



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15480-TDI/1423

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DAS
PERTURBAÇÕES EOF EXTRATROPICAIS E SEU
IMPACTO NA PREVISÃO DE TEMPO DE MÉDIO
PRAZO POR CONJUNTO**

Antônio Marcos Mendonça

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelo
Dr. José Paulo Bonatti, aprovada em 10 de outubro de 2008

Registro do documento original:

<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/09.12.14.10>

INPE
São José dos Campos
2008

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

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

Membros:

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

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

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

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

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

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

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

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

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

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



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15480-TDI/1423

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DAS
PERTURBAÇÕES EOF EXTRATROPICAIS E SEU
IMPACTO NA PREVISÃO DE TEMPO DE MÉDIO
PRAZO POR CONJUNTO**

Antônio Marcos Mendonça

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelo
Dr. José Paulo Bonatti, aprovada em 10 de outubro de 2008

Registro do documento original:

<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/09.12.14.10>

INPE
São José dos Campos
2008

M523e Mendonça, Antônio Marcos.

Estudo das características das perturbações EOF extratropicais e seu impacto na previsão de tempo de médio prazo por conjunto / Antônio Marcos Mendonça. – São José dos Campos: INPE, 2008.

237p. ; (INPE-15480-TDI/1423)

Tese (Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

1. Modelagem atmosférica. 2. Previsão numérica de tempo por conjunto. 3. Instabilidade baroclínica. 4. Avaliações estatísticas. 5. Furacão Catarina. I.Título.

CDU 551.511.3

Copyright © 2008 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, microfílmico, reprográfico ou outros, sem a permissão escrita da Editora, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2008 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, microfilming, recording or otherwise, without written permission from the Publisher, 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.

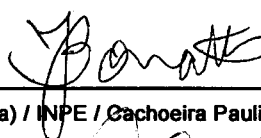
**Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Doutor(a) em
Meteorologia**

Dr. Prakki Satyamurty



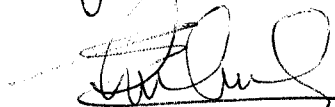
Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. José Paulo Bonatti



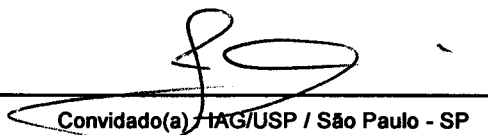
Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Marcelo Enrique Seluchi



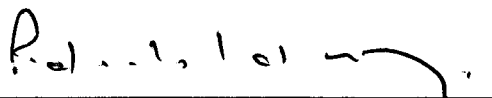
Membro da Banca / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Tércio Ambrizzi



Convidado(a) / IAG/USP / São Paulo - SP

Dr. Pedro Leite da Silva Dias



Convidado(a) / LNCC / Petrópolis - RJ

Aluno (a): Antônio Marcos Mendonça

São José dos Campos, 10 de outubro de 2008

Eu tenho um sonho no qual um dia esta nação se erguerá e viverá o verdadeiro significado do seu credo... que todos os homens são criados iguais...

Martin Luther King

Com carinho para minha esposa Renata Mendonça, e para os meus adorados filhos Matheus e Camila Mendonça.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por cada pequena graça que me ajuda a construir meu caminho.

A minha esposa Renata Mendonça, a quem serei eternamente grato pelo incansável apoio, dedicação, motivação, enfim por ter sido parte fundamental de todo o processo do meu doutoramento.

A meus filhos Matheus e Camila Mendonça, pelo carinho e pelas incontáveis alegrias que proporcionam mesmo sem saberem.

Ao Dr. José Paulo Bonatti, pela orientação segura, pelas discussões, e confiança que foram importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

A meus pais, João e Maria, pelas orações, incentivo e confiança em todas as fases do doutorado.

A meus irmãos, Jesus, Cristina, Adriana e Reinaldo, meus cunhados (as), e sobrinhos (as) pelo apoio, amizade e carinho que foram dedicados a mim, não apenas durante o doutorado, mas especialmente durante ele.

A meus sogros Wilson e Carmen e ao meu cunhado Rodrigo, pelo incentivo e pelo apoio em diversos momentos quando as tarefas diárias ficavam difíceis.

À Silvana A. N. D. Porto, pelas orações, amizade, compreensão e orientações que ajudaram a conciliar de forma mais equilibrada as diversas atividades em que estava envolvido, entre elas o doutorado.

À turma de doutorado, TURMA 10: Adma Raia, André Nunes, Gilvan Sampaio, Luz Adriana, Maria Luciene, Marco Aurélio, Paula Souza, Roberto Rozante, Wagner Soares, com quem tive o prazer de conviver durante estes vários anos. Obrigado pela amizade, companheirismo, união e descontraídas discussões científicas.

Aos membros do Conselho de Curso da Meteorologia do INPE, em especial à Dra. Marley Moscati e ao Dr. Julio Pablo que se empenharam para resolver algumas questões importantes sobre os alunos de doutorado da Turma de 2003.

À Dra. Mariane Mendes Coutinho pelas discussões sobre o assunto da Tese e pelas sugestões sobre a primeira versão do artigo derivado da mesma.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e ao Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), pela disponibilização dos equipamentos, instalações e infra-estrutura que permitiram realizar os experimentos propostos.

Aos membros da banca examinadora, Dr. Prakki Satyamurty, Dr. Marcelo Enrique Seluchi, Dr. Pedro Leite da Silva Dias, Dr. Tércio Ambrizzi, pelas correções e sugestões apresentadas.

Há muito mais pessoas que gostaria de agradecer, certamente não conseguiria me lembrar de todas neste momento, mas de qualquer forma, agradeço a todos que de forma direta ou indireta colaboraram para a realização deste trabalho. A todos, muito obrigado!!

RESUMO

As características das perturbações EOF extratropicais são estudadas e seu impacto na previsão de tempo de médio prazo por conjunto é avaliado a partir de simulações com o Sistema de Previsão de Tempo por Conjunto do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (EPS-CPTEC). O método EOF, originalmente aplicado sobre regiões tropicais e para os campos de vento horizontal e temperatura, utiliza funções ortogonais empíricas (EOF) para determinar as perturbações iniciais de crescimento rápido, denominadas perturbações ótimas. Sete experimentos são realizados a fim de investigar os mecanismos responsáveis pelo crescimento das perturbações EOF iniciais nos extratropicais. Este estudo é importante, já que os mecanismos de crescimento das perturbações nos trópicos são diferentes daqueles de latitudes médias, e as características das perturbações EOF nesta região é ainda desconhecido. Além da investigação das características das perturbações EOF em latitudes médias, também são realizadas análises sobre a inclusão de perturbações iniciais adicionais nos campos de pressão a superfície (P) e umidade específica (Q), perturbações em áreas alvos (*target areas*), e modificações na técnica de seleção dos modos de maior crescimento. Um teste utilizando uma versão simplificada do método de perturbação de condições iniciais *breeding of growing modes* também é realizado. Os resultados são apresentados para um período de verão austral (15 de dezembro de 2004 a 15 de fevereiro de 2005) e um estudo de caso de evento severo, o ciclone Catarina, ocorrido em março de 2004. Índices estatísticos adequados para a previsão de tempo por conjunto são calculados para avaliar, objetivamente, o impacto das modificações propostas em cada experimento, na qualidade das previsões de tempo por conjunto. Os resultados mostram que as perturbações baseadas em EOF extratropicais desenvolvem-se preferencialmente próximas a regiões com alta baroclinicidade em latitudes médias e próximas a áreas de sistemas sinóticos importantes que atuam nos trópicos-extratropicais do Hemisfério Sul durante o verão austral. Perturbações em P e Q são importantes para obter perturbações que são espacialmente mais organizadas e com estrutura mais baroclínica, em latitudes médias. Esta modificação também produz perturbações que crescem mais rápido do que naqueles casos em que não são aplicadas perturbações em P e Q, durante a integração não linear do modelo. Avaliações estatísticas indicam que as perturbações baseadas em EOF extratropicais estendem-se sobre um subespaço no espaço de fase representando erros de crescimento rápido, contribuindo para melhoria da qualidade das previsões por conjunto, tanto num sentido determinístico quanto probabilístico e, além disso, incluem mais diversidade às perturbações iniciais do sistema de previsões. Perturbações baseadas em EOF regionais, calculadas separadamente sobre o norte da América do Sul e sul da América do Sul, em adição a perturbações hemisféricas contribuem, em um sentido geral, para melhoria das previsões locais sobre a região alvo. O método *breeding* simplificado apresenta desempenho semelhante ao método EOF nos extratropicais, indicando ligeira vantagem apenas no espalhamento dos membros nesta região. Entretanto, nos trópicos e América do Sul, o método EOF apresenta melhores resultados, indicando que a

utilização deste método, nestas regiões, é uma opção mais adequada. Os resultados do estudo de caso do ciclone Catarina mostram que perturbações adicionais nos extratropicos e nos campos P e Q aumentam a capacidade dos membros do conjunto em indicar a presença do sistema, além de melhorar a previsão do valor da pressão no centro do ciclone.

**STUDY OF THE EXTRATROPICAL EOF PERTURBATION
CHARACTERISTICS AND THEIR IMPACT ON THE MEDIUM RANGE
WEATHER ENSEMBLE PREDICTION**

ABSTRACT

The characteristics of the extratropical EOF perturbations are studied and their impact on the medium range ensemble weather prediction is evaluated, using simulations with the Center for Weather Prediction and Climate Studies Ensemble Weather Prediction System (CPTEC-EPS). The EOF method, originally applied over tropical regions and for horizontal wind and temperature fields, uses empirical orthogonal functions (EOF) to determine the fast growing initial perturbations, named optimal perturbations. Seven experiments are performed in order to investigate the main mechanisms related to the EOF perturbations growth in the extratropics. This study is relevant since the mechanisms for perturbation growth in the tropics are different from those of midlatitudes. Also, the characteristics of extratropical EOF perturbations were not studied yet. Besides the investigation on the extratropical EOF characteristics, analyses about the inclusion of additional initial perturbations in the surface pressure (P) and specific humidity (Q) fields, perturbations on target areas, and modifications in the methodology for selecting the fast growing modes are also conducted. A test using a simplified version of the breeding of growing modes method for initial perturbations is also performed. The results are presented for a period of austral summer (December 15, 2004 to February 15, 2005) and for a case study of a severe event, the cyclone Catarina, occurred in March 2004. Suitable statistical scores for ensemble weather forecasting are calculated to assess objectively the impact that modifications proposed in each experiment has on the quality of ensemble weather predictions. The results show that extratropical EOF perturbations develops preferentially near regions with high baroclinicity in midlatitudes and close to areas of important synoptic systems that act in the tropics-extratropics of the Southern Hemisphere during the austral summer. Perturbations on P and Q are important in obtaining perturbations that are more organized and with more baroclinic structures in midlatitudes. This modification also produces perturbations that grow faster than in those cases in which no perturbations are applied to P and Q, during the nonlinear model integration. Statistical evaluation indicates that extratropical EOF perturbations span a subspace in the phase space representing fast-growing errors, contributing to the enhancement of the ensemble forecast quality in both deterministic and probabilistic sense and, moreover, including more diversity in the initial perturbations. Regional EOF Perturbations computed separately over northern South America and southern South America in addition to hemispheric perturbations contribute in a general sense to the

improvement of local forecasts over the target region. The simplified breeding method presents a performance similar to that of EOF method over extratropics, showing slight advantage only in the ensemble spread in this region. However, the EOF method is more skillful over tropics and South America, indicating that it is more suitable for both regions. The results of the case study for the cyclone Catarina show that additional EOF perturbations over the extratropics and on P and Q fields increase the ability of the ensemble members in simulating the system and contribute to produce better predictions of the cyclone central pressure.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

1	INTRODUÇÃO	33
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	39
2.1	Dinâmica e Incertezas nas Formulação dos Modelos	39
2.2	Incerteza nas Condições Iniciais	40
2.3	Interação Trópicos/Extratrópicos na Atmosfera	44
2.4	Influência dos Processos Físicos Úmidos na Seleção das Perturbações	44
3	DADOS E METODOLOGIA	47
3.1	Condições Iniciais, Climatologia e Período de Avaliação	47
3.2	Modelo de Circulação Geral da Atmosfera do CPTEC	48
3.3	O Método <i>EOF-Based Perturbation</i> Operacional do CPTEC/INPE	49
3.4	A Versão Simplificada do Método <i>Breeding of Growing Modes</i> ...	53
3.5	Descrição dos Experimentos	56
3.6	Medidas de Desempenho das Previsões	61
3.6.1	Conjunto Médio	62
3.6.2	Espalhamento do Conjunto	62
3.6.3	Correlação do Padrão de Anomalias	63
3.6.4	Raiz do Erro Quadrático Médio na Área	64
3.6.5	Brier Score	65
3.6.6	Análise da Correlação entre a Perturbação e o Erro	66

3.6.7	Características das Previsões a serem Avaliadas	68
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
4.1	Características das Perturbações EOF e <i>Breeding</i>	71
4.2	Perfil Vertical e Espectro de Energia das Perturbações	92
4.3	Desempenho das Previsões Baseado em Índices Estatísticos ...	104
4.3.1	Previsão de Controle VS. Conjunto Médio	105
4.3.2	Impacto do Cálculo de Perturbações EOF Adicionais para os Extratropicos e para os Campos de Pressão à Superfície e Umidade Específica	107
4.3.3	Impacto de Perturbações Regionais Calculadas sobre a AS ...	119
4.3.4	Seleção das Perturbações EOF Baseada na Taxa de Crescimento Linear dos Coeficientes das EOFs	123
4.3.5	Impacto de Perturbações Baseadas no <i>Breeding of Growing Modes</i> Simplificado	128
4.4	Estudo de Caso: Ciclone Catarina (Março de 2004)	132
5	CONCLUSÕES	147
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	151
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153
	ANEXO A – Artigo aceito para publicação no periódico Monthly Weather Review	161
	ANEXO B – Artigo submetido para o periódico Atmospheric Science Letters, sob revisão	223

LISTA DE FIGURAS

- 3.1 Diagrama esquemático do método EOF de geração de condições iniciais perturbadas utilizado operacionalmente no CPTEC/INPE e da previsão de tempo por conjunto subsequente. O processo inicia-se com a perturbação randômica nos campos de V e T da condição inicial (CI), na parte esquerda da figura e termina com a produção dos membros do conjunto na parte direita da figura 52
- 3.2 Diagrama esquemático do método breeding de geração das condições iniciais perturbadas 54
- 3.3 Regiões de perturbação utilizadas com o método EOF: a) região de perturbação utilizada operacionalmente no CPTEC/INPE; b) regiões que são perturbadas nos diversos experimentos do trabalho. NAS: norte da América do Sul, SAS: sul da América do Sul 59
- 4.1 Média de janeiro de 2005, no tempo inicial, para a altura geopotencial em 500 hPa. Conjunto Médio (linhas) e espalhamento (sombreado) para os experimentos (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR e (g) BRCP. Valor absoluto do índice de Eady em (h). Os intervalos dos contornos são 5 m para o espalhamento do conjunto e 0.2 dia^{-1} para o índice de Eady. Em (a) e (c), os valores do espalhamento foram multiplicados por 2 72
- 4.2 Informações do estado inicial de 20 de janeiro de 2005 às 1200 UTC, sobre o Oceano Atlântico Sul: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa) e vetor vento em 1000 hPa (m s^{-1}), (b) altura geopotencial em 500 hPa (m, contornos) e índice de Eady (dia^{-1} , sombreado); (c) altura geopotencial em 250 hPa (m) e vetor vento (m s^{-1}). O intervalo dos contornos é 0.3 dia^{-1} para o índice de Eady em (b). As referências para as magnitudes dos ventos são indicadas abaixo dos painéis (a) e (c) 78
- 4.3 Perturbações EOF iniciais de 20 de janeiro de 2005 às 1200 UTC dos campos de pressão à superfície e vetor vento, obtidos a partir da série temporal de diferenças entre a previsão de controle e a previsão randomicamente perturbada iniciada a partir da primeira condição inicial perturbada randomicamente ($n=1$, ver seção 3.3), para os experimentos: (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR, (g) BRCP e (h) perturbações randômicas. O intervalo dos contornos é 1 hPa para a pressão à superfície. As referências para as magnitudes do vento são indicadas abaixo dos painéis 81

- 4.4 Perturbações EOF iniciais de 20 de janeiro de 2005 às 1200 UTC dos campos de pressão à superfície e vetor vento, obtidos a partir da série temporal de diferenças entre a previsão de controle e a previsão randomicamente perturbada iniciada a partir da segunda condição inicial perturbada randomicamente ($n=2$, ver seção 3.3), para os experimentos: (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR, (g) BRCP e (h) perturbações randômicas. O intervalo dos contornos é 1 hPa para a pressão à superfície. As referências para as magnitudes do vento são indicadas abaixo dos painéis 82
- 4.5 Secção vertical longitude-pressão de 20 de janeiro de 2005 às 1200 UTC das perturbações EOF em 44S para o vento meridional no tempo inicial, obtido a partir da série temporal de diferenças entre a previsão de controle e a previsão perturbada randomicamente iniciada a partir da primeira condição inicial perturbada randomicamente ($n=1$, ver seção 3.3), para os experimentos: (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR, (g) BRCP e (h) perturbações randômicas. O intervalo dos contornos é 1 m s^{-1} 85
- 4.6 Secção vertical longitude-pressão de 20 de janeiro de 2005 às 1200 UTC das perturbações EOF em 42S para o vento meridional no tempo inicial, obtido a partir da série temporal de diferenças entre a previsão de controle e a previsão perturbada randomicamente iniciada a partir da segunda condição inicial perturbada randomicamente ($n=2$, ver seção 3.3), para os experimentos: (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR, (g) BRCP e (h) perturbações randômicas. O intervalo dos contornos é 1 m s^{-1} 87
- 4.7 Secção vertical longitude-pressão da evolução não linear de 48 horas das perturbações da componente meridional do vento apresentadas na Figura 4.5, mas em 45S, obtida como a diferença entre as previsões de 48 horas iniciadas a partir da condição inicial de controle (CIC) e da condição inicial perturbada na qual as perturbações EOF apresentadas nas Figuras 4.3 e 4.5 foram adicionadas à CIC. A condição inicial de controle é válida para 20 de janeiro de 2005 às 1200 UTC. Para os experimentos: (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR, (g) BRCP e (h) perturbações randômicas 89

- 4.8 Secção vertical longitude-pressão da evolução não linear de 48 horas das perturbações da componente meridional do vento apresentadas na Figura 4.6, mas em 45S, obtida como a diferença entre as previsões de 48 horas iniciadas a partir da condição inicial de controle (CIC) e da condição inicial perturbada na qual as perturbações EOF apresentadas nas Figuras 4.4 e 4.6 foram adicionadas à CIC. A condição inicial de controle é válida para 20 de janeiro de 2005 às 1200 UTC. Para os experimentos: (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR, (g) BRCP e (h) perturbações randômicas 90
- 4.9 Perfil vertical das contribuições de cada campo perturbado para a energia total, média sobre as sete perturbações EOF válidas para a condição inicial de 20 de janeiro de 2005 as 1200 UTC, e média sobre o Hemisfério Norte. As linhas tracejadas representam as contribuições da energia cinética (K), as linhas pontilhadas as contribuições da temperatura (T), as linhas traço-ponto as contribuições da umidade (Q), os triângulos as contribuições da pressão à superfície (P), e as linhas contínuas a soma de todas as contribuições. Os perfis são para os experimentos (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR, (g) BRCP, (h) perturbações randômicas 94
- 4.10 Perfil vertical das contribuições de cada campo perturbado para a energia total, média sobre as sete perturbações EOF das previsões de 48 horas, válidas para 22 de janeiro de 2005 às 1200 UTC, e média sobre todo o globo na horizontal. As linhas tracejadas representam as contribuições da energia cinética (K), as linhas pontilhadas as contribuições da temperatura (T), as linhas traço-ponto as contribuições da umidade (Q), os triângulos as contribuições da pressão à superfície (P), e as linhas contínuas a soma de todas as contribuições. Os perfis são para os experimentos (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR, (g) BRCP, (h) perturbações randômicas 96
- 4.11 Perfil vertical das contribuições de cada campo perturbado para a energia total, média sobre as sete perturbações EOF válidas para a condição inicial de 20 de janeiro de 2005 as 1200 UTC, e média sobre o Hemisfério Norte. As linhas tracejadas representam as contribuições da energia cinética (K), as linhas pontilhadas as contribuições da temperatura (T), as linhas traço-ponto as contribuições da umidade (Q), os triângulos as contribuições da pressão à superfície (P), e as linhas contínuas a soma de todas as contribuições. Os perfis são para os experimentos (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR, (g) BRCP, (h) perturbações randômicas 98

- 4.12 Perfil vertical das contribuições de cada campo perturbado para a energia total, média sobre as sete perturbações EOF válidas para a condição inicial de 20 de janeiro de 2005 as 1200 UTC, e média sobre o Hemisfério Sul. As linhas tracejadas representam as contribuições da energia cinética (K), as linhas pontilhadas as contribuições da temperatura (T), as linhas traço-ponto as contribuições da umidade (Q), os triângulos as contribuições da pressão à superfície (P), e as linhas contínuas a soma de todas as contribuições. Os perfis são para os experimentos (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR, (g) BRCP, (h) perturbações randômicas 99
- 4.13 Perfil vertical das contribuições de cada campo perturbado para a energia total, média sobre as sete perturbações EOF válidas para a condição inicial de 20 de janeiro de 2005 as 1200 UTC, e média sobre os trópicos. As linhas tracejadas representam as contribuições da energia cinética (K), as linhas pontilhadas as contribuições da temperatura (T), as linhas traço-ponto as contribuições da umidade (Q), os triângulos as contribuições da pressão à superfície (P), e as linhas contínuas a soma de todas as contribuições. Os perfis são para os experimentos (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR, (g) BRCP, (h) perturbações randômicas 100
- 4.14 Distribuição espectral da energia total, média sobre as sete perturbações EOF válidas para a condição inicial de 20 de janeiro de 2005 as 1200 UTC na coluna da esquerda e para as perturbações das previsões de 48 horas válidas para 22 de janeiro de 2005 as 1200 UTC na coluna da direita. Média sobre todo o globo em (a) e (b), Hemisfério Norte em (c) e (d), Hemisfério Sul (e) e (f), e trópicos (g) e (h). As linhas contínuas referem-se aos resultados do experimento OPER, linhas pontilhadas ao TROP, linhas tracejado curto ao EXT1, linhas tracejado longo ao EXT2, linhas traço ponto ao ETSA, linhas traço ponto ponto ao LNGR, linhas tracejadas com marcadores circulares ao BRCP e linhas pontilhadas com sinais de adição ao experimento com perturbações randômicas 103

- 4.15 Média no período de 15 de dezembro de 2004 a 15 de fevereiro de 2005 da correlação do padrão de anomalias (PAC) (painéis superiores) e da raiz do erro quadrático médio (RMSE) (painéis inferiores), das previsões determinísticas (DET, linhas tracejadas) e conjunto médio para o experimento OPER (linhas contínuas). Os valores referem-se a altura geopotencial em 500 hPa sobre as regiões: (a) e (e) Hemisfério Norte, (b) e (f) Hemisfério Sul e (d) e (h) América do Sul; e para a componente zonal do vento em 850 hPa sobre os trópicos em (c) e (g). As barras verticais nos painéis superiores indicam os erros estatísticos para um intervalo de confiança de 90 % para o experimento OPER 106
- 4.16 Média no período de 15 de dezembro de 2004 a 15 de fevereiro de 2005. Painéis superiores: correlação do padrão de anomalias (PAC) do conjunto médio. Painéis inferiores: raiz do erro quadrático médio (RMSE) do conjunto médio (linhas grossas) e espalhamento do conjunto (linhas finas). Para os experimentos OPER (linhas contínuas), TROP (linhas tracejadas), EXT1 (linhas pontilhadas) e EXT2 (linhas traço longo-ponto). Os valores referem-se à altura geopotencial em 500 hPa sobre as regiões: (a) e (e) Hemisfério Norte, (b) e (f) Hemisfério Sul e (d) e (h) América do Sul; e para a componente zonal do vento em 850 hPa sobre os trópicos em (c) e (g). As barras verticais nos painéis superiores indicam os erros estatísticos para um intervalo de confiança de 90 % para o experimento OPER 108
- 4.17 Média no período de 15 de dezembro de 2004 a 15 de fevereiro de 2005. Painéis superiores: Brier skill score (BSS), considerando os intervalos de probabilidade de acordo com o número de membros do conjunto. Painéis inferiores: correlação entre os erros da previsão de controle e as perturbações do conjunto (PECA), valores médios das 14 perturbações individuais (linhas finas) e valores para uma combinação ótima das perturbações individuais (linhas grossas), para os experimentos OPER (linhas contínuas), TROP (linhas tracejadas), EXT1 (linhas pontilhadas) e EXT2 (linhas traço longo-ponto). Os valores referem-se à altura geopotencial em 500 hPa sobre as regiões: (a) e (e) Hemisfério Norte, (b) e (f) Hemisfério Sul e (d) e (h) América do Sul; para a componente zonal do vento em 850 hPa sobre os trópicos em (c); e para o campo tri-dimensional multi-variável (U, V, T) em 850, 500 e 250 hPa sobre os trópicos em (g) 109

- 4.18 Média no período de 15 de dezembro de 2004 a 15 de fevereiro de 2005. Painéis superiores: correlação do padrão de anomalias (PAC) do conjunto médio. Painéis inferiores: raiz do erro quadrático médio (RMSE) do conjunto médio (linhas grossas) e espalhamento do conjunto (linhas finas). Para os experimentos EXT2 (linhas tracejadas) e ETSA (linhas contínuas). Os valores referem-se à altura geopotencial em 500 hPa sobre as regiões: (a) e (e) Hemisfério Norte, (b) e (f) Hemisfério Sul e (d) e (h) América do Sul; e para a componente zonal do vento em 850 hPa sobre os trópicos em (c) e (g) 121
- 4.19 Média no período de 15 de dezembro de 2004 a 15 de fevereiro de 2005. Painéis superiores: Brier skill score (BSS), considerando os intervalos de probabilidade de acordo com o número de membros do conjunto. Painéis inferiores: correlação entre os erros da previsão de controle e as perturbações do conjunto (PECA), valores médios das 14 perturbações individuais (linhas finas) e valores para uma combinação ótima das perturbações individuais (linhas grossas), para os experimentos EXT2 (linhas tracejadas) e ETSA (linhas contínuas). Os valores referem-se à altura geopotencial em 500 hPa sobre as regiões: (a) e (e) Hemisfério Norte, (b) e (f) Hemisfério Sul e (d) e (h) América do Sul; para a componente zonal do vento em 850 hPa sobre os trópicos em (c); e para o campo tri-dimensional multi-variável (U, V, T) em 850, 500 e 250 hPa sobre os trópicos em (g) 122
- 4.20 Número de vezes que os modos EOF de 1 a 4 foram selecionados durante o período de 15 de dezembro de 2004 a 15 de fevereiro de 2005, para cada campo perturbado da análise no experimento LNGR. Os valores representam uma soma sobre todo o período (60 dias) usado neste estudo e sobre as cinco regiões perturbadas usadas no experimento LNGR 124
- 4.21 Média no período de 15 de dezembro de 2004 a 15 de fevereiro de 2005. Painéis superiores: correlação do padrão de anomalias (PAC) do conjunto médio. Painéis inferiores: raiz do erro quadrático médio (RMSE) do conjunto médio (linhas grossas) e espalhamento do conjunto (linhas finas). Para os experimentos ETSA (linhas tracejadas) e LNGR (linhas contínuas). Os valores referem-se à altura geopotencial em 500 hPa sobre as regiões: (a) e (e) Hemisfério Norte, (b) e (f) Hemisfério Sul e (d) e (h) América do Sul; e para a componente zonal do vento em 850 hPa sobre os trópicos em (c) e (g) 126

- 4.22 Média no período de 15 de dezembro de 2004 a 15 de fevereiro de 2005. Painéis superiores: Brier skill score (BSS), considerando os intervalos de probabilidade de acordo com o número de membros do conjunto. Painéis inferiores: correlação entre os erros da previsão de controle e as perturbações do conjunto (PECA), valores médios das 14 perturbações individuais (linhas finas) e valores para uma combinação ótima das perturbações individuais (linhas grossas), para os experimentos ETSA (linhas tracejadas) e LNGR (linhas contínuas). Os valores referem-se à altura geopotencial em 500 hPa sobre as regiões: (a) e (e) Hemisfério Norte, (b) e (f) Hemisfério Sul e (d) e (h) América do Sul; para a componente zonal do vento em 850 hPa sobre os trópicos em (c); e para o campo tri-dimensional multi-variável (U, V, T) em 850, 500 e 250 hPa sobre os trópicos em (g) 127
- 4.23 Média no período de 15 de dezembro de 2004 a 15 de fevereiro de 2005. Painéis superiores: correlação do padrão de anomalias (PAC) do conjunto médio. Painéis inferiores: raiz do erro quadrático médio (RMSE) do conjunto médio (linhas grossas) e espalhamento do conjunto (linhas finas). Para os experimentos ETSA (linhas tracejadas) e LNGR (linhas contínuas). Os valores referem-se à altura geopotencial em 500 hPa sobre as regiões: (a) e (e) Hemisfério Norte, (b) e (f) Hemisfério Sul e (d) e (h) América do Sul; e para a componente zonal do vento em 850 hPa sobre os trópicos em (c) e (g) 130
- 4.24 Média no período de 15 de dezembro de 2004 a 15 de fevereiro de 2005. Painéis superiores: Brier skill score (BSS), considerando os intervalos de probabilidade de acordo com o número de membros do conjunto. Painéis inferiores: correlação entre os erros da previsão de controle e as perturbações do conjunto (PECA), valores médios das 14 perturbações individuais (linhas finas) e valores para uma combinação ótima das perturbações individuais (linhas grossas), para os experimentos EXT2 (linhas tracejadas) e BRCP (linhas contínuas). Os valores referem-se à altura geopotencial em 500 hPa sobre as regiões: (a) e (e) Hemisfério Norte, (b) e (f) Hemisfério Sul e (d) e (h) América do Sul; para a componente zonal do vento em 850 hPa sobre os trópicos em (c); e para o campo tri-dimensional multi-variável (U, V, T) em 850, 500 e 250 hPa sobre os trópicos em (g) 131

