell^{a(k)}$  de  $z_\ell^{a(k)}$ ,  $k = 1, 2, \dots, 3, K$ .

Uma vez que as componentes do viés do vetor de estado aumentado são compostas pelos parâmetros de correção do viés para todos os canais assimilados do satélite na localização  $\ell$ , o mesmo parâmetro do viés é estimado nas diferentes localizações  $\ell$ .

Para obter uma estimativa de cada um dos parâmetros do viés  $M$ , faz-se uma média da estimativa local dos parâmetros do viés sobre toda localização  $\ell$  pela fórmula:

$$\beta_m^{a(k)} = \frac{\sum \cos(\phi_\ell) \beta_{m,\ell}^{a(k)} \sigma_{m,\ell}^{-2}}{\sum \cos(\phi_\ell) \sigma_{m,\ell}^{-2}}, \quad m = 1, \dots, M \quad (4.7)$$

Onde,  $\beta_m^{a(k)}$  e  $\beta_{m,\ell}^{a(k)}$  são as  $m$ -ésimas componentes de  $\beta^{a(k)}$  e  $\beta_\ell^{a(k)}$ , respectivamente,  $\phi_\ell$  é a latitude na localização  $\ell$ , e o fator  $\cos(\phi_\ell)$  depende da latitude da área representada por um ponto de grade. O fator  $\sigma_{m,\ell}^{-2}$  é o inverso da variância  $\sigma_{m,\ell}$  do conjunto de análises da  $m$ -ésima componente do vetor de parâmetros do viés  $\beta$  na localização  $\ell$ .

A variância  $\sigma_{m,\ell}$  é dada pela seguinte equação:

$$\sigma_{m,\ell}^2 = (k-1)^{-1} \sum_{k=1}^K (\beta_{m,\ell}^{a(k)} - \beta_m^{a(k)}) \quad (4.8)$$

Atribuir peso ao inverso da variância assegura que nos locais onde as incertezas na estimativa de um determinado parâmetro do viés são maiores, haverá uma contribuição com um peso menor para a estimativa global do parâmetro do viés.

#### **4.4. Descrição dos Experimentos**

Foram realizados dois tipos de experimentos com o sistema 4D-LETKF/MCGA:

- (i) com assimilação somente de dados convencionais (seção 3.1), de agora em diante LETKF\_conv;
- (ii) com assimilação de dados convencionais e dados de radiância do sensor AMSU-A (seção 3.2), de agora em diante LETKF\_rad.

O principal objetivo dos experimentos foi determinar o impacto da assimilação de dados com a inclusão de radiância do AMSU-A no sistema 4D-LETKF/MCGA.

O ciclo da assimilação foi executado a cada 6 horas a partir de 01 de junho de 2008, de modo que foram geradas análises diárias nos horários padrões sinóticos (00, 06, 12 e 18Z). Ao todo foram geradas 240 análises (120 de cada experimento), entretanto só foram avaliadas 200, correspondente ao período de 06 a 30 de junho de 2008, nos 4 horários sinóticos.

A partir das análises das 00 e 12Z geradas nos experimentos LETKF\_conv e LETKF\_rad, foram geradas 48 horas de previsões com o modelo MCGA para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008.

#### 4.5. Avaliação dos Resultados

Neste trabalho foram feitas duas avaliações diferentes, a primeira foi uma avaliação utilizando índices estatísticos e a segunda foi uma avaliação subjetiva.

A avaliação estatística foi feita usando dois índices: a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) e o viés (Erro Médio) para avaliar as análises e previsões geradas pelo sistema 4D-LETKF/MCGA na região da América do Sul. Também foram calculados esses índices para o GPSAS. As análises de alta resolução do *National Center for Environment Prediction* (NCEP) foram tomadas como verdade para o estado da atmosfera. Uma vez que os dados tinham diferentes resoluções, optou-se pela interpolação dos mesmos para a mesma grade do 4D-LETKF/MCGA, ou seja T126L28.

As variáveis analisadas foram: temperatura, umidade e vento. Essas variáveis foram escolhidas para avaliação por dois motivos: primeiro porque são variáveis prognósticas dos modelos de previsão, e segundo porque os sistemas de observação geralmente medem essas grandezas.

O REQM é uma medida bastante utilizada para medir a acurácia dos campos previstos. O Erro Médio Quadrático é o quadrado dos valores médios dos desvios entre os previstos e os observados. A vantagem de se obter a raiz quadrada do Erro Médio Quadrático, obtendo assim a REQM, é a preservação da unidade da variável prevista, podendo ser mais facilmente interpretada. A REQM é mais sensível quanto maior for o desvio e se aproxima de zero quanto melhor a previsão. Para uma previsão perfeita a REQM é zero, com valores maiores indicando degradação da qualidade da previsão, ou seja, a REQM é negativamente orientada (WILKS, 2006).

O viés é um parâmetro que indica a tendência sistemática dos campos previstos, ou seja, se o viés for maior que zero, na média, os campos previstos estão sendo superestimados enquanto que se for menor do que zero os campos previstos estão subestimadas.

As fórmulas usadas para o cálculo do REQM e do viés, conforme Wilks (2006) são mostradas abaixo:

$$REQM(\alpha) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\alpha^P - \alpha^O)^2} \quad (4.9)$$

$$viés(\alpha) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\alpha^P - \alpha^O) \quad (4.10)$$

Onde:  $\alpha$  é uma variável arbitrária,  $N$  é o número de observações; e os índices  $P$  e  $O$  representam, respectivamente, os campos previstos e as observações.

A segunda avaliação foi uma verificação dos resultados através da comparação dos mesmos com as radiossondagens do Experimento Mini-BARCA/LBA. Nesse caso, os resultados obtidos pelo 4D-LETKF, os dados do GPSAS, e as radiossondagens foram plotadas sem nenhuma interpolação, ou seja, com as respectivas resoluções de cada dado: 4D-LETKF com resolução de aproximadamente 100km, e o GPSAS com resolução de aproximadamente 63km (T213L42). As análises do sistema GPSAS foram obtidas junto ao CPTEC. Dados assimilados operacionalmente pelo GPSAS são apresentados no Apêndice D.



## **5 IMPACTO DA ASSIMILAÇÃO DE RADIÂNCIA**

Este capítulo apresenta os resultados da assimilação de radiância no 4D-LETKF/MCGA, para a região da América do Sul. Os resultados das análises e previsões obtidos pelo 4D-LETKF/MCGA são avaliados, discutidos e comparados ao sistema operacional do CPTEC. A verificação dos resultados, tanto das análises quanto das previsões, é feita usando as análises de alta resolução do NCEP como verdade para o estado da atmosfera. Os índices estatísticos usados nas avaliações foram o REQM e o viés (seção 4.5).

### **5.1. Impacto no 4D-LETKF/MCGA**

#### **5.1.1 Temperatura**

A Figura 5.1 mostra a distribuição espacial dos erros com a inclusão das observações de radiância no sistema 4D-LETKF/MCGA para a variável Temperatura absoluta do ar (K). Nessa figura apresenta-se a diferença entre o REQM do experimento LETKF\_rad menos o REQM do experimento LETKF\_conv, para a região da América do Sul.

As Figuras 5.1a, 5.1b e 5.1c se referem à distribuição espacial dos erros das análises do 4D-LETKF/MCGA nos níveis de 250 hPa, 500 hPa e 850hPa, respectivamente, para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários das 00, 06, 12 e 18Z. De forma similar, as Figuras 5.1d, 5.1e e 5.1f se referem à distribuição espacial dos erros das 48 horas de previsões do MCGA T126L28 usando análises do 4D-LETKF/MCGA, para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários das 00 e 12Z. Diferença negativa mostra a melhoria dada pela inclusão dos dados de radiância, ou seja, regiões sombreadas em tons de cor azul mostram onde os erros com assimilação de radiância foram reduzidos. As cores em tons de amarelo representam um aumento nos erros associados à inclusão das radiância.

Com relação às análises de Temperatura apresentadas na Figura 5.1, pode-se observar um maior impacto nos níveis de 500hPa e 850hPa (Figuras 5.1b e 5.1c, respectivamente) com redução nos erros sobre boa parte do continente e oceanos, indicando uma melhoria nas análises em grande parte da América do Sul para esses níveis. Em 250hPa (Figuras 5.1a) observa-se uma redução dos erros em parte do Chile, Argentina e Oceano Pacífico. Nesse nível, observa-se um aumento dos erros no Oceano Atlântico, em latitudes maiores que 50°S.

Quanto as previsões (Figuras 5.1d, 5.1e e 5.1f), pode-se observar redução dos erros nas regiões continentais nos 3 níveis de pressão. Todavia, um aumento nos erros pode ser observado nas regiões oceânicas, principalmente no nível de 850hPa. Esse aumento nos erros não se mostrou presente nas análises.

A Figura 5.2 apresenta uma secção transversal vertical com a distribuição dos erros entre os níveis 1000hPa e 70hPa para a variável Temperatura do ar. Nessa figura apresenta-se a diferença entre o REQM do experimento LETKF\_rad menos o REQM do experimento LETKF\_conv, média longitudinal para a região da América do Sul. A Figura 5.2a mostra a média das análises para o período de 06 a 30 de junho de 2008, para os horários das 00, 06, 12 e 18Z, e a Figura 5.2b mostra a média para 48 horas de previsões do MCGA T126L28 usando análises do 4D-LETKF/MCGA, para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários das 00 e 12Z.

Na Figura 5.2a pode-se observar um ganho em praticamente todos os níveis de pressão. Entre 1000hPa e 250hPa, a média de redução nos erros chega a 0,6K, o que embora possa ser considerado um valor baixo, essa redução mostra uma consistência e homogeneidade na distribuição do ganho com a assimilação direta de radiação. Acima de 250hPa observa-se um ganho maior, com uma melhora que supera a média de 1K. A redução dos erros é também observada para as previsões (Figura 5.2b), com maior ganho nos níveis mais altos.

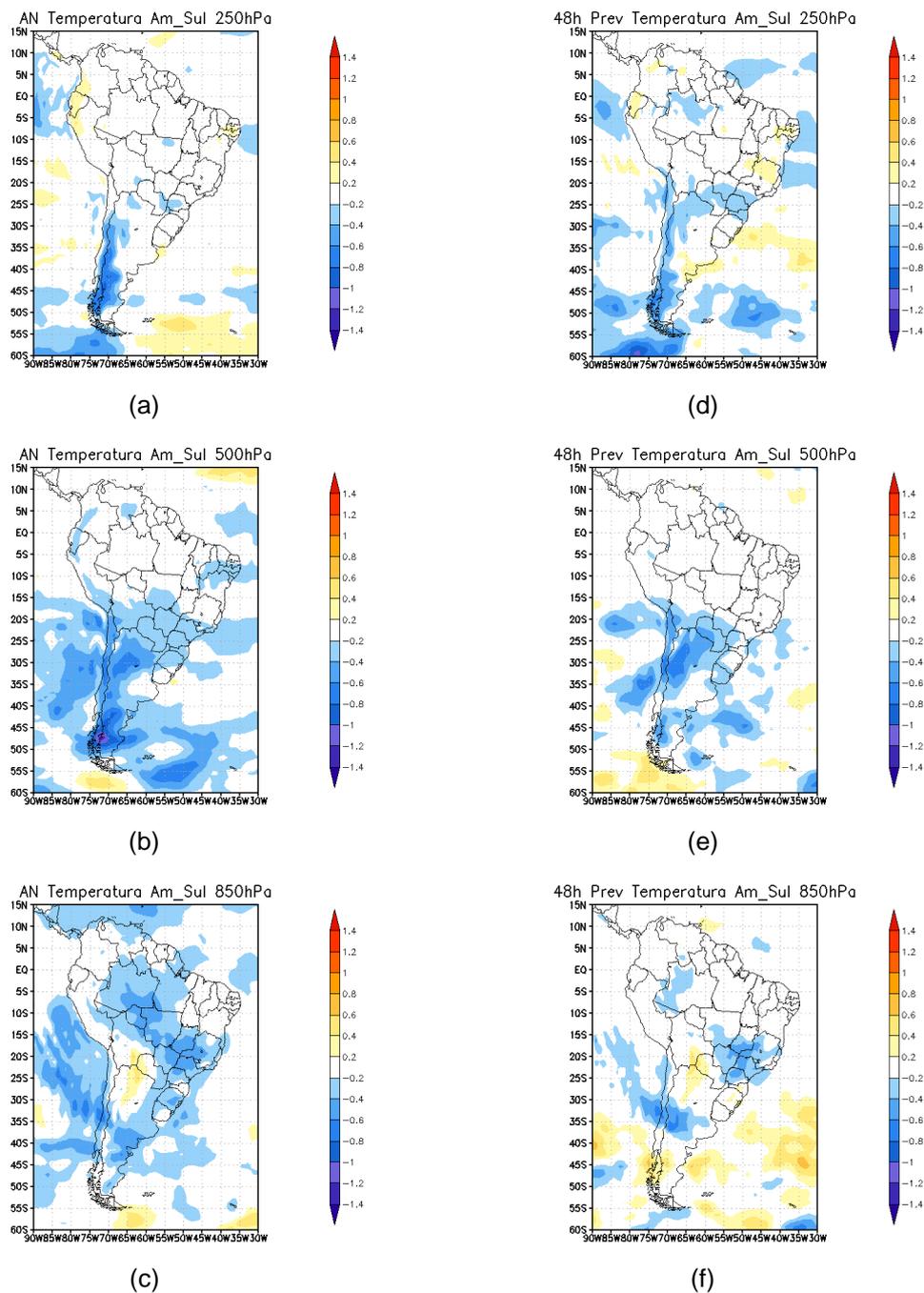


Figura 5.1 - Diferença entre o REQM da variável Temperatura (K) do ar entre o experimento LETKF\_rad e o experimento LETKF\_conv, para Análises em (a), (b) e (c) e 48 horas de Previsões em (d), (e), (f), para os níveis 250hPa, 500hPa e 850hPa, respectivamente. Os valores representam a média para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários 00, 06, 12 e 18Z, para as Análises; e média para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários 00 e 12Z, para Previsões. Diferença negativa mostra vantagem da inclusão dos dados de radiância.

A Figura 5.3 se refere à distribuição dos erros das análises sobre o mesmo período e região que a Figura 5.2a, no entanto para média em diferentes horários. A média para os horários das 00 e 12 Z é mostrada na Figura 5.3a, e a média para os horários das 06 e 18 Z é mostrada na Figura 5.3b. Pode-se observar um maior ganho com a redução dos erros na média para os horários das 06 e 18Z. O maior ganho nesses horários pode estar relacionado com os horários de passagem do satélite AQUA na América do Sul, ou seja, horários em que estão sendo incluídas as observações de radiancias oriundas do AMSU-A(AQUA) no sistema de assimilação (LETKF\_rad).

Para a variável temperatura do ar, os resultados sugerem que as análises obtidas com assimilação direta de radiancia (LETKF\_rad) fisicamente apresentam uma maior concordância com as análises do NCEP em boa parte da região da América do Sul. Para as previsões observa-se uma redução dos erros em parte do continente e Oceano Pacífico, e um aumento dos erros em parte do Oceano Atlântico. De forma geral, os resultados obtidos para temperatura do ar mostraram um impacto maior nas análises do que nas previsões.

A seguir a distribuição espacial dos erros com a inclusão das observações de radiancia no sistema 4D-LETKF/MCGA para a umidade específica e componentes zonal e meridional do vento.

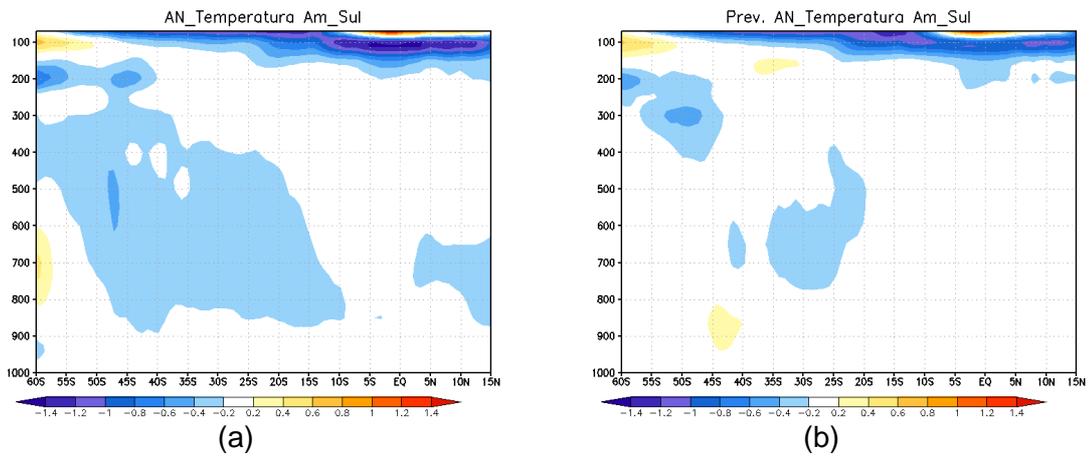


Figura 5.2 - Secção transversal vertical média longitudinal na América do Sul do REQM da variável Temperatura (K) do ar do LETKF\_rad menos REQM do LETKF\_conv, média para o período de 06 a 30 de junho de 2008 para as Análises nos horários das 00Z, 06Z, 12Z e 18Z em (a), e média para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008 para 48 horas de Previsões nos horários das 00Z e 12Z em (b).

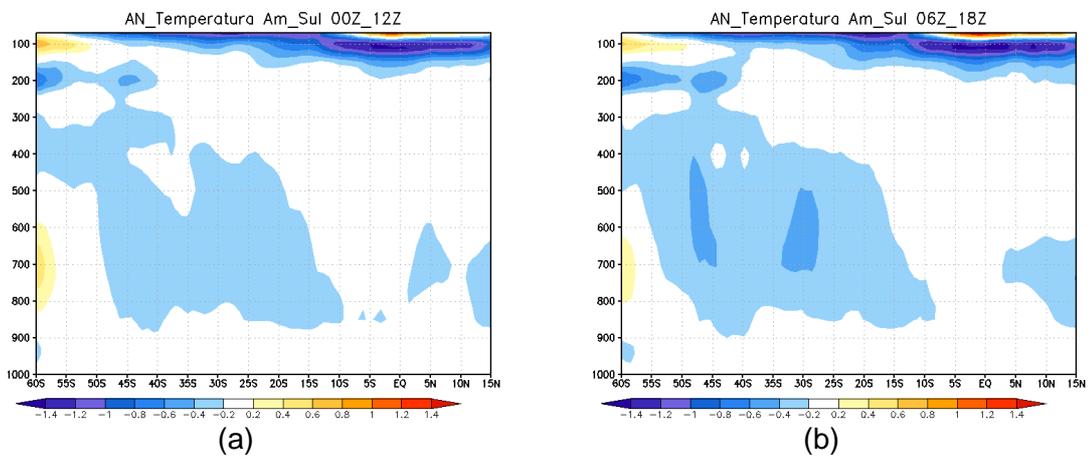


Figura 5.3 - Secção transversal vertical média longitudinal na América do Sul do REQM da variável Temperatura (K) do ar do LETKF\_rad menos REQM do LETKF\_conv, média para o período de 06 a 30 de junho de 2008 para as Análises nos horários das 00Z e 12Z em (a), e para os horários das 06Z e 18Z em (b).

### 5.1.2. Umidade específica

A distribuição espacial dos erros com a inclusão das observações de radiância no sistema 4D-LETKF/MCGA para a variável umidade específica (k/kg) é apresentada na Figura 5.4, somente para o nível de 850 hPa, onde é maior a concentração de umidade.

O maior ganho na redução dos erros da variável umidade específica, tanto para as análises (Figura 5.4a) quanto para as previsões (Figura 5.4b) no nível de 850hPa, é observado na região da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) no Atlântico Tropical. Embora os canais do AMSU-A assimilados pelo 4D-LETKF não tenham informações significantes sobre a variável umidade, as pequenas diferenças encontradas no nível 850hPa podem estar relacionadas a influência das diferenças de temperatura.

A Figura 5.5 apresenta uma secção transversal vertical com a distribuição dos erros entre os níveis 1000hPa e 70hPa para as análises da variável umidade específica. Essa figura mostra a diferença entre o REQM do LETKF\_rad menos o REQM do LETKF\_conv, média longitudinal para a região da América do Sul, para o período de 06 a 30 de junho de 2008, média para os horários das 00 e 12Z na Figura 5.5a, e média para os horários das 06 e 18Z na Figura 5.5b.

Não se observam diferenças relevantes na distribuição dos erros mostradas nas Figuras 5.5a e 5.5b. Também não se observam diferenças relevantes entre a Figura 5.5 e a figura referente a 48 horas de previsões (figura não mostrada). Em suma, não se observam diferenças significativas nas regiões e horários onde estão sendo incluídas as informações de radiância para a umidade específica em 850hPa, da forma com que os experimentos deste trabalho foram feitos. Contudo, há que se explorar esse assunto em trabalhos futuros, para outras configurações, outras épocas do ano, etc.

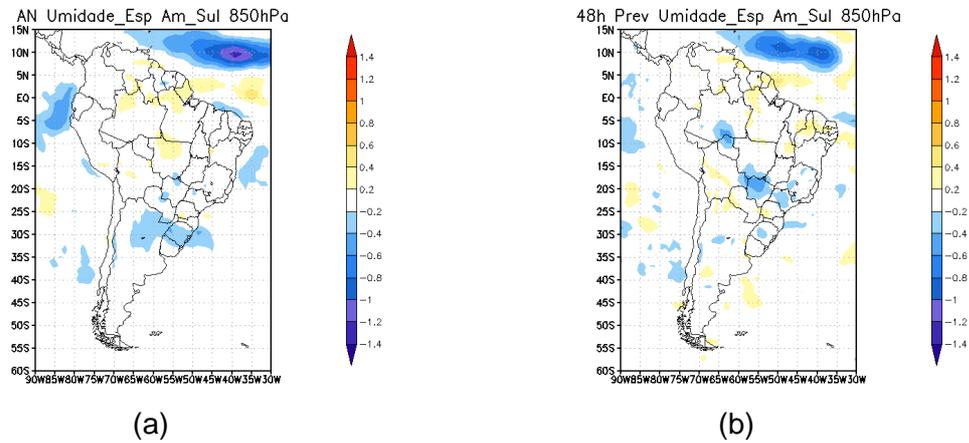


Figura 5.4 - Diferença entre o REQM da variável umidade específica (g/kg) entre o experimento LETKF\_rad e o experimento LETKF\_conv, para Análises em (a) e 48 horas de Previsões em (b), para o nível 850hPa, respectivamente. Os valores representam a média para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários 00, 06, 12 e 18Z, para as Análises; e média para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários 00 e 12Z, para Previsões. Diferença negativa mostra vantagem da inclusão dos dados de radiância.

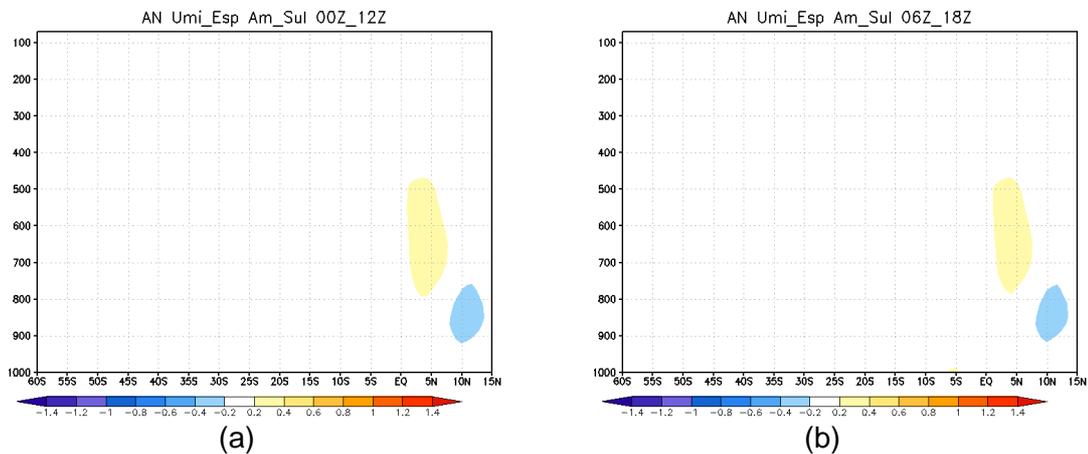


Figura 5.5 - Secção transversal vertical média longitudinal na América do Sul do REQM da variável umidade específica (g/kg) do LETKF\_rad menos REQM do LETKF\_conv, média para o período de 06 a 30 de junho de 2008 para as Análises nos horários das 00Z e 12Z em (a), e para os horários das 06Z e 18Z em (b).

### 5.1.3 Componente zonal do vento

Semelhante a Figura 5.1, a Figura 5.6 mostra a distribuição espacial dos erros com a inclusão das observações de radiação no sistema 4D-LETKF/MCGA, entretanto para a componente zonal do vento. Para as análises, observa-se que as maiores diferenças médias mensais dessa componente do vento, ocorrem no nível de 250hPa (Figura 5.6a) com redução dos erros em regiões oceânicas da América do Sul. No nível 500hPa (Figura 5.6b) ocorre aumento dos erros na região tropical do Oceano Pacífico (10°S a 30°S) e Atlântico (15°N a 10°S). Em 850hPa (Figura 5.6c) praticamente não houve diferença de REQM entre os experimentos com e sem assimilação de radiação.

Para as previsões, as maiores diferenças também ocorrem no nível de 250hPa (Figura 5.6d) com redução dos erros no Oceano Pacífico (5°S a 25°S) e aumento dos erros da mesma ordem em parte da Argentina e Chile (25°S a 35°S). No nível 500hPa (Figura 5.6e) o aumento dos erros ainda é observado na região da Argentina e Chile. Para o nível de 850hPa (Figura 5.6f), uma redução assim como um aumento dos erros, da mesma ordem de magnitude, podem ser observados na região oceânica.

