



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/11.29.01.27-TDI

## IMPACTO DAS OBSERVAÇÕES NAS PREVISÕES DE CURTO PRAZO

Fábio Luiz Rodrigues Diniz

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos Drs. Dirceu Luis Herdies, e Luis Gustavo Gonçalves de Gonçalves, aprovada em 14 de dezembro de 2012.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3D559CB>>

INPE  
São José dos Campos  
2012

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

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

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

**Membros:**

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

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

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

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

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

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

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

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

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

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

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

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

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

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



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/11.29.01.27-TDI

## IMPACTO DAS OBSERVAÇÕES NAS PREVISÕES DE CURTO PRAZO

Fábio Luiz Rodrigues Diniz

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos Drs. Dirceu Luis Herdies, e Luis Gustavo Gonçalves de Gonçalves, aprovada em 14 de dezembro de 2012.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3D559CB>>

INPE  
São José dos Campos  
2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Diniz, Fábio Rodrigues.

D615i

Impacto das observações nas previsões de curto prazo / Fábio Luiz Rodrigues Diniz. – São José dos Campos : INPE, 2012.

xxiv + 109 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/11.29.01.27-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

Orientadores : Drs. Dirceu Luis Herdies, e Luis Gustavo Gonçalves de Gonçalves.

1. meteorologia. 2. assimilação de dados. 3. impacto das observações. . I.Título.

CDU 551.509.313

---

Copyright © 2012 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 © 2012 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



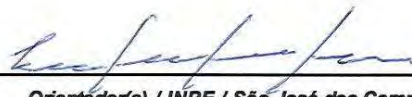
Presidente / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Dirceu Luis Herdies



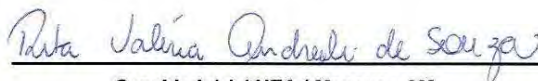
Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Luis Gustavo Gonçalves de  
Gonçalves



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

Dra. Rita Valéria Andreoli de Souza



Convidado(a) / UEA / Manaus - AM

**Este trabalho foi aprovado por:**

( ) maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Fabio Luiz Rodrigues Diniz**

**São José dos Campos, 14 de Dezembro de 2012**



*“You can’t connect the dots looking forward; you can only connect them looking backwards. So you have to trust that the dots will somehow connect in your future. You have to trust in something...”*

STEVE JOBS’ SPEECH AT STANFORD UNIVERSITY  
2005





*A meus pais e à Aline com grande amor e carinho.*  
*A meus amigos que me proporcionaram inesquecíveis momentos.*



## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pela concessão de toda a estrutura computacional necessária para a realização desta pesquisa.

Aos Professores Dr. Dirceu Luis Herdies e Dr. Luis Gustavo Gonçalves de Gonçalves pelo suporte e oportunidades à execução desta pesquisa.

Ao Dr. Ricardo Todling pelo suporte e intercâmbios técnicos e científicos que facilitaram e permitiram a realização desta pesquisa e desenvolvimento.

Aos integrantes do Grupo de Assimilação de Dados e Desenvolvimento do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos que sempre se prontificaram em prover suporte quando solicitados.

Aos integrantes do *Global Modelling and Assimilation Office* da NASA que me receberam e, de certa forma, apoiaram à realização desta pesquisa.

Aos inúmeros colegas do país e do exterior, que contribuíram tecnicamente e cientificamente para a realização desta pesquisa.

Muito obrigado!



## RESUMO

Nos últimos anos, os centros de previsão numérica de tempo operacionais têm assimilado um maior número de observações. Entretanto, para um melhor uso dessas observações em um sistema de assimilação de dados, é necessário conhecer o valor adicionado por essas observações ao sistema. Esse valor é comumente denominado como sendo o impacto das observações e, tradicionalmente, a metodologia utilizada para estimar o impacto dá-se por meio de experimentos em que determinadas observações são adicionadas ou removidas do sistema de assimilação de dados, e posteriormente compara-se o desempenho do sistema com relação às simulações de controle. Esses procedimentos fornecem um resultado relativo à presença ou ausência dessas observações de maneira acumulativa. Além disso, os mesmos são inviáveis operacionalmente devido a grande demanda de recursos computacionais. Entretanto, novas abordagens foram desenvolvidas com o intuito de estimar o impacto, as quais avaliam todas as observações utilizadas pelo sistema de assimilação de dados, sem a necessidade da realização de múltiplos experimentos adicionando ou removendo observações. Uma dessas abordagens foi desenvolvida utilizando um método de assimilação de dados baseado em uma variação do filtro de Kalman por conjunto. Esse mesmo método está em fase de implementação no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) para gerar as futuras análises do centro. Nesse contexto, esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar os impactos das observações nas previsões de curto prazo do futuro sistema que será operacional no CPTEC/INPE. Implementou-se um método de estimativa do impacto das observações nas previsões de curto prazo utilizando a abordagem proposta por Liu e Kalnay (2008), o qual é baseado em uma variação do filtro de Kalman por conjunto. O método mostrou-se viável operacionalmente devido a seu custo computacional ser menor do que o necessário para gerar as análises do próprio sistema. Avaliou-se os impactos das observações nas previsões de curto prazo desse sistema utilizando um conjunto de dados composto por observações: *in situ*, obtidas por sensoriamento remoto e sintéticas. As observações que tiveram maiores impactos benéficos para as previsões de curto prazo foram as obtidas por meio de sensoriamento remoto.



# OBSERVATION IMPACT ON SHORT RANGE FORECASTS

## ABSTRACT

In recent years, the operational centers of numerical weather prediction are assimilating a large number of observations. However, for a better use of these observations in a data assimilation system it is necessary to know the value added by these observations to the system. This value is commonly referred to as the impact of observations and, traditionally, the methodology used to estimate the impact occurs by mean of experiments in which certain observations are added or removed from the data assimilation system, and then compares the system performance with respect to a control simulation. These procedures provide a result concerning the presence or absence of such observations in a cumulative manner. Moreover, they are operationally unviable due to high demand of computational resources. However, new approaches have been developed in order to estimate the impact, wich evaluate all observations used for data assimilation system, without the need to perform multiple experiments adding or removing observations. One such approach has been developed using a data assimilation method based on a variation of the ensemble Kalman filter. This same method is being implemented at the Center for Weather Forecasting and Climate Studies from the Brazilian National Institute for Space Research (CPTEC/INPE) to generate future analysis of the center. In this context, the method to estimate the impact based on a variation of the Kalman filter was implemented in the future system that will be operational at CPTEC/INPE. The method was operationally viable due to its computational cost is less than required to generate the analysis of the system itself. We evaluate the impact of observations on short range forecasts of the system using a data set consisting of in situ, remote sensing and synthetics observations. The observations that had greater beneficial impacts for short range forecasts were obtained trough remote sensing.





## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1	Ciclo de análise e previsão numérica de tempo para o campo de vento. . . . . 10
2.2	Típico ciclo de análise global com intervalo de 6 horas entre as análises, realizado às 0000, 0600, 1200 e 1800 UTC. . . . . 12
2.3	Esquema temporal para o cálculo do impacto das observações em um ciclo de análise com intervalo de 6 horas entre as análises. . . . . 16
4.1	Esquema ilustrado do GOS. . . . . 31
4.2	Distribuição espacial das observações <i>in situ</i> do grupo ADPSFC, o qual representa as observações obtidas em superfície continental, para o dia 16 de fevereiro de 2004 às 0000 (topo esquerdo), 0600 (topo direito), 1200 (base esquerda) e 1800 UTC (base direita). . . . . 34
4.3	Idem a Figura 4.2, exceto que para o grupo SFCSHP, o qual representa as observações obtidas em superfície oceânica. . . . . 35
4.4	Idem a Figura 4.2, exceto que para o grupo ADPUPA, o qual representa as observações obtidas por meio de radiossondas, balões piloto e dropsondas. 36
4.5	Idem a Figura 4.2, exceto que para o grupo AIRCFT, o qual representa as observações obtidas por meio de aviões e enviadas diretamente para o solo. . . . . 37
4.6	Idem a Figura 4.2, exceto que para o grupo AIRCAR, o qual representa as observações obtidas por meio de aviões, enviadas para satélites geostacionários e posteriormente enviadas para o solo. . . . . 37
4.7	Distribuição espacial das observações obtidas por meio de sensoriamento remoto do grupo PROFLR, o qual representa as observações obtidas por meio de perfiladores de vento, para o dia 16 de fevereiro de 2004 às 0000 (topo esquerdo), 0600 (topo direito), 1200 (base esquerda) e 1800 UTC (base direita). . . . . 39
4.8	Idem a Figura 4.7, exceto que para o grupo VADWND, o qual representa as observações obtidas por meio de radares. . . . . 39
4.9	Idem a Figura 4.7, exceto que para o grupo SATWND, o qual representa as observações obtidas por meio de satélites. . . . . 41
4.10	Idem a Figura 4.7, exceto que para o grupo QKSWND, o qual representa as observações de superfície obtidas por meio do satélite QuikSCAT. . . . . 42
4.11	Idem a Figura 4.7, exceto que para o grupo SPSSMI, o qual representa as observações de superfície obtidas por meio do sensor SSM/I. . . . . 42

4.12	Distribuição espacial das observações sintéticas do grupo SYNDAT, o qual representa as observações sintéticas de vento de ciclones tropicais (BOGUS), para o dia 16 de fevereiro de 2004 às 0600 UTC. . . . .	43
4.13	Diagrama de Venn para ilustrar a distribuição das observações quanto as observações de massa e vento. . . . .	44
4.14	Topografia global para a resolução T <sub>Q</sub> 62L28 utilizada nesta pesquisa. A unidade é m. . . . .	50
4.15	Ciclo de análise utilizando o sistema GLETKF com intervalo de 6 horas entre as análises, realizado às 0000, 0600, 1200 e 1800 UTC. . . . .	54
5.1	Série temporal dos erros das previsões de 24 horas (linha contínua cinza) e 30 horas (linha contínua preta), do impacto total (linha pontilhada preta) e da correspondente estimativa do impacto das observações nas previsões de 24 horas (linha pontilhada cinza) utilizando o GLETKF para todas as análises durante o mês de fevereiro de 2004. A unidade é Jkg <sup>-1</sup> . . . . .	60
5.2	Série temporal da estimativa do impacto das observações nas previsões de 24 h normalizada pela redução dos erros das previsões utilizando o GLETKF para todas as análises durante o mês de fevereiro de 2004. . . . .	61
5.3	Distribuição espacial horizontal da média mensal dos erros das previsões de 30 h. O fator de escala é 10 <sup>-5</sup> e a unidade é Jkg <sup>-1</sup> . . . . .	63
5.4	Idem a Figura 5.3, exceto que para as previsões de 24 h. . . . .	64
5.5	Distribuição espacial horizontal da diferença entre as médias mensais dos erros das previsões de 24 e 30 h. O fator de escala é 10 <sup>-5</sup> e a unidade é Jkg <sup>-1</sup> . . . . .	65
5.6	Plotagens em barras para cada grupo de observação avaliado durante o mês de fevereiro de 2004: (a) do impacto das observações nas previsões de 24 h do GLETKF, a unidade é Jkg <sup>-1</sup> ; (b) da fração de observações benéficas, a unidade é %; (c) do total de observações assimiladas, o fator de escala é 10 <sup>6</sup> ; (d) e do impacto por observação, o fator de escala é 10 <sup>-6</sup> e a unidade é Jkg <sup>-1</sup> . . . . .	66
5.7	Plotagens em barras do impacto das observações nas previsões de 24 h do GLETKF durante o mês de fevereiro de 2004, para as regiões: (a) Global (90°S-90°N); (b) Hemisfério Norte (20°N-80°N); (c) Hemisfério Sul (80°S-20°S); (d) e Tropical (20°S-20°N). A unidade é Jkg <sup>-1</sup> . . . . .	71

5.8	Distribuição espacial da estimativa do impacto das observações (figura superior) e da contagem de observações (figura inferior) do grupo ADPSFC, o qual representa as observações <i>in situ</i> obtidas em superfície continental, durante o mês de fevereiro de 2004. Ambas figuras apresentam a média zonal (lado direito) referente a respectiva distribuição espacial. Os resultados referentes aos impactos representam valores médios, integrados verticalmente em grade de $1,875^\circ \times 1,875^\circ$ e utilizando a contagem apresentada. Para o impacto o fator de escala é $10^{-5}$ e a unidade é $\text{Jkg}^{-1}$ . Já para a contagem o fator de escala é $10^3$ . . . . .	74
5.9	Idem a Figura 5.8, exceto que para as observações do grupo SFCSHP, o qual representa o grupo das observações <i>in situ</i> em superfície oceânica. . . . .	75
5.10	Idem a Figura 5.8, exceto que para as observações do grupo ADPUPA, o qual representa o grupo das observações <i>in situ</i> obtidas por meio de radiossondas, dropsondas e balões piloto. . . . .	76
5.11	Idem a Figura 5.8, exceto que para as observações do grupo AIRCFT, o qual representa o grupo das observações <i>in situ</i> obtidas por meio de aviões e enviadas diretamente para o solo. . . . .	77
5.12	Idem a Figura 5.8, exceto que para as observações do grupo AIRCAR, o qual representa o grupo das observações <i>in situ</i> obtidas por meio de aviões, enviadas para satélites geostacionários e posteriormente enviadas para o solo. . . . .	78
5.13	Idem a Figura 5.8, exceto que para as observações do grupo PROFRLR, o qual representa o grupo das observações obtidas por meio de sensoriamento remoto utilizando perfiladores de vento. . . . .	79
5.14	Idem a Figura 5.8, exceto que para as observações do grupo VADWND, o qual representa o grupo das observações obtidas por meio de sensoriamento remoto utilizando radares. . . . .	80
5.15	Idem a Figura 5.8, exceto que para as observações do grupo SATWND, o qual representa o grupo das observações obtidas por meio de sensoriamento remoto utilizando satélites. . . . .	82
5.16	Idem a Figura 5.8, exceto que para as observações do grupo QKSWND, o qual representa o grupo das observações obtidas por meio de sensoriamento remoto utilizando o satélite QuikSCAT. . . . .	83
5.17	Idem a Figura 5.8, exceto que para as observações do grupo SPSSMI, o qual representa o grupo das observações obtidas por meio de sensoriamento remoto utilizando o sensor SSM/I. . . . .	85
5.18	Idem a Figura 5.8, exceto que para as observações do grupo SYNDAT, o qual representa o grupo das observações sintéticas. . . . .	86

5.19 Plotagens em barras para cada camada vertical durante o mês de fevereiro de 2004: (a) do impacto das observações nas previsões de 24 h do GLETKF, a unidade é  $\text{Jkg}^{-1}$ ; (b) da fração de observações benéficas, a unidade é %; (c) do total de observações assimiladas, o fator de escala é  $10^6$ ; (d) e do impacto por observação, o fator de escala é  $10^{-6}$  e a unidade é  $\text{Jkg}^{-1}$ . . . . . 89

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
4.1 Número de observações assimiladas em um dia típico (01 de fevereiro de 2004). . . . .	30
4.2 Reportes de massa para o período de 0000 UTC de 01 de janeiro de 2004 às 2100 UTC de 28 de fevereiro de 2004. . . . .	43
4.3 Reportes de vento para o período de 0000 UTC de 01 de janeiro de 2004 às 2100 UTC de 28 de fevereiro de 2004. . . . .	44
4.4 Configurações do GLETKF utilizadas nesta pesquisa. . . . .	50
4.5 Longitudes do MCGA-CPTEC/INPE utilizadas nesta pesquisa. . . . .	51
4.6 Latitudes do MCGA-CPTEC/INPE utilizadas nesta pesquisa. . . . .	52
4.7 Níveis verticais do MCGA-CPTEC/INPE utilizados nesta pesquisa. . . . .	53
4.8 Configurações do MCGA-CPTEC/INPE utilizadas nesta pesquisa. . . . .	54
5.1 Impactos das observações durante o mês de fevereiro de 2004 de acordo com os grupos de observações. . . . .	69
5.2 Impacto das observações durante o mês de fevereiro de 2004 de acordo com a sua distribuição espacial. A unidade é $\text{Jkg}^{-1}$ . . . . .	87
5.3 Fração do impacto das observações durante o mês de fevereiro de 2004 de acordo com a sua distribuição espacial. A unidade é %. . . . .	87
5.4 Contagem de observações durante o mês de fevereiro de 2004 de acordo com a sua distribuição espacial. . . . .	88
5.5 Impacto por observação durante o mês de fevereiro de 2004 de acordo com a sua distribuição espacial. O fator de escala é $10^{-5}$ e a unidade é $\text{Jkg}^{-1}$ . . . . .	88
5.6 Impactos das observações durante o mês de fevereiro de 2004 de acordo com a sua distribuição vertical. . . . .	91



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADPSFC	–	<i>Surface land (SYNOP, METAR) reports</i>
ADPUPA	–	<i>Upper-air (RAOB, PIBAL, RECCO, DROPS) reports</i>
AIRCAR	–	<i>ACARS aircraft reports</i>
AIRCFT	–	<i>Conventional (AIREP, PIREP) and ASDAR aircraft reports</i>
AIRS	–	<i>Atmospheric Infrared Sounder</i>
AMSU	–	<i>Advanced Microwave Sounding Unit</i>
AMV	–	<i>Atmospheric Motion Vectors</i>
ATOVS	–	<i>Advanced TIROS Operational Vertical Sounder</i>
BUFR	–	<i>Binary Universal Form for the Representation of meteorological data</i>
CMC	–	<i>Canadian Meteorological Centre</i>
COLA	–	<i>Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies</i>
CPTEC	–	<i>Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos</i>
DMSF	–	<i>Defense Meteorological Satellite Program</i>
ECMWF	–	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
EC	–	<i>Environment Canada</i>
EnKF	–	<i>Ensemble Kalman Filter</i>
ETKF	–	<i>Ensemble Transform Kalman Filter</i>
EUMETSAT	–	<i>European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites</i>
FSO	–	<i>Forecast Sensitivity to Observations</i>
GDAD	–	<i>Grupo de Desenvolvimento em Assimilação de Dados</i>
GMAO	–	<i>Global Modeling and Assimilation Office</i>
GMS	–	<i>Geostationary Meteorological Satellite</i>
GOES	–	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>
GOS	–	<i>Global Observing System</i>
GPSAS	–	<i>Global Physical-space Statistical Analysis System</i>
GSI	–	<i>Grid-Point Statistical Interpolation</i>
GTS	–	<i>Global Telecommunication System</i>
IGY	–	<i>International Geophysical Year</i>
INPE	–	<i>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais</i>
JMA	–	<i>Japan Atmospheric Agency</i>
KF	–	<i>Kalman Filter</i>
LEKF	–	<i>Local Ensemble Kalman Filter</i>
LETKF	–	<i>Local Ensemble Transform Kalman Filter</i>
MCGA	–	<i>Modelo de Circulação Geral da Atmosfera</i>
Météo-France	–	<i>Service Météorologique National de la France</i>
METEOSAT	–	<i>Meteorological Satellite</i>
MTSAT	–	<i>Multi-functional Transport Satellite</i>
NASA	–	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>

NCEP	–	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NESDIS	–	<i>National Environmental Satellite, Data, and Information Service</i>
NEXRAD	–	<i>Next-generation Radar</i>
NOAA	–	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NPN	–	<i>NOAA Profiler Network</i>
NRL	–	<i>Naval Research Laboratory</i>
OI	–	<i>Optimal Interpolation</i>
OMB	–	<i>Observation-Minus-Background</i>
OSE	–	<i>Observing System Experiment</i>
OSSE	–	<i>Observing System Simulation Experiment</i>
PrepBUFR	–	<i>Prepared Binary Universal Form for the Representation of meteorological data</i>
PROFLR	–	<i>Wind profiler reports</i>
PSAS	–	<i>Physical-space Statistical Analysis System</i>
QKSWND	–	<i>QuikSCAT scatterometer data (reprocessed wind speed)</i>
QuikSCAT	–	<i>Quick Scatterometer</i>
SATWND	–	<i>Satellite-derived wind reports</i>
SFCSHP	–	<i>Surface marine (SHIP, BUOY, C-MAN platform) reports</i>
SPEEDY	–	<i>Simplified Parameterizations Primitive Equation Dynamic</i>
SPSSMI	–	<i>SSM/I retrieval product (reprocessed wind speed)</i>
SSM/I	–	<i>Special Sensor Microwave/Imager</i>
SYNDAT	–	<i>Synthetic tropical cyclone BOGUS reports</i>
UKMetOffice	–	<i>United Kingdom Meteorological Office</i>
VAD	–	<i>Velocity-Azimuth Display</i>
VADWND	–	<i>VAD (NEXRAD) wind reports</i>
WMO	–	<i>World Meteorological Organization</i>
WWW	–	<i>World Weather Watch</i>
3D-Var	–	<i>Three-Dimensional Variational</i>
4DDA	–	<i>Four-Dimensional Data Assimilation</i>
4D-Var	–	<i>Four-Dimensional Variational</i>



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\bar{\square}$	– Média
$\bar{\mathbf{x}}^a$	– Média das análises do conjunto
$\bar{\mathbf{x}}^b$	– Média das estimativas iniciais do conjunto
$\square^T$	– Operação transposta
$C$	– Norma de energia total contínua
$C_p$	– Calor específico do ar à pressão constante
$\delta \mathbf{x}^{ai}$	– Diferença entre a $i$ -ésima análise do conjunto e a média das análises do conjunto
$\epsilon$	– Quadrado da diferença entre as previsões e o estado de verificação
$h(\square)$	– Operador de observação não-linear
$I$	– Impacto das observações
$J$	– Função custo
$K$	– Quantidade de membros do conjunto
$L_c$	– Calor latente de condensação
$L$	– Dimensão espacial dos conjuntos de observações
$l$	– Subconjunto de observações
$m$	– Dimensão espacial do conjunto
$M$	– Modelo numérico não-linear
$n$	– Dimensão espacial do modelo
$\omega_q$	– Peso relativo do termo úmido da norma de energia total
$p$	– Dimensão espacial das observações
$p_s$	– Pressão à superfície
$p_{sr}$	– Pressão à superfície de referência
$q$	– Umidade específica
$R_d$	– Constante dos gases para o ar seco
$\mathbf{B}$	– Matriz de covariância dos erros da estimativa inicial
$\mathbf{C}$	– Norma de energia total discretizada
$\mathbf{e}$	– Diferença das previsões e do estado de verificação
$\mathbf{H}(\square)$	– Operador de observação linear
$\mathbf{K}$	– Matriz ganho de Kalman
$\mathbf{M}$	– Modelo numérico linear
$\mathbf{P}^a$	– Matriz de covariância da análise
$\mathbf{P}^b$	– Matriz de covariância da estimativa inicial
$\mathbf{R}$	– Matriz de covariância dos erros das observações
$\mathbf{v}$	– Resíduos
$\mathbf{x}^a$	– Análise do estado
$\mathbf{x}^{ai}$	– $i$ -ésima análise do conjunto
$\mathbf{X}^a$	– Matriz de perturbações do conjunto de análise
$\mathbf{x}^b$	– Estimativa inicial

- $\mathbf{x}^{bi}$  –  $i$ -ésima estimativa inicial do conjunto
- $\mathbf{X}^b$  – Matriz de perturbações do conjunto de estimativa inicial
- $\mathbf{X}^f$  – Matriz de perturbações do conjunto de previsões
- $\mathbf{x}^f$  – Previsão do estado
- $\mathbf{x}^v$  – Estado de verificação
- $\mathbf{y}^o$  – Observações
- $\tilde{\square}$  – Espaço do conjunto
- $\tilde{\mathbf{K}}$  – Matriz ganho de Kalman no espaço do conjunto
- $\tilde{\mathbf{P}}^a$  – Matriz de covariância dos erros da análise no espaço do conjunto
- $T_r$  – Temperatura de referência
- $T$  – Temperatura
- $t$  – Tempo
- $u$  – Vento zonal
- $v$  – Vento meridional

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Objetivos . . . . .	4
1.2 Estrutura do documento . . . . .	4
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> . . . . .	<b>7</b>
2.1 Assimilação de dados . . . . .	7
2.2 Impacto das observações . . . . .	11
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> . . . . .	<b>17</b>
3.1 Impacto das observações . . . . .	17
3.1.1 Método tradicional . . . . .	17
3.1.2 Método baseado em modelos adjuntos . . . . .	19
3.1.3 Método baseado em conjuntos . . . . .	23
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> . . . . .	<b>29</b>
4.1 Dados . . . . .	29
4.1.1 Sistema de observação global . . . . .	30
4.1.1.1 Observações <i>in situ</i> . . . . .	33
4.1.1.1.1 - Observações de superfície . . . . .	33
4.1.1.1.2 - Observações de ar superior . . . . .	34
4.1.1.2 Observações obtidas por meio de sensoriamento remoto . . . . .	36
4.1.1.2.1 - Ventos obtidos por meio de perfiladores . . . . .	38
4.1.1.2.2 - Ventos obtidos por meio de radar . . . . .	38
4.1.1.2.3 - Ventos obtidos por meio de satélite . . . . .	38
4.1.1.2.4 - Observações de superfície . . . . .	40
4.1.1.3 Observações sintéticas . . . . .	41
4.2 Metodologia . . . . .	45
4.2.1 Sistema de assimilação de dados . . . . .	45
4.2.1.1 Método de assimilação de dados . . . . .	46
4.2.1.2 Modelo de circulação geral da atmosfera . . . . .	49
4.2.1.3 Descrição do ciclo de assimilação de dados . . . . .	53
4.2.2 Impacto das observações . . . . .	55

<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>59</b>
5.1	Estimativa do impacto	59
5.1.1	Distribuição temporal dos erros	59
5.1.2	Distribuição espacial dos erros	63
5.2	Impacto do sistema de observação global	65
5.2.1	Distribuição horizontal dos impactos	69
5.2.2	Distribuição vertical dos impactos	89
<b>6</b>	<b>Considerações finais</b>	<b>93</b>
6.1	Conclusões	94
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	98
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>99</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Até a década de 50, a previsão de tempo era realizada de forma altamente subjetiva, pois, para realizar um prognóstico, o previsor dispunha de pouquíssimas ferramentas. A partir dessa década, devido ao conhecimento teórico adquirido em relação à meteorologia, houve grande evolução com respeito à previsão numérica de tempo. Foi a partir do sucesso obtido por Charney et al. (1950), em que foi integrada no tempo a equação de vorticidade barotrópica não-divergente e conseqüentemente se obteve a primeira previsão numérica de tempo, que a comunidade meteorológica mundial retomou os estudos na área previsão numérica de tempo. A partir da década anteriormente citada, teve-se, como uma das principais ferramentas disponibilizadas para os centros de previsão de tempo, os prognósticos dos modelos de previsão numérica de tempo. Esses, seguem a ideia proposta por Richardson (1922) de, por meio de um método numérico, integrar no tempo as equações governantes dos fluxos atmosféricos a fim de obter um estado da atmosfera em um tempo futuro.

Segundo Bjerknes (1904), com o objetivo de prognosticar um estado futuro da atmosfera, é necessário conhecer o estado presente da atmosfera. Com isso, é possível generalizar que a previsão de tempo se dá por intermédio de duas etapas. Primeiro, uma etapa de diagnóstico, em que é necessário ter o conhecimento mais acurado possível do estado atual da atmosfera, o qual é denominado como sendo as condições iniciais para um modelo de previsão numérica de tempo. E segundo, uma etapa de prognóstico, em que torna-se necessário, ter conhecimento das leis fundamentais que governam os fluxos atmosféricos para poder prognosticar o estado futuro da atmosfera. A partir dessa generalização, e sabendo que a previsão numérica de tempo é limitada a um intervalo de tempo devido a atmosfera terrestre apresentar comportamento altamente caótico (LORENZ, 1963), é possível afirmar que a previsão numérica de tempo pode ser considerada matematicamente um problema de condição inicial, por ser altamente dependente das condições iniciais.

Nesse contexto, surge a assimilação de dados como uma importante ferramenta que é utilizada durante a etapa de diagnóstico, sendo responsável por criar um campo inicial representativo das condições atmosféricas reinantes em determinado momento utilizando o maior número de informações possíveis. Para isso a assimilação de dados basicamente combina as observações obtidas por meio de variados tipos de instrumentos com previsões realizadas por modelos de previsão numérica de tempo, e assim fornece as condições iniciais necessárias para a realização da etapa de prognóstico citada anteriormente, originando um sistema cíclico.

Anos após o sucesso da primeira previsão numérica de tempo, não somente novos métodos de assimilação de dados, mas também novos sistemas de observação surgiram e continuam em constante desenvolvimento. Entre esses, os baseados em observações obtidas por meio de sensoriamento remoto são, atualmente, os de maior interesse dos centros de previsão numérica de tempo operacionais, pois essas observações apresentam maior cobertura espacial e temporal com relação as observações *in situ*. Entretanto, somente adicionar observações ao sistema de assimilação de dados não significa que essas estarão o beneficiando, tornando-se necessário medir o valor adicionado ao sistema de assimilação de dados por essas observações. Para isso é necessário conhecer detalhadamente os sistemas de observação, pois essa medida pode variar de acordo com o tipo de instrumento utilizado para obter a observação, com o tipo de observação, com o local de observação e também com a presença de outras observações.

Diversos trabalhos podem ser encontrados na literatura estimando o impacto de diferentes tipos de observações em um sistema de assimilação de dados. Tradicionalmente, a metodologia utilizada para estimar esse impacto dá-se por meio de Experimento de Sistema de Observação (OSE, do inglês *Observing System Experiment*) e Experimento de Simulação de Sistema de Observação (OSSE, do inglês *Observing System Simulation Experiment*) baseados em experimentos com dados negados (do inglês *data denial*) ou com dados adicionados (do inglês *data add-on*), nos quais um determinado tipo de observação é removido ou adicionado, respectivamente, de um sistema de assimilação de dados e posteriormente comparadas com simulações de controle (*e.g.*, Kelly et al. (2007), Cardinali et al. (2007), Andreoli et al. (2008)). Podendo ser realizado até mesmo acrescentando ou removendo as observações de determinada região (*e.g.*, Mattos (2006)). Esse procedimento verifica de maneira acumulativa o quanto é modificado o sistema de assimilação de dados com relação a remoção de determinadas observações. Entretanto, esse procedimento torna-se inviável operacionalmente devido ao alto custo computacional para realizar múltiplas execuções do sistema de assimilação de dados.

O desenvolvimento de abordagens eficientes e viáveis operacionalmente para quantificar o impacto das observações em um sistema de assimilação de dados está no foco das pesquisas dos principais centros de previsão numérica de tempo do mundo inteiro. Uma avaliação objetiva desses impactos é necessária para atingir um uso ótimo dos dados a partir do conhecimento de como o sistema de assimilação responde ao uso desses dados, como por exemplo em uma estratégia para redução da

quantidade dos mesmos no processo de seleção das observações a serem assimiladas, ou uma avaliação de custo benefício de experimentos de campo para observações específicas, como também para o planejamento de futuros sistemas de observação.

Nos últimos anos, novas abordagens foram desenvolvidas utilizando sistemas de assimilação de dados variacionais, baseadas em modelo adjunto. Essa técnica baseada em modelos adjuntos, descrita em Langland e Baker (2004) e nos trabalhos subsequentes (ERRICO, 2007; GELARO et al., 2007; DAESCU, 2009; GELARO et al., 2010), estima os impactos de todas as observações assimiladas a partir de um ciclo de assimilação sem a necessidade da realização de experimentos de dados negados ou adicionados, podendo ser utilizada operacionalmente devido a sua flexibilidade e a sua eficiência computacional. Utilizando essa mesma abordagem de modelos adjuntos, Liu e Kalnay (2008) desenvolveram um método de calcular o impacto das observações, porém baseada em conjunto utilizando uma variação do filtro de Kalman como método de assimilação e aplicada em cenários idealizados. Ambos os métodos podem ser utilizados para estimar quantitativamente o impacto de todas as observações assimiladas e posteriormente classificar a medida de acordo com o tipo de observação, região da observação e até mesmo o instrumento utilizado na coleta da observação.

O Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) executa modelos numéricos de previsão de tempo em escala global e regional com a finalidade de produzir, operacionalmente, previsões de tempo para o Brasil. Atualmente, uma das ferramentas disponibilizadas para a previsão de tempo no CPTEC/INPE é o Sistema de Análise Estatística em Espaço Físico Global (GPSAS - do inglês *Global Physical-space Statistical Analysis System*), o qual representa combinação entre o Modelo de Circulação Geral da Atmosfera do CPTEC/INPE (MCGA-CPTEC/INPE) e o esquema de assimilação de dados Sistema de Análise Estatística em Espaço Físico (PSAS - do inglês *Physical-space Statistical Analysis System*, da Silva et al. (1995)) e está operacional no centro desde 2004. O método Filtro de Kalman Transformado por Conjunto Local (LETKF - do inglês *Local Ensemble Transform Kalman Filter*, Hunt et al. (2007)) está em fase de desenvolvimento no CPTEC/INPE, e esforços têm sido direcionados a fim de, futuramente, o método realizar os ciclos de análise, e com isso fornecer as condições iniciais para o MCGA-CPTEC/INPE gerar os prognósticos operacionais (*e.g.*, Aravéquia et al. (2010), Souza et al. (2010), Medeiros et al. (2010), Medeiros (2011)), originando o sistema Filtro de Kalman Transformado por Conjunto Local Global (GLETKF - do inglês *Global Local Ensemble Transform*

*Kalman Filter*). Nesse contexto, torna-se necessário a disponibilidade de uma ferramenta diagnóstica que forneça uma medida do impacto de cada observação nesse sistema em desenvolvimento.

## 1.1 Objetivos

Em vista do exposto, o objetivo principal desta pesquisa é avaliar os impactos das observações nas previsões de curto prazo, utilizando o método proposto por Liu e Kalnay (2008), no sistema de assimilação de dados que está em desenvolvimento no CPTEC/INPE, o GLETKF, a fim de fornecer conhecimento com relação ao uso dessa abordagem como uma ferramenta diagnóstica capaz de indicar possíveis causas de erro nas previsões de curto prazo. Para alcançar esse objetivo algumas metas específicas foram traçadas:

- implementar o método proposto por Liu e Kalnay (2008) no GLETKF;
- verificar o impacto dos diversos tipos de observações no ciclo de assimilação de dados que futuramente será operacional no CPTEC/INPE;
- e apresentar a viabilidade operacional do sistema.

## 1.2 Estrutura do documento

A estrutura do documento é descrita a seguir. No Capítulo 2 é apresentada uma breve fundamentação teórica com respeito à assimilação de dados no contexto de meteorologia e sobre os métodos utilizados para avaliar o impacto que as observações têm nas previsões de curto prazo, em particular utilizando o método de assimilação de dados LETKF. No Capítulo 3 é apresentada uma breve revisão bibliográfica com respeito aos impactos das observações nas previsões de um sistema de assimilação de dados por meio de uma breve revisão dos impactos obtidos utilizando um método tradicional de estimativa de impacto, assim como também é realizada uma breve revisão dos impactos obtidos utilizando técnicas mais recentes, como por exemplo os métodos baseados em modelos adjuntos e em conjuntos. No capítulo 4 são apresentados os dados e a metodologia utilizada nesta pesquisa por meio de uma apresentação geral com relação aos dados e ao sistema de assimilação, assim como suas principais componentes e o procedimento para o cálculo do impacto das observações nas previsões de curto prazo. No Capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados obtidos com a realização desta pesquisa por meio da verificação do impacto que as observações do sistema global de observação têm nas previsões de



curto prazo do GLETKF. E por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros obtidas com a realização desta pesquisa.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma breve fundamentação teórica sobre a assimilação de dados no contexto de meteorologia e sobre métodos para avaliar o impacto das observações nas previsões de curto prazo, em particular usando o método de assimilação de dados LETKF. Existem na literatura excelentes revisões em assimilação de dados, como por exemplo Daley (1991), Kalnay (2002) e Tsuyuki e Miyoshi (2007).

### 2.1 Assimilação de dados

Como citado no Capítulo 1, a previsão numérica de tempo necessita de uma representação adequada da atmosfera pelas condições iniciais. A assimilação de dados surge nesse contexto com o objetivo de produzir, o mais acurado possível, uma representação da atmosfera regular no espaço e no tempo, fisicamente consistente a partir de uma distribuição heterogênea no espaço e no tempo de observações *in situ*, de sensoriamento remoto e sintéticas. Após o sucesso obtido com a primeira previsão numérica de tempo as observações meteorológicas tornaram-se cada vez melhor distribuídas espacialmente e temporalmente para melhor representar a atmosfera. Entretanto, somente um aumento na quantidade de observações ainda não resolveria o problema encontrado por Richardson (1922), que basicamente foi devido a suas condições iniciais terem sido obtidas através de uma análise subjetiva nos campos meteorológicos. O procedimento de análise subjetiva surgiu a partir da confecção de cartas sinóticas e esse está sujeito a empirismo, uma vez que sua composição depende da habilidade e da experiência de cada especialista.

Assim como as previsões numéricas de tempo se beneficiaram com o desenvolvimento computacional, as análises também. A fim de obter um procedimento de análise objetiva, Panofsky (1949) propôs uma técnica automática de análise às observações para pontos de grade. Essa técnica consistia basicamente em um ajuste polinomial dos campos analisados, e apesar de ser relativamente simples de implementar e computacionalmente vantajosa, essa técnica apresentava problemas em regiões onde não haviam observações. Bergthórsson e Döös (1955) aperfeiçoaram a técnica citada anteriormente adicionando informações *a priori* da estimativa, conhecidas na literatura como estimativa inicial (do inglês *background*), solucionando o problema que essa apresentava anteriormente em regiões onde não haviam observações. A estimativa inicial consistia em uma previsão numérica válida para o tempo a ser analisado, tornando esse processo mais vantajoso, devido a essa abordagem ser baseada nas diferenças entre as observações e a estimativa inicial e não somente

baseada nas observações. Essas diferenças são conhecidas pela sigla OMB (do inglês *observation-minus-background*). Com isso, em um ciclo de assimilação de dados, a estimativa inicial pode ser considerada uma representação do estado das observações passadas propagadas pelo modelo numérico de previsão de tempo até o tempo de análise. Aliado à Cressman (1959), esse procedimento foi denominado como técnica de correções sucessivas e deram origem a assimilação de dados quadridimensional (4DDA, do inglês *Four-Dimensional Data Assimilation*) (KALNAY, 2002). A técnica de correções sucessivas consiste basicamente em suavizar de maneira iterativa o campo de estimativa inicial em pontos de grade com relação às observações. Apesar de essa técnica ser automática, os pesos são determinados empiricamente e tem como desvantagem o fato de não levar em consideração a estatística dos erros das observações e das condições iniciais.

Afim de considerar os erros estatísticos das observações e da estimativa inicial os trabalhos de Eliassen (1954) e, posteriormente Gandin (1963), propuseram um método conhecido como Interpolação Ótima (OI, do inglês *Optimal Interpolation*), no qual os pesos são obtidos por meio de funções de covariância estatística das variáveis meteorológicas. Um dos maiores avanços alcançados por OI se relaciona ao tratamento dado ao aspecto multivariável do problema de assimilação de dados. Essa técnica motivou o uso de relações dinâmicas que permitem relacionar observações de ventos com correções no campo de temperatura, e vice-versa. Apesar da dramática melhora na técnica de assimilação de dados, essas relações dinâmicas correspondem a drásticas simplificações das relações dinâmicas correspondentes as leis que governam a evolução dos campos atmosféricos. Uma das principais consequências é a discrepância dos balanços reais entre os vários campos físicos e o balanço introduzido por tais simplificações. Isso levou a necessidade do desenvolvimento de técnicas de inicialização, que tem por objetivo, balancear os campos físicos após feitas as análises, de modo a reduzir os efeitos colaterais causados pela integração do modelo quando inicializado com tais análises.

Além desses métodos de assimilação de dados brevemente apresentados aqui por meio de uma revisão histórica, existem outros em constante desenvolvimento devido a busca da solução de um dos maiores e mais importantes problemas em previsão numérica de tempo, que é indicado por Lorenc (1986) como sendo a determinação da condição inicial. A maneira como é obtida a análise, por meio da combinação da estimativa inicial e das observações, é o que os difere. Basicamente, os métodos de assimilação de dados fornecem condições iniciais à um modelo de previsão numérica de tempo, combinando observações e previsões do modelo de forma linear com pesos

determinados por meio da covariância estatística dos erros das observações e da estimativa inicial, conforme a equação abaixo (DALEY, 1991):

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^b + \mathbf{K}[\mathbf{y}^o - \mathbf{H}(\mathbf{x}^b)] \quad (2.1)$$

onde os campos de análise e de estimativa inicial são representados pelos vetores  $\mathbf{x}^a \in \mathbb{R}^n$  e  $\mathbf{x}^b \in \mathbb{R}^n$ , respectivamente. Será utilizado o superescrito  $n$  para indicar a dimensão espacial do estado e  $p$  para indicar a dimensão espacial das observações. A matriz ganho é representada por  $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{n \times p}$ ; as observações são representadas pelo vetor  $\mathbf{y}^o \in \mathbb{R}^p$ ; e o operador de observação, que realiza a interpolação do espaço físico para o espaço das observações, é representado por  $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{p \times n}$ . No caso do método OI, por exemplo, a matriz ganho é dada pela covariância dos erros da estimativa inicial no espaço das observações multiplicado pela covariância do erro total, e é definida pela equação abaixo:

$$\mathbf{K} = \mathbf{B}\mathbf{H}^T[\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1} \quad (2.2)$$

onde a matriz de covariância dos erros da estimativa inicial é representada por  $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  e a matriz de covariância dos erros das observações é representada por  $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{p \times p}$ . O superescrito T denota a operação transposta. A Figura 2.1 ilustra a relação apresentada acima em um sistema cíclico, utilizando o mesmo campo de variável apresentado por Daley (1985), sendo o vento em altos níveis. O ciclo tem início na etapa de previsão, em que a estimativa inicial  $\mathbf{x}^b$  é representada por uma evolução temporal por meio de um modelo numérico de previsão de tempo a partir de uma análise  $\mathbf{x}^{a1}$ .