- 4.25 Imagem no canal infravermelho do satélite GOES-12 válida para 13:39 UTC de 26 de Março de 2004. Pode ser visto o ciclone Catarina, com um *olho* bem configurado, próximo da costa brasileira. Fonte: Divisão de Satélites Ambientais – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DAS/CPTEC/INPE) 133
- 4.26 Pressão ao nível médio do mar (hPa) (contornos) e velocidade do vento (m s^{-1}) (cores) sobre a região de atuação do ciclone Catarina para a condição inicial do NCEP de 24 de março de 2004 às 1200 UTC. A pressão no centro do ciclone é de cerca de 1008 hPa e os ventos mais intensos nas bordas dos sistema é de cerca de 14 m s^{-1} 134
- 4.27 Trajetória do ciclone Catarina segundo as análises do NCEP na resolução T126L28. A posição do ciclone a cada 12 horas é indicada pelos pontos. O ponto mais ao norte representa o início da trajetória em 20 de março de 2004 às 1200 UTC e o último ponto (sobre o continente) corresponde à posição final em 28 de março de 2004 às 1200 UTC 135
- 4.28 Perturbações iniciais do campo de pressão à superfície (valores positivos: linhas contínuas; valores negativos: linhas tracejadas), sobrepostas ao campo de pressão ao nível médio do mar (linhas pontilhadas). A coluna da esquerda são para as perturbações do membro 1 e as da direita são do membro 2, para os experimentos TROP (a e b), EXT2 (c e d), ETSA (e e f), LNDR (g e h) e BRCP (i e j). Os experimentos OPER e EXT1 não contém perturbações no campo de pressão e por isso são omitidos. O valor da isóbara mais interna do campo de pressão é 1011 hPa e o intervalo entre elas é de 1 hPa 137
- 4.29 Perturbações iniciais na magnitude do campo de vento em 500 hPa (valores positivos: linhas contínuas; valores negativos: linhas tracejadas), sobrepostas ao campo de altura geopotencial em 500 hPa (linhas pontilhadas). A coluna da esquerda são para as perturbações do membro 1 e as da direita são do membro 2, para os experimentos OPER (a e b), TROP (c e d), EXT1 (e e f), EXT2 (g e h), ETSA (i e j), LNDR (k e l) e BRCP (m e n). O valor da isolinha de altura geopotencial mais interna é 5780 m e o intervalo entre elas é de 10 m 140

- 4.30 Previsão de trajetória do Catarina iniciada a partir de 24 de março de 2004 as 1200 UTC. O prazo máximo de previsão é de quatro dias e as posições são indicadas para cada 12 horas de previsão. As trajetórias são baseadas nas análises do NCEP (linhas sólidas), previsões de controle (linhas tracejadas), conjunto médio (linha pontilhada) e membros individuais do conjunto (pontos). Os painéis referem-se aos experimentos (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR e (g) BRCP 143
- 4.31 Valor da pressão reduzida ao nível do mar no centro do ciclone Catarina. Previsão iniciada em 24 de março de 2004 as 1200 UTC, em função do tempo (em horas) baseado nas análises do NCEP (linhas sólidas), previsão de controle (linhas tracejadas), conjunto médio (linhas pontilhadas) e membros individuais do conjunto (pontos). Os painéis referem-se aos experimentos (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR e (g) BRCP 146

LISTA DE TABELAS

3.1	Valores dos desvios padrões (<i>std</i>) utilizados para reescalonar os campos de umidade específica, para cada nível sigma (σ) do MCGA-CPTEC. Os valores estão multiplicados por um fator de 10^3	57
3.2	Lista dos experimentos realizados e as principais características de cada um: regiões utilizadas para o cálculo das perturbações, campos perturbados e metodologia usada para selecionar os modos instáveis	61
3.3	Regiões utilizadas para o cálculo dos índices estatísticos ..	69
4.1	Média das components <i>confiabilidade</i> (Rel) e <i>resolução</i> (Res, valores entre parênteses) do Brier skill score para todos os experimentos (colunas) e para todos os prazos de previsão (linhas). Os valores foram calculados considerando os intervalos de probabilidade de acordo com o número de membros do conjunto. Os valores referem-se ao campo de altura geopotencial em 500 hPa sobre o Hemisfério Norte. Para cada prazo de previsão, negritos identificam os melhores valores entre os experimentos OPER, TROP, EXT1 e EXT2. Sublinhados identificam os melhores resultados entre os experimentos EXT2 e ETSA. Os valores foram multiplicados por um fator de 10^2	115
4.2	Média das components <i>confiabilidade</i> (Rel) e <i>resolução</i> (Res, valores entre parênteses) do Brier skill score para todos os experimentos (colunas) e para todos os prazos de previsão (linhas). Os valores foram calculados considerando os intervalos de probabilidade de acordo com o número de membros do conjunto. Os valores referem-se ao campo de altura geopotencial em 500 hPa sobre o Hemisfério Sul. Para cada prazo de previsão, negritos identificam os melhores valores entre os experimentos OPER, TROP, EXT1 e EXT2. Sublinhados identificam os melhores resultados entre os experimentos EXT2 e ETSA. Os valores foram multiplicados por um fator de 10^2	116

4.3 Média das components *confiabilidade* (Rel) e *resolução* (Res, valores entre parênteses) do Brier skill score para todos os experimentos (colunas) e para todos os prazos de previsão (linhas). Os valores foram calculados considerando os intervalos de probabilidade de acordo com o número de membros do conjunto. Os valores referem-se à componente zonal do vento em 850 hPa sobre os trópicos. Para cada prazo de previsão, **negritos** identificam os melhores valores entre os experimentos OPER, TROP, EXT1 e EXT2. Sublinhados identificam os melhores resultados entre os experimentos EXT2 e ETSA. Os valores foram multiplicados por um fator de 10^2 117

4.4 Média das components *confiabilidade* (Rel) e *resolução* (Res, valores entre parênteses) do Brier skill score para todos os experimentos (colunas) e para todos os prazos de previsão (linhas). Os valores foram calculados considerando os intervalos de probabilidade de acordo com o número de membros do conjunto. Os valores referem-se ao campo de altura geopotencial em 500 hPa sobre a América do Sul. Para cada prazo de previsão, **negritos** identificam os melhores valores entre os experimentos OPER, TROP, EXT1 e EXT2. Sublinhados identificam os melhores resultados entre os experimentos EXT2 e ETSA. Os valores foram multiplicados por um fator de 10^2 118

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AS	- América do Sul
BS	- Brier Score
BSS	- Brier Skill Score
CIC	- Condição Inicial de Controle
CF	- Previsão de Controle
CPTEC	- Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DSA	- Divisão de Satélites Ambientais
ECMWF	- European Centre for Medium-Range Forecast
EOF	- Funções Ortogonais Empíricas
EM	- Conjunto Médio
EPS	- Sistema de Previsão de Tempo por Conjunto
ET	- Energia Total
FSU	- Florida State University
GL	- Domínio Global
HN	- Hemisfério Norte
HS	- Hemisfério Sul
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
L28	- Número de Camadas Verticais do Modelo (28)
L64	- Número de Camadas Verticais do Modelo (64)
MCGA	- Modelo de Circulação Geral da Atmosfera

MSC	- Meteorological Service of Canada
NAS	- Norte da América do Sul
NCEP	- National Center for Environmental Prediction
NMC	- National Meteorological Center
PECA	- Análise da correlação entre as Perturbações e o Erro das Previsões
PAC	- Correlação do Padrão de Anomalias
RAS	- Relaxed Arakawa-Schubert
REL	- Componente de Confiabilidade do BSS
RES	- Componente de Resolução do BSS
RMSE	- Raiz do Erro Quadrático Médio
SAS	- Sul da América do Sul
SPR	- Espalhamento do Conjunto
sSIB	- Simplified Simple Biosphere Model
SV	- Vetores Singulares
T126	- Truncamento Triangular no Número de Onda Zonal 126
T511	- Truncamento Triangular no Número de Onda Zonal 511
TR	- Trópicos
TRE	- Trópicos Estendidos
U850	- Componente zonal do vento no nível de 850 hPa
UTC	- Coordinated Universal Time
V850	- Componente meridional do vento no nível de 850 hPa

WMO	- World Meteorological Organization
Z500	- Altura Geopotencial no nível de 500 hPa
ZCAS	- Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	- Zona de Convergência Intertropical
ZCPS	- Zona de Convergência do Pacífico Sul

1 INTRODUÇÃO

Prever o estado futuro da atmosfera com elevado grau de acerto é um dos objetivos e, ao mesmo tempo, um contínuo desafio da modelagem numérica da atmosfera. Para aumentar a qualidade das previsões numéricas dois fatores principais devem ser considerados: a representação dos processos físicos e dinâmicos da atmosfera pelos modelos e uma condição inicial que reproduza realisticamente a condição atmosférica no início da integração dos modelos. O rápido desenvolvimento da tecnologia computacional, verificado nas últimas décadas, proporcionou condições para que os processos físicos observados na atmosfera pudessem ser descritos mais detalhadamente dentro dos modelos numéricos. Por outro lado, o advento das informações meteorológicas fornecidas por satélites aumentou significativamente a quantidade de dados disponíveis para geração das análises, ao mesmo tempo em que os métodos de assimilação de dados estão sendo aperfeiçoados (HAMILL, 2002; KALNAY et al., 2002; RABIER et al., 2000). Estes dois fatores contribuem para produção de melhores estimativas das condições iniciais dos modelos. Entretanto, apesar dos avanços na descrição dos processos atmosféricos pelos modelos e a produção de análises melhores, as previsões numéricas da atmosfera divergem do estado real observado após alguns dias de integração. Os erros das previsões numéricas de tempo são causados principalmente pelos dois fatores descritos anteriormente: deficiências do modelo em representar os processos dinâmicos e físicos da atmosfera real, denominado erro externo, e por incertezas contidas na estimativa do estado inicial da atmosfera, chamado erro interno (REYNOLDS et al., 1994).

As deficiências na formulação dos modelos foram consideradas no desenvolvimento de sistemas de previsão de tempo por conjunto que utilizam diferentes esquemas de parametrização ou diferentes modelos para criar um conjunto de previsões (KRISHNAMURTI et al., 2000 e HOUTEKAMER et al., 1996). Em Buizza et al. (1999), os erros randômicos do modelo, devido aos processos físicos parametrizados, foram simulados através da inclusão de

perturbações estocásticas na tendência diabática parametrizada de todas as componentes do vetor estado.

A importância dos estados iniciais nos erros cometidos nas previsões numéricas é explicada pela teoria conhecida como “caos” (LORENZ, 1963, 1965 e 1969) que, de forma simplificada, diz respeito à sensibilidade da evolução temporal de alguns sistemas dinâmicos determinísticos não-lineares às condições iniciais e de fronteira. A atmosfera é um exemplo desse tipo de sistema, de modo que estados iniciais ligeiramente diferentes podem levar a soluções finais marcadamente distintas. Assim, mesmo com um modelo perfeito, como o estado real da atmosfera não é completamente conhecido, os erros inevitavelmente existentes na análise do modelo irão crescer ao longo do tempo de integração, levando ao decaimento da qualidade da previsão com o aumento do prazo, impossibilitando o cálculo do estado futuro da atmosfera indefinidamente.

Uma forma de diminuir essas deficiências é utilizar um método para tratar o problema da incerteza no estado inicial da integração dos modelos, conhecida como técnica de previsão por conjunto (*ensemble forecasting* ou *ensemble prediction*). Uma das finalidades da técnica de previsão por conjunto é diminuir o impacto da incerteza do estado inicial da atmosfera na previsão final, considerando um conjunto de estados iniciais ligeiramente diferentes da análise original, ou seja, condições iniciais perturbadas, e gerando uma saída do modelo para cada um dos estados desse conjunto. Isto implica numa mudança conceitual na forma como as previsões de tempo são apresentadas, passando de um ponto de vista determinístico, representação binária de ocorrência de um evento (0 ou 100 %), para uma representação contínua da distribuição de probabilidades de ocorrência de um evento.

Alguns sistemas de previsão de tempo por conjunto não levam em conta as deficiências na formulação dos modelos e consideram apenas as incertezas contidas na condição inicial. Nestes sistemas, a geração das condições iniciais perturbadas é uma das etapas mais importantes do sistema de previsão. Sob a hipótese de modelo perfeito, busca-se estimar as

perturbações que tem potencial para crescer no tempo e possam produzir um conjunto de previsões que são suficientemente diferentes para dar uma impressão do intervalo provável dos estados atmosféricos futuros (BUIZZA et al., 1999).

Os primeiros centros a implementarem a previsão de tempo por conjunto operacional foram o National Center for Environmental Prediction (NCEP) e o European Centre for Medium-Range Forecast (ECMWF), utilizando os métodos de geração de condições iniciais perturbadas *breeding of growing modes* (TOTH e KALNAY, 1993) (*método breeding*) e o *singular vectors* (MOLTENI et al., 1996), respectivamente. Posteriormente, outros métodos de geração de condições iniciais perturbadas foram desenvolvidos, tais como o método *perturbed observations* (HOUTEKAMER et al., 1996) e mais recentemente, métodos baseados em *Ensemble Kalman Filter* (WEI et al., 2006; OTT et al., 2004; WANG e BISHOP, 2003; BISHOP et al., 2001).

Zhang e Krishnamurti (1999, daqui em diante ZK1999) desenvolveram um método de geração de condições iniciais perturbadas, baseado em uma análise de componentes principais (funções ortogonais empíricas - EOF), denominado *EOF-based perturbation (método EOF)*, com a finalidade de realizar previsões por conjunto de ciclones tropicais. Neste método, o modo mais instável, utilizado como *perturbação ótima*, é obtido a partir do autovetor cujos coeficientes se amplificam com o tempo.

Coutinho (1999) utilizou o método EOF, com algumas adaptações, para produzir condições iniciais perturbadas para o modelo de circulação geral da atmosfera (MCGA) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). Quando comparadas com previsões por conjunto baseadas em perturbações randômicas, as previsões por conjunto utilizando o método EOF apresentaram resultados melhores, além disso, o desempenho do conjunto médio mostrou-se melhor do que o desempenho da previsão de controle. Em outubro de 2001, o CPTEC começou a realizar previsões de tempo por conjunto operacionais a partir de condições iniciais perturbadas através do método EOF (MENDONÇA e BONATTI, 2002).

O método EOF foi originalmente desenvolvido e aplicado para produzir perturbações em regiões tropicais, sendo que nenhum estudo foi realizado para avaliar a habilidade deste método em produzir perturbações adequadas para as latitudes médias. Este é um tema de interesse teórico, pois os mecanismos de crescimento das perturbações nos trópicos são diferentes daqueles de latitudes médias, e a extensão de um método de uma região para outra deve ser acompanhada de uma investigação cuidadosa a respeito das características das perturbações geradas.

Quando ZK1999 desenvolveram o método EOF, as perturbações iniciais foram realizadas apenas nos campos de temperatura e vento. As incertezas iniciais devido aos erros na pressão à superfície e a umidade atmosférica, demais campos que compõem as condições iniciais, foram desprezados. A influência destas incertezas nas características das perturbações EOF iniciais e o seu conseqüente impacto no crescimento das perturbações, tanto em latitudes médias quanto nos trópicos, é ainda desconhecido.

Os resultados de ZK1999 e Coutinho (1999) indicaram que nos trópicos os modos EOF de primeira ordem, ou seja, os autovetores associados aos maiores autovalores são os modos que apresentam maior taxa de crescimento com o tempo. Entretanto, os trabalhos de ZK1999 e Coutinho (1999) foram limitados a um número restrito de casos para a região tropical. Esta característica pode não ser válida para todas as situações, especialmente em latitudes médias.

Perturbações calculadas em regiões globais podem ser importantes para a representação adequada das incertezas associadas aos sistemas de escala sinótica. Entretanto, em algumas situações específicas, especialmente nos casos de sistemas intensos, as características locais das perturbações podem ser fundamentais para uma simulação mais adequada da evolução destes sistemas. Barkmeijer et al. (2001) obteve perturbações mais adequadas para a previsão da trajetória e da intensidade de ciclones tropicais ao limitar o cálculo das perturbações em uma área próxima à região de atuação do sistema. É possível que o cálculo de perturbações EOF regionais sobre a América do Sul, como é realizado nos esquemas que utilizam *target*

perturbations, sejam capazes de produzir perturbações que estejam mais relacionadas ao desenvolvimento dos sistemas que atuam sobre esta região e, conseqüentemente, sejam capazes de dar origem a previsões com maior valor local.

Outra questão natural que surge ao se avaliar um método de perturbação é quanto às semelhanças ou diferenças entre as características deste em relação a outros métodos tradicionalmente empregados para este fim. Resultados da literatura são úteis para comparações qualitativas, mas, como em geral, há certo grau de dependência do modelo utilizado para produzir as perturbações, o número de membros e o período considerado são diferentes, as comparações podem não ser muito precisas. O método de perturbação breeding, tradicionalmente utilizado no NCEP, se aplicado ao MCGA do CPTEC, pode ser útil para o propósito de comparação das características das perturbações EOF.

Neste contexto, os objetivos deste trabalho são verificar se o método EOF é capaz de capturar modos de crescimento rápido em latitudes médias, produzindo perturbações que estão associadas aos mecanismos de crescimento dos sistemas em latitudes médias e avaliar se elas poderiam ser utilizadas para perturbar as condições iniciais nestas regiões, bem como investigar se as perturbações EOF regionais capturam aspectos que são importantes para o desenvolvimento de sistemas locais e, além disso, avaliar a utilização de um método mais geral, para a seleção dos modos EOF de crescimento rápido.

Desta forma, os objetivos específicos deste estudo são:

- 1) investigar as características das perturbações EOFs em latitudes médias;
- 2) investigar o impacto de perturbações na umidade e na pressão à superfície nas características das perturbações EOF;
- 3) avaliar a utilização de *target perturbations* sobre a América do Sul;

- 4) analisar as características dos modos EOF quanto ao crescimento dos seus coeficientes temporais;
- 5) avaliar estatisticamente as previsões, considerando as novas perturbações EOF e utilizando índices adequados para previsão de tempo por conjunto;
- 6) avaliar a previsibilidade do evento *Catarina* através de algumas informações derivadas das previsões por conjunto, levando em conta o impacto das novas perturbações EOF;
- 7) comparar as características das perturbações EOF e as previsões iniciadas com o método EOF com aquelas do método breeding.

Alguns trabalhos relevantes sobre o tema deste estudo são apresentados no Capítulo 2, Revisão Bibliográfica. Os dados, as descrições relevantes a respeito da metodologia usada para configurar e executar os experimentos, bem como os índices estatísticos utilizados para avaliar os resultados são apresentados no Capítulo 3. Os resultados são descritos e discutidos no Capítulo 4. As conclusões são apresentadas no Capítulo 5 e, por fim, algumas sugestões de trabalhos futuros são indicadas no Capítulo 6.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Dinâmica e Incertezas na Formulação dos Modelos

Em modelos de previsão de tempo tradicionais, a representação dos processos dinâmicos é feita a partir das equações primitivas, que consistem, resumidamente, em um conjunto de equações, contendo a continuidade de massa para o ar seco e vapor d'água, a primeira lei da termodinâmica e as equações do movimento com as seguintes simplificações: os termos devido à curvatura da Terra e o efeito da rotação da Terra associado à componente vertical do movimento são desprezados, além disso, a equação do momento vertical é substituída pela aproximação hidrostática (HOLTON, 2004).

Em geral, a resolução espacial dos modelos numéricos não é suficiente para representar todos os processos físicos que ocorrem na atmosfera (processos subgrade), assim, é necessário incluí-los a partir das variáveis previstas pelo modelo, ou seja, através de parametrizações. Os principais processos físicos parametrizados em um modelo de previsão de tempo são os fluxos na camada limite, processos radiativos, convecção úmida e seca e a interação da radiação com as nuvens.

Esforços significativos têm sido empregados na elaboração de parametrizações que representem adequadamente os processos físicos atmosféricos, o que levou ao desenvolvimento de diferentes esquemas de parametrização para descrever um mesmo processo. Um exemplo claro deste avanço são os vários esquemas de convecção profunda descritos na literatura (KUO, 1965; ARAKAWA-SCHUBERT, 1974; GRELL e DEVENYI, 2002; entre outros).

Embora esquemas diferentes descrevam um mesmo processo físico, as hipóteses e as considerações de cada esquema, a respeito da natureza do processo, são distintas e não é uma tarefa simples avaliar qual método é mais adequado para representar a atmosfera real. Isto levou ao desenvolvimento de técnicas de previsão por conjunto que utilizam diferentes esquemas de parametrização, por exemplo, da convecção profunda, para

criar um conjunto de previsões com perturbação na física (KRISHNAMURTI et al., 2000 e http://weatheroffice.ec.gc.ca/ensemble/verifs/model_e.html, 2008). O efeito das incertezas na formulação dos modelos é também abordado em um método descrito por Buizza et al. (1999). Neste esquema, os erros randômicos do modelo, devido aos processos físicos parametrizados, são simulados a partir de perturbações estocásticas na tendência diabática parametrizada das componentes do vetor estado.

2.2 Incerteza nas Condições Iniciais

Alguns sistemas de previsão de tempo por conjunto não levam em conta as incertezas na formulação dos modelos e consideram apenas as incertezas contidas na condição inicial. Nestes sistemas, a geração das condições iniciais perturbadas é uma das etapas mais importantes do processo. Supondo que os modelos sejam perfeitos, busca-se, através de algum método específico, estimar os erros associados às observações que produzirão previsões, possivelmente, mais distintas (SIVILLO et al., 1997).

O método mais simples e o primeiro a ser aplicado a um modelo numérico foi o método "Monte Carlo" (LEITH, 1974), que consiste em tomar variações em torno dos valores da análise inicial adicionando números aleatórios, característicos dos erros das análises, às observações utilizadas. A desvantagem deste método é a grande quantidade de elementos que seriam necessários para representar os estados iniciais possíveis, visto que para cada elemento corresponde uma rodada do modelo. De forma ideal, um conjunto ilimitado de condições iniciais seria necessário para descrever todos os estados atmosféricos possíveis, entretanto, como a taxa de crescimento dos erros depende do regime de circulação da atmosfera, da estação do ano e do domínio geográfico, é possível construir um número limitado de perturbações ótimas que representem os modos de crescimento mais rápidos associados aos padrões atmosféricos da condição inicial. A idéia é eliminar condições iniciais perturbadas que geram previsões muito semelhantes entre si e, através de um número menor de integrações, estimar os cenários atmosféricos futuros mais prováveis.

Os dois métodos mais conhecidos de geração de condições iniciais perturbadas são o *breeding of growing modes* (TOTH e KALNAY, 1993) empregado no NCEP, nos Estados Unidos, e o *Singular Vectors* (MOLTENI et al., 1996) utilizado pelo ECMWF, na Europa, para previsões de tempo por conjunto operacionais. O método breeding é baseado na hipótese de que os modos de crescimento rápido desenvolvem-se naturalmente em um ciclo de assimilação de dados, desta forma as perturbações são obtidas como a diferença entre os pares de previsões perturbadas (negativa e positiva), para o prazo de 24 horas. Estas diferenças são reescaladas para uma amplitude pré-especificada e então adicionadas (subtraídas) a (da) análise de controle para formar o conjunto de condições iniciais perturbadas para a previsão por conjunto seguinte. O *singular vectors* assume que o crescimento dos erros é aproximadamente linear até dois dias de previsão e utiliza uma versão linearizada do modelo, juntamente com seu adjunto, para obter os modos de crescimento rápido através da solução de um problema de autovalor. Diversos trabalhos discutiram as características e avaliaram o desempenho dos dois métodos: Tracton e Kalnay (1993), Whitaker e Lough (1998), Toth e Kalnay (1997), Molteni et al. (1996), Buizza (1997), Àtger (1999), Wei e Toth (2003), Buizza et al. (2005). Em geral, nestes trabalhos é dada maior ênfase para as características de cada método nas regiões de latitudes médias.

Zhang e Krishnamurti (1999) realizaram um trabalho direcionado para sistemas de latitudes tropicais. Eles desenvolveram um mecanismo de geração de condições iniciais baseado em uma análise de componentes principais (funções ortogonais empíricas - EOF), denominado *EOF-based perturbation* ou *método EOF*. Neste método, o modo mais instável, utilizado como *perturbação ótima*, é obtido a partir do autovetor cujos coeficientes se amplificam com o tempo. Eles obtiveram que o autovetor associado ao maior autovalor é que possui esta característica. Coutinho (1999) estudou o impacto da aplicação deste método ao modelo de circulação geral do CPTEC/INPE e seus resultados sugeriram que a técnica poderia, com algumas adaptações, ser utilizada operacionalmente para previsão de tempo por conjunto. No trabalho de Farina et al. (2005) o método EOF foi utilizado

para produzir campos de cisalhamento do vento à superfície perturbados para forçar um modelo dinâmico de previsão de ondas oceânicas e gerar previsões de ondas oceânicas por conjunto. Entre outros resultados, eles obtiveram que a utilização de campos perturbados de cisalhamento do vento à superfície, juntamente com perturbações no espectro inicial das ondas, é uma estratégia mais adequada para previsão de ondas oceânicas por conjunto do que a perturbação apenas no espectro inicial das ondas. Este resultado sugere que o método EOF também pode ser útil para produzir condições de contorno, por exemplo, para modelos de previsão de ondas oceânicas, atmosféricos regionais e outros que dependam de variáveis atmosféricas, para previsões por conjunto.

Mendonça e Bonatti (2006) avaliaram o sistema de previsão de tempo por conjunto do CPTEC/INPE usando índices estatísticos (correlação de anomalias, raiz do erro quadrático médio (RMSE) e mostraram que, ao menos para o geopotencial em 500 hPa, as previsões por conjunto do CPTEC/INPE apresentavam características de um sistema subdispersivo, ou seja, a taxa de crescimento do espalhamento é inferior à taxa de crescimento dos erros das previsões do conjunto médio. Como forma de atenuar esta subdispersão foram sugeridas modificações na região usada para calcular as perturbações. Na versão operacional, as perturbações eram calculadas em um cinturão de latitudes compreendidos entre 45S e 30N para os campos de temperatura e vento. Eles obtiveram que a aplicação do método EOF para calcular perturbações extratropicais adicionais melhorava o desempenho do EPS-CPTEC, principalmente para os primeiros dias de previsão.

O método EOF utiliza perturbações iniciais randômicas para integrar o modelo não linear completo a fim de identificar, num sentido linear, as direções de crescimento rápido das perturbações. Em Hamill et al. (2003) é também apresentado um esquema para gerar vetores singulares aproximados (SVs) usando um conjunto grande de previsões iniciadas a partir de uma análise de controle perturbada randomicamente. Para calcular os vetores singulares, primeiramente eles produzem um conjunto de condições iniciais que contêm além da condição inicial de referência, um

número grande de estados iniciais perturbados randomicamente que são construídos para ser ruído branco numa métrica baseada na energia total, ou seja, tenha energia igual em todas as escalas resolvidas; as perturbações são suficientemente pequenas para garantir que evoluirão linearmente. Um procedimento algébrico é usado para combinar linearmente o conjunto de previsões, a fim de obter a máxima variância na energia total; esta mesma combinação linear é aplicada ao conjunto inicial para determinar os SVs no tempo inicial. Este esquema tem em comum com o método EOF, o uso do modelo não linear completo para propagar as perturbações randômicas iniciais e a hipótese de que as perturbações evoluirão linearmente durante o tempo de otimização. Entretanto, os dois métodos são essencialmente diferentes em termos das demais características. As perturbações SVs são determinadas de acordo com a variância na métrica de energia total e demanda um grande número de membros para produzir boas aproximações dos vetores singulares reais, uma vez que o método considera que as matrizes de covariância amostrais, baseadas nos conjuntos de análises e previsões, devem aproximar-se das matrizes de covariâncias dos erros das análises e das previsões, o que é obtido somente com um número infinito de membros. No método EOF, as perturbações são calculadas como as principais direções nas quais uma previsão não linear perturbada randomicamente diverge da previsão de controle não linear, ou seja, o autovetor associado ao maior autovalor calculado a partir da série temporal dos campos de diferenças; no método EOF, para cada condição inicial perturbada randomicamente, uma suposta perturbação de crescimento rápido é obtida.