A secção transversal vertical com a distribuição dos erros entre os níveis 1000hPa e 70hPa para a componente zonal do vento é apresentada na Figura 5.7. Pode-se observar nessa figura um ganho com a redução dos erros nos níveis acima de 400hPa tanto para análises (Figura 5.7a) como para previsões (Figura 5.7b) . Entre os níveis 200hPa e 70hPa, a redução dos erros da previsão é mais significativa do que a redução dos erros das análises.

A Figura 5.8 se refere à distribuição dos erros das análises sobre o mesmo período e região que a Figura 5.7a, no entanto para média em diferentes horários, conforme foi feito para as variáveis anteriores. Um maior ganho para a média dos horários das 06 e 18Z (Figura 5.8b) em relação à média dos

horários das 00 e 12Z (Figura 5.8a) pode ser observado na região compreendida entre 45°S e 60°S (níveis 400hPa a 150hPa). Entretanto o ganho foi reduzido na região compreendida entre 20°S e 40°S (níveis 200hPa a 70hPa).

De forma geral, os resultados obtidos para componente zonal do vento mostraram um impacto com redução dos erros, tanto para análises quanto para as previsões nos níveis mais altos (níveis 400hPa a 150hPa). As figuras apresentadas na próxima seção são semelhantes às usadas nesta seção, exceto que para componente meridional, ao invés da componente zonal do vento.

#### **5.1.4 Componente meridional do vento**

A Figura 5.9 mostra a distribuição dos erros com a inclusão de radiância para a componente meridional do vento. Semelhante ao observado para a componente zonal (Figuras 5.6) as maiores diferenças médias mensais para as análises da componente meridional, ocorreram no nível de 250hPa (Figura 5.9a). Nesse nível observa-se redução dos erros em regiões oceânicas entre 40°S e 60°S, e aumento dos erros da mesma ordem principalmente no Oceano Pacífico. No nível 500hPa (Figura 5.9b) observa-se aumento dos erros na região tropical do Oceano Pacífico. Em 850hPa (Figura 5.9c), assim como ocorreu com o componente zonal, praticamente não houve diferença de REQM entre os experimentos com e sem assimilação de radiância.

Para as previsões, as maiores diferenças também ocorrem no nível de 250hPa (Figura 5.9d) com significativo aumento dos erros no Oceano Pacífico (30°S a 45°S). Contudo, nesse nível ainda é possível observar redução de erros no continente e também nos oceanos. Nos níveis de 500hPa e 850hPa (Figuras 5.9e e 5.9f, respectivamente) ocorre aumento dos erros.

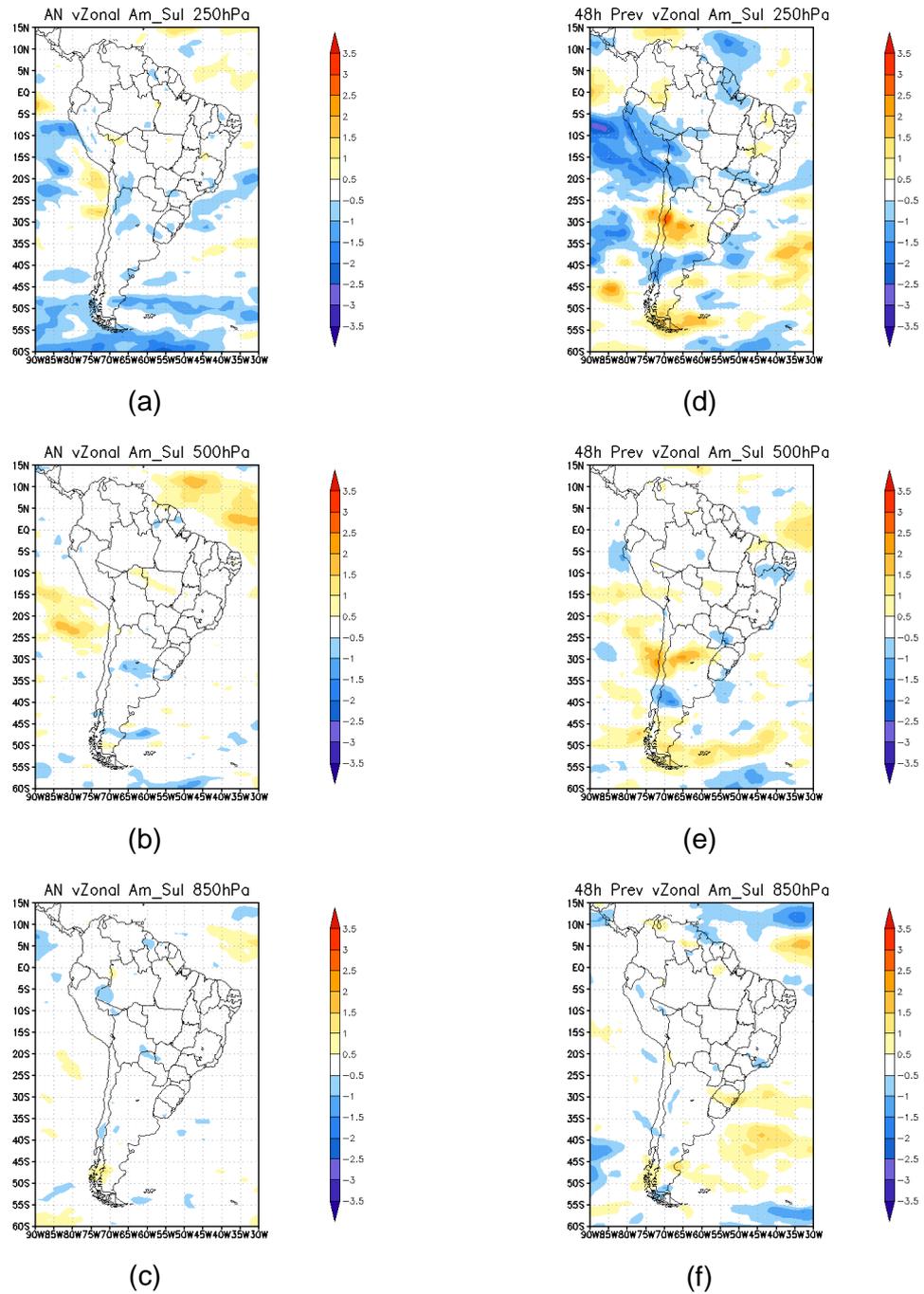


Figura 5.6 - Diferença entre o REQM da componente zonal do vento (m/s) entre o experimento LETKF\_rad e o experimento LETKF\_conv, para Análises em (a), (b) e (c) e 48 horas de Previsões em (d), (e), (f), para os níveis 250hPa, 500hPa e 850hPa, respectivamente. Os valores representam a média para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários 00, 06, 12 e 18Z, para as Análises; e média para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários 00 e 12Z, para Previsões. Diferença negativa mostra vantagem da inclusão dos dados de radiância.

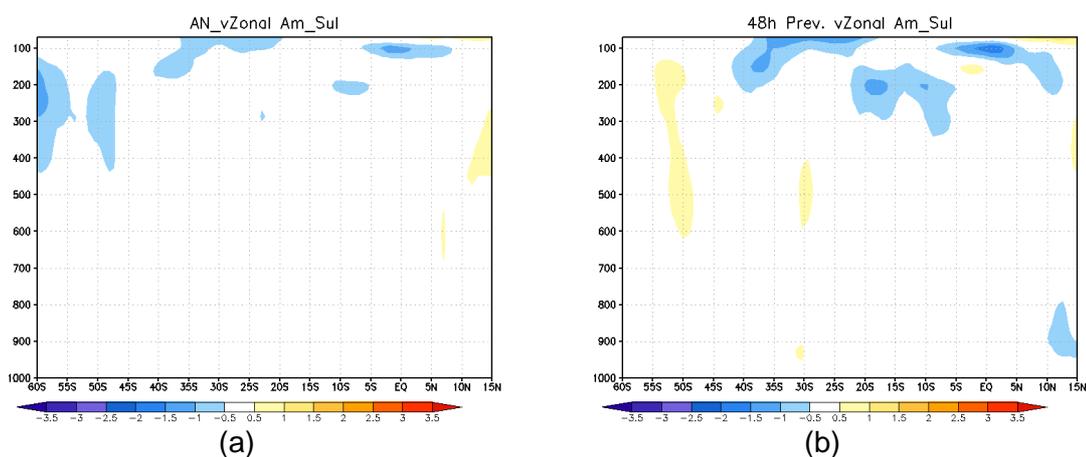


Figura 5.7 - Secção transversal vertical média longitudinal na América do Sul do REQM da componente zonal do vento (m/s) do LETKF\_rad menos REQM do LETKF\_conv, média para o período de 06 a 30 de junho de 2008 para as Análises nos horários das 00Z, 06Z, 12Z e 18Z em (a), e média para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008 para 48 horas de Previsões nos horários das 00Z e 12Z em (b).

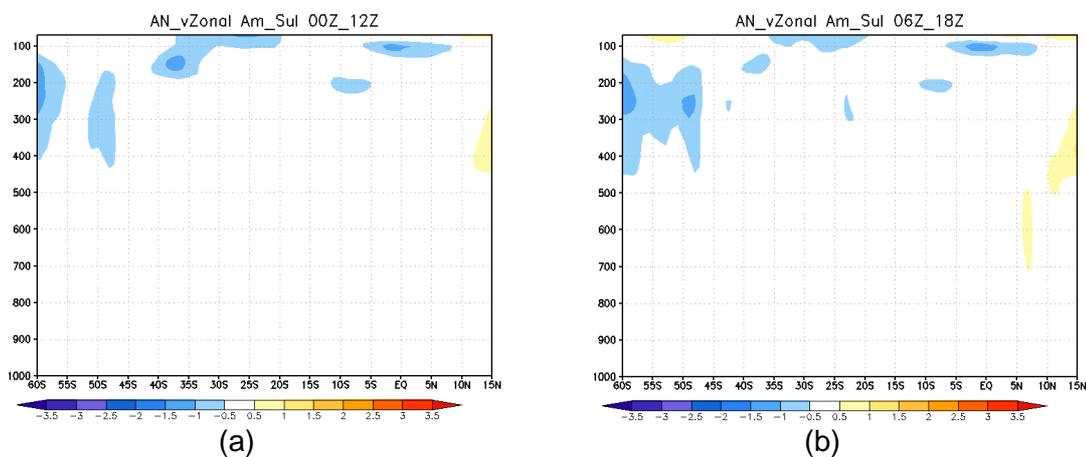


Figura 5.8 - Secção transversal vertical média longitudinal na América do Sul do REQM da componente zonal do vento (m/s) do LETKF\_rad menos REQM do LETKF\_conv, média para o período de 06 a 30 de junho de 2008 para as Análises nos horários das 00Z e 12Z em (a), e para os horários das 06Z e 18Z em (b).

A secção transversal vertical com a distribuição dos erros entre os níveis 1000hPa e 70hPa para a componente meridional do vento é apresentada na Figura 5.10. Pode-se observar um ganho com a redução dos erros nos níveis acima de 400hPa (50°S a 65°S) para as análises (Figura 5.10a), no entanto para previsões (Figura 5.10b), o que se observa é um aumento dos erros.

A Figura 5.11 se refere à distribuição dos erros das análises sobre o mesmo período e região que a Figura 5.10a. Como observado para outras variáveis (temperatura e componente zonal do vento), um maior ganho foi observado para a componente meridional do vento para a média dos horários das 06 e 18Z (Figura 5.11b) em relação à média dos horários das 00 e 12Z (Figura 5.11a).

De forma geral, os resultados da assimilação de radiância pelo 4D-LETKF/MCGA apresentados nessa secção, mostraram que a variável que apresentou um maior ganho com a redução dos erros, em praticamente todos os níveis, tanto para análises quanto para previsões, foi a temperatura do ar. Para o vento, os resultados mais significantes foram nos altos níveis, com redução dos erros tanto nas análises quanto nas previsões, a exceção das previsões da componente meridional do vento que apresentou aumento dos erros. Para a umidade específica em 850hPa não se observaram diferenças significativas com a assimilação de radiância para as análises e previsões.

## **5.2. 4D-LETKF x GPSAS**

Nesta secção análises e previsões obtidas pelo sistema 4D-LETKF/MCGA são comparadas a análises e previsões do sistema de assimilação de dados operacional do CPTEC, o GPSAS. As comparações são feitas usando os índices estatísticos REQM e viés para as mesmas variáveis analisadas na secção anterior: temperatura, umidade específica, e componentes zonal e

meridional do vento. As análises do NCEP são usadas como verdade para o estado da atmosfera.

Os índices estatísticos foram calculados com base nos resultados presentes obtidos durante os experimentos do 4D-LETKF/MCGA (LETKF\_rad e LETKF\_conv) e nos resultados do GPSAS fornecidos pelo CPTEC. Os valores do REQM e viés representam a média para os horários das 00 e 12Z na região da América do Sul: a) período de 06 até 30 de junho de 2008 para as análises; e b) período de 08 de junho até 02 de julho de 2008 para 48 horas de previsões.

### **5.2.1 Temperatura**

A Figura 5.12 mostra perfis do REQM (Figuras 5.12a e 5.12c) e do viés (Figura 5.12b e 5.12d) das análises e previsões para variável temperatura do ar. Quanto ao REQM observa-se uma redução dos erros, da variável temperatura do ar obtida no experimento LETKF\_rad em relação LETKF\_conv, em todos os níveis, tanto para análises quanto para previsões. O maior ganho com a redução do REQM é observado no nível de 100hPa, com redução de aproximadamente 0,7 K para análises e 0,6 K para previsões.

Com relação às análises, o experimento LETKF\_rad apresentou erros REQM similares ou menores que o GPSAS na maioria dos níveis (Figura 5.12a), sendo inferior ao sistema GPSAS apenas nos níveis de 700hPa e 100hPa. Para as previsões observa-se que o REQM do GPSAS só é menor que o LETKF\_rad no nível de aproximadamente 150hPa, nos outros níveis os erros são similares, com o LETKF\_rad apresentando-se ligeiramente melhor, inclusive no nível de 700hPa onde ocorreu a maior diferença para as análises.

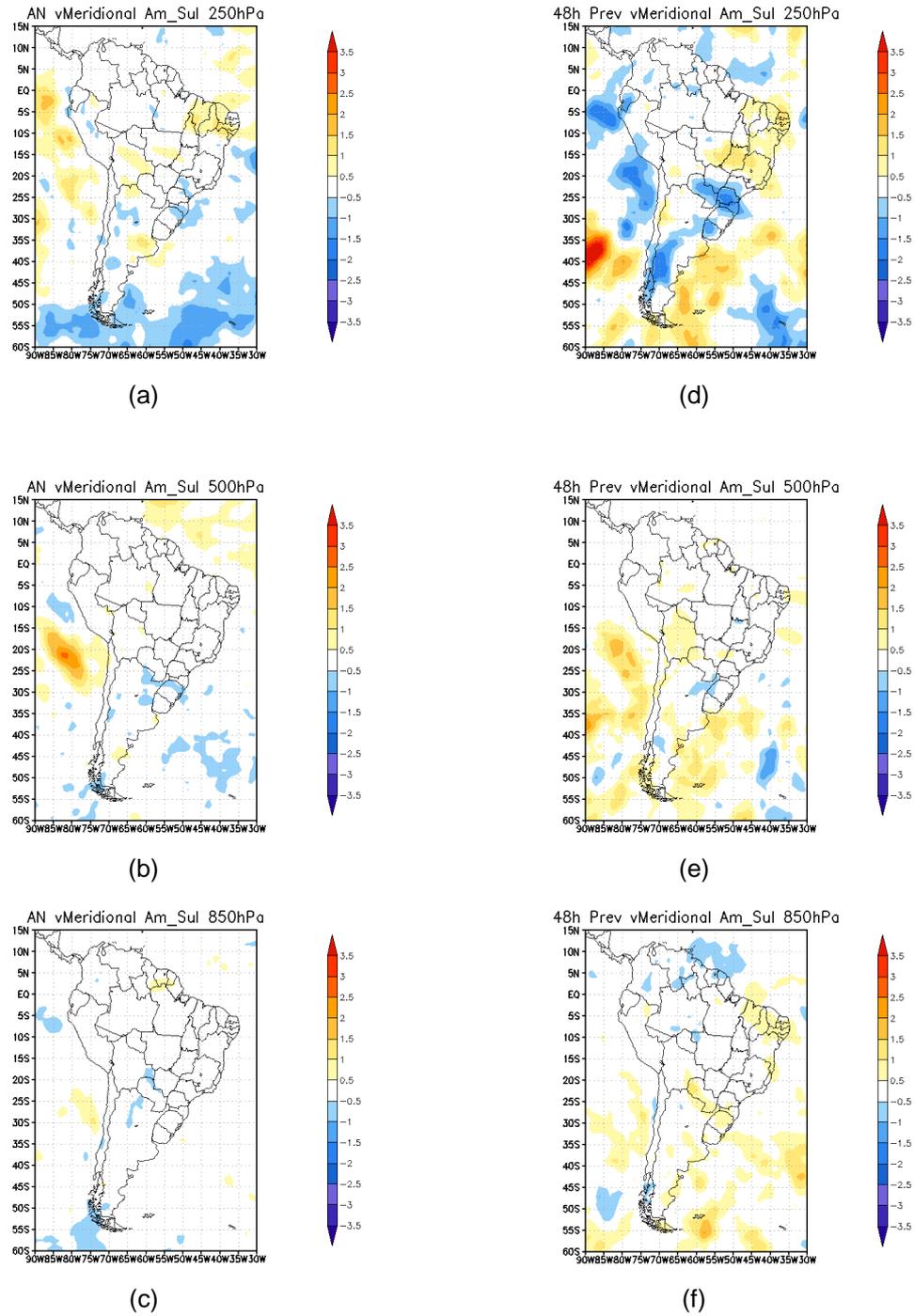


Figura 5.9 - Diferença entre o REQM da componente meridional do vento (m/s) entre o experimento LETKF\_rad e o experimento LETKF\_conv, para Análises em (a), (b) e (c) e 48 horas de Previsões em (d), (e), (f), para os níveis 250hPa, 500hPa e 850hPa, respectivamente. Os valores representam a média para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários 00, 06, 12 e 18Z, para as Análises; e média para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários 00 e 12Z, para Previsões. Diferença negativa mostra vantagem da inclusão dos dados de radiância.

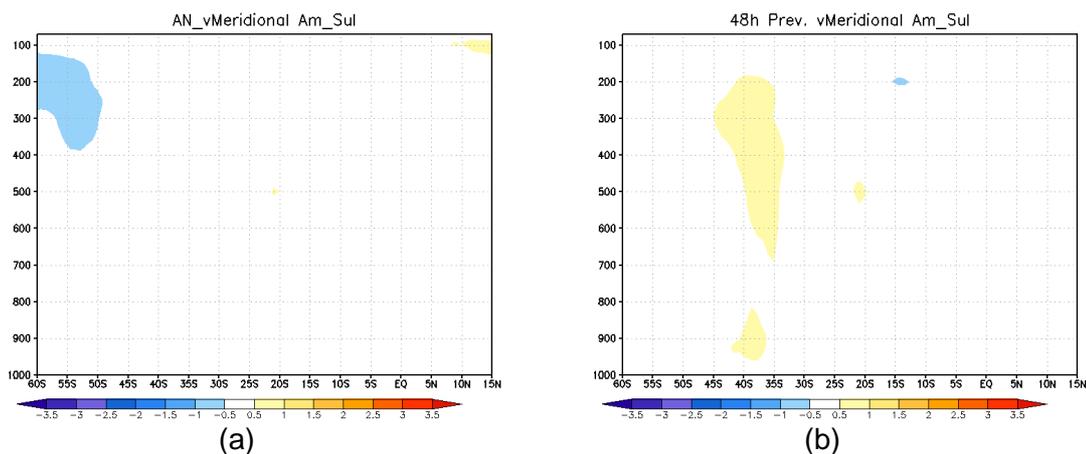


Figura 5.10 - Secção transversal vertical média longitudinal na América do Sul do REQM da componente meridional do vento (m/s) do LETKF\_rad menos REQM do LETKF\_conv, média para o período de 06 a 30 de junho de 2008 para as Análises nos horários das 00Z, 06Z, 12Z e 18Z em (a), e média para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008 para 48 horas de Previsões nos horários das 00Z e 12Z em (b).

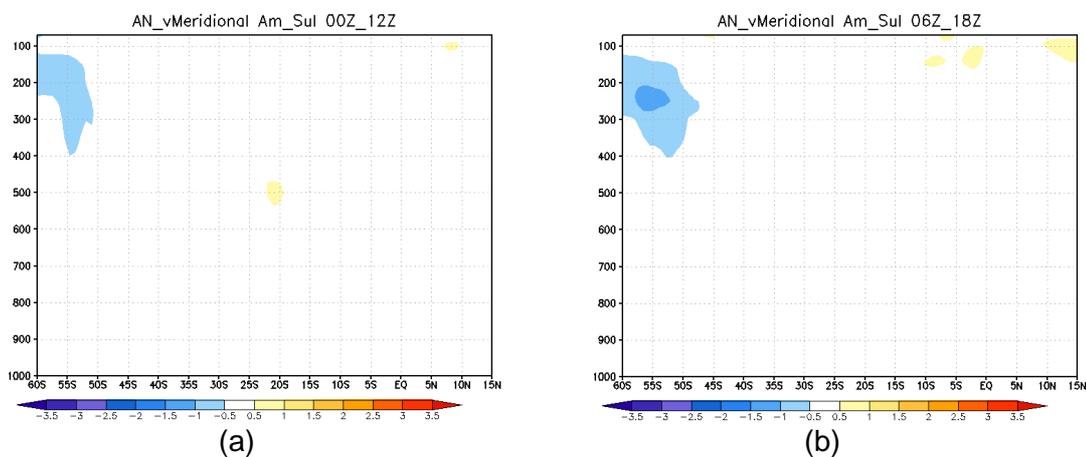


Figura 5.11 - Secção transversal vertical média longitudinal na América do Sul do REQM da componente meridional do vento (m/s) do LETKF\_rad menos REQM do LETKF\_conv, média para o período de 06 a 30 de junho de 2008 para as Análises nos horários das 00Z e 12Z em (a), e para os horários das 06Z e 18Z em (b).

Através da Figura 5.12b que representa o índice viés, observa-se que a tendência do sistema 4D-LETKF até aproximadamente o nível 300hPa é subestimar as análises da variável temperatura, e acima desse nível ocorre uma inversão, com esse sistema tendendo a superestimar essa variável. O oposto é observado para o sistema GPSAS, onde esse sistema tende a superestimar as análises de temperatura até o nível aproximado de 400hPa e subestimar essa variável acima desse nível.

No nível de 700hPa, conforme aconteceu para o REQM, ocorreu a maior diferença nas análises entre os dois sistemas, com viés do GPSAS próximo de zero e viés do LETKF\_rad próximo a -1,5 K, indicando que, para esse nível, os valores de temperatura obtidos pelo GPSAS estão mais próximas das análises do NCEP do que o LETKF\_rad. Entretanto, essa melhor representação do GPSAS em relação ao LETKF\_rad não é refletida no viés da previsão, onde esse nível apresenta o maior erro.

As Figuras 5.13 a 5.16 mostram séries temporais de REQM e viés para análises e previsões de Temperatura. Os níveis mostrados nas figuras são 250hPa, 500hPa e 850hPa, e a região e período são os mesmos usados na Figura 5.12, para LETKF\_rad, LETKF\_conv e GPSAS.

Na Figura 5.13, pode-se observar que o LETKF\_rad apresenta os menores erros REQM durante toda a série temporal no nível de 850hPa (Figura 5.13c). No nível de 500hPa (Figura 5.13b) o LETKF\_rad apresenta menores erros na maior parte do período de estudo exceto no período compreendido entre os dias 10 e 11 e entre os dias 21 e 24 de junho, onde o GPSAS apresentou erros menores. No nível de 250hPa (Figura 5.13a) hora o LETKF\_rad apresenta menores erros, hora é o GPSAS que apresenta os menores erros.