A evolução temporal citada anteriormente, será utilizada como estimativa inicial  $\mathbf{x}^b$  a ser corrigida com as observações  $\mathbf{y}^o$  válidas para esse tempo futuro. Para isso, as variáveis da estimativa inicial são interpoladas do espaço do modelo utilizado na evolução temporal para os locais das observações, gerando pseudo-observações, e posteriormente realizadas as diferenças entre essas pseudo-observações e as observações. Com isso, são gerados os resíduos  $[\mathbf{y}^o - \mathbf{H}(\mathbf{x}^b)]$ , também conhecidos como incrementos de observações<sup>2</sup>, que posteriormente serão interpoladas novamente

---

<sup>1</sup>Aqui assume-se que a estimativa inicial já existe, entretanto na ausência dessa para iniciar o ciclo, a mesma pode ser composta por uma climatologia ou até mesmo um estado atmosférico aleatório.

<sup>2</sup>Embora errôneo, frequentemente encontra-se na literatura um sinônimo para esse termo

para o espaço do modelo utilizado na evolução temporal e receberão seus devidos pesos de acordo com o método de assimilação para gerar as correções  $\mathbf{K}[\mathbf{y}^o - \mathbf{H}(\mathbf{x}^b)]$ , também conhecidas como incrementos de análise. E com isso gerar uma nova análise do estado da atmosfera em um tempo futuro, que será utilizada para uma nova evolução temporal do estado da atmosfera, reiniciando o ciclo de análise e previsão de tempo.

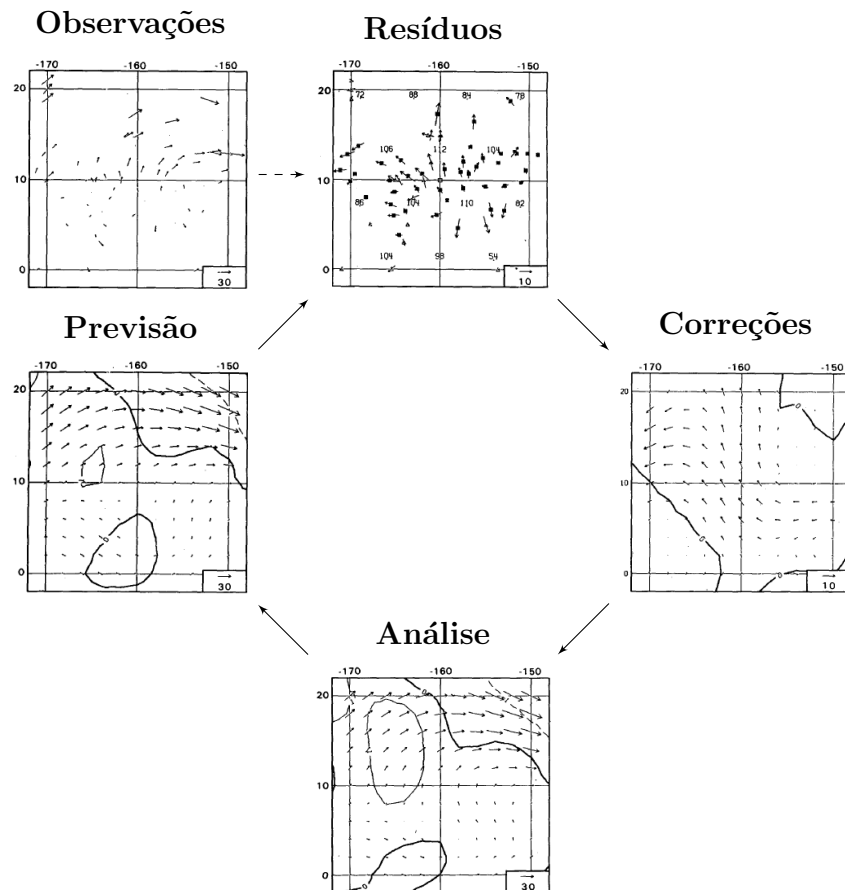


Figura 2.1 - Ciclo de análise e previsão numérica de tempo para o campo de vento.  
 Fonte: Adaptado de Daley (1985).

O processo citado anteriormente é utilizado continuamente nos grandes centros operacionais de previsão numérica de tempo, caracterizando um ciclo de assimilação de dados intermitente (Figura 2.2), em que tipicamente realiza-se uma análise a cada 6 horas, totalizando 4 análises por dia centradas em horários sinóticos, como por exemplo, 0000, 0600, 1200 e 1800 UTC. O modelo de previsão desempenha uma

---

denominado inovações.

importante função nesse processo, uma vez que em regiões com grande quantidade de informações observadas, a análise é dominada pelas observações. Já em regiões com pouca quantidade de informações, a estimativa inicial domina nessas áreas (KALNAY, 2002).

Como exemplo do uso dos variados métodos de assimilação de dados entre os principais centros de previsão numérica de tempo, podemos citar o Centro Europeu de Previsão de Tempo de Médio Prazo (ECMWF, do inglês *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), a Agência Meteorológica do Japão (JMA, do inglês *Japan Meteorological Agency*), o Laboratório de Pesquisa Naval (NRL, do inglês *Naval Research Laboratory*), o Meio Ambiente do Canadá (EC, do inglês *Environment Canada*) a Divisão Meteorológica do Reino Unido (UKMetOffice, do inglês *United Kingdom Meteorological Office*) e o Serviço Meteorológico da França (Météo-France, do francês *Service Météorologique National de la France*) que utilizam operacionalmente o método Variacional Quadridimensional (4D-Var, do inglês *Four-Dimensional Variational*, Le Dimet e Talagrand (1986)), que considera em seu processo de assimilação as três dimensões espaciais e a dimensão temporal de um modelo adjunto (KALNAY, 2002). O Centro Nacional de Previsão Ambiental (NCEP, do inglês *National Centers for Environmental Prediction*) utiliza, assim como a Divisão de Modelagem Global e Assimilação (GMAO, do inglês *Global Modelling and Assimilation Office*) da Administração Nacional do Espaço e da Aeronáutica (NASA, do inglês *National Aeronautics and Space Administration*), o método Interpolação Estatística em Ponto de Grade (GSI, do inglês *Grid-Point Statistical Interpolation*), cuja análise é formulada como um problema variacional. Como citado no Capítulo 1, o CPTEC/INPE, atualmente, utiliza operacionalmente o método de assimilação de dados PSAS que é basicamente OI. Entretanto, o método LETKF, originado no grupo de Tempo e Caos (do inglês *Weather and Chaos*) da Universidade de Maryland nos Estados Unidos, está em fase de implementação no CPTEC/INPE.

## **2.2 Impacto das observações**

Com o desenvolvimento e o surgimento de novos sistemas de observação, torna-se necessário avaliar o impacto das observações provenientes dos mesmos em um ciclo de assimilação, uma vez que essas são assimiladas. Como citado no Capítulo 1, a verificação do impacto que as observações têm em um sistema de assimilação de dados, tradicionalmente, é realizada por meio de OSE e OSSE. Tais experimentos baseiam-se na seleção sistemática de conjuntos de dados adicionados ou removidos

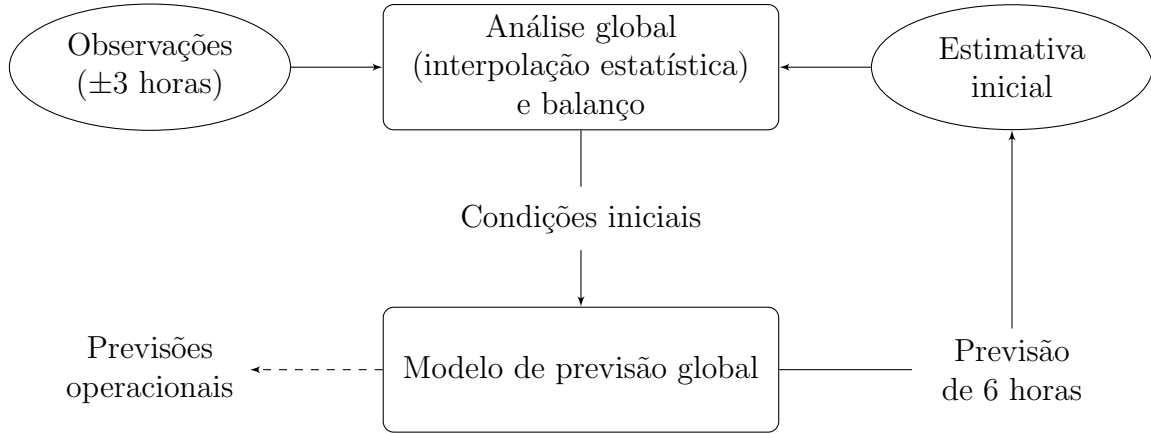


Figura 2.2 - Típico ciclo de análise global com intervalo de 6 horas entre as análises, realizado às 0000, 0600, 1200 e 1800 UTC.  
 Fonte: Adaptado de Kalnay (2002).

de um estado de controle do sistema de assimilação de dados para obter a diferença gerada a partir da modificação realizada no estado de controle. Em OSE e OSSE, a contribuição das observações nas previsões e análises dá-se, essencialmente, pela diferença causada na matriz ganho  $\mathbf{K}$ , apresentada em (2.1) e (2.2), com relação ao conjunto de observações selecionado como controle para cada subconjunto de observações a ser avaliado.

Nos últimos anos surgiram técnicas que estimam o impacto das observações nas previsões de um sistema de assimilação de dados. Uma dessas técnicas dá-se por meio da sensibilidade das previsões com relação às observações (FSO, do inglês *Forecast Sensitivity to Observations*). Assim como qualquer técnica de avaliação, primeiramente torna-se necessário definir uma métrica para avaliar o que se entende por qualidade dos resultados. Uma maneira de definir essa métrica é escolher uma medida quadrática dos erros das previsões  $\epsilon_t$ , dada por:

$$\epsilon_t = (\mathbf{x}_t^f - \mathbf{x}_t^v)^T \mathbf{C} (\mathbf{x}_t^f - \mathbf{x}_t^v) = \|\mathbf{x}_t^f - \mathbf{x}_t^v\|_{\mathbf{C}}^2 = \|\mathbf{e}_t\|_{\mathbf{C}}^2 \quad (2.3)$$

onde  $\mathbf{x}_t^f = M_t(\mathbf{x}^a)$  representa uma previsão do modelo não linear  $M$  da condição inicial  $\mathbf{x}^a$  até o tempo de verificação  $t$ , onde  $\mathbf{x}_t^v$  representa o estado de verificação nesse mesmo tempo de verificação  $t$ , e  $\mathbf{e}_t = (\mathbf{x}_t^f - \mathbf{x}_t^v)$  representa a diferença entre esses dois termos. Aqui assume-se que o estado de verificação é considerado a verdade, e tipicamente é escolhido como sendo uma análise dada pelo mesmo sistema de



assimilação de dados durante o ciclo do mesmo<sup>3</sup>. A matriz  $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  é uma matriz positiva e simétrica de pesos que define uma norma no espaço do estado (*e.g.*, energia total seca ou úmida). Para aplicações em casos reais, em que normalmente o vetor de estado é composto por diferentes variáveis, torna-se necessário a escolha de uma norma para comparar essas variáveis (*e.g.*, para aplicações meteorológicas, vento e temperatura). Conforme apresentado por Todling (2009) e, posteriormente Todling (2012), o uso de diferentes normas fornecem diferentes resultados, conseqüentemente diferentes interpretações dos mesmos devem ser realizadas. Com isso, a escolha da norma é muito importante, pois pode-se ter ambigüidades nos resultados obtidos utilizando diferentes normas. Tipicamente, em estudos de impacto das observações nas previsões de curto prazo, é escolhida a norma de energia total. Essa é uma norma que relaciona os campos de vento, temperatura, umidade e pressão, podendo ser escrita da seguinte forma:

$$C = \frac{1}{2} \int_{\Sigma} \int_0^1 \left[ u^2 + v^2 + \frac{C_p}{T_r} T^2 + \omega_q \frac{L_c^2}{C_p T_r} q^2 \right] d\sigma d\Sigma + \frac{1}{2} \int_{\Sigma} \left[ \frac{R_d T_r}{p_{sr}^2} p_s^2 \right] d\Sigma \quad (2.4)$$

onde  $u$ ,  $v$ ,  $T$ ,  $q$  e  $p_s$  representam os ventos zonal e meridional, a temperatura, a umidade específica e a pressão à superfície, respectivamente.  $C_p = 1005,7 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$  representa o calor específico do ar em pressão constante,  $L_c = 2,5104\text{E}+6 \text{ Jkg}^{-1}$  representa o calor latente de condensação,  $R_d = 287,04 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$  representa a constante dos gases para o ar seco,  $T_r = 300 \text{ K}$  e  $p_{sr} = 1000 \text{ hPa}$  representam a temperatura e a pressão à superfície de referência, respectivamente.  $\omega_q$  representa um parâmetro que define o peso relativo fornecido ao termo de umidade específica que considera o calor equivalente liberado à se ocorresse a condensação de toda umidade. É por meio da escolha desse parâmetro que define-se a norma de energia total seca ou úmida. Quando  $\omega_q = 0$ , o termo de umidade específica é nulo, resultando  $C$  no que é denominado como sendo a norma de energia total seca. Já quando  $\omega_q = 1$ , o termo de umidade específica é calculado e resulta em valor não nulo, resultando  $C$  no que é denominado como sendo a norma de energia úmida.  $\sigma$  e  $\Sigma$  indicam as dimensões espaciais verticais e horizontais, respectivamente. A matriz de pesos  $\mathbf{C}$  é derivada da expressão contínua de  $C$ , apresentada em (2.4), por intermédio de discretização apropriada.

Uma vez definida a métrica para avaliar as previsões, pode-se definir o funcional

---

<sup>3</sup>O estado de verificação também pode ser escolhido como sendo uma análise de verificação dada por um outro sistema de assimilação (*e.g.*, uma análise em alta resolução).

necessário para estimar o impacto das observações. Tipicamente, esse funcional dá-se por meio da diferença de duas medidas de erros de previsões válidas para um tempo de verificação e iniciadas a partir de análises consecutivas. Considerando um ciclo de assimilação semelhante ao apresentado na Figura 2.2, em que é gerada uma análise a cada 6 h, e utilizando a métrica definida em (2.3), o funcional pode ser escrito da seguinte forma:

$$J = \frac{1}{2} (\epsilon_{t|0} - \epsilon_{t|-6}) \quad (2.5)$$

$$= \frac{1}{2} (\mathbf{e}_{t|0}^T \mathbf{C} \mathbf{e}_{t|0} - \mathbf{e}_{t|-6}^T \mathbf{C} \mathbf{e}_{t|-6}) \quad (2.6)$$

$$= \frac{1}{2} [(\mathbf{e}_{t|0} - \mathbf{e}_{t|-6})^T \mathbf{C} (\mathbf{e}_{t|0} + \mathbf{e}_{t|-6})] \quad (2.7)$$

onde  $\epsilon_{t|0}$  e  $\epsilon_{t|-6}$  representam medidas quadráticas dos erros  $\mathbf{e}_{t|0}$  e  $\mathbf{e}_{t|-6}$ , respectivamente, e esses erros representam as diferenças entre as previsões do modelo  $\mathbf{x}_{t|0}^f = M_{t|0}(\mathbf{x}_0^a)$  e  $\mathbf{x}_{t|-6}^f = M_{t|-6}(\mathbf{x}_{-6}^a)$  com relação ao estado de verificação  $\mathbf{x}_t^v$ , que tipicamente é escolhido como sendo uma análise  $\mathbf{x}_t^a$  gerada pelo próprio sistema de assimilação de dados. Com isso, pode-se obter a seguinte relação:

$$\mathbf{e}_{t|0} - \mathbf{e}_{t|-6} = \mathbf{x}_{t|0}^f - \mathbf{x}_{t|-6}^f \approx \mathbf{M}_t (\mathbf{x}_0^a - \mathbf{x}_{0|-6}^f) = \mathbf{M}_t (\mathbf{K}_0 \mathbf{v}_0) \quad (2.8)$$

onde  $\mathbf{M}_t$  representa o modelo tangente linear que realiza uma evolução temporal dos incrementos de análise  $(\mathbf{x}_0^a - \mathbf{x}_{0|-6}^f) = \mathbf{K}_0 \mathbf{v}_0$  até o tempo de verificação  $t$ .  $\mathbf{v}_0 = [\mathbf{y}^o - \mathbf{H}(\mathbf{x}^b)]$  representam os resíduos. É importante notar que  $\mathbf{x}_{0|-6}^f = \mathbf{x}_0^b$  representa a estimativa inicial no tempo  $t = 0$  h e, suprimindo o subscrito 0, a mesma pode ser facilmente identificada na expressão definida para a atualização da análise em (2.1). Portanto, (2.7) pode ser reescrita em função dos incrementos de análise da seguinte forma:

$$J \cong \frac{1}{2} \left\{ \left[ \mathbf{M}_t \left( \mathbf{x}_0^a - \mathbf{x}_{0|-6}^f \right) \right]^T \mathbf{C} \left( \mathbf{e}_{t|0} + \mathbf{e}_{t|-6} \right) \right\} \quad (2.9)$$

$$= \frac{1}{2} \left\{ \left[ \mathbf{M}_t \left( \mathbf{K}_0 \mathbf{v}_0 \right) \right]^T \mathbf{C} \left( \mathbf{e}_{t|0} + \mathbf{e}_{t|-6} \right) \right\} \quad (2.10)$$

$$= \frac{1}{2} \left[ \mathbf{v}_0^T \mathbf{K}_0^T \mathbf{M}_t^T \mathbf{C} \left( \mathbf{e}_{t|0} + \mathbf{e}_{t|-6} \right) \right] \quad (2.11)$$

onde  $\mathbf{K}_0^T$  representa o modelo adjunto do método de assimilação de dados e  $\mathbf{M}^T$  representa o modelo adjunto do modelo de previsão numérica de tempo, ambos no tempo  $t = 0$  h. Conseqüentemente, o impacto das observações é medido por meio de um produto interno escalar, o que resulta para (2.11) a seguinte expressão:

$$I = \left\langle \mathbf{v}_0, \frac{1}{2} \mathbf{K}_0^T \mathbf{M}_t^T \mathbf{C} \left( \mathbf{e}_{t|0} + \mathbf{e}_{t|-6} \right) \right\rangle \quad (2.12)$$

Quando (2.12) resultar valor negativo, significa que as observações assimiladas em  $t = 0$  h contribuíram para a redução do erro da previsão  $\mathbf{x}_{t|0}^f$ . Caso ocorra o contrário, (2.12) resultar valor positivo, significa que as observações assimiladas em  $t = 0$  h contribuíram para o aumento do erro da previsão  $\mathbf{x}_{t|-6}^f$ . Isso ocorre devido a essência do funcional definido para estimar o impacto das observações. Um esquema temporal para esse procedimento é ilustrado na Figura 2.3, de modo que a diferença entre as previsões verificadas dá-se por meio da contribuição fornecida pelas observações assimiladas em  $t = 0$  h.

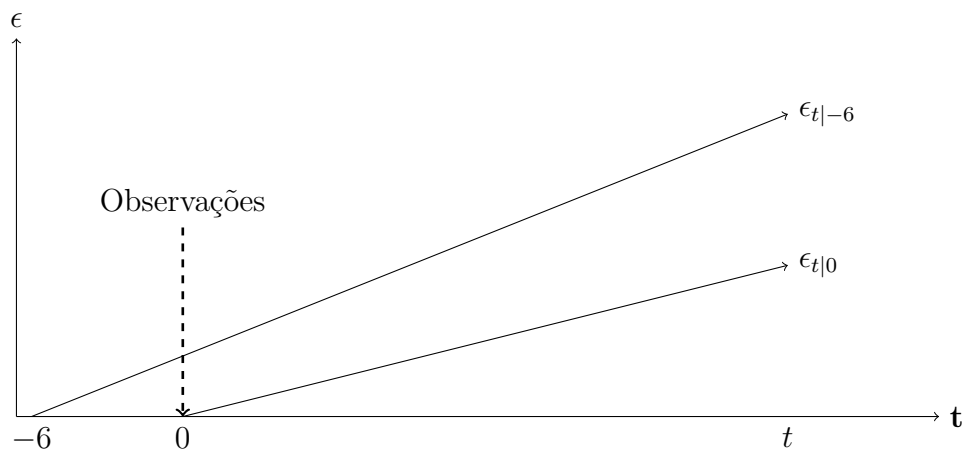


Figura 2.3 - Esquema temporal para o cálculo do impacto das observações em um ciclo de análise com intervalo de 6 horas entre as análises.  
Fonte: Adaptado de Langeland e Baker (2004).

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre o impacto das observações nas previsões. Isso é realizado por meio de uma breve revisão dos impactos obtidos utilizando um método tradicional de estimativa do impacto. Assim como também é realizada uma breve revisão dos impactos obtidos utilizando técnicas mais recentes, como por exemplo os métodos baseados em modelos adjuntos e em conjuntos para estimar o impacto das observações nas previsões de curto prazo, em particular quando utiliza-se o método de assimilação de dados LETKF.

#### 3.1 Impacto das observações

Nos últimos anos, esforços têm sido realizados pela comunidade meteorológica mundial para entender como que as observações interagem com os variados sistemas de assimilação de dados utilizados pelos centros operacionais de previsão de tempo. Isso justifica-se devido ao constante desenvolvido dos sistemas de observação. Para entender essa interação, técnicas foram elaboradas com o intuito de obter-se uma medida do quanto às observações contribuem para os sistemas de assimilação de dados, o que entende-se como sendo o impacto das observações.

##### 3.1.1 Método tradicional

Conforme citado no Capítulo 1, a verificação do impacto que as observações têm no sistema de assimilação de dados é tradicionalmente realizada por meio de OSE e OSSE. Um importante estudo relacionado a esses experimentos é apresentado por Kelly et al. (2004), consistindo em avaliar o impacto causado pela assimilação de diferentes tipos de observações no sistema de assimilação de dados operacional do ECMWF. Nesse estudo foram realizados seis experimentos, sendo que o experimento considerado como controle foi o experimento que utilizava o conjunto completo de observações assimiladas operacionalmente no ECMWF. Os demais experimentos consistiam em retirar do sistema de assimilação um determinado tipo de observação do conjunto de observações do experimento considerado controle. Resultando nas cinco combinações descritas a seguir: sem observações de satélites; sem observações de aviões; sem as radiâncias da Unidade de Sondagem de Microondas Avançada (AMSU, do inglês *Advanced Microwave Sounding Unit*); sem observações de ar superior; e sem observações de vento por satélite. Um dos principais resultados apresentados é com relação aos impactos da assimilação de radiâncias para o Hemisfério Sul, onde foi encontrado que, para o sistema de assimilação avaliado, essa região é altamente dependente das radiâncias, em contraste com o Hemisfério

Norte, que apresenta baixa dependência com relação a essas observações. Isso ocorre devido ao Hemisfério Norte apresentar uma rede de observação convencional mais robusta do que a rede presente no Hemisfério Sul. Entretanto, nesse mesmo estudo, concluiu-se que as informações de ar superior também são muito importantes para o sistema de assimilação.

Um outro estudo também relacionado a esses experimentos de dados negados ou adicionados, porém utilizando o GPSAS, é o de Andreoli et al. (2008), em que foi avaliado o impacto causado pela assimilação de diferentes tipos de observações no sistema de assimilação de dados operacional do CPTEC/INPE. Foram realizados nove experimentos, e assim como apresentado no estudo anterior, a simulação de controle contém o conjunto de observações utilizadas operacionalmente. Os demais experimentos consistiam em retirar determinados tipos de observações do conjunto de observações considerado controle, como descrito a seguir: sem os perfis atmosféricos inferidos pelo Avançado Sondador Vertical Operacional TIROS (ATOVS, do inglês *Advanced TIROS Operational Vertical Sounder*); sem as observações convencionais e o vento estimado por satélite; sem os perfis de altura geopotencial do ATOVS, do AMSU e do Sondador de Infravermelho Atmosférico (AIRS, do inglês *Atmospheric Infrared Sounder*); sem as observações de vento sobre o oceano; sem as observações de vento estimado por satélite; sem as observações de vento sobre o oceano e vento estimado por satélite; e sem as observações de água precipitável. Com isso foram obtidas as contribuições de cada conjunto de observações nas previsões em diferentes regiões do globo, concluindo que, para o sistema de assimilação de dados avaliado, todos os conjuntos de observações do estudo contribuíram para melhorar a qualidade das análises e também das previsões. Foi também encontrado que as observações de satélites têm grande importância no Hemisfério Sul, principalmente em altas latitudes, onde há predomínio de regiões oceânicas e conseqüentemente escassez de observações convencionais. Porém é importante ressaltar que, embora os conjuntos de observações assimilados possam variar consideravelmente de acordo com a estratégia operacional proposta de cada centro, os resultados apresentados em Andreoli et al. (2008) concordam com estudos anteriores realizados para diferentes sistemas de assimilação de dados (*e.g.*, Kelly et al. (2004)).

Encontram-se na literatura também outras aplicações desses experimentos de dados negados ou adicionados utilizando o sistema de assimilação de dados operacional do CPTEC/INPE. Um exemplo disso é o estudo de Mattos (2006), em que utilizando o GPSAS, adiciona ao sistema perfis verticais extraídos a partir de

observações simuladas em regiões que apresentam escassez de observações de ar superior, nomeando-as de “pseudo-temps”. Essas foram obtidas a partir de análises do ECMWF e do NCEP. Os experimentos utilizando as “pseudo-temps” foram comparados com os experimentos sem o uso dessas. Os resultados obtidos mostraram que, para esse sistema, a utilização das “pseudo-temps” proporcionam um aumento do prazo útil das previsões.

Um outro exemplo, dessa vez utilizando o mesmo método de assimilação de dados do sistema que está em fase de implementação no CPTEC/INPE, o LETKF, é o estudo de Medeiros (2011), em que foi avaliado o desempenho do sistema utilizando as observações de radiâncias provenientes do sensor AMSU, além de utilizar as observações convencionais. Entre as comparações realizadas no estudo, foram realizados experimentos fazendo uso das radiâncias aliado ao conjunto de observações convencionais e, posteriormente, os resultados obtidos foram confrontados com os experimentos utilizando apenas o conjunto de observações convencionais. Com isso, baseado na análise realizada no estudo, pôde-se concluir que o uso das radiâncias beneficiaram o sistema, proporcionando análises e previsões com melhor qualidade.

### **3.1.2 Método baseado em modelos adjuntos**

Em vista do exposto, é notável que esses experimentos são inviáveis operacionalmente devido a grande demanda computacional para realizar múltiplos experimentos e posteriormente avaliá-los. Tornando necessário o desenvolvimento de abordagens eficientes e viáveis operacionalmente capazes de estimar a contribuição das observações assimiladas em um determinado sistema de assimilação de dados. Uma abordagem que supre essas necessidades foi proposta por Langland e Baker (2004), onde, por meio da sensibilidade do sistema com relação as observações (BAKER; DALEY, 2000), a contribuição de cada observação é obtida sem a utilização de experimentos de dados negados ou adicionados. Essa contribuição é obtida, basicamente, por meio da redução dos erros das previsões de curto prazo utilizando os modelos adjuntos do método de assimilação de dados e do modelo numérico de previsão de tempo. Para isso utiliza-se uma medida de erro de previsões. Em Langland e Baker (2004), o tempo de avaliação foi escolhido como 24 h, onde a medida de erro é definida com relação às análises, ou seja, essas são utilizadas para verificação. Em Langland (2005) estende seu trabalho original avaliando o impacto das observações em um período ainda mais longo de 42 h, mas ainda assim dentro da validade da aproximação linear. Por convenção a maior parte dos trabalhos que utilizam essa técnica de estimativa do impacto utilizando o método baseado em

modelos adjuntos verificam o impacto das observações nas previsões de 24 h. Isso dá-se pelo fato de o método apresentar uma limitação, em que esse tem validade para um intervalo de tempo relativamente curto, de 2 a 3 dias. Essa limitação ocorre devido a validade da técnica de modelos adjuntos assumir que durante um intervalo de tempo as perturbações evoluem linearmente.

Em Langland e Baker (2004) foram avaliados os impactos das observações nas previsões do sistema de assimilação de dados pertencente ao NRL utilizando a metodologia de estimativa de impacto por meio dos modelos adjuntos. Foram realizados dois experimentos, um para o mês de junho e o outro para o mês de dezembro, ambos para o ano de 2002 e avaliando os impactos das observações que foram utilizadas para gerar as condições iniciais das previsões de 24 h que tiveram início às 0000 UTC durante esses dois períodos de estudo. O conjunto de observações avaliadas compreendia os seguintes grupos de observações: perfis atmosféricos ATOVS; radiossondas; ventos estimados por meio de satélite; aviões; superfície; bóias e navios; e sintéticas. Os autores encontraram que as observações que mais contribuíram para a redução dos erros das previsões de 24 h no Hemisfério Norte, em ordem de grandeza, foram as observações de radiossondas, vento estimado por meio de satélite e aviões. Já para o Hemisfério Sul, em ordem de grandeza foram os perfis atmosféricos ATOVS, vento estimado por meio de satélite e radiossondas. Os autores também encontraram que aproximadamente 60 % do impacto global é atribuído às observações localizadas abaixo de 500 hPa. Restando cerca de 40 % para as observações localizadas acima de 500 hPa. Com relação à acurácia da estimativa, a mesma contabilizou cerca de 75 % da redução global média dos erros das previsões.

Em Errico (2007) foram apresentadas interpretações para os resultados obtidos utilizando o método baseado em modelos adjuntos quando analisados com relação a somas parciais de impacto das observações de acordo com um critério escolhido (*e.g.*, tipo de observação, local, etc.). A principal interpretação é relacionada ao fato de que ao analisar os impactos classificando-os em subgrupos de observações, deve ser considerado que o impacto de cada subgrupo está relacionado com todos os subgrupos que compõem o grupo das observações.

Aliado a Errico (2007), em Gelaro et al. (2007) e a formulação proposta em Langland e Baker (2004) foi derivada novamente utilizando expansões em séries de Taylor. Com isso foram reconsideradas as diversas ordens de aproximação em função dos incrementos observacionais, concluindo que a medida apresentada por Langland e Baker (2004) era essencialmente equivalente a aproximações de terceira ordem



da real redução dos erros das previsões. Segundo Gelaro et al. (2007), o uso de aproximações de terceira ordem melhoram os resultados do método baseado em modelos adjuntos em comparação com as aproximações de segunda e primeira ordem da real redução dos erros das previsões. Segundo os autores, esse fato ocorre devido a própria natureza da medida dos erros como sendo uma medida quadrática. Trémolet (2007) também analisou as diversas aproximações para obter essa medida, e concluiu que, quando utilizadas, as aproximações de primeira ordem fornecem uma medida superestimada, resultando em uma medida duas vezes maior do que a real redução dos erros das previsões. Daescu e Todling (2009) reinterpretam a formulação proposta em Langland e Baker (2004) como sendo de segunda ordem baseado no tratamento da expressão do erro da previsão como uma forma integral que pode ser tratada com fórmulas de quadratura.

Em Daescu (2009) é apresentada uma excelente revisão, utilizando uma abordagem matemática elegante, comparando os impactos obtidos por meio do uso da técnica baseada em modelos adjuntos e a técnica envolvida nos experimentos de dados negados ou adicionados que são utilizados em OSE e OSSE.

Apesar de a abordagem proposta por Baker e Daley (2000) com relação a sensibilidade do sistema para as observações ter sido utilizada para estimar o impacto que as observações têm no sistema de assimilação e conseqüentemente nas previsões de curto prazo, em Daescu e Todling (2010) foram propostas novas capacidades e aplicações para essa abordagem, porém, dessa vez, com relação aos parâmetros envolvidos no sistema de assimilação de dados. Nesse estudo foram apresentados os conceitos envolvidos e testados numericamente utilizando experimentos idealizados, aliado aos resultados preliminares utilizando um sistema de assimilação de dados realístico e robusto. Esses resultados indicam a possibilidade do uso dessas novas capacidades operacionalmente. Entretanto, os autores sugerem que futuros estudos sejam realizados a fim de apresentar a implementação e validação dessas abordagens em um sistema de assimilação de dados robusto.

Em Gelaro et al. (2010) foram comparados os impactos nas previsões de 24 h originadas de três sistemas de assimilação de dados operacionais pertencentes ao GMAO, NRL e EC. Nesse estudo, os sistemas de assimilação do GMAO e NRL utilizaram o método de assimilação 3D-Var, e o EC utilizou o método 4D-Var. Todos realizaram análises a cada 6 h durante janeiro de 2007, resultando em 127 conjuntos de resultados para cada sistema. Apesar da diferença entre os sistemas de assimilação dos três centros, os resultados obtidos com relação a estimativa do impacto utilizando

o método baseado em modelos adjuntos mostraram-se coerentes entre si globalmente para a maioria dos tipos de observações. Entretanto regionalmente os resultados obtidos apresentaram diferenças substanciais de um sistema para outro. Os impactos por observação também apresentaram diferenças substanciais. Os autores presumem que isso dá-se devido a não somente a quantidade de observações de cada subgrupo de observações, mas também devido as características de cada sistema de assimilação de dados de cada centro e indicam que, para um completo entendimento dessas diferenças, é necessário uma investigação.

As observações que tiveram a maior contribuição benéfica nas previsões de curto prazo foram: as radiâncias, os ventos estimados por meio de satélite, as radiossondas e os aviões comerciais. Segundo os autores, os outros tipos de observações apresentaram pequenas contribuições individuais, porém significativas. Apenas uma pequena maioria das observações contribuíram para a redução dos erros das previsões de 24 h. Essa maioria oscilou em torno de 50 e 53 % das observações pertencentes aos grupos de observações escolhidos pelos autores para serem avaliados, com exceção das observações de vento sobre superfície oceânica obtidas por meio do Imageador do Sensor de Microondas Especial (SSM/I, do inglês *Special Sensor Microwave/Imager*), que apresentaram em torno de 48 % das observações com impacto benéfico para as previsões avaliadas do GMAO. Os autores indicaram também que a maior parte da redução dos erros das previsões é fornecida por observações com moderado tamanho de incrementos observacionais, e não de observações com grandes incrementos observacionais.

Um importante resultado que nota-se em Gelaro et al. (2010) é com relação as observações provenientes do sensor AMSU, em que essas tiveram o maior acúmulo de impacto benéfico entre todas os tipos de observações avaliadas para os três sistemas avaliados. É válido ressaltar que apenas para o sistema do NRL as observações do sensor AMSU tiveram acúmulos de impactos semelhantes a um outro tipo de observação avaliado. Isso ocorreu para as observações de vento obtidas por meio de satélites. Independente desse estudo, outros estudos buscam entender os motivos de esse sistema obter um grande benefício desse tipo de observação. Baker et al. (2012a) e Baker et al. (2012b) apresentam as possíveis razões para a ocorrência disso. Segundo os autores, essa ocorrência deve-se aos seguintes fatos: o NRL assimila um número grande dessas observações, em que nesse estudo foram assimilados praticamente o dobro do que os outros dois centros; o NRL utiliza um cuidadoso processo de seleção e controle de qualidade dessas observações, e posteriormente ainda geram superobservações dos vetores de vento (ver *e.g.* Pauley et al. (2012));

e devido a influência das outras observações assimiladas em conjunto com essas observações.

Gelaro e Zhu (2009) compararam as estimativas de impactos obtidos utilizando o método baseado em modelos adjuntos com as estimativas obtidas por meio de OSE. Segundo os autores, apesar das diferenças entre os métodos, ambos apresentam estimativas consistentes de todo o impacto da maior parte dos subsistemas de observações na redução dos erros das previsões de 24 h utilizando como métrica uma norma de energia total seca. Os autores afirmam que quando ambos os métodos são utilizados juntos, são obtidas redundâncias com relação aos impactos das observações.

O método baseado em modelos adjuntos pode ser utilizado aliado à técnicas de experimentos de dados negados ou adicionados a fim de diagnosticar a qualidade das observações assimiladas, assim como também pode indicar se essas observações estão sendo utilizadas otimamente no sistema de assimilação de dados (*e.g.*, Gelaro e Zhu (2009) e Daescu (2009)). Além disso essa ferramenta pode ser utilizada operacionalmente para monitorar as observações assimiladas (*e.g.*, Cardinali (2009)).

### **3.1.3 Método baseado em conjuntos**

Para estimar o impacto das observações nas previsões de curto prazo utilizando um sistema de assimilação variacional, torna-se necessário em sua implementação o uso de modelos adjuntos (LANGLAND; BAKER, 2004). Como indicado por Daescu (2009), o uso desse ao estimar o impacto pode gerar uma fonte de incerteza na estimativa devido as inconsistências entre o modelo adjunto e o modelo de previsão numérica de tempo com relação aos processos não lineares indevidamente representados pelo modelo adjunto. Entretanto, uma abordagem semelhante a de Langland e Baker (2004), foi proposta por Liu (2007) e Liu e Kalnay (2008) (veja também Li et al. (2010)) sem utilizar um modelo adjunto.

Isso foi realizado utilizando uma variação do filtro de Kalman por conjuntos, o LETKF. A técnica baseada em previsões por conjunto utiliza um conjunto de perturbações das previsões ao invés de utilizar o modelo adjunto do modelo numérico de previsão e calcula o modelo adjunto do método de assimilação explicitamente por meio do cálculo da transposta da matriz ganho de acordo com as suposições de cada variação do filtro de Kalman por conjunto. No LETKF, essa matriz é calculada no espaço do conjunto. Com isso, o LETKF fornece estrutura para calcular o impacto das observações nas previsões de curto prazo utilizando um conjunto de previsões e

calculando o modelo adjunto do sistema de assimilação explicitamente ao invés de utilizar os modelos adjuntos do modelo numérico de previsão de tempo e do sistema de assimilação, respectivamente.

Em Liu (2007) e Liu e Kalnay (2008) o método baseado em conjunto foi proposto e testado numericamente com experimentos idealizados utilizando o modelo de Lorenz com 40 variáveis em torno de um círculo de latitude (LORENZ; EMANUEL, 1998). Com isso foram simulados casos reais por meio da assimilação de observações modificadas artificialmente. Essas modificações constituíam três grupos: o grupo de observações consideradas normais, em que foi assumido que as mesmas apresentavam desvio padrão igual a 0,2 unidades somado a uma perturbação aleatória gaussiana; o grupo de observações em que uma observação apresentava um grande erro aleatório quatro vezes maior do que o das outras observações; e o grupo das observações em que uma observação apresentava viés igual a 0,5. Os impactos dessas observações foram verificados nas previsões válidas para um tempo de verificação correspondente a 24 h.

Os resultados obtidos utilizando o método proposto foram comparados com os resultados obtidos utilizando o método baseado em modelos adjuntos. Com relação as observações consideradas normais, os autores concluíram que os resultados de ambos os métodos apresentaram-se similares, refletindo a maior parte do impacto das observações. Os autores também concluíram que o impacto das observações modificadas artificialmente utilizando o método baseado em conjunto apresentou um forte sinal na detecção das mesmas. Com relação ao custo computacional, os autores apresentaram as vantagens e desvantagens de ambos os métodos. Segundo os autores, caso o método baseado em conjunto seja implementado em modo serial, o mesmo pode apresentar maior tempo de execução do que o método baseado em modelos adjuntos. Entretanto, caso seja implementado em arquitetura paralelizada, o mesmo pode apresentar-se mais rápido do que o método baseado em modelos adjuntos. Aliado a esses experimentos, ainda foram realizados testes retirando do sistema de assimilação de dados essas observações que apresentavam erros aleatórios, caracterizando os experimentos de dados negados, concluindo que os resultados obtidos por meio desses testes foram bem representados por meio do método proposto.

Devido a localização ser uma importante componente para qualquer Filtro de Kalman por conjunto, os autores realizaram testes com diferentes configurações de localização. Foram apresentados os resultados de dois experimentos: um com 39

pontos de grade (19 pontos de grade em cada lado do ponto central) e o outro com 13 pontos de grade (6 pontos de grade em cada lado do ponto central). Segundo os autores, e também por meio de uma análise visual no gráfico que apresenta os resultados referentes a esses testes em Liu e Kalnay (2008), ambos os experimentos apresentaram resultados quase indistinguíveis. Os autores afirmam que foi realizado um outro experimento com 7 pontos de grade (3 pontos de grade em cada lado do ponto central). Segundo os autores a estimativa do impacto apresentou-se pior nesse caso. Entretanto os autores encontraram que utilizando um fator de inflação multiplicativo nos erros das previsões (*e.g.*, igual a 1,04, equivalente a 4% de inflação) a estimativa do impacto apresentou-se similar a dos experimentos com 39 e 13 pontos de grade. É importante ressaltar que os autores utilizaram a mesma configuração de localização tanto durante o processo de análise como no processo de estimativa do impacto das observações.