O trabalho de Reynolds et al. (1994) mostrou que o crescimento dos erros internos do modelo apresenta dependência latitudinal. Em latitudes médias, a instabilidade baroclínica é o processo mais importante para o desenvolvimento de sistemas sinóticos e o principal mecanismo responsável pelo rápido crescimento dos erros das condições iniciais dos modelos. Já nos trópicos, quando não há a ocorrência de um evento severo, o crescimento dos erros devido à instabilidade dinâmica do modelo é muito menor do que sobre as latitudes médias. Desta forma, Zhang (1997) sugere que as

perturbações sobre os trópicos sejam geradas separadamente daquelas de latitudes médias.

2.3 Interação Trópicos/Extratrópicos na Atmosfera

Diversos trabalhos descrevem a influência que anomalias nos sistemas atmosféricos tropicais exercem sobre a variabilidade observada em algumas regiões dos extratropicos: Wallace e Gutzler (1981), Hoskins e Karoly (1981), Grimm e Silva Dias (1995), Mo e Higgins (1998) ressaltam a influência da região tropical nas latitudes médias. Por outro lado, a propagação de sistemas transientes de latitudes médias em direção aos trópicos pode servir como fonte de energia para os sistemas tropicais. Liebmann e Hartmann (1984) concluíram que na escala de tempo de 5 a 10 dias, as latitudes médias exercem forte influência na região tropical. Esta troca de energia, entre sistemas de baixas e médias latitudes está relacionada com a interação trópicos/extratropicos da atmosfera.

Na escala sazonal, uma grande componente de previsibilidade extratropical é de origem tropical e padrões previsíveis da circulação de escala planetária nos trópicos influenciam as circulações extratropicais através de teleconexões. Para previsões de tempo estendidas (5 a 10 dias) ou sazonal a interanual, os erros (ou processos) ocorrendo em uma parte do globo podem poluir rapidamente previsões em grandes distâncias (influência de processos remotos) a partir da fonte do erro (WEBSTER e CHANG, 1997; ARAVÉQUIA, 2003).

2.4 Influência dos Processos Físicos Úmidos na Seleção das Perturbações

Outro aspecto relevante para previsão de tempo por conjunto é o conhecimento a respeito da influência dos processos físicos parametrizados na seleção das perturbações iniciais. Em latitudes médias, o principal mecanismo responsável pelo desenvolvimento dos sistemas meteorológicos é a instabilidade baroclínica associada ao gradiente meridional de temperatura (CHARNEY, 1947). Entretanto, a liberação de calor latente é

importante para o desenvolvimento de alguns sistemas de latitudes médias, tal como as nuvens vírgula (BONATTI e RAO, 1987). Nos trópicos, o gradiente horizontal de temperatura é pequeno, sendo a liberação de calor latente e a instabilidade barotrópica mecanismos fundamentais para o desenvolvimento dos distúrbios tropicais.

Toth e Kalnay (1997) estudaram as características das perturbações produzidas pelo método *breeding of growing modes* e concluíram que o padrão de perturbação global depende da evolução do fluxo básico baroclinicamente instável e de forçantes de escalas menores, como a convecção.

Coutinho et al. (2004) analisaram o impacto da utilização de uma versão linearizada dos processos físicos no procedimento de obtenção dos *singular vectors* extratropicais. Entre outros resultados, obtiveram que a liberação de calor latente pela precipitação de grande escala aumenta a taxa de crescimento das perturbações, enquanto a convecção não produz impacto significativo para as perturbações. No entanto, a versão da parametrização da convecção utilizada pelos autores era muito simplificada e, além disso, a análise apresentada foi direccionada para os sistemas de latitudes médias, que são fortemente influenciados pela instabilidade baroclínica e onde a precipitação é, na maior parte, produzida pela parametrização de grande escala.

3 DADOS E METODOLOGIA

Nas seções a seguir, são descritas as condições iniciais, o modelo de circulação geral da atmosfera do CPTEC e os métodos de geração de condições iniciais perturbadas EOF e breeding, utilizados neste trabalho. Em seguida, são apresentados os experimentos que compõem o trabalho da tese. Por fim, são apresentados os índices estatísticos que auxiliarão na avaliação dos resultados das previsões.

3.1 Condições Iniciais, Climatologia e Período de Avaliação

As condições iniciais de controle (sem perturbação) usadas neste trabalho são as análises espectrais diárias do horário 1200 UTC do NCEP, disponíveis no acervo de dados do CPTEC/INPE. O truncamento espectral horizontal usado neste trabalho é T126, ou seja, truncamento triangular no número de onda zonal 126. Para evitar *aliasing* na solução dos termos não lineares das equações do modelo é necessário usar aproximadamente um número de pontos na direção zonal equivalente a três vezes o número da onda mais curta considerada, o que corresponde a aproximadamente uma resolução horizontal de 0.94° de longitude x latitude no espaço de grade. Na vertical, a atmosfera é dividida em 28 camadas sigma (L28). Para as avaliações subjetivas e para calcular os índices estatísticos, estas condições iniciais são consideradas como a melhor estimativa do estado real da atmosfera.

Para cada rodada do EPS-CPTEC são geradas sete perturbações baseadas em EOF ou breeding, que são somadas e subtraídas da condição inicial de controle, gerando um total de 14 condições iniciais perturbadas. Os membros são integrados até 10 dias, partindo de cada uma das análises perturbadas e do controle. Ao final de cada simulação, é obtido um conjunto de 15 previsões para cada prazo de previsão.

O período entre 15 de dezembro de 2004 a 15 de fevereiro de 2005, que corresponde ao verão no Hemisfério Sul, é considerado para a avaliação dos resultados utilizando índices estatísticos. A opção pelo verão 2004-2005 para a realização das simulações foi técnica, uma vez que se optou por um

período que não contivesse falhas na série de condições iniciais do NCEP, utilizadas para rodar os experimentos, e que não fosse muito anterior ao período de realização do trabalho. A motivação para centrar as simulações durante uma estação de verão no Hemisfério Sul foi o significativo impacto dos sistemas atmosféricos sobre as atividades sócio-econômicas do Brasil, particularmente neste período. Sobre o continente Sul Americano, a climatologia de janeiro indica um período de forte atividade convectiva sobre os setores central e norte da América do Sul. A Zona de Convergência Intertropical (ITCZ), a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), a Alta da Bolívia e o Cavado do Nordeste Brasileiro são os principais sistemas de escala sinótica que atuam nesta região durante o verão austral. Embora o objetivo não seja avaliar a previsibilidade destes sistemas individualmente, os resultados obtidos com os índices estatísticos médios representam uma forma objetiva de medir indiretamente a capacidade do sistema de previsão em simular tais fenômenos meteorológicos e contribuem para uma avaliação mais precisa do impacto de modificações na metodologia utilizada para gerar o conjunto de previsões.

Para o estudo de caso do ciclone Catarina, são utilizadas as condições iniciais do período de ocorrência do evento, 20 0000 UTC a 28 1200 UTC de março de 2004.

A climatologia dos campos de altura geopotencial em 500 hPa e do vento em 850 hPa, utilizada para calcular as anomalias das previsões e das análises, corresponde a uma climatologia de 49 anos (1950-1998), obtida do NCEP. Para o cálculo do desvio padrão climatológico destes campos foram utilizados dados de 27 anos (1979-2006) da Climatologia Reanálises 2 do NCEP (KANAMITSU et al., 2002).

3.2 Modelo de Circulação Geral da Atmosfera do CPTEC

O modelo utilizado neste trabalho é o MCGA do CPTEC, na mesma resolução das análises (T126L28) e saídas em grade gaussiana. Resumidamente, o MCGA do CPTEC é baseado na solução espectral das equações primitivas da dinâmica, na forma de divergência e vorticidade,

temperatura virtual, umidade específica e logaritmo da pressão à superfície, e na inclusão dos processos subgrade a partir de parametrizações (KINTER et al., 1997 e BONATTI, 1996a).

Os principais processos físicos incluídos neste modelo, cujos detalhes estão em Kinter et al. (1997) ou em <http://grads.iges.org/agcm/>, são apresentados a seguir:

Processos úmidos:

- Convecção profunda (Esquema de Kuo (KUO, 1965, modificado por ANTHES, 1977 e em NMC, 1988); Esquema RAS (MOORTHI e SUAREZ, 1992));
- Convecção rasa (TIEDTKE, 1983);
- Condensação de grande escala (NMC, 1988).

Demais processos:

- Modelo biológico simplificado sobre os continentes (sSIB, XUE et al., 1991);
- Esquema aerodinâmico tipo *bulk* sobre os oceanos (SATO et al., 1989);
- Camada limite planetária (MELLOR e YAMADA, 1982);
- Fluxos radiativos (onda curta (LACIS e HANSEN, 1974; modificada por DAVIES, 1982) e onda longa (HARSHVARDHAN et al., 1987);

3.3 O Método *EOF-Based Perturbation* Operacional do CPTEC/INPE

O procedimento utilizado operacionalmente no CPTEC/INPE para gerar as condições iniciais atmosféricas perturbadas é baseado no método desenvolvido por ZK1999 e proposto originalmente para previsão de furacões usando o MCGA da *Florida State University* (FSU), nos Estados Unidos. O método, denominado *EOF-based perturbation*, foi desenvolvido levando-se

em conta o fato que durante os primeiros dias (cerca de 1.5 dias) de integração do modelo, as perturbações crescem quase linearmente.

O procedimento usado no CPTEC/INPE para produzir análises perturbadas pode ser resumido nas seguintes etapas:

a) n pequenas perturbações randômicas (atualmente $n=7$) são adicionadas à temperatura e às componentes horizontais do vento da análise de controle. Estas perturbações são normalmente distribuídas com média zero e desvio padrão (magnitude das perturbações) comparáveis aos erros das previsões de 3 horas (3 m s^{-1} para o campo de vento e 0.6 K para o campo de temperatura);

b) as n análises perturbadas randomicamente e a análise de controle são utilizadas para integrar o modelo por 36 horas (intervalo ótimo), com saídas a cada 3 horas de integração. Nenhuma suavização horizontal ou vertical ou balanço é imposto às perturbações randômicas iniciais, entretanto as primeiras 6 horas de integração do modelo são descartadas a fim de permitir um auto-ajuste do modelo às condições iniciais perturbadas e, conseqüentemente, o desenvolvimento de perturbações das previsões mais balanceadas;

c) n séries temporais da diferença dos campos previstos são construídos subtraindo a previsão de controle da previsão perturbada para cada intervalo de 3 horas de saídas do modelo;

d) uma análise de EOF da série temporal de diferenças é realizada sobre um domínio de interesse para cada n série temporal a fim de obter as perturbações de crescimento rápido (consideradas como os autovetores associados aos maiores autovalores);

e) estas perturbações são re-escaladas de forma que o desvio padrão destas perturbações seja da mesma ordem das perturbações iniciais;

f) adicionando (subtraindo) estas perturbações re-escaladas a (da) análise de controle produz-se um conjunto de $2n$ estados iniciais perturbados.

Obter as perturbações de crescimento rápido citado no item d) consiste em obter as direções que explicam a máxima quantidade de variância na qual as previsões perturbadas randomicamente divergem das previsões de controle, em um período de otimização e em um sentido linear. A análise de EOF é útil para este propósito. Neste caso, esta análise é baseada na solução de um problema de autovalor da matriz de covariância obtida a partir das séries de diferenças temporais descritas no item c). Considerando os N pontos sobre um domínio especificado, uma matriz de dados \mathbf{X} , de dimensões $M \times N$, destas séries temporais de diferenças é construída; M é o número de saídas do modelo durante o período de 6 a 36 horas com intervalo de 3 horas ($M=11$). A matriz de covariância $N \times N$ é definida como $\mathbf{C} = (1/M)\mathbf{X}^T\mathbf{X}$ em que o sobrescrito T denota a matriz transposta. \mathbf{C} é simétrica e tem M autovalores reais λ_i , não nulos, e \mathbf{e}_i autovetores ortonormais. Os autovetores são obtidos a partir da seguinte decomposição $\mathbf{C}\mathbf{E}=\mathbf{E}\mathbf{\Lambda}$, em que \mathbf{E} é a matriz com os autovetores \mathbf{e}_i como suas colunas, e $\mathbf{\Lambda}$ é a matriz com os autovalores λ_i ao longo de sua diagonal e zeros nas demais posições. Os autovalores de \mathbf{C} são ordenados do maior para o menor obtendo uma ordem respectiva nos autovetores associados (ordem decrescente de variância explicada por cada autovetor). A matriz de dados \mathbf{X} pode ser expandida em relação à base de autovetores \mathbf{e}_i como $\mathbf{X}=\mathbf{E}\mathbf{Z}$. A matriz \mathbf{Z} contém os coeficientes para diferentes autovetores em diferentes tempos. \mathbf{Z} é chamada matriz de componentes principais (PC). Os modos de crescimento rápido podem ser selecionados através da evolução temporal dos coeficientes dos autovetores.

Para as séries temporais de diferenças dos campos de vento, o procedimento é análogo, mas suas componentes (zonal δu e meridional δv) são usadas para compor um número complexo $\delta u + i \delta v$, de acordo com a metodologia descrita em Legler (1983). Assim, para avaliar a matriz \mathbf{C} , a matriz complexa conjugada transposta \mathbf{X}^* da matriz \mathbf{X} é considerada a fim de obter $\mathbf{C}=(1/M)\mathbf{X}^*\mathbf{X}$. \mathbf{C} é simétrica e é composta de elementos complexos, exceto na

diagonal, que são reais. Por definição, \mathbf{C} é uma matriz Hermitiana com autovalores reais e autovetores ortogonais.

Um diagrama esquemático da utilização do método EOF para previsão de tempo por conjunto é dado na Figura 3.1.

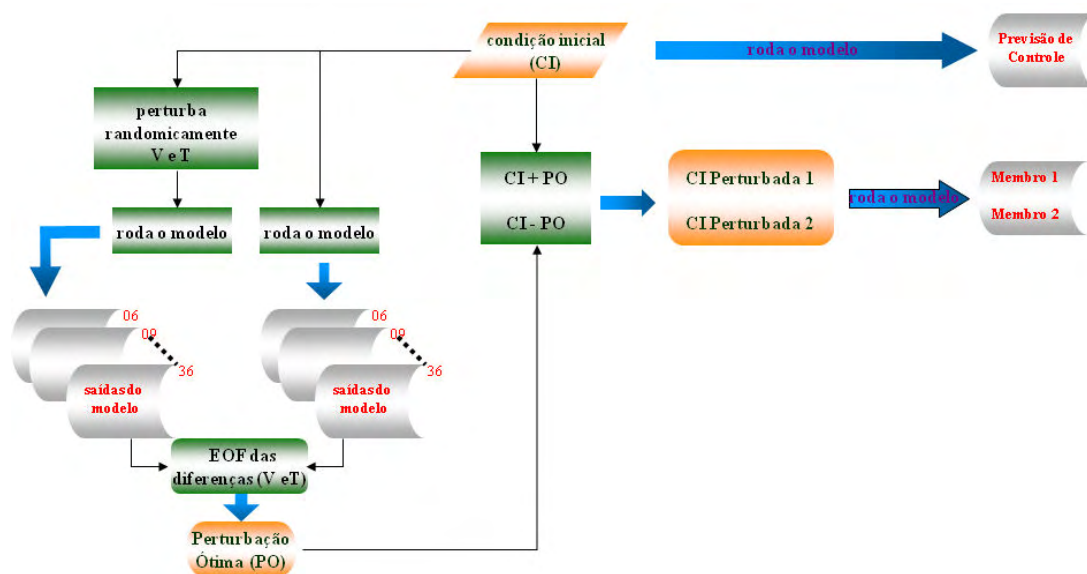


Figura 3.1 – Diagrama esquemático do método EOF de geração de condições iniciais perturbadas, utilizado operacionalmente no CPTEC/INPE e da previsão de tempo por conjunto subsequente. O processo inicia-se com a perturbação randômica nos campos de \mathbf{V} e \mathbf{T} da condição inicial (CI), na parte esquerda da figura e termina com a produção dos membros do conjunto na parte direita da figura.

Para a previsão de furacões, ZK1999 propuseram perturbações na posição inicial do furacão e o cálculo das funções ortogonais empíricas na vizinhança do furacão. Para previsão de tempo global não são aplicadas perturbações na posição inicial dos sistemas meteorológicos. Coutinho (1999) notou que confinar as perturbações a apenas uma área limitada como, por exemplo, sobre a América do Sul não produziam bons resultados. Este isolamento

afetava o crescimento das perturbações em regiões relevantes ao desenvolvimento dos sistemas sinóticos. Coutinho (1999) obteve melhores resultados usando uma região estendida (45S-30N; 0-360E). Esta região foi adotada na versão do EPS-CPTEC implementada operacionalmente.

No procedimento de reescalonamento das perturbações, cada campo perturbado é reescalonado para um valor pré-especificado, em termos do desvio padrão no domínio, ou seja, suponha que o desvio padrão original das perturbações EOF seja σ_i e o desvio padrão pré-especificado seja σ_f , então todos os pontos de grade daquela região são multiplicados pelo fator (σ_f/σ_i) tal que as perturbações adquiram a amplitude desejada. É importante notar que esta operação não muda a estrutura das perturbações uma vez que ela ajusta apenas a sua intensidade. Com relação à amplitude das perturbações reescaladas, Zhang (1997b), conforme citação de Coutinho (1999), utilizou um desvio padrão de 1.5 m s^{-1} para o campo de vento e 0.7 K para o campo de temperatura. Coutinho (1999) obteve melhores resultados usando 5.0 m s^{-1} e 1.5 K (obtidos de DALEY e MAYER, 1986) para a amplitude das perturbações no procedimento de reescalonamento. Estas últimas amplitudes das perturbações são utilizadas em todos os experimentos deste estudo.

3.4 A Versão Simplificada do Método *Breeding of Growing Modes*

Toth e Kalnay (1993) propuseram um método de criação de modos instáveis a partir de previsões por conjunto mais recentes, denominado *breeding of growing modes*. O método consiste dos seguintes passos:

- a) na primeira execução do procedimento, adiciona-se e subtrai-se pequenas perturbações aleatórias à análise atmosférica, formando pares de análises com perturbações positivas e negativas;
- b) integra-se o modelo por 24 horas a partir de cada condição inicial perturbada;
- c) subtrai-se a previsão iniciada da análise com perturbações negativas daquelas iniciadas com perturbações positivas;

- d) os campos de diferenças das previsões são reescalados para as mesmas amplitudes das perturbações iniciais;
- e) estas perturbações são adicionadas e subtraídas à próxima análise atmosférica. O processo é então repetido no tempo, a partir do item b).

Uma representação esquemática deste procedimento é apresentada na Figura 3.2. Por construção, este método seleciona (cria) os modos que crescem mais rápido durante o ciclo.

A opção por utilizar o método breeding foi baseada na sua relativa simplicidade e devido a algumas características positivas do método, tais como: a geração das perturbações não exige custo computacional elevado e, similarmente ao método EOF, utiliza o modelo completo no procedimento de obtenção das perturbações.

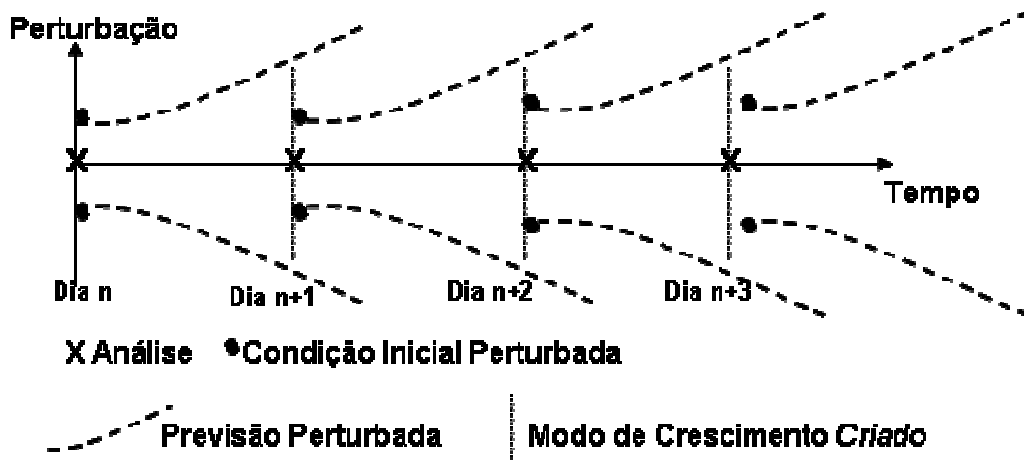


Figura 3.2 – Diagrama esquemático do método breeding de geração das condições iniciais perturbadas.

A versão simplificada do método breeding, utilizada neste trabalho segue, em linhas gerais, a metodologia apresentada em Toth e Kalnay (1993) e Toth e Kalnay (1997). Entretanto, algumas simplificações foram adotadas para que o

método funcionasse corretamente por um período longo de iterações sucessivas com o MCGA do CPTEC. Em relação à versão original, duas alterações principais foram realizadas: a primeira relacionada aos campos perturbados e a segunda ao reescalonamento das perturbações. Nesta versão, ao invés de operar sobre os campos de vorticidade e divergência, as perturbações e o reescalonamento foram calculados utilizando-se as componentes zonal e meridional do vento. No processo de reescalonamento das perturbações, foi utilizado um desvio padrão global (horizontal e vertical) pré-especificado, semelhante aquele utilizado no método EOF, ao invés do reescalonamento regional de acordo com as incertezas climatológicas das análises e da energia das perturbações descrita em Toth e Kalnay (1997). Os valores pré-especificados dos desvios padrões globais das perturbações são semelhantes àqueles utilizados no método EOF para os campos de pressão à superfície (1 hPa) e umidade específica, porém valores ligeiramente menores são utilizados para temperatura (0.7 K) e para as componentes zonal e meridional do vento (1.5 m s^{-1}). Para a umidade específica, o reescalonamento global é realizado separadamente para cada nível vertical, usando como referência os valores dos desvios padrões apresentados em Derber e Bouttier (1999) para o sistema de assimilação de dados global do ECMWF. Estes valores foram interpolados linearmente para cada nível sigma do MCGA do CPTEC e são apresentados na Tabela 3.1.

Perturbações com magnitudes iguais aos do método EOF foram testados para o reescalonamento dos campos de temperatura e vento no método *breeding* simplificado, mas as perturbações tornaram-se instáveis (muito elevadas) após alguns dias de iteração do método, por isso, adotaram-se os valores citados anteriormente, que foram obtidos de ZK1999.

Outro aspecto que deve ser mencionado é o fato que as análises do NCEP, embora sejam de boa qualidade, não estão completamente balanceadas em relação ao MCGA do CPTEC. Isto pode aumentar os erros, especialmente para os prazos mais curtos de previsão.

3.5 Descrição dos Experimentos

Algumas características das perturbações EOF na região tropical foram avaliadas nos trabalhos de Zhang e Krishnamurti (1999) e Coutinho (1999). Ambos os trabalhos mostraram que este método captura modos de crescimento rápido nesta região. Como citado anteriormente, nestes trabalhos, apenas as incertezas nos campos de temperatura e vento foram consideradas.

Como um dos objetivos deste trabalho é investigar as características das perturbações EOF em latitudes médias, primeiramente o cálculo das perturbações EOF é estendido para as latitudes médias, mantendo as perturbações apenas nos campos de temperatura e vento.

Enquanto nas latitudes médias a instabilidade dinâmica (de acordo com a teoria da perturbação linear) é o mecanismo mais importante para o crescimento das perturbações, nos trópicos, as perturbações são fortemente influenciadas por processos físicos de escalas menores do que as resolvidas pelo modelo e experimentam um crescimento menor do que nos extratropicos (ZHANG, 1997a; REYNOLDS et al., 1994). Um tratamento especial das perturbações nos trópicos foi inserido no método aplicado no ECMWF através da inclusão de *singular vectors tropicais* sobre áreas alvo (BARKMEIJER et al., 2001; PURI, et al., 2001). No NCEP, não há um tratamento específico das perturbações nos trópicos, mas o reescalamento regional, baseado na incerteza das análises, contribui para aumentar o desempenho do conjunto médio no Hemisfério Sul e nos trópicos (TOTH e KALNAY, 1997). Naqueles experimentos em que perturbações EOF são aplicadas nas latitudes médias, considera-se mais adequado calcular as perturbações separadamente para os trópicos e extratropicos.

As incertezas nos campos de pressão à superfície e umidade específica, que são campos que compõem o vetor estado atmosférico inicial, e não são considerados nos trabalhos anteriores, são abordados neste estudo, através do cálculo de perturbações EOF adicionais para ambos os campos. A magnitude das perturbações randômicas iniciais e no reescalamento no

campo de pressão à superfície é especificada em 1.0 hPa. Para a umidade específica, as perturbações randômicas iniciais e o reescalonamento são realizados separadamente para cada nível vertical. As magnitudes das perturbações são, novamente, aquelas apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Valores dos desvios padrões (*std*) utilizados para reescalonar os campos de umidade específica, para cada nível sigma (σ) do MCGA-CPTEC. Os valores estão multiplicados por um fator de 10^3 .

σ	<i>std</i>	σ	<i>std</i>	σ	<i>std</i>	σ	<i>std</i>
1	0.77	8	0.98	15	0.90	22	0.00
2	0.78	9	1.14	16	0.75	23	0.00
3	0.78	10	1.27	17	0.49	24	0.00
4	0.78	11	1.37	18	0.26	25	0.00
5	0.80	12	1.35	19	0.12	26	0.00
6	0.82	13	1.18	20	0.05	27	0.00
7	0.88	14	1.05	21	0.02	28	0.00

Perturbações EOF regionais sobre a América do Sul são calculadas considerando as diferenças entre os setores tropical e extratropical da América do Sul quanto a atuação de sistemas sinóticos e, portanto, diferentes mecanismos de desenvolvimento. Duas áreas diferentes, porém aproximadamente homogêneas quanto à influência de sistemas meteorológicos são consideradas: um setor com regime tropical e fortemente influenciado pela atuação de sistemas convectivos (norte da América do Sul:

100W-10W; 20S-20N) e uma região bastante influenciada pela atuação de sistemas baroclínicos (sul da América do Sul: 110W-20W; 60S-20S).

Para previsão de furacões, ZK1999 obtiveram que o autovetor associado ao maior autovalor (primeiro modo) era o modo cujos coeficientes apresentavam maior taxa de crescimento com o tempo. Conseqüentemente, eles o utilizaram como perturbações ótimas. Em latitudes médias e para outros campos da análise, entretanto, pode ser que este resultado não seja válido. Desta forma, propõe-se um experimento no qual o modo utilizado como perturbação ótima seja selecionado de acordo com a tendência linear exibida pela série temporal dos coeficientes de cada modo. A tendência linear e a taxa de crescimento serão medidas através do coeficiente angular da reta ajustada à série temporal dos coeficientes através do método dos mínimos quadrados. O modo selecionado será aquele cujos coeficientes apresentar maior taxa de crescimento no período de otimização (aqui estipulado em 36 horas).

O experimento com o método breeding será realizado substituindo-se as perturbações EOF iniciais pelas perturbações breeding. Neste caso, a região utilizada para reescalonar as perturbações é global.

Além da região global utilizada no experimento breeding, seis subregiões são consideradas para o cálculo das perturbações EOF:

- Hemisfério Norte (HN): 0-360W; 20N-90N;
- Hemisfério Sul (HS): 0-360W; 20S-90S;
- Trópicos (TR): 0-360W; 20S-20N;
- Trópicos Estendidos (TRE): 0-360W; 45S-30N;
- Norte da América do Sul (NAS): 100W-10W; 20S-20N;
- Sul da América do Sul (SAS): 110W-20W; 60S-20S.

Estas seis regiões de perturbação são apresentadas na Figura 3.3.

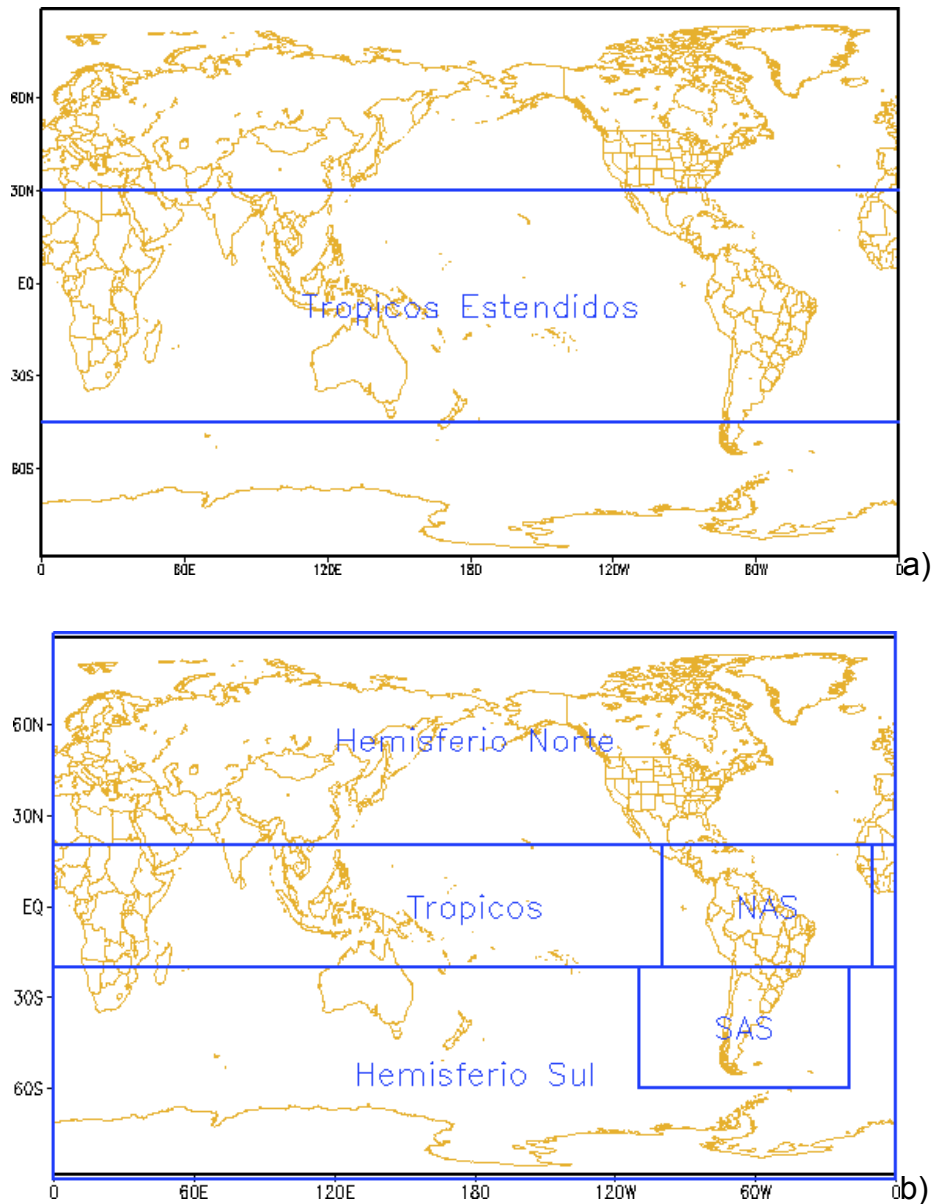


Figura 3.3 – Regiões de perturbação utilizadas com o método EOF: a) região de perturbação utilizada operacionalmente no CPTEC/INPE; b) regiões que são perturbadas nos diversos experimentos do trabalho. NAS: norte da América do Sul, SAS: sul da América do Sul.