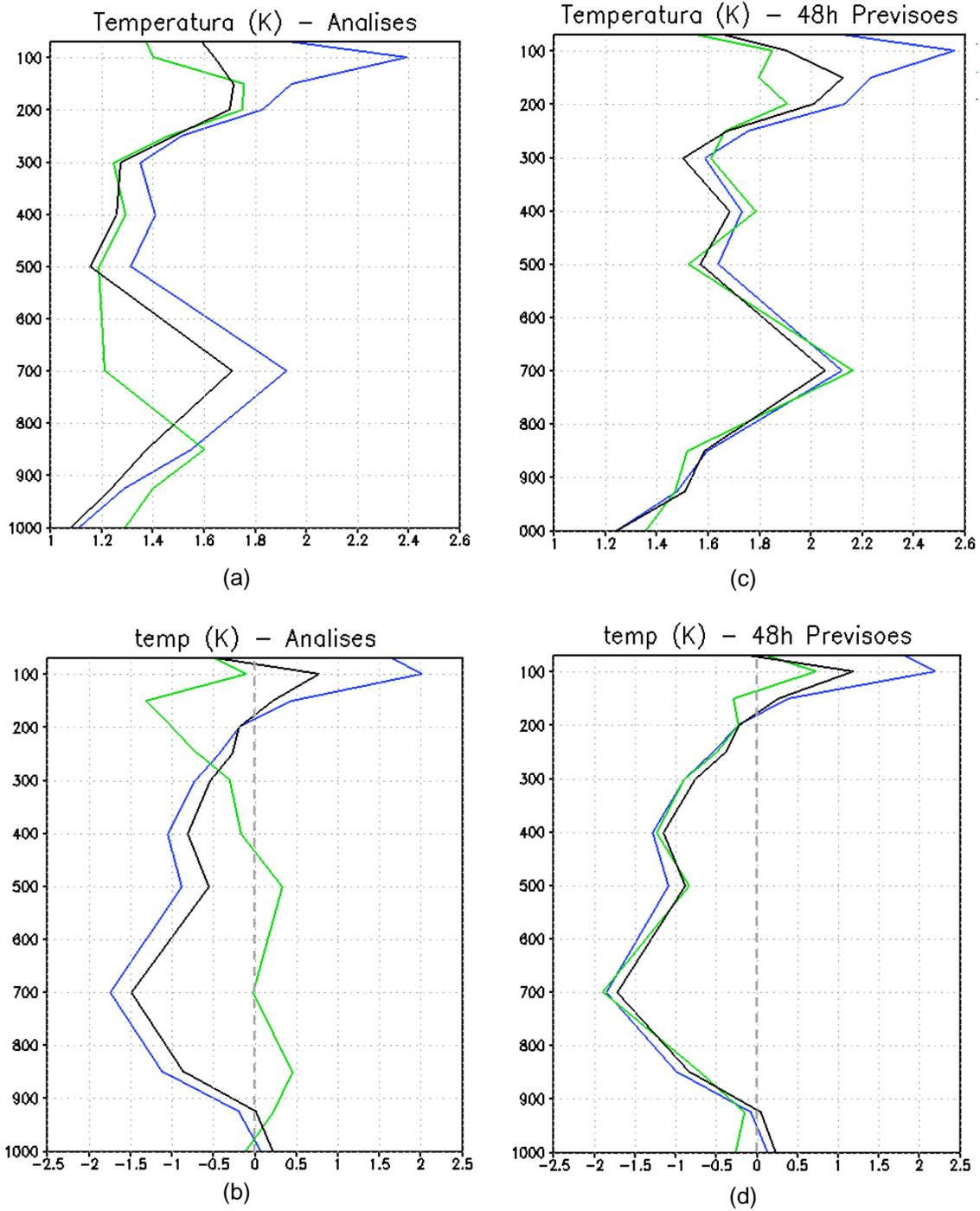


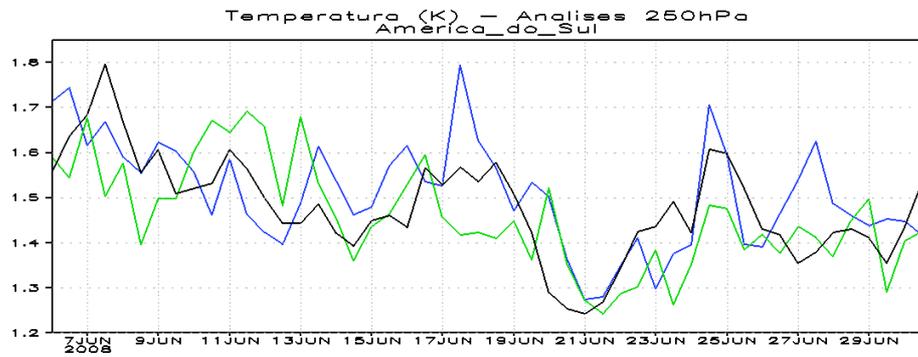
Figura 5.12 - REQM e viés das análises em (a) e (b), e REQM e viés de 48 horas de previsões em (c) e (d), respectivamente, para temperatura (K) do ar, média na América do Sul para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários 00 e 12Z, para as análises, e média para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008 para previsões, horários 00 e 12Z. LETKF\_conv na cor azul, LETKF\_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde.

Analisando-se o viés para as análises de temperatura (Figura 5.14), observa-se que em 500hPa (Figura 5.14b) e em 850hPa (Figura 5.14c) o 4D-LETKF/MCGA (LETKF\_conv e LETKF\_rad) tende a subestimar a temperatura, enquanto que o GPSAS tende a superestimar essa variável nesses níveis. No nível de 250hPa (Figura 5.14a) ambos os sistemas tendem a subestimar as análises de temperatura.

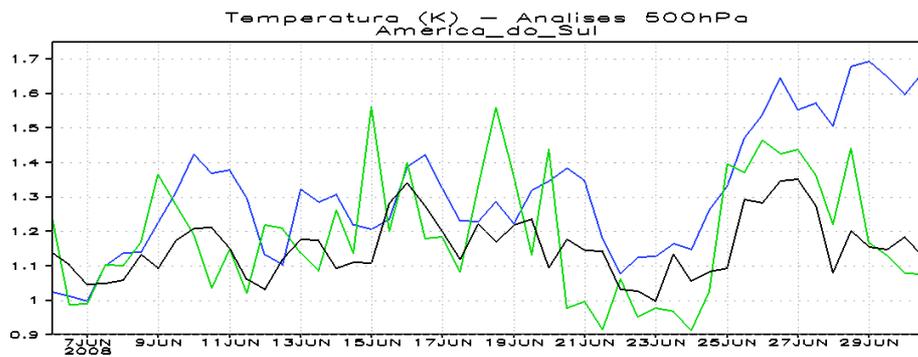
As Figuras 5.15 e 5.16 se referem ao REQM e viés para 48 horas de previsões, respectivamente. Quanto as séries temporais do REQM (Figura 5.15), o LETKF\_rad apresentou valores de REQM ligeiramente menores que o LETKF\_conv na maior parte das séries temporais para previsões nos três níveis mostrados. Quanto as diferenças entre os sistemas pode-se observar que o GPSAS apresenta valores de REQM ligeiramente menores que o REQM do 4D-LETKF/MCGA, na maior parte das séries temporais para previsões nos três níveis mostrados.

Quanto ao viés das previsões (Figura 5.16), observa-se que nos níveis de 500hPa (Figura 5.16b) e 850hPa (Figura 5.16c) tanto o 4D-LETKF/MCGA quanto o GPSAS tendem a subestimar a temperatura, ocorrendo o inverso no nível de 250hPa, onde o viés de ambos os sistemas indicam uma superestimativa dessa variável.

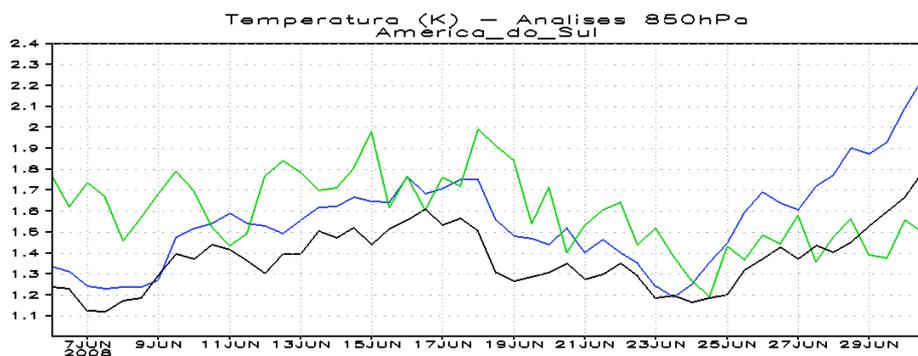
De forma geral, tomando como verdade as análises do NCEP, as análises de temperatura obtidas do experimento com assimilação de radiância pelo 4D-LETKF/MCGA apresentaram REQM similares ou menores que REQM do GPSAS na maioria dos níveis apresentados. Para as previsões os valores de REQM do experimento com assimilação de radiância pelo 4D-LETKF/MCGA foram similares ou menores que os valores de REQM do GPSAS na maioria dos níveis, exceto entre os níveis 200hPa e 100hPa, onde o GPSAS apresentou menores erros.



(a)

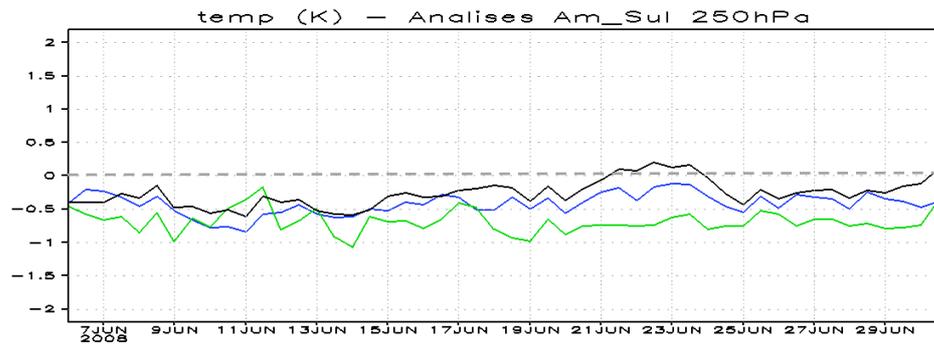


(b)

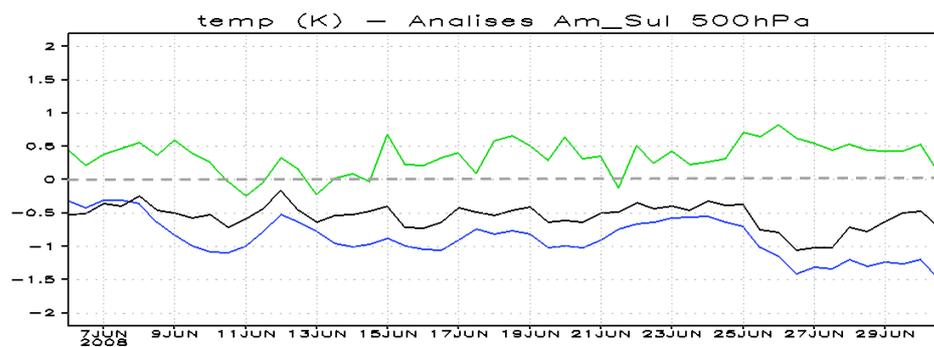


(c)

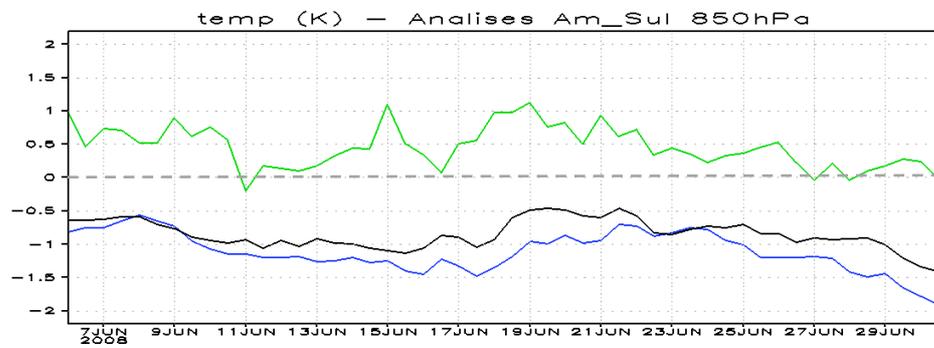
Figura 5.13 - Série temporal do REQM para análises da temperatura (K) do ar, nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), média na América do Sul para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários das 00 e 12Z. LETKF\_conv na cor azul, LETKF\_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde.



(a)

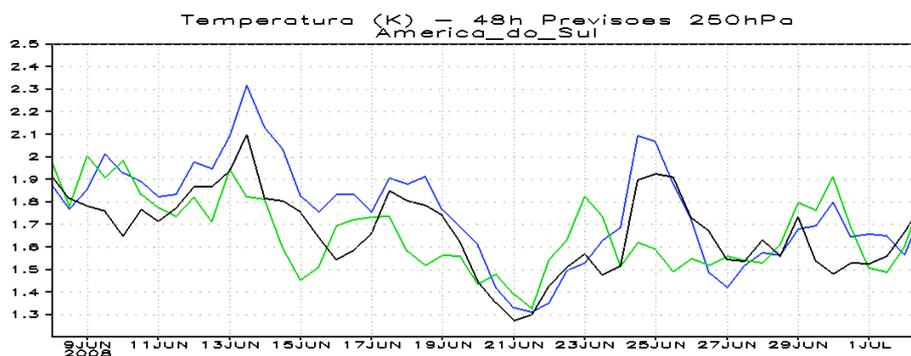


(b)

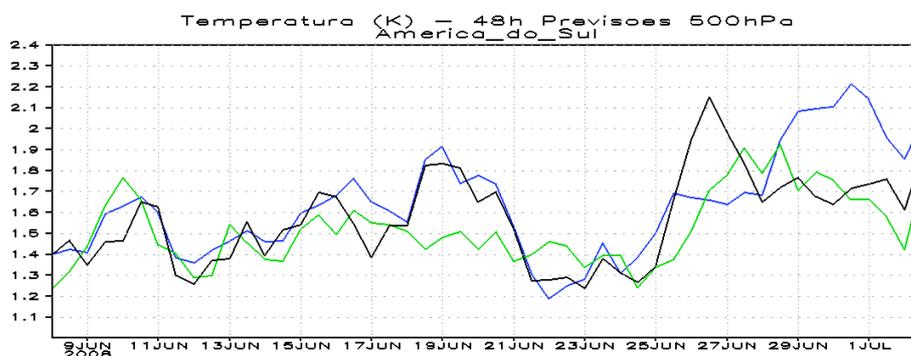


(c)

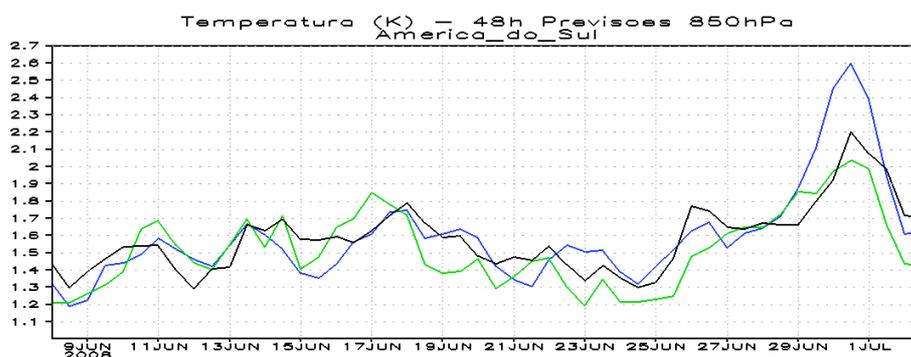
Figura 5.14 - Série temporal do viés para análises da temperatura (K) do ar, nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), média na América do Sul para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários das 00 e 12Z. LETKF\_conv na cor azul, LETKF\_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde.



(a)

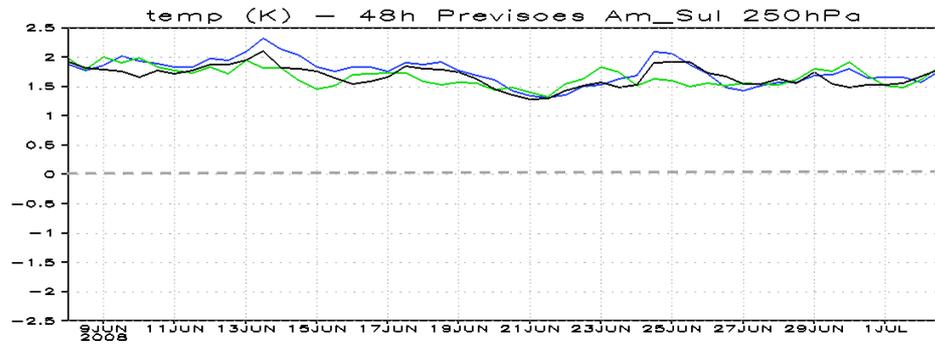


(b)

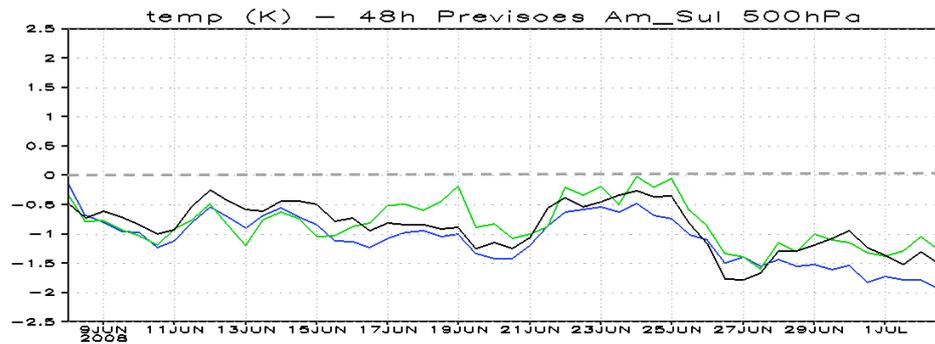


(c)

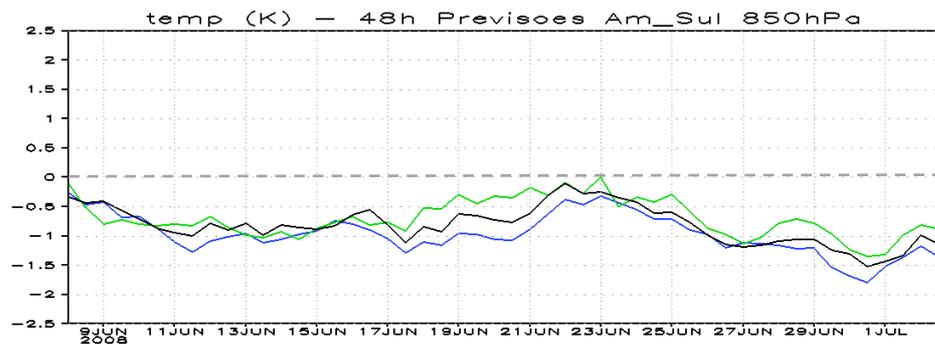
Figura 5.15 - Série temporal do REQM para 48 horas de previsões da temperatura (K) do ar, nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), média na América do Sul para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários 00 e 12 Z. LETKF\_conv na cor azul, LETKF\_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.16 - Série temporal do viés para 48 horas de previsões da temperatura (K) do ar, nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), média na América do Sul para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários 00 e 12Z. LETKF\_conv na cor azul, LETKF\_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde.

### 5.2.2 Umidade específica

A Figura 5.17 mostra perfis do REQM (Figuras 5.17a e 5.17c) e do viés (Figura 5.17b e 5.17d) das análises e previsões para variável umidade específica. Os perfis do REQM dos experimentos LETKF\_rad e LETKF\_conv se apresentaram muito próximos, com uma pequena variação dos erros à superfície, com valores aproximados entre 1,4 e 1,3 g/kg, para as análises, e 1,5 e 1,4 g/kg para previsões, respectivamente. Essa pequena variação está ligada ao fato dos canais do AMSU-A assimilados pelo 4D-LETKF/MCGA não terem sensibilidade a variável umidade. As pequenas diferenças encontradas na superfície podem estar relacionadas a influência das diferenças de temperatura apresentadas na seção 5.2.1.

Comparando-se os erros REQM dos sistemas 4D-LETKF/MCGA e GPSAS, pode-se observar que o GPSAS apresentou os menores valores para umidade específica, tanto para análises (Figura 5.17a) quanto para previsões (Figura 5.17c), exceto nas previsões entre os níveis 1000hPa e 900hPa, onde os erros REQM do GPSAS são ligeiramente maiores. As maiores diferenças do REQM entre os sistemas podem ser observadas no nível de 700hPa, essa diferença também foi observada para os erros REQM das análises de temperatura apresentadas na Figura 5.12a.

Com relação ao viés (Figuras 5.17b e 5.17d), observa-se que a tendência do sistema 4D-LETKF/MCGA até o nível de aproximadamente 900hPa é superestimar a variável umidade específica, e entre 900hPa e 500hPa ocorre uma inversão, com esse sistema tendendo a subestimar essa variável. O sistema GPSAS apresenta o mesmo padrão do viés do 4D-LETKF/MCGA, subestimando essa variável já a partir, aproximadamente, do nível 950hPa. Isso indica que o viés deve estar ligado mais a deficiências no modelo de previsão do tempo e menos ao sistema de assimilação.

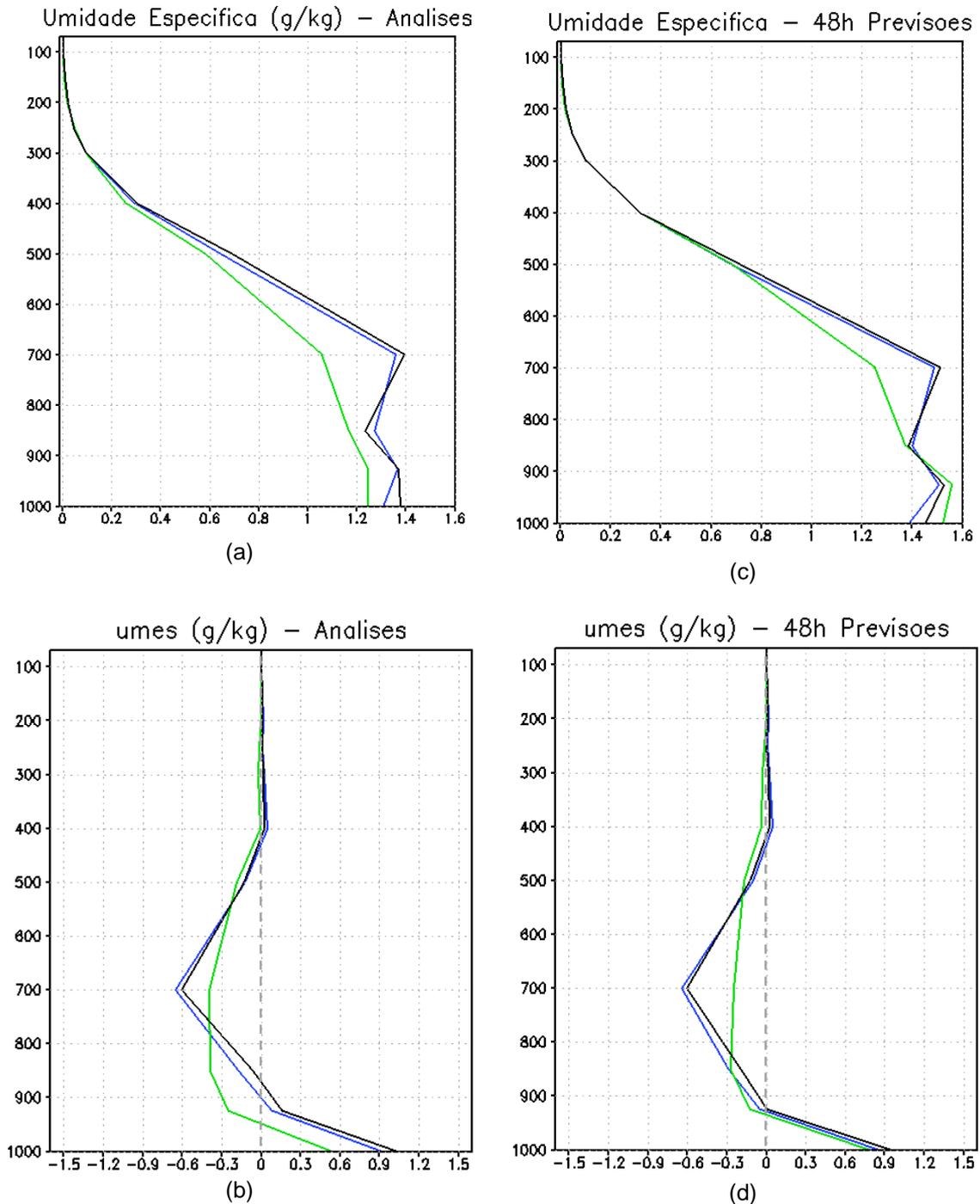


Figura 5.17 - REQM e viés das análises em (a) e (b), e REQM e viés de 48 horas de previsões em (c) e (d), respectivamente, para umidade específica (g/kg), média na América do Sul para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários 00 e 12Z, para as análises, e média para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008 para previsões, horários 00 e 12Z. LETKF\_conv na cor azul, LETKF\_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde.

As Figuras 5.18 a 5.21 mostram séries temporais do REQM e do viés para análises e previsões da umidade específica no nível de 850hPa, onde geralmente está o maior conteúdo de umidade.

Para as análises (Figura 5.18), observa-se que o REQM do experimento LETKF\_rad é ligeiramente menor que o REQM do experimento LETKF\_conv , principalmente de 20 a 30 de junho, período em que ocorre também as maiores diferenças entre os erros dos sistemas 4D-LETKF/MCGA e GPSAS, com menores erros apresentados pelo GPSAS. No período entre 8 a 14 de junho o GPSAS também apresenta os menores erros. No caso do viés (Figura 5.19), observa-se que tanto o 4D-LETKF/MCGA quanto o GPSAS tendem a subestimar as análises de umidade específica, com viés do LETKF\_rad apresentando os valores mais próximos de zero.

As diferenças entre as curvas do REQM das previsões para variável umidade específica dos sistemas 4D-LETKF/MCGA e GPSAS apresentam-se muito pequenas (Figura 5.20), com maiores diferenças entre os dias 17 a 22 de junho, e entre os dias 27 de junho a 02 de julho. No primeiro período o GPSAS apresentou erros maiores, e no segundo período ocorreu uma inversão com o GPSAS apresentando os menores erros. Quanto ao viés das previsões (Figura 5.21), tanto o 4D-LETKF/MCGA quanto o GPSAS tendem a subestimar a umidade específica com valores de viés do LETKF\_rad mais próximos de zero.

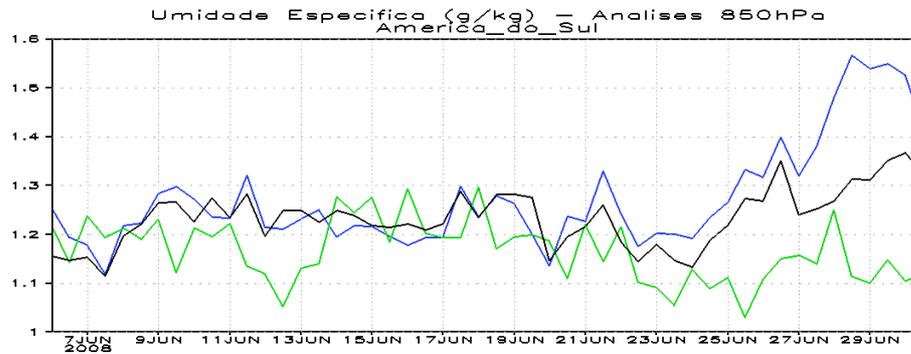


Figura 5.18 - Série temporal do REQM para análises da umidade específica (g/kg), no nível de 850hPa, média na América do Sul para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários das 00 e 12Z. LETKF\_conv na cor azul, LETKF\_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde.