Li et al. (2010) publicaram uma correção com relação a dedução do método proposto por Liu (2007) e Liu e Kalnay (2008). Segundo Li et al. (2010), apesar de a maior parte da dedução estar correta, havia um pequeno erro presente na mesma. A correção referia-se a um passo desnecessário durante a dedução. Nesse passo foi calculado a sensibilidade da função custo definida para a estimativa do impacto com relação aos incrementos observacionais, resultando na segunda derivada da mesma. Com isso a equação final apresentava a ausência de um fator de 2 dividindo um termo envolvido na estimativa do impacto. A ausência desse fator adicionava à estimativa um viés positivo, e com isso a estimativa apresentava o forte sinal indicado pelos autores que propuseram o método baseado em conjunto. Além da formulação correta, os autores apresentaram a mesma evidenciando as duas trajetórias dos erros das previsões. Devido a isso os autores afirmam que esse método utiliza aproximações de terceira ordem. Foram apresentados os resultados utilizando ambas as fórmulas, a original e a corrigida, e comparadas com a estimativa utilizando o método baseado em modelos adjuntos. Assim como em Liu (2007) e Liu e Kalnay (2008), também foram discutidos os experimentos referentes a configuração de localização. Com isso foi apresentado que para os experimentos com localização igual a 39, 13 e 7 pontos de grade a estimativa do impacto correspondia a 99, 94 e 90 % da redução dos erros das previsões, respectivamente. Em adição a esses experimentos, apesar de os resultados dos mesmos não serem apresentados, os autores afirmaram que utilizando o modelo Parametrizações Simplificadas e Equações Dinâmicas Primitivas (SPEEDY, do inglês *Simplified Parameterizations Primitive Equation Dynamic*, Molteni (2003)), com um conjunto composto por 30 membros, foram obtidos resultados similares. Segundo os autores isso indica que com uma forte localização (poucos pontos de

grade), o método proposto por Liu (2007) e Liu e Kalnay (2008) subestima o real impacto das observações, entretanto esse problema pode ser minimizado utilizando um conjunto composto por um número maior de membros e, portanto, maior quantidade de pontos de grade na localização.

Um exemplo da aplicação dessa ferramenta em experimentos de casos reais é apresentado em Kunii et al. (2011). Nesse estudo os autores investigaram o impacto das observações nas previsões de curto prazo durante a ocorrência de um ciclone tropical, concluindo que as sondagens de ar superior foram as que apresentaram as maiores contribuições para a redução dos erros das previsões de curto prazo. Entretanto, para isso foram avaliadas as previsões de 12 h de um modelo numérico de previsão de tempo regional. O método de assimilação de dados utilizado nesse estudo foi o LETKF, com um conjunto composto por 40 membros e localizações horizontal, vertical e temporal iguais a 400 km,  $0,4 \ln(p)$  e 3 h, respectivamente. Aliado a estimativa obtida por meio do método baseado em conjunto, os autores realizaram experimentos de dados negados. Isso deu-se com o intuito de validar a estimativa do impacto obtida por meio da comparação com os resultados de um OSE. Para isso, uma vez diagnosticadas quais observações que, segundo o método baseado em conjunto, deterioraram as previsões de curto prazo, as mesmas foram negadas durante a realização do OSE, concluindo que a negação dessas observações melhoraram as previsões de 12 h. Apesar disso, segundo os autores, o método baseado em conjunto subestimou a real redução dos erros das previsões durante todo o período de estudo. Os autores sugerem que a causa para essa ocorrência seja devido a localização e o tamanho do conjunto. Apesar de os autores sugerirem isso, a investigação do efeito desses parâmetros na estimativa do impacto das observações não foi realizada nesse estudo. Entretanto os autores indicam a importância da realização de um estudo cuidadoso com relação a esses parâmetros quando se utiliza o método de estimativa do impacto baseado em conjunto.

Em Kalnay et al. (2009) foi deduzida uma formulação alternativa para o método baseado em conjunto. Essa formulação utiliza um conjunto de análise no espaço das observações ao invés de utilizar a matriz ganho de Kalman no subespaço do conjunto para estimar o impacto das observações nas previsões.

Apesar de não se encontrar na literatura estudos com relação ao uso dessa ferramenta baseada em previsões por conjunto para modelos numéricos de previsão de tempo globais, estudos tem sido realizados internamente no NCEP utilizando o modelo

numérico de previsão de tempo global do centro, o GFS, em conjunto com o LETKF<sup>1</sup>. O interesse do NCEP nessa ferramenta é devido ao futuro sistema de assimilação de dados do centro ser um sistema híbrido. Com isso, resultados têm sido apresentados em encontros do NCEP mostrando os impactos do sistema de observação global nas previsões de curto prazo do centro. Um dos resultados mais importantes com relação à esses estudos diz respeito ao impacto benéfico dos canais de umidade dos sensores à bordo de satélites, fato esse que em outros centros não ocorre. Acredita-se que isso ocorra devido ao fato de que a estimativa do impacto obtida por meio do uso do método baseado em conjuntos não apresente restrições com relação a umidade.

Nesse contexto, aliado ao esforço que está sendo realizado para implementar o LETKF no CPTEC/INPE, esta dissertação visa suprir a necessidade de avaliar os impactos das observações nas previsões de curto prazo utilizando a ferramenta baseada em previsões por conjunto utilizando um modelo numérico de previsão de tempo global.

---

<sup>1</sup>Comunicação pessoal de Yoichiro Ota, em 24 de agosto de 2011 e 8 de fevereiro de 2012, recebidas por correio eletrônico.





## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os dados e a metodologia utilizada nesta pesquisa. Isso é realizado por meio de uma apresentação geral com relação aos dados e ao sistema de assimilação, assim como suas principais componentes. Por fim, apresenta-se o procedimento para o cálculo do impacto das observações nas previsões de curto prazo.

### 4.1 Dados

O conjunto de dados utilizados nesta pesquisa compreende o período de 1 de janeiro de 2004 até 29 de fevereiro de 2004. Esse conjunto de dados é composto pelos subsistemas de observação do Sistema Global de Observação (GOS, do inglês *Global Observing System*). O GOS é um dos mais importantes programas da Organização Meteorológica Mundial (WMO, do inglês *World Meteorological Organization*) fazendo parte do programa de Vigilância do Tempo Mundial (WWW, do inglês *World Weather Watch*). Esse programa tem o intuito de observar, arquivar e reportar as informações de tempo e clima para a preparação de previsões, avisos e alertas de tempo operacionais realizadas pelos programas da WMO e pelas outras importantes organizações internacionais integrantes do programa. Fazem parte dessas organizações os serviços nacionais de meteorologia e as agências espaciais nacionais ou internacionais de todo o mundo, envolvendo diversos consórcios relativos a específicos subsistemas de observação.

Seguindo a convenção de previsão numérica de tempo operacional para sistemas de assimilação de dados globais, foi utilizado nesta pesquisa uma janela de assimilação de seis horas, e foram realizadas quatro análises por dia: às 0000, 0600, 1200 e 1800 UTC. Um típico exemplo do número de observações que foram assimiladas é apresentado na Tabela 4.1. Em todos os dias foram assimilados quase um milhão de observações. Foram processadas mais observações do que o indicado na Tabela 4.1, porém o número de observações é apresentado reduzido devido a rejeição das observações pelo processo de seleção dos dados. O procedimento para seleção dos dados consistiu em descartar aquelas que apresentavam diferença entre o valor observado e a média do conjunto de estimativa inicial maior do que três vezes o erro padrão assumido para o tipo de observação.

Com a primeira análise tendo validade para as 0000 UTC de 01 de janeiro de 2004, o sistema de assimilação de dados aqui utilizado teve como primeiro conjunto de estimativa inicial as análises operacionais do NCEP, escolhidas aleatoriamente,

Tabela 4.1 - Número de observações assimiladas em um dia típico (01 de fevereiro de 2004).

Ciclo de assimilação	0000 UTC	0600 UTC	1200 UTC	1800 UTC	Total Diário
Pressão à superfície	5.176	5.244	4.433	3.660	18.513
Temperatura	17.708	5.403	15.908	12.859	51.878
Vento zonal	101.966	95.784	93.549	91.488	382.787
Vento meridional	113.751	102.647	105.072	100.796	422.266
Total	238.601	209.078	218.962	208.803	875.444

no período compreendido entre 01 de janeiro de 2004 e 29 de fevereiro de 2004. Essa escolha tem a desvantagem que, devido a relativa proximidade dos tempos de análises, os membros do conjunto inicial não são tão independentes como eles poderiam ser se escolhidos de um arquivo climatológico. Entretanto, essa escolha tem a vantagem devido aos dados necessários serem facilmente disponibilizados. Com isso, torna-se necessário avaliar o sistema a partir de um período necessário para que o sistema de assimilação de dados atinja o equilíbrio dinâmico (do inglês *spin-up*). Com o intuito de ser conservador, o sistema de assimilação de dados aqui utilizado teve seu início em 01 de janeiro de 2004 as 0000 UTC e término em 29 de fevereiro de 2004 as 18 UTC, entretanto a avaliação estatística apresentada nesta pesquisa foi realizada para o mês de fevereiro.

A Figura 4.1 apresenta um esquema ilustrado dos principais subsistemas do GOS utilizados nesta pesquisa e que serão descritos nas subseções a seguir. Esses subsistemas são compostos por observações obtidas por satélites de órbitas polares (do inglês *Polar Orbiting Satellite*) e geostacionárias (do inglês *Geostationary Satellite*), aviões (do inglês *Aircraft*), navios (do inglês *Weather Ship*), bóias oceânicas (do inglês *Ocean Data Buoy*), estações de superfície (do inglês *Surface Station*) e de ar superior (do inglês *Upper-air Station*), estações automáticas (do inglês *Automatic Station*) e radares (do inglês *Weather Radar*).

#### 4.1.1 Sistema de observação global

Atualmente, o GLETKF assimila um conjunto de observações disponibilizado diariamente, de forma pública, pelo NCEP. Esse conjunto de dados é composto por diversos subsistemas do GOS que são recebidos operacionalmente no NCEP. A seguir serão brevemente apresentados os diversos processos envolvidos para gerar esse conjunto de dados, maiores detalhes com relação ao processamento observacional no NCEP podem ser encontrados em Keyser (2011).

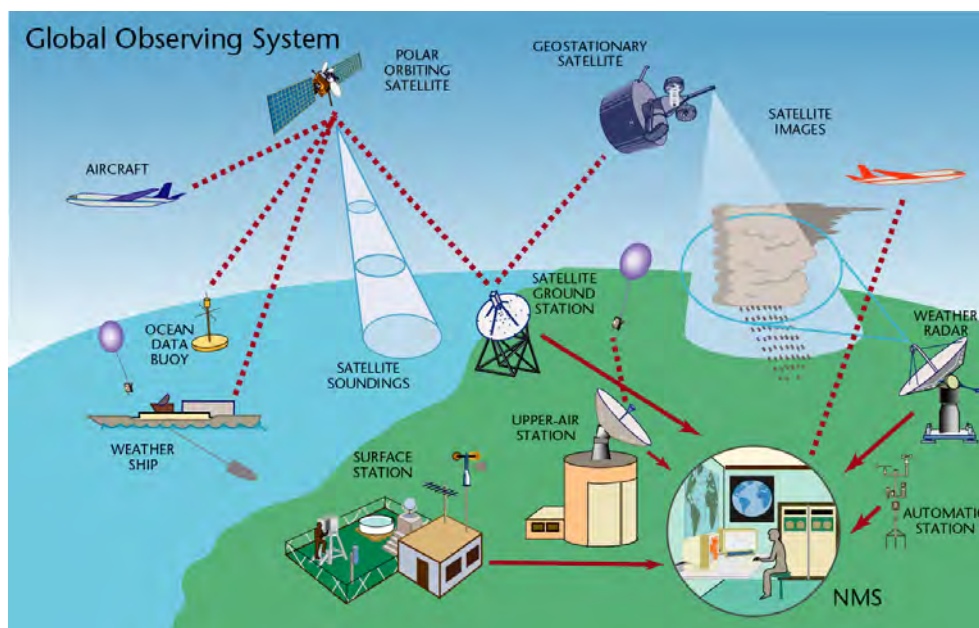


Figura 4.1 - Esquema ilustrado do GOS.  
 Fonte: WMO (2012).

Desde 1988 é sugerido pela WMO que a disseminação desses dados seja realizada operacionalmente utilizando o Formato Universal Binário para a Representação de dados meteorológicos (BUFR, do inglês *Binary Universal Form for the Representation of meteorological data*), por meio do Sistema de Telecomunicação Global (GTS, do inglês *Global Telecommunication System*). Entretanto na prática o que ocorre é que diversos centros fazem uso da flexibilidade desse formato o adaptando de acordo com as suas próprias necessidades. No caso do NCEP, a maioria desses dados recebidos em diversos formatos, são decodificados e armazenados utilizando um único formato.

Uma vez que as observações estão armazenadas, essas são selecionadas para passarem por um processo de controle de qualidade. A seleção é realizada de acordo com o tipo de observação e para isso, essas são classificadas em dois grupos: as observações convencionais e as observações não convencionais. As observações não convencionais são submetidas a um processo de controle de qualidade que ocorre durante o processo de assimilação de dados do centro e representam grande parte das observações obtidas por meio de sensoriamento remoto (*e.g.*, radiâncias, refletividades, radio ocultação, ozônio, vento estimado por satélite<sup>1</sup>). Apesar de,

<sup>1</sup>Desde o dia 22 de maio de 2012 que o NCEP assimila em seu sistema global de assimilação de dados o vento estimado por satélite sem realizar o processo de controle de qualidade dessas

atualmente, o NCEP considerar o vento estimado por satélite como sendo um tipo de observação não convencional, o GLETKF utiliza essas observações devido a essas serem disponibilizadas nos arquivos gerados pelo NCEP.

O GLETKF utiliza apenas as observações convencionais que são processadas pelo NCEP, as quais são submetidas a um processo de controle de qualidade prévio à assimilação de dados. Esse processo consiste na adição dos erros observacionais para cada tipo de observação e da estimativa inicial interpolada até o local de cada observação, ambos necessários para a execução de diversos programas que verificam a qualidade das observações por meio de testes rudimentares em que todas observações são submetidas e testes complexos em que observações específicas são submetidas (*e.g.*, o processo de controle de qualidade específico para o vento obtido por meio de radar envolve até mesmo testes com relação a estação de migração de pássaros).

Uma vez que esse processo seja finalizado, as informações com respeito a qualidade dessas observações, como também as informações prévias de cada observação são armazenadas em um arquivo único, em formato BUFR, recebendo o nome de PrepBUFR. Dentre as observações disponíveis nos arquivos PrepBUFR, o GLETKF apenas utiliza uma parte dessas observações devido a esses arquivos apresentarem variáveis observadas que o GLETKF não analisa (*e.g.* taxa de chuva, total de água precipitável na coluna atmosférica, temperatura da superfície do mar e umidade). Com isso, as seções a seguir apresentam apenas as observações utilizadas pelo GLETKF, omitindo as variáveis e tipos de observação não utilizadas. Maiores detalhes com relação ao processamento dos arquivos PrepBUFR podem ser encontrados em Keyser (2012).

Apesar do GOS ser subdivido em duas componentes, a componente espacial e a componente de solo, para a descrição dos subsistemas do GOS que compõem o sistema de observação utilizado pelo GLETKF nesta pesquisa serão classificados e apresentados nas seções subsequentes da seguinte forma: o grupo das observações *in situ*, o grupo das observações obtidas por sensoriamento remoto e o grupo das observações sintéticas.

---

observações prévio ao processo de assimilação de dados. Isso ocorre devido a seu atual sistema de assimilação de dados, conforme citado no Capítulo 3, o GSI, já possui um controle de qualidade destinado a esse e aos outros tipos de observações citados como exemplo de observações não convencionais. Entretanto, o vento estimado por satélite ainda é selecionado para participar do processo de controle de qualidade prévio à assimilação de dados devido aos sistemas regionais de assimilação de dados presentes no NCEP ainda terem essa necessidade.

#### 4.1.1.1 Observações *in situ*

As observações *in situ* são obtidas basicamente por meio de termômetros, barômetros, higrômetros e anemômetros no local da medida. Até o lançamento dos primeiros satélites meteorológicos e do uso em sistemas de assimilação das observações provenientes dos mesmos, fato ocorrido a partir da década de 70, as observações *in situ* formavam a principal fonte de dados para gerar as condições iniciais dos modelos de previsão numérica de tempo. Apesar disso, mesmo a partir da década anteriormente citada, essas observações continuaram e ainda continuam sendo uma das principais fontes de dados.

De uma forma geral, todas as observações desse grupo apresentam uma grande variação com relação ao tempo e com relação ao espaço. Sendo essas altamente irregulares tanto no tempo como no espaço. Entretanto as observações *in situ* apresentam uma característica marcante quando avaliadas com relação a sua distribuição espacial devido a apresentarem-se concentradas em regiões de maior concentração populacional, e principalmente sobre o Hemisfério Norte. Essa característica poderá ser facilmente notada nas figuras que serão apresentadas para cada subgrupo das observações *in situ* a seguir. As observações *in situ* são representadas pelas observações de superfície e de ar superior.

##### 4.1.1.1.1 Observações de superfície

As observações *in situ* de superfície são obtidas tanto por meio manual, como também por meio automático. Devido as estações de superfície manuais demandarem alto custo financeiro, ainda mais para obter-se observações em regiões pouco habitadas, e também devido a necessidade de ter-se observações do estado da atmosfera mais contínuas no tempo, há esforços dos diversos integrantes do GOS em instalar estações automáticas ao invés de estações manuais, e até mesmo substituir as estações manuais já existentes por automáticas.

Essas observações podem ser classificadas de acordo com o tipo de superfície onde as mesmas são obtidas, originando os dois grupos seguintes: o grupo das observações de superfície continental (ADPSFC), que são as observações obtidas em estações sinóticas de superfície (SYNOP) e em aeródromos (METAR); e o grupo das observações de superfície oceânica (SFCSHP), que são as observações obtidas em navios (SHIP), bóias (BUOY) e estações marinhas (C-MAN). As observações dos grupos ADPSFC e SFCSHP fornecem informações de massa. No entanto as observações do grupo ADPSFC fornecem apenas informações de pressão à superfície

( $p_s$ ), enquanto as do grupo SFCSHIP também fornecem informações de temperatura ( $T$ ). A maior parte das observações de superfície oceânica são automáticas. As Figuras 4.2 e 4.3 mostram as distribuições espaciais dessas observações.

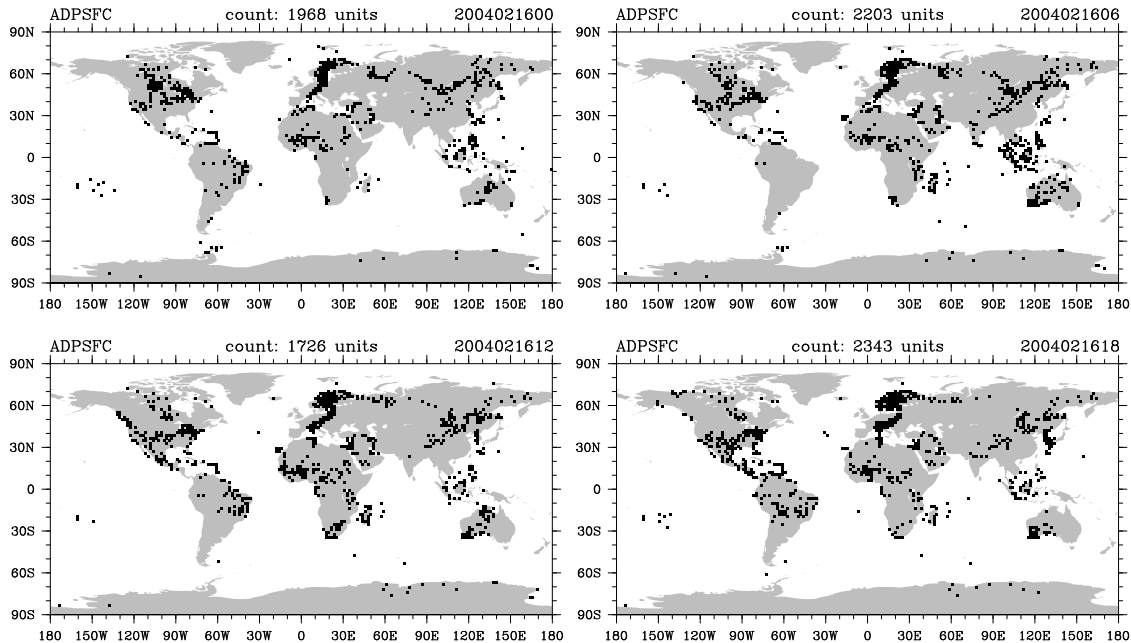


Figura 4.2 - Distribuição espacial das observações *in situ* do grupo ADPSFC, o qual representa as observações obtidas em superfície continental, para o dia 16 de fevereiro de 2004 às 0000 (topo esquerdo), 0600 (topo direito), 1200 (base esquerda) e 1800 UTC (base direita).

#### 4.1.1.1.2 Observações de ar superior

A maior parte das observações *in situ* de ar superior são obtidas por meio automático. Entretanto algumas observações ainda são obtidas por meio manual. Essas observações podem ser divididas em dois grupos distintos. Um grupo é composto pelas observações obtidas por meio de radiossondas, balões piloto e dropsondas (ADPUPA). O outro grupo é composto pelas observações obtidas por meio de aviões (AIRCAR e AIRCFT).

Além do grande avanço na área de previsão numérica de tempo na década de 50, como citado no Capítulo 1, essa década foi um marco também para as observações do grupo ADPUPA, as quais tornaram-se cada vez mais frequentes no GOS a partir dessa década. Isso deveu-se à participação da recém fundada WMO no Ano Geofísico Mundial (IGY, do inglês *International Geophysical Year*). Como mostrado

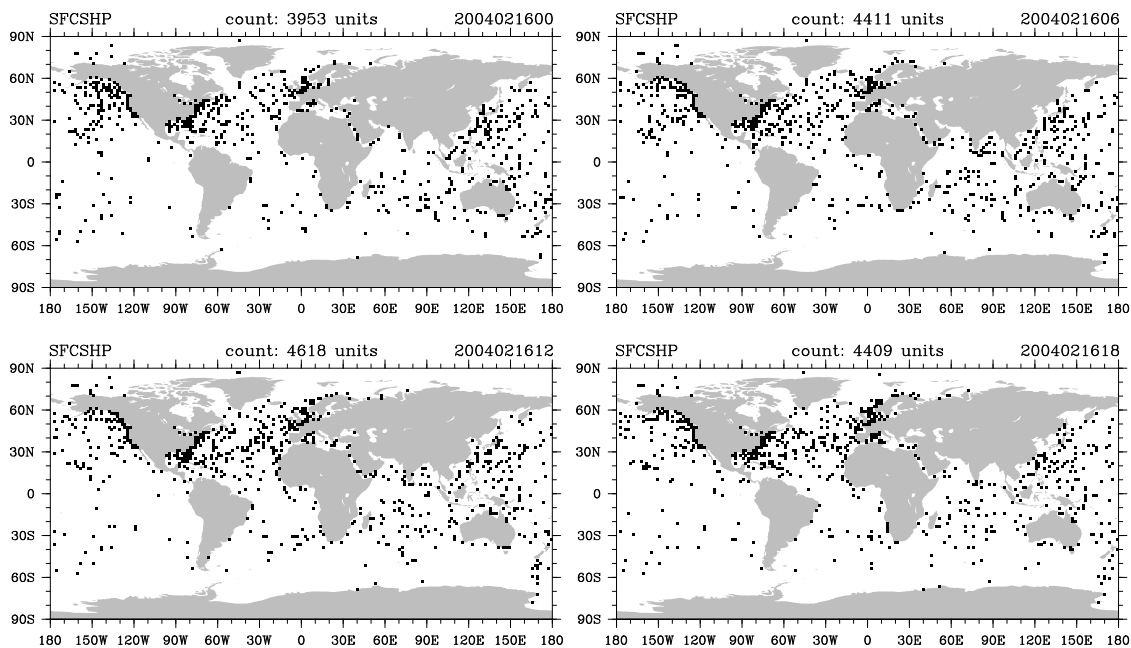


Figura 4.3 - Idem a Figura 4.2, exceto que para o grupo SFCSHIP, o qual representa as observações obtidas em superfície oceânica.

na Figura 4.13, essas observações fornecem informações de massa ( $T$ ) e ventos zonal ( $u$ ) e meridional ( $v$ ), sendo essas informações compostas por perfis verticais feitos nos níveis padrão e nos níveis de significância. O GLETKF assimila as observações de ambos os níveis, sem realizar distinção com relação a isso. Apesar dos balões piloto não apresentarem instrumentos perfilando verticalmente a atmosfera, esses são classificados no mesmo grupo das radiossondas e dropsondas por fornecerem perfis verticais de vento, sendo uma exceção das observações desse grupo que não apresentam informações de massa. Tradicionalmente, essas observações são obtidas por meio do uso de um teodolito ótico auxiliando no registro da localização do balão que ascende na atmosfera. A Figura 4.4 mostra a distribuição espacial dessas observações.

As observações de aviões, assim como as radiossondas e dropsondas, também fornecem informação de massa ( $T$ ) e vento ( $u$  e  $v$ ) para o GLETKF. Apesar dessas observações não apresentarem informações na forma de perfis verticais, elas apresentam informações ao longo da trajetória do voo do avião, tornando-as altamente irregulares tanto com relação ao tempo como com relação ao espaço. Essas observações de aviões estão classificadas em dois grupos. Um dos grupos é o grupo AIRCFT, que é composto pelas observações feitas diretamente do avião e enviadas para o solo, tanto por meio manual como por meio automático. O

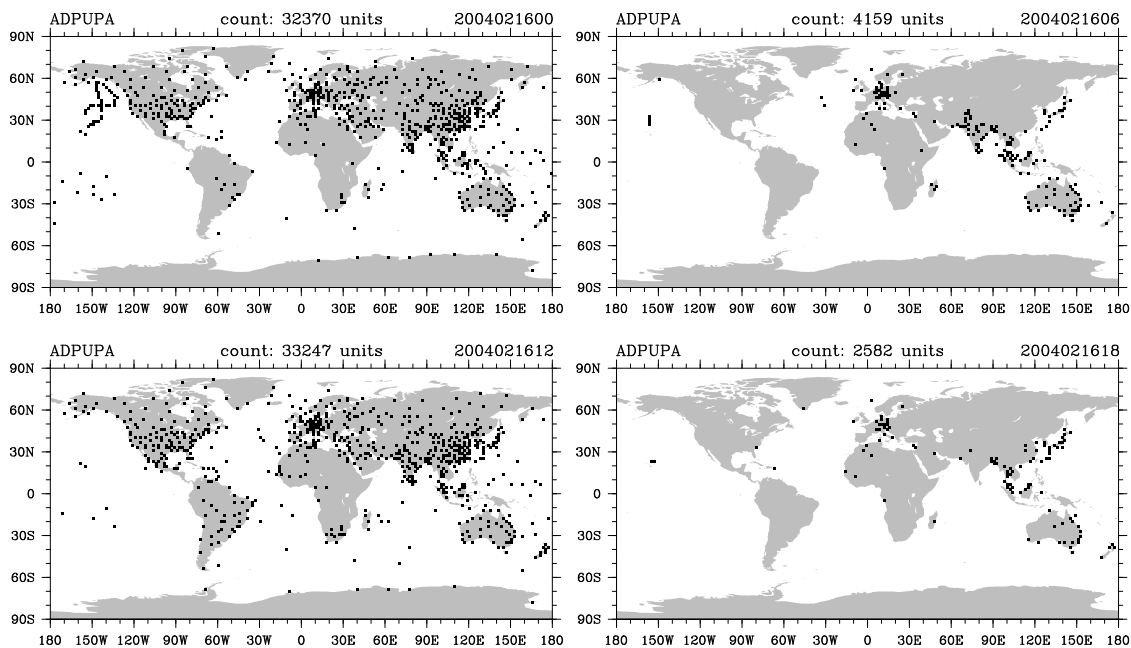


Figura 4.4 - Idem a Figura 4.2, exceto que para o grupo ADPUPA, o qual representa as observações obtidas por meio de radiossondas, balões piloto e dropsondas.

outro grupo é o grupo AIRCAR, que é composto pelas observações feitas por meio automático e enviadas diretamente para satélites geoestacionários e posteriormente enviadas para solo a fim de serem distribuídas entre os diversos integrantes do GOS. A maior diferença entre as observações de aviões é com respeito a frequência de observação do estado da atmosfera. Uma vez que essas observações são obtidas por meio automático, assim como as observações *in situ* de superfície, apresentam maior frequência temporal do que as obtidas por meio manual. Entretanto, diferentemente das observações *in situ* de superfície, apresentam maior precisão quando obtidas por esse meio do que manualmente. As Figuras 4.5 e 4.6 mostram as distribuições espaciais dessas observações.

#### 4.1.1.2 Observações obtidas por meio de sensoriamento remoto

De uma forma geral, todas as observações desse grupo apresentam-se com pequena variação com relação ao tempo e com relação ao espaço. Podendo essas serem consideradas relativamente homogêneas tanto no tempo como no espaço. As observações pertencentes a esse grupo fornecem informações de ventos zonal ( $u$ ) e meridional ( $v$ ). As observações obtidas por meio de sensoriamento remoto são obtidas por meio de perfiladores de vento, de radares e de satélites.



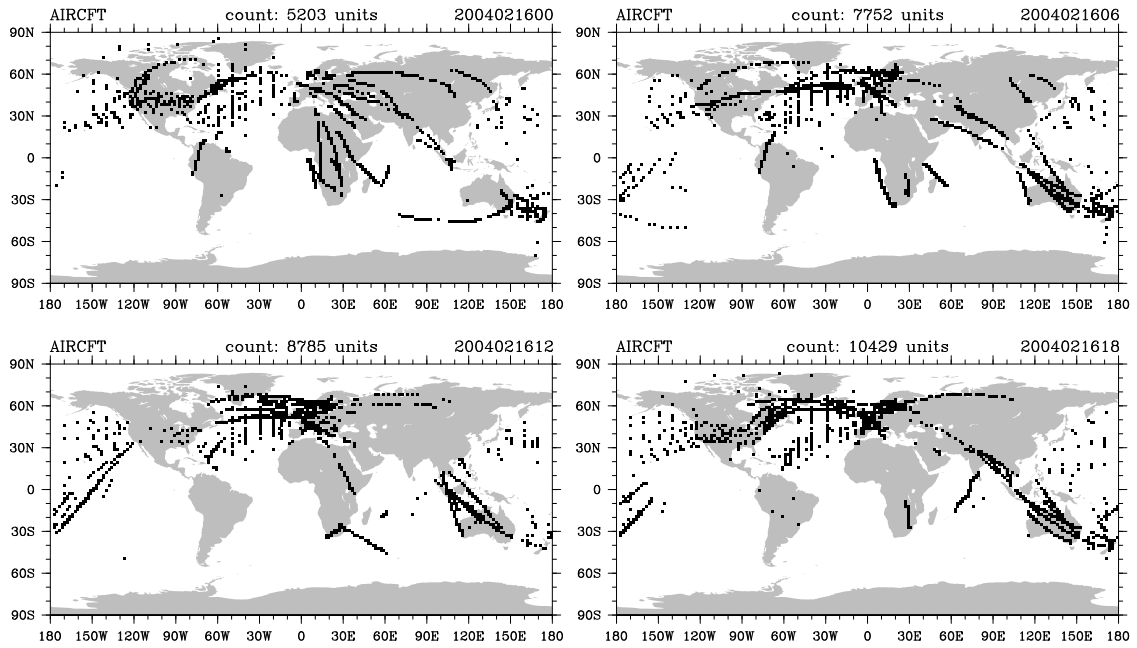


Figura 4.5 - Idem a Figura 4.2, exceto que para o grupo AIRCFT, o qual representa as observações obtidas por meio de aviões e enviadas diretamente para o solo.

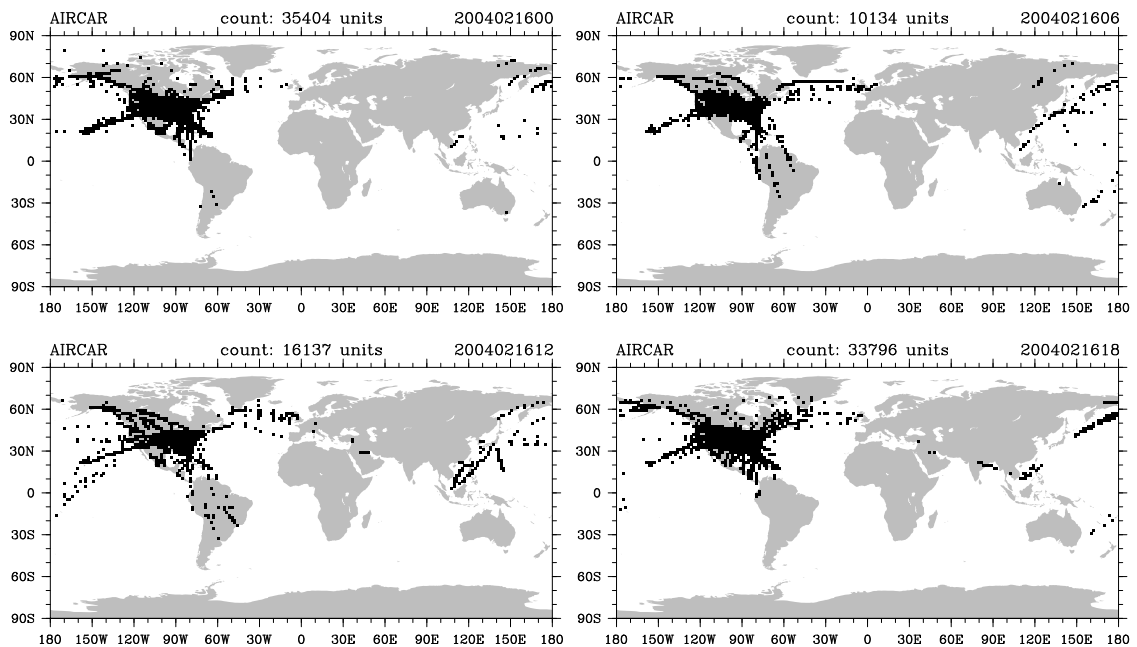


Figura 4.6 - Idem a Figura 4.2, exceto que para o grupo AIRCAR, o qual representa as observações obtidas por meio de aviões, enviadas para satélites geostacionários e posteriormente enviadas para o solo.

#### 4.1.1.2.1 Ventos obtidos por meio de perfiladores

O grupo dos perfiladores de vento (PROFLR) é composto pelos perfiladores da Rede de Perfiladores NOAA (NPN, do inglês *NOAA Profiler Network*), perfiladores do JMA e também sodares. Os perfiladores de vento e sodares fornecem perfis verticais de vento sobre a estação na qual esses estão instalados, em geral de toda a troposfera, por meio de sistemas ativos (*e.g.*, radares e sodares) que emitem sinais verticalmente na atmosfera e com base no espalhamento desses sinais estimam a velocidade e a direção do vento. O funcionamento de ambos é semelhante. Ambos são sistemas ativos que emitem sinais na atmosfera com o intuito de estimar o vento. Entretanto os radares emitem ondas eletromagnéticas e os sodares enviam ondas acústicas na atmosfera.

Devido ao alto custo financeiro dessas observações, as mesmas apresentam-se altamente irregulares no espaço. Entretanto, diferentemente dos perfis verticais fornecidos pelas observações do grupo ADPUPA, essas além de apresentarem-se homogêneas no tempo, não sofrem o arraste ocorrido pelo balão devido ao vento, tornando o perfil vertical obtido uma medida exatamente sobre a estação. A Figura 4.7 mostra a distribuição espacial dessas observações.

#### 4.1.1.2.2 Ventos obtidos por meio de radar

O grupo dos ventos ( $u$  e  $v$ ) obtidos por meio de radar (VADWND) é composto pelas observações obtidas utilizando os radares Doppler da rede NEXRAD (do inglês, *Next-generation Radar*). Esses radares medem a velocidade radial média para cada ângulo de azimute em torno do radar, com isso tem-se medidas de ventos em diferentes altitudes. Essa técnica é denominada como sendo Exibição de Velocidade-Azimute (VAD, do inglês *Velocity-Azimuth Display*). A rede NEXRAD de radares está localizada nos Estados Unidos da América. A Figura 4.8 mostra a distribuição espacial dessas observações.

#### 4.1.1.2.3 Ventos obtidos por meio de satélite

As observações do grupo de ventos obtidos por meio de satélite (SATWND) são obtidas por meio do movimento de nuvens observadas por imageadores passivos a bordo de satélites. Em geral esses satélites são de órbita geoestacionária posicionados em torno do equador ao redor do globo, limitando a estimativa de ventos à latitudes menores que  $60^{\circ}$ <sup>2</sup>. A técnica utilizada para obter essas observações recebe o nome de

---

<sup>2</sup>Os ventos obtidos por meio de satélite não são mais restritos aos satélites de órbita geoestacionária. Atualmente, esses ventos são gerados utilizando satélites de órbita polar (*e.g.*, os

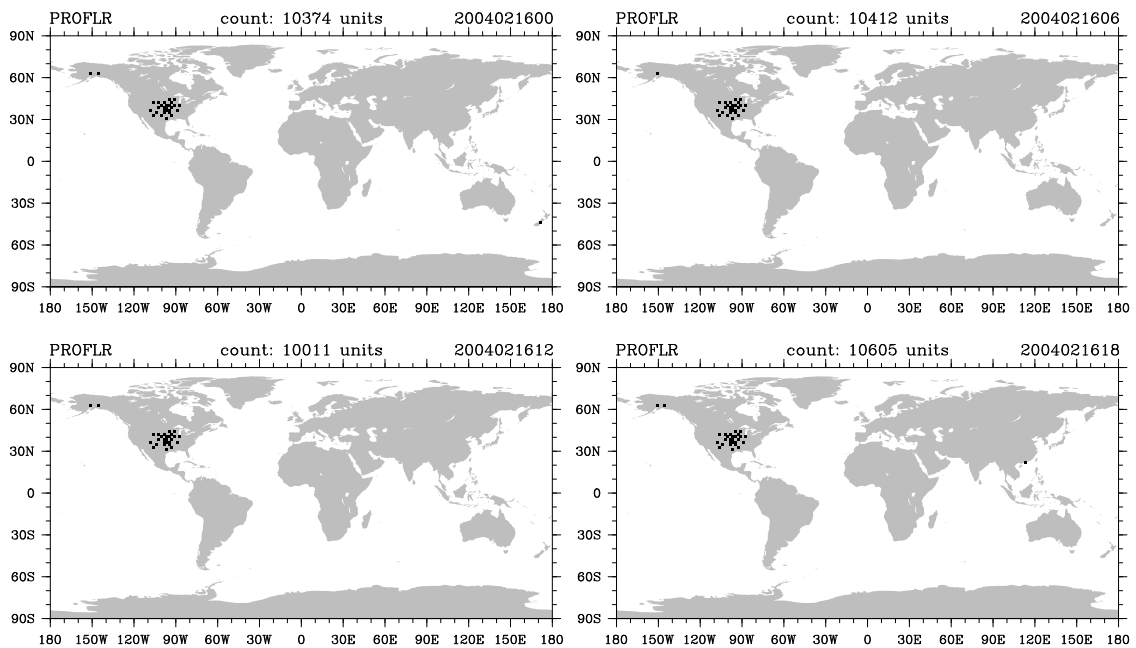


Figura 4.7 - Distribuição espacial das observações obtidas por meio de sensoriamento remoto do grupo PROFLR, o qual representa as observações obtidas por meio de perfiladores de vento, para o dia 16 de fevereiro de 2004 às 0000 (topo esquerdo), 0600 (topo direito), 1200 (base esquerda) e 1800 UTC (base direita).