No total, sete experimentos são propostos: o experimento OPER, considerado como referência para os demais experimentos, representa a

configuração de controle, neste caso, os campos perturbados são as componentes zonal e meridional do vento (U,V) e a temperatura (T), para a região tropical estendida (TRE); no segundo experimento (EXT1), as perturbações são calculadas separadamente para três regiões do globo, Hemisfério Norte (HN), Hemisfério Sul (HS) e trópicos (TR) e as variáveis perturbadas continuam sendo os campos U, V e T; no terceiro experimento, definido como TROP, a região de perturbação é a mesma do controle (OPER), mas inclui-se perturbações nos campos de pressão à superfície (P) e umidade específica (Q) que não haviam naquele experimento; no quarto experimento (EXT2), as perturbações nas três regiões HN, HS e TR é combinada com a aplicação de perturbações em P e Q; no experimento ETSA (quinto), além das perturbações nas latitudes médias (HN e HS) e trópicos (TR), é calculado, separadamente, perturbações para dois setores específicos da América do Sul (norte da América do Sul - NAS e sul da América do Sul - SAS) e os campos perturbados são P,T,Q,U e V; no sexto experimento (LNGR), o impacto da seleção dos modos instáveis através da taxa de crescimento linear dos coeficientes de cada EOF, ao invés de se considerar sempre o primeiro modo como sendo o mais instável, é avaliado, e as perturbações são calculadas para as regiões de perturbação HN, HS, TR, NAS, SAS e para os campos P,T,Q,U e V das análises; o último experimento, BRCP, consiste na utilização do método de perturbação breeding simplificado para perturbar as condições iniciais. A lista dos experimentos e as principais características de cada um deles são apresentadas na Tabela 3.2.

A análise das características das perturbações dos experimentos será baseada na estrutura espacial e vertical das perturbações selecionadas pelos métodos no processo de geração das condições iniciais perturbadas, bem como no crescimento destas durante a integração dos membros. Os experimentos também serão avaliados quanto ao desempenho das previsões, utilizando-se índices estatísticos para medir a qualidade das previsões, e em uma situação de evento severo, o ciclone Catarina.

Tabela 3.2 - Lista dos experimentos realizados e as principais características de cada um: regiões utilizadas para o cálculo das perturbações, campos perturbados e metodologia usada para selecionar os modos instáveis.

<i>Experimento</i>	<i>Regiões utilizadas para calcular as perturbações</i>	<i>Campos Perturbados</i>	<i>Metodologia de seleção dos modos instáveis</i>
<i>OPER</i>	TRE	T,U,V	modo 1
<i>EXT1</i>	HN,HS,TR	T,U,V	modo 1
<i>TROP</i>	TRE	P,T,Q,U,V	modo 1
<i>EXT2</i>	HN,HS,TR	P,T,Q,U,V	modo 1
<i>ETSA</i>	HN,HS,TR,NAS,SAS	P,T,Q,U,V	modo 1
<i>LNGR</i>	HN,HS,TR,NAS,SAS	P,T,Q,U,V	crescimento linear
<i>BRCP</i>	GLOBAL	P,T,Q,U,V	<i>breeding</i>

3.6 Medidas de Desempenho das Previsões

Uma das componentes de avaliação dos resultados dos experimentos é a capacidade das novas perturbações de produzir previsões por conjunto melhores. Para medir a qualidade das previsões por conjunto é preciso considerar algumas informações úteis que podem ser geradas a partir deste tipo de previsão. Índices estatísticos adequados também são necessários. As informações derivadas das previsões por conjunto que são utilizadas para avaliar a qualidade das previsões, bem como os índices estatísticos utilizados, são definidos a seguir.

3.6.1 Conjunto Médio

É a forma mais condensada de obter informações da previsão por conjunto e consiste em calcular a média das previsões considerando que a probabilidade de ocorrência é a mesma para todos os membros. O cálculo para cada ponto de grade j do modelo é dado por:

As equações e fórmulas são escritas no sexto espaço ou centralizadas

$$EM_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_j^i; \quad (3.1)$$

em que N é o número de membros do conjunto (inclusive o de controle) e F_j^i são as previsões de cada membro.

O conjunto médio pode ser considerado, numa aproximação determinística, como a melhor estimativa da atmosfera futura, especialmente para previsão de médio prazo. Toth e Kalnay (1993), obtiveram que as correlações de anomalias do conjunto médio do NCEP para o geopotencial em 500 hPa eram 2% (3%) maiores sobre o Hemisfério Norte (Hemisfério Sul) do que a previsão determinística de 5 dias, numa resolução T062. No ECMWF, Molteni et al. (1996) analisaram o desempenho do conjunto médio sobre o Hemisfério Norte para o campo de altura geopotencial em 500 hPa durante os invernos de 1992 e 1993, e primavera, verão e outono de 1993. Eles obtiveram que a raiz do erro quadrático médio (RMSE), médio de cada estação, apresentou melhorias em relação à previsão de controle a partir de 4 e 5 dias.

3.6.2 Espalhamento do Conjunto

Uma informação útil que pode ser obtida da previsão por conjunto está relacionada à capacidade de estimar a incerteza associada a um determinado padrão atmosférico previsto. Trabalhos realizados por Buizza (1997) e Whitaker e Loughé (1998) para os sistemas de previsão por conjunto do ECMWF e do NCEP, respectivamente, mostraram haver determinada correlação entre o espalhamento do conjunto e os erros das

previsões. A incerteza ou confiabilidade de uma previsão é avaliada em função do espalhamento do conjunto de previsões, definido como o desvio padrão das previsões em relação ao conjunto médio (EM). Para regiões onde há menor espalhamento é atribuído maior confiabilidade à previsão e, para regiões onde os membros estão mais distantes é atribuído menor confiabilidade. O espalhamento do conjunto para cada ponto de grade j pode ser calculado como segue:

$$SPR_j = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_j^i - EM_j)^2 \right\}^{1/2} \quad (3.2)$$

A média na área do espalhamento do conjunto é obtida a partir da expressão:

$$SPR = \frac{\sum_{j=1}^J \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_j^i - EM_j)^2 \right]^{1/2} \times W_j}{\sum_{j=1}^J W_j} \quad (3.3)$$

em que N é o número de membros do conjunto, j é o índice para cada ponto de grade sobre a área, J é o número total de pontos na área, F_j^i são as previsões de cada membro do conjunto, EM_j é a previsão do conjunto médio e W_j é o peso para a área que o ponto representa.

3.6.3 Correlação do Padrão de Anomalias

A correlação do padrão de anomalias é um índice comumente usado para medir o desempenho de previsões numéricas. Para calcular a correlação do padrão de anomalias, os valores previstos e analisados são primeiro convertidos para anomalias, ou seja, o valor médio climatológico do campo analisado em cada ponto de grade é subtraído.

A correlação do padrão de anomalias é definida como:

$$PAC = \frac{\sum_{j=1}^J [(F_j - C_j) \times (A_j - C_j)] \times W_j}{\left\{ \sum_{j=1}^J [(F_j - C_j)^2 \times W_j] \times \sum_{j=1}^J [(A_j - C_j)^2 \times W_j] \right\}^{\frac{1}{2}}}; \quad (3.4)$$

em que j é o índice para cada ponto de grade sobre a área, J é o número total de pontos na área, W_j é o peso para a área que o ponto representa, F_j é o campo previsto, A_j é o campo analisado, C_j é o campo climatológico, $(F_j - C_j)$ é a anomalia prevista para o ponto j e $(A_j - C_j)$ é a anomalia observada no ponto j .

A correlação do padrão de anomalias mede similaridades entre os padrões de anomalias das previsões e das análises. Se os campos previstos e analisados estão ambos acima ou abaixo do valor climatológico em um ponto de grade particular, o termo do numerado contribuirá positivamente para o PAC. Para aqueles pontos em que a previsão e a análise têm sinais diferentes, termos negativos são introduzidos no numerador e o PAC torna-se menor (WILKS, 1995). O PAC assume valores entre ± 1 é positivamente orientado, ou seja, quanto mais próximo de 1 melhor.

3.6.4 Raiz do Erro Quadrático Médio na Área

Uma medida bastante utilizada para medir a acurácia dos campos previstos é a raiz do erro quadrático médio, que, essencialmente, representa a média na área das diferenças quadráticas individuais (cada ponto de grade) entre a previsão e a análise.

A raiz do erro quadrático médio é dada por:

$$RMSE = \left\{ \frac{\sum_{j=1}^J (F_j - A_j)^2 \times W_j}{\sum_{j=1}^J W_j} \right\}^{1/2}; \quad (3.5)$$

sendo que as siglas e índices desta equação possuem o mesmo significado da equação da correlação do padrão de anomalias (equação 3.4).

Para uma previsão perfeita o RMSE é zero, com valores maiores de RMSE indicando degradação da qualidade da previsão, ou seja, o RMSE é negativamente orientado (WILKS, 1995).

3.6.5 Brier Score

O *Brier score* pode ser definido como a soma da medida de três características das previsões de probabilidades, também chamadas componentes do *Brier score*, que são a confiabilidade (BS_{rel}), a resolução (BS_{res}) e a incerteza (BS_{unc}):

$$BS = BS_{rel} - BS_{resol} + BS_{unc} \quad (3.6)$$

$$BS_{rel} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^I N_i (y_i - \bar{o}_i)^2 \quad (3.7)$$

$$BS_{resol} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^I N_i (\bar{o}_i - \bar{o})^2 \quad (3.8)$$

$$BS_{unc} = \bar{o}(1 - \bar{o}_i) \quad (3.9)$$

em que y_i é a probabilidade prevista, o_i é a probabilidade observada, N_i é a frequência relativa do evento previsto em cada sub-amostra i , e

$$n = \sum_{i=1}^I N_i \quad (3.10)$$

$$\bar{o}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{k \in N_i} o_k \quad (3.11)$$

$$\bar{o} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n o_k \quad (3.12)$$

O termo confiabilidade representa a calibração, ou o viés condicional, da previsão. Consiste de uma média ponderada de diferenças quadráticas entre as probabilidades previstas e as frequências relativas do evento previsto em cada sub-amostra. O termo resolução mede a habilidade da previsão em

discernir períodos de previsão da sub-amostra com diferentes frequências relativas do evento. As probabilidades previstas não aparecem explicitamente neste termo, mas ele depende das previsões através da distribuição dos eventos que definem as frequências relativas das sub-amostras. O termo incerteza depende apenas da frequência relativa climatológica da amostra e não é afetado pelas previsões.

O *Brier skill score* é definido como

$$BSS = \frac{BS - BS_{ref}}{BS_{perf} - BS_{ref}} \quad (3.13)$$

Como $BS_{perf} = 0$, BSS também pode ser escrito na forma

$$BSS = 1 - \frac{BS}{BS_{ref}} \quad (3.14)$$

Considerando $BS_{ref} = BS_{unc}$, temos:

$$BSS = \frac{BS_{resol} - BS_{rel}}{BS_{unc}} \quad (3.15)$$

3.6.6 Análise da Correlação entre a Perturbação e o Erro

A análise da correlação entre a perturbação e o erro (*perturbation versus error correlation analysis, PECA*) foi desenvolvida por Wei e Toth (2003). O PECA mede a quantidade de variância que as perturbações do conjunto individuais e/ou otimamente combinadas podem explicar dos erros dos campos previstos.

Definindo como perturbações das previsões a diferença entre uma previsão iniciada a partir de uma condição inicial perturbada (PF_i) e uma previsão de controle (CF), iniciada a partir de uma análise não perturbada, tem-se:

$$P_i = PF_i - CF \quad (3.16)$$

em que $i = 1, 2, \dots, N$ são os membros perturbados do conjunto. Neste trabalho, $N = 14$. Para cada membro i do conjunto, obtém-se uma perturbação da previsão, P_i , que é chamada perturbação individual.

Os erros das previsões são definidos como a diferença entre a previsão de controle e a análise (A) para a qual aquela previsão é válida:

$$E = CF - A \quad (3.17)$$

A combinação ótima das perturbações, OP , é definida como a combinação das n perturbações individuais, que melhor explicam os erros das previsões, conseguida através da solução de um problema de mínimos quadrados:

$$\text{Min} \left| E - \sum_{i=1}^n \alpha_i P_i \right| \quad (3.18)$$

Uma vez obtidos os α_i da equação acima, o vetor otimamente combinado é dado por:

$$OP = \sum_{i=1}^n \alpha_i P_i \quad (3.19)$$

O índice PECA é definido como a correlação do padrão de anomalias (PAC) entre as perturbações individuais (P_i) ou otimamente combinadas (OP) e os erros das previsões (E), ou seja:

$$PECA = PAC(P_i \text{ ou } OP, E) = \frac{\sum_{j=1}^J [(PF_i^j - CF^j) \times (CF^j - A^j)] \times W_j}{\left\{ \sum_{j=1}^J [(PF_i^j - CF^j)^2 \times W_j] \times \sum_{j=1}^J [(CF^j - A^j)^2 \times W_j] \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (3.20)$$

Os valores de correlação calculados entre as perturbações individuais (P_i) e os erros da previsão são mediados sobre as 14 perturbações individuais do conjunto.

A descrição genérica do PECA, dada anteriormente, é válida para uma variável em apenas um nível. Para avaliar a estrutura tridimensional dos erros

e, para mais de uma variável, uma alternativa é tomar os campos de temperatura (T) e vento (U,V) nos níveis de 850, 500 e 250 hPa e definir uma nova variável $p = (U, V, \alpha T)$, em que $\alpha = \sqrt{C_p/T_r}$, $C_p = 1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ é o calor específico à pressão constante para o ar seco e T_r é uma temperatura de referência. Para cada nível de pressão, T_r é obtido por interpolação linear a partir dos dados da atmosfera padrão, obtidas de Holton (2004).

3.6.7 Características das Previsões a serem Avaliadas

A qualidade das previsões dos padrões atmosféricos e das previsões de probabilidades é avaliada através do conjunto médio e da distribuição de probabilidades, respectivamente. O crescimento das perturbações durante a integração do modelo é considerado através do cálculo do espalhamento do conjunto. Para medir a qualidade das previsões do conjunto médio, a correlação dos padrões de anomalias (PAC) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) são calculadas diariamente para o período considerado. Já a qualidade das previsões de probabilidades é verificada através do cálculo do Brier Skill Score (BSS) e suas componentes (confiabilidade (REL), resolução (RES) e incerteza), de acordo com Wilks (1995) e Buizza et al. (2005). O campo de altura geopotencial em 500 hPa (Z500) sobre os extratropicos do Hemisfério Norte e do Hemisfério Sul, e América do Sul é usado nas avaliações. A altura geopotencial em 500 hPa fornece informações relevantes a respeito do padrão de escala sinótica da atmosfera, especialmente sobre as latitudes médias. Nos trópicos, onde o cisalhamento horizontal do vento é mais significativo do que as anomalias da altura geopotencial, a avaliação é realizada para as componentes zonal e meridional do vento em 850 hPa (U850 e V850). As componentes do Brier Score são calculadas para as previsões de probabilidade de anomalias da altura geopotencial em 500 hPa maiores ou menores do que um desvio padrão climatológico. Os campos U850 e V850 são considerados separadamente, e as previsões de probabilidades de U850 e V850 maiores ou menores do que 5 m s^{-1} são avaliadas. Os intervalos de probabilidades são determinados de acordo com o número de membros do conjunto, segundo a metodologia descrita no

documento manual sobre processamento de dados da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 1992).

A qualidade das perturbações do conjunto é investigada utilizando o índice PECA. Este índice é calculado para a altura geopotencial em 500 hPa para avaliar o padrão sinótico das perturbações nas latitudes médias e América do Sul. Nos trópicos, para investigar a habilidade das perturbações do conjunto em capturar a estrutura tridimensional dos erros das previsões, o PECA é calculado para a variável tridimensional $p=(U,V,\alpha T)$, definida na subseção 3.6.6.

Cada rodada do EPS-CPTEC produz um conjunto de 15 previsões ou membros (14 perturbadas e 1 controle) integradas até 10 dias. Para o cálculo dos índices estatísticos, exceto para o PECA, os campos de previsões e análises foram interpolados para uma grade regular de 2.5 x 2.5 graus, de acordo com o manual sobre o processamento de dados global da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 1992).

As regiões Hemisfério Norte, Hemisfério Sul, Trópicos e América do Sul, consideradas para o cálculo dos índices estatísticos, são apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Regiões utilizadas para o cálculo dos índices estatísticos.

Regiões	Longitude ; Latitude
Hemisfério Norte	0-360E ; 20N-90N
Hemisfério Sul	0-360E ; 90S-20S
Trópicos	0-360E ; 20S-20N
América do Sul	101.25W-11.25W ; 60S-15N

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados deste trabalho é dividida em três partes. Na primeira parte, as características das perturbações no tempo inicial e sua evolução não linear são avaliadas, a fim de identificar os mecanismos responsáveis pelo seu desenvolvimento e crescimento, bem como avaliar o impacto das modificações propostas em cada experimento nas características de tais perturbações. A segunda parte consiste da avaliação da qualidade das previsões por conjunto, bem como da qualidade das perturbações, através de índices estatísticos. Espera-se que perturbações que apresentem as características mais adequadas para o crescimento rápido, seja nos trópicos ou latitudes médias, apresentem desempenho superior. Na terceira parte, o impacto das perturbações iniciais na previsibilidade da trajetória e na intensidade do ciclone Catarina é avaliado.

4.1 Características das Perturbações EOF e Breeding

Com o intuito de analisar o padrão global das perturbações EOF e breeding, para cada experimento, é mostrado na Figura 4.1 o campo de altura geopotencial em 500 hPa e o espalhamento correspondente para a condição inicial, média para janeiro de 2005. Para uma referência aproximada, uma medida simples da instabilidade atmosférica é também fornecida, o índice de Eady, calculado segundo Hoskins e Valdes (1990):

$$\sigma_e = 0.31 \frac{f}{N} \frac{du}{dz} \quad (4.1)$$

em que N é a estabilidade estática; f é o parâmetro de Coriolis; u é a magnitude do vetor vento; para os cálculos são utilizados a temperatura potencial e o vento em 300 hPa e 1000 hPa.

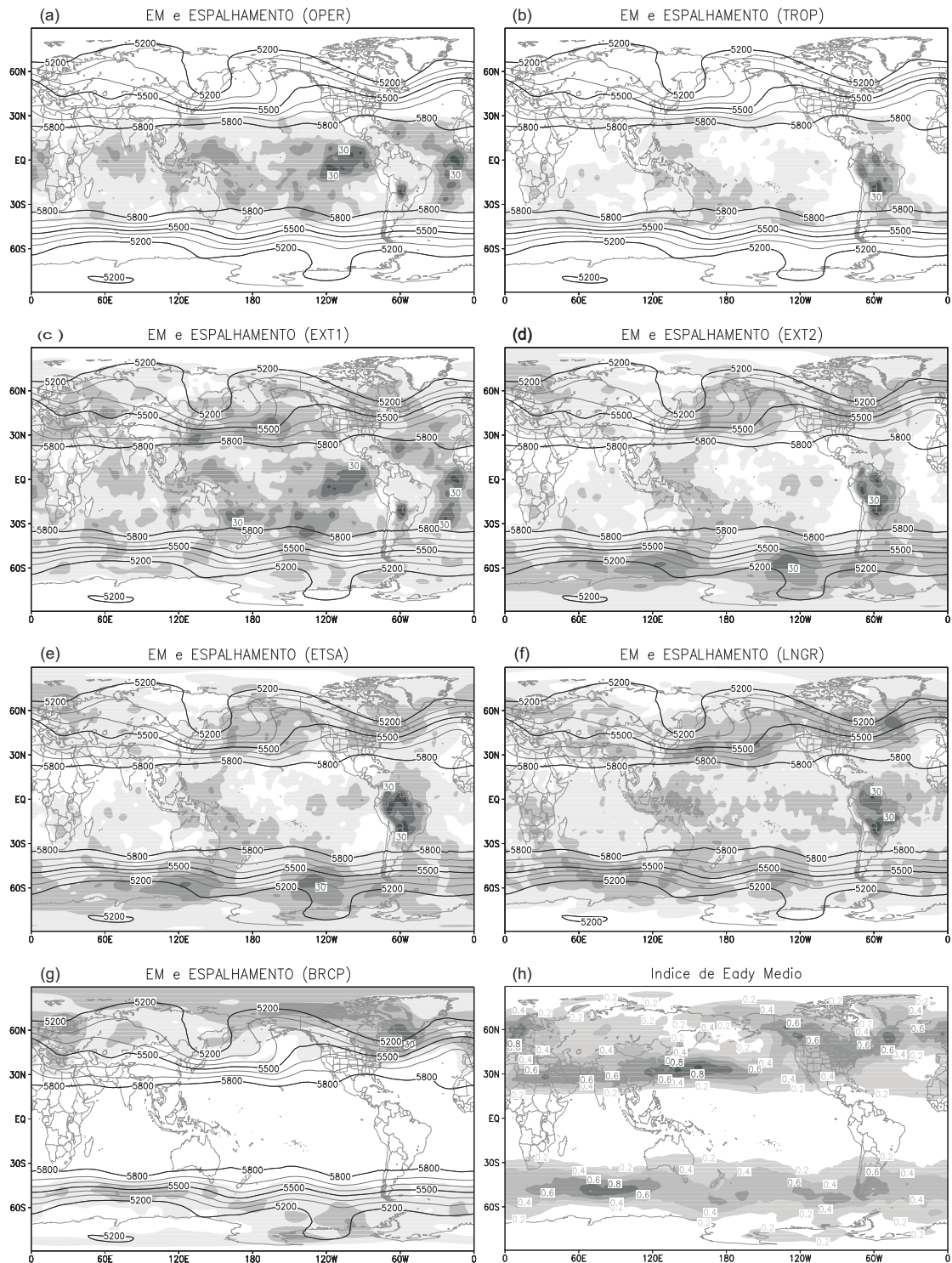


Figura 4.1 – Média de janeiro de 2005, no tempo inicial, para a altura geopotencial em 500 hPa. Conjunto Médio (linhas) e espalhamento (sombreado) para os experimentos (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR e (g) BRCP. Valor absoluto do índice de Eady em (h). Os intervalos dos contornos são 5 m para o espalhamento do conjunto e 0.2 dia^{-1} para o índice de Eady. Em (a) e (c), os valores do espalhamento foram multiplicados por 2.

Em OPER e TROP (Figuras 4.1a,b), as perturbações são aplicadas a um cinturão tropical estendido e, conseqüentemente, não são observadas perturbações em latitudes além de 30N e 45S. Em OPER e EXT1 (Figuras 4.1a,c), as perturbações são, na média do período, quase metade daquelas dos outros experimentos (nas Figuras 4.1a,c as perturbações foram multiplicadas por 2), apesar do mesmo método de reescalonamento e amplitude das perturbações ter sido usado para todos os experimentos. Estas diferenças nas amplitudes resultaram da aplicação, ou não, de perturbações em P e Q. Além das diferenças nas amplitudes, os experimentos com (Figuras 4.1b,d,e,f) e sem (Figuras 4.1a,c) perturbações em P e Q apresentam diferenças significativas em relação ao padrão horizontal. OPER e EXT1 (Figuras 4.1a,c) produzem perturbações similares na região tropical (30S-30N). Centros de perturbações intensas podem ser observados sobre as três bacias oceânicas e sobre o Paraguai, na América do Sul. Este centro sobre a América do Sul parece estar associado com a baixa pressão comumente observada nesta região durante o verão do Hemisfério Sul, conhecida como *baixa do Chaco* (SELUCHI et al., 2003). Próximo ao equador, núcleos intensos de perturbações sobre os Oceanos Pacífico e Índico parecem estar relacionados às atuações da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e da monção Asiática, respectivamente. Estes padrões indicam que a convecção profunda e a liberação de calor latente durante a evolução não linear do modelo têm um papel preponderante no desenvolvimento das perturbações. Sobre o Atlântico, entretanto, as perturbações são alongadas sobre quase toda bacia oceânica tropical e parece não estar relacionada a um sistema sinótico, exceto próximo ao equador onde a ZCIT pode ter alguma influência. Sobre as latitudes médias do HN, EXT1 (Figura 4.1c) produz um máximo sobre o Oceano Pacífico que se assemelha a região de máximo índice de Eady, visto na Figura 4.1h. Isto sugere que há, neste experimento, uma relação entre o desenvolvimento das perturbações EOF e a instabilidade baroclínica nesta região. Sobre as latitudes médias do HS, as perturbações são menores do que aquelas observadas no HN e deslocadas para o equador em relação às latitudes onde são observados máximos do índice de Eady.

Os experimentos TROP, EXT2 e ETSA (Figuras 4.1b,d,e) produzem regiões preferenciais similares para o desenvolvimento de perturbações, exceto para o TROP sobre as latitudes médias, já que não são aplicadas perturbações sobre esta região, neste experimento. Em contraste com os resultados de OPER e EXT1 (Figuras 4.1a,c), sobre os trópicos as perturbações não são espalhadas através de quase toda região, ao contrário, elas são mais concentradas em regiões com forte atividade convectiva: norte da América do Sul e oeste do Pacífico. Nos subtropicais do Hemisfério Sul, perturbações intensas são observadas sobre regiões nas quais a condensação de grande-escala é importante para a manutenção dos sistemas e representam um modo de interação entre trópicos e extratropicais, os dois bem conhecidos sistemas que ocorrem durante o verão do Hemisfério Sul sobre o Pacífico Sul e Atlântico Sul, denominados Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS) e Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), respectivamente (KODAMA, 1992). Estes dois fenômenos são associados com a intensa atividade convectiva no oeste do Pacífico e norte da América do Sul e parece dominar o desenvolvimento das perturbações sobre os trópicos/subtrópicos do Hemisfério Sul, nos experimentos TROP, EXT2 e ETSA (Figuras 4.1b,d,e). Estas regiões preferenciais para formação das perturbações são apontadas em estudos anteriores (KALNAY et al., 1986; GRIMM e SILVA DIAS, 1995) como fontes de distúrbios para muitas outras regiões em torno do globo, através da propagação de trens de ondas de Rossby que podem influenciar o regime atmosférico ou ajudar a disparar o desenvolvimento de sistemas sinóticos em regiões remotas.

No experimento LNGR (Figura 4.1f) as perturbações EOF formam-se preferencialmente sobre a região da ITCZ no Atlântico tropical oeste e no Pacífico tropical oeste, e sobre o setor tropical do continente Sul Americano. Diferentemente dos experimentos EXT2 e ETSA as regiões de atuação da ZCPS e ZCAS não aparecem bem definidas como regiões de formação preferencial de perturbações EOF. As perturbações breeding (Figura 4.1g) apresentam valores significativamente menores nos trópicos do que aqueles dos experimentos EOF, não apresentando uma estrutura bem definida sobre esta região. A menor amplitude das perturbações breeding do que aquela das

perturbações EOF, nos trópicos, é uma consequência do reescalonamento global das perturbações utilizado no método breeding, que privilegia as regiões com maior variabilidade atmosférica, especialmente nas latitudes médias.

Sobre as latitudes médias do Hemisfério Norte, EXT2 e ETSA mostram três regiões preferenciais para o desenvolvimento das perturbações: partes oeste e central do Pacífico Norte, parte leste da América do Norte e oeste do Atlântico Norte e norte da Europa. Examinando o índice de Eady (Figura 4.1h) observamos que aquelas regiões preferenciais para o desenvolvimento das perturbações estão próximas de regiões relativamente mais instáveis, sugerindo que as perturbações EOF estão associadas com a instabilidade baroclínica. Resultados de Blackmon (1976) confirmam que estas regiões são relacionadas com a variância do fluxo de calor para os pólos, confirmando que elas são regiões de forte atividade convectiva. Sobre as latitudes médias do HS, dois centros de perturbações relativamente intensos aparecem em torno de 120E e 120W. Estas duas regiões preferenciais estão próximas de áreas de máximos relativos do índice de Eady, sugerindo novamente que as perturbações EOF em latitudes médias estão relacionadas à instabilidade baroclínica.