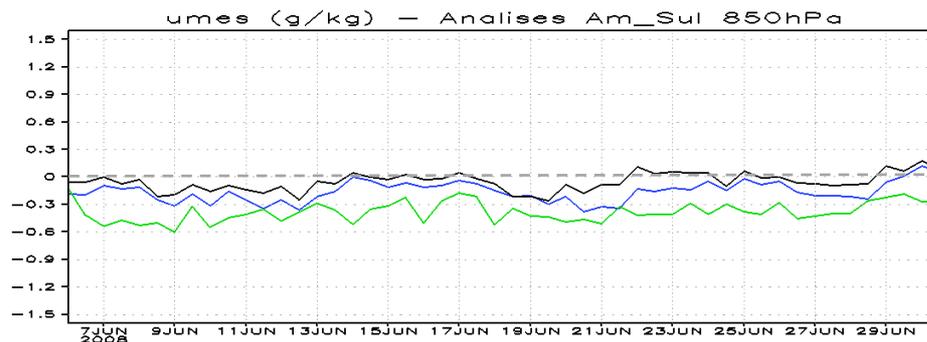


Figura 5.19 - Série temporal do viés para análises da umidade específica (g/kg), no nível de 850hPa, média na América do Sul para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários das 00 e 12Z. LETKF\_conv na cor azul, LETKF\_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde.

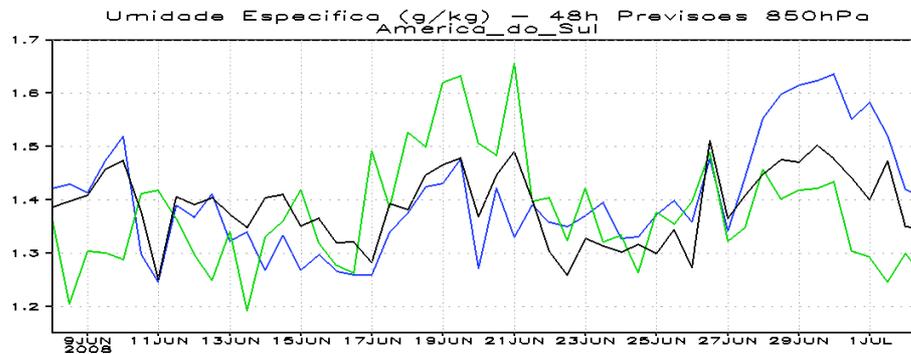


Figura 5.20 - Série temporal do REQM para 48 horas de previsões da umidade específica (g/kg), no nível 850hPa, média na América do Sul para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários 00 e 12Z. LETKF\_conv na cor azul, LETKF\_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde.

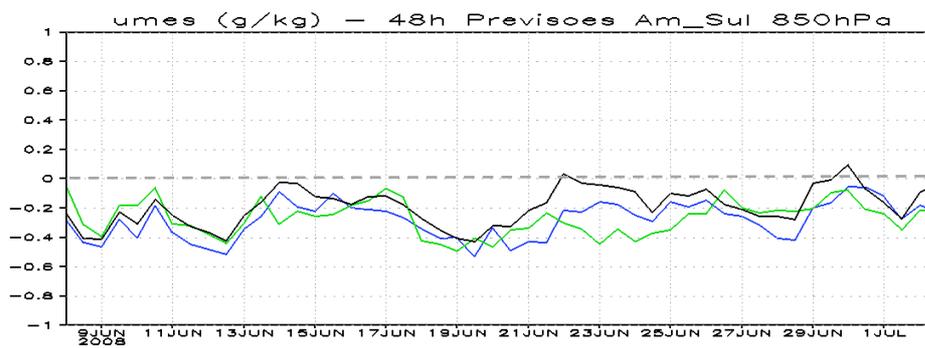


Figura 5.21 - Série temporal do viés para 48 horas de previsões da umidade específica (g/kg), no nível 850hPa, média na América do Sul para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários 00 e 12Z. LETKF\_conv na cor azul, LETKF\_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde.

### 5.2.3. Componente zonal do vento

A Figura 5.22 mostra perfis do REQM e do viés das análises e previsões para a componente zonal do vento. Com relação aos experimentos LETKF\_rad e LETKF\_conv pode-se observar que as maiores diferenças para essa variável encontram-se acima do nível de 300hPa onde o LETKF\_rad apresenta menores erros REQM que o LETKF\_conv, tanto para análises quanto para previsões (Figuras 5.22a e 5.22c). No caso do viés as maiores diferenças encontram-se acima do nível de 500hPa, onde o LETKF\_rad apresenta viés mais próximo de zero nos altos níveis para análises (Figuras 5.22b), e viés mais próximo de zero em praticamente todo o perfil para previsões (Figuras 5.22d).

Comparando-se agora os sistemas 4D-LETKF/MCGA e GPSAS, pode-se observar que as análises (Figura 5.22a) do 4D-LETKF/MCGA apresentam erros REQM menores que o GPSAS em todos os níveis, com maior variação dos erros no nível de 250hPa. Para as previsões (Figura 5.22c) os erros REQM do GPSAS são menores que os erros do 4D-LETKF/MCGA entre os níveis 1000hPa até aproximadamente 400hPa. Acima de 400hPa o experimento LETKF\_rad apresenta erros REQM menores que o GPSAS. As maiores diferenças do REQM entre os sistemas 4D-LETKF/MCGA e GPSAS são observadas para o campo das análises, o mesmo foi verificado para a variável temperatura, conforme apresentado na Figura 5.12.

Ainda com relação à Figura 5.22, observa-se que o viés (Figura 5.22b) do experimento LETKF\_rad apresenta-se mais próxima de zero do que o GPSAS na maior parte dos níveis, com maior variação entre 850hPa e 700hPa. Observa-se ainda, que o sistema GPSAS tende a superestimar a componente zonal do vento em praticamente todo o perfil. Os maiores valores do viés do sistema 4D-LETKF/MCGA encontram-se no nível de 100hPa, com esse sistema tendendo a superestimar essa variável nesse nível. Analisando-se

agora as diferenças de viés para as previsões (Figura 5.22d), observa-se que o 4D-LETKF/MCGA apresenta valores mais próximos de zero do que o GPSAS na maior parte do perfil, com menor viés para LETKF\_rad. Nota-se que os maiores valores do viés para o 4D-LETKF/MCGA tanto para análises (Figura 5.22b) quanto para previsões (Figura 5.22d) encontram-se no nível 100hPa.

As Figuras 5.23 a 5.26 mostram séries temporais do REQM para análises e previsões da componente zonal do vento. Na Figura 5.23, observa-se que as análises do 4D-LETKF/MCGA apresenta erros REQM menores que as análises do GPSAS, nos 3 níveis mostrados, durante todo o período da série temporal. Quanto ao viés (Figura 5.24) pode-se observar que o GPSAS tende a superestimar as análises da componente zonal do vento nos níveis de 500hPa (Figura 5.24b) e 850hPa (Figura 5.24c), enquanto que o 4D-LETKF/MCGA tende a subestimar as análises dessa componente entre o período de 6 a 19 de junho em 500hPa. Em 850hPa o sistema 4D-LETKF/MCGA apresenta viés mais próximo de zero, exceto entre 19 a 23 de junho com tendência a superestimar a variável nesse período. Em 250hPa tanto o GPSAS quanto o 4D-LETKF/MCGA apresentam viés próximos de zero, exceto no período entre 19 a 23 de junho, onde o 4D-LETKF/MCGA tende a subestimar a componente zonal do vento, e o GPSAS tende a superestimar essa componente.

Com relação às previsões, pode-se observar que as diferenças entre as curvas dos erros REQM (Figura 5.25) para os sistemas 4D-LETKF/MCGA e GPSAS apresentam-se muito pequenas, no entanto no nível de 850hPa (Figura 5.25c) os erros do GPSAS apresentam-se menores que os erros do 4D-LETKF/MCGA no período de 21 de junho a 02 de julho. Quanto ao viés (Figura 5.26) o sistema GPSAS apresentou valores mais próximos de zero na maior parte da série temporal para os níveis mostrados.

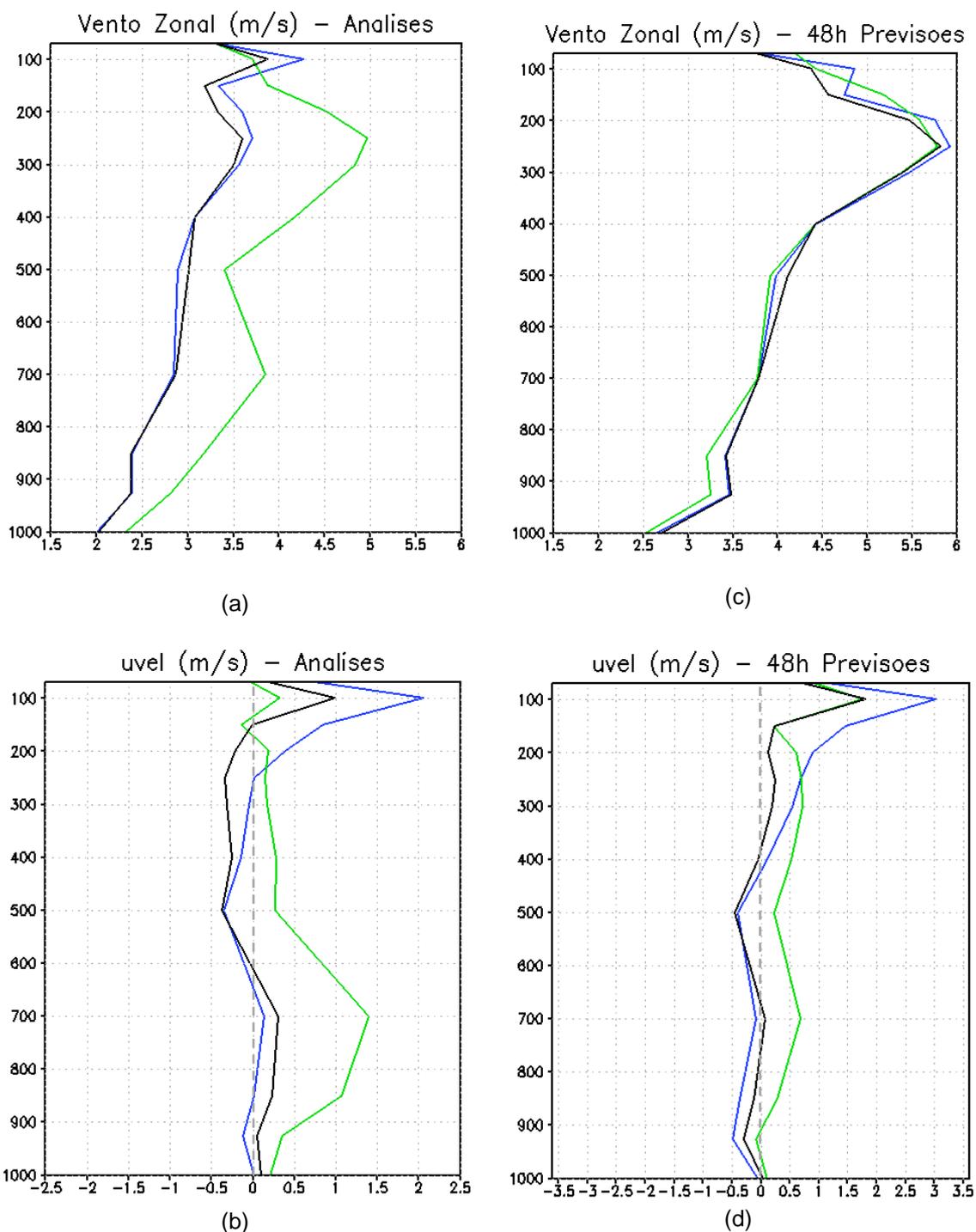
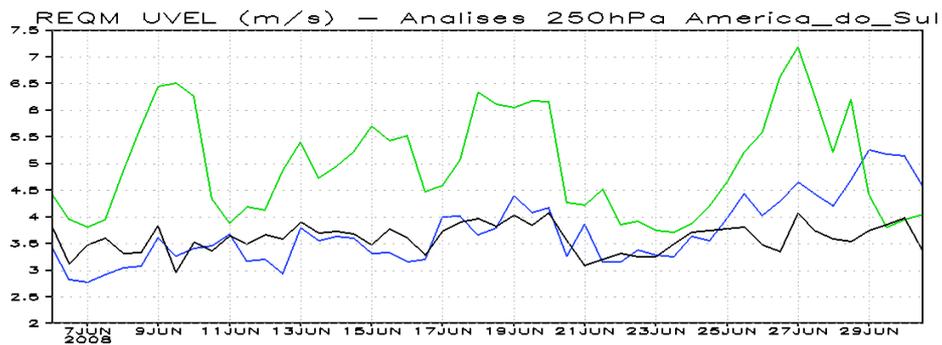
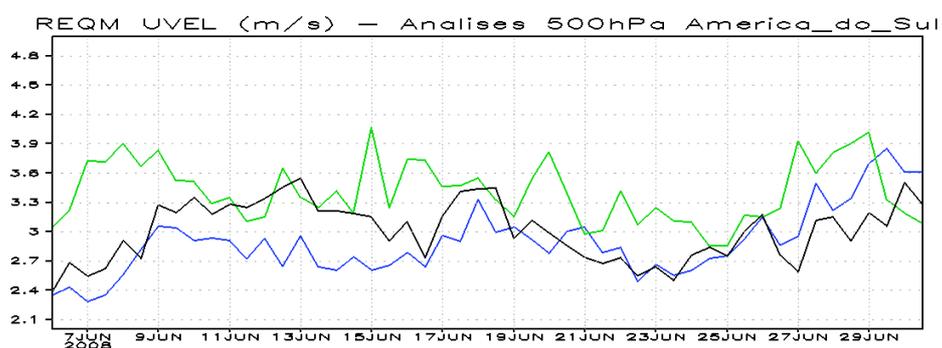


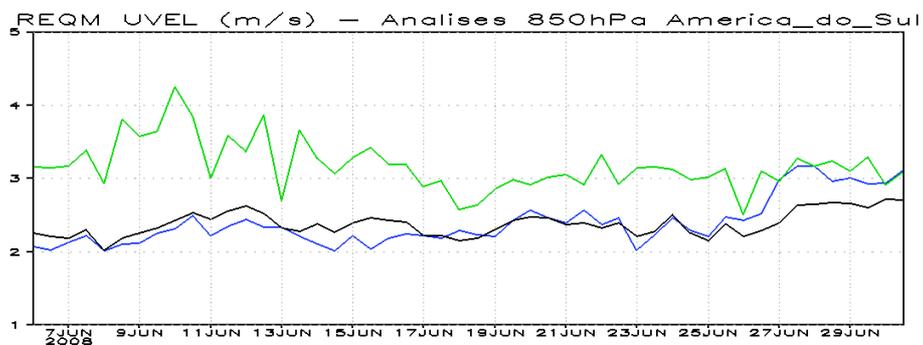
Figura 5.22 - REQM e viés das análises em (a) e (b), e REQM e viés de 48 horas de previsões em (c) e (d), respectivamente, para componente zonal do vento (m/s), média na América do Sul para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários 00 e 12Z, para as análises, e média para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008 para previsões, horários 00 e 12Z. LETKF\_conv na cor azul, LETKF\_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde.



(a)

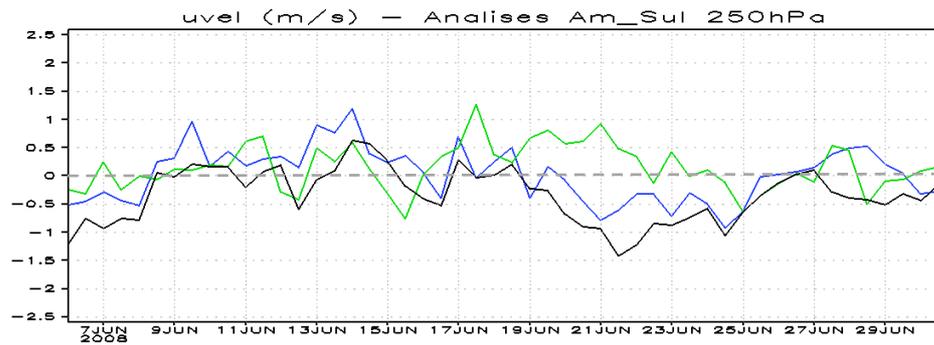


(b)

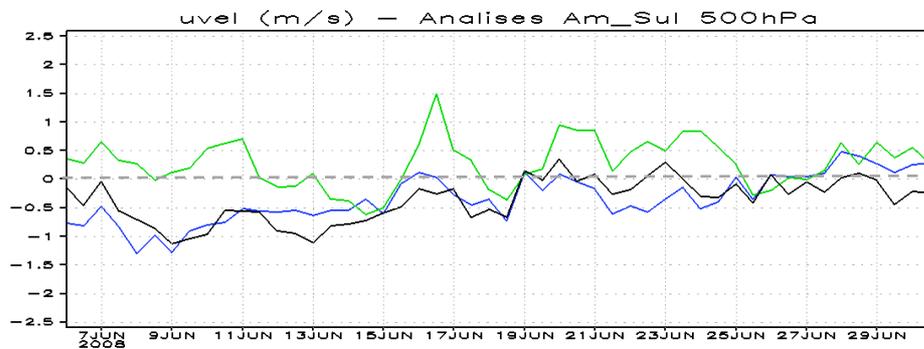


(c)

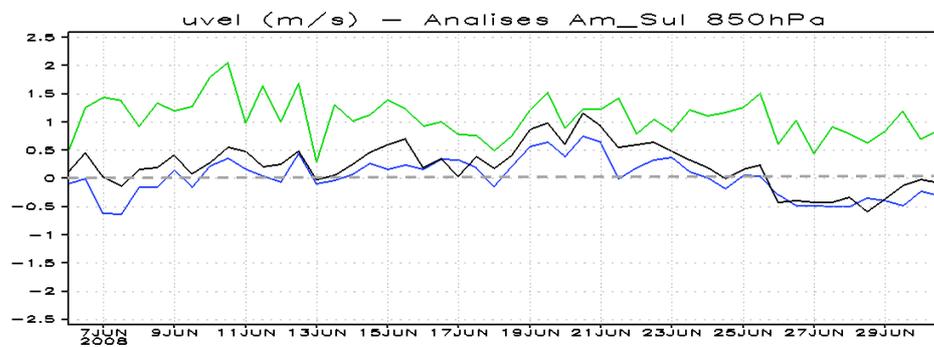
Figura 5.23 - Série temporal do REQM para análises da componente zonal do vento (m/s), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), média na América do Sul para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários das 00 e 12Z. LETKF\_conv na cor azul, LETKF\_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde.



(a)

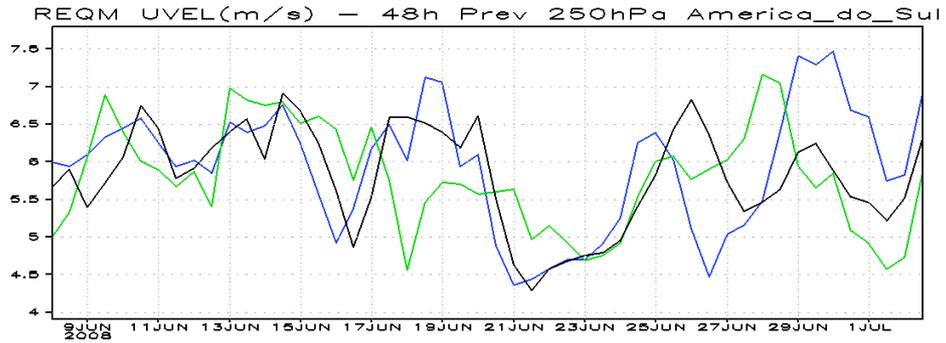


(b)

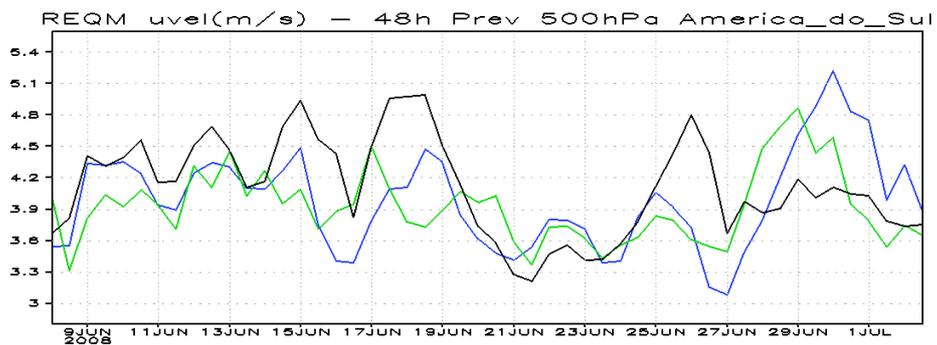


(c)

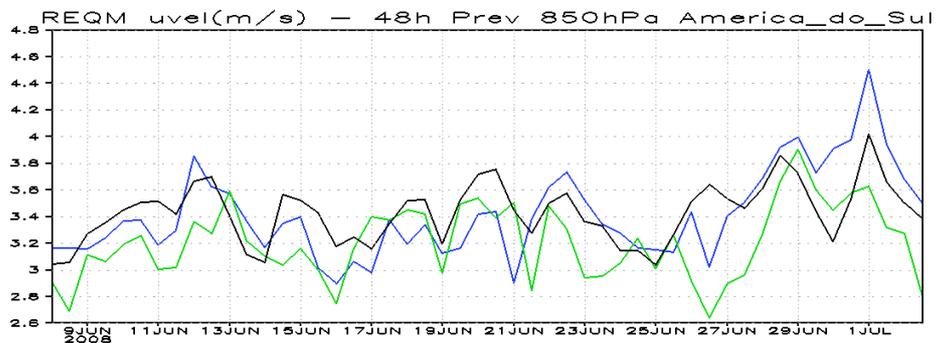
Figura 5.24 - Série temporal do viés para análises da componente zonal do vento (m/s), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), média na América do Sul para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários das 00 e 12Z. LETKF\_conv na cor azul, LETKF\_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.25 - Série temporal do REQM para 48 horas de previsões da componente zonal do vento (m/s), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), média na América do Sul para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários 00 e 12 Z. LETKF\_conv na cor azul, LETKF\_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde.

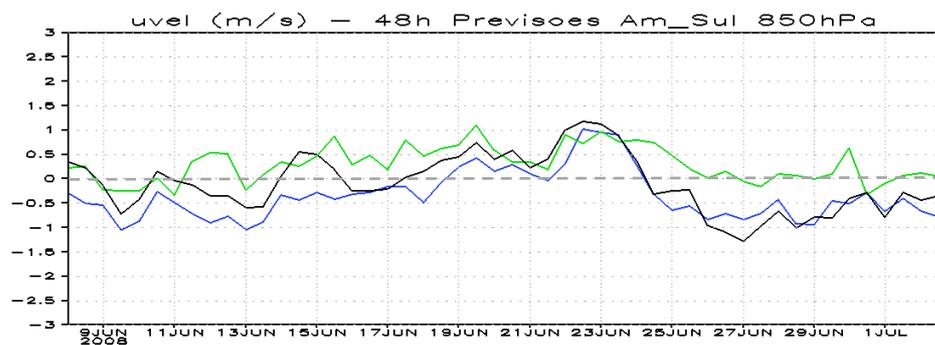
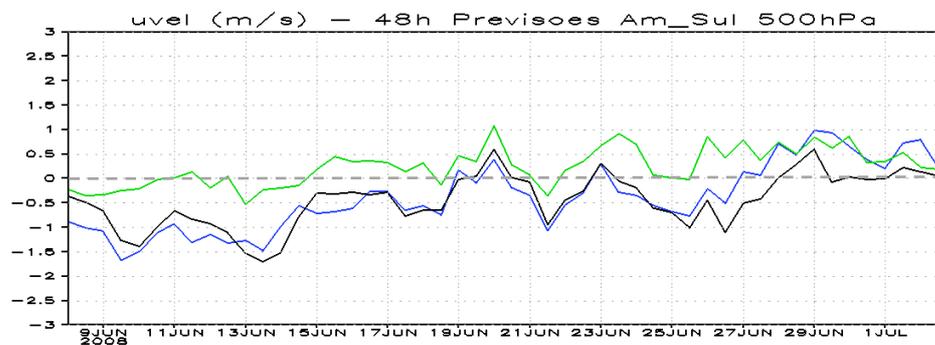
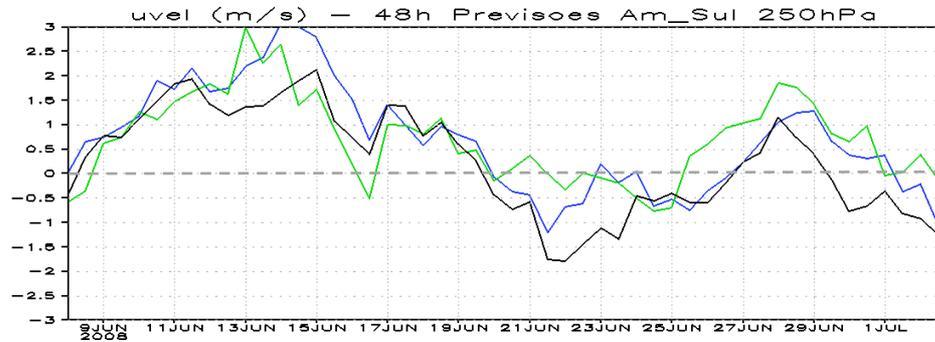


Figura 5.26 - Série temporal do viés para 48 horas de previsões da componente zonal do vento (m/s), no nível 850hPa, média na América do Sul para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários 00 e 12Z. LETKF\_conv na cor azul, LETKF\_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde.

#### 5.2.4. Componente meridional do vento

Analisando-se a Figura 5.27a, pode-se observar que praticamente não houve diferença entre as curvas dos erros REQM para os experimentos LETKF\_rad e LETKF\_conv para as análises da componente meridional do vento. Embora a assimilação direta de radiância não tenha apresentado melhora para as análises dessa variável, ainda assim o sistema 4D-LETKF/MCGA apresentou erros REQM menores que o GPSAS em quase todo o perfil.