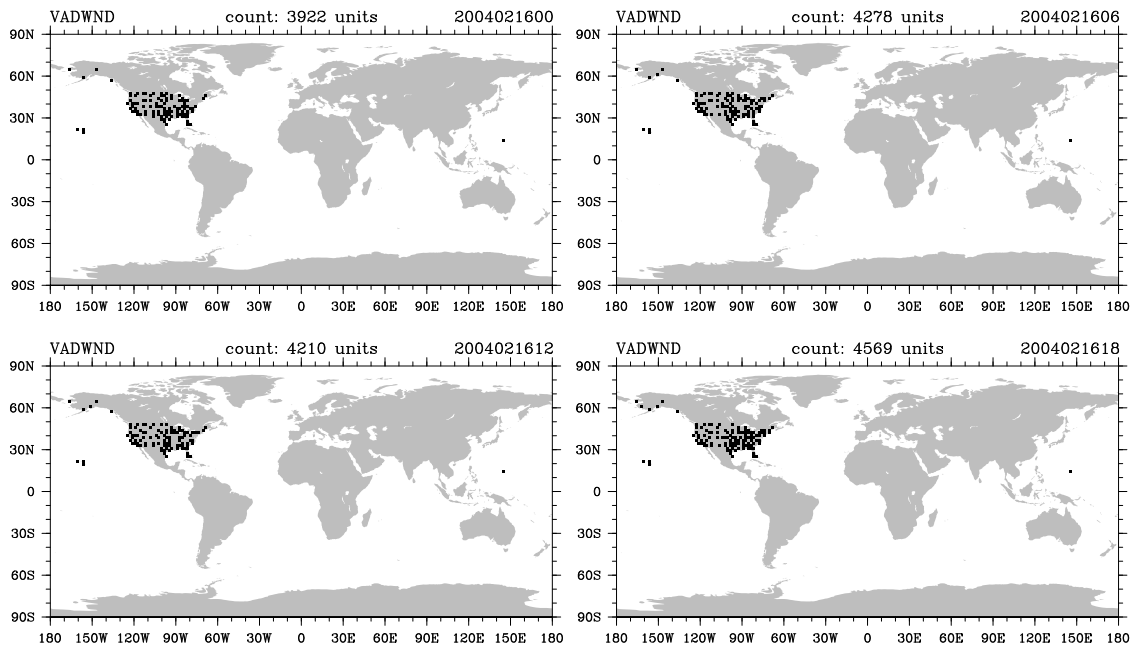


Figura 4.8 - Idem a Figura 4.7, exceto que para o grupo VADWND, o qual representa as observações obtidas por meio de radares.

Vetores de Movimento Atmosférico (AMV, do inglês *Atmospheric Motion Vectors*), e consiste basicamente em reconhecer padrões de movimento das nuvens utilizando um procedimento objetivo de rastreamento em uma sequência temporal de imagens obtidas por meio dos canais infravermelho, vapor d'água e visível de sensores a bordo de satélites.

Diversos centros geram AMV operacionalmente. Os arquivos PrepBUFR apresentam AMV gerados pelo NESDIS (do inglês *National Environmental Satellite, Data, and Information Service*), JMA e EUMETSAT (do inglês *European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*). O NESDIS gera essas observações para os satélites do programa Satélite Ambiental Operacional Geoestacionário (GOES, do inglês *Geostationary Operational Environmental Satellite*). Para o período desta pesquisa, os satélites do programa GOES que estavam em órbita eram os satélites GOES-8, -9, -10, -11 e -12, posicionados em 165°E, 155°E, 135°W, 105°W e 75°W, respectivamente. O JMA gera essas observações para os satélites dos programas Satélite Meteorológico Geoestacionário (GMS, do inglês *Geostationary Meteorological Satellite*) e, seu sucessor, Satélite de Transporte Multifuncional (MTSAT, do inglês *Multi-functional Transport Satellite*). Para o período desta pesquisa, o satélite dos programas GMS e MTSAT que estava em órbita era o GMS-5, posicionado em 140°E. O EUMETSAT gera essas observações para os satélites do programa Satélite Meteorológico (METEOSAT, do inglês *Meteorological Satellite*). Para o período desta pesquisa, os satélites do programa METEOSAT que estavam em serviço eram os satélites METEOSAT-5, -6, -7 e -8, posicionados em 62,9°W, 9°E, 57,5°E e 3,4-10,5°W, respectivamente. O GLETKF assimila essas observações caso as mesmas estejam disponíveis nos arquivos PrepBUFR, não havendo distinção entre os satélites dos diferentes programas durante o processo assimilação. A Figura 4.9 mostra a distribuição espacial dessas observações.

#### 4.1.1.2.4 Observações de superfície

As observações de superfície obtidas por meio de sensoriamento remoto são representadas pelas observações de vento ( $u$  e  $v$ ) em superfície oceânica do satélite de órbita polar Escaterômetro Rápido (QuikSCAT, do inglês *Quick Scatterometer*) e dos satélites, também de órbita polar, do Programa de Satélite Meteorológico de Defesa (DMSP, do inglês *Defense Meteorological Satellite Program*). Apesar de os satélites do DMSP não fazerem parte do GOS, parte das observações do mesmo

---

satélites AQUA e TERRA). Entretanto os ventos estimados por meio desses satélites são gerados somente para as regiões polares devido a limitação da técnica para obter o vento. Com isso supre a necessidade dessa estimativa em altas latitudes.

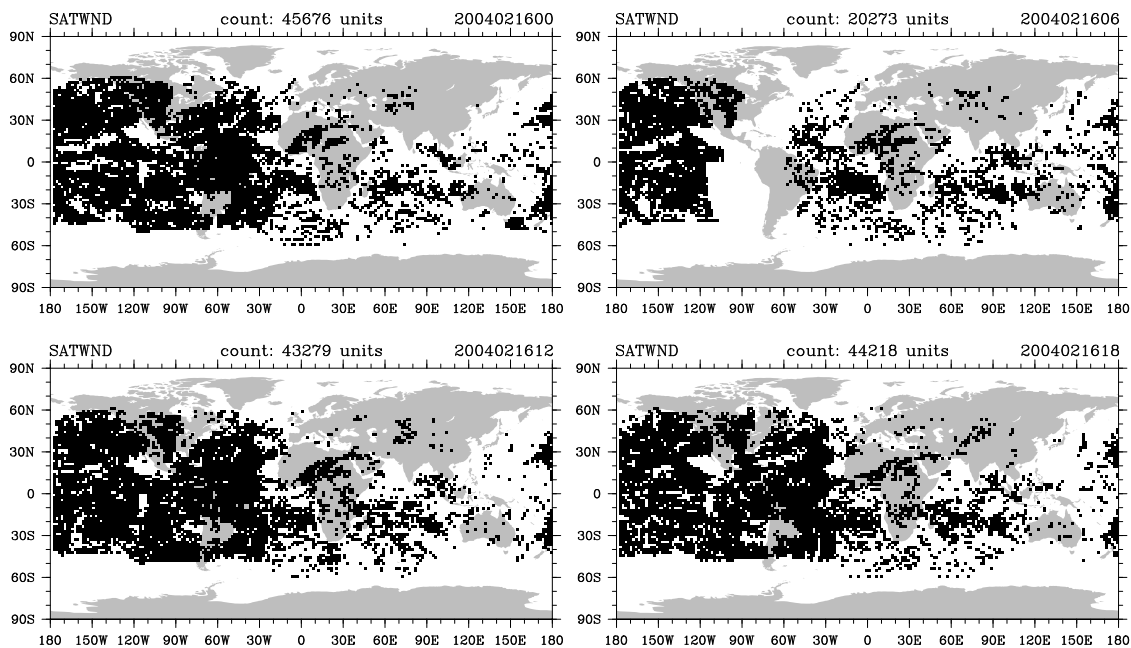


Figura 4.9 - Idem a Figura 4.7, exceto que para o grupo SATWND, o qual representa as observações obtidas por meio de satélites.

são distribuídas pela NOAA. Para o período desta pesquisa, os satélites do DMSP que estavam em serviço eram os satélites DMSP-F12, -F13, -F14, -F15 e -F16. Essas observações de ventos em superfície oceânica dos satélites do DMSP, são obtidas por meio do SSM/I. As observações QuikSCAT são superobservações (do inglês *superobs*) geradas com resolução de grade de  $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$ . As observações SSM/I também são superobservações, no entanto geradas com resolução de grade de  $1,0^{\circ} \times 1,0^{\circ}$ . As Figuras 4.10 e 4.11 mostram as distribuições espaciais dessas observações.

#### 4.1.1.3 Observações sintéticas

As observações que compõem o grupo das observações sintéticas (SYNDAT) são as observações sintéticas de vento ( $u$  e  $v$ ) de ciclones tropicais (BOGUS). Essas observações são geradas quando a estimativa inicial não representa corretamente os vórtices de ciclones tropicais. Com isso são gerados sinteticamente perfis verticais de vento nas redondezas desses sistemas com o intuito de representar esses sistemas tropicais. Essa técnica é utilizada a fim de suprir a escassez de observações próximas a esses sistemas, sejam elas *in situ* ou obtidas por meio de sensoriamento remoto. Assim como também devido a intenção de, caso hajam observações próximas aos sistemas tropicais, as mesmas não sejam excluídas durante um procedimento de controle de qualidade. O GLETKF não gera essas observações sintéticas. Entretanto

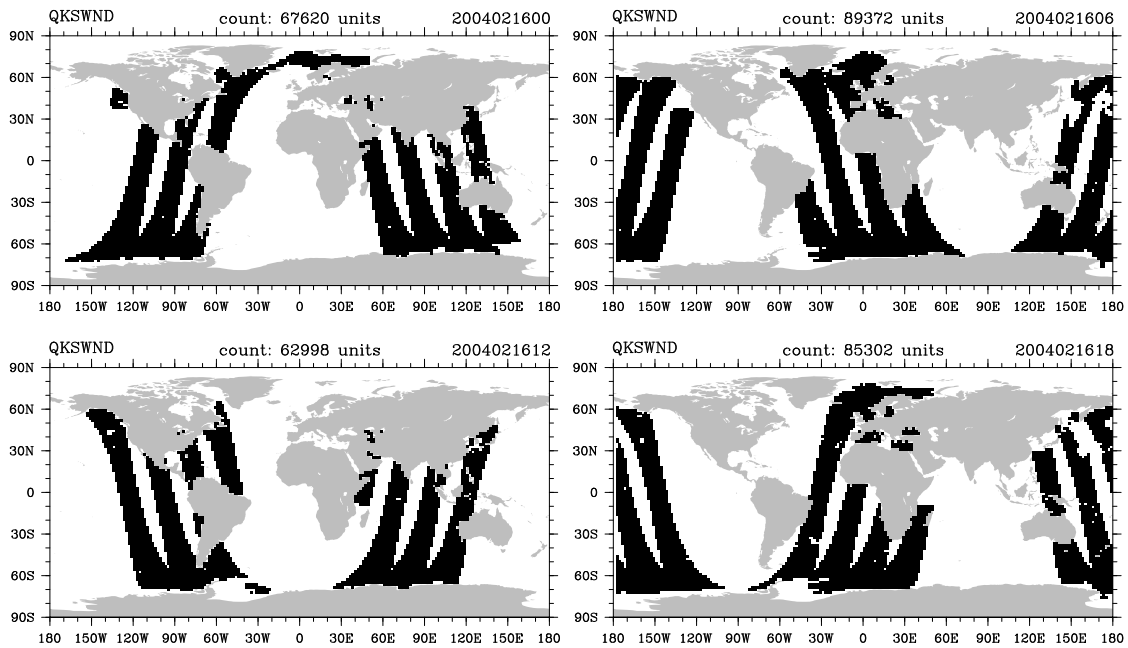


Figura 4.10 - Idem a Figura 4.7, exceto que para o grupo QKSWND, o qual representa as observações de superfície obtidas por meio do satélite QuikSCAT.

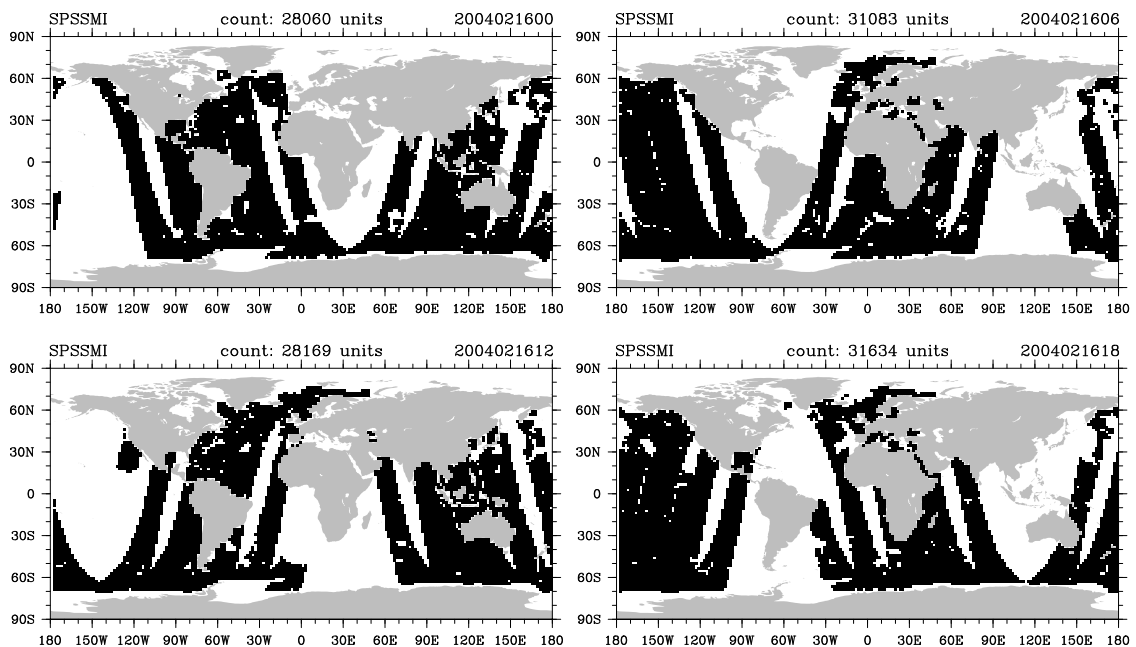


Figura 4.11 - Idem a Figura 4.7, exceto que para o grupo SPSSMI, o qual representa as observações de superfície obtidas por meio do sensor SSM/I.

essas observações serão assimiladas caso as mesmas estejam presentes nos arquivos PrepBUFR e satisfizerem os critérios de seleção das observações. A Figura 4.12 mostra a distribuição espacial dessas observações.

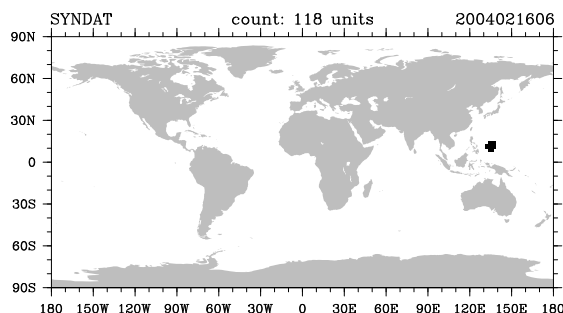


Figura 4.12 - Distribuição espacial das observações sintéticas do grupo SYNDAT, o qual representa as observações sintéticas de vento de ciclones tropicais (BOGUS), para o dia 16 de fevereiro de 2004 às 0600 UTC.

A Figura 4.13 e as Tabelas 4.2 e 4.3 resumam as descrições de todos os grupos de observações apresentados nesta seção. A Figura 4.13 apresenta um diagrama de Venn relacionado a classificação das observações com relação ao fornecimento de informações de massa e vento. Já as Tabelas 4.2 e 4.3 apresentam a descrição de cada tipo de observação que compõe os grupos apresentados nesta seção com relação ao seu código, variável observada e a sua descrição seguindo a mesma classificação utilizada nos arquivos PrepBUFR.

Tabela 4.2 - Reportes de massa para o período de 0000 UTC de 01 de janeiro de 2004 às 2100 UTC de 28 de fevereiro de 2004.

Código	$T$	$p_s$	Mnemônico	Descrição
120	●	○	ADPUPA	Radiossondas
130	●	-	AIRCFT	Aviões (AIREP PIREP)
131	●	-	AIRCFT	Aviões (ASDAR)
132	●	○	ADPUPA	Dropsondas
133	●	-	AIRCAR	Aviões (MDCRS ACARS)
180	●	●	SFCSHP	Superfície oceânica
181	○	●	ADPSFC	Superfície continental
182	●	●	SFCSHP	Dropsondas sobre o oceano

Nota: o símbolo ● significa que essas observações estavam disponíveis no sistema de observação e foram assimiladas, o símbolo ○ significa que estavam disponíveis porém não foram assimiladas e o símbolo - significa que não estavam disponíveis.

MASSA

VENTO

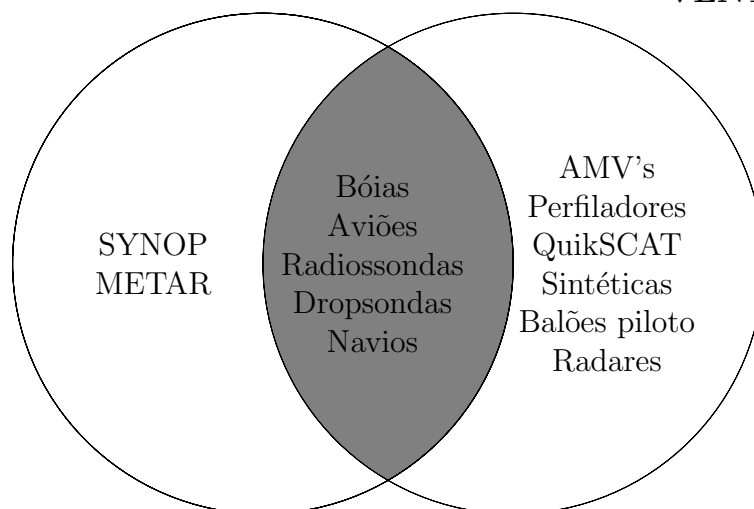


Figura 4.13 - Diagrama de Venn para ilustrar a distribuição das observações quanto as observações de massa e vento.

Tabela 4.3 - Reportes de vento para o período de 0000 UTC de 01 de janeiro de 2004 às 2100 UTC de 28 de fevereiro de 2004.

Código	<i>u</i>	<i>v</i>	Mnemônico	Descrição
210	•	•	SYNDAT	Sintéticos (BOGUS)
220	•	•	ADPUPA	Radiossondas
221	•	•	ADPUPA	Balões piloto
223	•	•	PROFLR	Perfiladores
224	•	•	VADWND	<i>Vertical Azimuth Display</i>
230	•	•	AIRCFT	Aviões (AIREP PIREP)
231	•	•	AIRCFT	Aviões (ASDAR)
232	•	•	ADPUPA	Dropsondas
233	•	•	AIRCAR	Aviões (MDCRS ACARS)
242	•	•	SATWND	AMV's JMA abaixo de 850 mb (IR e Vis)
243	•	•	SATWND	AMV's EUMETSAT abaixo de 850 mb (IR e Vis)
245	•	•	SATWND	AMV's NESDIS todos os níveis (IR)
246	•	•	SATWND	AMV's NESDIS topo das nuvens (WV)
252	•	•	SATWND	AMV's JMA acima de 850 mb (IR e Vis)
253	•	•	SATWND	AMV's EUMETSAT acima de 850 mb (IR e Vis)
255	•	•	SATWND	AMV's NESDIS baixos níveis (Vis)
280	•	•	SFCSHP	Superfície oceânica
283	•	•	SPSSMI	<i>Special Sensor Microwave/Imager</i>
285	•	•	QKSWND	Escaterômetro (QuikSCAT)

Nota: o símbolo • significa que essas observações estavam disponíveis no sistema de observação e foram assimiladas.



## 4.2 Metodologia

### 4.2.1 Sistema de assimilação de dados

O sistema de assimilação de dados utilizado nesta pesquisa é o GLETKF. Como citado no Capítulo 1, esse sistema está em fase de implementação no CPTEC/INPE. Atualmente o CPTEC/INPE utiliza um sistema de gestão de projetos com o intuito de gerenciar os diversos projetos em desenvolvimento no centro. A maior vantagem da utilização de um sistema como esse, é a possibilidade de todos os integrantes envolvidos no desenvolvimento do projeto terem a capacidade de se beneficiar das diversas melhorias que, direta ou indiretamente, ocorrem no sistema.

Um desses projetos tem a finalidade de desenvolver e testar o sistema GLETKF. Para isso, o grupo de assimilação de dados do CPTEC/INPE criou, e ainda cria, diversos ramos de desenvolvimento com o intuito de prover melhorias, corrigir falhas e implementar novas capacidades direcionadas ao benefício desse sistema. Isso ocorre por meio da realização de uma série de testes, utilizando uma configuração de referência (do inglês *benchmark*) do sistema GLETKF. Essa configuração de referência, atualmente, é realizada para o período de janeiro e fevereiro de 2004, utilizando um conjunto de observações para esse período. Esse conjunto de observações é composto de observações fornecidas pelo NCEP, por meio dos arquivos PrepBUFR. Entretanto os arquivos PrepBUFR foram decodificados e modificações foram realizadas com o intuito de criar um conjunto de observações específico para a configuração de referência.

No entanto, durante a realização desta pesquisa foi detectado que o conjunto de observações dessa configuração de referência apresentava falhas na classificação das observações que eram assimiladas pelo sistema. A falha ocorria de acordo com o código de cada tipo de observação, com relação a classificação estabelecida pelo NCEP para a codificação das observações contidas nos arquivos PrepBUFR, em que as observações de massa apresentam códigos compostos por números entre 100 e 199 e as observações de vento entre 200 e 299. Com isso, em alguns casos, o sistema classificava as observações de massa utilizando codificação de observações de vento e vice-versa. Com o intuito de sanar essa falha, para a realização desta pesquisa, foi utilizado um conjunto de observações diferente do conjunto de observações da configuração de referência. Para isso foi implementado no sistema GLETKF, um decodificador de arquivos PrepBUFR, tornando o sistema hábil a utilizar esses arquivos diretamente, sem a necessidade de utilizar o conjunto de observações de referência.

O sistema GLETKF é composto pelo método de assimilação de dados LETKF e o modelo de circulação geral da atmosfera do CPTEC/INPE, o MCGA-CPTEC/INPE. A seguir essas duas componentes serão descritas.

#### 4.2.1.1 Método de assimilação de dados

A atualização da análise é uma das principais etapas envolvidas em um sistema de assimilação de dados. Isso ocorre por meio do uso de um método de assimilação. Para a realização desta pesquisa o método utilizado é uma variação do filtro de Kalman (KF, do inglês *Kalman Filter*). O KF foi originalmente proposto por Kalman (1960) e Kalman e Bucy (1961), sendo composto de duas etapas principais: previsão e análise. A principal característica do KF ocorre no processo de previsão, onde, além de ele apresentar uma equação para a evolução temporal da análise em um tempo presente, esse método apresenta também uma equação para evolução temporal da matriz de covariância dos erros em um estado presente. Ghil et al. (1981) sugeriram que o KF pode, em teoria, ser utilizado para uma estimativa ótima do estado atmosférico. Entretanto, na prática, torna-se difícil utilizar o KF para a assimilação de dados atmosféricos devido a dois sérios problemas. Primeiro, devido a estimativa da covariância dos erros da estimativa inicial ser necessária, porém difícil (DEE, 1995). Segundo, devido a operação com matrizes de grandes dimensões tornarem o custo computacional muito alto. Com isso, alguns autores propuseram novas abordagens com o intuito de solucionar os dois problemas citados anteriormente, surgindo as variações do KF, também chamadas de sub-ótimas (do inglês *suboptimal*, e.g. em Todling e Cohn (1994)) devido a elas apresentarem simplificações com respeito ao KF.

O Filtro de Kalman por Conjunto (EnKF, do inglês *Ensemble Kalman Filter*, Evensen (1994)) é uma das variações existentes do KF. Nessa variação do KF, a evolução temporal da covariância dos erros da estimativa inicial é estimada por meio de um conjunto de previsões. O EnKF ganhou popularidade devido a sua formulação conceitual relativamente simples e implementação relativamente fácil comparado ao método 4D-Var, devido ao EnKF não necessitar a derivação de um modelo tangente linear e de um modelo adjunto. Encontram-se na literatura diversas aplicações do EnKF na área de Ciências da Terra, como por exemplo: Reichle (2008) apresenta o uso do EnKF em assimilação de dados hidrológicos; Whitaker et al. (2004) utilizaram o EnKF para reanálises atmosféricas; Keppenne e Rienecker (2002) utilizaram o EnKF para assimilação de dados oceânicos; e Houtekamer et al. (2005) utilizaram o EnKF para assimilação de dados atmosféricos no Centro Meteorológico Canadense

(CMC, do inglês *Canadian Meteorological Centre*).

Até então, considerava-se apenas a integração a partir de uma análise. Aqui torna-se necessário buscar os conceitos de previsão por conjunto. Em geral, a média do conjunto fornece uma previsão melhor do que cada membro do conjunto individualmente, devido a média do conjunto tender a filtrar as incertezas da previsão. O espalhamento (do inglês *spread*) dos membros do conjunto fornecem uma importante indicação da precisão provável da previsão média do conjunto. Havendo um grande espalhamento entre os membros do conjunto, nem todos os membros podem estar corretos, com isso, a confiança na previsão pode ser baixa. Porém, devido a isso há uma estimativa dos extremos possíveis, de ocorrer de acordo com a dinâmica do modelo atmosférico. Entretanto, quando a maioria dos membros concorda, a confiabilidade na previsão pode ser alta. Em resumo, a previsão por conjunto não somente pode melhorar a confiabilidade na previsão, mas também pode fornecer informações sobre o grau de confiabilidade na previsão.

O método Filtro de Kalman Local por Conjunto (LEKF, do inglês *Local Ensemble Kalman Filter*, Ott et al. (2002), Ott et al. (2004)) é uma outra variação do KF, que assimila observações simultaneamente, sendo eficiente em arquitetura computacional paralelizada. Esse método basicamente estima o estado da análise em um ponto de grade utilizando as observações que se encontram dentro de um raio de influência a partir do centro desse ponto, independente das observações que se encontram fora desse raio de influência. O método Transformada do Filtro de Kalman por Conjunto (ETKF, do inglês *Ensemble Transform Kalman Filter*, Bishop et al. (2001)), também é outra variação de KF, porém esse método utiliza uma transformação do conjunto e uma normalização para obter rapidamente a matriz de covariância dos erros da previsão associada com uma implantação particular dos recursos observacionais. Hunt et al. (2005) e Hunt et al. (2007) utilizaram a abordagem do ETKF para atualizar o LEKF a fim de acelerar o ciclo de análise e previsão, originando o método Transformada do Filtro de Kalman Local por Conjunto (LETKF, do inglês *Local Ensemble Transform Kalman Filter*). Semelhantemente ao LEKF, o LETKF apresenta a importante possibilidade de ser codificado em arquitetura computacional paralelizada, que ocorre devido ao cálculo da análise em cada ponto de grade ser independente dos outros pontos de grade. O LETKF atualiza o estado de cada membro do conjunto de análise de acordo com a seguinte equação:

$$\mathbf{x}^{ai} = \bar{\mathbf{x}}^b + \mathbf{X}^b \tilde{\mathbf{K}} \mathbf{v} + \delta \mathbf{x}^{ai} \quad (4.1)$$

onde o campo de análise do  $i$ -ésimo membro do conjunto e o campo médio da estimativa inicial são representados pelos vetores  $\mathbf{x}^{ai} \in \mathbb{R}^n$  e  $\bar{\mathbf{x}}^b \in \mathbb{R}^n$ , respectivamente. Os incrementos de observações são representados aqui pelo vetor  $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^p$ , sendo definidos como  $\mathbf{v} = [\mathbf{y}^o - h(\bar{\mathbf{x}}_b)]$ , onde o operador de observação aqui é representado por  $h \in \mathbb{R}^{p \times n}$ . Note que diferentemente do operador observação apresentado na Seção 2.1, aqui esse é considerado não linear devido a não somente interpolar o campo de estimativa inicial para o espaço das observações, mas também se necessário transformar as variáveis a serem analisadas para as variáveis observáveis, gerando pseudo-observações. O  $\delta$  representa a diferença entre o  $i$ -ésimo membro do conjunto e a média do conjunto. Com isso, facilmente consegue-se relacionar a atualização do estado médio da análise utilizando o LETKF em (4.1) com a expressão em (2.1) (ver página 9). Aliado às definições espaciais  $n$  e  $p$  utilizadas na Seção 2.1, aqui será utilizado o superescrito  $m$  para indicar a dimensão espacial do conjunto. A matriz de perturbações do conjunto de estimativa inicial é representada por  $\mathbf{X}^b \in \mathbb{R}^{n \times m}$ , cujas colunas representam as diferenças entre cada membro do conjunto e a média do conjunto. A matriz ganho no espaço das perturbações do conjunto é representada por  $\tilde{\mathbf{K}} \in \mathbb{R}^{m \times p}$ , e essa pode ser representada em função da matriz de covariância dos erros das observações  $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{p \times p}$ , da matriz de perturbações do conjunto no espaço das observações  $\mathbf{H}\mathbf{X}^b \in \mathbb{R}^{p \times m}$ , da matriz identidade  $\mathbf{I} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ , e pelo número de membros do conjunto  $K \in \mathbb{R}^m$ , conforme a equação abaixo:

$$\tilde{\mathbf{K}} = [(\mathbf{H}\mathbf{X}^b)^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{H}\mathbf{X}^b) + (K - 1)\mathbf{I}]^{-1} (\mathbf{H}\mathbf{X}^b)^T \mathbf{R}^{-1} \quad (4.2)$$

A matriz de perturbações do conjunto de análise  $\mathbf{X}^a \in \mathbb{R}^{n \times m}$  no LETKF é dada por uma combinação linear das perturbações do conjunto de estimativa inicial:

$$\mathbf{X}^a = \mathbf{X}^b [(K - 1)\tilde{\mathbf{P}}^a]^{-\frac{1}{2}} \quad (4.3)$$

onde a matriz de covariância dos erros da análise no espaço das perturbações do conjunto  $\tilde{\mathbf{P}}^a \in \mathbb{R}^{m \times m}$  é definida por  $\tilde{\mathbf{P}}^a = [(\mathbf{H}\mathbf{X}^b)^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}\mathbf{X}^b + (K - 1)\mathbf{I}]^{-1}$ . As matrizes de covariância dos erros da estimativa inicial  $\mathbf{P}^b \in \mathbb{R}^{n \times n}$  e de covariância dos erros da análise  $\mathbf{P}^a \in \mathbb{R}^{n \times n}$  são definidas, respectivamente, por:

$$\mathbf{P}^b = \frac{1}{K - 1} \mathbf{X}^b \mathbf{X}^{bT} \quad (4.4)$$

e

$$\mathbf{P}^a = \frac{1}{K-1} \mathbf{X}^b \tilde{\mathbf{P}}^a \mathbf{X}^{bT} \quad (4.5)$$

Diferentemente dos métodos de assimilação variacionais, os métodos baseados no EnKF atualizam a covariância dos erros da estimativa inicial a cada ciclo de análise por meio do conjunto de estimativa inicial, que contém uma estatística dos erros de todas as variáveis de estado envolvidas no sistema de assimilação.

As covariâncias dos erros das observações são univariadas e os termos de auto covariância são funções delta, com isso a matriz de covariância dos erros das observações  $\mathbf{R}$  facilmente torna-se diagonal. Para formar essa matriz foram utilizados os erros observacionais provenientes das observações presentes nos arquivos PrepBUFR. Usualmente, esses erros são definidos de acordo com o tipo de observação e variam com relação a altura da observação.

A Tabela 4.4 apresenta as opções das configurações do GLETKF utilizadas nas simulações desta pesquisa. O número de membros que compõem o conjunto de previsões utilizado nesta pesquisa foi escolhido igual a 40. A localização horizontal de 400 km, configurada para as simulações desta pesquisa, corresponde a um raio de influência em torno de 1.460 km para cada ponto de grade a ser analisado. A localização temporal escolhida foi de 3 h, o que resulta em uma janela atmosférica de 6 h, sendo essa escolhida centrada no horário de análise. Com isso, para cada ciclo de atualização da análise são selecionadas as observações de 3 h antes e 3 h depois do horário a ser analisado. O limiar vertical indica o limite aceitável para assimilar as observações que não estão localizadas verticalmente no mesmo nível em que realiza-se análise. O GLETKF atualiza a análise em todos os níveis do modelo, nesta pesquisa escolhido igual a 28 níveis. Com isso, todas as observações que encontravam-se em distâncias verticais maiores do que 600 m com relação aos níveis do modelo foram descartadas. Com o intuito de ser conservador, optou-se por utilizar um teste de erro grosseiro que descartou todas as observações que apresentaram diferenças entre os valores observados e os valores da estimativa inicial maiores do que três vezes o seu próprio desvio padrão.

#### 4.2.1.2 Modelo de circulação geral da atmosfera

Assim como a etapa de atualização da análise, uma outra etapa também considerada como sendo uma das principais é a etapa de previsão. Essa etapa dá-se por meio do uso de um modelo numérico de previsão de tempo. Nesta pesquisa, em conjunto com o LETKF, foi utilizado o MCGA-CPTEC/INPE. Esse modelo tem

Tabela 4.4 - Configurações do GLETKF utilizadas nesta pesquisa.

Número de membros	40 membros
Localização horizontal	400 km
Localização vertical	$0,4 \ln(p)$
Localização temporal	3 h
Variáveis de estado	$u, v, T$ e $p_s$
Limiar vertical	600 m
Erro grosseiro	3 vezes o desvio padrão

suas variáveis definidas espectralmente. Entretanto para realizar a atualização da análise, essas variáveis são transformadas para o espaço físico e então interpoladas linearmente para os locais das observações. Esse modelo foi utilizado nesta pesquisa configurado para  $T_Q62L28$ , onde  $T_Q62$  representa a resolução de uma grade quadrática com truncamento triangular no número de onda zonal 62, e L28 indica que são utilizados 28 níveis verticais em coordenadas sigma, correspondendo a uma grade com resolução horizontal com 192 pontos de grade zonais e 96 pontos de grade meridionais de aproximadamente  $1,875^\circ \times 1,875^\circ$  e 21 níveis situados na troposfera e 7 níveis situados na estratosfera. Essa resolução é essencialmente equivalente a  $200 \text{ km} \times 200 \text{ km}$ . A Figura 4.14 mostra a topografia truncada espectralmente utilizada pela resolução do modelo escolhida para esta pesquisa. As Tabelas 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam as longitudes, latitudes e níveis verticais, respectivamente, que compõem a grade utilizada nas simulações desta pesquisa.

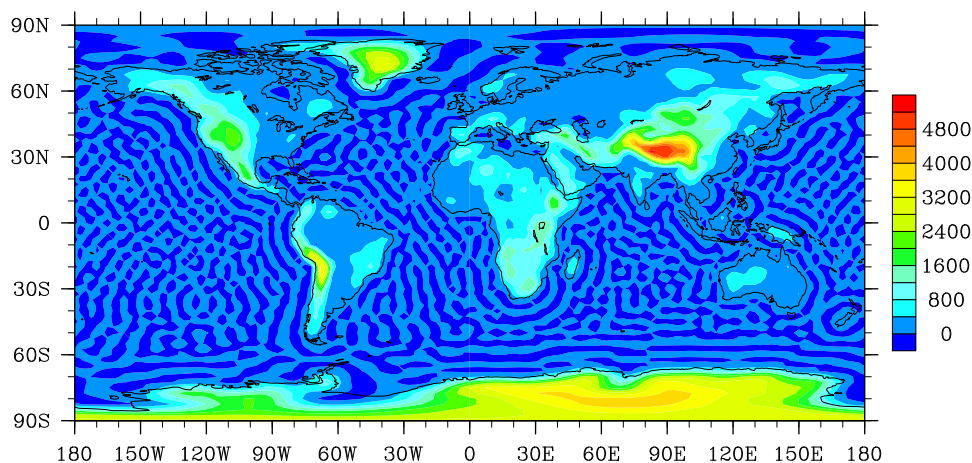


Figura 4.14 - Topografia global para a resolução  $T_Q62L28$  utilizada nesta pesquisa. A unidade é m.

Atualmente o MCGA-CPTEC/INPE compõe o sistema de assimilação de dados

Tabela 4.5 - Longitudes do MCGA-CPTEC/INPE utilizadas nesta pesquisa.

Longitudes					
0,00000	1,87500	3,75000	5,62500	7,50000	9,37500
11,25000	13,12500	15,00000	16,87500	18,75000	20,62500
22,50000	24,37500	26,25000	28,12500	30,00000	31,87500
33,75000	35,62500	37,50000	39,37500	41,25000	43,12500
45,00000	46,87500	48,75000	50,62500	52,50000	54,37500
56,25000	58,12500	60,00000	61,87500	63,75000	65,62500
67,50000	69,37500	71,25000	73,12500	75,00000	76,87500
78,75000	80,62500	82,50000	84,37500	86,25000	88,12500
90,00000	91,87500	93,75000	95,62500	97,50000	99,37500
101,25000	103,12500	105,00000	106,87500	108,75000	110,62500
112,50000	114,37500	116,25000	118,12500	120,00000	121,87500
123,75000	125,62500	127,50000	129,37500	131,25000	133,12500
135,00000	136,87500	138,75000	140,62500	142,50000	144,37500
146,25000	148,12500	150,00000	151,87500	153,75000	155,62500
157,50000	159,37500	161,25000	163,12500	165,00000	166,87500
168,75000	170,62500	172,50000	174,37500	176,25000	178,12500
180,00000	181,87500	183,75000	185,62500	187,50000	189,37500
191,25000	193,12500	195,00000	196,87500	198,75000	200,62500
202,50000	204,37500	206,25000	208,12500	210,00000	211,87500
213,75000	215,62500	217,50000	219,37500	221,25000	223,12500
225,00000	226,87500	228,75000	230,62500	232,50000	234,37500
236,25000	238,12500	240,00000	241,87500	243,75000	245,62500
247,50000	249,37500	251,25000	253,12500	255,00000	256,87500
258,75000	260,62500	262,50000	264,37500	266,25000	268,12500
270,00000	271,87500	273,75000	275,62500	277,50000	279,37500
281,25000	283,12500	285,00000	286,87500	288,75000	290,62500
292,50000	294,37500	296,25000	298,12500	300,00000	301,87500
303,75000	305,62500	307,50000	309,37500	311,25000	313,12500
315,00000	316,87500	318,75000	320,62500	322,50000	324,37500
326,25000	328,12500	330,00000	331,87500	333,75000	335,62500
337,50000	339,37500	341,25000	343,12500	345,00000	346,87500
348,75000	350,62500	352,50000	354,37500	356,25000	358,12500

GPSAS. Conforme citado no Capítulo 1, o GPSAS é utilizado operacionalmente no CPTEC/INPE, estando configurado para a resolução  $T_Q213L42$  (aproximadamente  $63 \text{ km} \times 63 \text{ km}$ ), utilizando o método de assimilação de dados PSAS para gerar as análises e prognosticando para até 7 dias. Há também duas versões operacionais desse modelo, ambas utilizando as análises do NCEP como condições iniciais. Uma delas está configurada para a mesma resolução utilizada pelo GPSAS e a outra está configurada para a resolução  $T_Q299L64$  (aproximadamente  $45 \text{ km} \times 45 \text{ km}$ ).

Tabela 4.6 - Latitudes do MCGA-CPTEC/INPE utilizadas nesta pesquisa.

Latitudes					
-88,57217	-86,72253	-84,86197	-82,99894	-81,13498	-79,27056
-77,40589	-75,54106	-73,67613	-71,81113	-69,94608	-68,08099
-66,21587	-64,35073	-62,48557	-60,62040	-58,75521	-56,89001
-55,02481	-53,15960	-51,29438	-49,42916	-47,56393	-45,69870
-43,83346	-41,96822	-40,10298	-38,23774	-36,37249	-34,50725
-32,64200	-30,77675	-28,91150	-27,04624	-25,18099	-23,31573
-21,45048	-19,58522	-17,71997	-15,85471	-13,98945	-12,12419
-10,25893	-8,39367	-6,52841	-4,66315	-2,79789	-0,93263
0,93263	2,79789	4,66315	6,52841	8,39367	10,25893
12,12419	13,98945	15,85471	17,71997	19,58522	21,45048
23,31573	25,18099	27,04624	28,91150	30,77675	32,64200
34,50725	36,37249	38,23774	40,10298	41,96822	43,83346
45,69870	47,56393	49,42916	51,29438	53,15960	55,02481
56,89001	58,75521	60,62040	62,48557	64,35073	66,21587
68,08099	69,94608	71,81113	73,67613	75,54106	77,40589
79,27056	81,13498	82,99894	84,86197	86,72253	88,57217

Além de esse modelo estar configurado para previsões determinísticas, há também, operacional, uma versão desse mesmo modelo, gerando previsões probabilísticas de até 15 dias, configurado para T<sub>Q</sub>126L28 (aproximadamente 100 km × 100 km).

A seguir será apresentada uma breve descrição a respeito do MCGA-CPTEC/INPE. Entretanto uma descrição detalhada pode ser encontrada em Bonatti (1996), Kinter et al. (1997) e Panetta et al. (2007). O MCGA-CPTEC/INPE tem sua origem no NCEP e foi modificado pelo Centro de Estudos em Oceano-Terra-Atmosfera (COLA, do inglês *Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies*) nas décadas de 80 e 90. O modelo é espectral, tem coordenadas horizontais esféricas e tem condições de contorno dadas por velocidade vertical sigma no topo e na superfície nulas. A parte dinâmica do modelo usa as equações espectrais primitivas em forma de divergência e vorticidade, temperatura virtual, umidade específica e logaritmo natural da pressão à superfície. Uma das características importantes do MCGA-CPTEC/INPE é a de facilitar o acoplamento de novas parametrizações e novos esquemas físicos, juntamente com bom desempenho computacional (TOMITA et al., 2006). A Tabela 4.8 apresenta as opções das parametrizações físicas do MCGA-CPTEC/INPE utilizadas nas simulações desta pesquisa.