Selecionando as perturbações EOF através do crescimento das componentes principais em LNGR, nota-se que, no HN, as regiões preferenciais de formação das perturbações são semelhantes àquelas dos experimentos EXT2 e ETSA, entretanto aparecem alguns núcleos mais intensos e uma maior semelhança com o índice de Eady pode ser notada. No HS, as perturbações de LNGR são ligeiramente menores do que em EXT2 e ETSA, mas a faixa de latitude onde as perturbações se formam preferencialmente está mais próxima daquela observada no índice de Eady, sugerindo maior associação das perturbações com a instabilidade baroclínica.

As perturbações breeding (Figura 4.1g) apresentam valores mais elevados do que aqueles encontrados com o método EOF próximo do Pólo Norte. Sobre o HN, duas regiões preferenciais de formação de perturbações são

identificadas: norte da Europa e leste da América do Norte. Estas duas regiões assemelham-se àquelas encontradas em EXT2 e ETSA e com o índice de Eady. Contudo, na região do máximo do índice de Eady sobre o Pacífico oeste e central não é observado perturbações breeding associadas. Sobre o HS, uma região de formação preferencial sobre o sul do Índico apresenta um alto grau de similaridade com o máximo do índice de Eady sobre esta região. Nas demais áreas do HS, as regiões preferenciais de formação são mais deslocadas em direção ao Pólo, quando comparadas com a Figura 4.1h.

Buizza et al. (2005) comparou o desempenho dos conjuntos do ECMWF, do *Meteorological Service of Canada* (MSC) e do NCEP sobre o Hemisfério Norte. Embora o período seja diferente do usado neste trabalho (eles apresentaram as características médias dos três conjuntos para maio de 2002), pode ser útil fazer uma comparação qualitativa entre o resultado deles e os resultados do método EOF. Em termos do valor médio do espalhamento do conjunto é observado que o método EOF apresenta aproximadamente a mesma ordem de magnitude, em torno de 30 m sobre as latitudes médias nos experimentos TROP, EXT2 e ETSA, que eles obtiveram para os conjuntos do MSC e do NCEP. Entretanto, o método EOF não apresenta perturbações relativamente altas sobre a região polar, como observado nos EPSs do MSC e do NCEP. Em latitudes médias, o padrão das perturbações EOF assemelha-se àquele do índice de Eady, o que também foi obtido para o EPS do ECMWF. Próximo dos trópicos o método EOF produz perturbações que são, ao menos em termos de valores, próximos ao conjunto do MSC, embora por razões diferentes; o maior espalhamento observado no EPS-MSC nesta região está associado com as características intrínsecas do método, ou seja, diferentes versões do modelo, perturbações nas observações, etc, enquanto no método EOF maiores perturbações são associadas com o cálculo das perturbações especificamente sobre os trópicos.

A seguir, um caso selecionado “aleatoriamente” (1200 UTC de 20 de janeiro de 2005) é usado para investigar a estrutura dinâmica das perturbações EOF

e breeding, e o papel das perturbações EOF adicionais, de acordo com as configurações de cada experimento, na estrutura dinâmica das perturbações EOF. Por “aleatório” aqui se entende que o episódio foi selecionado sem a utilização de um critério objetivo, e que este caso representa o comportamento típico das perturbações para este período. O procedimento para a escolha deste episódio foi baseado na visualização do campo de pressão ao nível médio do mar das condições iniciais do mês de janeiro de 2005. Como neste caso havia um ciclone bem configurado na região da América do Sul (Figura 4.2), optou-se por utilizá-lo como estado básico para a realização dos estudos.

A área considerada nesta avaliação é centrada em latitudes médias sobre o Oceano Atlântico Sul. A Figura 4.2 apresenta os sistemas sinóticos que estavam atuando naquela situação. Em superfície é observado um ciclone (localizado próximo de 50W e 42S e pressão ao nível médio do mar (psnm) de cerca de 990 hPa) e parte de um anticiclone maior no canto superior direito da Figura 4.2a. Em geral, a circulação associada apresenta um balanço geostrófico aproximado. O ciclone é projetado na vertical quase sem inclinação, como indicado pela altura geopotencial nos níveis de pressão de 500 hPa (Figura 4.2b) e 250 hPa (Figura 4.2c), configurando um sistema barotrópico. O jato subtropical no nível de pressão de 250 hPa também é observado atuar sobre a parte norte da região considerada, produzindo um cisalhamento vertical do vento relativamente intenso. Como consequência, esta região apresenta relativa alta baroclinicidade, de acordo com o índice de Eady (Figura 4.2b). Uma região com mais alta baroclinicidade pode ser identificada em torno de 20W-15W e 45S.

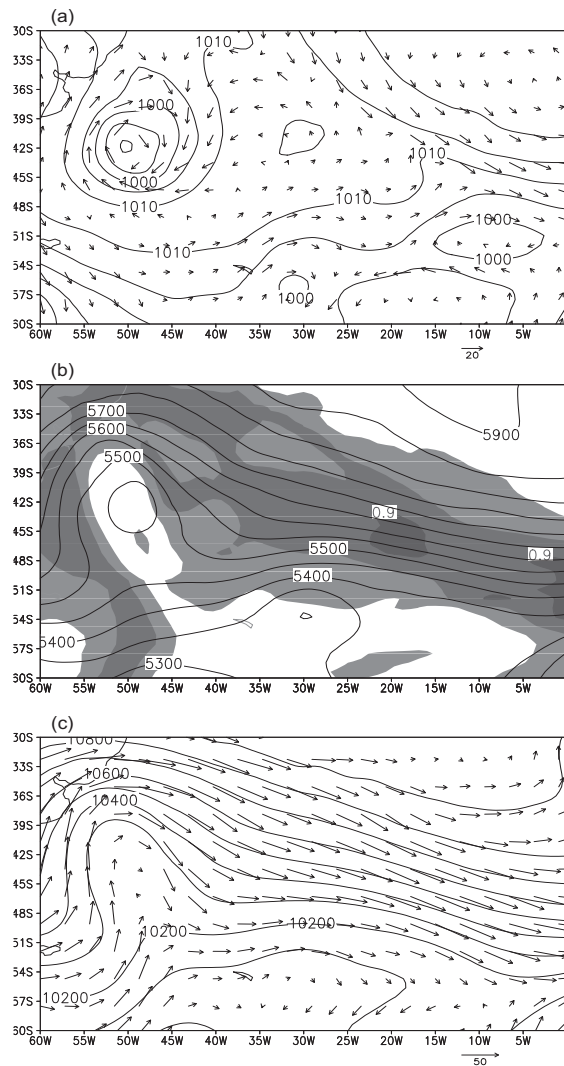


Figura 4.2 – Informações do estado inicial de 20 de janeiro de 2005 às 1200 UTC, sobre o Oceano Atlântico Sul: (a) pressão ao nível médio do mar (hPa) e vetor vento em 1000 hPa (m s^{-1}), (b) altura geopotencial em 500 hPa (m, contornos) e índice de Eady (dia^{-1} , sombreado); (c) altura geopotencial em 250 hPa (m) e vetor vento (m s^{-1}). O intervalo dos contornos é 0.3 dia^{-1} para o índice de Eady em (b). As referências para as magnitudes dos ventos são indicadas abaixo dos painéis (a) e (c).

Como as perturbações EOF são calculadas separadamente para cada campo da análise, uma importante questão é se estas perturbações são balanceadas umas com as outras. Para abordar este ponto, são mostradas nas Figuras 4.3 e 4.4 a primeira e a segunda perturbações EOF do campo de vento em 1000 hPa sobreposto às perturbações da pressão à superfície para cada experimento. As discussões serão concentradas nos resultados da primeira perturbação EOF e, quando houver diferenças significativas, os resultados da segunda perturbação EOF serão mencionados. A primeira e a

segunda perturbações do método breeding também são apresentados e discutidos.

Os experimentos OPER e EXT1 não contêm perturbações em P e Q, por isso não aparecem perturbações em P nas Figuras 4.3a,c e 4.4a,c. São observadas pequenas perturbações no campo de vento para OPER e EXT1 e um padrão horizontal de perturbações não muito organizado principalmente no experimento OPER; no experimento EXT1 uma pequena região ciclônica aparece próximo do canto superior direito da Figura 4.3c. Quando são calculadas perturbações adicionais para P e Q sobre a região TRE, uma região de perturbação alongada zonalmente, centrada em torno de 30W e próximo do limite do domínio de perturbação (45S), é produzida na pressão à superfície (Figura 4.3b). Esta perturbação principal tem amplitude máxima negativa de cerca de -4 hPa. Da teoria geostrófica, perturbações negativas induzem circulações ciclônicas ao seu redor. As perturbações do vento são ligeiramente aumentadas se comparadas com as perturbações em OPER e é notada a circulação ciclônica associada às perturbações em P, em um balanço quase geostrófico.

Quando as perturbações são calculadas como EOFs extratropicais, observa-se que os distúrbios se estendem para sul, sobre uma grande área, atingindo aproximadamente 54S (Figura 4.3d). As amplitudes das perturbações são aumentadas para cerca de -6 hPa em P e 5 m s^{-1} no vento. Dois núcleos menos intensos de perturbações positivas em P são observados próximo à longitude de 45W. Novamente, pode-se notar que as perturbações no vento seguem aproximadamente a teoria geostrófica e apresentam circulação ciclônica sobre perturbações negativas e rotação anticiclônica sobre perturbações positivas. Para a região analisada e para este caso, as perturbações EOF regionais sobre a América do Sul contribuem para diminuir levemente as amplitudes das perturbações (Figura 4.3e), entretanto o padrão horizontal permanece quase o mesmo daquele observado em EXT2. No experimento LNCR (Figura 4.3f), nota-se que as perturbações da pressão a superfície e do vento apresentam um padrão diferente daquele observado em EXT2 e ETSA. Dois núcleos principais formando um dipolo de perturbações

positivas e negativas com os centros, respectivamente, em 41S-20W e 44S-25W são observados. As perturbações do vento acoplam-se as perturbações em P de forma menos geostrófica do que nos demais experimentos. Isto pode estar relacionado à estrutura de menor escala da perturbação na pressão em LNGR e ao fato que perturbações de modos EOF diferentes estão sendo combinados para produzir a condição inicial perturbada.

Na Figura 4.3g são apresentadas as perturbações breeding. Neste caso, novamente é observado um dipolo nas perturbações da pressão com um núcleo positivo em 54S-18W e um núcleo negativo em 45S-44W. O campo de vento apresenta forte acoplamento geostrófico com as perturbações no campo de pressão. Este resultado é uma consequência da forma como as perturbações são construídas, ou seja, a partir de previsões de 24 horas que são essencialmente balanceadas. Na Figura 4.3h são apresentadas as perturbações randômicas para uma comparação com as perturbações EOF e breeding. Nota-se claramente o caráter aleatório das perturbações iniciais, sem qualquer relação com os sistemas meteorológicos atuantes naquela região.

A segunda perturbação EOF e breeding, mostrada na Figura 4.4, apresenta resultados que confirmam as discussões sobre a questão do balanço das perturbações apresentadas anteriormente. O padrão espacial da segunda perturbação é semelhante àquele da primeira perturbação, exceto nos experimentos LNGR e BRCP, nos quais as perturbações são significativamente distintas.

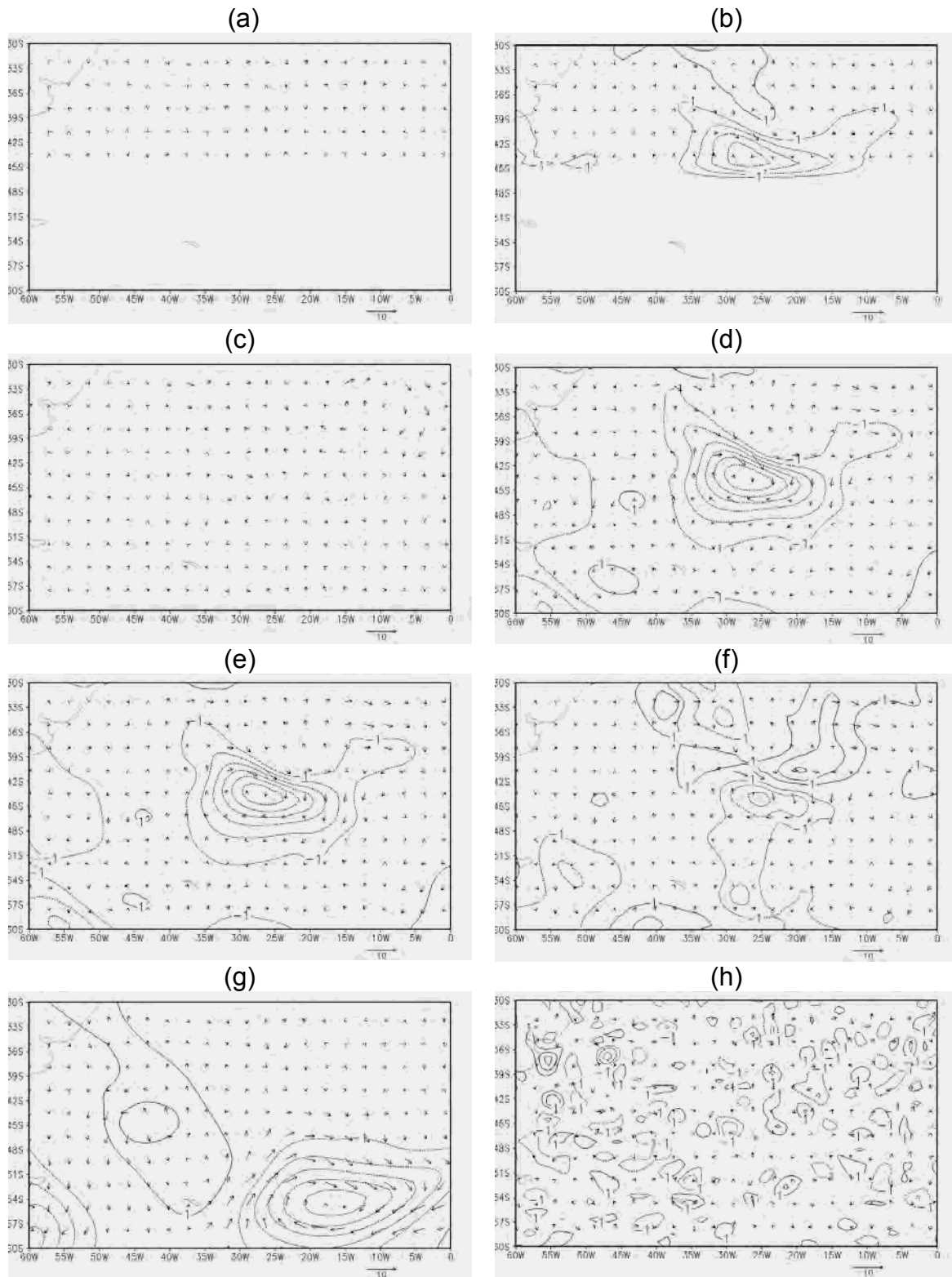


Figura 4.3 – Perturbações EOF iniciais de 20 de janeiro de 2005 às 1200 UTC dos campos de pressão à superfície e vetor vento, obtidos a partir da série temporal de diferenças entre a previsão de controle e a previsão randomicamente perturbada iniciada a partir da primeira condição inicial perturbada randomicamente ($n=1$, ver seção 3.3), para os experimentos: (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR, (g) BRCP e (h) perturbações randômicas. O intervalo dos contornos é 1 hPa para a pressão à superfície. As referências para as magnitudes do vento são indicadas abaixo dos painéis.

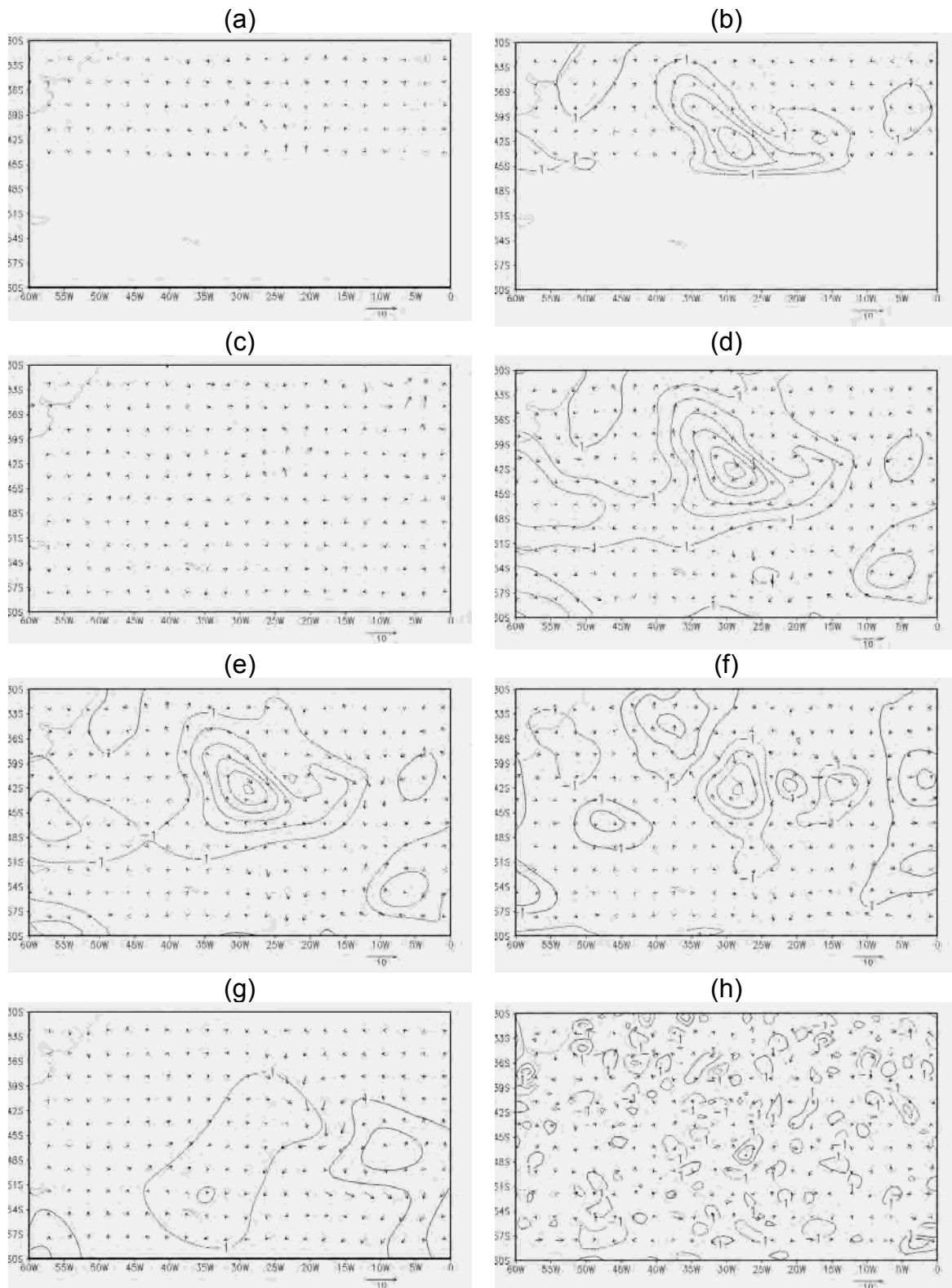


Figura 4.4 – Perturbações EOF iniciais de 20 de janeiro de 2005 às 1200 UTC dos campos de pressão à superfície e vetor vento, obtidos a partir da série temporal de diferenças entre a previsão de controle e a previsão randomicamente perturbada iniciada a partir da segunda condição inicial perturbada randomicamente ($n=2$, ver seção 3.3), para os experimentos: (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR, (g) BRCP e (h) perturbações randômicas. O intervalo dos contornos é 1 hPa para a pressão à superfície. As referências para as magnitudes do vento são indicadas abaixo dos painéis.

Os resultados indicam que embora nenhuma restrição seja imposta às perturbações EOF e elas tenham sido calculadas separadamente para cada campo, um balanço aproximado entre elas é obtido, principalmente quando são incluídas perturbações na pressão à superfície e umidade específica. Este resultado é derivado do fato de que apesar da integração do modelo ser iniciada a partir de uma condição inicial perturbada randomicamente, o campo de erros torna-se organizado após algumas horas. Começando a análise de EOF a partir de 6 horas, contaminações devido a efeitos randômicos são evitadas.

Outro ponto relevante a ser investigado é a estrutura vertical das perturbações, o que pode revelar algumas pistas a respeito da natureza das perturbações e mecanismos pelos quais as perturbações crescem. Para este propósito, é apresentada uma secção vertical da primeira perturbação EOF e breeding da componente meridional do vento (v) para o caso selecionado, em 44S na condição inicial (Figura 4.5) e 45S na previsão de $t+48h$ (Figura 4.7). Os resultados para a segunda perturbação também são apresentados, mas em 42S, na condição inicial (Figura 4.6) e 45S, na previsão de $t+48h$ (Figura 4.8). Novamente a discussão se concentrará nos resultados da primeira perturbação e as diferenças relevantes da segunda perturbação serão mencionadas. As secções verticais foram produzidas nas latitudes mencionadas, pois os máximos das perturbações em P estão localizados próximos desta latitude, como pode ser observado nas Figuras 4.3d e 4.4d.

Primeiramente é identificado que as perturbações do experimento OPER apresentam a estrutura vertical menos organizada no tempo inicial, na primeira perturbação (Figura 4.5a). Na segunda perturbação, as perturbações do experimento OPER apresentam uma estrutura bem organizada com a vertical, mas a sua inclinação é na direção do cisalhamento vertical do vento (Figura 4.6a). Segundo Badger e Hoskins (2001), perturbações que se inclinam com a vertical na direção do cisalhamento do fluxo básico tendem a decrescer com o tempo. Portanto, a configuração correspondente do método EOF parece não ser capaz de capturar os principais mecanismos de crescimento das perturbações em latitudes médias. As perturbações

extratropicais de EXT1 (Figura 4.5c) apresentam núcleos descontínuos que mostram inclinação para oeste com a vertical, sugerindo que, ao menos em parte, elas são associadas com a instabilidade baroclínica. Quando são incluídas perturbações em P e Q (experimentos TROP, EXT2 e ETSA) uma estrutura mais típica de sistemas baroclínicos é verificada nas perturbações. Exceto pela intensidade, em EXT2 elas são mais intensas, as perturbações nestes três experimentos possuem muitas semelhanças (Figuras 4.5b,d,e). Consistente com as perturbações na superfície das Figuras 4.3b,d,e, pode-se observar um ramo de perturbações negativas localizadas aproximadamente entre 25W e 10W próximo à superfície, que se estende até aproximadamente 200 hPa. Um ramo de perturbações positivas também é observado no lado oeste daquelas perturbações negativas. A inclinação para oeste com a vertical indica uma estrutura baroclínica, sugerindo que este mecanismo está associado com o crescimento das perturbações EOF em latitudes médias, nestes experimentos. Na Figura 4.5f, observa-se que a estrutura vertical das perturbações do vento meridional do experimento LNGR é praticamente igual àquela observada em ETSA. Isto deve estar relacionado ao fato que o mesmo modo EOF deve ter sido selecionado quando o critério de seleção baseado no crescimento linear das componentes principais foi utilizado.

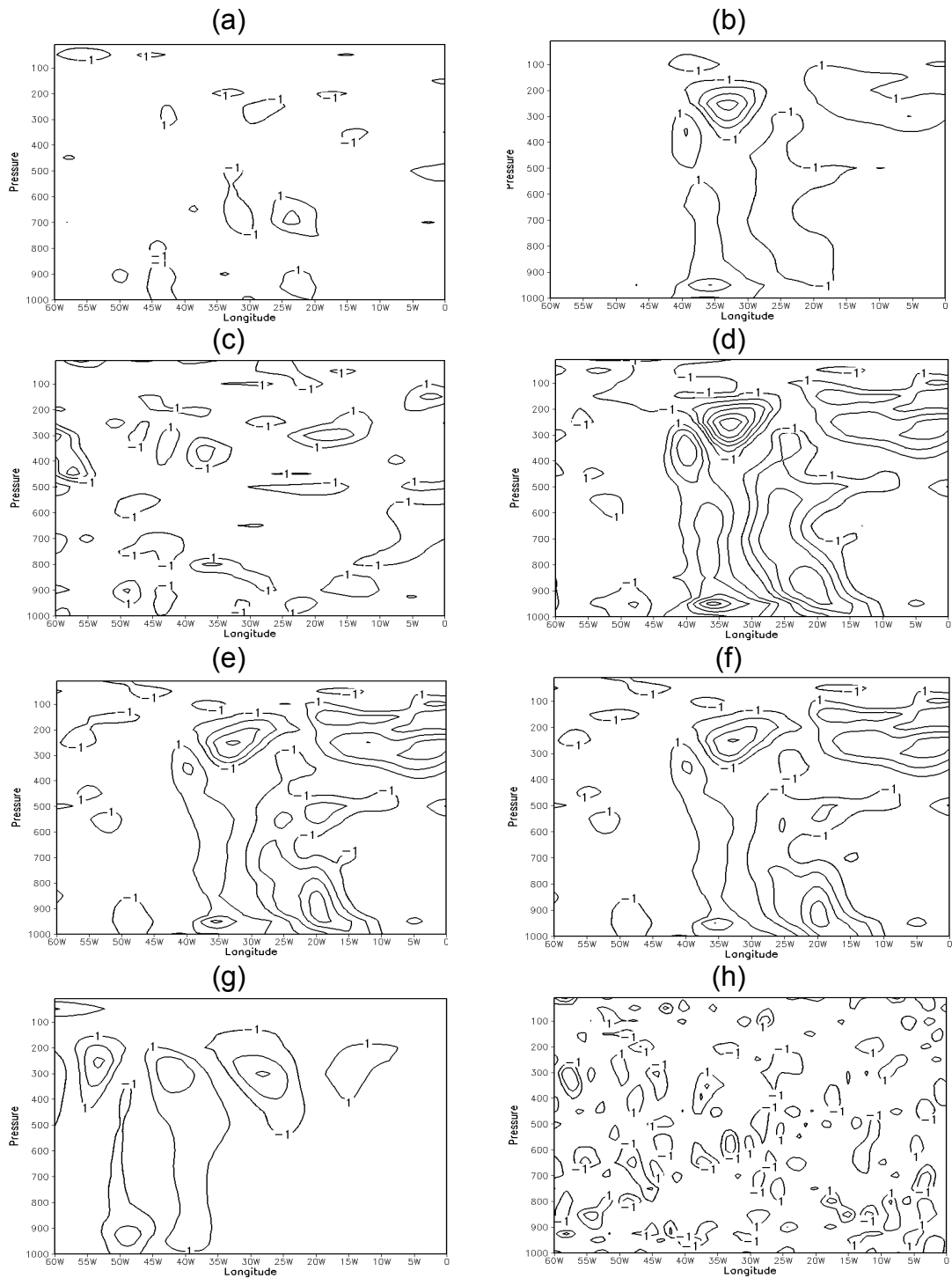


Figura 4.5 – Secção vertical longitude-pressão de 20 de janeiro de 2005 às 1200 UTC das perturbações EOF em 44S para o vento meridional no tempo inicial, obtido a partir da série temporal de diferenças entre a previsão de controle e a previsão perturbada randomicamente iniciada a partir da primeira condição inicial perturbada randomicamente ($n=1$, ver seção 3.3), para os experimentos: (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR, (g) BRCP e (h) perturbações randômicas. O intervalo dos contornos é 1 m s^{-1} .

A estrutura vertical da primeira perturbação breeding, apresentada na Figura 4.5g, mostra um ramo de perturbações negativas centrada aproximadamente em 50W e um ramo de perturbações positivas em 40W. Estas estruturas praticamente não apresentam inclinação até aproximadamente 500 hPa, mostrando uma suave inclinação apenas entre 500 e 200 hPa. Nota-se, neste caso, que as perturbações apresentam maiores amplitudes próximo a região da tropopausa, entre 300 e 200 hPa. A primeira perturbação breeding é consideravelmente diferente das perturbações EOF, apresentando uma estrutura mais barotrópica e com os núcleos de perturbações deslocados para oeste em relação aqueles encontrados com o método EOF. Já a segunda perturbação breeding (Figura 4.6g) apresenta um ramo de perturbação negativa, com núcleos entre 20W e 15W, próximo a superfície, que se inclinam para oeste com a vertical. Novamente, verifica-se diferenças significativas entre as perturbações breeding e EOF, principalmente quanto ao domínio das perturbações. As perturbações breeding são restritas a uma área menor quando comparadas com àquelas dos experimentos EXT2, ETSA e LNGR. Estas diferenças estão relacionadas, obviamente, à metodologia empregada na construção das perturbações, mas uma diferença entre os dois métodos merece ser citada, que é o fato do método EOF ser baseado na obtenção dos modos de crescimento rápido a partir das previsões perturbadas avançadas em 36 horas, enquanto o método breeding utiliza a previsão perturbada de 24 horas, válida para o horário da análise considerada, ou seja, aparentemente diferentes modos de crescimento são considerados quando estas duas metodologias são utilizadas. Isto sugere que a utilização de mais do que um método para selecionar as perturbações de crescimento rápido pode ser uma estratégia mais eficiente para produzir previsões por conjunto operacionais. As Figuras 4.5h e 4.6h mostram o perfil vertical das perturbações randômicas e, novamente, nenhum padrão bem definido é observado.