Para o viés das análises (Figura 5.27b), pode-se observar que o sistema 4D-LETKF/MCGA apresenta valores mais próximos de zero, enquanto que o GPSAS tende a subestimar a componente meridional do vento em todo o perfil. A série temporal apresentada na Figura 5.28 mostra que os erros REQM das análises do 4D-LETKF/MCGA são menores que o GPSAS durante todo o período, para os 3 níveis observados. Quanto ao viés (Figura 5.29) pode-se observar que o GPSAS tende a superestimar a componente meridional do vento em 850hPa em quase todo o período da série, enquanto que o 4D-LETKF/MCGA apresenta valores mais próximos de zero. Nos outros níveis os valores do viés para ambos os sistemas se apresentam muito próximos.

Com relação às previsões (Figura 5.27c) pode-se observar uma pequena diferença entre as curvas dos erros REQM para os experimentos LETKF\_rad e LETKF\_conv, onde para a componente meridional do vento, o experimento LETKF\_conv apresenta um erro REQM ligeiramente menor que o LETKF\_rad. No entanto, as diferenças entre os erros REQM dos sistemas 4D-LETKF/MCGA e GPSAS para essa componente do vento são pouco significativas (Figuras 5.27c, 5.30 e 5.31). As maiores diferenças nas previsões podem ser observadas para o viés (Figura 5.27d) em altos níveis (entre 200hPa e 100hPa), onde ambos os sistemas de assimilação tendem a subestimar essa variável.

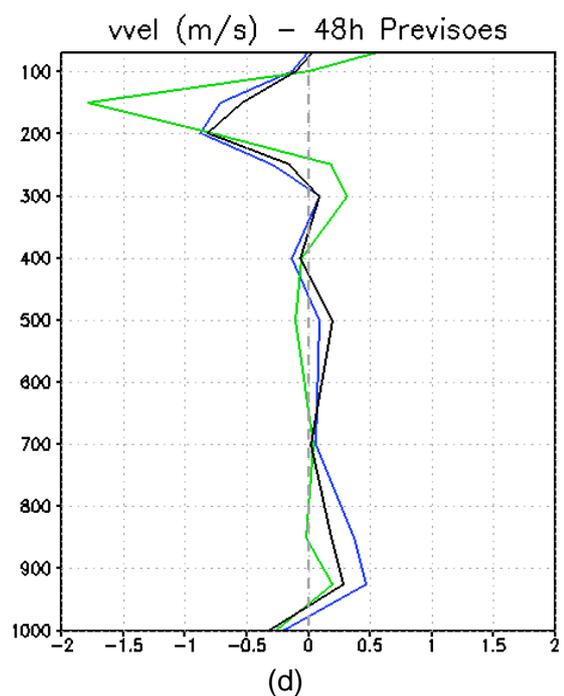
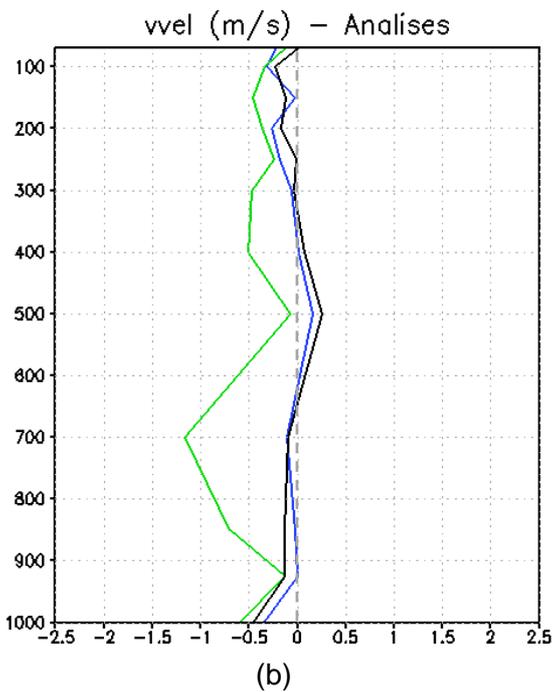
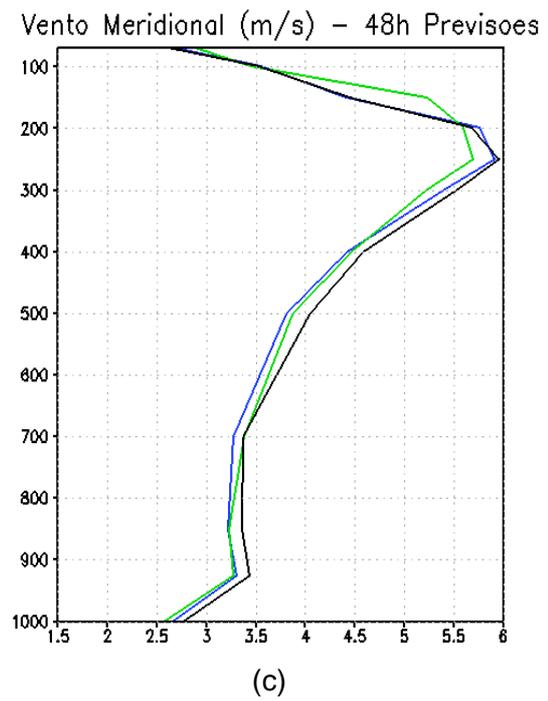
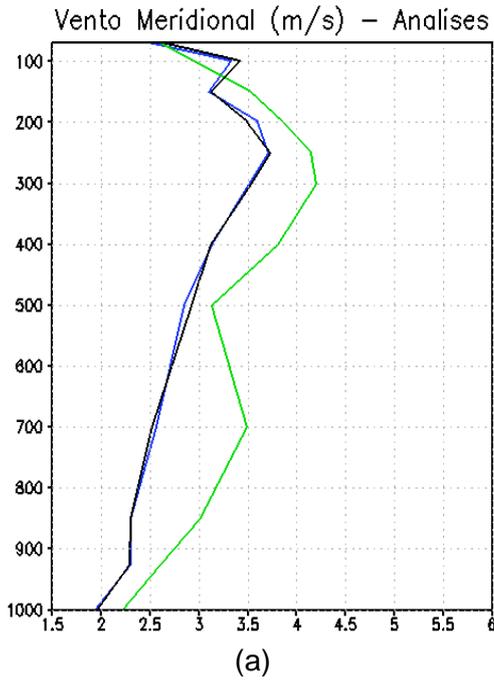
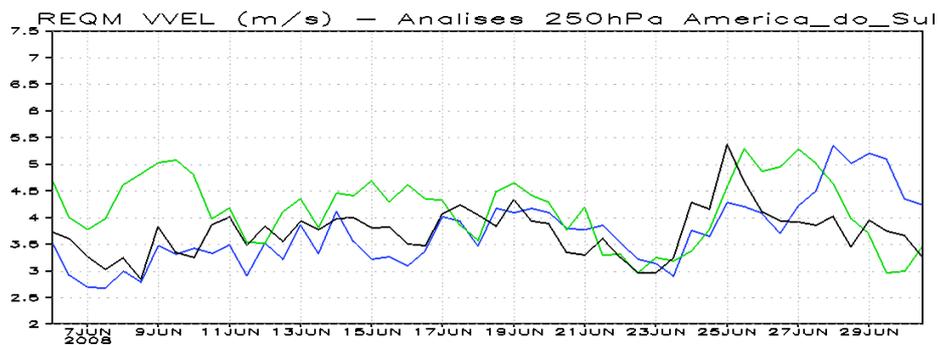
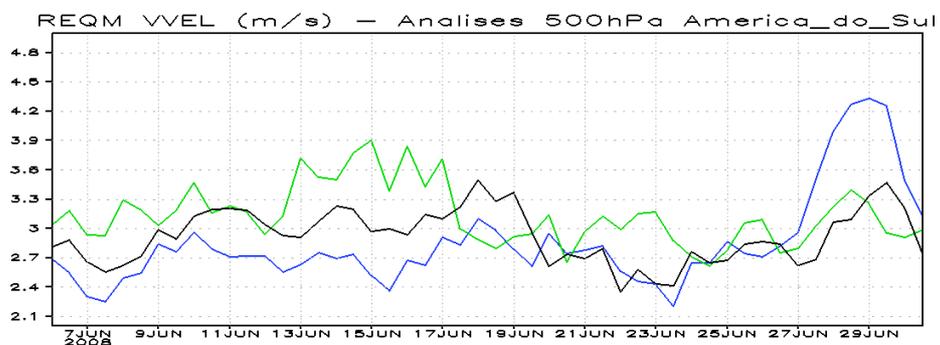


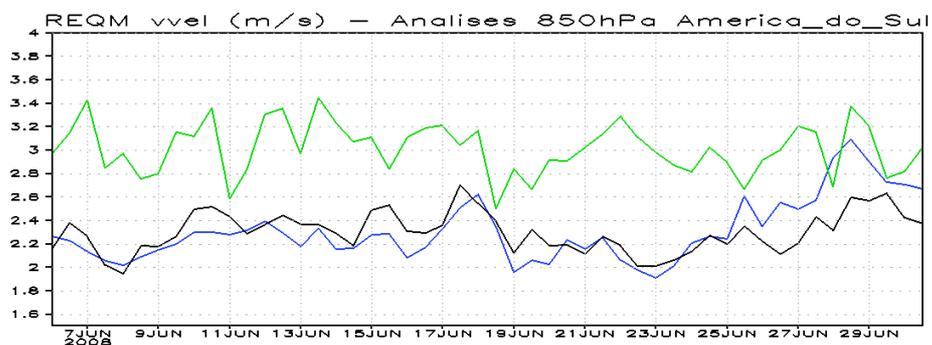
Figura 5.27 - REQM e viés das análises em (a) e (b), e REQM e viés de 48 horas de previsões em (c) e (d), respectivamente, para componente meridional do vento (m/s), média na América do Sul para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários 00 e 12Z, para as análises, e média para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008 para previsões, horários 00 e 12Z. LETKF\_conv na cor azul, LETKF\_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde.



(a)

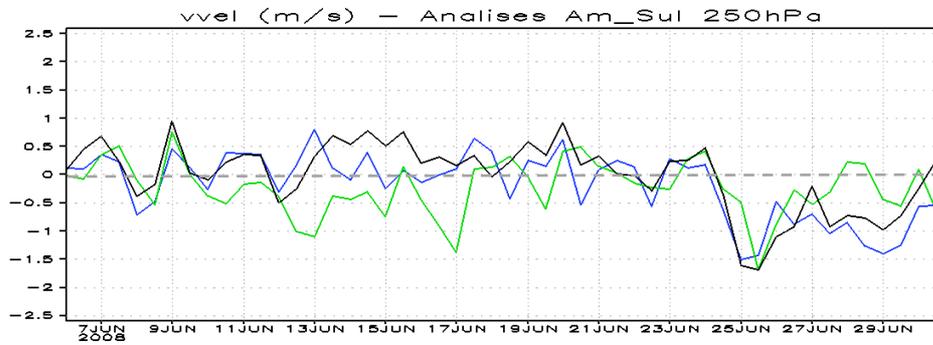


(b)

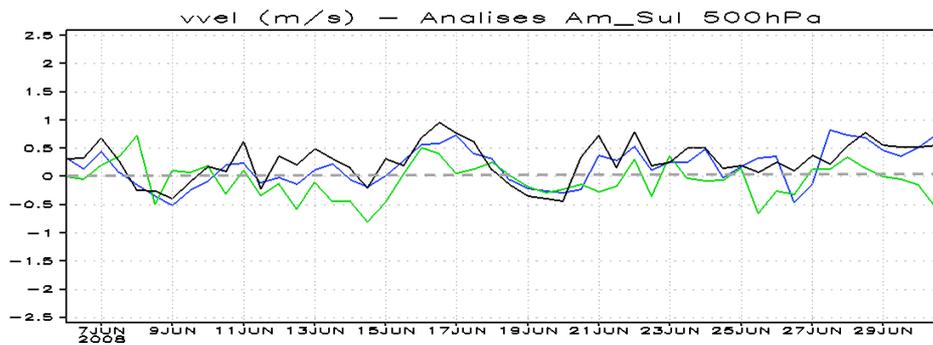


(c)

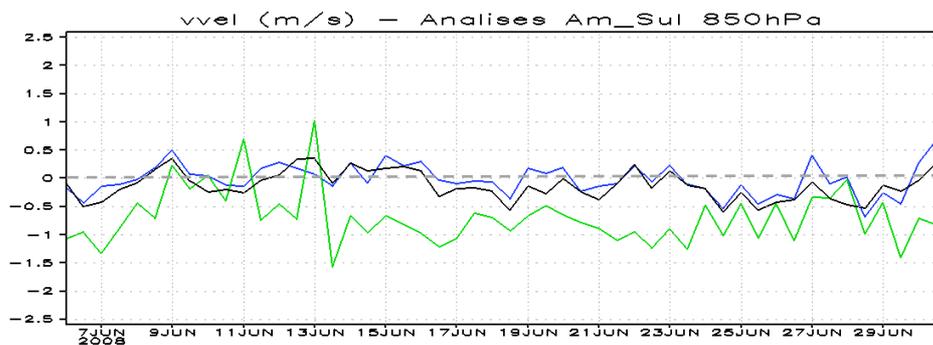
Figura 5.28 - Série temporal do REQM para análises da componente meridional do vento (m/s), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), média na América do Sul para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários das 00 e 12Z. LETKF\_conv na cor azul, LETKF\_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde.



(a)

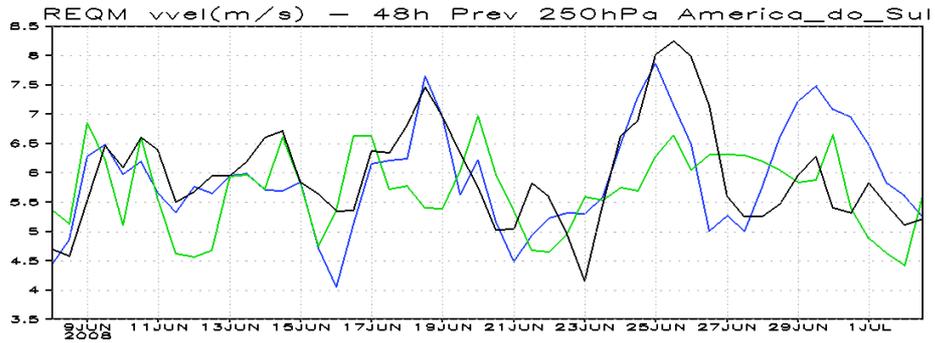


(b)

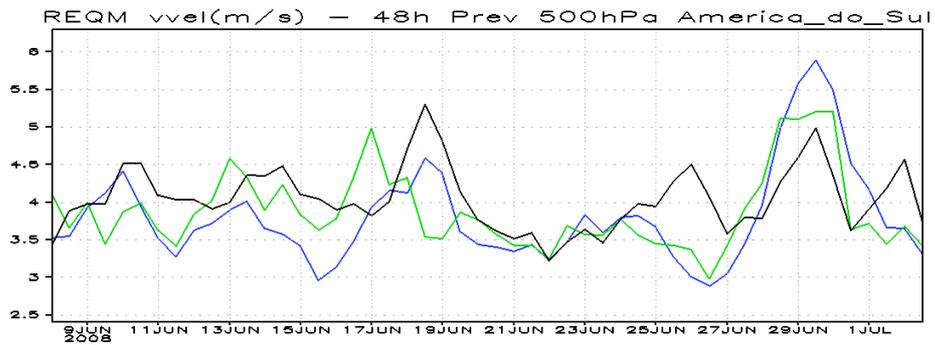


(c)

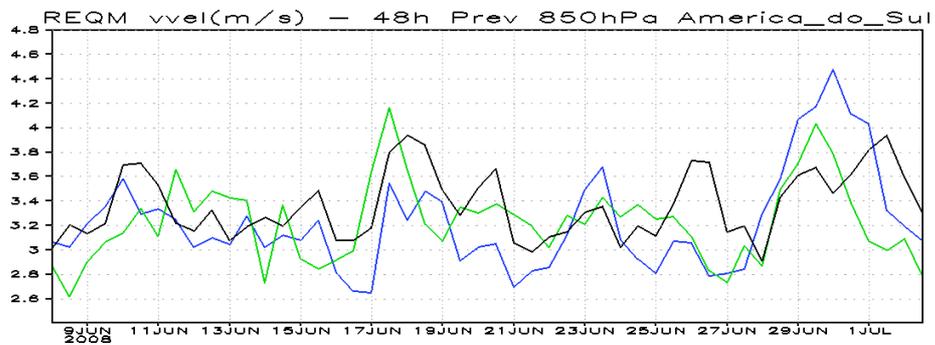
Figura 5.29 - Série temporal do viés para análises da componente meridional do vento (m/s), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), média na América do Sul para o período de 06 a 30 de junho de 2008, horários das 00 e 12Z. LETKF\_conv na cor azul, LETKF\_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde.



(a)

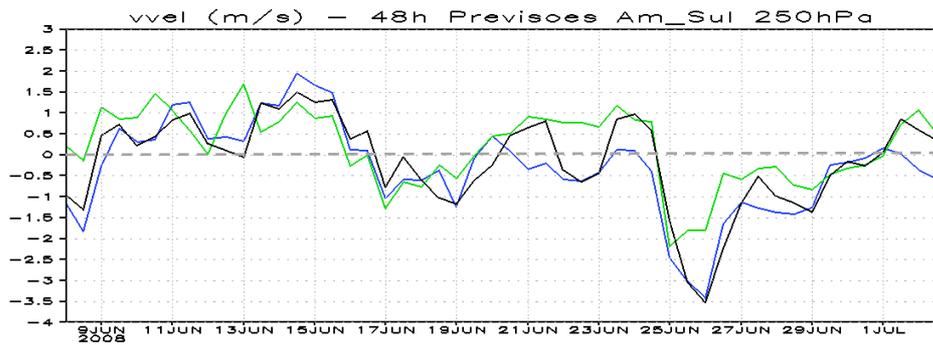


(b)

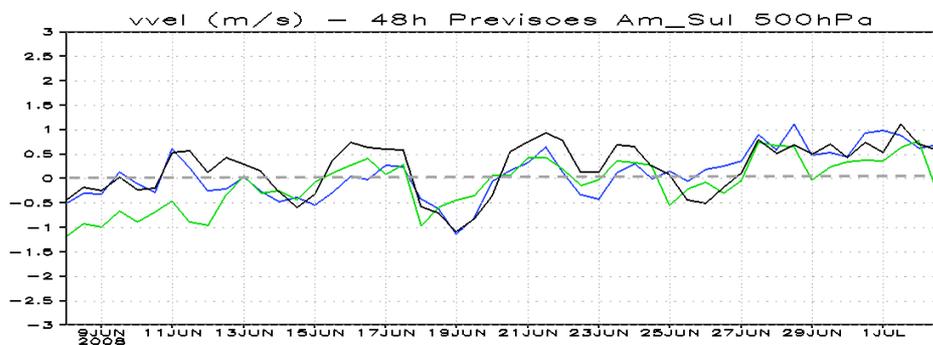


(c)

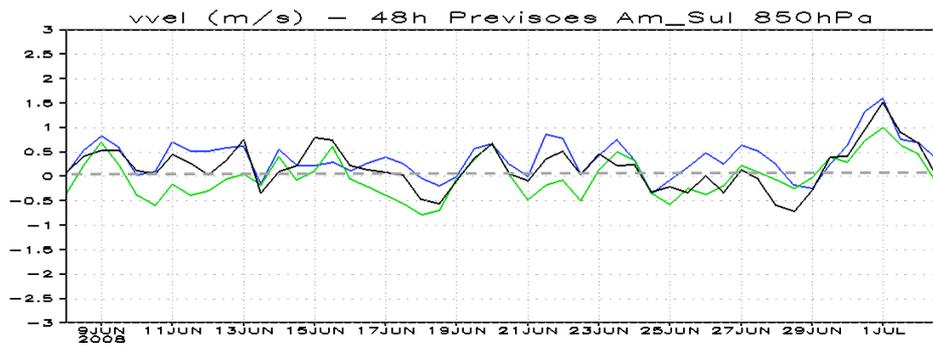
Figura 5.30 - Série temporal do REQM para 48 horas de previsões da componente meridional do vento (m/s), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), média na América do Sul para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários 00 e 12 Z. LETKF\_conv na cor azul, LETKF\_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.31 - Série temporal do viés para 48 horas de previsões da componente meridional do vento (m/s), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), média na América do Sul para o período de 08 de junho a 02 de julho de 2008, horários 00 e 12 Z. LETKF\_conv na cor azul, LETKF\_rad na cor preto, e GPSAS na cor verde.

## **6 AVALIAÇÃO DURANTE O EXPERIMENTO DE CAMPO Mini-BARCA**

Este capítulo apresenta uma validação dos resultados obtidos pelo 4D-LETKF/MCGA, através da comparação das análises/previsões desse sistema com radiossondagens do Experimento Mini-BARCA/LBA (seção 3.3) lançadas na região da Amazônia Legal. A variável analisada é a temperatura do ar, em baixos (850hPa), médios (500hPa) e altos (250hPa) níveis, para o período de 9 a 30 de junho de 2008. Escolheu-se avaliar a temperatura, por ter sido a variável que apresentou o maior ganho, com redução dos erros em praticamente todos os níveis de pressão, a partir da assimilação de radiância pelo 4D-LETKF/MCGA, conforme resultados apresentados no Capítulo 5.

No período do Experimento Mini-BARCA/LBA ocorreram vários sistemas meteorológicos na região, dentre eles: ZCIT, Friagens, Aglomerados convectivos e Linha de instabilidade, conforme comentados na seção 2.3. As análises aqui presentes foram auxiliadas por algumas imagens de satélite meteorológico (ver Apêndice C).

As Figuras 6.1 a 6.5 mostram séries temporais para análises do 4D-LETKF/MCGA com e sem assimilação de radiância (LETKF\_rad e LETKF\_conv, respectivamente), para análises provenientes do sistema do GPSAS e para as radiossondagens. As análises do 4D-LETKF/MCGA e as radiossondagens correspondem aos horários das 00, 06, 12 e 18Z, entretanto pontos de radiossondagens que não foram apresentados significa a não disponibilidade dessa observação naquele(s) horário(s). Os dados do GPSAS disponibilizados pelo CPTEC correspondem apenas aos horários das 00 e 12Z, portanto todos os dados do GPSAS foram plotados apenas para esses horários.

Ressalta-se que as séries temporais (análise e previsão) foram plotadas nos pontos de grade mais próximos da localização da radiossondagem, sem

nenhuma interpolação, ou seja, foram plotadas com as suas respectivas resoluções: com aproximadamente 100 km no 4D-LETKF/MCGA e 60 km no GPSAS.

De um modo geral as análises obtidas pelo sistema 4D-LETKF/MCGA apresentaram concordância com os dados observados nas estações meteorológicas e conseguiram capturar o ciclo diário da temperatura do ar durante o período em questão para ambos os experimentos LETKF\_rad e LETKF\_conv.

Em particular, nas séries temporais para a estação de Carolina-MA (Figura 6.1) observam-se tendências de aquecimento de temperatura em dois períodos: de 10 a 12, e de 14 a 16, em baixos níveis associadas possivelmente a aglomerados de nuvens presente nessa região (Figuras C.1 e C.2). As análises do 4D-LETKF/MCGA não capturaram essas tendências de aquecimento, ainda assim a inclusão das radiancias fez com que as temperaturas ficassem mais próximas do observado, principalmente no período de 14 a 16. O GPSAS, entretanto, capturou essa tendência nesse período (14 a 16). Em baixos níveis, o 4D-LETKF/MCGA subestima a temperatura em praticamente toda série temporal, enquanto o GPSAS superestima. Nos médios e altos níveis as análises do 4D-LETKF/MCGA apresentaram uma maior concordância com as flutuações diárias observadas. Nestes níveis, O GPSAS, apresentou uma leve tendência de superestimativa em médios níveis e subestimativa em altos níveis.

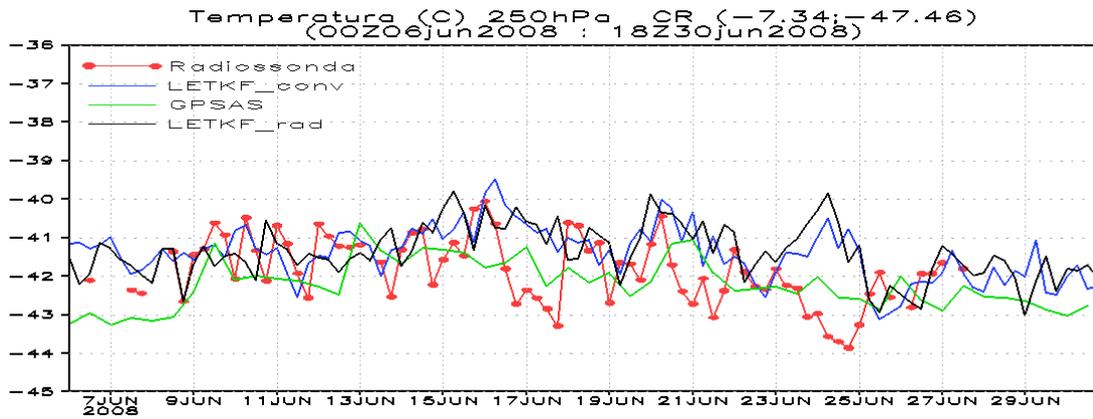
Nas séries temporais para as estações de Rio Branco-AC, Tabatinga-AM, Belém-PA e Manaus-AM (Figuras 6.2 a 6.5, respectivamente) observa-se em 850 hPa que análises dos sistemas 4D-LETKF/MCGA conseguiram capturar na maioria dos casos a flutuabilidade diária entre diferentes períodos, associadas a eventos de Friagens. Nesse nível, nessas estações, o LETKF\_rad apresentou melhores resultados do que o LETKF\_conv, ficando mais próximo

do observado. A tendência de subestimativa da temperatura pelo 4D-LETKF/MCGA nos baixos níveis também é observada nessas estações, novamente com melhores resultados com o uso de dados de radiância.