Tabela 4.7 - Níveis verticais do MCGA-CPTEC/INPE utilizados nesta pesquisa.

Índice do nível	Nível sigma ( $\sigma$ )	Pressão no nível (hPa)
1	0,99500	1008,18
2	0,98208	995,09
3	0,96437	977,15
4	0,94255	955,04
5	0,91592	928,06
6	0,88384	895,55
7	0,84579	857,00
8	0,80142	812,04
9	0,75076	760,71
10	0,69426	703,46
11	0,63290	641,29
12	0,56809	575,62
13	0,50168	508,33
14	0,43568	441,45
15	0,37205	376,98
16	0,31248	316,62
17	0,25823	261,65
18	0,21006	212,84
19	0,16823	170,46
20	0,13261	134,37
21	0,10278	104,14
22	0,07815	79,19
23	0,05805	58,82
24	0,04179	42,34
25	0,02875	29,13
26	0,01834	18,58
27	0,01006	10,19
28	0,00273	2,77

Nota: os valores de pressão no nível foram obtidos considerando o valor de pressão à superfície igual a 1013,25 hPa.

#### 4.2.1.3 Descrição do ciclo de assimilação de dados

O ciclo de assimilação de dados meteorológicos utilizado nesta pesquisa consiste em uma série de operações repetidas a cada seis horas todos os dias nos horários sinóticos (0000, 0600, 1200 e 1800 UTC). As operações realizadas durante o período de seis horas são apresentadas no diagrama da Figura 4.15. A série inicia a partir da seleção das observações que serão utilizadas para a análise dentro de uma janela de seis horas centrada em torno dos horários de análise. Essas observações escolhidas

Tabela 4.8 - Configurações do MCGA-CPTEC/INPE utilizadas nesta pesquisa.

Dinâmica	Euleriana
Tipo de grade	Não reduzida
Convecção profunda	Kuo (1974)
Convecção rasa	Tiedtke (1983)
Radiação de onda longa	Harshvardhan et al. (1987)
Radiação de onda curta	CLIRAD (TARASOVA et al., 2007)
Superfície	Xue et al. (1991)
Camada limite	Mellor e Yamada (1982)
Onda de gravidade	Alpert et al. (1988)

serão armazenadas e realizada uma etapa de controle de qualidade nas mesmas. A etapa seguinte é a análise realizada pelo GLETKF a partir da combinação de uma estimativa inicial e das observações. Essa etapa irá gerar as condições iniciais para o MCGA-CPTEC/INPE realizar os prognósticos operacionais. Desses prognósticos operacionais, o prognóstico válido para seis horas, a partir da análise utilizada como condições iniciais, será utilizado como estimativa inicial para próxima análise a ser realizada. Com isso, reiniciando o ciclo de assimilação de dados.

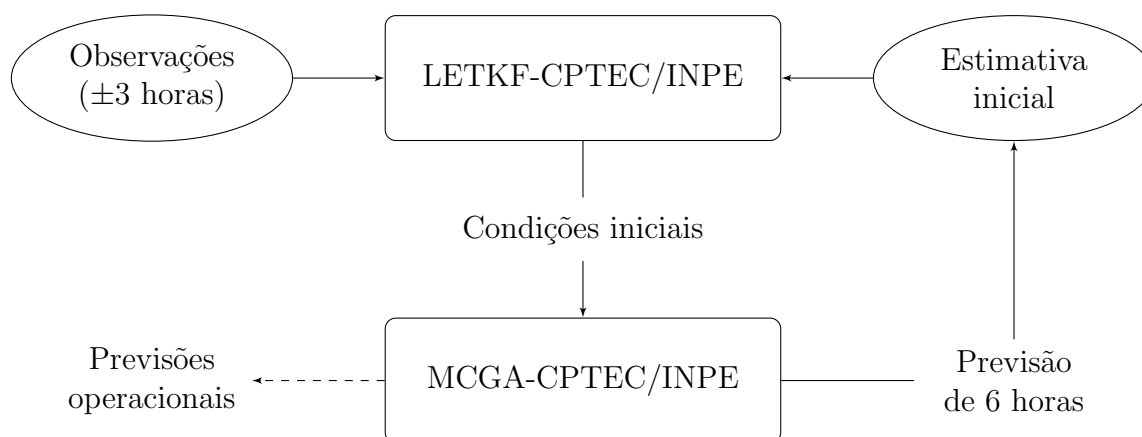


Figura 4.15 - Ciclo de análise utilizando o sistema GLETKF com intervalo de 6 horas entre as análises, realizado às 0000, 0600, 1200 e 1800 UTC.

Fonte: Adaptado de Kalnay (2002).

O GLETKF realiza a atualização da análise para cada ponto de grade da grade gaussiana do MCGA-CPTEC/INPE (192×96×28). Com isso, devido a configuração de resolução selecionada para esta pesquisa, o número total de pontos de grade para cada nível e para cada variável é igual a 18.432 pontos de grade. Considerando as

variáveis de estado que o GLETKF realiza a atualização da análise ( $u$ ,  $v$ ,  $T$  e  $p_s$ ), resulta em 1.566.720 pontos de grade.

#### 4.2.2 Impacto das observações

A técnica utilizada nesta pesquisa para examinar o impacto das observações nas previsões de curto prazo é a técnica proposta em Liu (2007) e Liu e Kalnay (2008). Essa técnica é baseada em conjunto e é semelhante a abordagem utilizada na técnica baseada em modelos adjuntos, a qual foi introduzida primeiramente por Langland e Baker (2004) e extensivamente testada nos trabalhos subsequentes brevemente apresentados na revisão bibliográfica desta pesquisa (ver Capítulo 3). Essa técnica utiliza um funcional definido de maneira semelhante ao apresentado na fundamentação teórica desta pesquisa (ver Seção 2.2, de (2.5) à (2.7)), em que para medir a redução do erro de previsão em um tempo de verificação  $t$ , devido às observações assimiladas em  $t = 0$  h, é definida uma função custo como sendo a diferença do quadrado dos erros entre as previsões iniciadas em  $t = 0$  h e  $t = -6$  h:

$$J = \frac{1}{2} (\mathbf{e}_{t|0}^T \mathbf{C} \mathbf{e}_{t|0} - \mathbf{e}_{t|-6}^T \mathbf{C} \mathbf{e}_{t|-6}) \quad (4.6)$$

$$= \frac{1}{2} (\mathbf{e}_{t|0} + \mathbf{e}_{t|-6})^T \mathbf{C} (\mathbf{e}_{t|0} - \mathbf{e}_{t|-6}) \quad (4.7)$$

onde  $\mathbf{e}_{t|0}$  e  $\mathbf{e}_{t|-6}$  representam os erros das previsões válidas para um tempo de verificação  $t$  e iniciadas em  $t = 0$  h e  $t = -6$  h, respectivamente. De modo que essa diferença seja devido às observações assimiladas em  $t = 0$  h. A fim de comparar o impacto de diferentes tipos de observações, como por exemplo vento e temperatura, utiliza-se uma matriz diagonal de pesos que define uma norma, aqui representada por  $\mathbf{C}$ . Devido a maioria dos estudos que verificam o impacto das observações nas previsões de curto prazo utilizarem a norma de energia total (seca), optou-se por utilizar essa mesma norma nesta pesquisa. Portanto a norma utilizada nesta pesquisa é semelhante a norma apresentada na fundamentação teórica (ver (2.4)), entretanto, por tratar-se da norma de energia total (seca), utiliza-se o termo  $\omega_q$  igual a zero, resultando na deconsideração do termo de umidade. Com isso, é possível, futuramente, comparar qualitativamente os resultados obtidos nesta pesquisa com os resultados obtidos em estudos anteriores a este, que utilizaram diferentes sistemas de assimilação de dados.

O método utilizado nesta pesquisa é baseado em conjunto, com isso os erros

$\mathbf{e}_{t|0}$  e  $\mathbf{e}_{t|-6}$  são definidos como sendo erros médios e obtém-se os mesmos da seguinte forma:

$$\mathbf{e}_{t|0} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K M_{t|0}(\mathbf{x}_0^{ai}) - \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \mathbf{x}_t^{ai} = \bar{\mathbf{x}}_{t|0}^f - \bar{\mathbf{x}}_t^a \quad (4.8)$$

e

$$\mathbf{e}_{t|-6} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K M_{t|-6}(\mathbf{x}_{-6}^{ai}) - \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \mathbf{x}_t^{ai} = \bar{\mathbf{x}}_{t|-6}^f - \bar{\mathbf{x}}_t^a \quad (4.9)$$

onde  $M_{t|0}(\mathbf{x}_0^{ai})$  e  $M_{t|-6}(\mathbf{x}_{-6}^{ai})$  representam as integrações temporais do modelo não linear de previsão numérica de tempo até o tempo de verificação  $t$  dos  $K$  membros do conjunto, iniciados a partir do conjunto de  $K$  análises em  $t = 0$  h e  $t = -6$  h, respectivamente. A notação utilizada é a mesma de Liu e Kalnay (2008), com o primeiro subscrito indicando o tempo para o qual é válida a medida, e, quando presente, o segundo subscrito, separado por uma barra vertical, indicando o tempo das condições iniciais da previsão ou do erro da previsão. Substituindo as definições de  $\mathbf{e}_{t|0}$  e  $\mathbf{e}_{t|-6}$  em (4.7), a função custo pode ser reescrita como:

$$J = \frac{1}{2} \left( 2\mathbf{e}_{t|-6} + \bar{\mathbf{x}}_{t|0}^f - \bar{\mathbf{x}}_{t|-6}^f \right)^T \mathbf{C}(\bar{\mathbf{x}}_{t|0}^f - \bar{\mathbf{x}}_{t|-6}^f) \quad (4.10)$$

ou

$$J = \frac{1}{2} \left( \mathbf{e}_{t|0} + \mathbf{e}_{t|-6} \right)^T \mathbf{C}(\bar{\mathbf{x}}_{t|0}^f - \bar{\mathbf{x}}_{t|-6}^f) \quad (4.11)$$

Com o intuito de medir a redução do erro de previsão devido as observações assimiladas em  $t = 0$  h, Liu e Kalnay (2008), considerando o esquema de análise do LETKF, reescreveram a diferença entre as previsões iniciadas em  $t = 0$  h e  $t = -6$  h como uma função dos incrementos de observações  $\mathbf{v}_0$  utilizados em  $t = 0$  h:

$$\bar{\mathbf{x}}_{t|0}^f - \bar{\mathbf{x}}_{t|-6}^f \approx \mathbf{X}_{t|-6}^f \tilde{\mathbf{K}}_0 \mathbf{v}_0, \quad (4.12)$$

onde  $\mathbf{X}_{t|-6}^f$  representa a matriz de perturbações do conjunto de previsões iniciadas em  $t = -6$  h e válida para o tempo de verificação  $t$ , cujas colunas são dadas pela diferença entre cada membro do conjunto de previsão e a média sobre os  $K$  membros do conjunto. É importante notar que essa matriz é semelhante a matriz de perturbações do conjunto de estimativa inicial apresentada na Seção 4.2.1.1, diferenciando-se apenas pelos tempos de início e término das previsões que h formam

essas matrizes. Já a matriz  $\tilde{\mathbf{K}}_0 \in \mathbb{R}^{m \times p}$  e o vetor  $\mathbf{v}_0 \in \mathbb{R}^p$  são os mesmos apresentados na Seção 4.2.1.1, que são utilizados durante a atualização do estado de cada membro do conjunto de análise no LETKF, porém, aqui foi adicionado o subscrito que indica o seu tempo de validade. Apesar de (4.12) ter sido obtida através de uma linearização em torno do campo médio da estimativa inicial  $\bar{\mathbf{x}}_{0|-6}^b$ , segundo Liu (2007) e Liu e Kalnay (2008), essa apresenta resultados indistinguíveis com relação a equação que não faz uso dessa linearização. Maiores detalhes com relação a equação não linearizada, como também com relação as deduções aqui apresentadas, podem ser obtidos em Liu (2007) e Liu e Kalnay (2008). Utilizando a relação apresentada em (4.12), é possível reescrever (4.10) e (4.11), para, enfim, obter-se o funcional representando a redução do erro das previsões em função das observações assimiladas em  $t = 0$  h:

$$J \cong \left( \mathbf{e}_{t|-6} + \frac{1}{2} \mathbf{X}_{t|-6}^f \tilde{\mathbf{K}}_0 \mathbf{v}_0 \right)^T \mathbf{C} \mathbf{X}_{t|-6}^f \tilde{\mathbf{K}}_0 \mathbf{v}_0 \quad (4.13)$$

ou

$$J \cong \frac{1}{2} (\mathbf{e}_{t|0} + \mathbf{e}_{t|-6})^T \mathbf{C} \mathbf{X}_{t|-6}^f \tilde{\mathbf{K}}_0 \mathbf{v}_0 \quad (4.14)$$

E assim, conforme discutido primeiramente em Langland e Baker (2004), o impacto pode ser escrito como um produto interno escalar, com isso, reescrevendo (4.13) e (4.14), o impacto é dado por:

$$I = \left\langle \mathbf{v}_0, \tilde{\mathbf{K}}_0^T \mathbf{X}_{t|-6}^{fT} \mathbf{C} \left( \mathbf{e}_{t|-6} + \frac{1}{2} \mathbf{X}_{t|-6}^f \tilde{\mathbf{K}}_0 \mathbf{v}_0 \right) \right\rangle \quad (4.15)$$

ou

$$I = \left\langle \mathbf{v}_0, \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{K}}_0^T \mathbf{X}_{t|-6}^{fT} \mathbf{C} (\mathbf{e}_{t|0} + \mathbf{e}_{t|-6}) \right\rangle \quad (4.16)$$

Ao analisar (4.15) ou (4.16) nota-se que é possível calcular o impacto das observações nas previsões de curto prazo, durante um ciclo de assimilação de dados, uma vez que se tenha a análise no tempo de verificação  $t$  (utilizado nesta pesquisa igual a 24 horas), o conjunto de previsão válido para esse tempo de verificação  $t$  e iniciado em  $t = -6$  h, a matriz ganho no subespaço do conjunto e os resíduos, ambos utilizados em  $t = 0$  h. A medida fornecida por (4.15) ou (4.16), expressa em unidades de energia devido a norma escolhida, indica a contribuição dos incrementos de observação  $\mathbf{v}_0$  para a redução do erro da previsão de 24 h. Posteriormente, essa contribuição pode ser classificada de acordo com um critério de classificação, como por exemplo, o tipo de observação, o tipo de instrumento, assim como também o local de observação.

Quando as observações assimiladas em  $t = 0$  h melhorarem as previsões iniciadas em  $t = 0$  h, válidas para o tempo de verificação  $t$ , com relação as previsões iniciadas em  $t = -6$  h, (4.15) ou (4.16) resultará um valor negativo. Essa melhora dá-se devido ao erro das previsões iniciada em  $t = 0$  h e válida para o tempo de verificação  $t$  apresentar menor magnitude do que o erro das previsões iniciadas em  $t = -6$  h. Caso contrário, se as observações assimiladas em  $t = 0$  h degradarem as previsões iniciadas em  $t = 0$  h, (4.15) ou (4.16) resultará um valor positivo. Um raciocínio análogo ao anterior explica a diferença nos resultados.

Utilizando (4.15) ou (4.16) podemos calcular o impacto de cada subconjunto de observações  $l$ , considerando um somatório do  $l$ -ésimo subconjunto de observações da seguinte forma:

$$I = \sum_{l=1}^L I^l \quad (4.17)$$

onde  $I^l$  representa o impacto observacional causado pelo  $l$ -ésimo subconjunto de observações. Resultando que, para (4.15) ou (4.16), esse somatório pode ser escrito da seguinte forma:

$$I = \sum_{l=1}^L \mathbf{v}_0^l \cdot \tilde{\mathbf{K}}_0^T \mathbf{X}_{t|-6}^{fT} \mathbf{C} \left( \mathbf{e}_{t|-6} + \frac{1}{2} \mathbf{X}_{t|-6}^f \tilde{\mathbf{K}}_0 \mathbf{v}_0^l \right) \quad (4.18)$$

ou

$$I = \sum_{l=1}^L \mathbf{v}_0^l \cdot \tilde{\mathbf{K}}_0^T \mathbf{X}_{t|-6}^{fT} \mathbf{C} (\mathbf{e}_{t|0} + \mathbf{e}_{t|-6}) \quad (4.19)$$

onde  $\mathbf{v}_0^l$  são os resíduos causados pelo  $l$ -ésimo subconjunto de observações. Por meio da utilização de (4.18) ou (4.19), é possível calcular o impacto nas previsões de curto prazo para qualquer subconjunto de observações sem realizar experimentos de dados negados ou adicionados. É importante notar que (4.18) ou (4.19) é considerada um somatório dos impactos causados para subconjuntos de dados, a estimativa contém a covariância de todas as observações assimiladas. Devido a todas as observações terem sido assimiladas simultaneamente, a redução do erro da previsão por um  $l$ -ésimo subconjunto de observações não é independente das outras observações.

## 5 RESULTADOS

Neste capítulo são examinados os impactos dos diversos subsistemas do GOS nas previsões de 24 h do GLETKF para os horários sinóticos 0000, 0600, 1200 e 1800 UTC durante o mês de fevereiro de 2004 em termos de energia. A medida do impacto dá-se em termos de energia devido a norma escolhida tornar possível avaliar os campos de ventos zonal ( $u$ ) e meridional ( $v$ ), temperatura ( $T$ ) e pressão em superfície ( $p_s$ ) combinados em função da energia total (seca) (para maiores detalhes ver Seções 2.2 e 4.2.2).

### 5.1 Estimativa do impacto

Considerando que a estimativa do impacto utilizada nesta pesquisa dá-se por meio de um funcional definido como sendo a diferença quadrática entre as medidas dos erros das previsões de 24 e 30 h, em que esses são representados por  $\epsilon_{t|0}$  e  $\epsilon_{t|-6}$ , é importante verificar como que esses erros estão distribuídos durante o período de estudo desta pesquisa.

#### 5.1.1 Distribuição temporal dos erros

A Figura 5.1 apresenta uma representação da distribuição temporal para os erros das previsões de 24 h (linha contínua cinza), das previsões de 30 h (linha contínua preta), da diferença entre esses dois erros obtidos no espaço do estado (linha pontilhada preta), considerada a verdadeira redução dos erros das previsões, e a respectiva estimativa do impacto das observações nas previsões de 24 h (linha pontilhada cinza) utilizando o GLETKF durante o mês de fevereiro de 2004. Para a confecção dessa representação, os erros das previsões de 24 e 30 h estão condizentes com o funcional definido para a estimativa do impacto das observações apresentado na Seção 4.2.2.

Primeiramente nota-se que os erros das previsões de 24 h durante toda a série temporal apresentam-se menores do que os erros das previsões de 30 h, indicando que, considerando todas as observações do GOS, as mesmas beneficiaram as previsões de 24 h, com uma redução média de  $0,8 \text{ Jkg}^{-1}$ . Os erros das previsões de 24 e 30 h apresentaram valores em torno de  $1,5$  e  $2,2 \text{ Jkg}^{-1}$ , respectivamente. A estimativa do impacto apresentou-se com uma redução média de  $0,3 \text{ Jkg}^{-1}$ . Essa estimativa, quando normalizada com relação aos valores obtidos pela diferença dos erros apresentada anteriormente, indica o quanto foi subestimada a redução dos erros devido as observações assimiladas. Isso pode ser verificado por meio da distribuição temporal apresentada na Figura 5.2. Em média, a estimativa do impacto

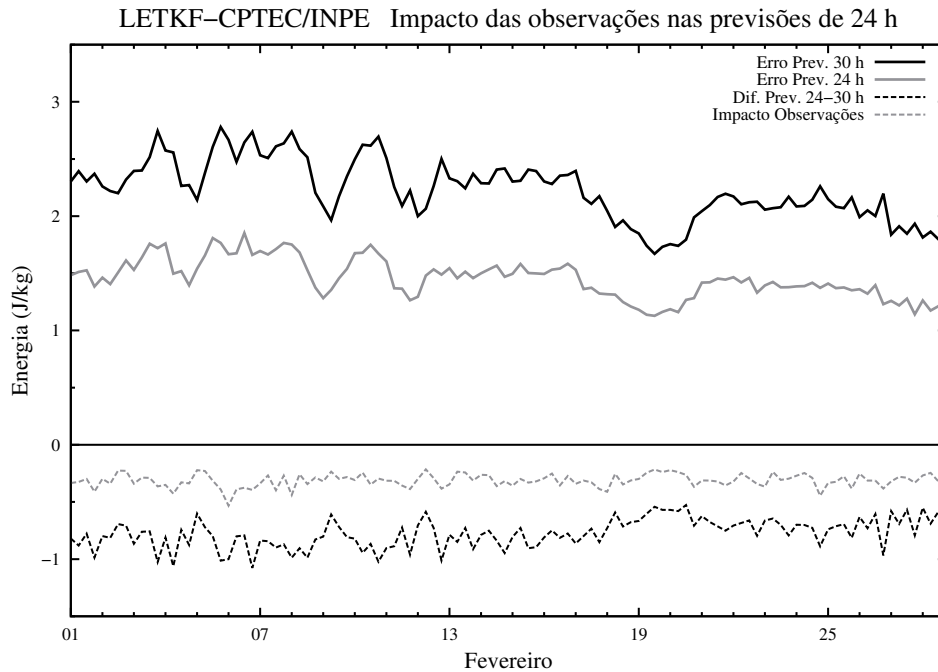


Figura 5.1 - Série temporal dos erros das previsões de 24 horas (linha contínua cinza) e 30 horas (linha contínua preta), do impacto total (linha pontilhada preta) e da correspondente estimativa do impacto das observações nas previsões de 24 horas (linha pontilhada cinza) utilizando o GLETKF para todas as análises durante o mês de fevereiro de 2004. A unidade é  $\text{Jkg}^{-1}$ .

das observações nas previsões de 24 h do GLETKF representou 40 % da redução fornecida pelas observações quando verificadas no espaço do estado, indicando que 60 % do impacto dessas observações foi subestimado. Esses valores indicam a acurácia da estimativa do impacto utilizando a abordagem baseada em conjuntos. É esperado que a estimativa do impacto das observações consiga capturar a redução dos erros quando verificados no espaço do estado, entretanto os resultados aqui apresentados mostram que há uma significativa subestimativa. Essa subestimativa é semelhante à encontrada no estudo de Kunii et al. (2011), que utilizaram a mesma abordagem utilizada nesta pesquisa. Devido ao fato de não ser o foco desta pesquisa, não são investigadas as razões para essa ocorrência. Entretanto possíveis causas são facilmente identificadas por meio de uma análise da formulação da estimativa do impacto. Uma vez que a formulação do impacto relaciona os resíduos  $\mathbf{v}_0$ , dois conjuntos de previsões obtidas para um tempo de verificação e iniciados por meio de análises subsequentes,  $\mathbf{x}_{t|0}^f$  e  $\mathbf{x}_{t|-6}^f$ , uma análise de verificação  $\mathbf{x}_t^a$  e a matriz ganho de Kalman  $\tilde{\mathbf{K}}_0$ , é evidente que a estimativa refletirá a performance do sistema de assimilação. Com isso, caso o sistema esteja utilizando as observações de uma maneira ótima, consequentemente isso será refletido na estimativa do impacto por



meio de análises e previsões mais acuradas. Analogamente ocorre o inverso caso o sistema não esteja utilizando as observações de uma maneira ótima. Portanto, a estimativa do impacto reflete o estado do sistema de assimilação utilizado, e com isso todos os parâmetros envolvidos durante o processo de atualização da análise influenciam no processo de estimativa do impacto das observações.

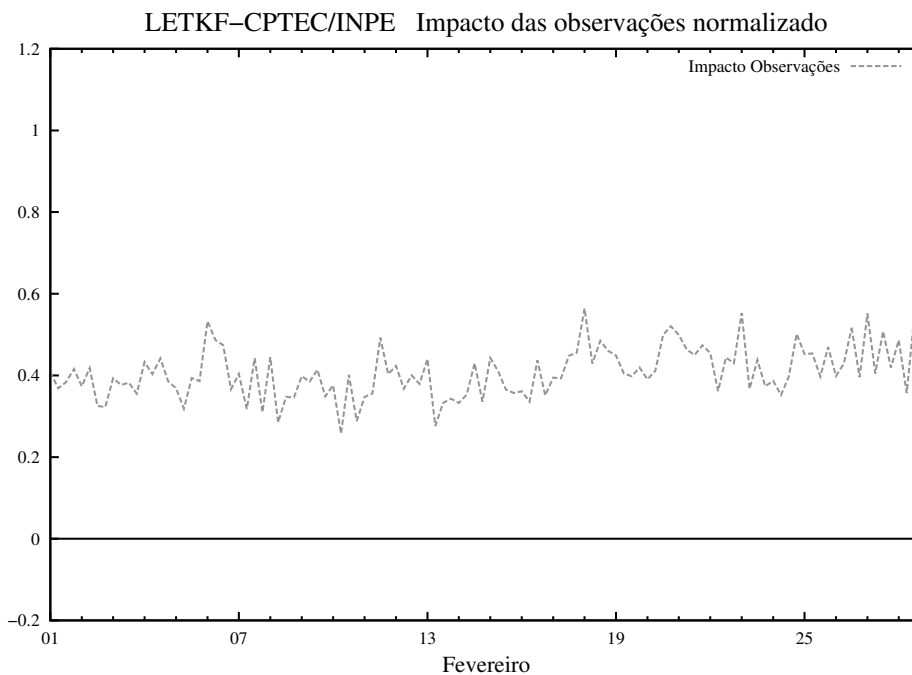


Figura 5.2 - Série temporal da estimativa do impacto das observações nas previsões de 24 h normalizada pela redução dos erros das previsões utilizando o LETKF para todas as análises durante o mês de fevereiro de 2004.

Os valores dos erros das previsões de 24 e 30 h apresentados na Figura 5.1, quando comparados com os valores obtidos em outros estudos que verificaram o impacto das observações nas previsões de curto prazo (*e.g.*, Gelaro et al. (2010)), apresentam-se significativamente menores. Em Gelaro et al. (2010), o quadrado dos erros das previsões de 24 e 30 h apresentaram valores em torno de 9 e 11  $\text{Jkg}^{-1}$ , respectivamente, durante janeiro de 2007 para os três sistemas de assimilação de dados apresentados. Certamente deve-se considerar que foram utilizados sistemas de assimilação diferentes do utilizado nesta pesquisa e também que a técnica para estimar o impacto das observações foi a baseada em modelos adjuntos. Assim como também o período de estudo e o sistema de observação são diferentes dos utilizados nesta pesquisa. Entretanto obter valores de erros significativamente menores não necessariamente indicam que as análises e previsões do sistema utilizado nesta

pesquisa estão representando melhor os estados atmosféricos. Provavelmente está ocorrendo exatamente o contrário devido às análises e previsões apresentarem-se relativamente piores. Com isso os erros das previsões apresentam-se pequenos pois esses são gerados por meio da análise de verificação fornecida pelo próprio sistema.

Ainda não está claro quais os motivos dessa significativa subestimativa. Entretanto existem indícios (não mostrados nesta pesquisa) de que uma das importantes causas para essa ocorrência é o uso não ótimo das observações. Isso necessita de um estudo dedicado para ajustar o sistema de uma maneira ótima ao atualizar a análise, e a partir desse ajuste verificar o impacto das observações no sistema de assimilação, reavaliando a acurácia dessa estimativa e maneiras de melhorar a mesma. Uma maneira de melhorar essa estimativa foi apresentada por Liu e Kalnay (2008), consistindo em utilizar um fator de inflação multiplicativo nos erros das previsões. Uma outra maneira é considerar na verificação do impacto das observações que os incrementos de análise propagados no tempo pelo modelo numérico de previsão têm dependência com relação ao fluxo atmosférico, assumindo que esses movem-se de acordo com a onda dominante<sup>1</sup>. Apesar disso, nesta pesquisa não foi realizada nenhuma melhoria, tanto na atualização das análises como também na estimativa dos impactos. Essa escolha é facilmente justificada uma vez que o objetivo desta pesquisa é avaliar os impactos das observações nas previsões de curto prazo utilizando a versão do GLETKF que está em desenvolvimento pelo Grupo de Desenvolvimento em Assimilação de Dados (GDAD) no CPTEC/INPE. Com isso o GDAD terá uma avaliação do estado do sistema com relação aos impactos das observações para que, futuramente, o mesmo possa realizar melhorias no sistema e compará-las com os resultados aqui apresentados.

As oscilações presentes na série temporal dos erros das previsões de 24 e 30 h e conseqüentemente na diferença entre essas duas medidas, apresentadas na Figura 5.1, são devido a reduzida acurácia das previsões quando inicializadas nos horários sinóticos 0600 e 1800 UTC, que são horários em que há poucas observações *in situ*. O inverso observa-se para as mesmas previsões, porém iniciadas nos horários sinóticos 0000 e 1200 UTC, que são horários em que têm-se previsões iniciadas a partir de análises de baixa qualidade e verificadas com análises de qualidade relativamente melhor, devido a presença de um número maior de observações *in situ*.

---

<sup>1</sup>Comunicação pessoal de Yoichiro Ota, em 24 de agosto de 2011 e 8 de fevereiro de 2012, recebidas por correio eletrônico.

### 5.1.2 Distribuição espacial dos erros

Torna-se importante também verificar como que esses erros estão distribuídos espacialmente em torno do globo. As Figuras 5.3 e 5.4 apresentam representações da distribuição espacial horizontal da média mensal dos erros das previsões de 30 h e 24 h, respectivamente, para o mês de fevereiro de 2004. Para a confecção de ambas as figuras, foram realizadas médias temporais de cada um dos respectivos erros durante o período de estudo desta pesquisa e posteriormente foram realizadas integrações verticais da energia para cada ponto de grade do modelo representado nas figuras. Assim como também, em ambas figuras são apresentadas médias zonais de cada um dos respectivos erros.

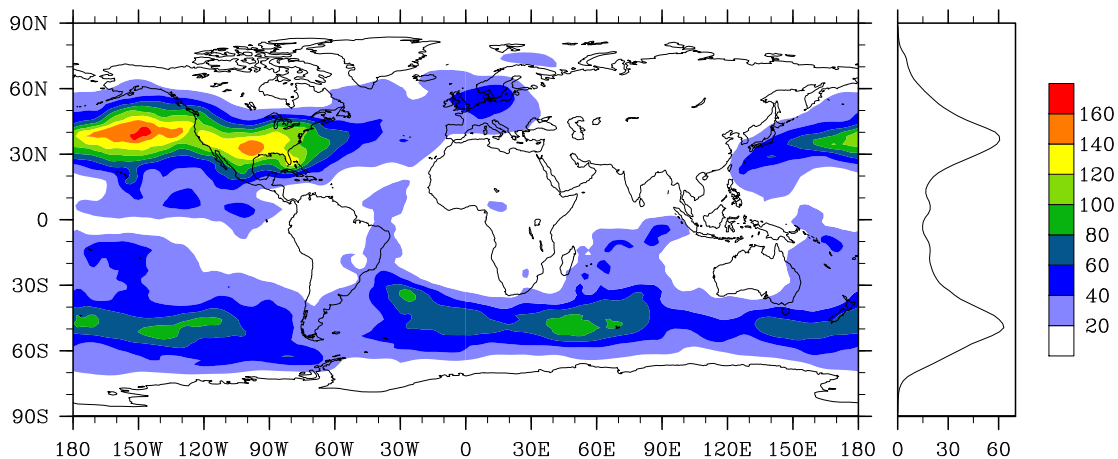


Figura 5.3 - Distribuição espacial horizontal da média mensal dos erros das previsões de 30 h. O fator de escala é  $10^{-5}$  e a unidade é  $\text{Jkg}^{-1}$ .

Primeiramente, nota-se que as áreas com maiores magnitudes de erros estão localizadas nas regiões baroclínicas de ambos os hemisférios (latitudes médias). Um dos motivos para essa ocorrência é devido a componente de energia cinética da norma de energia total (seca)  $\mathbf{C}$  predominar nessas regiões devido às variáveis dessa componente apresentar maiores variações com relação aos campos previstos e os analisados, o que se entende pelo uso dessa técnica como sendo os erros. Nota-se também que os máximos de energia estão localizados sobre o Hemisfério Norte, mais precisamente sobre o centro do Oceano Pacífico Norte, com um máximo secundário sobre a América do Norte. Isso ocorre devido ao experimento ter sido realizado durante o inverno desse hemisfério, com isso as regiões baroclínicas identificadas anteriormente apresentam-se mais intensas durante esse período, posicionadas entre  $20^{\circ}\text{N}$  e  $60^{\circ}\text{N}$ . O mesmo ocorre para o Hemisfério Sul, entretanto apresentando regiões

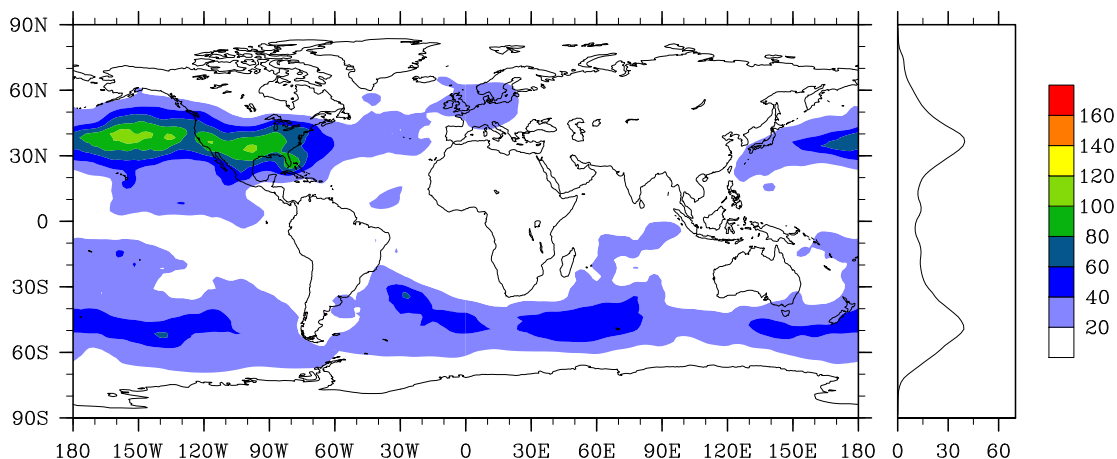


Figura 5.4 - Idem a Figura 5.3, exceto que para as previsões de 24 h.

menos intensas e espalhadas sobre os oceanos, posicionadas entre 30°S e 70°S devido a ser verão nesse hemisfério.

A diferença entre as Figuras 5.3 e 5.4 indica o quanto as observações contribuem para as previsões do sistema GLETKF. Isso pode ser verificado por meio da Figura 5.5, em que para cada ponto de grade foi realizada a diferença entre as previsões de 24 h e 30 h, de acordo com o funcional definido para esta pesquisa. Com isso, valores positivos (graduações de vermelho) apresentados nessa figura indicam regiões que em média, utilizando a métrica definida, as observações assimiladas contribuem para degradar as previsões de 24 h do sistema. Já para valores negativos (graduações de azul) ocorre o contrário, as observações assimiladas contribuem para melhorar as previsões de 24 h do sistema.

Nota-se claramente que, em média, o efeito benéfico das observações na redução dos erros predomina em todo o campo apresentado. É importante ressaltar que, apesar do campo ser apresentado mascarando pequenos valores utilizando a cor branca, há um predomínio de valores negativos em todo o campo apresentado, mesmo para esses pequenos valores. Isso pode ser facilmente observado por meio da média zonal apresentada, em que são apresentados valores negativos, ou iguais a zero, em todas as latitudes. Portanto, as observações assimiladas durante o processo de análise que originou as condições iniciais do MCGA-CPTEC/INPE para gerar as previsões de 24 h beneficiaram as mesmas, reduzindo o erro dessas previsões com relação as previsões de 30 h. Nota-se também que, no Hemisfério Sul a redução dos erros apresenta-se com maior intensidade sobre os oceanos, sugerindo que a redução ocorre devido às observações *in situ* (e.g. bóias e navios) ou então às observações obtidas

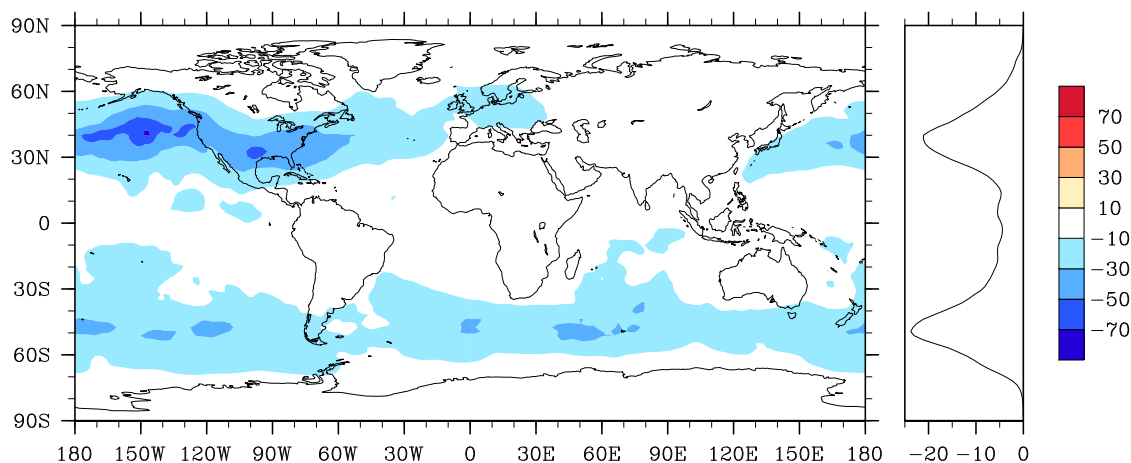


Figura 5.5 - Distribuição espacial horizontal da diferença entre as médias mensais dos erros das previsões de 24 e 30 h. O fator de escala é  $10^{-5}$  e a unidade é  $\text{Jkg}^{-1}$ .

por sensoriamento remoto (*e.g.* as observações de ventos em superfície oceânica e os ventos por satélite).

## 5.2 Impacto do sistema de observação global

O impacto das observações verificado no espaço do estado, apresentado na Figura 5.5, é verificado no espaço das observações por meio da estimativa do impacto. Essa estimativa é apresentada na Figura 5.6 por meio do acúmulo de energia classificado com relação aos grupos de observações apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3 (ver páginas 43 e 44, respectivamente) utilizando o GLETKF durante o mês de fevereiro de 2004 para todos os horários sinóticos que foram realizadas análises nesta pesquisa.

O painel da Figura 5.6 apresenta, para cada grupo de observação avaliado, plotagens em barras: na Figura 5.6(a) da estimativa do impacto por meio do acúmulo de energia; na Figura 5.6(b) da fração de observações benéficas ( $I < 0$  em (4.18) ou (4.19)) referente ao total de observações de cada grupo; na Figura 5.6(c) do total de observações assimiladas; e na Figura 5.6(d) do impacto por observação referente ao total de observações de cada grupo.