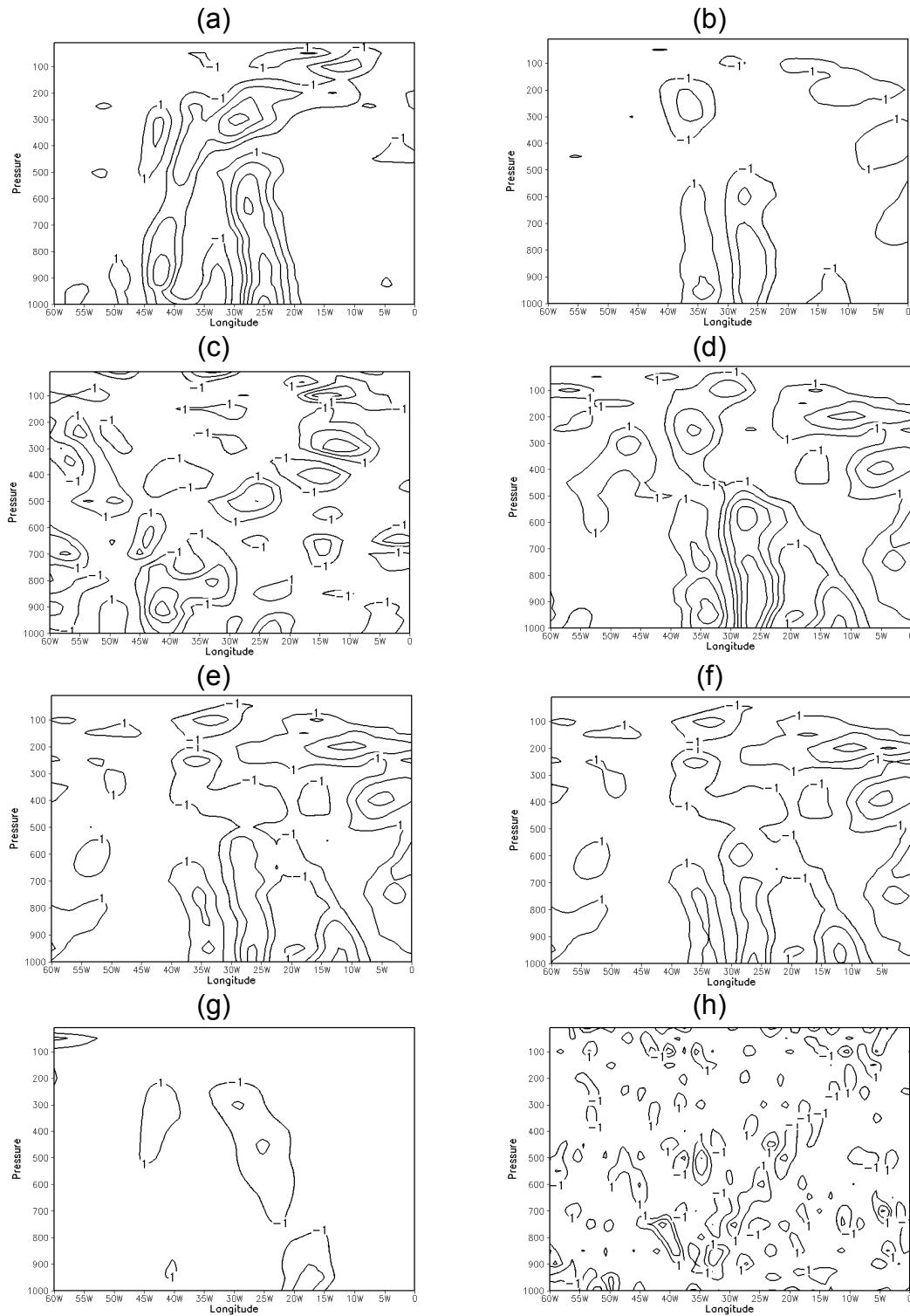


Figura 4.6 – Seção vertical longitude-pressão de 20 de janeiro de 2005 às 1200 UTC das perturbações EOF em 42S para o vento meridional no tempo inicial, obtido a partir da série temporal de diferenças entre a previsão de controle e a previsão perturbada randomicamente iniciada a partir da segunda condição inicial perturbada randomicamente ($n=2$, ver seção 3.3), para os experimentos: (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR, (g) BRCP e (h) perturbações randômicas. O intervalo dos contornos é 1 m s^{-1} .

A evolução não linear das perturbações é apresentada nas Figuras 4.7 e 4.8, para a primeira e segunda perturbações, para o prazo de previsão de 48 horas. Menor crescimento foi obtido no experimento OPER. Isto é consistente com os resultados apresentados anteriormente nas Figuras 4.5 e 4.6, uma vez que este experimento apresentou perturbações iniciais menos organizadas e com características menos favoráveis para o seu crescimento. Um máximo de perturbações positivas é observado próximo de 20-10W em OPER, para a primeira perturbação, estendendo-se da superfície até aproximadamente 200 hPa. Em EXT1, as perturbações são mais intensas do que em OPER e um ramo de perturbações negativas pode ser observado próximo a 10W, na primeira perturbação. Aplicando perturbações em P e Q, nota-se que as perturbações adquirem uma estrutura vertical mais organizada. Nos experimentos TROP, EXT2 e ETSA, perturbações positivas são observadas entre 25W e 15W e um ramo de perturbações negativas é observado em torno de 10-0W (Figuras 4.7b,d,e). Como esperado, o domínio no qual as perturbações iniciais são aplicadas desempenham um papel significativo na taxa de crescimento das perturbações das previsões. Quando os extratropicais são perturbados (experimentos EXT2 e ETSA), as perturbações crescem mais rápido do que nos casos em que as perturbações são aplicadas apenas sobre os trópicos estendidos (TROP). Neste caso, as perturbações de EXT2 apresentam crescimento maior do que os outros experimentos. O crescimento das perturbações do experimento LNDR (Figura 4.7f) é superior aquele do ETSA, mas ainda assim, é inferior àquele do experimento EXT2. A estrutura vertical das perturbações neste prazo de previsão é ligeiramente diferente daquele observado nos demais experimentos com perturbações EOF, sugerindo que perturbações de ordem diferente, selecionadas para a pressão à superfície (Figuras 4.3f e 4.4f) e, possivelmente para os outros campos, podem incluir novos modos de crescimento às perturbações EOF e maior diversidade entre as previsões iniciadas a partir de um horário específico pode ser alcançada fazendo uso do método utilizado neste experimento para selecionar as perturbações.

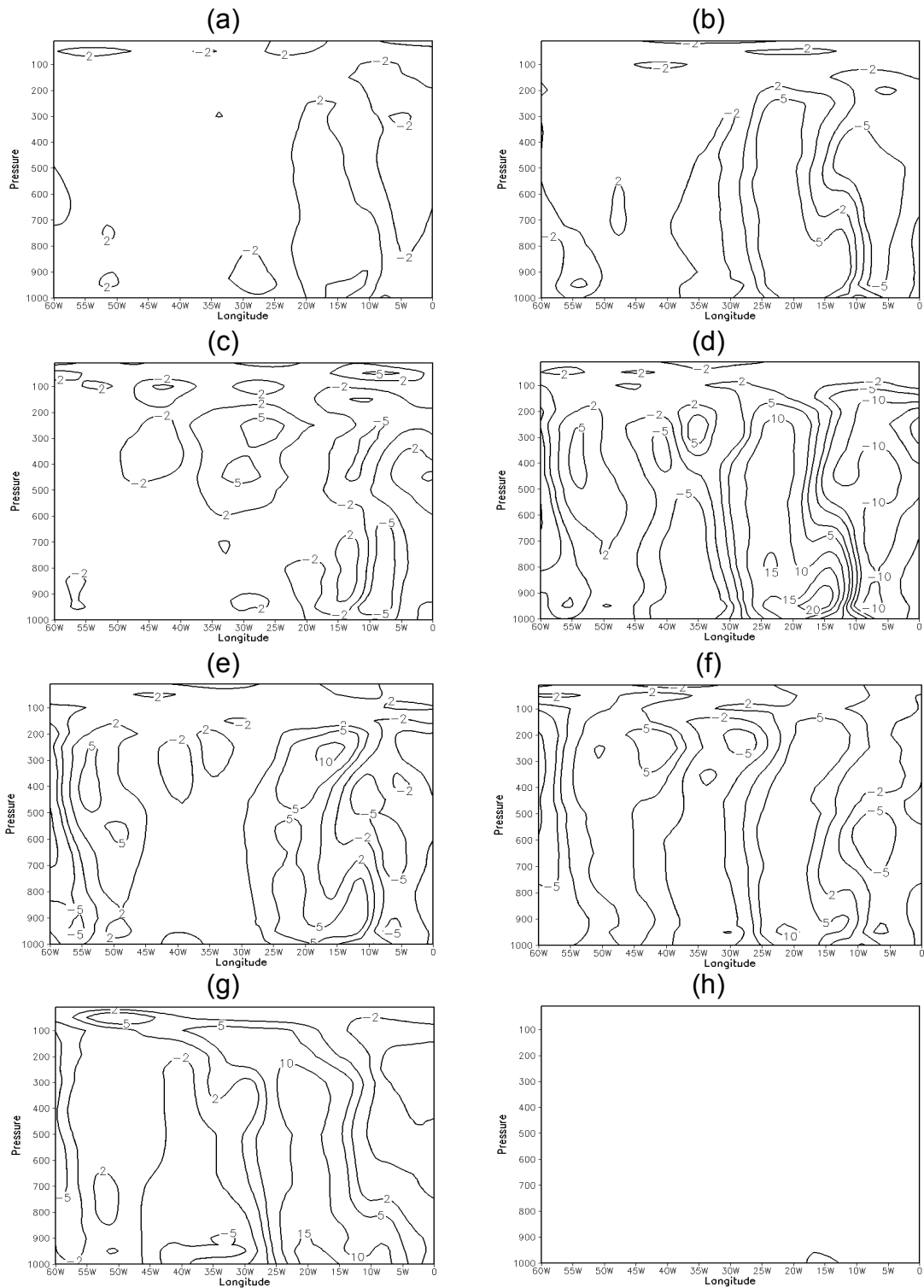


Figura 4.7 – Secção vertical longitude-pressão da evolução não linear de 48 horas das perturbações da componente meridional do vento apresentadas na Figura 4.5, mas em 45S, obtida como a diferença entre as previsões de 48 horas iniciadas a partir da condição inicial de controle (CIC) e da condição inicial perturbada na qual as perturbações EOF apresentadas nas Figuras 4.3 e 4.5 foram adicionadas à CIC. A condição inicial de controle é válida para 20 de janeiro de 2005 às 1200 UTC. Para os experimentos: (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR, (g) BRCP e (h) perturbações randômicas.

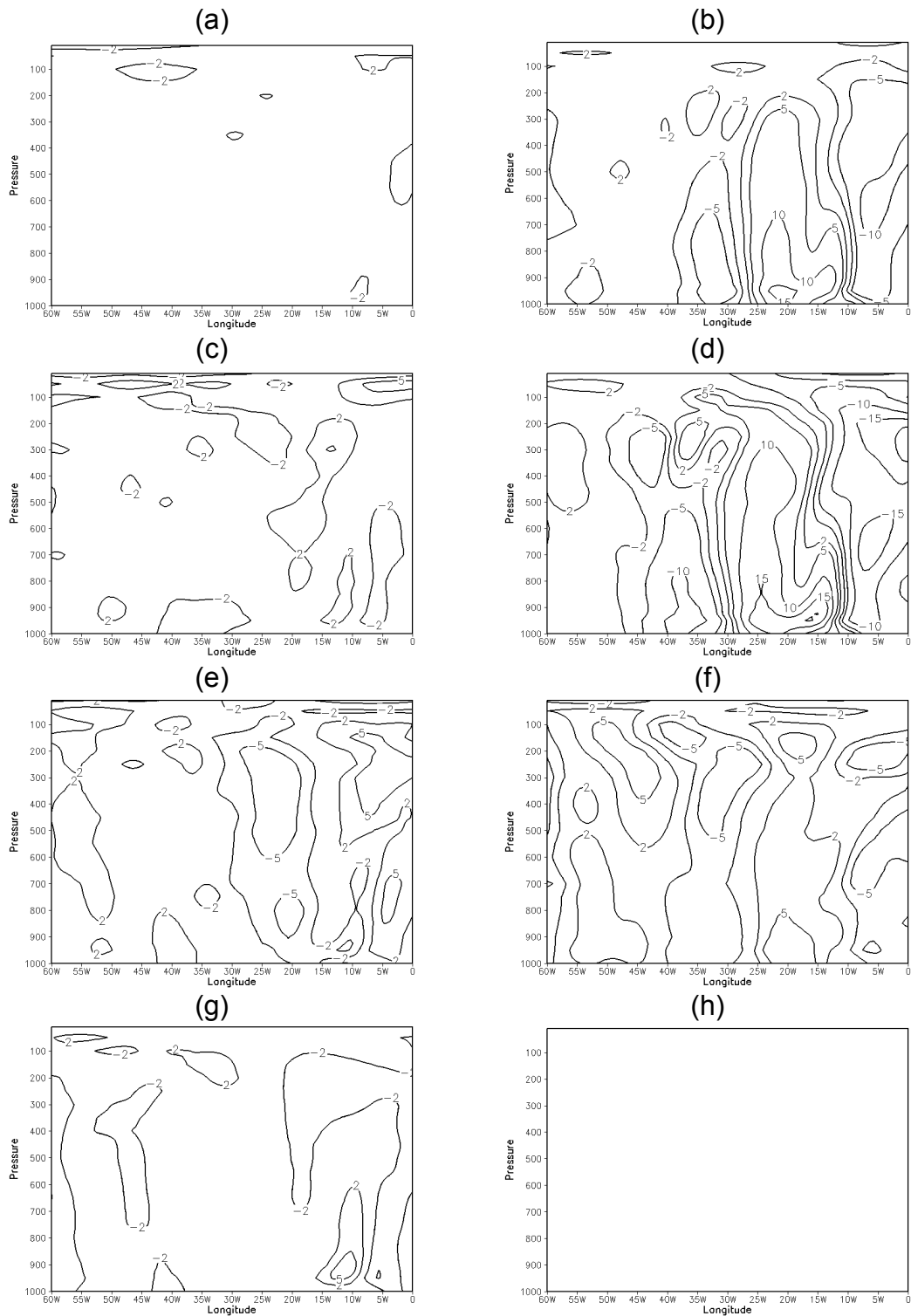


Figura 4.8 – Seção vertical longitude-pressão da evolução não linear de 48 horas das perturbações da componente meridional do vento apresentadas na Figura 4.6, mas em 45S, obtida como a diferença entre as previsões de 48 horas iniciadas a partir da condição inicial de controle (CIC) e da condição inicial perturbada na qual as perturbações EOF apresentadas nas Figuras 4.4 e 4.6 foram adicionadas à CIC. A condição inicial de controle é válida para 20 de janeiro de 2005 às 1200 UTC. Para os experimentos: (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR, (g) BRCP e (h) perturbações randômicas.

A evolução não linear da primeira perturbação breeding, mostrada na Figura 4.7g, apresenta uma estrutura vertical que se assemelha a estrutura observada em EXT2, especialmente em termos do ramo de perturbações negativas entre 45W e 30W e o ramo de perturbações positivas entre 25W e 10W, embora as amplitudes das perturbações breeding sejam menores. A segunda perturbação breeding também apresenta semelhanças quanto ao sinal e posição das perturbações em relação às aquelas do experimento EXT2, mas o seu crescimento é significativamente menor.

As Figuras 4.7h e 4.8h não apresentam isolinhas das perturbações randômicas, mostrando que o crescimento destas é bastante inferior àquele das perturbações EOF ou breeding. Este resultado indica que modos de crescimento rápido estão sendo selecionados pelos dois métodos e que as diferenças na taxa de crescimento das perturbações estão relacionadas à sua estrutura inicial, uma vez que as mesmas amplitudes, em termos de desvio padrão espacial, foram utilizadas. No experimento com perturbações randômicas, os campos de P e Q também foram perturbados.

Nos experimentos em que as perturbações se inclinam na vertical contra o cisalhamento vertical do fluxo básico, a inclinação para oeste das perturbações iniciais foi reduzida após a evolução não linear de 48 horas, e as perturbações das previsões adquiriram uma estrutura barotrópica. Este comportamento é similar aquele apontado por Randel e Stanford (1985) para o ciclo de vida das ondas de escala média em latitudes médias no verão do Hemisfério Sul: crescimento baroclínico nos estágios iniciais de desenvolvimento e decaimento barotrópico, com perda de energia para o fluxo médio zonal. Estes resultados também são similares aqueles obtidos por Hoskins et al. (2000) e Coutinho et al. (2004) para o crescimento dos vetores singulares extratropicais do EPS do ECMWF.

4.2 Perfil Vertical e espectro de energia das perturbações

A *energia total* (ET) das perturbações foi calculada seguindo a metodologia apresentada em Ehrendorfer et al. (1999). Neste método, a energia total das perturbações é calculada a partir da soma das contribuições das energias de cada campo perturbado. A vantagem de utilizar este método é poder avaliar separadamente a importância de cada campo para a energia total das perturbações. Como este método incorpora a contribuição da perturbação na umidade, ela também é chamada *energia total úmida*. A expressão para a energia total úmida, por unidade de massa, numa formulação contínua, é dada por:

$$ET = \frac{1}{2} \frac{1}{D} \int_D \frac{1}{p_s} \int_{p_t}^{p_s} \left[u'^2 + v'^2 + \frac{c_p}{T_r} T'^2 + RT_r \left(\frac{p'_s}{p_r} \right)^2 + \frac{L^2}{c_p T_r} Q'^2 \right] dp dD \quad (4.2)$$

em que c_p , R , e L são o calor específico a pressão constante, a constante dos gases para o ar seco e o calor latente de condensação por unidade de massa, respectivamente (com valores numéricos de $1005.7 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $287.04 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ e $2.5104 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$, respectivamente), e a integração estende-se sobre o domínio horizontal D e a direção vertical p , do topo da atmosfera (p_t) à superfície (p_s). Os termos u' , v' , T' , p'_s e Q' são as perturbações das componentes zonal e meridional do vento, temperatura, pressão à superfície e umidade específica, respectivamente, e $T_r = 270 \text{ K}$ e $p_r = 1000 \text{ hPa}$.

Quatro regiões diferentes foram consideradas para a análise da estrutura das perturbações: global (GL), Hemisfério Norte (HN), Hemisfério Sul (HS) e trópicos (TR). As coordenadas de cada região são as mesmas apresentadas na Tabela 3.3. A análise é realizada para o tempo inicial (t+00h) e para o prazo de 48 horas de integração não linear do modelo (t+48h). O episódio avaliado é o da condição inicial do dia 20 de janeiro de 2005 1200 UTC.

Na Figura 4.9 é apresentada a média das ETs para as sete perturbações EOFs calculadas em cada experimento para a região global. A energia total (linha sólida) nos experimentos EOF apresenta dois máximos bem definidos, um em médio/baixos níveis (aproximadamente 700 hPa) e outro próximo da

tropopausa. Observa-se que nos experimentos OPER e EXT1 (Figuras 4.9a,c), não há contribuição das perturbações na pressão à superfície (triângulo sólido) e umidade específica (linha traço-ponto) para a energia total, uma vez que nestes experimentos não foi aplicada perturbações iniciais nestes campos. Uma característica comum a todos os experimentos (exceto painel h) é o domínio da energia cinética (linha tracejada) próximo da tropopausa. O máximo de ET em baixos/médios níveis é causado por um máximo absoluto na componente T' (linha pontilhada) nos experimentos em que não há perturbações na umidade específica. Sendo que nos experimentos nos quais Q' não é nulo, é esta a componente responsável por este segundo máximo na ET. Observa-se que em todos os experimentos, a contribuição das perturbações na pressão é significativamente menor do que aquelas das demais componentes. No experimento BRCP, o máximo da ET em baixos níveis ocorre aproximadamente em 800 hPa, e é dominado principalmente pelas perturbações na umidade específica. O máximo de energia cinética próximo da tropopausa é encoberto por um crescimento acentuado da energia da componente T' acima de 300 hPa. Para uma referência da estrutura da energia das perturbações utilizadas nas condições iniciais perturbadas randomicamente, é apresentado na Figura 4.9h o perfil vertical da energia total e das componentes para uma média das sete perturbações randômicas iniciais. Nota-se a estrutura típica aleatória das componentes T' e do vento, apresentando energia semelhante em todos os níveis verticais. A estrutura da componente Q' é causada pela aplicação de amplitudes diferentes em cada nível vertical.

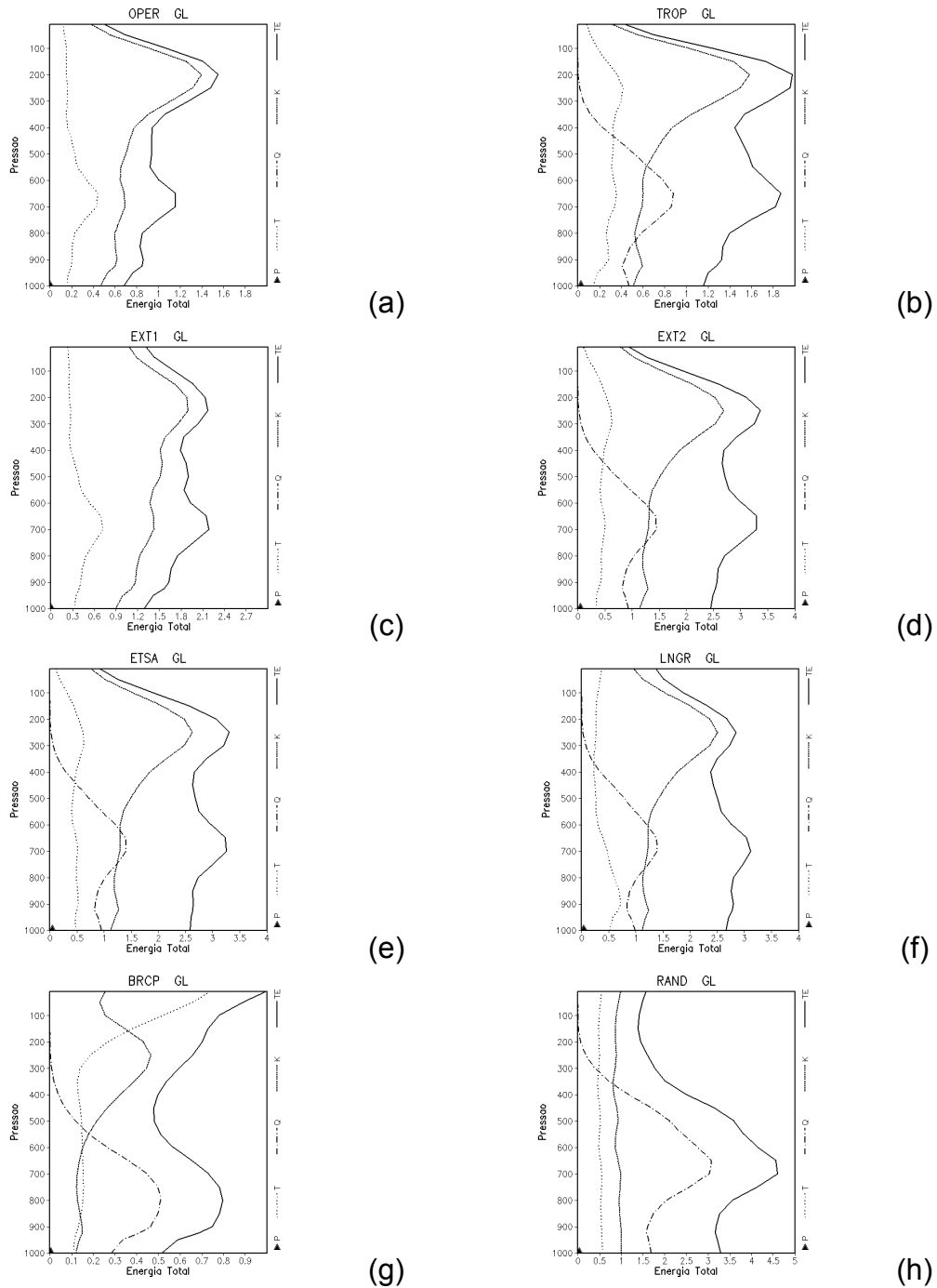


Figura 4.9 – Perfil vertical das contribuições de cada campo perturbado para a energia total, média sobre as sete perturbações EOF válidas para a condição inicial de 20 de janeiro de 2005 as 1200 UTC, e média sobre todo o globo na horizontal. As linhas tracejadas representam as contribuições da energia cinética (K), as linhas pontilhadas as contribuições da temperatura (T), as linhas traço-ponto as contribuições da umidade (Q), os triângulos as contribuições da pressão à superfície (P), e as linhas contínuas a soma de todas as contribuições. Os perfis são para os experimentos (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNDR, (g) BRCP, (h) perturbações randômicas.

A evolução não linear das perturbações iniciais discutidas no parágrafo anterior é apresentada na Figura 4.10. Observa-se que, neste caso, há novamente dois máximos de ET, mas desta vez os máximos são mais pronunciados em relação àqueles da condição inicial. O máximo em altos níveis permanece aproximadamente na mesma região, próximo da tropopausa. Já no máximo inferior, há notadamente um deslocamento da energia para níveis mais baixos da atmosfera, entre 800 e 900 hPa. Em todos os experimentos, o que se observa é uma diminuição da contribuição da componente T' para a energia total, e uma contribuição relativa maior da energia cinética nos altos níveis para a energia total. Esta contribuição maior da energia cinética nos altos níveis deve estar relacionada à propagação da energia cinética para cima das perturbações inclinadas contra o cisalhamento do vento básico com a vertical (BADGER e HOSKINS, 2001). Em baixos níveis, é evidente a diminuição da contribuição da energia cinética e um aumento considerável da contribuição da energia da componente úmida (Q'). O deslocamento do máximo da energia total dos médios para os baixos níveis é devido ao deslocamento do máximo da contribuição da componente Q' para os baixos níveis. Forte contribuição da componente úmida para a energia total das perturbações em baixos/médios níveis das perturbações SVs no tempo final também foi obtido por Ehrendorfer et al. (1999). Há uma nítida diferença entre os máximos de perturbações na umidade dos experimentos sem perturbações em Q' na condição inicial (OPER e EXT1), e os demais experimentos. Nos experimentos com perturbações iniciais em Q' o máximo é mais acentuado com um pico bem definido em torno de 850 hPa, enquanto em OPER e EXT1, o máximo estende-se de 925 hPa até aproximadamente 700 hPa. No experimento BRCP, é observado uma estrutura semelhante aos demais experimentos até aproximadamente 150 hPa, mas na estratosfera, há um nítido aumento da energia total devido a um aumento da energia cinética e de T' . O experimento partindo de perturbações randômicas desenvolveu um máximo relativamente menor em altos níveis e um máximo nitidamente maior nos baixos níveis, que tem maior contribuição da energia da componente úmida. Neste experimento, o crescimento da energia das perturbações é claramente inferior aquele observado nos demais experimentos.