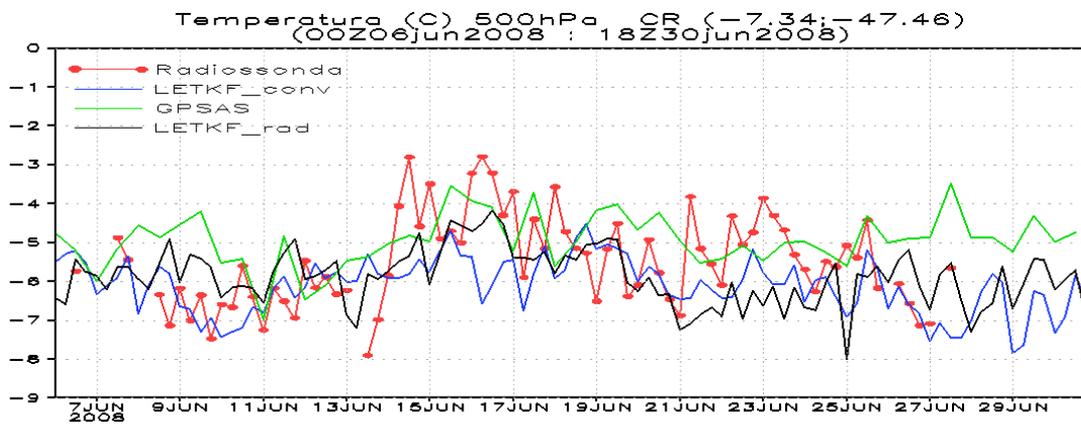
As Figuras 6.6 a 6.8 mostram séries temporais para radiossondagens do Mini-BARCA, para 48 horas de previsão com o sistema GPSAS (com análises das 00 e 12Z), e para 48 horas de previsão com o modelo MCGA/T126L28 utilizando análises das 00 e 12Z do 4D-LETKF/MCGA com e sem assimilação de radiância (LETKF\_rad e LETKF-conv, respectivamente). As observações usadas na comparação com as previsões foram as radiossondagens das estações de Carolina, Rio Branco e Tabatinga pela maior disponibilidade de dados nos horários das 00 e 12Z.

As previsões com o MCGA/T126L28 do CPTEC utilizando análises do 4D-LETKF/MCGA (MCGA/4D-LETKF) favorecem uma boa concordância até 48 horas de previsão. Maiores discrepâncias foram verificadas na estação de Carolina durante períodos onde se observam tendências de aquecimento, em baixos níveis. Ainda assim, a tendência de aquecimento observada durante os dias 10, 11 e 12 de junho foi bem representada pelo MCGA/4D-LETKF\_rad (com radiância). As previsões com o MCGA/4D-LETKF em relação as radiossondagens de Carolina, Rio Branco e Tabatinga apresentaram tendência a subestimativa em baixos níveis e superestimativa em altos níveis.

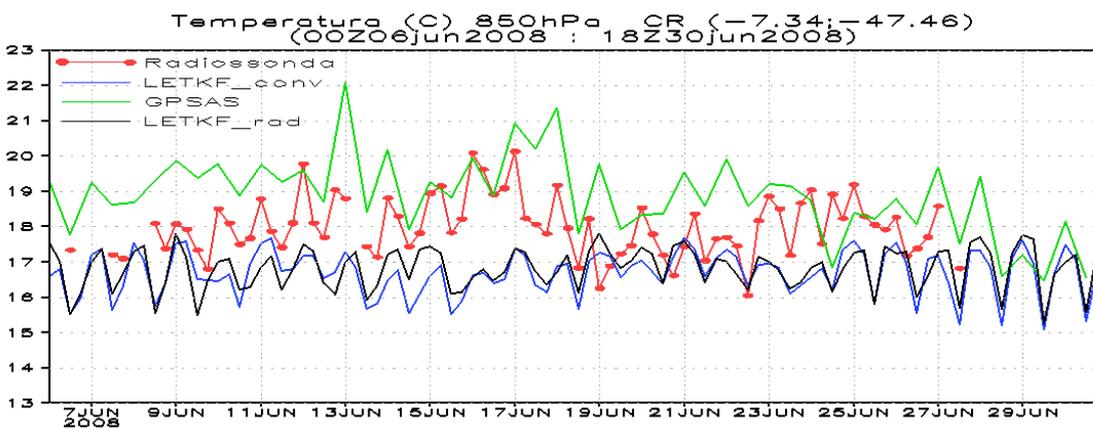
Em suma, os resultados indicaram que o sistema 4D-LETKF/MCGA (com e sem assimilação de radiância) apresentou um melhor desempenho em médios e altos níveis em todas as estações meteorológicas em questão. Em baixos níveis o sistema apresentou uma tendência a subestimativa e dificuldades em capturar tendências de aquecimento; nesse caso o GPSAS conseguiu (entre 14 e 16 de junho). Vale ressaltar a resolução espacial baixa do 4D-LETKF/MCGA e a necessidade de uma maior resolução espacial também na vertical (O GPSAS teve 42 níveis; o 4D-LETKF/MCGA, 28 níveis).



(a)

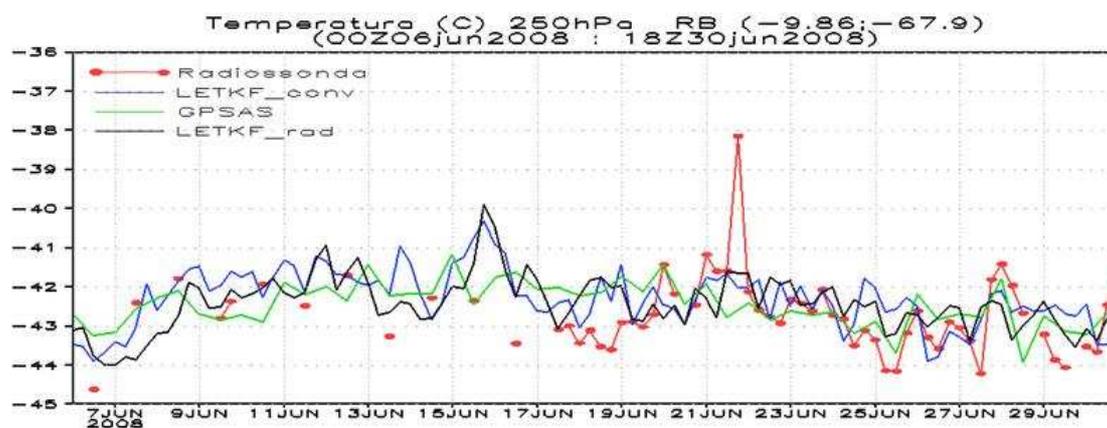


(b)

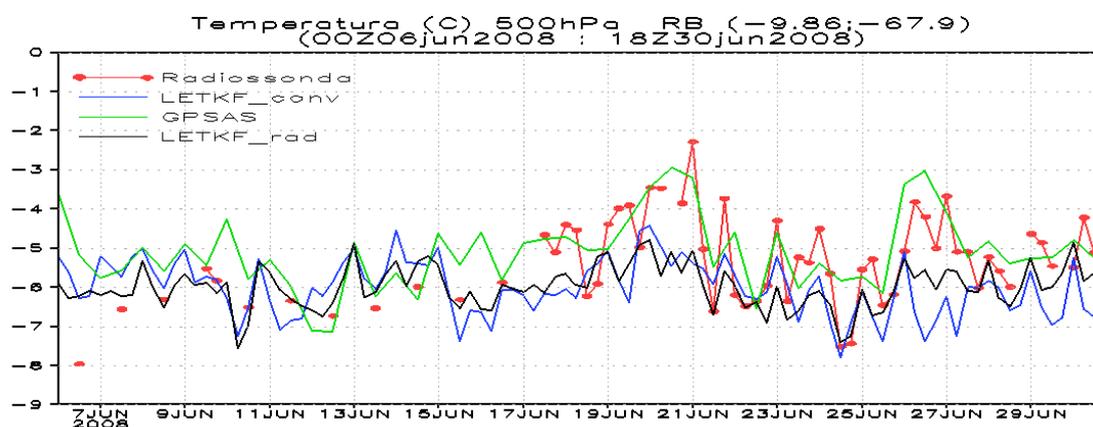


(c)

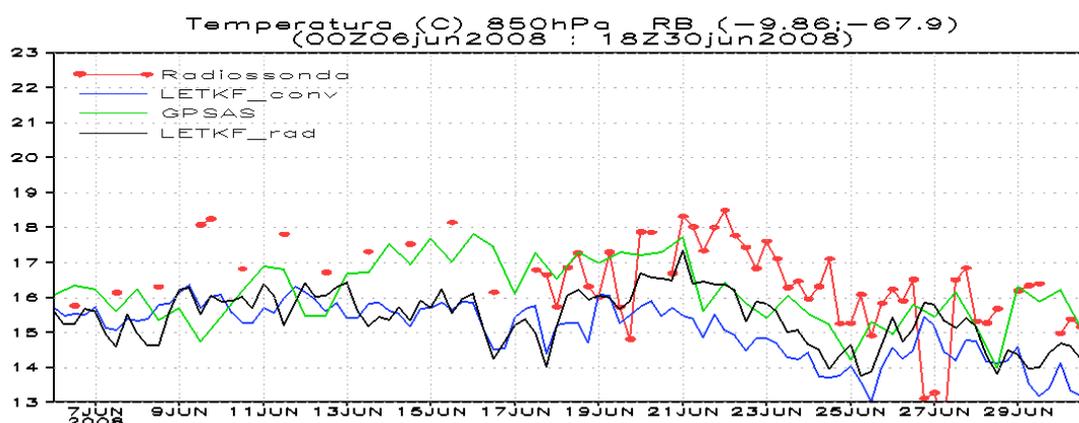
Figura 6.1 - Série temporal da variável temperatura do ar (°C), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), para análises do 4D-LETKF, análises do GPSAS e radiossondagens próximas a estação meteorológica de Carolina (CR), para o período de 06 até 30 de junho de 2008.



(a)

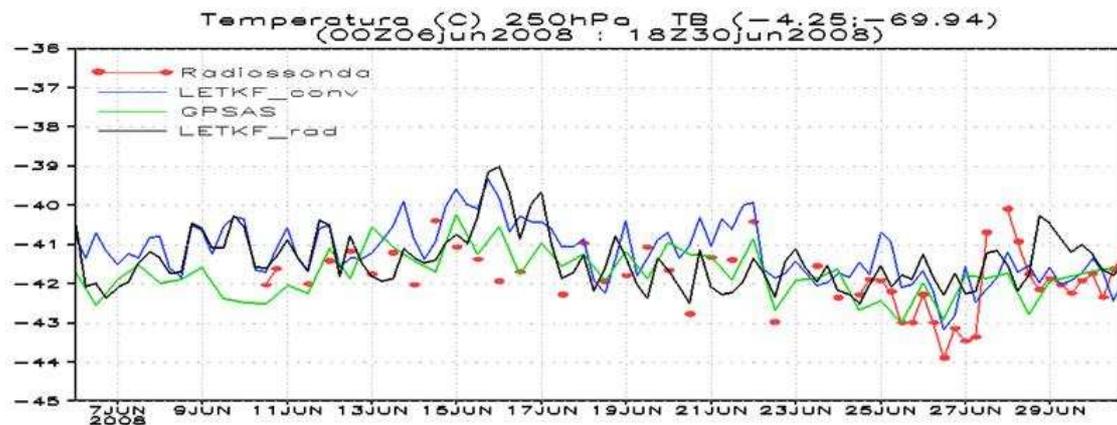


(b)

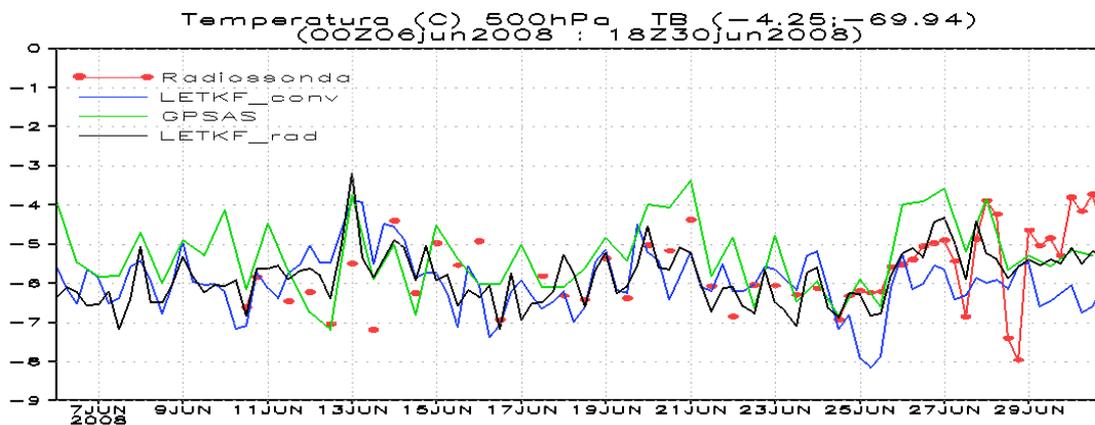


(c)

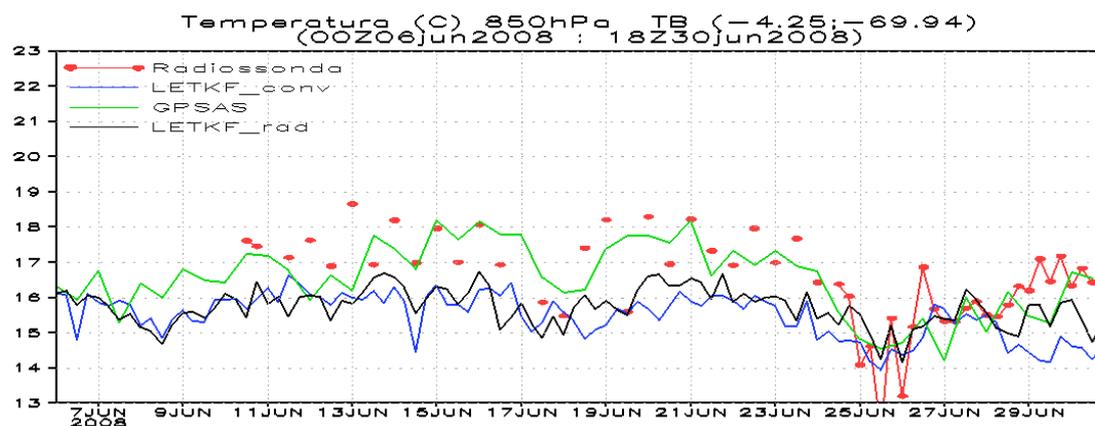
Figura 6.2 - Série temporal da variável temperatura do ar (°C), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), para análises do 4D-LETKF, análises do GPSAS e radiossondagens próximas a estação meteorológica de Rio Branco (RB), para o período de 06 até 30 de junho de 2008.



(a)

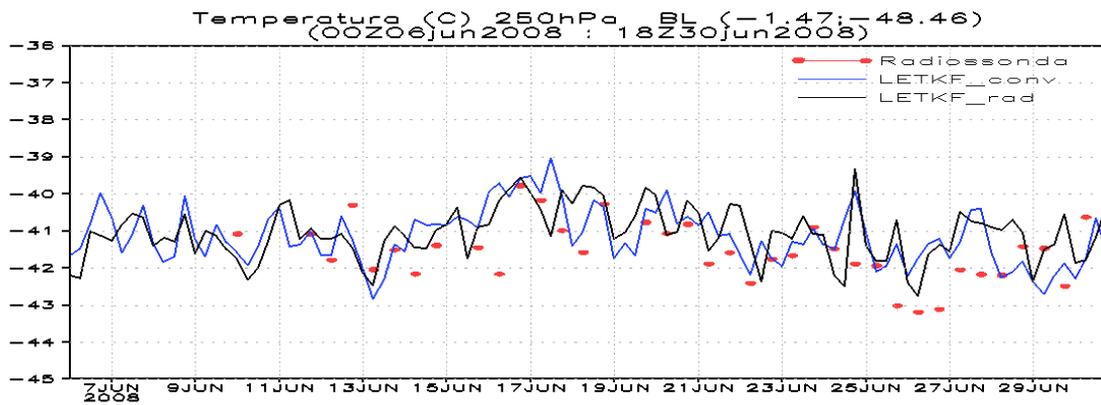


(b)

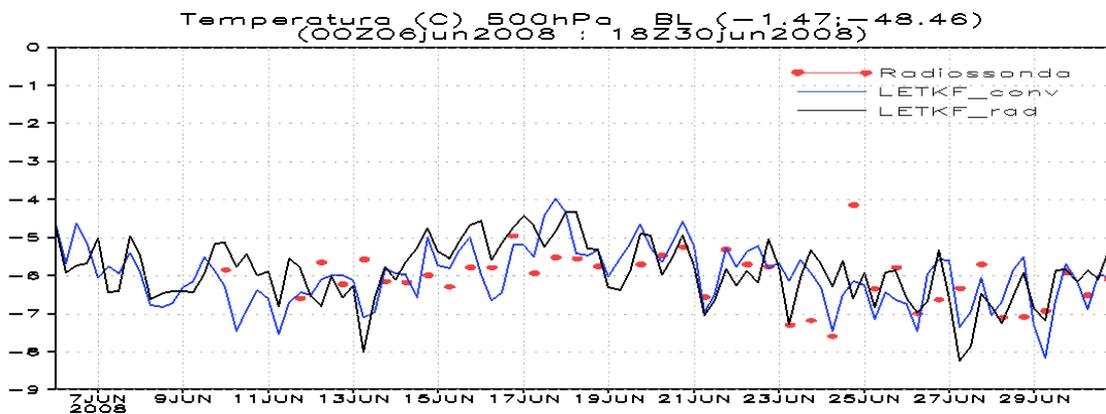


(c)

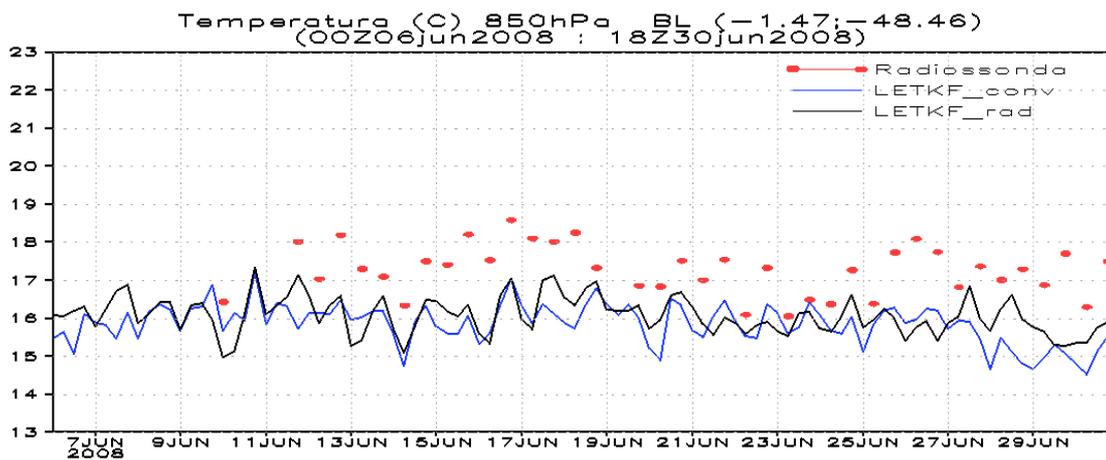
Figura 6.3 - Série temporal da variável temperatura do ar (°C), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), para análises do 4D-LETKF, análises do GPSAS e radiossondagens próximas a estação meteorológica de Tabatinga (TB), para o período de 06 até 30 de junho de 2008.



(a)

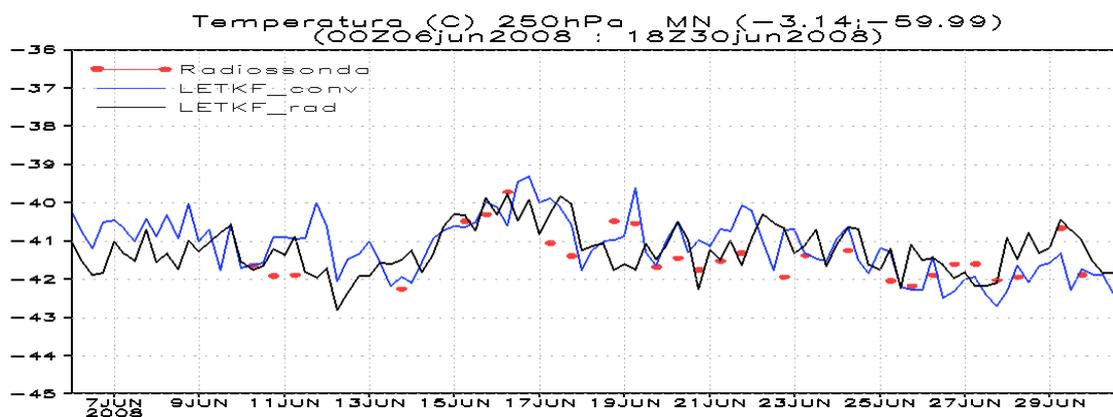


(b)

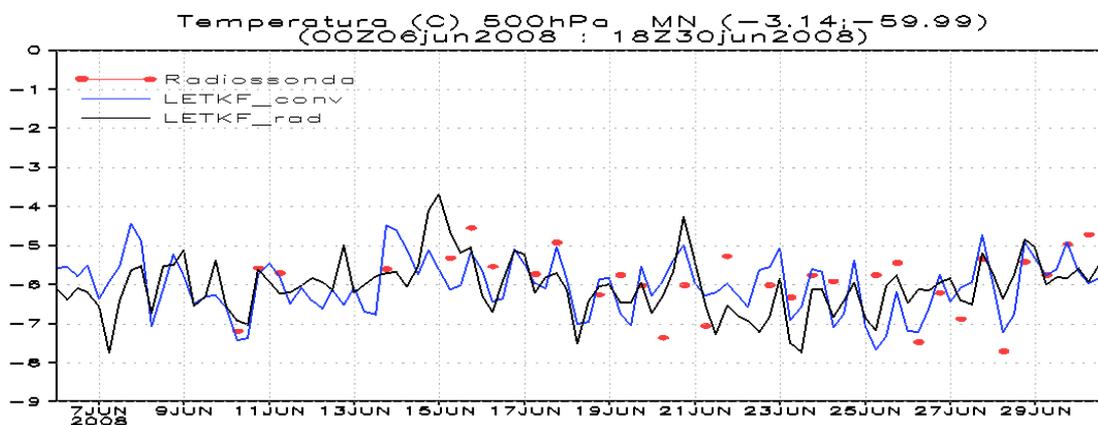


(c)

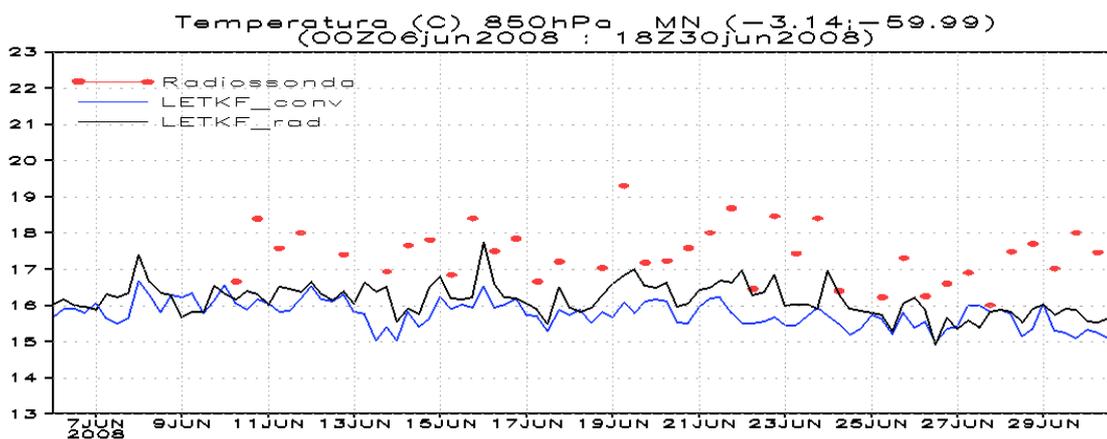
Figura 6.4 - Série temporal da variável temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), para análises do 4D-LETKF, análises do GPSAS e radiossondagens próximas a estação meteorológica de Belém (BL), para o período de 06 até 30 de junho de 2008.