Primeiramente, nota-se que por meio da estimativa do impacto para o sistema de observação utilizado pelo sistema GLETKF, apresentado na Figura 5.6(a), de um modo geral todos os grupos apresentam-se com acumulados de energia negativos, indicando que esses grupos de observações apresentaram impacto benéfico às previsões de 24 h do sistema durante o mês de fevereiro de 2004, totalizando  $-35,0095 \text{ Jkg}^{-1}$ . Esse acúmulo dá-se por meio de todos os

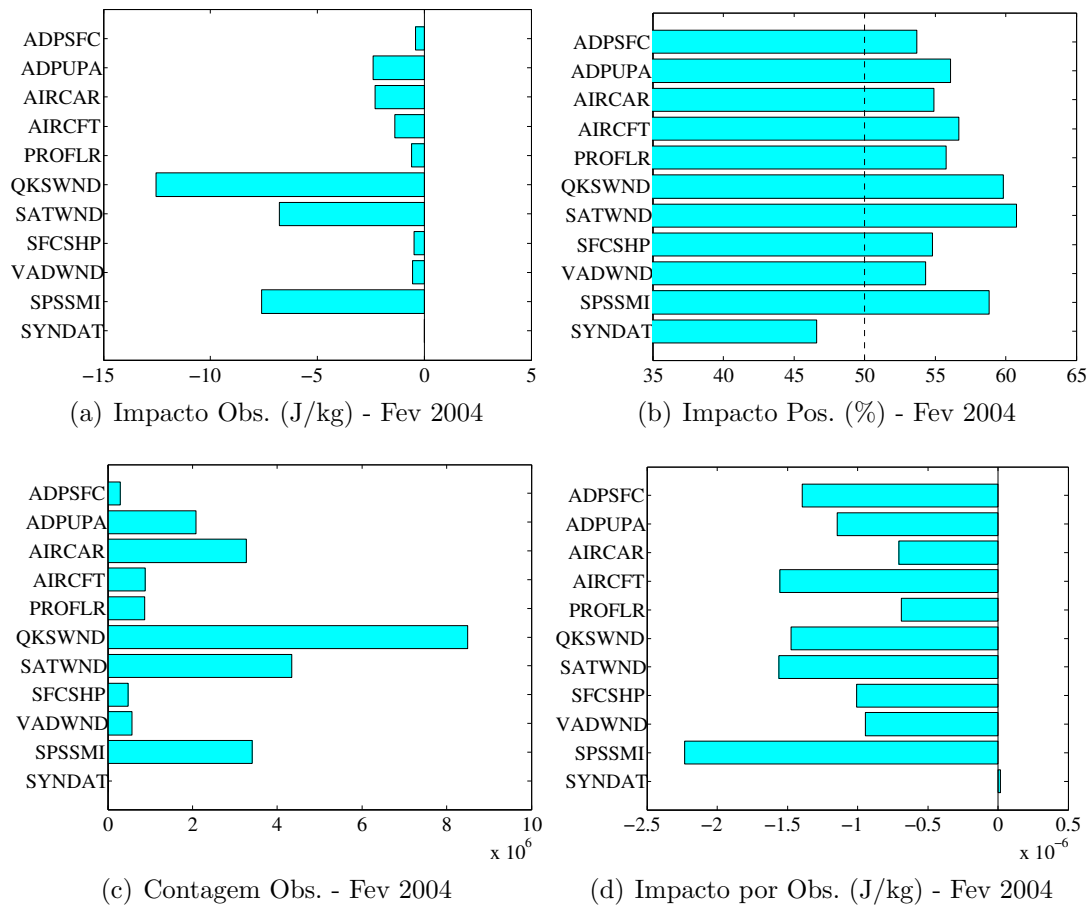


Figura 5.6 - Plotagens em barras para cada grupo de observação avaliado durante o mês de fevereiro de 2004: (a) do impacto das observações nas previsões de 24 h do GLETKF, a unidade é  $\text{Jkg}^{-1}$ ; (b) da fração de observações benéficas, a unidade é %; (c) do total de observações assimiladas, o fator de escala é  $10^6$ ; (d) e do impacto por observação, o fator de escala é  $10^{-6}$  e a unidade é  $\text{Jkg}^{-1}$ .

grupos de observações avaliados. Exceto o grupo das observações SYNDAT, o qual representa as observações sintéticas, que apresentou acumulado de energia positivo, indicando impacto maléfico às previsões de 24 h do sistema. Entretanto tal acumulado pode ser desconsiderado devido a ser muito pequeno, igual a  $2,1396E-06 \text{ Jkg}^{-1}$  ( $-6,1116E-06 \%$ ), fornecido por meio de 118 observações que foram assimiladas no dia 16 de fevereiro de 2004 às 0600 UTC. Certamente os resultados referentes às observações do grupo SYNDAT poderiam ser omitidos nesta seção, entretanto esses resultados são aqui apresentados com o intuito de enfatizar que a técnica de estimativa do impacto utilizada nesta pesquisa estima o impacto de todas as observações assimiladas em um ciclo de assimilação.

As observações com maior impacto benéfico nas previsões de 24 h do GLETKF, durante o mês de fevereiro de 2004, pertencem ao grupo QKSWND. Essas observações apresentaram impacto acumulado igual a  $-12,5362 \text{ Jkg}^{-1}$ , sendo responsável por 35,8 % do impacto total. Acompanhadas pelas observações dos grupos SPSSMI e SATWND, apresentando impactos acumulados durante todo o mês iguais a  $-7,6102$  (21,7 %) e  $-6,7706 \text{ Jkg}^{-1}$  (19,3 %), respectivamente. Totalizando, para esses dois grupos, 41 % do impacto total durante o período. Com isso, tem-se que esses três grupos apresentam aproximadamente 77 % do impacto total das observações nas previsões de 24 h do GLETKF. Isso explica-se devido aos três grupos responsáveis por essa fração serem compostos por observações obtidas por meio de sensoriamento remoto em plataformas a bordo de satélites, e com isso apresentam-se como sendo as mais contínuas no tempo com relação ao sistema de observação assimilado pelo GLETKF. Também nota-se que, das observações classificadas como observações *in situ*, as observações dos grupos ADPUPA e AIRCAR foram as que apresentaram maior acumulado de impacto benéfico para as previsões, com valores iguais a  $-2,3869$  (6,8 %) e  $-2,3052 \text{ Jkg}^{-1}$  (6,6 %), respectivamente.

Com relação a contagem das observações assimiladas durante o mês de fevereiro de 2004 (24.689.487 observações), apresentado na Figura 5.6(c), o grupo QKSWND também apresentou-se tendo a maior quantidade, com 8.495.233 de observações. Seguido novamente pelas observações dos grupos SPSSMI e SATWND, apresentando acumulados de observações durante todo o mês iguais a 3.408.502 e 4.338.342, respectivamente. Fazendo parte do grupo das observações obtidas por sensoriamento remoto, porém com plataformas em superfície, as observações dos grupos VADWND e PROFLR apresentaram acumulados de observações iguais a 573.366 e 872.476, respectivamente. Tais acumulados apresentam-se relativamente pequenos, tendo em vista que esses dois grupos fornecem observações por meio de perfis de vento.

Entretanto isso ocorre devido a maioria das observações desses dois grupos, no sistema de observação do GLETKF, estarem presentes sobre a América do Norte. É importante ressaltar que a maioria das observações do grupo VADWND, nesta pesquisa referem-se as observações de vento obtidas por meio dos radares da rede americana, e a maioria das observações do grupo PROFLR também são observações de vento, porém obtidas por meio de perfiladores e sodares localizados na América do Norte, Europa e Japão. As observações do grupo AIRCAR apresentaram uma quantidade relativamente maior do que as observações do grupo ADPUPA, com valores iguais a 3.265.803 e 2.082.430 observações, respectivamente. Fazendo parte do grupo das observações *in situ*, porém com plataformas em superfície, os grupos ADPSFC e SFCSCHP apresentaram valores iguais a 289.515 e 479.328 observações, respectivamente.

Ao relacionar o acúmulo do impacto de cada grupo classificado com a sua respectiva quantidade de observações, pode-se obter o impacto por observação, que é apresentado na Figura 5.6(d). Esse tipo de avaliação é importante devido a tratar-se de uma avaliação normalizada com relação a quantidade de observações de cada grupo. No caso desta pesquisa, em que há um predomínio de impacto benéfico das observações que apresentam grandes quantidades (*e.g.* SATWND, QKSWND e SPSSMI), esse tipo de avaliação torna-se ainda mais importante.

Apesar de as observações do grupo QKSWND terem apresentado-se como sendo as observações que mais contribuíram para a redução dos erros das previsões de 24 h do GLETKF, essas observações quando avaliadas com relação a quantidade de observações presentes nesse grupo, obtém-se que o impacto por observação é o quarto maior com relação aos outros grupos avaliados, com valor igual a  $-0,1476E-05 \text{ Jkg}^{-1}$  por observação. Isso ocorre devido a grande quantidade de observações presentes nesse grupo, com aproximadamente 34 % de todas observações assimiladas durante o período de estudo. Por meio dessa avaliação, quando aplicada aos outros grupos de observações ocorre o oposto. Um exemplo disso ocorre com o grupo de observações ADPSFC, que apresentam um dos menores acumulados de impacto durante o mês de fevereiro de 2004 ( $-0,4041 \text{ Jkg}^{-1}$ ) e quando avaliado com relação a quantidade de observações presentes no grupo, apresentam impacto comparável ao impacto do grupo QKSWND, com valor igual a  $-0,1396E-05 \text{ Jkg}^{-1}$  por observação. O segundo grupo com maior impacto acumulado, o grupo SPSSMI, quando avaliado com relação a quantidade de observações apresenta-se como sendo o grupo com o maior impacto por observação, com valor igual a  $-0,2233E-05 \text{ Jkg}^{-1}$  por observação. As observações do grupo de observações SFCSCHP, o qual apresentou valor acumulado



de impacto igual a  $-0,4822 \text{ Jkg}^{-1}$ , quando com relação ao total de observações apresentou valor igual a  $-0,1006\text{E}-05 \text{ Jkg}^{-1}$  por observação.

É importante notar que, com exceção do grupo SYNDAT, todos os grupos de observações apresentaram frações benéficas acima de 53 %, atingindo 60,8 % para o grupo SATWND. Essa medida indica que, mesmo os grupos com acumulados de impacto relativamente pequenos, mais da metade dos impactos de cada grupo avaliado são benéficos para o sistema, reduzindo os erros das previsões de 24 h. Sendo uma medida independente da magnitude do impacto de cada grupo avaliado. A Tabela 5.1 sumariza os resultados apresentados nesta seção.

Tabela 5.1 - Impactos das observações durante o mês de fevereiro de 2004 de acordo com os grupos de observações.

Grupo de observações (mnemônico)	Contagem de observações (unidades)	Impacto total ( $\text{Jkg}^{-1}$ )	Fração do impacto total (%)	Impacto benéfico (%)	Impacto por observação ( $\text{E}-05 \text{ Jkg}^{-1}$ )
ADPSFC	289.515	-0,4041	1,1541	53,6894	-0,1396
ADPUPA	2.082.430	-2,3869	6,8179	56,0821	-0,1146
AIRCAR	3.265.803	-2,3052	6,5846	54,9083	-0,0706
AIRCFT	884.374	-1,3728	3,9213	56,6742	-0,1552
PROFLR	872.476	-0,5999	1,7134	55,7872	-0,0688
QKSWND	8.495.233	-12,5362	35,8078	59,8136	-0,1476
SATWND	4.338.342	-6,7706	19,3394	60,7571	-0,1561
1;3R SFC SHP	479.328	-0,4822	1,3773	54,8130	-0,1006
VADWND	573.366	-0,5414	1,5464	54,3150	-0,0944
SPSSMI	3.408.502	-7,6102	21,7376	58,8200	-0,2233
SYNDAT	118	0,0000	-0,0000	46,6102	0,0018
Total	24.689.487	-35,0095	100,0000	58,3272	-1,2689

Nota: os valores de impacto total e fração do impacto total do grupo de observações SYNDAT são iguais a  $2,1396\text{E}-06 \text{ Jkg}^{-1}$  e  $-6,1116\text{E}-06 \%$ , respectivamente.

### 5.2.1 Distribuição horizontal dos impactos

Uma vez verificado a estimativa do impacto das observações globalmente, torna-se importante verificar a distribuição horizontal dessa estimativa durante o período de estudo desta pesquisa. Uma maneira de verificar isso é classificando a estimativa do impacto apresentada na seção anterior de acordo com a sua localização em diferentes regiões do globo. A Figura 5.7 contempla essa importante verificação. Para a confecção dessa figura, a estimativa do impacto apresentada anteriormente

foi classificada de acordo com quatro regiões definidas por faixas de latitudes em torno dos círculos de longitudes, as quais seguem abaixo:

- Global: compreende as latitudes entre  $90^{\circ}\text{S}$  -  $90^{\circ}\text{N}$ ;
- Hemisfério Norte: compreende as latitudes entre  $20^{\circ}\text{N}$  -  $80^{\circ}\text{N}$ ;
- Hemisfério Sul: compreende as latitudes entre  $80^{\circ}\text{S}$  -  $20^{\circ}\text{S}$ ;
- e Tropical: compreende as latitudes entre  $20^{\circ}\text{S}$  -  $20^{\circ}\text{N}$ .

É importante ressaltar que, independente das regiões selecionadas, utiliza-se o conjunto completo de observações. Não foram realizadas diferentes simulações utilizando apenas as observações de cada uma das regiões. Com isso, utiliza-se o mesmo conjunto de observações para a atualização da análise e, conseqüentemente, para a estimativa do impacto dessas observações nas previsões de 24 h do GLETKF, para posteriormente classificar essa estimativa de acordo com as suas regiões. Portanto, por meio dessa escolha, observações localizadas em uma determinada região podem contribuir para a redução dos erros das previsões em regiões diferentes da região onde essas observações estão localizadas (*e.g.*, observações localizadas na região Tropical podem estar contribuindo para reduzir os erros das previsões nas regiões Hemisfério Norte ou Hemisfério Sul).

A Figura 5.7 apresenta um painel com quatro plotagens em barras referentes ao acúmulo de impacto para as regiões Global (Figura 5.7(a)), Hemisfério Norte (Figura 5.7(b)), Hemisfério Sul (Figura 5.7(c)) e Tropical (Figura 5.7(d)).

Primeiramente nota-se que, com poucas exceções, todos os grupos de observações apresentaram acumulados de energia negativos, indicando que esses grupos de observações apresentaram impacto benéfico às previsões de 24 h do GLETKF durante o mês de fevereiro de 2004. Totalizando  $-35,0095$ ,  $-16,3059$ ,  $-5,9907$  e  $-12,6797 \text{ Jkg}^{-1}$  para as regiões Global, Hemisfério Sul, Tropical e Hemisfério Norte, respectivamente. Entretanto alguns grupos de observações apresentaram acumulados de impacto maléficis às previsões em determinadas regiões, como por exemplo as observações dos grupos ADPSFC e SYNDAT, que apresentaram acumulados de impacto iguais a  $0,0026 \text{ Jkg}^{-1}$  e  $2,1396\text{E}-06 \text{ Jkg}^{-1}$ , respectivamente, na região Tropical. Apesar disso, as observações do grupo ADPSFC apresentaram acumulado de impacto benéfico para a região Global ( $-0,4041 \text{ Jkg}^{-1}$ ). Já as observações do grupo SYNDAT, por se tratarem de observações que foram observadas apenas na

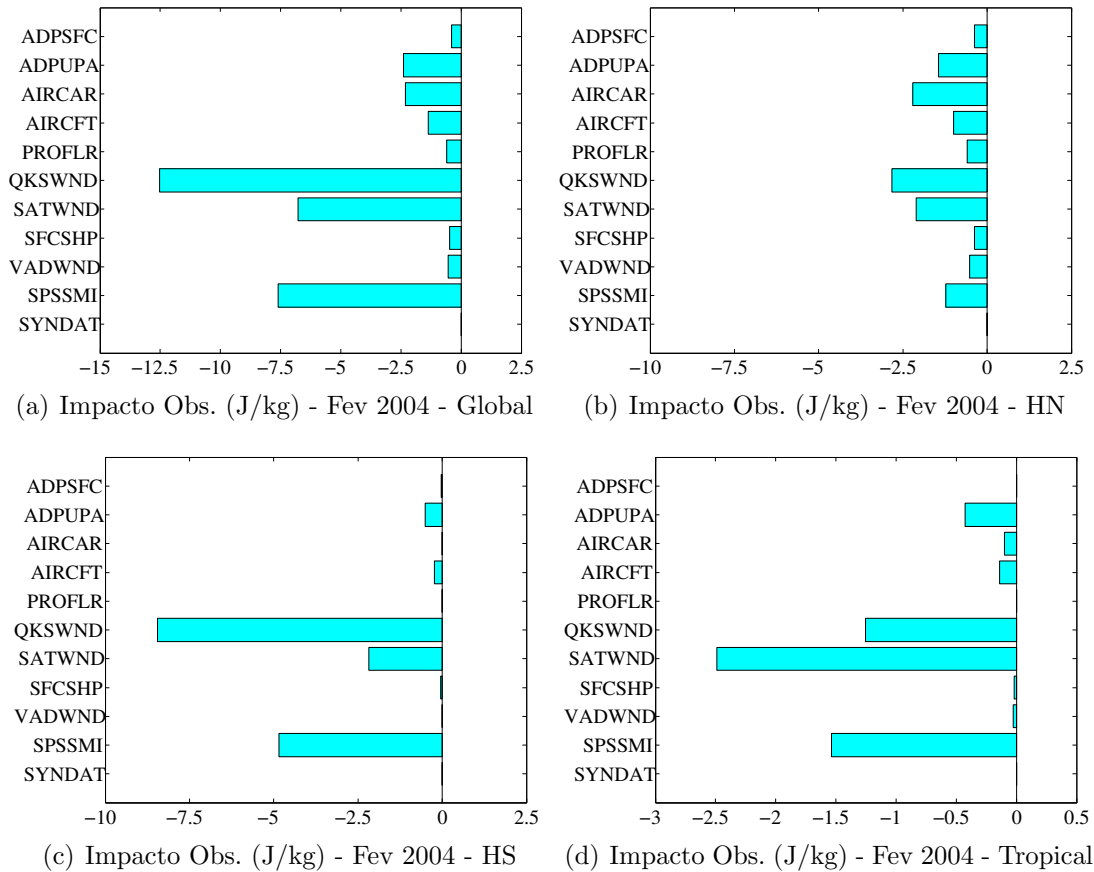


Figura 5.7 - Plotagens em barras do impacto das observações nas previsões de 24 h do GLETKF durante o mês de fevereiro de 2004, para as regiões: (a) Global ( $90^{\circ}S-90^{\circ}N$ ); (b) Hemisfério Norte ( $20^{\circ}N-80^{\circ}N$ ); (c) Hemisfério Sul ( $80^{\circ}S-20^{\circ}S$ ); (d) e Tropical ( $20^{\circ}S-20^{\circ}N$ ). A unidade é  $Jkg^{-1}$ .

região Tropical, apresentaram acumulado de impacto maléfico para a região Global. Houveram grupos de observações que apresentaram acumulados de impacto nulos em determinadas regiões. Isso deve-se à ausência dessas observações nessas regiões, fato ocorrido com as observações dos grupos PROFLR na região Tropical, VADWND na região Hemisfério Sul e SYNDAT nas regiões Hemisfério Norte e Hemisfério Sul.

Nota-se que as contribuições dos diferentes grupos de observações variam significativamente de acordo com a região em que as observações estão localizadas. Entretanto, pode-se perceber facilmente que as observações do grupo QKSWND tem um significativo acúmulo de impacto benéfico para todas as regiões avaliadas. Apresentando os maiores acumulados para as regiões Hemisfério Sul e Hemisfério Norte e o terceiro maior acumulado para a região Tropical, totalizando  $-8,4482$ ,  $-2,8343$  e  $-1,2536 \text{ Jkg}^{-1}$ , respectivamente. As observações que tiveram o maior acúmulo benéfico para a região Tropical foram as observações do grupo SATWND, apresentando um total de  $-2,4911 \text{ Jkg}^{-1}$ . Seguidas pelas observações do grupo SPSSMI, que apresentaram acumulado igual a  $-1,5376 \text{ Jkg}^{-1}$ . Para as regiões Hemisfério Sul e Tropical nota-se um marcante predomínio das observações obtidas por meio de sensoriamento remoto em plataformas a bordo de satélites (*e.g.*, as observações dos grupos QKSWND, SATWND e SPSSMI).

Uma outra importante maneira de verificar a distribuição horizontal da estimativa do impacto dá-se por meio da verificação em torno do globo de cada grupo de observações. As Figuras de 5.8 à 5.18 contemplam essa verificação. Essas figuras mostram os impactos das observações por meio de médias em grade com resolução de  $1,875^\circ \times 1,875^\circ$  integradas verticalmente. Aliado às distribuições dos impactos, essas figuras também mostram a distribuição horizontal da quantidade de observações utilizadas para calcular a média de impacto na grade com a resolução mencionada. Posteriormente, médias zonais foram realizadas e plotadas ao lado direito de cada plotagem horizontal.

Primeiramente, nota-se que a maior parte dos grupos apresentam valores de impacto benéfico com relação às suas distribuições horizontais. Isso é facilmente percebido ao verificar que a maioria das plotagens superiores em cada figura apresentam valores negativos (coloração azul). Certamente essa ocorrência limita-se a escala apresentada em cada figura, entretanto verifica-se que qualitativamente os impactos das observações que serão apresentados a seguir estão de acordo com os resultados anteriormente apresentados.

A Figura 5.8 mostra o impacto das observações do grupo ADPSFC, o qual representa as observações *in situ* obtidas em superfícies continentais. Ao analisar a plotagem referente ao impacto (plotagem superior), verifica-se que a maioria dessas observações apresentam médias de impactos entre  $-2E-05$  e  $2E-05$   $Jkg^{-1}$ . Sendo que a região que apresenta uma cobertura mais abrangente de médias de impactos benéficos está localizada na região compreendida entre as longitudes  $0^\circ$  e  $30^\circ E$  e as latitudes  $30^\circ N$  e  $60^\circ N$ , sobre a Europa, que é aonde essas observações apresentam-se em maior quantidade. Isso pode ser verificado por meio da plotagem referente à quantidade de observações (plotagem inferior), a qual apresenta regiões com pontos máximos de  $3,5E+03$  observações. Verifica-se também um segundo máximo, porém com menor magnitude, na região compreendida entre as longitudes  $130^\circ E$  e  $140^\circ E$  e as latitudes  $30^\circ N$  e  $50^\circ N$ , sobre o Japão. Isso amplifica as médias zonais para essas regiões, com valores próximos à  $0,25E+03$  observações entre  $30^\circ N$  e  $60^\circ N$ . Apesar disso, por meio da média zonal do impacto observa-se que a região com maior impacto benéfico não ocorre em nenhuma dessas regiões. Essa ocorrência dá-se na região em torno de  $60^\circ S$  com valor próximo à  $-4E-05$   $Jkg^{-1}$  e grande parte dessa contribuição é fornecida pelas observações localizadas entre as longitudes  $80^\circ W$  e  $50^\circ W$ , na Antártica. No entanto, observações localizadas entre as latitudes  $40^\circ S$  e  $30^\circ S$  e as duas faixas de longitudes compreendidas entre as longitudes  $80^\circ W$  e  $50^\circ W$ , no Sul da América, e  $150^\circ E$  e  $180^\circ$ , na Oceania, tornam essa média zonal positiva, indicando que as observações nessas regiões degradaram as previsões de 24 h do GLETKF.

A Figura 5.9 mostra o impacto das observações do grupo SFCSHP, o qual representa as observações *in situ* obtidas em superfícies oceânicas. Ao analisar a plotagem referente ao impacto (plotagem superior), verifica-se que a maioria dessas observações apresentam médias de impactos entre  $-10E-05$  e  $10E-05$   $Jkg^{-1}$ . Verifica-se sobre o Sul do Oceano Pacífico regiões de máximo de impacto acentuados, atingindo valores iguais a  $-30E-05$   $Jkg^{-1}$ , próximos a  $140^\circ W$  e  $60^\circ S$ . Ao analisar a plotagem referente à quantidade de observações (plotagem inferior) observa-se que essas observações ocorrem mais frequentemente em torno da costa dos Estados Unidos da América. Atingindo máximos de até  $8E+03$  observações em torno da costa e máximos zonais maiores do que  $0,35E+03$  entre  $30^\circ N$  e  $80^\circ N$ .

A Figura 5.10 mostra o impacto das observações do grupo ADPUPA, o qual representa as observações *in situ* obtidas por meio de radiossondas, dropsondas e balões piloto. Ao analisar a plotagem referente ao impacto (plotagem superior), verifica-se que a maioria dessas observações apresentam impactos entre

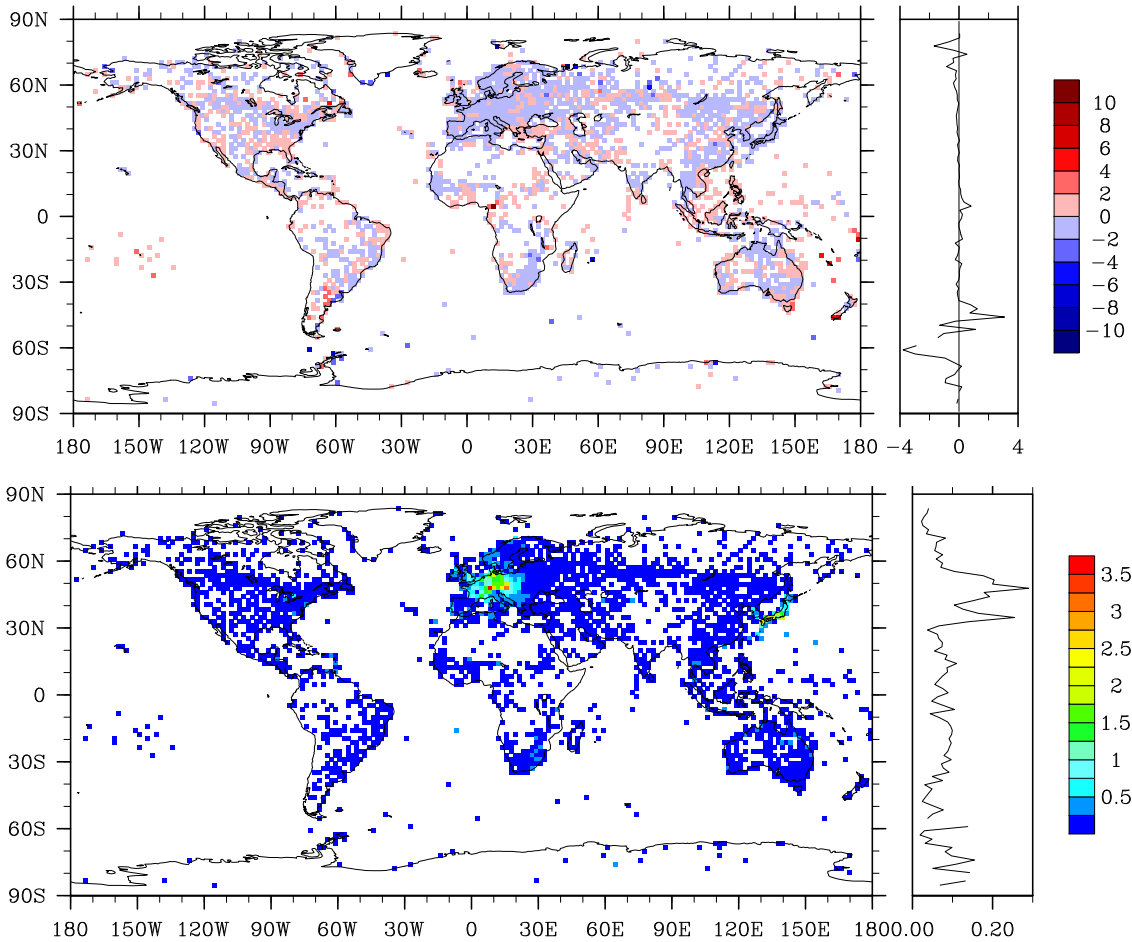


Figura 5.8 - Distribuição espacial da estimativa do impacto das observações (figura superior) e da contagem de observações (figura inferior) do grupo ADPSFC, o qual representa as observações *in situ* obtidas em superfície continental, durante o mês de fevereiro de 2004. Ambas figuras apresentam a média zonal (lado direito) referente a respectiva distribuição espacial. Os resultados referentes aos impactos representam valores médios, integrados verticalmente em grade de  $1,875^\circ \times 1,875^\circ$  e utilizando a contagem apresentada. Para o impacto o fator de escala é  $10^{-5}$  e a unidade é  $\text{Jkg}^{-1}$ . Já para a contagem o fator de escala é  $10^3$ .

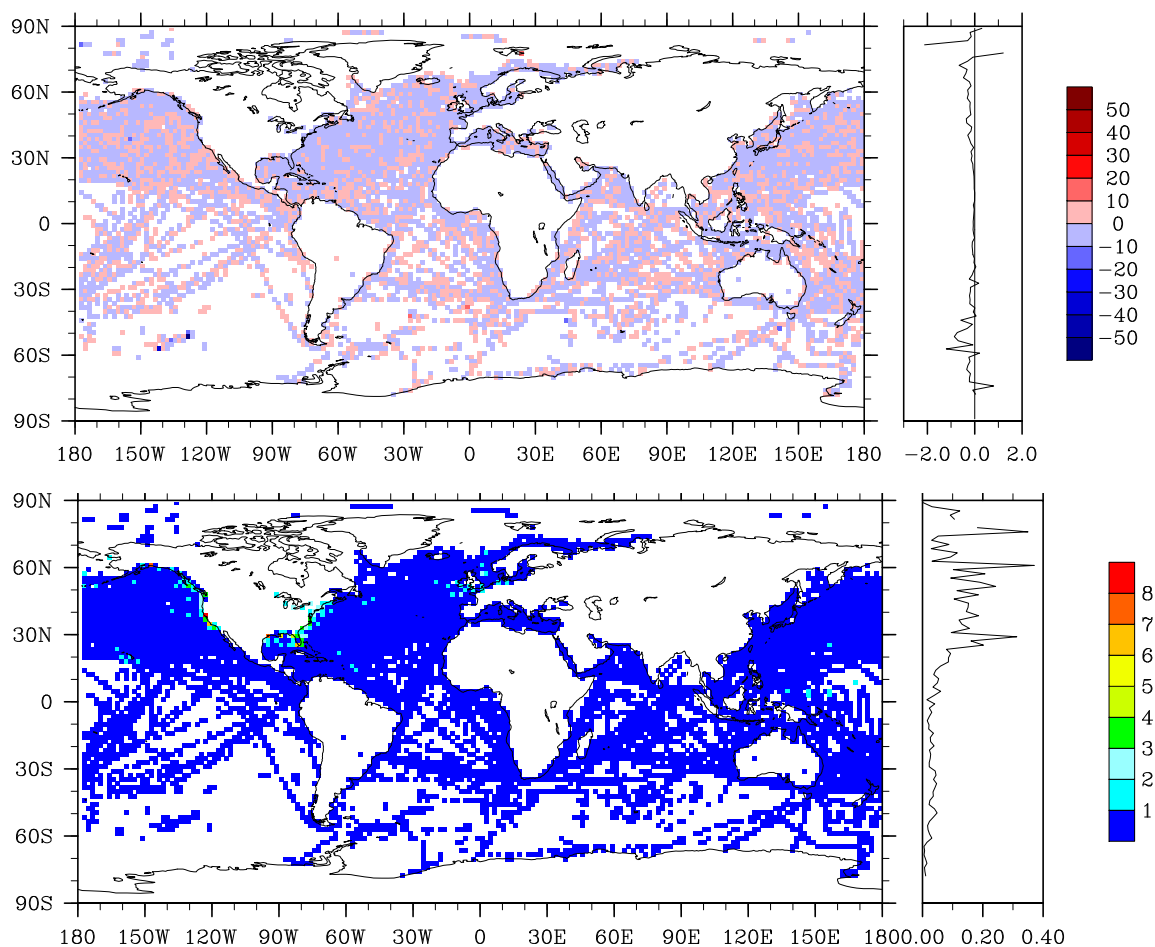


Figura 5.9 - Idem a Figura 5.8, exceto que para as observações do grupo SFCSHP, o qual representa o grupo das observações *in situ* em superfície oceânica.

$-2E-05$  e  $2E-05$   $Jkg^{-1}$ . Sendo que as regiões continentais são as que apresentam uma densidade maior de observações com médias de impactos benéficos. Nota-se na região compreendida entre as longitudes  $180^\circ$  e  $120^\circ W$  e as latitudes  $20^\circ N$  e  $60^\circ N$  alguns pontos de máximo tanto maléficis como benéficos para as previsões. No entanto, quando verifica-se a quantidade de observações nessa região (plotagem inferior), observa-se que há poucas observações compondo essas médias. Isso ocorre devido às observações localizadas nessa região serem provenientes de dropsondas lançadas durante os voos de reconhecimento de tempestades sobre o Oceano Pacífico Norte. Observa-se também algumas dessas observações sobre o oceano Atlântico Norte. A média zonal relativa ao impacto apresenta um perfil quase que totalmente benéfico para as previsões, com alguns pequenos pontos de média zonal positivos, indicando malefício às previsões, com exceção de uma região em torno de  $60^\circ S$ , o qual apresenta uma média zonal acentuada de impactos maléficis, com valor

igual a  $0,75E-05 \text{ Jkg}^{-1}$ . No entanto esse valor é fornecido por poucas observações espalhadas ao longo desse círculo de longitude. A média zonal relativa à quantidade de observações (plotagem inferior) apresenta um perfil que indica uma média de observações maior para o Hemisfério Sul do que para o Hemisfério Norte. Apesar disso, nota-se claramente que essas observações predominam espalhadas sobre o Hemisfério Norte.

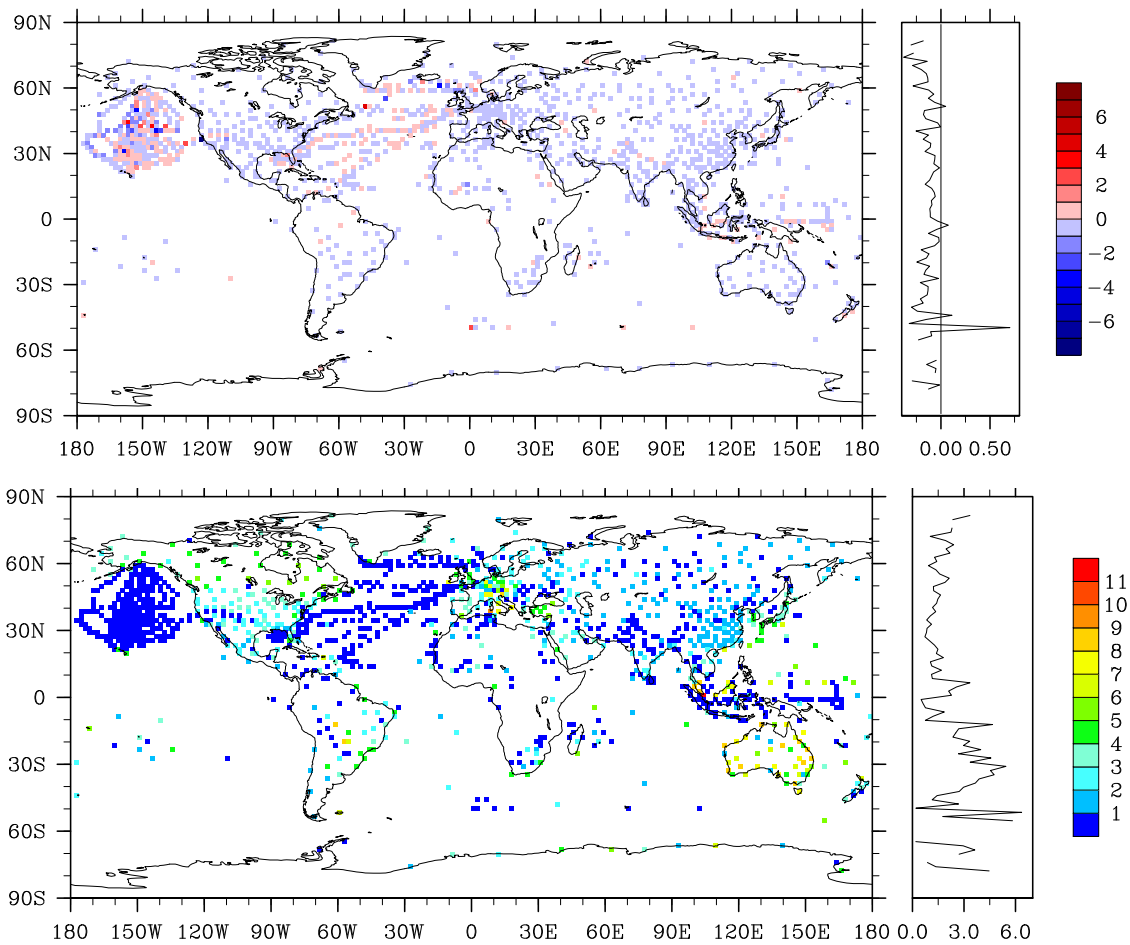


Figura 5.10 - Idem a Figura 5.8, exceto que para as observações do grupo ADPUPA, o qual representa o grupo das observações *in situ* obtidas por meio de radiossondas, dropsondas e balões piloto.

A Figura 5.11 apresenta o impacto das observações do grupo AIRCFT, o qual representa as observações *in situ* obtidas por meio de aviões e enviadas diretamente para o solo. Ao analisar a plotagem referente ao impacto (plotagem superior), verifica-se que a maioria dessas observações apresentam impactos entre  $-2,5E-05$  e  $2,5E-05 \text{ Jkg}^{-1}$ . Nota-se que entre as longitudes  $10^{\circ}\text{W}$  e  $10^{\circ}\text{E}$  e as



latitudes 40°N e 50°N é a região onde encontra-se os máximos de ocorrência dessas observações, atingindo até valores médios iguais a 60E+03 observações (plotagem inferior). A média zonal relativa à quantidade de observações apresenta um perfil em que observa-se claramente que há um predomínio dessas observações sobre o Hemisfério Norte, com a região entre 40°N e 70°N atingindo valor igual a 0,8+03 observações. Embora menor do que no Hemisfério Norte, a média zonal para o Hemisfério Sul apresenta-se acentuada entre as latitudes 30°S e 40°S.

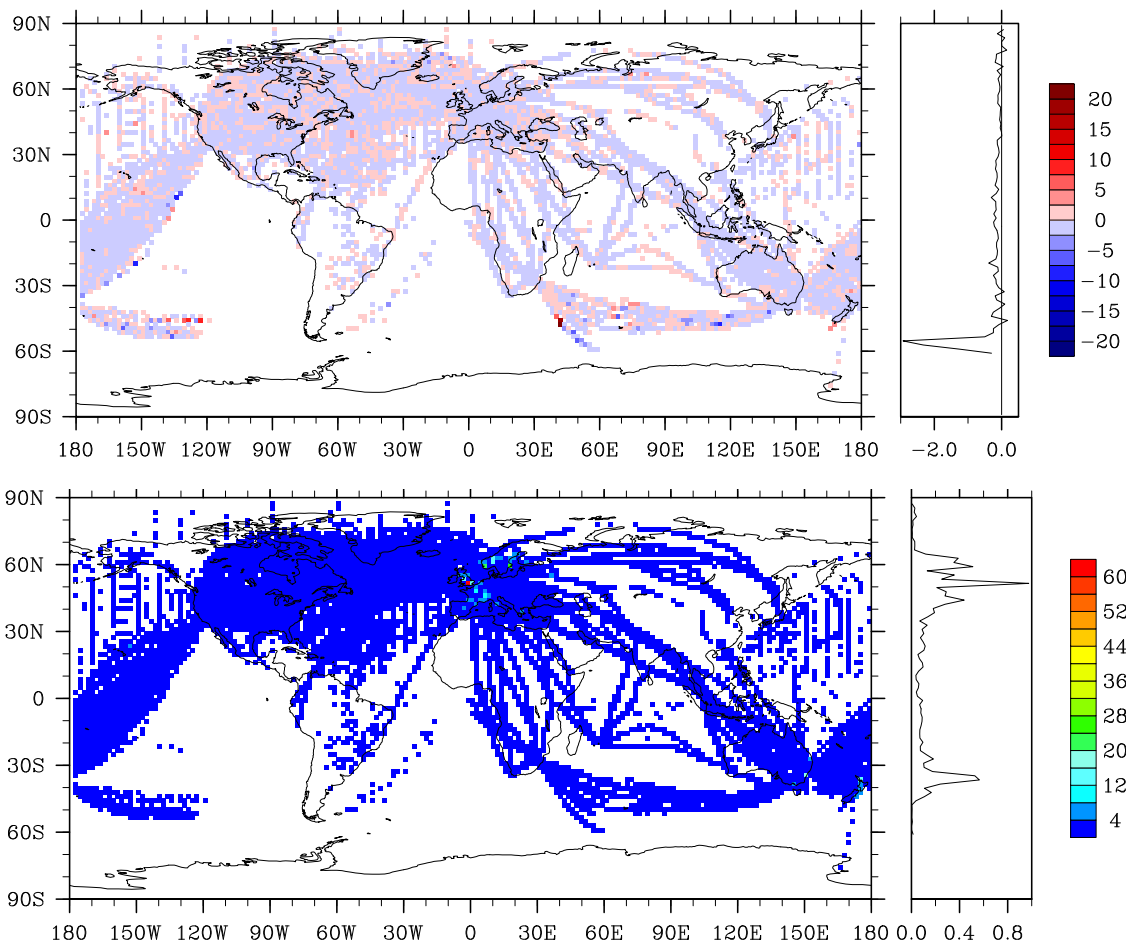


Figura 5.11 - Idem a Figura 5.8, exceto que para as observações do grupo Aircft, o qual representa o grupo das observações *in situ* obtidas por meio de aviões e enviadas diretamente para o solo.

A Figura 5.12 apresenta o impacto das observações do grupo Aircar, o qual representa as observações *in situ* obtidas por meio de aviões, enviadas para satélites geostacionários e posteriormente enviadas para o solo. Ao analisar a plotagem referente ao impacto (plotagem superior), verifica-se que a maioria dessas

observações apresentam impactos entre  $-2E-05$  e  $2E-05$   $Jkg^{-1}$ . Sendo que a região continental compreendida entre as longitudes  $120^{\circ}W$  e  $70^{\circ}W$  e as latitudes  $20^{\circ}N$  e  $50^{\circ}N$ , ao Norte da América, é a que apresenta uma densidade maior de observações com médias de impactos benéficos. Essa região também apresenta as maiores densidades de observações, atingindo valores de  $160E+03$  observações (plotagem inferior). Nota-se que ao longo das rotas de aviões intercontinentais ocorrem a maior parte dos máximos de impactos benéficos e maléficos. A média zonal relativa à quantidade de observações (plotagem inferior) apresenta um perfil em que observa-se claramente que há um predomínio dessas observações sobre o Hemisfério Norte, com a região entre  $30^{\circ}N$  e  $40^{\circ}N$  atingindo valor igual a  $6E+03$  observações. A média zonal para o Hemisfério Sul apresenta-se praticamente nula devido à ausência de observações nessa região, com poucos voos sobre o Sul da América e Oceania.