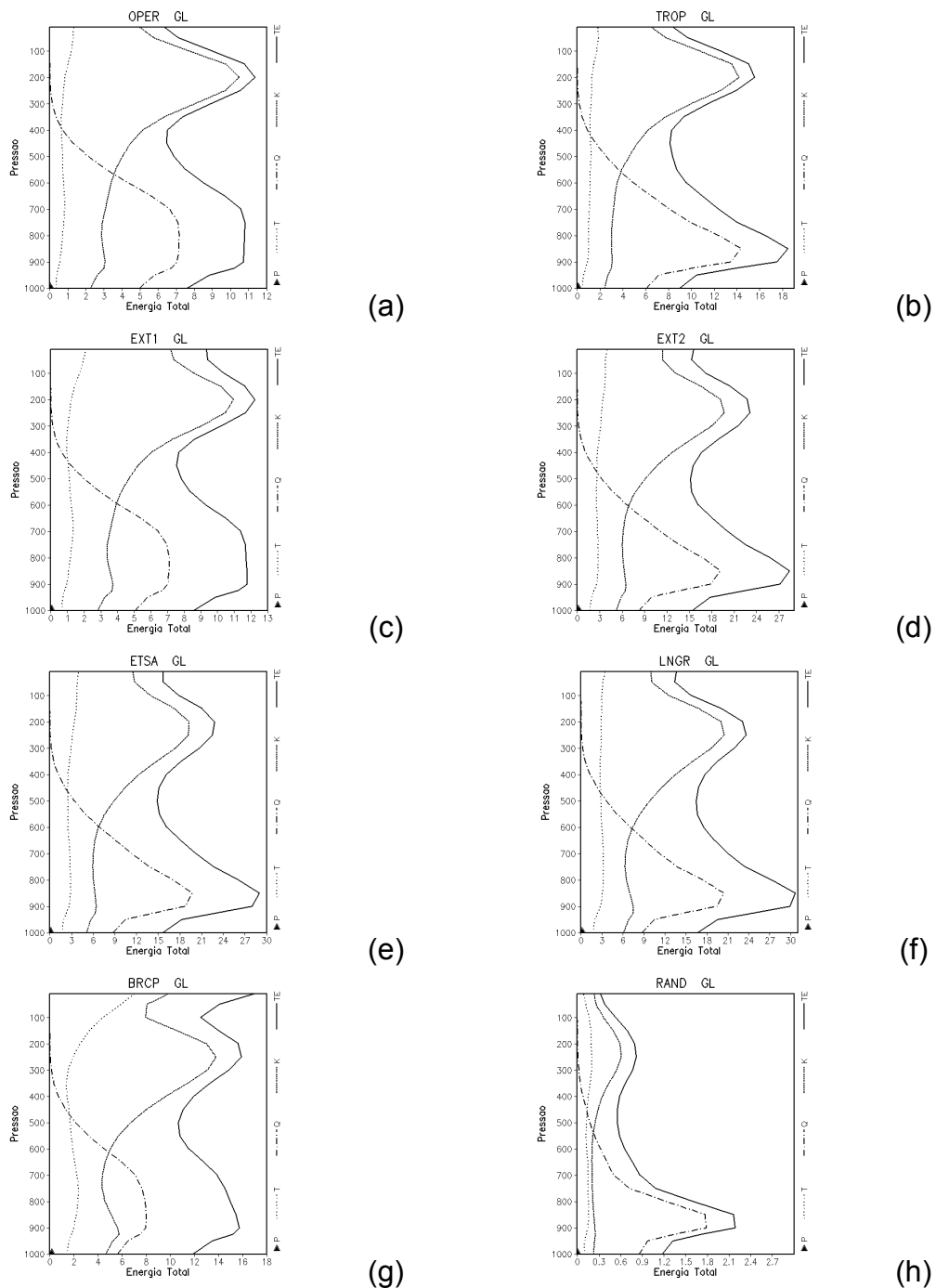


Figura 4.10 – Perfil vertical das contribuições de cada campo perturbado para a energia total, média sobre as sete perturbações EOF das previsões de 48 horas, válidas para 22 de janeiro de 2005 às 1200 UTC, e média sobre todo o globo na horizontal. As linhas tracejadas representam as contribuições da energia cinética (K), as linhas pontilhadas as contribuições da temperatura (T), as linhas traço-ponto as contribuições da umidade (Q), os triângulos as contribuições da pressão à superfície (P), e as linhas contínuas a soma de todas as contribuições. Os perfis são para os experimentos (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR, (g) BRCP, (h) perturbações randômicas.

As características das perturbações extratropicais em comparação com aquelas obtidas para os trópicos são avaliadas nas Figuras 4.11 (HN), 4.12 (HS) e 4.13 (TR). Neste caso, a análise foi realizada apenas para o tempo inicial. É importante observar que as escalas das abscissas (eixos x) são diferentes nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13. Apenas os aspectos qualitativos, ou seja, o padrão da estrutura vertical das perturbações será avaliado. Nos experimentos com perturbações EOF, não há grandes diferenças na estrutura vertical das perturbações em termos da energia total. Já em termos das contribuições de cada componente perturbada do vetor estado da atmosfera, verifica-se que há uma maior contribuição da componente Q' no hemisfério de verão, a exemplo do que é observado nas Figuras 4.12d e 4.13d. Observa-se também que a energia total nos extratropicos é maior nos baixos/médios níveis da atmosfera. O experimento BRCP apresenta diferenças significativas no perfil vertical da energia, principalmente acima de 150 hPa. Nos trópicos, nota-se que nos experimentos OPER e EXT1, o máximo de perturbação em altos níveis é mais acentuado do que nos experimentos com perturbações na umidade. Isto sugere que nos experimentos em que Q' é nulo as perturbações são mais confinadas em altos níveis e concentradas nas ondas externas da atmosfera, e as perturbações na umidade contribuem para perturbar mais significativamente as ondas internas na região tropical. As ondas internas estão associadas a regiões de intensa atividade convectiva e contêm a maior parte da energia nos trópicos (MENDONÇA e BONATTI, 2008). No experimento BRCP, a energia total das perturbações nos trópicos apresenta uma estrutura bastante diferente daquela observada nos extratropicos, com um máximo relativamente intenso em torno de 800 hPa, sendo causado, quase exclusivamente, pela componente da perturbação na umidade. As perturbações randômicas (Figuras 4.11h, 4.12h e 4.13h), como era esperado, apresentam comportamento semelhante em todas as regiões, com valores aproximadamente constantes de energia cinética e potencial devido a T' em todos os níveis verticais da atmosfera, e um máximo de energia devido a Q' em torno de 700 hPa.

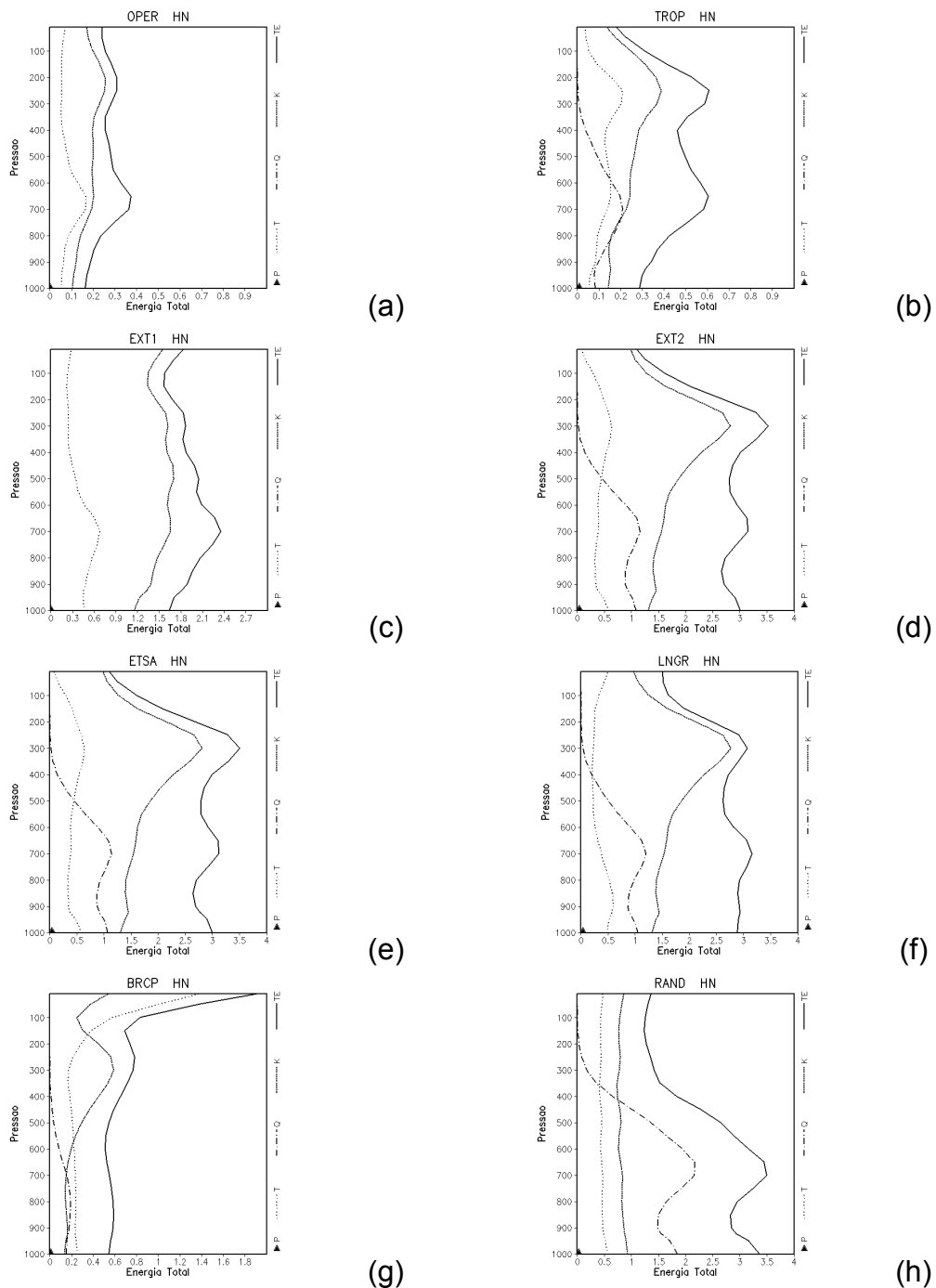


Figura 4.11 – Perfil vertical das contribuições de cada campo perturbado para a energia total, média sobre as sete perturbações EOF válidas para a condição inicial de 20 de janeiro de 2005 as 1200 UTC, e média sobre o Hemisfério Norte. As linhas tracejadas representam as contribuições da energia cinética (K), as linhas pontilhadas as contribuições da temperatura (T), as linhas traço-ponto as contribuições da umidade (Q), os triângulos as contribuições da pressão à superfície (P), e as linhas contínuas a soma de todas as contribuições. Os perfis são para os experimentos (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR, (g) BRCP, (h) perturbações randômicas.

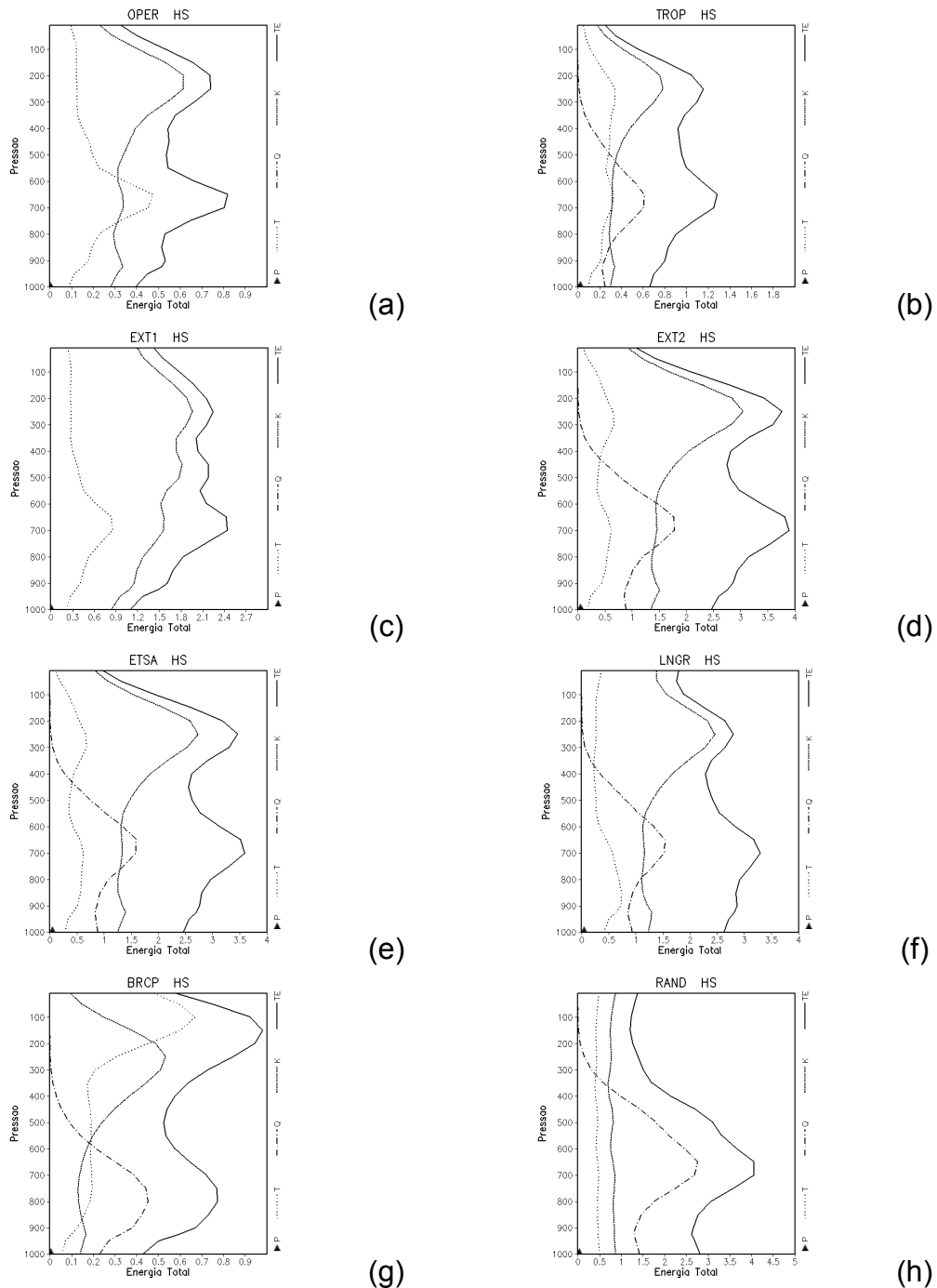


Figura 4.12 – Perfil vertical das contribuições de cada campo perturbado para a energia total, média sobre as sete perturbações EOF válidas para a condição inicial de 20 de janeiro de 2005 as 1200 UTC, e média sobre o Hemisfério Sul. As linhas tracejadas representam as contribuições da energia cinética (K), as linhas pontilhadas as contribuições da temperatura (T), as linhas traço-ponto as contribuições da umidade (Q), os triângulos as contribuições da pressão à superfície (P), e as linhas contínuas a soma de todas as contribuições. Os perfis são para os experimentos (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR, (g) BRCP, (h) perturbações randômicas.

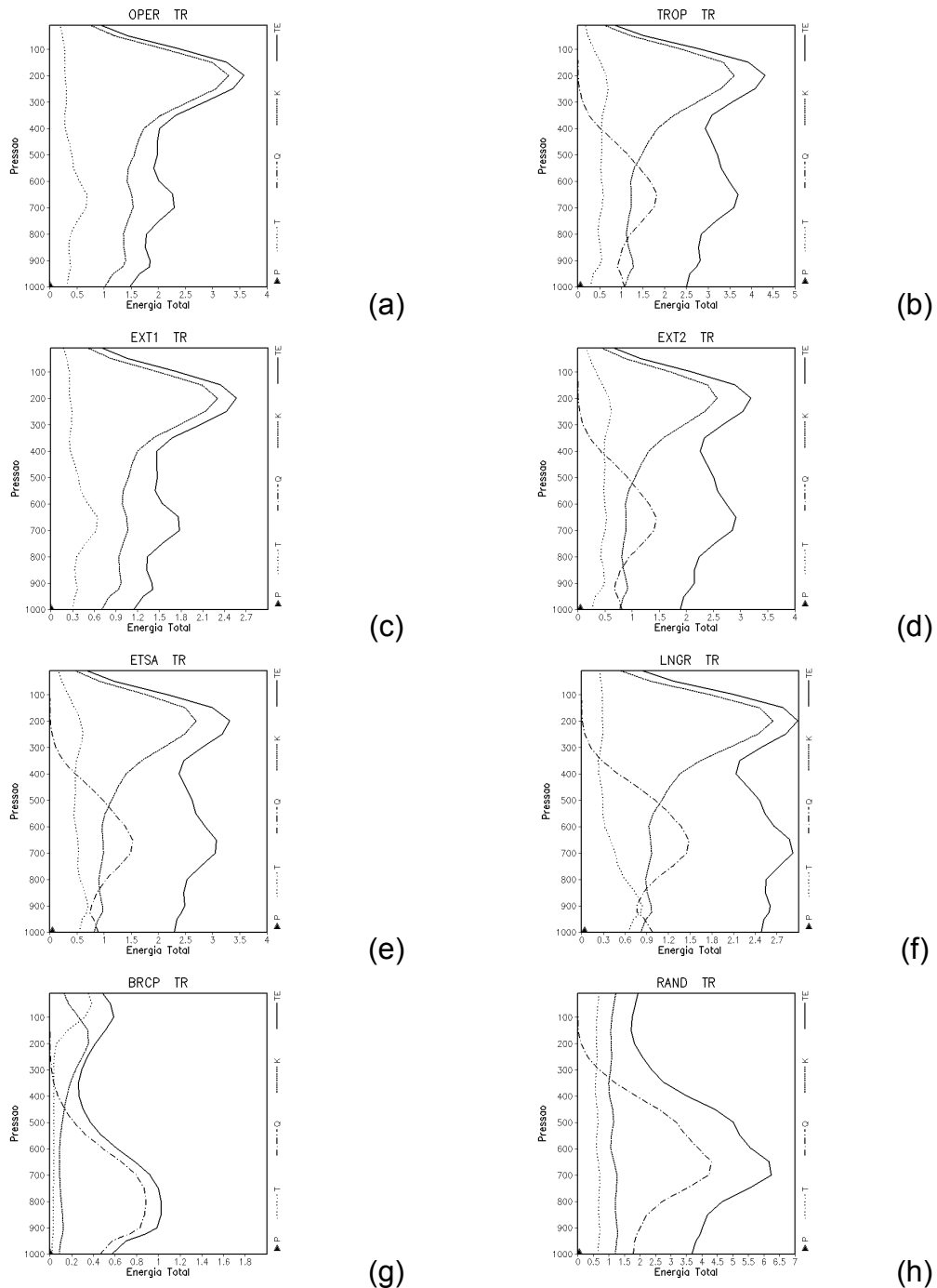


Figura 4.13 – Perfil vertical das contribuições de cada campo perturbado para a energia total, média sobre as sete perturbações EOF válidas para a condição inicial de 20 de janeiro de 2005 as 1200 UTC, e média sobre os trópicos. As linhas tracejadas representam as contribuições da energia cinética (K), as linhas pontilhadas as contribuições da temperatura (T), as linhas traço-ponto as contribuições da umidade (Q), os triângulos as contribuições da pressão à superfície (P), e as linhas contínuas a soma de todas as contribuições. Os perfis são para os experimentos (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR, (g) BRCP, (h) perturbações randômicas.

Algumas características importantes da energia das perturbações podem ser avaliadas através da distribuição espectral da energia. Para isto, as perturbações foram expandidas em séries de Fourier na direção zonal, para cada latitude e cada nível vertical do modelo, seguindo a metodologia apresentada em Bonatti (1980). Considerando que as perturbações (u' , v' , T' , Q' e p_s') em cada latitude e em cada nível vertical é uma função periódica da longitude, tais perturbações podem ser expandidas em séries de senos e cossenos, chamados *modos* ou *ondas*. Cada *onda* desta série é caracterizada por duas informações fundamentais, o número de ondas k (que representa o número de vezes que determinada *onda* aparece no comprimento de arco 2π , e está relacionado ao comprimento da onda), e os coeficientes de expansão da série ($A(k)$), que também podem ser chamados de amplitudes das ondas. Os coeficientes destas ondas são determinados a partir dos dados originais, e podem ser utilizados para calcular a energia de cada onda k , através da utilização de propriedades da expansão em série de variáveis quadráticas, como é o caso da Energia Total das perturbações, dada pela equação 4.2. É importante ressaltar que a energia calculada desta forma representa um valor médio sobre todos os pontos de longitude. A energia do modo com número de onda zero representa a energia contida na média zonal das perturbações. As amplitudes dos coeficientes dos modos com número de ondas 1, 2 e 3 indicam a energia das perturbações contidas nas ondas atmosféricas longas. Modos com número de ondas de 4 a 7 podem ser considerados de escala média, e podem ser associadas a ondas de escala sinótica da atmosfera (RANDEL e STANFORD, 1985). Modos com número de ondas maiores representam as ondas mais curtas, e estão associados aos sistemas atmosféricos de escala sub-sinótica.

Nesta análise é apresentado o espectro da energia total das perturbações, ou seja, a soma das contribuições devido às componentes cinética e potenciais de T' , Q' e p_s' . Novamente, a análise dos resultados é realizada no tempo inicial e após 48 horas de integração não linear das previsões. Os resultados apresentados representam uma média horizontal (sobre quatro regiões diferentes: global, HN, HS e TR), na vertical e sobre as sete perturbações

EOF e breeding calculadas em cada experimento, além das sete perturbações randômicas de referência (Figura 4.14).

Analisando o espectro de energia na região global e no tempo inicial (Figura 4.14a), observam-se diferenças significativas entre os experimentos, na distribuição da energia. O experimento com perturbações randômicas apresenta energia praticamente constante em todos os números de onda, ou seja, as perturbações são do tipo *ruído branco*, sem qualquer relação com os sistemas atmosféricos. Nos demais experimentos, o máximo de energia ocorre nos modos com números de onda menores, decaindo quase linearmente à medida que o número de onda aumenta, havendo significativa quantidade de energia nos modos com número de onda até 30 ou 35. Entretanto, nota-se que nos experimentos LNGR e TROP o máximo de energia ocorre nos modos 2 e 3, respectivamente. Já nos experimentos BRCP, EXT1, EXT2 e ETSA o máximo de energia encontra-se na média zonal e nas ondas com número de ondas menores, 1 a 3. Um máximo secundário de energia também é observado nos experimentos EXT2, ETSA e LNGR no modo 10, e no modo 6 do experimento BRCP.

Analisando o espectro de energia das perturbações para evolução não linear de 48 horas das perturbações (Figura 4.14b), observa-se claramente que as perturbações aleatórias possuem o menor crescimento entre todos os experimentos, caracterizando a inadequação deste tipo de perturbação para previsões de tempo por conjunto. Em ordem crescente de amplificação das perturbações observam-se os experimentos OPER, TROP, EXT1, BRCP e aproximadamente juntos EXT2, ETSA e LNGR. Em todos os experimentos, exceto aquele com perturbações randômicas, observa-se uma concentração da energia nos modos com número de onda até 15, caracterizando um deslocamento da energia dos modos mais curtos em direção aos modos de escala longa e média. Em todos os experimentos com perturbações EOF e breeding, há um máximo relativo de energia no modo com número de onda 5, que são modos que apresentam, em geral, crescimento baroclínico.

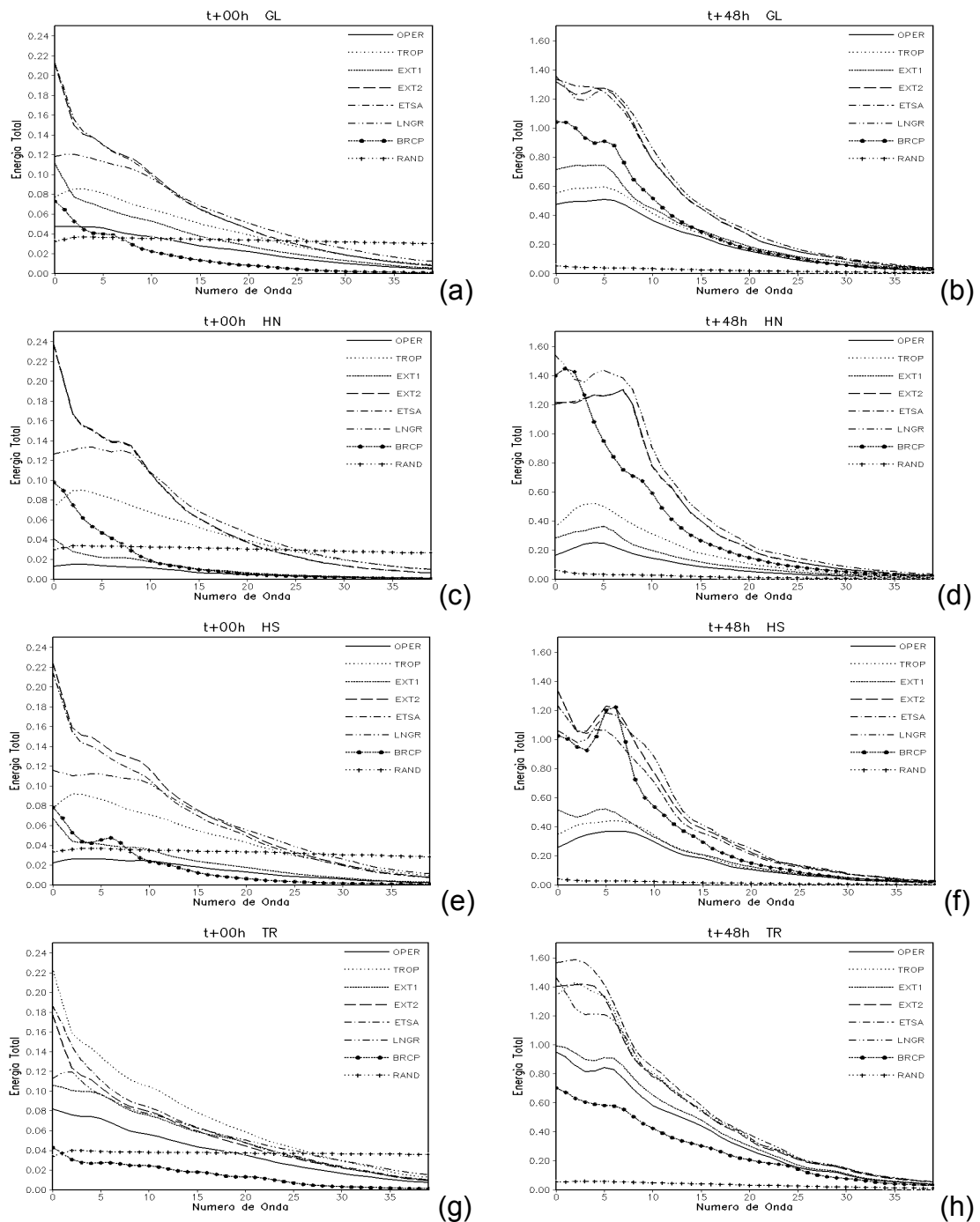


Figura 4.14 – Distribuição espectral da energia total, média sobre as sete perturbações EOF válidas para a condição inicial de 20 de janeiro de 2005 as 1200 UTC na coluna da esquerda e para as perturbações das previsões de 48 horas válidas para 22 de janeiro de 2005 as 1200 UTC na coluna da direita. Média sobre todo o globo em (a) e (b), Hemisfério Norte em (c) e (d), Hemisfério Sul (e) e (f), e trópicos (g) e (h). As linhas contínuas referem-se aos resultados do experimento OPER, linhas pontilhadas ao TROP, linhas tracejado curto ao EXT1, linhas tracejado longo ao EXT2, linhas traço ponto ao ETSA, linhas traço ponto ponto ao LNDR, linhas tracejadas com marcadores circulares ao BRCP e linhas pontilhadas com sinais de adição ao experimento com perturbações randômicas.

A análise da estrutura extratropical dos Hemisférios Norte e Sul, e tropical, mostra que, no tempo inicial, o espectro de energia global é semelhante àquele observado nos extratropicais. A diferença mais significativa entre o HN e o HS é observada no experimento BRCP, em que o máximo secundário que aparece no HS no modo com número de onda 5 ou 6 não ocorre no HN. Nos trópicos, a distribuição de energia parece ser menos confinada nos modos com número de onda menores do que nas perturbações dos extratropicais. No prazo $t+48h$, nota-se que as perturbações do experimento BRCP amplificam-se aproximadamente tanto quanto os experimentos EOF com maior crescimento (EXT2, ETSA e LNGR) nos extratropicais. No HN, há uma divergência entre o experimento BRCP e os experimentos EOF quanto ao modo com máxima energia. Enquanto no primeiro, o modo 1 ou 2 apresenta maior energia, nos demais, é no modo 5 que se observa tal característica. No HS, o máximo de energia no modo 5 apresenta-se bem pronunciado em todos os experimentos. Nos trópicos, as perturbações que mais cresceram durante a integração não linear apresentam máximo de energia em torno do modo com número de onda 3. Observa-se também que o crescimento das perturbações breeding é inferior àquele dos experimentos EOF. Isto sugere que as perturbações EOF sejam mais adequadas nesta faixa de latitude.

4.3 Desempenho das previsões baseado em índices estatísticos

Nesta seção, os resultados dos experimentos são avaliados através da média dos índices estatísticos para o período de 15 de dezembro de 2004 a 15 de fevereiro de 2005. O desempenho da previsão de controle é calculado e comparado com o desempenho do experimento OPER para fornecer uma referência das vantagens das previsões por conjunto em relação à previsão de controle, num sentido determinístico. Procurando investigar o impacto das modificações no procedimento de perturbações iniciais de cada experimento no desempenho das previsões, os resultados são analisados de acordo com quatro conjuntos principais de configurações do procedimento de geração das condições iniciais perturbadas. Primeiramente, é avaliado o impacto da inclusão de perturbações nos campos de pressão à superfície e umidade

específica e a extensão das perturbações baseadas em EOF para os extratropicais. Em seguida, o impacto da aplicação de perturbações regionais sobre a América do Sul é analisado. Posteriormente, investiga-se o impacto da utilização do método de seleção dos modos EOFs mais instáveis baseado no crescimento da série temporal dos coeficientes das EOFs. Finalmente, os resultados do experimento com o método breeding simplificado são avaliados. Atenção especial é dispensada aos impactos de cada experimento sobre a região da América do Sul. Sobre os extratropicais o campo avaliado é o geopotencial em 500 hPa. Sobre os trópicos, apenas os resultados de U850 serão apresentados, uma vez que V850 apresenta resultados similares e conclusões análogas são obtidas para ambos.

4.3.1 Previsão de controle vs. conjunto médio

Para uma ideia simples dos benefícios que o EPS adiciona ao desempenho das previsões, a correlação do padrão de anomalias e a raiz do erro quadrático médio da previsão de controle (CF) foi calculada e são apresentadas como linhas pretas tracejadas na Figura 4.15. Nas Figuras 4.15a,b,c,d as barras de erros para um nível de confiança de 90 % do experimento OPER é mostrado para cada prazo de previsão. As barras de erros dos outros experimentos são similares àsquelas do OPER, por isso elas serão omitidas. Quando o RMSE é considerado, é evidente que o conjunto médio (EM) supera a previsão de controle em todas as regiões, em todos os prazos de previsão. Para o prazo de 7 dias, sobre o HS, os índices são 97.79 e 101.71 para EM e CF, respectivamente, o que representa uma melhoria de quase 4 %.