(a)

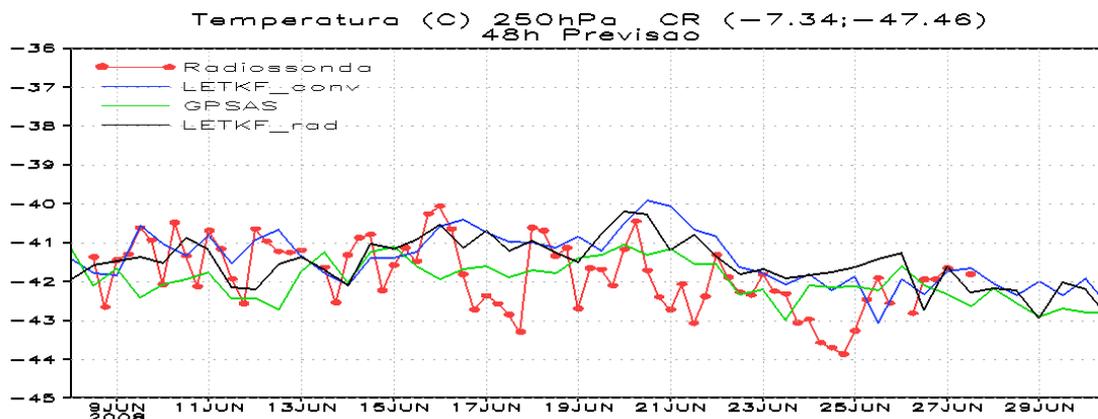


(b)

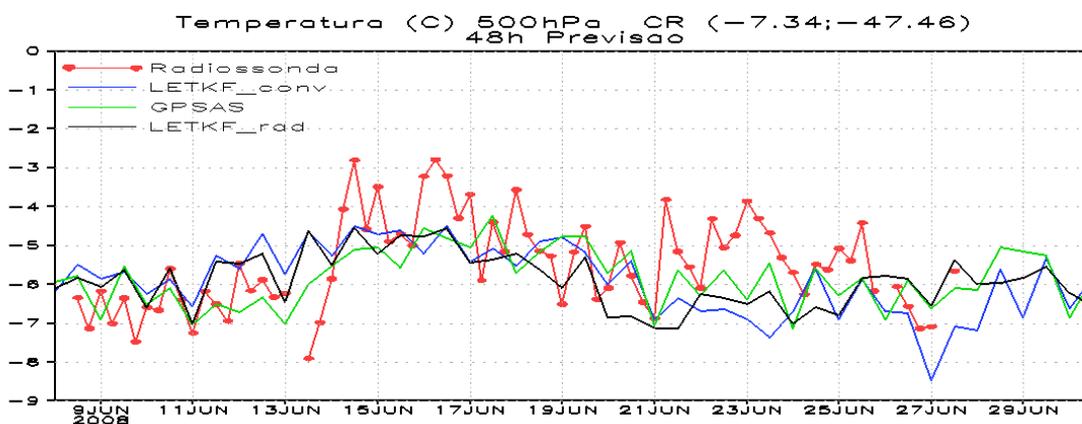


(c)

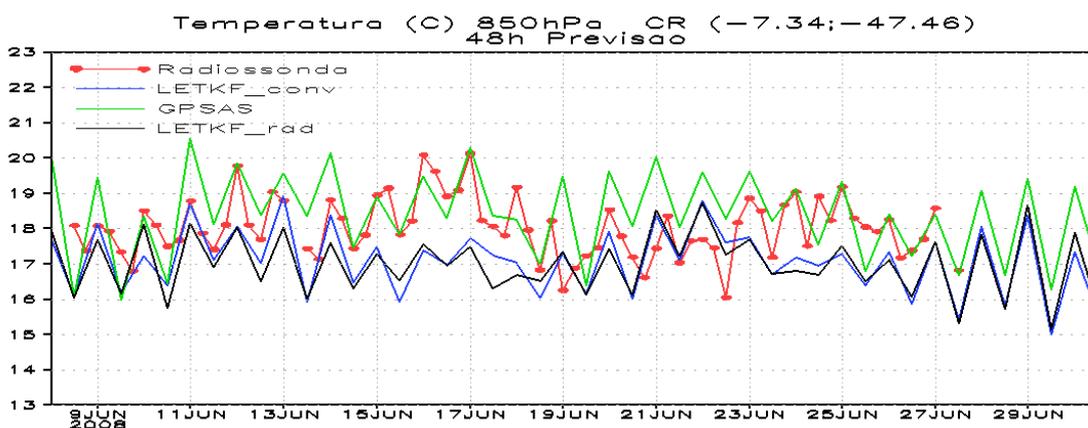
Figura 6.5 - Série temporal da variável temperatura do ar (°C), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), para análises do 4D-LETKF, análises do GPSAS e radiossondagens próximas a estação meteorológica de Manaus (AM), para o período de 06 até 30 de junho de 2008.



(a)

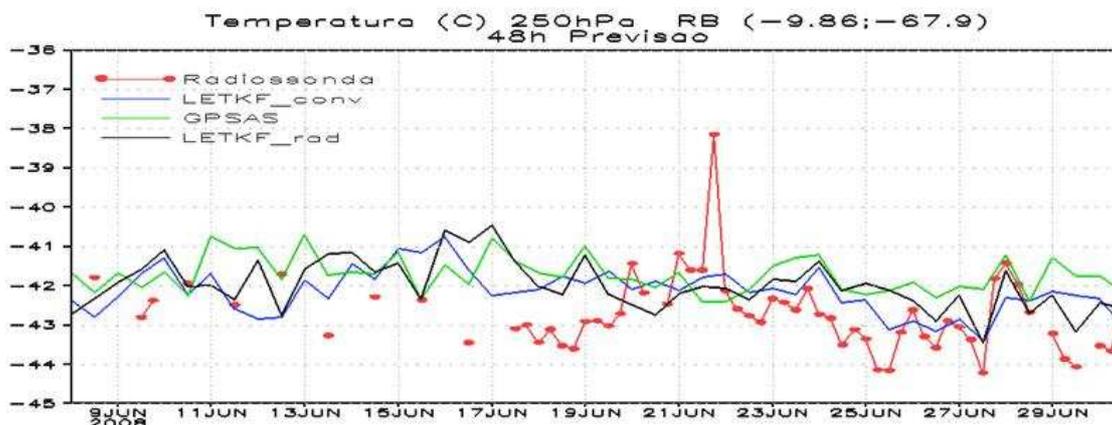


(b)

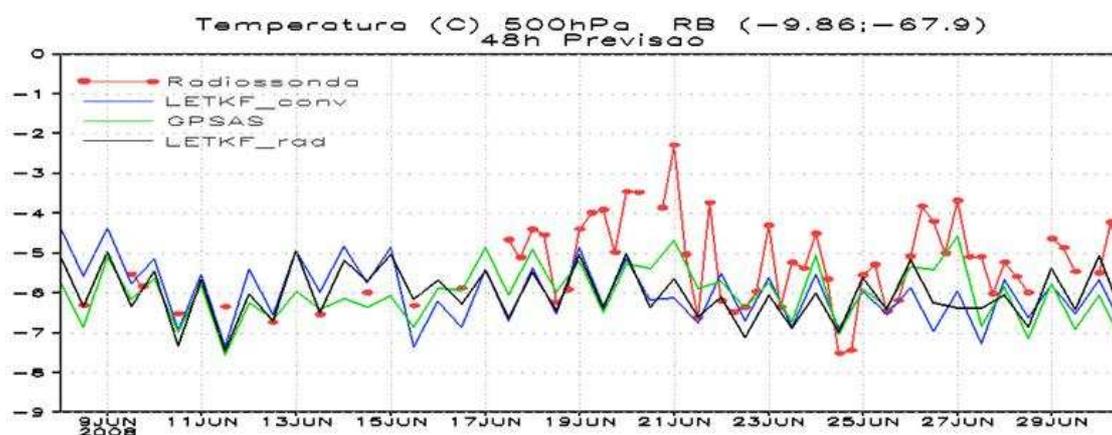


(c)

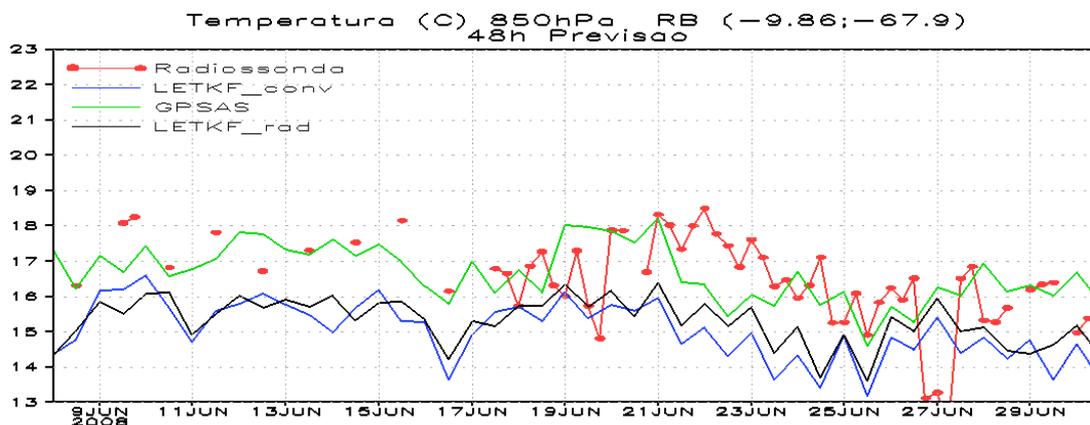
Figura 6.6 - Série temporal da variável temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), para 48 horas de previsões do MCGA/4D-LETKF, previsões do GPSAS, e radiossondagens da estação de Carolina (CR), no período de 09 até 30 de junho de 2008.



(a)

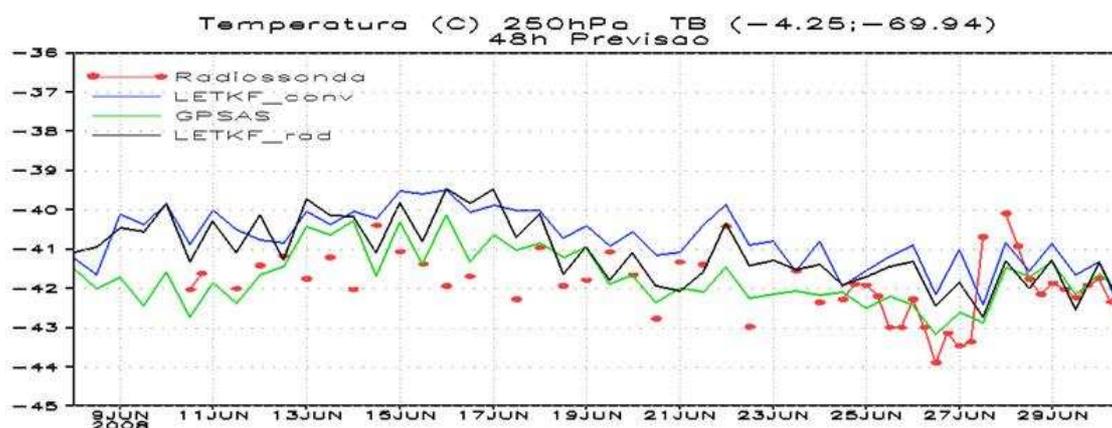


(b)

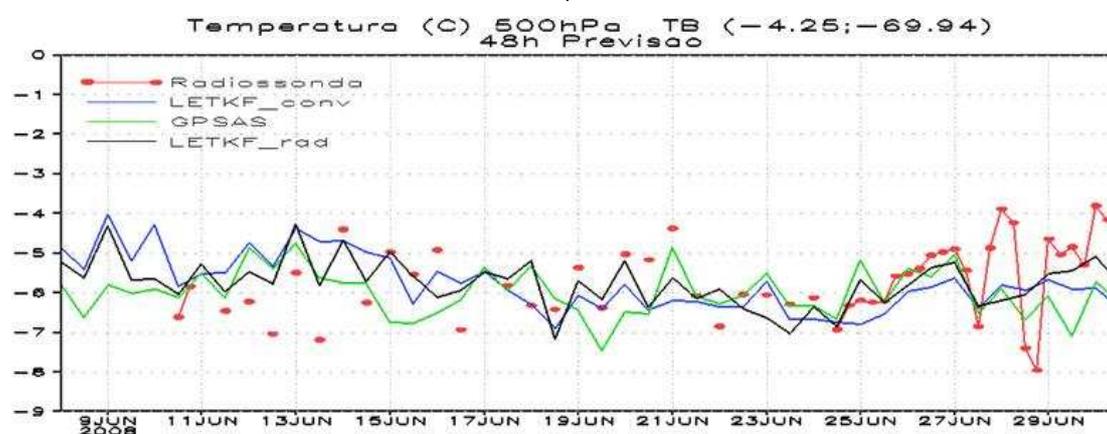


(c)

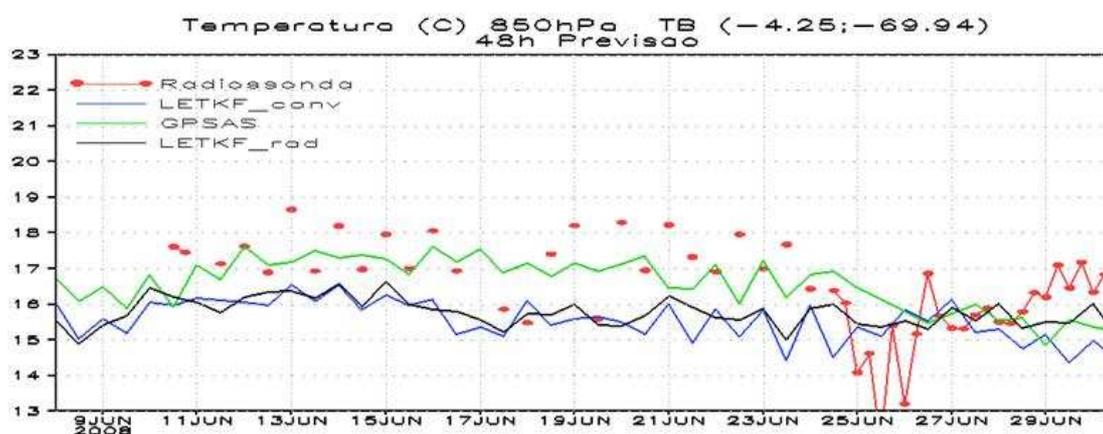
Figura 6.7 - Série temporal da variável temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), para 48 horas de previsões do MCGA/4D-LETKF, previsões do GPSAS, e radiossondagens próximas a estação de Rio Branco (RB), no período de 09 até 30 de junho de 2008.



a)



b)



c)

Figura 6.8 - Série temporal da variável temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ), nos níveis 250hPa (a), 500hPa (b) e 850hPa (c), para 48 horas de previsões do MCGA/4D-LETKF, previsões do GPSAS, e radiossondagens próximas a estação de Tabatinga (TB), no período de 09 até 30 de junho de 2008.



## 7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho usou o avançado sistema de assimilação de dados baseado em Filtro de Kalman por conjunto, o 4D-LETKF, a ser operacional no CPTEC. O desempenho do 4D-LETKF na assimilação direta de observações de radiâncias do sensor AMSU-A (satélite AQUA) foi avaliado no ambiente pré-operacional desse centro de pesquisa. O 4D-LETKF foi usado com o MCGA/CPTEC na resolução T126L28. Análises e Previsões obtidas a partir desse novo sistema foram avaliadas em comparação às análises do NCEP e também em relação à radiossondagens do Experimento Mini-BARCA/LBA. A região de estudo compreendeu a América do Sul, e o período estudado foi o mês de junho de 2008.

A assimilação de radiâncias pelo sistema 4D-LETKF/MCGA apresentou um ganho com redução dos erros para análises, na região da América do Sul, não somente na temperatura, que é a variável do modelo mais bem representada pelas radiâncias através do operador observação, mas também nas componentes horizontais do vento, principalmente a componente zonal.

As previsões de 48 horas feitas pelo MCGA/CPTEC usando condições iniciais do 4D-LETKF também apresentaram ganho, com redução dos erros para a temperatura e componente zonal do vento. No entanto, a previsão da componente meridional do vento não apresentou ganho, pelo contrário, a assimilação direta de radiância pelo 4D-LETKF/MCGA ocasionou um aumento dos erros para essa componente.

Embora os canais do AMSU-A assimilados não continham informações significantes para a variável umidade específica, a assimilação de radiância pelo 4D-LETKF/MCGA, permitiu uma pequena, mas ainda importante redução dos erros na região da ZCIT para o nível de 850hPa, tanto para análises como para previsões.

Uma comparação entre os erros dos sistemas de assimilação 4D-LETKF/MCGA e GPSAS mostrou que as análises do 4D-LETKF/MCGA (com e sem assimilação de radiação) apresentaram erros menores que as análises do GPSAS para a variável vento em todos os níveis analisados, apesar da menor resolução espacial do 4D-LETKF/MCGA em comparação ao GPSAS. Para a variável temperatura, os erros das análises do experimento com assimilação de radiação (LETKF\_rad) foram menores que os erros do GPSAS em praticamente todos os níveis, a exceção do nível de 700hPa. Para as análises da variável umidade específica, os erros do sistema GPSAS foram menores que os erros das análises do 4D-LETKF/MCGA.

Com relação à avaliação da variável temperatura do ar usando as observações de radiossondagem do Experimento Mini-BARCA, as análises do sistema 4D-LETKF/MCGA apresentaram concordância com os dados observados para as estações meteorológicas e período estudados. De um modo geral observou-se que o sistema 4D-LETKF/MCGA conseguiu capturar a evolução diária das observações da variável temperatura do ar.

As previsões com o MCGA/T126L28 do CPTEC utilizando análises do 4D-LETKF/MCGA favorecem uma boa concordância com as observações do Experimento Mini-BARCA até 48 horas de previsão. Em baixos níveis o sistema 4D-LETKF/MCGA apresentou uma tendência a subestimativa e dificuldades em capturar tendências de aquecimento; nesse caso o GPSAS conseguiu capturar (entre 14 e 16 de junho). A presença de frentes frias, aglomerados convectivos, linhas de instabilidades durante o período favoreceu o sistema de assimilação com maior resolução espacial, no caso o GPSAS.

Em suma, os resultados da assimilação direta das radiações do AMSU-A pelo 4D-LETKF/MCGA apresentaram melhora com redução dos erros nas análises e previsões, não apenas para a variável temperatura do ar, mas também para

outras variáveis. Entretanto, inicialmente também seriam utilizados dados de outros sensores como o AIRS e o IASI. Contudo, devido a problemas de uso de computador (limitação no uso do *cluster* UNA, por exemplo, onde foram executados os experimentos no ambiente do CPTEC), não foi possível a realização de outras assimilações e testes que seriam úteis para uma melhor avaliação do sistema. Esperava-se utilizar um conjunto maior de membros no 4D-LETKF, para se ter uma maior representatividade dos erros, o que também não foi possível pelo mesmo motivo acima citado. Nesse contexto, sugerem-se como trabalhos futuros:

- Estudar o impacto da assimilação de dados provenientes dos sensores AIRS e IASI, que apresentam excelentes resultados em outros centros operacionais, e um volume de dados substancialmente maior que o do sensor AMSU;
- Estudar o impacto da assimilação conjunta de dados de radiância, *retrievals* e dados convencionais usando o 4D-LETKF;
- Aumentar a resolução do sistema 4D-LETKF/modelo de previsão;
- Utilizar no mínimo 40 membros, similar a versão que será colocada em operação no CPTEC/INPE.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, J. An ensemble adjustment filter for data assimilation. **Monthly Weather Review**, v. 129, p. 2884-2903, 2001.

ANDREOLI, R. V.; SOUZA, R. A. F.; SAPUCCI, L. F.; FERREIRA, S. H. S.; HERDIES, D. L.; ARAVEQUIA, J. A. Inclusão das Sondagens AIRS/AMSU no Sistema Global de Assimilação/Previsão de Tempo do CPTEC/INPE: Estudo de Impacto. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 1, p. 88-102, 2008.

ARAVEQUIA, J. A. A assimilação de radiâncias no filtro de Kalman local por conjunto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15., São Paulo. **Anais...** 2008. On-line. (INPE-15486-PRE/10214). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.18.13.38>>. Acesso em: 25 jan. 2010.

ARAVEQUIA, J. A.; SZUNYOGH, I.; FERTIG, E. J.; KALNAY, E.; KUHL, D.; KOSTELICH, E. J. **Evaluation of a Strategy for the Assimilation of Satellite Radiance Observations with the local ensemble transform Kalman filter**. São José dos Campos: INPE, 2009-07-24. (INPE ePrint sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/07.23.17.23). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/07.23.17.23>>. Acesso em: 25 jan. 2010.

AUMANN, H. H.; CHAHINE, M. T.; GAUTIER, C.; GOLDBERG, M. D.; KALNAY, E.; MCMILLIN, L. M.; REVERCOMB, H.; ROSENKRANZ, P. W.; SMITH, W. L.; STAELIN, D. H.; STROW, L. L.; SUSSKIND, J. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: design, science objectives, data products and processing systems. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 2, p. 253-264, 2003.

BASTARZ, C. F. **Impacto da assimilação de dados de precipitação no sistema RPSAS/CPTEC: um estudo de caso de complexo convectivo de mesoescala**. 2010. 138 p. (INPE-16710-TDI/1649). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2010. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2010/03.09.16.52>>. Acesso em: 01 nov. 2010.

BISHOP, C.; ETHERTON, B.; MAJUMDAR, S. Adaptive sampling with ensemble transform Kalman filter. Part I: theoretical aspects. **Monthly Weather Review**, v. 129, p. 420-436, 2001.

BONATTI, J. P. Modelo de circulação geral atmosférico do CPTEC. **Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, v. on line, n. Especial 10 anos, 1996. (INPE-12799-PRE/8089). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1915/2005/05.31.13.35>>. Acesso em: 10 jan. 2010.

BONAVITA, M.; TORRISI, L.; MARCUCCI, F. The ensemble kalman filter in an operational regional nwp system: Preliminary results with real observations. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Royal Meteorological Society, v. 134, p. 1733-1744, 2008.

CAVALCANTI, I. F. A.; MARENGO, J. A.; PRAKKI, S.; NOBRE, C. A.; TROSNIKOV, I.; BONATTI, J. P.; MANZI, A. O.; TARASOVA, T.; PEZZI, L. P.; D' ALMEIDA, C.; SAMPAIO, G.; CASTRO, C. A. C.; SANCHES, M. B.; CAMARGO, H. Global climatological features in a simulation using the CPTEC-COLA AGCM. **Journal of Climate**, v. 15, n. 21, p. 2965-2988, Nov. 2002. (INPE-9842-PRE/5426). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1915/2005/05.05.11.19>>. Acesso em: 10 jan. 2010.

CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES (CNES). **Infrared Atmospheric Sounding Interferometer**, 2009. Disponível em <<http://smsc.cnes.fr/IASI/index.htm> > Acesso em: 10 abr. 2010.

CINTRA, R. S. C.; LIMA, W. F.; ESPINOZA, E. S.; CAMPOS VELHO, H. F. Inclusão de dados ATOVS no Sistema de Assimilação de Dados GPSAS do CPTEC. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 2917-2924. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. (INPE-12706-PRE/7996). Disponível em: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.20.23.49>>. Acesso em: 10 nov. 2010.

CLIMANÁLISE: Boletim de Monitoramento e Análise Climática. Cachoeira Paulista, SP, Brasil: INPE/CPTEC, v. 23, n. 06, jun. 2008. Disponível em <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rcliman/boletim/index0608>>. Acesso em: 10 nov. 2010.

COHEN, J. C. P.; SILVA DIAS, M. F.; NOBRE, C. A. Aspectos climatológicos das linhas de instabilidade na Amazônia. **Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, v. 4, n. 11, p. 34-40, nov. 1989. (INPE-6028-PRE/2143).

COSTA, S. S.; RODRIGUES, J. V.; GONÇALVES, W. A.; SOUZA, R. A. F. Performance of sounding retrievals from AIRS, GOES10, MODIS and HIRS Radiances during Mini-Barca campaign – June 2008. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 1647-1652. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. (INPE-15859-PRE/10469). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.22.19>>. Acesso em: 22 jul. 2010.

DIVAKARLA, M. G.; BARNET, C. D.; GOLDBERG, M. D., MCMILLIN, L. M.; MADDY, E.; WOLF, W.; ZHOU, L.; LIU, X. Validation of Atmospheric Infrared Sounder temperature and water vapor retrievals with matched radiosonde measurements and forecasts. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, D09S15, doi:10.1029/2005JD006116 , 2006.

EVENSEN, G. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using monte carlo methods to forecast error statistics. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, p. 143-162, 1994.

FERREIRA, S. H. S.; ARAVÉQUIA, J. A. A sensibility study of the inclusion of the cloud drift wind data in the CPTEC global data assimilation system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOUTHERN HEMISPHERE METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY, 8. (ICSHMO), 2006, Foz do Iguaçu. **Proceedings...** 2006. p. 1769-1771. CD-ROM; On-line. (INPE-13820-PRE/9006). Disponível em: <[http://urlib.net/cptec.inpe.br/adm\\_conf/2005/10.31.23.54](http://urlib.net/cptec.inpe.br/adm_conf/2005/10.31.23.54)>. Acesso em: 12 nov. 2010.

FERTIG, E. J.; BAEK, S.-J.; HUNT, B. R.; OTT, E.; SZUNYOGH, I.; ARAVÉQUIA, J. A.; KALNAY, E.; LI, H.; LIU, J. Observation bias correction with an ensemble kalman filter. **Tellus A**, v. 61, p. 210-226, 2009.

FERTIG, E. J.; HUNT, B. R.; OTT, E.; SZUNYOGH, I. Assimilating non-local observations with a local ensemble kalman filter. **Tellus A**, v. 59, p. 719-730, 2007.

FETZER, E. J. **Validation of AIRS/AMSU/HSB core products for Data Release Version 4.0**. 2005. 60 p. (JPL D-31448) Disponível em: [http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/AIRS/documentation/v4\\_docs/V4.0\\_Validation\\_Report.pdf](http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/AIRS/documentation/v4_docs/V4.0_Validation_Report.pdf)>. Acesso em: 12 nov. 2010.

FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Clima da Amazônia. **Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, v. on line, n. Especial 10 anos, 1996. (INPE-11888-PRE/7235). Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliesp10a/fish.html>>. Acesso em: 25 jan. 2010.

GELB, A. **Applied optimal estimation**. Cambridge MA.: MIT Press, 1974. 434 p.

GREWAL, M.; ANDREWS, A. **Kalman filtering theory and practice using MATLAB**. 2 ed. New York, NY USA: John Wiley & Sons. 2001. 416 p.

HAN, Y.; VAN DELST P.; LIU, Q.; WENG, F.; DERBER, J. C. **User's guide to the jcsda community radiative transfer model** (beta version). Joint Center for

Satellite Data Assimilation, Camp Springs, Maryland, USA. 2005. Disponível em <[http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/spb/CRTM/crtm-code/CRTM\\_UserGuide-beta.pdf](http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/spb/CRTM/crtm-code/CRTM_UserGuide-beta.pdf)> Acesso em: 01 mai. 2010.

HARLIM, J.; HUNT, B. R. Four-dimensional local ensemble transform Kalman filter: numerical experiments with a global circulation model. **Tellus A**, v. 59, p. 731-748, 2007.

HARLIM, J.; HUNT, B. R. **Local Ensemble Transform Kalman Filter: An Efficient Scheme For Assimilating Atmospheric Data**. Maryland: University of Maryland, College Park. 2005. Disponível em <[http://www.atmos.umd.edu/~ekalnay/harlim\\_hunt05.pdf](http://www.atmos.umd.edu/~ekalnay/harlim_hunt05.pdf)>. Acesso em: 25 jan. 2010.

HERDIES, D. L.; ARAVÉQUIA, J. A.; FERREIRA, S. H. S.; ANDREOLI, R. V.; SAPUCCI, L. F.; MATTOS, J. G. Z. **Assimilacao de dados no CPTEC/INPE**. São José dos Campos: INPE, 2007-09-04. (INPE ePrint sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/09.03.13.27). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/09.03.13.27>>. Acesso em: 25 jan. 2010.