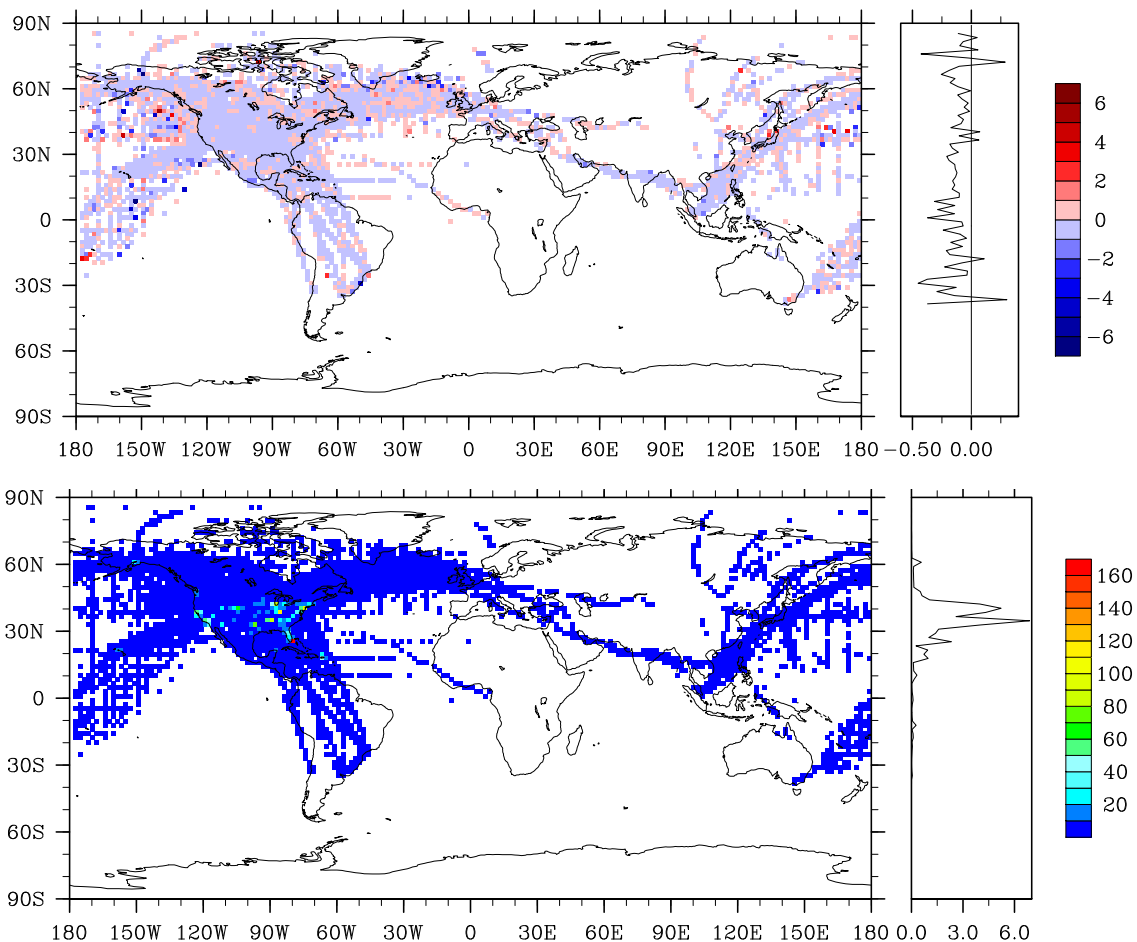


Figura 5.12 - Idem a Figura 5.8, exceto que para as observações do grupo AIRCAR, o qual representa o grupo das observações *in situ* obtidas por meio de aviões, enviadas para satélites geostacionários e posteriormente enviadas para o solo.

A Figura 5.13 apresenta o impacto das observações do grupo PROFLR, o qual representa as observações obtidas por meio de sensoriamento remoto utilizando perfiladores de vento. Ao analisar a plotagem referente ao impacto (plotagem superior), verifica-se que a maioria dessas observações apresentam impactos entre  $-0,1E-05$  e  $0,1E-05$   $Jkg^{-1}$ , sendo a maioria benéficos. Atingindo valores de até  $-0,3E-05$   $Jkg^{-1}$ . Com relação plotagem referente a contagem de observações (plotagem inferior) é possível observar que praticamente todas as observações desse grupo estão localizadas sobre a região central dos Estados Unidos da América, atingindo valores iguais a  $52E+03$  observações.

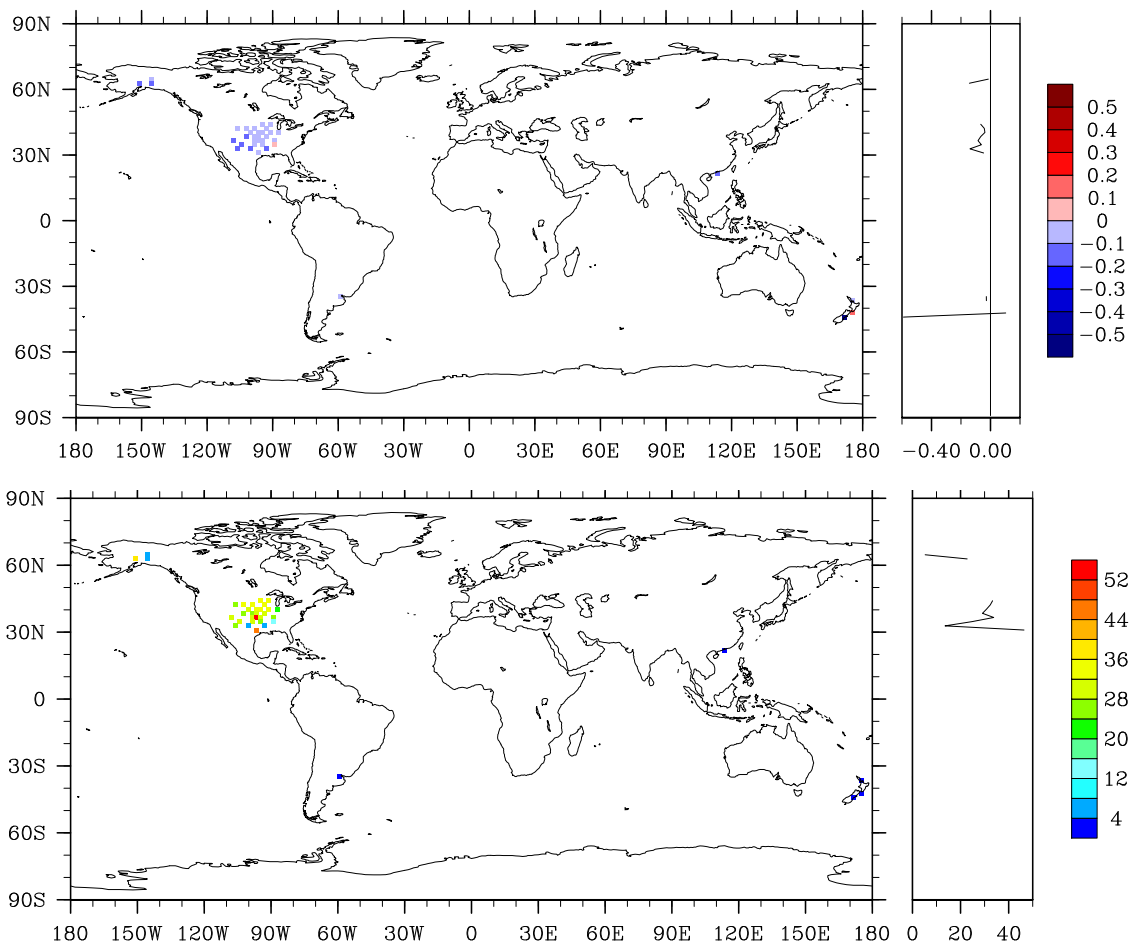


Figura 5.13 - Idem a Figura 5.8, exceto que para as observações do grupo PROFLR, o qual representa o grupo das observações obtidas por meio de sensoriamento remoto utilizando perfiladores de vento.

A Figura 5.14 apresenta o impacto das observações do grupo VADWND, o qual representa as observações obtidas por meio de sensoriamento remoto

utilizando radares. Ao analisar a plotagem referente ao impacto (plotagem superior), verifica-se que a maioria dessas observações apresentam impactos entre  $-0,16E-05$  e  $0,16E-05 \text{ Jkg}^{-1}$ , sendo que a maior parte dessas observações apresentam impactos benéficos. Com relação plotagem referente a contagem de observações (plotagem inferior) é possível observar que praticamente todas as observações desse grupo estão localizadas sobre os Estados Unidos da América, atingindo valores iguais a  $11E+03$  observações.

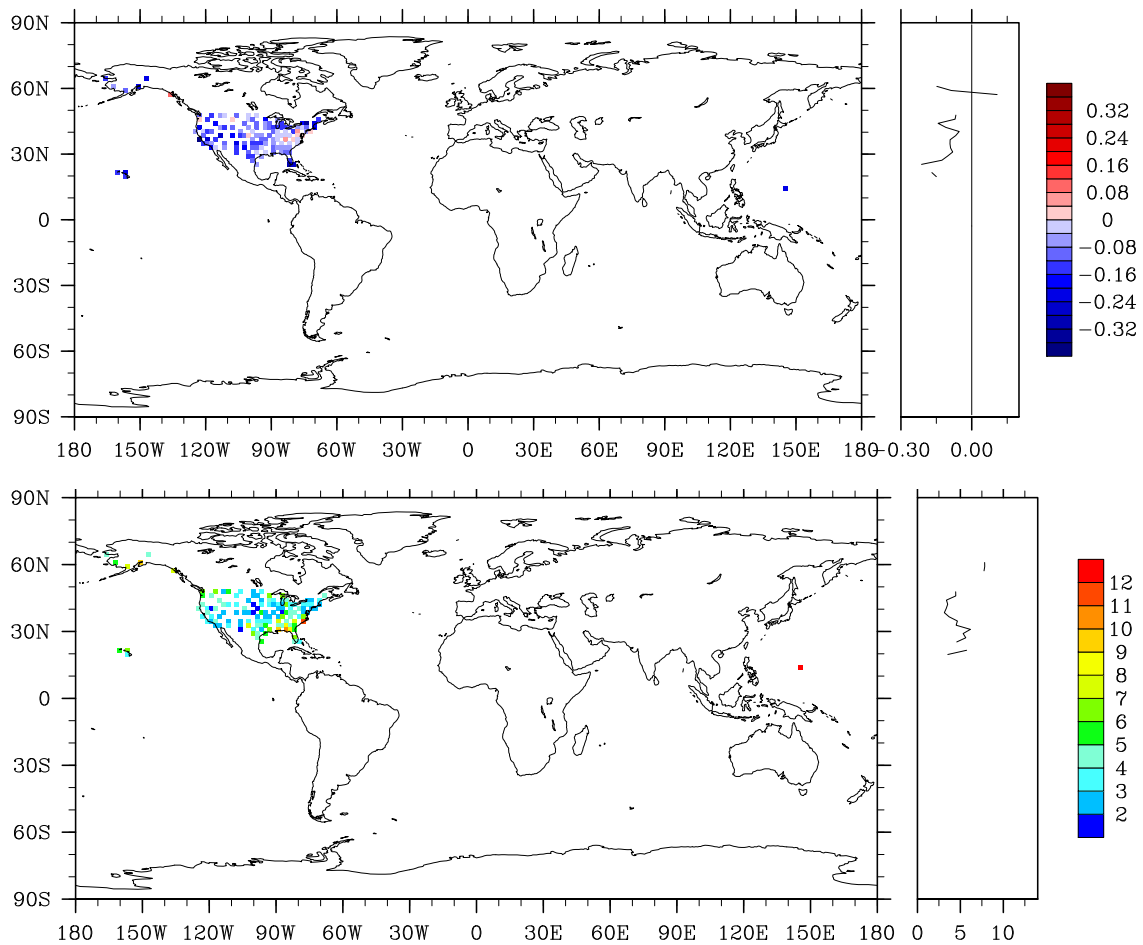


Figura 5.14 - Idem a Figura 5.8, exceto que para as observações do grupo VADWND, o qual representa o grupo das observações obtidas por meio de sensoriamento remoto utilizando radares.

A Figura 5.15 mostra uma representação da distribuição espacial da estimativa do impacto das observações (figura superior) nas previsões de 24 h do GLETKF e da contagem de observações (figura inferior) do grupo SATWND, o qual representa as observações obtidas por meio de sensoriamento remoto utilizando satélites.

Ao analisar a plotagem referente ao impacto, verifica-se que a maioria dessas observações apresentam impactos entre  $-2\text{E}-05$  e  $2\text{E}-05$   $\text{Jkg}^{-1}$ . Ao analisar a plotagem referente à quantidade de observações, verifica-se que essas observações apresentam grande cobertura espacial, atingindo valores maiores que  $2,6\text{E}+03$  em algumas regiões. Observa-se que há um predomínio dessas observações sobre a região dos satélites GOES, compreendida entre as longitudes  $180$  e  $30^\circ\text{W}$ . O motivo para essa ocorrência é devido ao critério de seleção desse tipo de observações. Nessa mesma região nota-se que o impacto apresenta a maior densidade de impactos benéficos. Na região dos satélites METEOSAT, compreendida entre as longitudes  $30^\circ\text{W}$  e  $110^\circ\text{E}$ , observa-se que para as latitudes maiores do que  $50^\circ$  há máximos de impactos maléficos, que é facilmente percebida também pela média zonal. Isso ocorre principalmente no Hemisfério Sul, e alguns centros de previsão numérica de tempo adotam como estratégia para a escolha desse tipo de observação a negação das observações nessas regiões (*e.g.*, NRL). A média zonal apresentada para a contagem de observações tem valores que atingem  $0,60\text{E}+03$ . Sendo que esses máximos encontram-se próximos a  $0^\circ$  devido aos ventos terem sido obtidos por meio de satélites geostacionários.

A Figura 5.16 mostra uma representação da distribuição espacial da estimativa do impacto das observações (figura superior) nas previsões de 24 h do GLETKF e da contagem de observações (figura inferior) do grupo QKSWND, o qual representa as observações obtidas por meio de sensoriamento remoto utilizando o satélite QuikSCAT, durante o mês de fevereiro de 2004. Ao analisar a plotagem referente ao impacto, verifica-se que a maioria dessas observações apresentam impactos entre  $-2,5\text{E}-05$  e  $2,5\text{E}-05$   $\text{Jkg}^{-1}$ . Ao analisar a plotagem referente à quantidade de observações, verifica-se que essas observações apresentam grande cobertura espacial, atingindo valores maiores que  $1,6\text{E}+03$  em algumas regiões. A média zonal apresentada para essa plotagem tem valores maiores que  $0,5\text{E}+03$  observações para praticamente todas as latitudes, com exceção das latitudes maiores do que  $70^\circ$ . Sendo que essa média zonal apresenta-se com acentuadas oscilações a cada  $5^\circ$  que ocorrem devido ao campo mostrado também apresentar essas oscilações distribuídas zonalmente e meridionalmente. Isso ocorre por causa da sobreposição de diversas varreduras realizadas pelo QuikSCAT durante o período de estudo. Nota-se que há uma predominância dessas observações no Hemisfério Sul devido à esse hemisfério apresentar uma cobertura maior de regiões oceânicas.

A Figura 5.17 mostra uma representação da distribuição espacial da estimativa do impacto das observações (figura superior) nas previsões de 24 h do GLETKF e

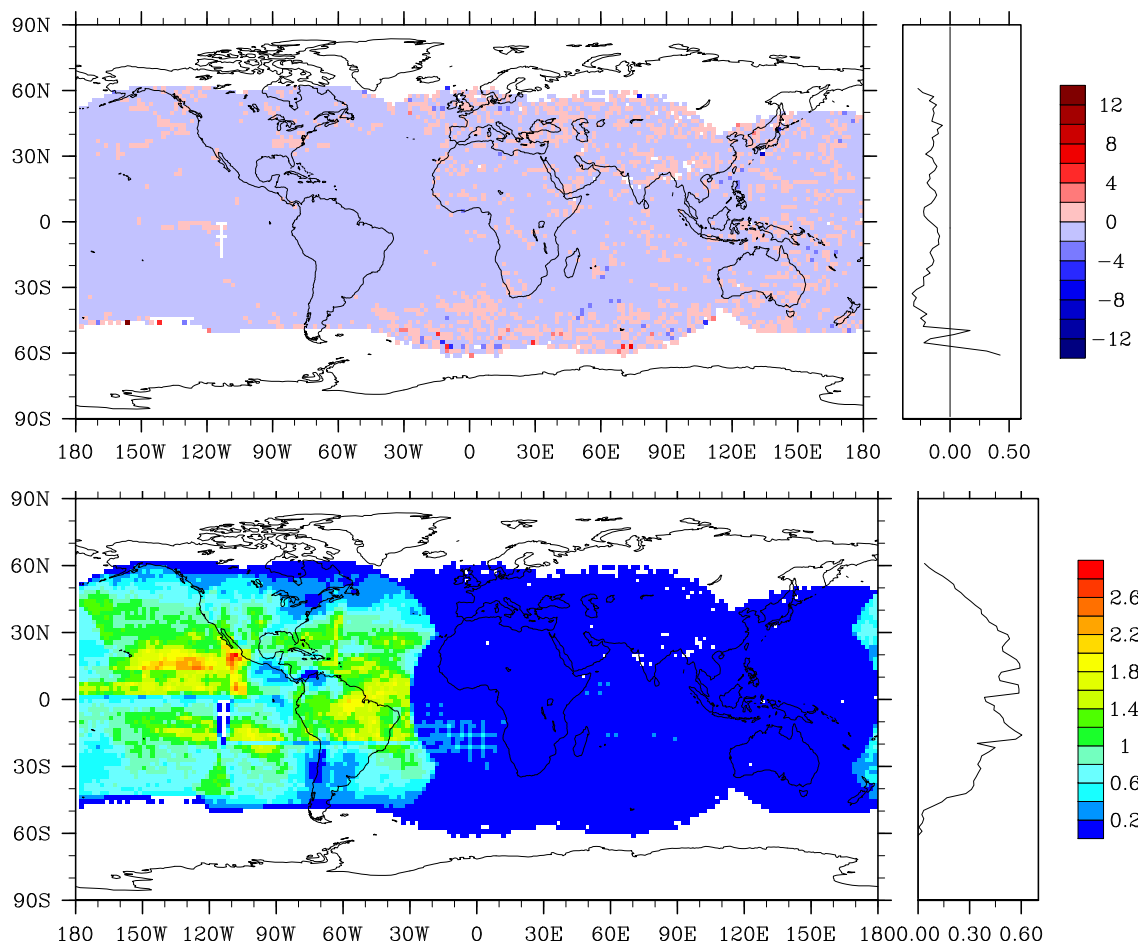


Figura 5.15 - Idem a Figura 5.8, exceto que para as observações do grupo SATWND, o qual representa o grupo das observações obtidas por meio de sensoriamento remoto utilizando satélites.

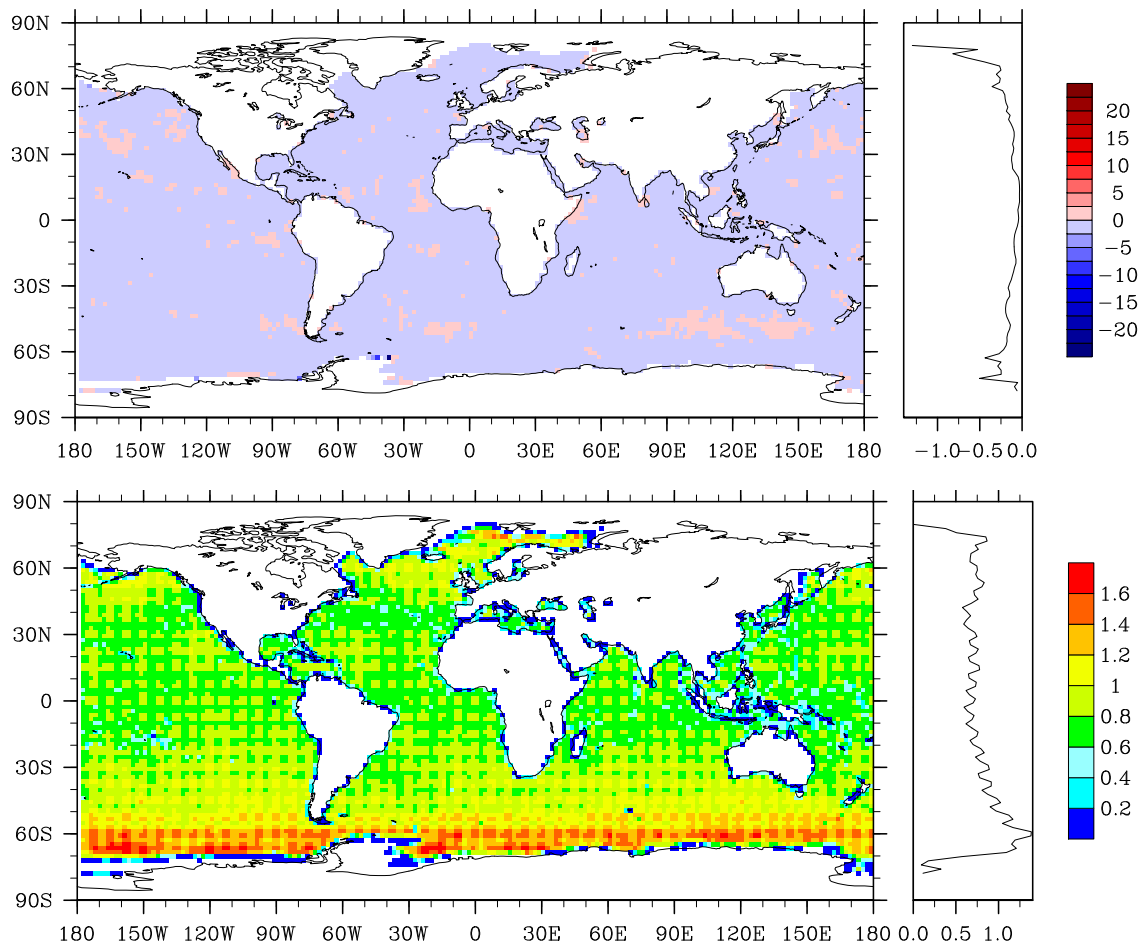


Figura 5.16 - Idem a Figura 5.8, exceto que para as observações do grupo QKSWND, o qual representa o grupo das observações obtidas por meio de sensoriamento remoto utilizando o satélite QuikSCAT.

da contagem de observações (figura inferior) do grupo SPSSMI, o qual representa as observações obtidas por meio de sensoriamento remoto utilizando o sensor SSM/I, durante o mês de fevereiro de 2004. Ao analisar a plotagem referente ao impacto, verifica-se que a maioria dessas observações apresentam impactos entre  $-1\text{E}-05$  e  $1\text{E}-05$   $\text{Jkg}^{-1}$ . Ao analisar a plotagem referente à quantidade de observações, verifica-se que essas observações apresentam grande cobertura espacial, atingindo valores maiores que  $0,6\text{E}+03$  em algumas regiões. A média zonal apresentada para essa plotagem tem valores maiores que  $0,2\text{E}+03$  observações para praticamente todas as latitudes, com exceção das latitudes maiores do que  $70^\circ$ , as quais limitam a ocorrência desse tipo de observação. Sendo que essa média zonal apresenta-se com acentuadas oscilações a cada  $10^\circ$  que ocorrem devido ao campo mostrado também apresentar essas oscilações distribuídas zonalmente e meridionalmente. O motivo para essa ocorrência é a sobreposição de diversas varreduras realizadas pelos satélites do DMSP durante o período de estudo. Nota-se que há uma predominância dessas observações no Hemisfério Sul devido à esse hemisfério apresentar uma cobertura maior de regiões oceânicas.

A Figura 5.18 mostra uma representação da distribuição espacial da estimativa do impacto das observações (figura superior) nas previsões de 24 h do GLETKF e da contagem de observações (figura inferior) do grupo SYNDAT, o qual representa as observações sintéticas, durante o mês de fevereiro de 2004. Ao analisar ambas as plotagens, primeiramente nota-se que essas observações encontram-se localizadas próximas a latitude  $10^\circ\text{N}$  e entre as longitudes  $130^\circ\text{E}$  e  $140^\circ\text{E}$ . Isso ocorre devido à essas observações terem sido utilizadas apenas no dia 16 de fevereiro de 2004 às 06 UTC. Verifica-se que menos de  $0,002\text{E}+03$  dessas observações forneceram a maior parte do impacto maléfico.

As Tabelas de 5.2 à 5.5 resumizam os resultados apresentados nesta seção.



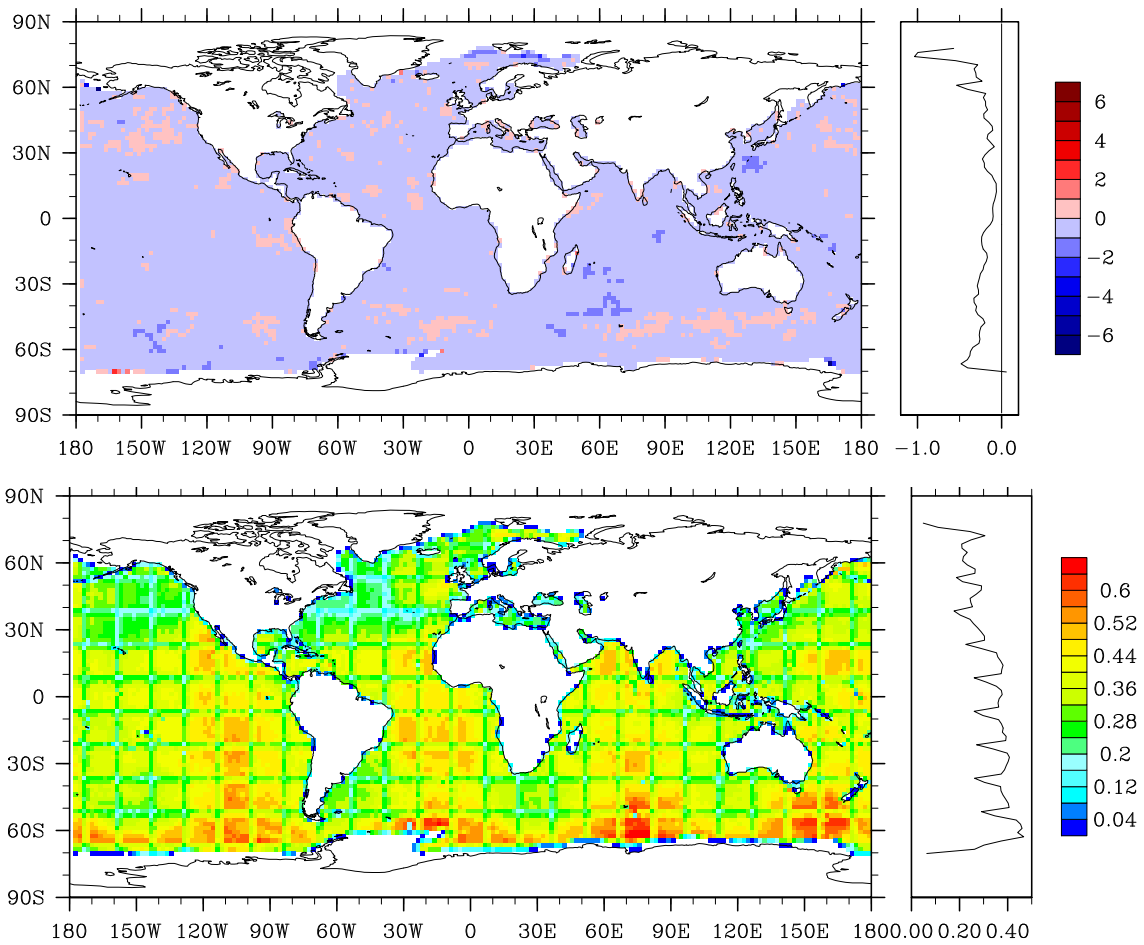


Figura 5.17 - Idem a Figura 5.8, exceto que para as observações do grupo SPSSMI, o qual representa o grupo das observações obtidas por meio de sensoriamento remoto utilizando o sensor SSM/I.

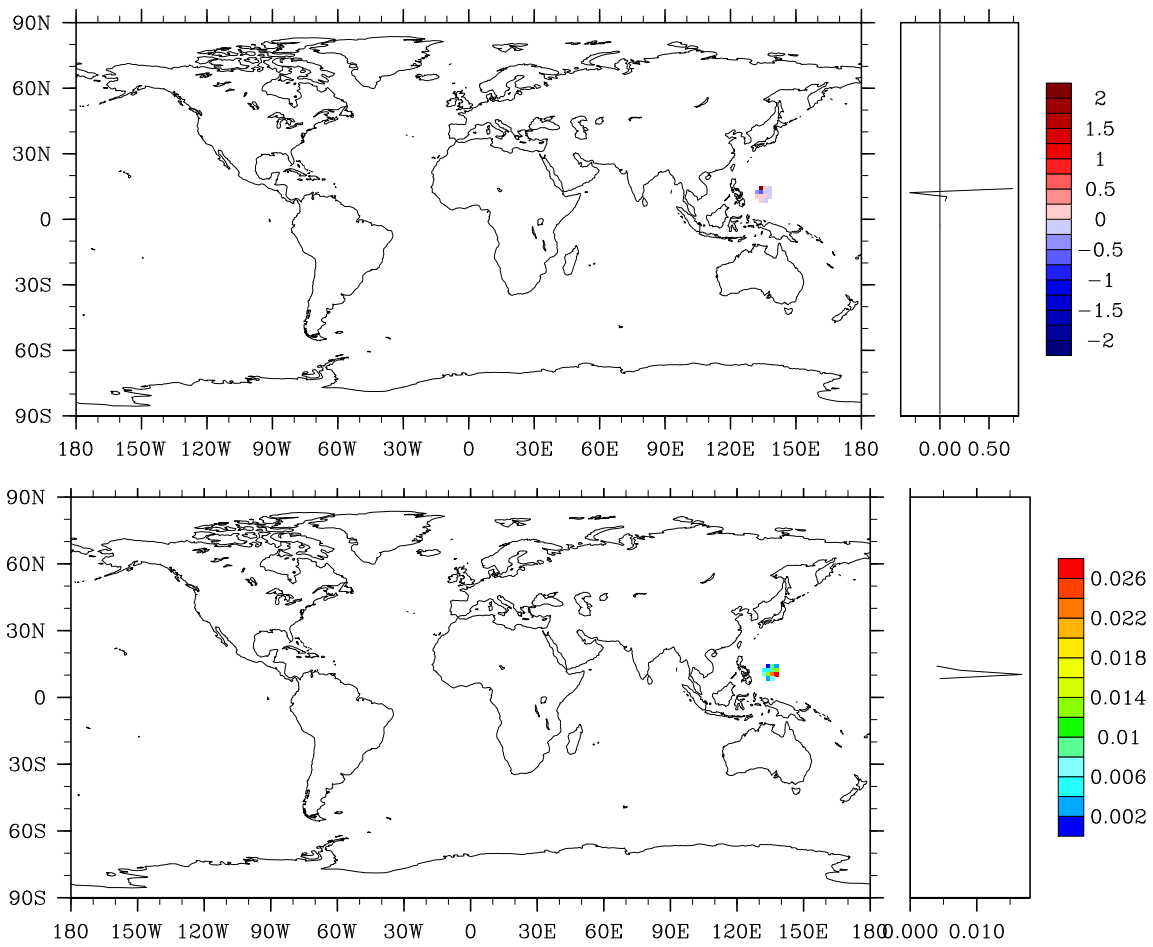


Figura 5.18 - Idem a Figura 5.8, exceto que para as observações do grupo SYNDAT, o qual representa o grupo das observações sintéticas.

Tabela 5.2 - Impacto das observações durante o mês de fevereiro de 2004 de acordo com a sua distribuição espacial. A unidade é  $\text{Jkg}^{-1}$ .

Grupo de observações (mnemônico)	Regiões			
	Global (90°S-90°N)	Hemisfério Sul (80°S-20°S)	Tropical (20°S-20°N)	Hemisfério Norte (20°N-80°N)
ADPSFC	-0,4041	-0,0291	0,0026	-0,3775
ADPUPA	-2,3869	-0,5097	-0,4283	-1,4429
AIRCAR	-2,3052	-0,0057	-0,0979	-2,2019
AIRCFT	-1,3728	-0,2296	-0,1413	-1,0022
PROFLR	-0,5999	-0,0002	0,0000	-0,5996
QKSWND	-12,5362	-8,4482	-1,2536	-2,8343
SATWND	-6,7706	-2,1846	-2,4911	-2,1016
SFCSHP	-0,4822	-0,0487	-0,0174	-0,3818
VADWND	-0,5414	0,0000	-0,0260	-0,5154
SPSSMI	-7,6102	-4,8500	-1,5376	-1,2226
SYNDAT	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Total	-35,0095	-16,3059	-5,9907	-12,6797

Nota: o valor de impacto total do grupo de observações SYNDAT é igual a  $2,1396\text{E}-06 \text{ Jkg}^{-1}$  para as regiões Global e Tropical.

Tabela 5.3 - Fração do impacto das observações durante o mês de fevereiro de 2004 de acordo com a sua distribuição espacial. A unidade é %.

Grupo de observações (mnemônico)	Regiões			
	Global (90°S-90°N)	Hemisfério Sul (80°S-20°S)	Tropical (20°S-20°N)	Hemisfério Norte (20°N-80°N)
ADPSFC	1,1541	0,0831	-0,0074	1,0782
ADPUPA	6,8179	1,4560	1,2233	4,1215
AIRCAR	6,5846	0,0162	0,2796	6,2894
AIRCFT	3,9213	0,6559	0,4037	2,8625
PROFLR	1,7134	0,0007	0,0000	1,7127
QKSWND	35,8078	24,1312	3,5808	8,0958
SATWND	19,3394	6,2401	7,1155	6,0029
SFCSHP	1,3773	0,1390	0,0497	1,0906
VADWND	1,5464	0,0000	0,0744	1,4720
SPSSMI	21,7376	13,8534	4,3920	3,4921
SYNDAT	-0,0000	0,0000	-0,0000	0,0000
Total	100,0000	46,5756	17,1190	36,2177

Nota: o valor de fração do impacto total do grupo de observações SYNDAT é igual a  $-6,1116\text{E}-06 \%$  para as regiões Global e Tropical.

Tabela 5.4 - Contagem de observações durante o mês de fevereiro de 2004 de acordo com a sua distribuição espacial.

Grupo de observações (mnemônico)	Regiões			
	Global (90°S-90°N)	Hemisfério Sul (80°S-20°S)	Tropical (20°S-20°N)	Hemisfério Norte (20°N-80°N)
ADPSFC	289.515	27.512	49.066	212.169
ADPUPA	2.082.430	392.245	438.811	1.248.028
AIRCAR	3.265.803	3.336	177.286	3.085.299
AIRCFT	884.374	143.417	98.869	642.316
PROFLR	872.476	101	0	872.375
QKSWND	8.495.233	4.574.558	2.211.024	1.709.651
SATWND	4.338.342	911.001	2.099.441	1.332.707
SFCSHP	479.328	51.162	84.265	340.197
VADWND	573.366	0	12.334	561.032
SPSSMI	3.408.502	1.688.826	1.115.364	604.312
SYNDAT	118	0	118	0
Total	24.689.487	7.792.158	6.286.578	10.608.086

Tabela 5.5 - Impacto por observação durante o mês de fevereiro de 2004 de acordo com a sua distribuição espacial. O fator de escala é  $10^{-5}$  e a unidade é  $\text{Jkg}^{-1}$ .

Grupo de observações (mnemônico)	Regiões			
	Global (90°S-90°N)	Hemisfério Sul (80°S-20°S)	Tropical (20°S-20°N)	Hemisfério Norte (20°N-80°N)
ADPSFC	-0,1396	-0,1057	0,0053	-0,1779
ADPUPA	-0,1146	-0,1300	-0,0976	-0,1156
AIRCAR	-0,0706	-0,1698	-0,0552	-0,0714
AIRCFT	-0,1552	-0,1601	-0,1430	-0,1560
PROFLR	-0,0688	-0,2446	0,0000	-0,0687
QKSWND	-0,1476	-0,1847	-0,0567	-0,1658
SATWND	-0,1561	-0,2398	-0,1187	-0,1577
SFCSHP	-0,1006	-0,0951	-0,0206	-0,1122
VADWND	-0,0944	0,0000	-0,2112	-0,0919
SPSSMI	-0,2233	-0,2872	-0,1379	-0,2023
SYNDAT	0,0018	0,0000	0,0018	0,0000
Total	-1,2690	-1,6170	-0,8338	-1,3195

### 5.2.2 Distribuição vertical dos impactos

É importante verificar como que a estimativa do impacto está distribuída verticalmente durante o período de estudo desta pesquisa.

O painel da Figura 5.19 apresenta, para cada camada vertical da atmosfera durante o mês de fevereiro de 2004, plotagens em barras: na Figura 5.19(a) da estimativa do impacto por meio do acúmulo de energia; na Figura 5.19(b) da fração de observações benéficas ( $I < 0$  em (4.18) ou (4.19)) referente ao total de observações de cada camada; na Figura 5.19(c) do total de observações assimiladas; e na Figura 5.19(d) do impacto de cada observação referente ao total de observações de cada camada.

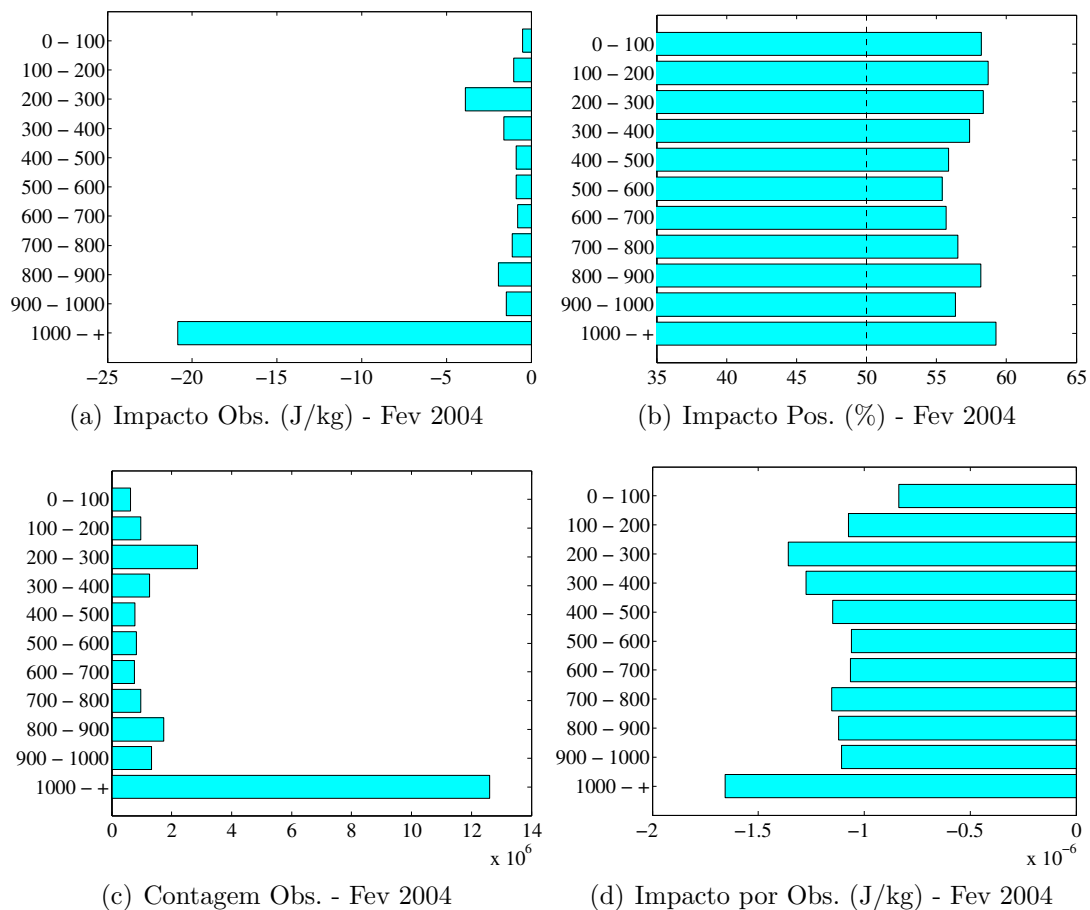


Figura 5.19 - Plotagens em barras para cada camada vertical durante o mês de fevereiro de 2004: (a) do impacto das observações nas previsões de 24 h do GLETKF, a unidade é  $\text{Jkg}^{-1}$ ; (b) da fração de observações benéficas, a unidade é %; (c) do total de observações assimiladas, o fator de escala é  $10^6$ ; (d) e do impacto por observação, o fator de escala é  $10^{-6}$  e a unidade é  $\text{Jkg}^{-1}$ .

Primeiramente, nota-se que por meio da estimativa do impacto para o sistema de observação utilizado pelo GLETKF, apresentado na Figura 5.19(a), todas as camadas verticais apresentam-se com acumulados de energia negativos, indicando que todas as camadas apresentaram impacto benéfico às previsões de 24 h do GLETKF, totalizando, assim como para a classificação de acordo com os grupos de observações,  $-35,0095 \text{ Jkg}^{-1}$ . As observações localizadas na camada atmosférica entre a superfície e 1000 hPa apresentaram o maior acumulado benéfico durante o período de estudo, totalizando  $-20,8641 \text{ Jkg}^{-1}$ , referente a quase 60 % do impacto total. Com isso, cerca de 40 % da redução dos erros das previsões de 24 h do GLETKF durante o mês de fevereiro de 2004, pode ser atribuída às observações localizadas entre o topo da atmosfera e 1000 hPa. Embora menor, um segundo máximo de acumulado benéfico apresenta-se localizado na camada atmosférica entre 200 e 300 hPa, camada essa em que encontram-se as correntes dos jatos de altos níveis, porém totalizando  $-3,8824 \text{ Jkg}^{-1}$ , referente a aproximadamente 11 % do impacto total.

Assim como para a estimativa do impacto, com relação a quantidade de observações ocorre o mesmo. Isso pode ser verificado na Figura 5.19(c). Em que encontra-se um máximo pronunciado entre a superfície e 1000 hPa com valor igual a 12.601.942 (51 % da quantidade total de observações). Um segundo máximo, embora com menor magnitude, encontra-se localizado na camada entre 200 e 300 hPa, com valor igual a 2.855.523 (11,6 %). Isso ocorre devido à grande quantidade de observações em superfície utilizadas no sistema GLETKF (*e.g.*, SPSSMI e QKSWND), como apresentado anteriormente quando os impactos foram classificados de acordo com os grupos de observações. Assim como também, devido a não utilizar-se grande quantidade de observações distribuídas verticalmente na atmosfera obtidas por meio de sensoriamento remoto (*e.g.*, radiâncias, radio ocultação).

Com relação a quantidade de observações com impactos benéficos, apresentado na Figura 5.19(b), indistinguindo-se sua magnitude e o seu tipo de observação, todas as camadas atmosféricas apresentaram frações maiores que 55 % de observações com impacto benéfico. Com dois máximos relativos de aproximadamente 59 % localizados nas camadas atmosféricas entre a superfície e 1000 hPa e, em altos níveis, entre 100 e 200 hPa. Ao relacionar a quantidade de observações e o seu acumulado de impacto durante o mês de fevereiro de 2004 para o GLETKF, apresenta-se uma distribuição vertical mais homogênea, quando comparadas com as distribuições verticais da quantidade de observações e do acumulado de impacto, devido à normalização que ocorre com relação a quantidade de observações. Isso pode ser verificado por

meio da Figura 5.19(d). Entretanto, assim como para a distribuição vertical da quantidade de observações com impactos benéficos, nota-se dois máximos. Um máximo relativo localizado entre a superfície e 1000 hPa, apresentando uma redução de  $0,1656\text{E}-05 \text{ Jkg}^{-1}$  por observação. E um segundo máximo relativo localizado na camada entre 200 e 300 hPa, apresentando uma redução média de  $0,1360\text{E}-05 \text{ Jkg}^{-1}$ . A Tabela 5.6 sumariza os resultados apresentados nesta seção.

Tabela 5.6 - Impactos das observações durante o mês de fevereiro de 2004 de acordo com a sua distribuição vertical.

Camada vertical (hPa)	Contagem de observações (unidades)	Impacto total ( $\text{Jkg}^{-1}$ )	Fração do impacto total (%)	Impacto benéfico (%)	Impacto por observação ( $\text{E}-05 \text{ Jkg}^{-1}$ )
0 - 100	624.451	-0,5220	1,4909	58,2023	-0,0836
100 - 200	964.467	-1,0352	2,9570	58,7065	-0,1073
200 - 300	2.855.523	-3,8824	11,0894	58,3354	-0,1360
300 - 400	1.262.673	-1,6105	4,6002	57,3578	-0,1275
400 - 500	772.372	-0,8874	2,5349	55,8508	-0,1149
500 - 600	828.704	-0,8783	2,5088	55,4121	-0,1060
600 - 700	750.809	-0,7990	2,2821	55,7010	-0,1064
700 - 800	963.594	-1,1120	3,1764	56,5374	-0,1154
800 - 900	1.737.674	-1,9496	5,5688	58,1722	-0,1122
900 - 1000	1.327.278	-1,4690	4,1961	56,3434	-0,1107
1000 - +	12.601.942	-20,8641	59,5954	59,2668	-0,1656
Total	24.689.487	-35,0095	100,0000	58,3272	-1,2690





## 6 Considerações finais

Nesta pesquisa foram avaliados os impactos das observações nas previsões de curto prazo por meio do método de estimativa do impacto proposto em Liu e Kalnay (2008), utilizando um sistema de assimilação de dados global. O sistema escolhido foi o GLETKF, o qual utiliza uma variação do filtro de Kalman como método de assimilação de dados, conhecido como LETKF, e o MCGA-CPTEC/INPE. Esse sistema encontra-se em estado de implementação no CPTEC/INPE para que futuramente torne-se operacional gerando as análises do centro. A versão do GLETKF utilizada nesta pesquisa foi fornecida pelo GDAD. Atualmente, essa versão utiliza um conjunto de observações disponibilizados publicamente pelo NCEP. Dentre todas as observações desse conjunto, o GLETKF utiliza as observações de ventos zonal ( $u$ ) e meridional ( $v$ ), temperatura ( $T$ ) e pressão à superfície ( $p_s$ ).

O método para estimar o impacto das observações utilizado nesta pesquisa provém uma avaliação quantitativa das contribuições de todas as observações assimiladas durante um ciclo de assimilação sem a necessidade de realizar experimentos de dados negados ou adicionados. Posteriormente à estimativa, os resultados obtidos podem ser classificados de acordo com variados critérios (*e.g.*, tipo de instrumento, variável observada, região geográfica, nível vertical e outros).

A métrica utilizada nesta pesquisa dá-se por meio de um funcional definido como sendo a diferença de duas medidas quadráticas dos erros das previsões de 24 e 30 h, de modo que essa diferença seja devido às observações utilizadas para gerar as condições iniciais que deram origem às previsões de 24 h. Essa métrica fornece uma medida ponderada por uma norma, a qual foi utilizada nesta pesquisa como sendo a norma de energia total (seca), que relaciona os campos de ventos zonal ( $u$ ) e meridional ( $v$ ), temperatura ( $T$ ) e pressão à superfície ( $p_s$ ) em termos de energia (para maiores detalhes ver Seção 4.2.2). O motivo pelo qual utilizou-se essa norma é devido a sua robustez em relacionar os principais campos meteorológicos. Assim como também devido a convenção de uso da mesma estabelecida dentre os diversos estudos que verificam o impacto das observações nas previsões de curto prazo.

A ferramenta foi implementada e o custo computacional por meio do uso da mesma é menor do que o necessário para realizar a atualização da análise.

O período de estudo utilizado nesta pesquisa foi janeiro e fevereiro de 2004, no entanto, com o intuito de ser conservador, foram apresentados apenas os resultados obtidos durante o mês de fevereiro para que durante o mês de janeiro o sistema

GLETKF atingisse equilíbrio dinâmico. O motivo pelo qual utilizou-se esse período é devido a disponibilidade da versão de testes do GLETKF pelo GDAD.

## 6.1 Conclusões

Considerando que a estimativa de impacto das observações utilizada nesta pesquisa dá-se por uma medida de erro que relaciona os erros das previsões de 24 e 30 h, primeiramente foram apresentadas as distribuições temporal e espacial desses erros.

Com relação a distribuição temporal dos erros das previsões, conforme o esperado, encontrou-se que os erros das previsões de 24 h apresentaram magnitude menor do que os erros das previsões de 30 h. Indicando que as observações assimiladas durante o processo de atualização das análises que serviram de condições iniciais para o MCGA-CPTEC/INPE gerar as previsões de 24 h beneficiaram essas previsões. Devido ao funcional escolhido nesta pesquisa ser, por definição, uma aproximação da diferença entre esses dois erros, ao comparar essa diferença com a estimativa do impacto obtida por meio da aproximação desse funcional obteve-se que a estimativa representou, em média, apenas 40 % dessa diferença. Resultando em uma subestimativa de 60 % do impacto das observações. Essa subestimativa também foi encontrada no estudo de Kunii et al. (2011), no qual foi utilizada a mesma abordagem para estimar o impacto das observações. Devido a não ser o foco desta pesquisa, não foram investigadas as possíveis causas dessa significativa subestimativa. Apesar de ainda não estar claro quais os motivos para essa ocorrência, há indícios (não mostrados nesta pesquisa) de que o motivo pelo qual ocorre essa subestimativa seja devido a um mau uso das observações. Ao comparar qualitativamente as séries temporais dos erros das previsões e da estimativa do impacto das observações obtidas na realização desta pesquisa com as apresentadas em estudos anteriores, porém utilizando a abordagem de modelos adjuntos para estimar o impacto das observações (*e.g.*, Gelaro et al. (2010)), nota-se facilmente que os valores aqui apresentados são significativamente menores do que os apresentados nesses estudos. É importante salientar que isso não significa que as previsões e análises aqui apresentadas têm melhor qualidade do que as apresentadas nesses estudos porque esses valores são obtidos com relação ao próprio sistema de assimilação de dados.

Com relação a distribuição espacial dos erros das previsões de 24 e 30 h, encontrou-se que esses erros apresentaram maior magnitude nas regiões baroclínicas, as quais ficam localizadas em latitudes médias. Os erros de ambas previsões apresentaram os seus máximos sobre o Hemisfério Norte, mais precisamente sobre o Oceano Pacífico Norte e um máximo secundário sobre a América do Norte. Fato ocorrido

devido a ser inverno nesse hemisfério, com isso, as regiões baroclínicas apresentam-se mais intensas durante esse período tornando a previsão dos sistemas transientes que passam por essas regiões mais difícil de serem previstas. Apesar disso, as médias zonais apresentaram-se praticamente simétricas em ambos os hemisférios. Fato ocorrido devido a esses erros apresentarem-se espalhados sobre grande parte dos oceanos no Hemisfério Sul, sem apresentar um máximo pronunciado sobre essa região, porém apresentando um espalhamento significativo o suficiente para tornar as médias zonais semelhantes para ambos os hemisférios, com as médias zonais no Hemisfério Sul ligeiramente maiores. Assim como para a distribuição temporal, notou-se claramente que os erros das previsões de 24 h apresentaram menor magnitude do que os erros das previsões de 30 h, sendo isso facilmente notável para todas as regiões do globo. O motivo para essa ocorrência é o mesmo apresentado para as séries temporais, ou seja, as observações assimiladas durante o período de estudo beneficiaram as previsões de 24 h. As maiores reduções dos erros das previsões de 24 h com relação aos erros das previsões de 30 h, ocorreram nas mesmas regiões de máxima magnitude desses erros. No Hemisfério Sul, essa redução apresentou-se espalhada sobre os oceanos desse hemisfério, sugerindo que as observações que mais contribuíram para a redução desses erros encontram-se sobre essas regiões. Com isso, a média zonal dessa redução apresentou-se praticamente simétrica em ambos os hemisférios.

Com relação a estimativa do impacto das observações nas previsões de 24 h do sistema GLETKF, encontrou-se que o conjunto de observações assimilado por esse sistema contribuiu para a redução dos erros dessas previsões. Entretanto, o impacto quando verificado de acordo com os grupos de observações definidos nas Tabelas 4.2 e 4.3 (ver páginas 43 e 44, respectivamente), todos os grupos apresentaram contribuições benéficas às previsões, com exceção apenas do grupo das observações SYNDAT que apresentou contribuição maléfica para essas previsões, porém praticamente desprezível. Um dos motivos para a ocorrência desse fato é que essas observações sintéticas são observações geradas para o sistema de assimilação do NCEP, com base na estimativa inicial desse sistema. Dentre os grupos definidos, os grupos que mais contribuíram para a redução dos erros das previsões foram os grupos das observações de vento obtidas por meio de sensoriamento remoto QKSWND (35,8 % do impacto total), SPSSMI (21,7 %) e SATWND (19,3 %). Esses grupos também apresentaram as maiores quantidades de observações assimiladas com valores iguais a 8.495.233 (34,4 % da quantidade total), 3.408.502 (13,8 %) e 4.338.342 (17,6 %), respectivamente. Dentre as observações *in situ*, os grupos das observações de ar superior ADPUPA (6,8 % do impacto total) e AIRCAR (6,6 %)

foram os que apresentaram as maiores contribuições para a redução dos erros das previsões. O grupo das observações SPSSMI foi o grupo que apresentou o maior impacto por observação (17,6 % do total de impacto por observação), seguido pelos grupos SATWND (12,3 %), AIRCFT (12,2 %), QKSWND (11,6 %) e ADPSFC (11,0%). Todos os grupos de observações, com exceção do grupo das observações SYNDAT, apresentaram mais do que 53 % de todas as observações pertencentes aos respectivos grupos com impacto benéfico às previsões, com a maior fração pertencente ao grupo das observações SATWND, o qual atingiu uma fração de 60,8 % de observações benéficas.

Com relação a estimativa do impacto das observações nas previsões de 24 h do sistema GLETKF de acordo com as quatro regiões definidas (Global, Tropical, Hemisfério Norte e Hemisfério Sul), encontrou-se que o conjunto de observações assimilado por esse sistema contribuíram para a redução dos erros dessas previsões em todas as regiões avaliadas. Do total de impacto das observações em torno do globo, valor igual a  $-35,0095 \text{ Jkg}^{-1}$ , a maior parte encontrou-se na região Hemisfério Sul (46,6 %), seguido pelas regiões Hemisfério Norte (36,2 %) e Tropical (17,1 %). Para a região Hemisfério Sul, as observações que tiveram as maiores contribuições para a redução dos erros das previsões foram as dos grupos QKSWND (24,1 % do impacto total) e SPSSMI (13,9 %). Para a região Hemisfério Norte, as observações que tiveram as maiores contribuições para a redução dos erros das previsões foram as dos grupos QKSWND (8,1 %), AIRCAR (6,3 %) e SATWND (6,0 %). Para a região Tropical, as observações que tiveram as maiores contribuições para a redução dos erros das previsões foram as dos grupos SATWND (7,1 %), SPSSMI (4,4 %) e QKSWND (3,6 %).

Com relação a estimativa do impacto das observações nas previsões de 24 h do sistema GLETKF de acordo com a distribuição vertical dessas observações, encontrou-se que o conjunto de observações assimilado por esse sistema contribuiu para a redução dos erros dessas previsões em todas as camadas avaliadas. Para isso foram definidas onze camadas da superfície até o topo da atmosfera distribuídas com espaçamento de 100 hPa. Dentre o impacto total, quase que 60 % desse impacto encontrou-se na camada entre a superfície e 1000 hPa, restando 40 % desse impacto nas camadas localizadas entre 1000 hPa e o topo da atmosfera, com um máximo relativo de 11 % localizado na camada entre 200 e 300 hPa. Os máximos relacionados à quantidade de observações mostraram-se semelhantes as localizações dos máximos do impacto total. Do total de observações utilizadas pelo GLETKF, 24.689.487 observações, cerca de 51 % dessas observações foram utilizadas entre a

superfície e 1000 hPa, restando 49 % para as camadas localizadas entre 1000 e o topo da atmosfera. Dentre essas camadas, a que apresentou maior quantidade de observações foi a camada localizada entre 200 e 300 hPa, com cerca de 11 % do total das observações utilizadas. Todas as camadas atmosféricas avaliadas apresentaram frações de impacto benéfico maiores do que 55 % do total de observações em cada camada.

As contribuições das observações do grupo ADPUPA encontradas nesta pesquisa são intrigantes devido a esse grupo de observações apresentarem em alguns centros impactos altamente benéficos (*e.g.*, GMAO). Uma hipótese para a ocorrência desse fato é devido às observações de radiossondas terem sido utilizadas como perfis verticais fixos sobre a estação de lançamento da sonda, desconsiderando o efeito de arraste durante a sua ascensão na atmosfera. Alguns sistemas de assimilação de dados ainda utilizam essas observações dessa forma. Isso ocorre devido a maioria dessas observações não apresentar informações de sua localização horizontal durante a ascensão da sonda. Os sistemas que não utilizam dessa forma, tradicionalmente, estimam o deslocamento horizontal da sonda relacionando as observações de ventos zonal e meridional durante a sua ascensão. Essas informações estão presentes nos arquivos PrepBUFR, as quais são adicionadas por meio de um dos processos realizados na confecção do mesmo. No entanto, esta pesquisa não fez uso dessas informações devido ao decodificador para esses arquivos não estar apto para utilizar essas informações. Apesar de alguns trabalhos na literatura mostrarem por meio de análise de escala que esse efeito pode ser desconsiderado, resultados preliminares obtidos utilizando a posição estimada da sonda durante a sua ascensão tornam o impacto dessas observações mais benéficos para as previsões de 24 h do GLETKF (não mostrados nesta pesquisa).

Os impactos fornecidos pelas observações de aviões também são, de certa maneira, intrigantes. Essas observações fornecem informações de massa ( $T$ ) e ventos ( $u$  e  $v$ ), sendo que as informações de  $T$  são fornecidas como sendo valores de temperatura sensível. Porém o GLETKF utiliza as mesmas considerando que a diferença entre a temperatura sensível e a temperatura virtual é desprezível e com isso utiliza essas observações de aviões sem realizar a transformação da variável do modelo, a qual apresenta-se como sendo temperatura virtual, para temperatura sensível.

Nenhum ajuste foi realizado no GLETKF para os experimentos desta pesquisa. Com isso tem-se a partir dos resultados aqui apresentados um padrão a ser comparado futuramente quando forem realizados ajustes nesse sistema. Há a necessidade de

se realizar mais estudos com relação às aplicações da ferramenta de impacto das observações.

## 6.2 Sugestões para trabalhos futuros

A partir da realização desta pesquisa, são apresentadas a seguir sugestões de trabalhos futuros que necessitam ser investigados:

- verificar o impacto das observações de radiossondas utilizando-as considerando o efeito de arraste sofrido enquanto as mesmas ascendem na atmosfera;
- assimilar as observações de umidade e posteriormente verificar o impacto utilizando uma métrica que envolva umidade, como por exemplo a norma de energia total (úmida);
- verificar o impacto das observações de temperatura sensível fornecidas por aviões, realizando a transformação da variável do modelo, a qual apresenta-se como sendo temperatura virtual, para temperatura sensível;
- expandir a implementação dessa pesquisa para acomodar a expressão não-linear apresentada em Liu e Kalnay (2008) e examinar os impactos nas previsões de tempo maiores que um dia;
- adaptar a ferramenta de estimativa do impacto das observações implementada nesta pesquisa para o código em desenvolvimento pelo CPTEC/INPE que assimila radiâncias;
- e reavaliar os impactos na presença das radiâncias.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALPERT, J. C.; KANAMITSU, M.; CAPLAN, P. M.; SELA, J. G.; WHITE, G. H.; KALNAY, E. Mountain induced gravity wave drag parameterization in the NMC medium range forecast model. In: CONFERENCE ON NUMERICAL WEATHER PREDICTION, 8., 1988, Boston, MA, United States of America. **Proceedings...** Baltimore, MD, United States of America: American Meteorological Society, 1988. p. 726–733. 54
- ANDREOLI, R. V.; FERREIRA, S. H. S.; SAPUCCI, L. F.; SOUZA, R. A. F. de; MENDONÇA, R. W. B.; HERDIES, D. L.; ARAVÉQUIA, J. A. Contribuição de diversos sistemas de observação na previsão de tempo no CPTEC/INPE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Scielo, v. 23, p. 219–238, jun. 2008. ISSN 0102-7786. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-77862008000200009&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862008000200009&nrm=iso)>. Acesso em: 14 nov. 2012. 2, 18
- ARAVÉQUIA, J. A.; MEDEIROS, M. D. S.; HERDIES, D. L.; SOUZA, S. S. How the LETKF/GCM-CPTEC analysis reproduces the observations time scales signal? In: THE MEETING OF THE AMERICAS, 2010, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. **Proceedings...** Washington, DC, United States of America: American Geophysical Union, 2010. 3
- BAKER, N. L.; DALEY, R. Observation and background adjoint sensitivity in the adaptive observation-targeting problem. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, John Wiley & Sons, Ltd, v. 126, n. 565, p. 1431–1454, 2000. ISSN 1477-870X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/qj.49712656511>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 19, 21
- BAKER, N. L.; LANGLAND, R.; PAULEY, P. M.; XU, L.; MERKOVA, D.; GELARO, R.; VELDEN, C. The impact of satellite atmospheric motion vectors in the U.S. Navy global data assimilation system - NWP results. In: INTERNATIONAL WINDS WORKSHOP, 11., 2012, Auckland, New Zealand. **Proceedings...** Darmstadt, Germany: EUMETSAT, 2012. ISSN 1023-0416. 22
- BAKER, N. L.; MERKOVA, D.; LANGLAND, R.; GELARO, R.; PAULEY, P. M.; MCCARTY, W.; XU, L. The impact of satellite atmospheric motion vectors in the Navy and NASA global data assimilation systems. **Joint Center for**

**Satellite Data Assimilation Quarterly**, Joint Center for Satellite Data Assimilation, College Park, MD, United States of America, n. 39, p. 1–2, 2012. 22

BERGTHÓRSSON, P.; DÖÖS, B. R. Numerical weather map analysis. **Tellus**, Blackwell Publishing Ltd, v. 7, n. 3, p. 329–340, 1955. ISSN 2153-3490. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.2153-3490.1955.tb01170.x>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 7

BISHOP, C. H.; ETHERTON, B. J.; MAJUMDAR, S. J. Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part I: theoretical aspects. **Monthly Weather Review**, American Meteorological Society, v. 129, n. 3, p. 420–436, 2001. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493%282001%29129%3C0420%3AASWTET%3E2.0.CO%3B2>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 47

BJERKNES, V. Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 21, p. 1–7, 1904. 1

BONATTI, J. P. **Modelo de circulação geral atmosférico do CPTEC**. Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, 1996. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/bonatti.html>>. Acesso em: 28 de Novembro, 2010. 52

CARDINALI, C. Monitoring the observation impact on the short-range forecast. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, John Wiley & Sons, Ltd., v. 135, n. 638, p. 239–250, 2009. ISSN 1477-870X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/qj.366>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 23

CARDINALI, C.; BUIZZA, R.; KELLY, G.; SHAPIRO, M.; THÉPAUT, J.-N. The value of observations. III: influence of weather regimes on targeting. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, John Wiley & Sons, Ltd., v. 133, n. 628, p. 1833–1842, 2007. ISSN 1477-870X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/qj.148>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 2

CHARNEY, J. G.; FJÖRTOFT, R.; VON NEUMANN, J. Numerical integration of the barotropic vorticity equation. **Tellus**, Blackwell Publishing Ltd, v. 2, n. 4, p. 237–254, 1950. ISSN 2153-3490. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.2153-3490.1950.tb00336.x>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 1



CRESSMAN, G. P. An operational objective analysis system. **Monthly Weather Review**, American Meteorological Society, v. 87, n. 10, p. 367–374, 1959.

Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493%281959%29087%3C0367%3AA00AS%3E2.0.CO%3B2>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 8

DA SILVA, A.; PFAENDTNER, J.; GUO, J.; SIENKIEWICZ, M.; COHN, S. E. Assessing the effects of data selection with the DAO's physical-space statistical analysis system. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE ASSIMILATION OF OBSERVATIONS IN METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY, 2., 1995, Tokyo, Japan. **Proceedings...** Geneva Switzerland: World Meteorological Organization, 1995. 3

DAESCU, D. N. On the deterministic observation impact guidance: a geometrical perspective. **Monthly Weather Review**, American Meteorological Society, v. 137, n. 10, p. 3567–3574, 2009. Disponível em:

<<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2009MWR2954.1>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 3, 21, 23

DAESCU, D. N.; TODLING, R. Adjoint estimation of the variation in model functional output due to the assimilation of data. **Monthly Weather Review**, American Meteorological Society, v. 137, n. 5, p. 1705–1716, set. 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1175/2008MWR2659.1>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 21

\_\_\_\_\_. Adjoint sensitivity of the model forecast to data assimilation system error covariance parameters. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, John Wiley & Sons, Ltd., v. 136, n. 653, p. 2000–2012, 2010. ISSN 1477-870X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/qj.693>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 21

DALEY, R. The analysis of synoptic scale divergence by a statistical interpolation procedure. **Monthly Weather Review**, American Meteorological Society, v. 113, n. 6, p. 1066–1080, 1985. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493%281985%29113%3C1066%3ATA0SSD%3E2.0.CO%3B2>>.

Acesso em: 14 nov. 2012. 9, 10

\_\_\_\_\_. **Atmospheric data analysis**. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1991. 457 p. 7, 9

DEE, D. P. On-line estimation of error covariance parameters for atmospheric data assimilation. **Monthly Weather Review**, American Meteorological Society,

v. 123, n. 4, p. 1128–1145, 1995. Disponível em:

<<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493%281995%29123%3C1128%3AOLEOEC%3E2.0.CO%3B2>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 46

ELIASSEN, A. **Provisional report on calculation of spatial covariance and autocorrelation of the pressure field**. Oslo, Norway, 1954. 12 p. Reprinted in Bengtsson et al. 1981, pp. 319-330. 8

ERRICO, R. M. Interpretations of an adjoint-derived observational impact measure. **Tellus A**, Blackwell Publishing Ltd, v. 59, n. 2, p. 273–276, 2007. ISSN 1600-0870. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0870.2006.00217.x>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 3, 20

EVENSEN, G. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 99, p. 10143–10162, 1994. 46

GANDIN, L. S. **Objective analysis of meteorological fields, gidrometeorologicheskoe izdatelstvo, leningrad (in Russian)**. Jerusalem, Israel: [s.n.], 1963. 242 p. English translation from the Russian by Israel program for scientific translations. 8

GELARO, R.; LANGLAND, R. H.; PELLERIN, S.; TODLING, R. The THORPEX observation impact intercomparison experiment. **Monthly Weather Review**, American Meteorological Society, v. 138, n. 11, p. 4009–4025, 2010.

Disponível em:

<<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2010MWR3393.1>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 3, 21, 22, 61, 94

GELARO, R.; ZHU, Y. Examination of observation impacts derived from observing system experiments (OSEs) and adjoint models. **Tellus A**, Blackwell Publishing Ltd, v. 61, n. 2, p. 179–193, 2009. ISSN 1600-0870. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0870.2008.00388.x>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 23

GELARO, R.; ZHU, Y.; ERRICO, R. M. Examination of various-order adjoint-based approximations of observation impact. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 16, n. 6, p. 685–692(8), dez. 2007. Disponível em:

<<http://www.ingentaconnect.com/content/schweiz/mz/2007/00000016/00000006/art00010>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 3, 20, 21

GHIL, M.; COHN, S.; TAVANTZIS, J.; BIBE, K.; ISAACSON, E. Applications of estimation theory to numerical weather prediction. In: BENGTSSON, L.; GHIL, M.; KÄLLÉN, E. (Ed.). **Dynamic meteorology: data assimilation methods**. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 1981. p. 139–224. 46

HARSHVARDHAN; DAVIES, R.; RANDALL, D. A.; CORSETTI, T. G. A fast radiation parameterization for atmospheric circulation models. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, John Wiley & Sons, Ltd., v. 92, n. D1, p. 1009–1016, 1987. ISSN 2156-2202. Disponível em:  
<<http://dx.doi.org/10.1029/JD092iD01p01009>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 54

HOUTEKAMER, P. L.; MITCHELL, H. L.; PELLERIN, G.; BUEHNER, M.; CHARRON, M.; SPACEK, L.; HANSEN, B. Atmospheric data assimilation with an ensemble Kalman filter: results with real observations. **Monthly Weather Review**, American Meteorological Society, v. 133, n. 3, p. 604–620, 2005. Disponível em:  
<<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/MWR-2864.1>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 46

HUNT, B. R.; KOSTELICH, E. J.; SZUNYOGH, I. Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: a local ensemble transform Kalman filter. **ArXiv Physics e-prints**, nov. 2005. Disponível em:  
<<http://arxiv.org/abs/physics/0511236>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 47

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, Elsevier, v. 230, n. 1-2, p. 112–126, 2007. ISSN 0167-2789. Data Assimilation. Disponível em:  
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TVK-4MNHXX0-3/2/43ec2cf5df5aacf538cdeb90cd480>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 3, 47

KALMAN, R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. **Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering**, v. 82, n. Series D, p. 35–45, 1960. 46

KALMAN, R. E.; BUCY, R. S. New results in linear filtering and prediction theory. **Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering**, v. 83, n. Series D, p. 95–107, 1961. 46

KALNAY, E. **Atmospheric modelling, data assimilation and predictability**. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2002. 364 p. 7, 8, 11, 12, 54

KALNAY, E.; YANG, S.-C.; MIYOSHI, T.; LI, H.; LIU, J. Data assimilation systems: focus on EnKF diagnostics. In: ECMWF WORKSHOP ON DIAGNOSTICS OF DATA ASSIMILATION SYSTEM PERFORMANCE, 1., 2009. **Proceedings...** Shinfield Park, Reading, Berkshire, United Kingdom: ECMWF, 2009. p. 1–14. 26

KELLY, G.; MCNALLY, A.; THÉPAUT, J. N.; SZYNDEL, M. OSEs of all main data types in the ECMWF operational system. In: WMO WORKSHOP ON THE IMPACT OF VARIOUS OBSERVING SYSTEMS ON NUMERICAL WEATHER PREDICTION, 3., 2004, Alpbach, Austria. **Proceedings...** Geneva Switzerland: World Meteorological Organization, 2004. p. 63–94. 17, 18

KELLY, G.; THÉPAUT, J.-N.; BUIZZA, R.; CARDINALI, C. The value of observations. I: data denial experiments for the Atlantic and the Pacific. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, John Wiley & Sons, Ltd., v. 133, n. 628, p. 1803–1815, 2007. ISSN 1477-870X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/qj.150>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 2

KEPPENNE, C. L.; RIENECKER, M. M. Initial testing of a massively parallel ensemble Kalman filter with the Poseidon isopycnal ocean general circulation model. **Monthly Weather Review**, American Meteorological Society, v. 130, n. 12, p. 2951–2965, 2002. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493%282002%29130%3C2951%3AITOAMP%3E2.0.CO%3B2>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 46

KEYSER, D. **Observational data processing at NCEP**. jul. 2011. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, National Centers for Environmental Prediction, Environmental Modeling Center. Disponível em: <[http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/data\\_processing/data\\_processing/](http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/data_processing/data_processing/)>. Acesso em: 14 nov. 2012. 30

\_\_\_\_\_. **PrepBUFR processing at NCEP**. jul. 2012. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, National Centers for Environmental Prediction, Environmental Modeling Center. Disponível em: <[http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/data\\_processing/prepbufr.doc/document.htm](http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/data_processing/prepbufr.doc/document.htm)>. Acesso em: 14 nov. 2012. 32

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.**  
Calverton, Maryland, United States of America, 1997. Volume 1: Formulation. 52

KUNII, M.; MIYOSHI, T.; KALNAY, E. Estimating the impact of real observations in regional numerical weather prediction using an ensemble Kalman filter. **Monthly Weather Review**, American Meteorological Society, v. 140, n. 6, p. 1975–1987, ago. 2011. Disponível em:  
<<http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-11-00205.1>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 26, 60, 94

KUO, H. L. Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large-scale flow. **Journal of the Atmospheric Sciences**, American Meteorological Society, v. 31, n. 5, p. 1232–1240, jul. 1974. ISSN 0022-4928. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469%281974%29031%3C1232%3AFS0TP0%3E2.0.CO%3B2>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 54

LANGLAND, R. H. Observation impact during the North Atlantic TReC—2003. **Monthly Weather Review**, American Meteorological Society, v. 133, n. 8, p. 2297–2309, ago. 2005. Disponível em:  
<<http://dx.doi.org/10.1175/MWR2978.1>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 19

LANGLAND, R. H.; BAKER, N. L. Estimation of observation impact using the NRL atmospheric variational data assimilation adjoint system. **Tellus A**, Munksgaard International Publishers, v. 56, n. 3, p. 189–201, 2004. ISSN 1600-0870. Disponível em:  
<<http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0870.2004.00056.x>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 3, 16, 19, 20, 21, 23, 55, 57

LE DIMET, F.-X.; TALAGRAND, O. Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations: theoretical aspects. **Tellus A**, Blackwell Publishing Ltd, v. 38A, n. 2, p. 97–110, 1986. ISSN 1600-0870. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0870.1986.tb00459.x>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 11

LI, H.; LIU, J.; KALNAY, E. Correction of ‘Estimating observation impact without adjoint model in an ensemble Kalman filter’. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, John Wiley & Sons, Ltd., v. 136, n. 651, p. 1652–1654, 2010. ISSN 1477-870X. Disponível em:  
<<http://dx.doi.org/10.1002/qj.658>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 23, 25

LIU, J. **Applications of the LETKF to adaptive observations, analysis sensitivity, observation impact, and assimilation of moisture**. 168 p. Ph. D Thesis — University of Maryland (UMD), College Park, MD, United States of America, 2007. 23, 24, 25, 26, 55, 57

LIU, J.; KALNAY, E. Estimating observation impact without adjoint model in an ensemble Kalman filter. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, John Wiley & Sons, Ltd., v. 134, n. 634, p. 1327–1335, 2008. ISSN 1477-870X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/qj.280>>. Acesso em: 14 nov. 2012. ix, 3, 4, 23, 24, 25, 26, 55, 56, 57, 62, 93, 98

LORENC, A. C. Analysis methods for numerical weather prediction. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, John Wiley & Sons, Ltd, v. 112, n. 474, p. 1177–1194, 1986. ISSN 1477-870X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/qj.49711247414>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 8

LORENZ, E. N. Deterministic nonperiodic flow. **Journal of the Atmospheric Sciences**, American Meteorological Society, v. 20, n. 2, p. 130–141, 1963. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469%281963%29020%3C0130%3ADNF%3E2.0.CO%3B2>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 1

LORENZ, E. N.; EMANUEL, K. A. Optimal sites for supplementary weather observations: Simulation with a small model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, American Meteorological Society, v. 55, p. 399–414, 1998. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1998\)055%3C0399:OSFSW0%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1998)055%3C0399:OSFSW0%3E2.0.CO;2)>. Acesso em: 14 nov. 2012. 24

MATTOS, J. G. Z. **Sensibilidade do uso de “Pseudo-temps” na assimilação de dados do modelo de circulação geral atmosférica do CPTEC/COLA**. 129 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006-12-05 2006. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/02.15.17.37>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 2, 18

MEDEIROS, M. D. S. **Impacto do uso de radiância na assimilação de dados usando 4D-LETKF na região da América do Sul**. 137 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010-12-06 2011. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19/2010/11.24.18.42>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 3, 19

MEDEIROS, M. D. S.; ARAVÉQUIA, J. A.; HERDIES, D. L.; SOUZA, S. S. Assessing the data assimilation system 4D-LETKF/AGCM-CPTEC using data from the BARCA/LBA field experiment. In: THE MEETING OF THE AMERICAS, 2010, Foz do Iguaçu, Paraná, Brazil. **Proceedings...** Washington, DC, United States of America: American Geophysical Union, 2010. 3

MELLOR, G. L.; YAMADA, T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 20, n. 4, p. 851–875, nov. 1982. ISSN 1944-9208. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/RG020i004p00851>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 54

MOLTENI, F. Atmospheric simulations using a GCM with simplified physical parametrizations. I: model climatology and variability in multi-decadal experiments. **Climate Dynamics**, Springer Berlin / Heidelberg, v. 20, p. 175–191, 2003. ISSN 0930-7575. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00382-002-0268-2>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 25

OTT, E.; HUNT, B. R.; SZUNYOGH, I.; ZIMIN, A. V.; KOSTELICH, E. J.; CORAZZA, M.; KALNAY, E.; PATIL, D. J.; YORKE, J. A. **Exploiting local low dimensionality of the atmospheric dynamics for efficient ensemble Kalman filtering**. [s.n.], 2002. ArXiv:archive/paper 020358v3. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/physics/0203058v3>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 47

\_\_\_\_\_. A local ensemble Kalman filter for atmospheric data assimilation. **Tellus A**, Munksgaard International Publishers, v. 56, n. 5, p. 415–428, 2004. ISSN 1600-0870. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0870.2004.00076.x>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 47

PANETTA, J.; BARROS, S. R. M.; BONATTI, J. P.; TOMITA, S. S.; KUBOTA, P. Y. Computational cost of CPTEC AGCM. In: ECMWF WORKSHOP ON USE OF HIGH PERFORMANCE COMPUTING IN METEOROLOGY, 12., 2006, Shinfield Park, Reading, Berkshire, United Kingdom. **Proceedings...** Covent Garden, London: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2007. p. 65–83. ISBN 9812775889. 52

PANOFSKY, H. Objective weather-map analysis. **Journal Applied Meteorology**, v. 6, p. 386–392, 1949. 7

PAULEY, P. M.; BAKER, N. L.; LANGLAND, R.; XU, L.; VELDEN, C. The impact of satellite atmospheric motion vectors in the U.S. Navy global data assimilation system - The superob procedure. In: INTERNATIONAL WINDS WORKSHOP, 11., 2012, Auckland, New Zealand. **Proceedings...** Darmstadt, Germany: EUMETSAT, 2012. ISSN 1023-0416. 22

REICHLE, R. H. Data assimilation methods in the earth sciences. **Advances in Water Resources**, Elsevier, v. 31, n. 11, p. 1411–1418, 2008. ISSN 0309-1708. Hydrologic Remote Sensing. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VCF-4RJRVVX-2/2/71ce220ca2b54168573c7ccca7d23a43>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 46

RICHARDSON, L. F. **Weather prediction by numerical process**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1922. 248 p. 1, 7

SOUZA, S. S.; FIGUEROA, S. N.; HERDIES, D. L.; ARAVÉQUIA, J. A.; BONATTI, J. P.; DE GONÇALVES, L. G. 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, Paraná, Brazil. **Proceedings...** Washington, DC, United States of America: American Geophysical Union, 2010. 3

TARASOVA, T. A.; FIGUEROA, S. N.; BARBOSA, H. d. M. J. **Incorporation of new solar radiation scheme into CPTEC GCM**. Cachoeira Paulista, São Paulo, Brasil, 2007. 44 p. INPE-14052-NTC/371. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1915/2006/01.16.10.40>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 54

TIEDTKE, M. The sensitivity of the time mean large scale flow to cumulus convection in the ECMWF model. In: ECMWF WORKSHOP ON CONVECTION IN LARGE SCALE NUMERICAL MODELS, 1., 1983, Shinfield Park, Reading, Berkshire, United Kingdom. **Proceedings...** Shinfield Park, Reading, Berkshire, United Kingdom: ECMWF, 1983. p. 297–316. 54

TODLING, R. An approach to assess observation impact based on observation-minus-forecast residuals. In: ECMWF WORKSHOP ON DIAGNOSTICS OF DATA ASSIMILATION SYSTEM PERFORMANCE, 1., 2009, Shinfield Park, Reading, Berkshire, United Kingdom. **Proceedings...** Shinfield Park, Reading, Berkshire, United Kingdom: ECMWF, 2009. p. 199–202.



\_\_\_\_\_. Comparing two approaches for assessing observation impact. **Monthly Weather Review**, American Meteorological Society, out. 2012. In press. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-12-00100.1>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 13

TODLING, R.; COHN, S. E. Suboptimal schemes for atmospheric data assimilation based on the Kalman filter. **Monthly Weather Review**, American Meteorological Society, v. 122, n. 11, p. 2530–2557, 1994. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493%281994%29122%3C2530%3ASSFADA%3E2.0.CO%3B2>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 46

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, 14., 2006, Florianópolis, SC, Brasil. **Anais...** Rio de Janeiro, RJ, Brasil: SBMET, 2006. CD-ROM. 52

TRÉMOLET, Y. First-order and higher-order approximations of observation impact. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 16, n. 6, p. 693–694(2), dez. 2007. Disponível em: <<http://www.ingentaconnect.com/content/schweiz/mz/2007/00000016/00000006/art00011>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 21

TSUYUKI, T.; MIYOSHI, T. Recent progress of data assimilation methods in meteorology. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 85B, p. 331–361, 2007. 7

WHITAKER, J. S.; COMPO, G. P.; WEI, X.; HAMILL, T. M. Reanalysis without radiosondes using ensemble data assimilation. **Monthly Weather Review**, American Meteorological Society, v. 132, n. 5, p. 1190–1200, 2004. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493%282004%29132%3C1190%3ARWRUED%3E2.0.CO%3B2>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 46

WMO. **Global observing system**. 2012. Disponível em: <<http://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/GOS.html>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 31

XUE, Y.; SELLERS, P. J.; KINTER, J. L.; SHUKLA, J. A Simplified Biosphere Model for Global Climate Studies. **Journal of Climate**, American Meteorological Society, v. 4, n. 3, p. 345–364, mar. 1991. ISSN 0894-8755. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0442%281991%29004%3C0345%3AASBMFG%3E2.0.CO%3B2>>. Acesso em: 14 nov. 2012. 54