HOUTEKAMER, P. L.; MITCHELL, H. L. Data assimilation using an ensemble kalman filter technique. **Monthly Weather Review**, v. 126, p. 796-811, 1998.

HOUTEKAMER, P. L.; MITCHELL, H. L.; PELLERIN, G.; BUEHNER, M.; CHARRON, M.; SPACEK, L.; HANSEN, M. Atmospheric data assimilation with an ensemble kalman filter: Results with real observations. **Monthly Weather Review**, v. 133, p. 604-620, 2005.

HUNT, B. R. **Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: a local ensemble transform kalman filter**. College Park: University of Maryland, 2005-11-28. (arxiv.org/abs/physics/0511236).

HUNT, B. R.; KOSTELICH, E. J.; SZUNYOGH, I. Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform kalman filter. **Physica D**, v. 230, p. 112-126, 2007.

JACOBS, O. L. R.. **Introduction to control theory**. 2 ed. Oxford University Press, 1993. 390 p.

JOINER, J.; DA SILVA, A. M. Efficient methods to assimilate Satellite remotely sensed data Based on Information Content. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 124, n. 549, p. 1669-1694, 1998.

KALMAN, R. A new approach to linear filtering and prediction problems. **Transactions of the ASME-Journal of Basic Engineering**, v. 82, p. 35-45, 1960.

KALNAY, E. **Atmospheric modeling, data assimilation and predictability**. Cambridge, England: Cambridge University, 2003. 341 p.

KALNAY, E.; LI, H.; MIYOSHI, T.; YANG, S-C.; BALLABRERA-POY, J. Response to the Discussion on “4DVar or EnKF?” by Nils Gustaffson. **Tellus A**, v. 59, p. 778-780, 2007.

KINTER, J.L.; DEWITT, D.; DIRMEYER, P.A.; FENNESSY, M.J.; KIRTMAN, B.P.; MARX, L.; SCHNEIDER, E.K.; SHUKLA, J.; STRAUS, D.M. **The COLA atmosphere-biosphere general circulation model Volume 1: Formulation**. Calverton, MD: Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies. COLA Staff, Report Nº 51, 1997.

LEWIS, L. L. **Optimal Estimation with an Introduction to Stochastic Control Theory**. New York: John Wiley & Sons, 1986. 368 p.

LI, H.; LIU, J.; FERTIG, E.; KALNAY, E.; ARAVÉQUIA, J. A.; SZUNYOGH, I.; KOSTELICH, E. J.; TODLING, R. Improved analyses and forecasts with AIRS retrievals using the local ensemble transform Kalman filter. In: THE 87TH AMS ANNUAL MEETING, San Antonio, TX, USA. **Proceedings...** 2007. Disponível em: <[http://ams.confex.com/ams/87ANNUAL/techprogram/paper\\_119564.htm](http://ams.confex.com/ams/87ANNUAL/techprogram/paper_119564.htm)> Acesso em: 01 mai. 2010.

LIU, J.; FERTIG, E. J.; LI, H.; KALNAY, E.; HUNT, B. R.; KOSTELICH, E. J.; SZUNYOGH, I.; TODLING, R. Comparison between Local Ensemble Transform Kalman Filter and PSAS in the NASA finite volume GCM - perfect model experiments. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 15, p. 645-659, 2008.

LORENC, A. Analysis methods for numerical weather prediction. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 112, p. 1177-1194, 1986.

METEOROLOGIA APLICADA A SISTEMAS DE TEMPO REGIONAIS / *LARGE SCALE BIOSPHERE-ATMOSPHERE EXPERIMENT IN AMAZONIA (MASTER/LBA)*. **MINI-BARCA/LBA**, 2008. Disponível em <<http://www.master.iag.usp.br/lba/>> Acesso em: 01 mai. 2010.

MAYBECK, P. S. **Stochastic models, estimation, and control - Volume 1**. New York: Academic Press, 1979. 116 p.

MIYOSHI, T.; SATO, Y. Assimilating satellite radiances with a local ensemble transform kalman filter (letkf) applied to the jma global model (gsm). **Scientific Online Letters on the Atmosphere**, v. 135, p. 37-40, 2007.

MIYOSHI, T.; YAMANE, S. Local ensemble transform kalman filtering with an agcm at a t159/l48 resolution. **Monthly Weather Review**, v. 135, p. 3841-3860, 2007.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **AMSU Instrument Guide**. 2010. Disponível em <[http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/AIRS/documentation/amsu\\_instrument\\_guide.shtml](http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/AIRS/documentation/amsu_instrument_guide.shtml)> Acesso em: 01 mai. 2010.

OTT, E.; HUNT, B. R.; SZUNYOGH, I.; CORAZZA, M.; KALNAY, E.; PATIL, D.J.; YORKE, J. A.; ZIMIN, A. V.; KOSTELICH, E. J. **Exploiting local low dimensionality of the atmospheric dynamics for efficient ensemble Kalman filtering**. University of Maryland, College Park, 2002. Disponível em <[http://arxiv.org/PS\\_cache/physics/pdf/0203/0203058v3.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0203/0203058v3.pdf)> Acesso em 01 de maio de 2010.

OTT, E.; HUNT, B. H.; SZUNYOGH, I.; ZIMIN, A. V.; KOSTELICH, E. J. A local ensemble Kalman filter for atmospheric data assimilation. **Tellus A**, v. 56, p. 415-428, 2004.

PANETTA, J.; BARROS, S. R. M.; BONATTI, J. P.; TOMITA, S.S.; KUBOTA, P. Y. **Computational Cost of CPTEC AGCM at use of high performance computing in meteorology**. [S.l.]: World Scientific Publishing Co., , p. 65-83, 2007. ISBN-13 978-981-277-588-7.

SAPUCCI, L. F.; ARAVÉQUIA, J. A.; SOUZA, R. A. F.; FERREIRA, S. H. S.; ANDREOLI, R. V.; HERDIES, D. L.; MATTOS, J. G. Z. The inclusion of integrated water vapor estimates from AIRS/AMSU and SSM/I sensors into PSAS data assimilation system in the CPTEC. In: INTERNATIONAL TOVS STUDY CONFERENCE , 15., 2006, Maratea, Italy. **Proceedings...** 2006. Papel. (INPE-14531-PRE/9562). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m15@80/2006/08.15.12.37>>. Acesso em: 10 nov. 2010.

SILVA DIAS, M.A.F. Meteorologia , desmatamento e queimadas na Amazônia: uma síntese de resultados do LBA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, p.190-199, 2006.

SILVA DIAS, M. A. F.; HERDIES, D. L.; FISCH, G.; MOTA, M. A.; SANTOS, R. M.; DUARTE, A. F.; SARAIVA, J. M. Experimento Meteorológico Mini-Barca em 2008. In: CONFERÊNCIA CIENTÍFICA INTERNACIONAL AMAZÔNIA EM PERSPECTIVA: CIÊNCIA INTEGRADA PARA UM FUTURO SUSTENTÁVEL, 2008, Manaus, AM. **Proceedings...** 2008. On-line. Disponível em: <[http://www.lbaconferencia.org/cgi-bin/lbaconf\\_2008/conf08\\_ab\\_search.pl](http://www.lbaconferencia.org/cgi-bin/lbaconf_2008/conf08_ab_search.pl)>. Acesso em 23/03/2008

SOUZA, R. A. F.; ANDREOLI, R. V.; RODRIGUES, J. V.; CEBALLOS, J. C.; HERDIES, D. L. Validação das sondagens AQUA sobre a América do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA (CBMET), 14., 2006, Florianópolis, SC. **Proceedings...** 2006a. CD-ROM; Papel. (INPE-14588-PRE/9618). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2006/12.26.13.36>>. Acesso em: 20 jul. 2010.

SOUZA, R. A. F.; RODRIGUES, J. V.; ANDREOLI, R. V.; CEBALLOS, J. C. Intercomparação das sondagens AIRS/AMSU e MODIS do satélite AQUA sobre a cidade de Natal -RN: campanha SHADOZ entre 2002 e 2006. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA (CBMET), 14., 2006, Florianópolis, SC. **Proceedings...** 2006b. CD-ROM; Papel. (INPE-14588-PRE/9616). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2006/12.21.18.41>>. Acesso em: 20 jul. 2010.

SOUZA, S. S.; FIGUEROA, S. N.; HERDIES, D. L.; ARAVÉQUIA, J. A.; BONATTI, J. P.; GONÇALVES, L. G.; KUBOTA, P. Y.; SAPUCCI, L. F.; FERREIRA, S. H.; MATTOS, J. G. Impact of the scheme of deep convection in the global data assimilation system LETKF of the CPTEC/INPE. In: THE MEETING OF THE AMERICAS, 2010, Foz do Iguaçu, BR. **Proceedings...** 2010. On-line. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19/2010/08.24.17.33>>. Acesso em: 10 nov. 2010.

SZUNYOGH, I.; KOSTELICH, E. J.; GYARMATI, G.; KALNAY, E.; HUNT, B. R.; OTT, E.; SATTERFIELD, E.; YORKE, J. A. A local ensemble transform kalman filter data assimilation system for the ncep global model. **Tellus A**, v. 60, p. 113-130, 2008.

TOMITA, S. S.; KUBOTA, P. Y.; BONATTI, J. P.; HERDIES, D. L. Testes de sensibilidade do novo modelo global MCGA/MPI - CPTEC/INPE usando diferentes parametrizações físicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA (CBMET), 14., Florianópolis, SC. **Proceedings...** 2006. CD-ROM; Papel. (INPE-14590-PRE/9620). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2006/12.26.12.30>>. Acesso em: 10 nov. 2010.

TORN, R. D.; HAKIM, G. J. Performance characteristics of a pseudo-operational ensemble kalman filter. **Monthly Weather Review**, v. 136, p. 3497-3963, 2008.

WELCH, G.; BISHOP, G. **An introduction to the Kalman filter**. University of North Carolina at Chapel Hill, 2006. Disponível em <[http://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman\\_intro.pdf](http://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf)> Acesso em: 01 mai. 2010.

WHITAKER, J. S.; COMPO, G. P.; WEI, X.; HAMILL, T. M. Reanalysis without radiosondes using ensemble data assimilation. **Monthly Weather Review**, v. 132, p. 1190-1200, 2004.

WHITAKER, J. S., HAMILL, T. M.; WEI, X.; SONG, Y.; TOTH, Z. Ensemble data assimilation with the ncep global forecast system. **Monthly Weather Review**, v. 136, p. 463-482, 2008.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2. ed. New York: Academic, 2006. 627 p.

WON, Y. **AIRS Level-1B Version 5 AMSU-A Calibrated Brightness Temperature products: AIRABRAD, AIRABRAD\_NRT**. NASA, 2008.  
Disponível em <  
<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/AIRS/documentation/readmes/README.AIRABRAD.pdf> > Acesso em: 01 mai. 2010.

ZAPOTOCNY, T. H.; MENZEL, W. P.; JUNG, J. A.; NELSON III, J. P. A Four-Season impact study of rawinsonde, GOES, and POES data in the ETA Data Assimilation system. Part II: Contribution of the Components. **Weather and Forecasting**, v. 20, p. 178-198, 2005.

## **APÊNDICE A - Modelo de Circulação Geral Atmosférico do CPTEC**

O Modelo de Circulação Geral Atmosférico (MCGA) do CPTEC/INPE tem sua origem naquele usado para previsão de tempo de médio prazo pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP, então NMC) em 1985. Esse modelo, chamado MRF (*Medium Range Forecasting Model*) pelo NCEP, era uma combinação do código espectral global desenvolvido pelo NCEP e as parametrizações físicas de escala de subgrade desenvolvidas no *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL) do NOAA na Universidade de Princeton, EUA. Esse modelo foi transferido ao *Center for Ocean, Land and Atmosphere Studies* (COLA), onde foram adicionados, a princípio, cálculos diagnósticos para um melhor entendimento dos processos físicos simulados e de sua importância relativa.

O CPTEC adotou a versão 1.7 do COLA (KINTER *et al.*, 1997), que tem truncamento romboidal. Essa versão foi generalizada para truncamento triangular, e foram introduzidas resoluções, horizontal e vertical, versáteis e adaptações na geração de arquivos de entrada e saída para as necessidades operacionais do CPTEC, e utilização de temperatura da superfície do mar média observada da última semana. Essa versão foi chamada de versão 1.0 CPTEC/COLA.

Resumidamente, o MCGA do CPTEC (PANETTA *et al.*, 2007) é baseado na solução espectral das equações primitivas onde são fornecidas as componentes zonal e meridional do vento nas formulações das equações do movimento (na versão original do COLA era na forma divergência e vorticidade), a temperatura virtual, a umidade específica, o logaritmo da pressão à superfície, e, na inclusão dos processos subgrade considerando parametrizações físicas específicas. A Tabela A.1 apresenta as opções das parametrizações físicas do MCGA/CPTEC usadas nas simulações deste trabalho.

Tabela A.1 – Opções das Parametrizações Físicas do MCGA/CPTEC-T126L28 utilizadas nas simulações

Dinâmica	Euleriana
Radiação de onda curta	Lacis e Hansen, 1974
Radiação de Onda Longa	Harshvardhan, 1987
Camada limite	Mellor e Yamada, 1982
Superfície	Xue, 1991
Convecção profunda	Kuo, 1974
Convecção rasa	Tiedke, 1983
Onda de gravidade	Alpert, 1988

## APÊNDICE B - Parâmetros de localização usados no 4D-LETKF

LOCAL\_RAD\_BT.dat

# Vertical localization and patch radius data file.

```
#
# HTRAD is the vertical patch radius in terms of the scale height of the
# atmosphere. A value of 1/4, for instance, means that we look DOWN
# up to 1/4 scale height away and UP 1/4 scale height away so that the
# *total layer depth* corresponds to a scale height of 1/2.
#
# PRAD is the patch radius in km. A value of 620 approximately corresponds
# to 3 model grid points at T62 resolution near the equator.
#
# COVAR refers to the simple covariance inflation factor; 0.05 means 5%
# simple variance inflation, for example.
# ADD refers to the additive variance inflation factor, if any (0 => none).
#
# AVARS lists the variables that are assimilated at each level, normally
# T (=temperature), U (u-wind component), and V (v-wind component).
# Surface pressure (P) may be assimilated at level 1, or it may be done
# separately, as here, with a deep layer. A separate surface pressure
# assimilation is denoted with a P in column 1, and P must be specified
# as an analysis variable.
#
# OVARS lists the observation variable types (with the same mnemonics as above)
# that are used for each level. In this case, we use observations of all types
# to assimilate the surface pressure and to analyze surface variables.
# For patches whose logical centers are not at the surface, we assimilate
# all variable types except the surface pressure.
#
# This version implements a boxcar taper, except south of ~45S.
#
lat 1:48
#lev htrad prad covar add avars ovars taper_params
#
1      0.35  800  0.50  0.00  PTUV PTUVB  500  800
2:6    0.35  800  0.50  0.00   TUV PTUVB  500  800
7:8    0.35  800  0.47  0.00   TUV PTUVB  500  800
9:10   0.35  800  0.44  0.00   TUV PTUVB  500  800
11:12  0.35  800  0.40  0.00   TUV PTUVB  500  800
13:15  0.35  800  0.35  0.00   TUV PTUVB  500  800
16:20  0.50  800  0.30  0.00   TUV  TUVB  500  800
21:26  1.00  800  0.30  0.00   TUV  TUVB  500  800
27     1.50  800  0.30  0.00   TUV  TUVB  500  800
28     2.00  800  0.30  0.00   TUV  TUVB  500  800
#
# Remainder of SH and tropics and
# Intermediate values to 25N
lat 49:124
```

1	0.35	800	0.35	0.00	PTUV	PTUVB	500	800
2:6	0.35	800	0.35	0.00	TUV	PTUVB	500	800
7:8	0.35	800	0.32	0.00	TUV	PTUVB	500	800
9:10	0.35	800	0.32	0.00	TUV	PTUVB	500	800
11:12	0.35	800	0.30	0.00	TUV	PTUVB	500	800
13:15	0.35	800	0.27	0.00	TUV	PTUVB	500	800
16:20	0.50	800	0.27	0.00	TUV	TUVB	500	800
21:26	1.00	800	0.27	0.00	TUV	TUVB	500	800
27	1.50	800	0.25	0.00	TUV	TUVB	500	800
28	2.00	800	0.25	0.00	TUV	TUVB	500	800

#

# Northern Hemisphere north of ~25N

#

lat 125:192

1	0.35	800	0.50	0.00	PTUV	PTUVB	500	800
2:6	0.35	800	0.50	0.00	TUV	PTUVB	500	800
7:8	0.35	800	0.47	0.00	TUV	PTUVB	500	800
9:10	0.35	800	0.44	0.00	TUV	PTUVB	500	800
11:12	0.35	800	0.40	0.00	TUV	PTUVB	500	800
13:15	0.35	800	0.35	0.00	TUV	PTUVB	500	800
16:20	0.50	800	0.30	0.00	TUV	TUVB	500	800
21:26	1.00	800	0.30	0.00	TUV	TUVB	500	800
27	1.50	800	0.30	0.00	TUV	TUVB	500	800
28	2.00	800	0.30	0.00	TUV	TUVB	500	800

## APÊNDICE C - Imagens de Satélites

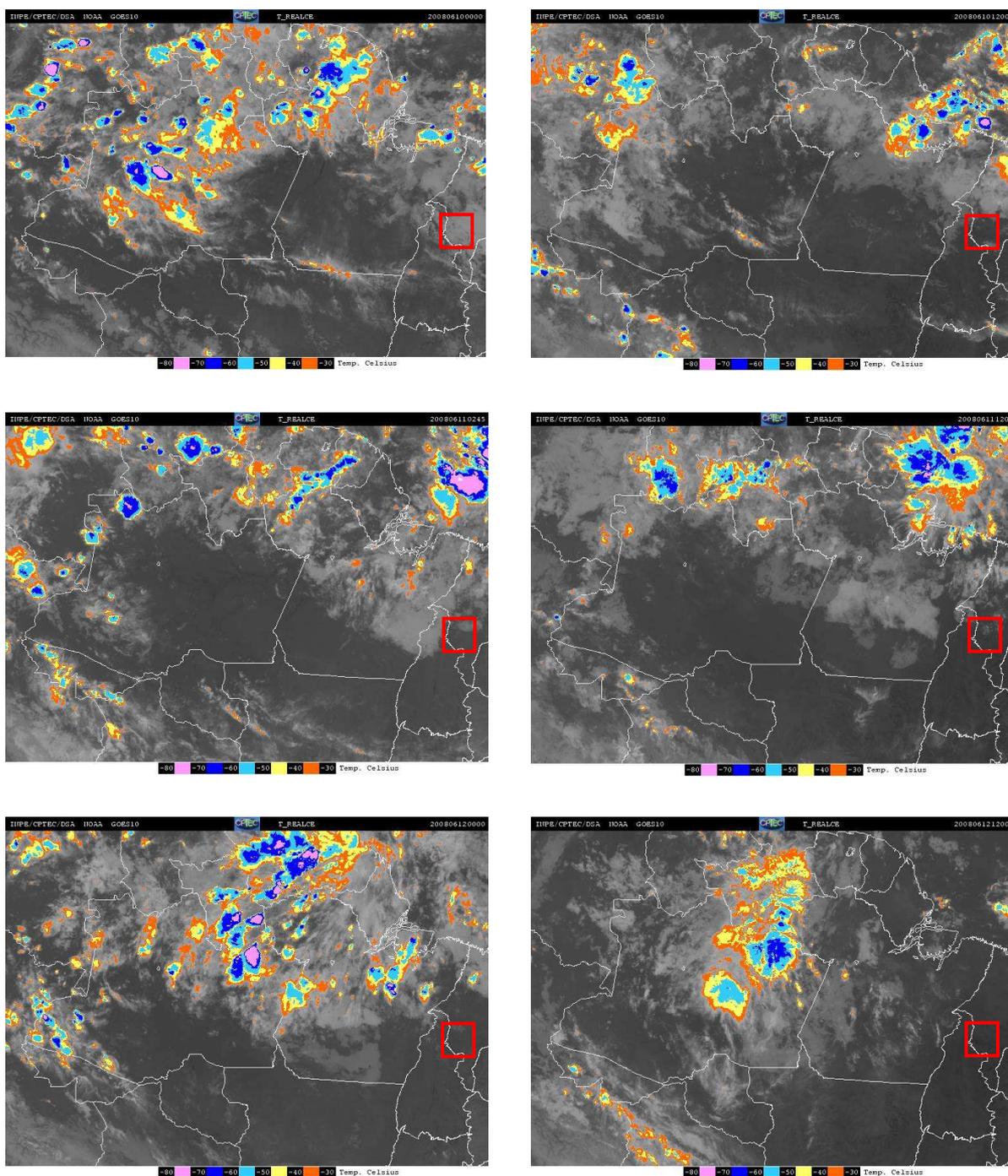


Figura C.1 – Recorte de imagem com realce do satélite GOES-10, com destaque para a região que compreende a estação de Carolina-MA, onde se observa a dissipação de nebulosidade, entre os dias 10, 11 e 12 de junho de 2008 as 00 (esquerda) 12 (direita) Z.

Fonte: <http://satelite.cptec.inpe.br/>

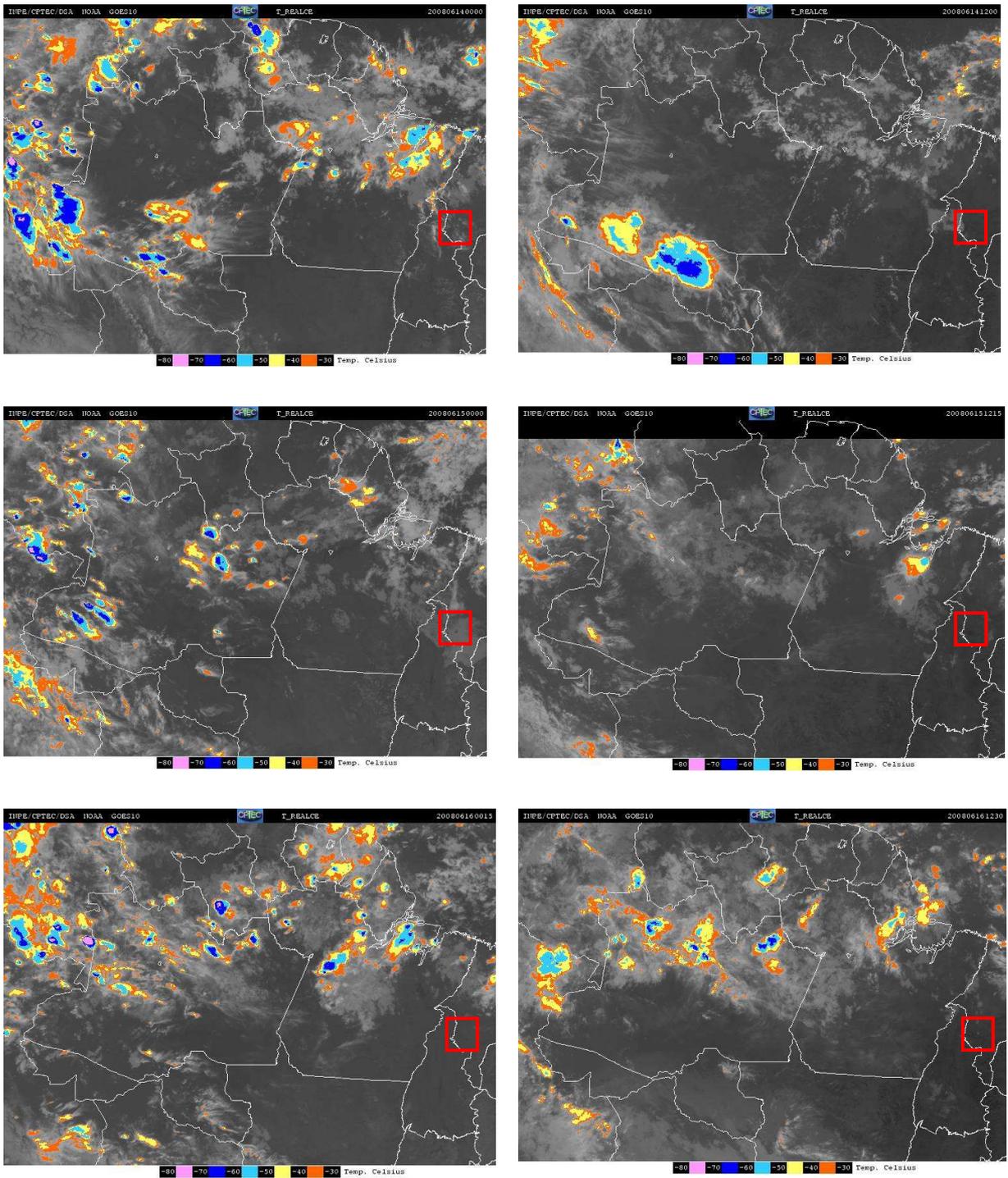


Figura C.2 – Recorte de imagem com realce do satélite GOES-10, com destaque para a região que compreende a estação de Carolina-MA, onde se observa a dissipação de nebulosidade, entre os dias 14, 15 e 16 de junho de 2008 as 00 (esquerda) 12 (direita) Z.

Fonte: <http://satelite.cptec.inpe.br/>

## **APÊNDICE D - Global Physical-space Statistical Assimilation System**

O sistema de assimilação de dados GPSAS (*Global Physical-space Statistical Analysis System*) utilizado operacionalmente no CPTEC está habilitado para assimilar informações oriundas de diferentes sistemas de observações. Neste trabalho as análises e previsões do GPSAS foram disponibilizadas pelo CPTEC.

Uma descrição dos dados assimilados por esse sistema de assimilação encontra-se na página do Grupo de Assimilação de Dados do CPTEC (GDAD): <http://assimila.cptec.inpe.br/>. Os dados assimilados pelo GPSAS compreendem:

- a) Dados convencionais de estação de superfície e ar superior (SYNOP e TEMP);
- b) Dados de satélite: ventos em baixos e altos níveis (SATOBS), ventos sobre a superfície do oceano (Quikscat), água precipitável (TPW) e dados de temperatura/geopotencial (ATOVS).

Na página do GDAD é possível também consultar informações sobre a quantidade e distribuição dos dados assimilados pelo GPSAS.