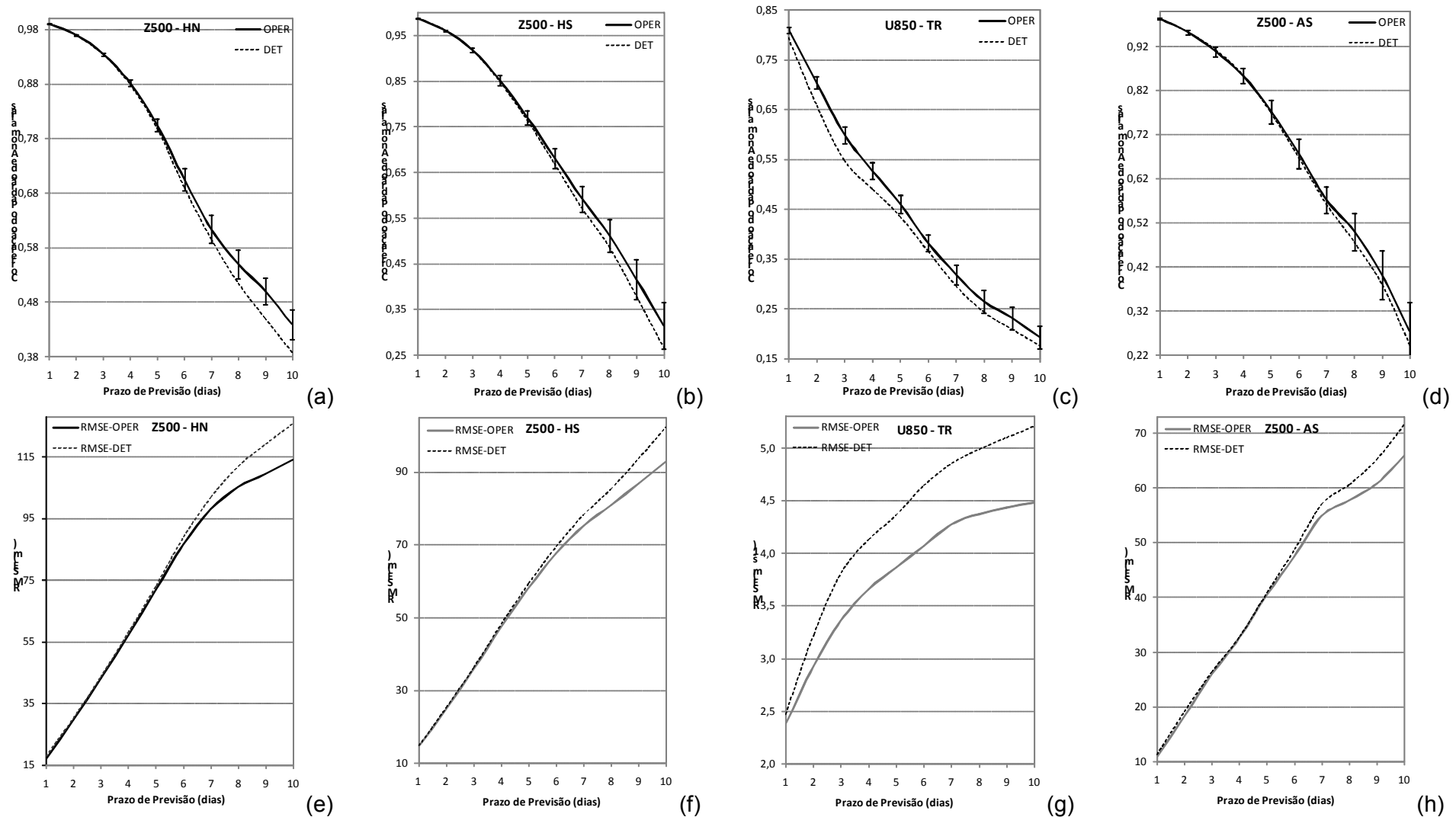


Figura 4.15 – Média no período de 15 de dezembro de 2004 a 15 de fevereiro de 2005 da correlação do padrão de anomalias (PAC) (painéis superiores) e da raiz do erro quadrático médio (RMSE) (painéis inferiores), das previsões determinísticas (DET, linhas tracejadas) e conjunto médio para o experimento OPER (linhas contínuas). Os valores referem-se a altura geopotencial em 500 hPa sobre as regiões: (a) e (e) Hemisfério Norte, (b) e (f) Hemisfério Sul e (d) e (h) América do Sul; e para a componente zonal do vento em 850 hPa sobre os trópicos em (c) e (g). As barras verticais nos painéis superiores indicam os erros estatísticos para um intervalo de confiança de 90 % para o experimento OPER.

Quando PAC é considerado, o conjunto médio é novamente melhor do que a CF, exceto apenas para os dois primeiros prazos de previsão sobre HN e HS, e para os primeiros quatro prazos de previsão sobre a AS. Sobre a AS, para a previsão de 5 dias, os valores da PAC são 0.572 e 0.561 para EM e CF, respectivamente. É observado também que na amostra utilizada, não é possível discriminar entre a correlação do padrão de anomalias destes dois experimentos, com um nível de confiança de 90 %.

Os resultados obtidos aqui são coerentes com aqueles apresentados em Buizza et al. (2005), para maio-junho-julho de 2002 sobre o HN, para os conjuntos operacionais do ECMWF, MSC e NCEP, e aqueles apresentados em Toth e Kalnay (1997), para 6 de maio-14 de junho de 1992 sobre o HN, HS e trópicos, para o conjunto operacional do NCEP. É importante enfatizar que os dois trabalhos citados são usados apenas como uma referência grosseira, pois eles usaram períodos diferentes e diferentes tamanhos de conjuntos.

4.3.2 Impacto do cálculo de perturbações EOF adicionais para os extratropicais e para os campos de pressão à superfície e umidade específica

Nesta subseção, o impacto de calcular perturbações baseadas em EOF adicionais para os extratropicais e para os campos de pressão à superfície e umidade específica no desempenho do conjunto é discutido. Estas modificações foram consideradas individualmente ou combinadas nos experimentos OPER, TROP, EXT1 e EXT2.

Três índices estatísticos (PAC, RMSE e espalhamento) para estes experimentos são mostrados para todas as regiões avaliadas na Figura 4.16. Os resultados de todos os experimentos são analisados e comparados entre si.

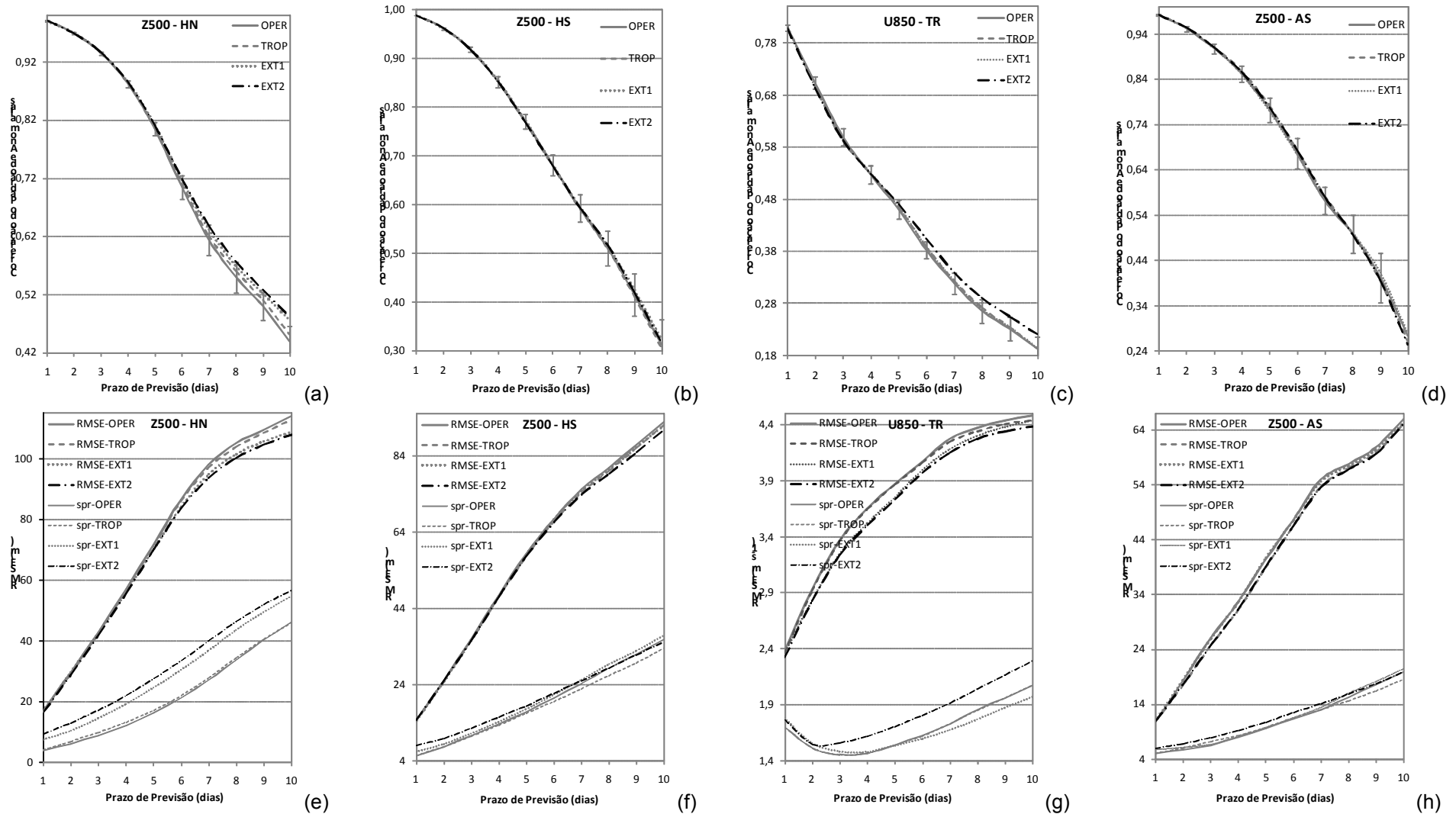


Figura 4.16 – Média no período de 15 de dezembro de 2004 a 15 de fevereiro de 2005. Painéis superiores: correlação do padrão de anomalias (PAC) do conjunto médio. Painéis inferiores: raiz do erro quadrático médio (RMSE) do conjunto médio (linhas grossas) e espalhamento do conjunto (linhas finas). Para os experimentos OPER (linhas contínuas), TROP (linhas tracejadas), EXT1 (linhas pontilhadas) e EXT2 (linhas traço longo-ponto). Os valores referem-se à altura geopotencial em 500 hPa sobre as regiões: (a) e (e) Hemisfério Norte, (b) e (f) Hemisfério Sul e (d) e (h) América do Sul; e para a componente zonal do vento em 850 hPa sobre os trópicos em (c) e (g). As barras verticais nos painéis superiores indicam os erros estatísticos para um intervalo de confiança de 90 % para o experimento OPER.

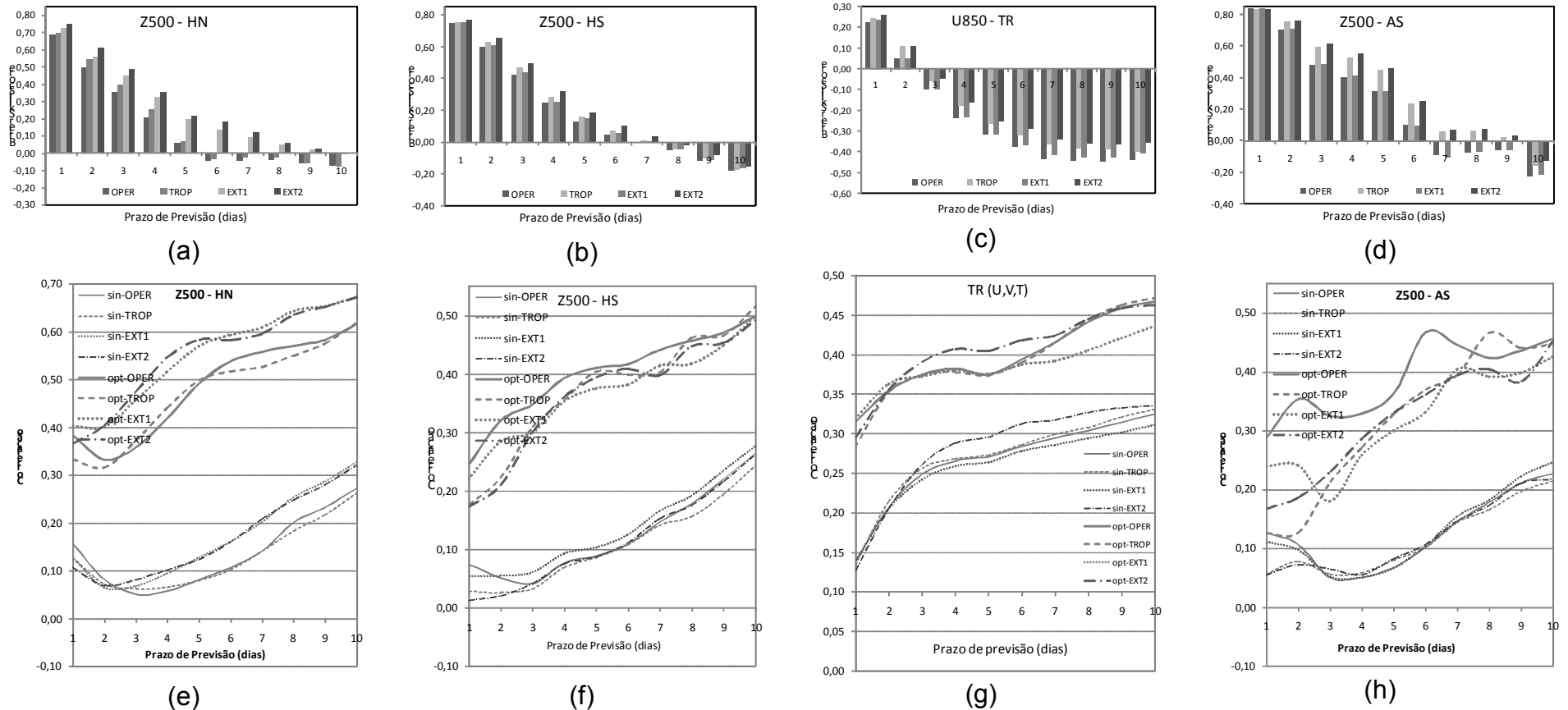


Figura 4.17 – Média no período de 15 de dezembro de 2004 a 15 de fevereiro de 2005. Painéis superiores: Brier skill score (BSS), considerando os intervalos de probabilidade de acordo com o número de membros do conjunto. Painéis inferiores: correlação entre os erros da previsão de controle e as perturbações do conjunto (PECA), valores médios das 14 perturbações individuais (linhas finas) e valores para uma combinação ótima das perturbações individuais (linhas grossas), para os experimentos OPER (linhas contínuas), TROP (linhas tracejadas), EXT1 (linhas pontilhadas) e EXT2 (linhas traço longo-ponto). Os valores referem-se à altura geopotencial em 500 hPa sobre as regiões: (a) e (e) Hemisfério Norte, (b) e (f) Hemisfério Sul e (d) e (h) América do Sul; para a componente zonal do vento em 850 hPa sobre os trópicos em (c); e para o campo tri-dimensional multi-variável (U, V, T) em 850, 500 e 250 hPa sobre os trópicos em (g).

Avaliando a qualidade do conjunto médio e o espalhamento do conjunto, nota-se que, mantendo a região de perturbação operacional e incluindo perturbações nos campos P e Q (experimento TROP), são produzidas previsões por conjunto melhores do que a versão operacional, principalmente sobre o HN. Para esta região, no prazo de 7 dias, os valores da correlação do padrão de anomalias são 0.550 para o OPER contra 0.560 para TROP, e os correspondentes valores de RMSE (espalhamento) são 97.79 (26.97) para o OPER e 96.89 (27.89) para TROP. Sobre as outras regiões, os resultados mostram uma leve tendência de TROP ser melhor do que OPER, mas isto não é verificado para todos os prazos de previsão; por exemplo, sobre a AS, no prazo de 7 dias, o espalhamento do TROP (12.94) é menor do que do OPER (13.04). Nota-se também que não é possível discriminar os resultados do PAC dos experimentos OPER e TROP para um nível de confiança de 90 %.

Perturbações nos campos de P e Q melhoram as previsões de probabilidade do EPS. O índice BSS é apresentado nas Figuras 4.17a,b,c,d. Observa-se que o BSS é aumentado especialmente sobre as regiões TR e AS, principalmente para os prazos maiores que 2 dias. As componentes do BSS são mostradas nas Tabelas 4.1 a 4.4. Para os quatro experimentos avaliados, os melhores índices são realçados em negrito. Quando os índices são similares para mais do que um experimento, todos eles são realçados. Em geral, RES é maior e REL é menor para o experimento TROP. Sobre a região AS, no prazo de 7 dias, REL (RES) são 5.648 (3.481) para OPER e 3.837 (5.351) para TROP, o que indica uma melhoria das previsões de probabilidade.

Os valores de PECA indicam que perturbações iniciais extras para P e Q no experimento TROP não fornece diversidade significativa para as perturbações das previsões sobre os extratropicais (HN e HS) e AS, uma vez que os índices são similares para OPER e TROP (Figuras 4.17e,f,h). Sobre os trópicos (Figura 4.17g), o impacto é ligeiramente positivo, principalmente para prazos de previsão maiores do que 3 dias, quando perturbações individuais são consideradas.

No experimento EXT1, a extensão das perturbações baseadas em EOF para os extratropicais é avaliada. A aplicação destas perturbações extras tem um impacto positivo sobre as regiões HN e HS (Figuras 4.16a,b,e,f). O conjunto médio do EXT1 é melhor do que do OPER para todos os prazos de previsão. Sobre o HN, o espalhamento do conjunto do experimento EXT1 é quase o dobro daquele do OPER (7.35 contra 3.97), para o prazo de 1 dia. Para U850, sobre os trópicos (Figuras 4.16c,g), PAC e RMSE não são muito afetados, mas o espalhamento é diminuído para prazos maiores do que 6 dias. Sobre a AS (Figuras 4.16d,h), o espalhamento do conjunto é ligeiramente aumentado, mas em termos de PAC e RMSE o conjunto médio do EXT1 é melhor, principalmente para os prazos maiores do que 6 dias.

Em termos de previsões de probabilidades, maiores efeitos positivos são observados novamente sobre o HN e HS (Figuras 4.17a,b e Tabelas 4.1 e 4.2). O impacto sobre TR é aproximadamente neutro de acordo com o BSS. As previsões de probabilidades são ligeiramente melhores sobre a AS (Figura 4.17d) e pode ser verificado que a principal contribuição decorre de melhorias na confiabilidade das previsões (Tabela 4.4).

É evidente que as perturbações nos extratropicais do experimento EXT1 têm impacto significativo na qualidade das perturbações das previsões sobre o HN e ligeiro impacto sobre HS e AS (Figuras 4.17e,f,h). Sobre os trópicos (Figura 4.17g), o impacto é ligeiramente negativo. Esta provavelmente seja a razão para os resultados adversos obtidos para a qualidade das previsões por conjunto sobre TR, em EXT1.

Os resultados de EXT1 mostram que as previsões sobre as regiões extratropicais são melhores quando perturbações baseadas em EOF extratropicais são calculadas, o que significa que mais espalhamento e variedade são incorporados às previsões quando estas perturbações extras são incluídas nas condições iniciais. Além disso, nas latitudes médias são obtidos os melhores resultados. Como apresentado na Figura 4.1c, as perturbações EOF iniciais de EXT1 em latitudes médias concentram-se próxima a regiões com maior baroclinicidade, medido pelo índice de Eady (Figura 4.1h). Como a instabilidade baroclínica é o principal mecanismo

responsável pelo desenvolvimento de sistemas sinóticos em latitudes médias, isto sugere que o método EOF é capaz de capturar parte daquele mecanismo de crescimento das perturbações. O cálculo dos modos tropicais instáveis em um cinturão mais restrito (20N-20S) parece ter eliminado algumas características importantes para o crescimento das perturbações nos trópicos. A eliminação dos subtropicais do cálculo das perturbações EOF tropicais pode ter inibido a influência de interações trópicos-extratropicais, o que pode ter afetado o desenvolvimento das perturbações.

Nos experimentos TROP e EXT1 verificou-se que perturbações baseadas em EOF aplicadas separadamente nos extratropicais e nos campos P e Q têm, em geral, impacto positivo no desempenho das previsões, principalmente sobre os trópicos e latitudes médias, respectivamente. No experimento EXT2, é investigado o impacto do uso de uma combinação destas duas modificações na configuração do método de perturbação no desempenho do conjunto.

A qualidade do conjunto médio e do espalhamento do conjunto é melhorada sobre todas as regiões avaliadas para a maioria dos prazos de previsão (Figura 4.16). Sobre o HN, no prazo de 7 dias, o RMSE (espalhamento) são 97.79 (26.97) para OPER e 93.46 (40.00) para EXT2. É nítido que o impacto mais significativo ocorre sobre o espalhamento do conjunto, que aumenta por um fator de quase 2, neste caso.

Melhorias no espalhamento do conjunto contribuem para produzir previsões de probabilidade mais balanceadas, o que pode ser notado através da redução da confiabilidade das previsões de probabilidade (REL) (Tabelas 4.1 a 4.4) para quase todos os prazos de previsão. A capacidade de discernir períodos de previsão com diferentes freqüências relativas do evento também melhorou. Os valores de RES em EXT2 são maiores do que nos experimentos OPER, TROP e EXT1. Por exemplo, no prazo de previsão de 7 dias, sobre o HS, os valores são 3.802 para OPER e 4.191 para EXT2. O BSS (Figuras 4.17a,b,c,d) também indica que melhores previsões de probabilidades são produzidas combinando perturbações baseadas em EOF

adicionais nos extratropicais e nos campos P e Q com perturbações baseadas em EOF tropicais.

O índice PECA de EXT2 (linhas traço longo-ponto nas Figuras 4.17e,f,g,h) indica que a combinação de perturbações nos extratropicais com perturbações nos campos P e Q é capaz de reproduzir as melhorias individuais que foram observadas sobre regiões particulares, quando ambas as modificações são aplicadas individualmente nos experimentos TROP e EXT1. Desta forma, a combinação daquelas duas perturbações iniciais extras parece ter criado mais diversidade nos padrões das perturbações iniciais, o que contribui para aumentar a variância dos erros das previsões explicada pelas perturbações do conjunto.

Os resultados apresentados nesta seção estão em concordância com os resultados da seção 4.1, ou seja, a aplicação de perturbações em P e Q e a extensão daquelas perturbações para os extratropicais contribuem para a geração de perturbações iniciais mais adequadas e, conseqüentemente, a produção de melhores previsões por conjunto. Os resultados também indicam que a subdispersão do sistema é atenuada, embora, apesar disto, permaneça subdispersivo. Uma comparação qualitativa grosseira destes resultados com aqueles de Buizza et al. (2005) (eles usaram um período diferente e um número menor de membros) revela que, em termos de RMSE e espalhamento, em latitudes médias, o sistema aqui utilizado apresenta menor balanço entre o crescimento do RMSE e o espalhamento, indicando que ele é mais subdispersivo. É importante ressaltar que eles obtiveram que os EPSs do ECMWF, MSC e do NCEP mostraram subdispersão apenas para os prazos de previsão maiores do que 5, 4 e 4 dias, respectivamente. Em termos de qualidade de previsões probabilísticas, o BSS do sistema analisado apresenta valores positivos aproximadamente até os mesmos prazos obtidos por Buizza et al. (2005) sobre latitudes médias, para os conjuntos do ECMWF, MSC e NCEP, em torno do prazo de 6 ou 7 dias.

Wei e Toth (2003) compararam a qualidade dos padrões das perturbações dos EPSs do ECMWF e do NCEP usando PECA para abril de 2001. Wei et al. (2006) também usou o PECA para estudar a correlação entre as

perturbações do conjunto e os erros das previsões para dois métodos de produção das perturbações iniciais com o sistema de previsão global do NCEP: *breeding of growing modes* e uma versão do *ensemble transform Kalman filter*. Neste caso, o período usado foi 15 de janeiro a 15 de fevereiro de 2003. Sobre as latitudes médias, os valores de PECA obtidos com o método EOF são qualitativamente comparáveis aqueles mostrados em Wei e Toth (2003) e Wei et al. (2006). Em geral, é observado que os valores de PECA aumentam com o aumento do prazo de previsão. Isto está relacionado à convergência de ambos, os padrões das perturbações e dos erros em um subespaço pequeno de padrões de crescimento (WEI e TOTH, 2003). Sobre os trópicos, o PECA obtido com o método EOF para a variável tri-dimensional $p(U,V,T)$ apresenta um comportamento similar àquele obtido por Wei e Toth (2003), embora os valores estejam mais próximos daqueles exibidos pelo EPS do ECMWF.

Tabela 4.1 – Média das componentes *confiabilidade* (Rel) e *resolução* (Res, valores entre parênteses) do Brier skill score para todos os experimentos (colunas) e para todos os prazos de previsão (linhas). Os valores foram calculados considerando os intervalos de probabilidade de acordo com o número de membros do conjunto. Os valores referem-se ao campo de altura geopotencial em 500 hPa sobre o Hemisfério Norte. Para cada prazo de previsão, negritos identificam os melhores valores entre os experimentos OPER, TROP, EXT1 e EXT2. Sublinhados identificam os melhores resultados entre os experimentos EXT2 e ETSA. Os valores foram multiplicados por um fator de 10^2 .

Prazo de Previsão (dias)	Experimentos						
	OPER	TROP	EXT1	EXT2	ETSA	LNGR	BRCP
1	0.449 (16.834)	0.399 (16.995)	0.280 (17.940)	0.151 (18.491)	0.164 (18.353)	<u>0.138 (18.629)</u>	0.049 (18.439)
2	1.254 (13.240)	0.997 (14.378)	0.843 (14.595)	0.544 (15.790)	<u>0.537 (15.805)</u>	<u>0.476 (15.942)</u>	0.256 (15.479)
3	2.055 (10.716)	1.760 (11.573)	1.255 (12.455)	0.951 (13.165)	0.974 (13.019)	<u>0.834 (13.102)</u>	0.522 (12.990)
4	3.140 (8.252)	2.741 (8.970)	1.846 (10.029)	1.494 (10.330)	<u>1.489 (10.353)</u>	<u>1.312 (10.460)</u>	0.773 (11.218)
5	4.422 (5.961)	4.284 (6.013)	2.599 (7.411)	2.204 (7.536)	2.213 (7.533)	<u>1.858 (8.103)</u>	1.055 (8.940)
6	5.399 (4.310)	5.234 (4.413)	2.824 (6.094)	2.226 (6.458)	2.259 (6.409)	<u>1.953 (6.745)</u>	1.387 (6.956)
7	4.855 (3.849)	4.620 (3.990)	2.810 (4.902)	2.348 (5.021)	2.384 (4.986)	<u>2.273 (5.020)</u>	1.644 (5.265)
8	4.421 (3.499)	4.162 (3.589)	2.888 (3.974)	2.570 (3.917)	2.593 (3.883)	<u>2.507 (3.870)</u>	1.758 (4.097)
9	4.226 (2.918)	4.185 (2.856)	2.866 (3.240)	2.614 (3.120)	2.617 (3.116)	<u>2.537 (3.116)</u>	1.755 (3.251)
10	4.000 (2.374)	3.999 (2.324)	2.702 (2.705)	2.486 (2.583)	2.493 (2.577)	<u>2.418 (2.529)</u>	1.592 (2.768)

Tabela 4.2 – Média das componentes *confiabilidade* (Rel) e *resolução* (Res, valores entre parênteses) do Brier skill score para todos os experimentos (colunas) e para todos os prazos de previsão (linhas). Os valores foram calculados considerando os intervalos de probabilidade de acordo com o número de membros do conjunto. Os valores referem-se ao campo de altura geopotencial em 500 hPa sobre o Hemisfério Sul. Para cada prazo de previsão, negritos identificam os melhores valores entre os experimentos OPER, TROP, EXT1 e EXT2. Sublinhados identificam os melhores resultados entre os experimentos EXT2 e ETSA. Os valores foram multiplicados por um fator de 10^2 .

Prazo de Previsão (dias)	Experimentos						
	OPER	TROP	EXT1	EXT2	ETSA	LNGR	BRCP
1	0.278 (18.934)	0.322 (19.100)	0.257 (19.080)	0.186 (19.410)	0.246 (19.223)	0.265 (19.188)	0.037 (19.457)
2	0.692 (15.534)	0.558 (16.280)	0.673 (15.834)	0.427 (16.734)	<u>0.417 (16.825)</u>	0.411 (16.878)	0.224 (16.297)
3	1.487 (11.941)	1.206 (12.905)	1.417 (12.392)	0.975 (13.333)	<u>0.938 (13.476)</u>	0.882 (13.626)	0.607 (12.633)
4	2.479 (8.654)	2.179 (9.318)	2.424 (8.780)	1.810 (9.729)	<u>1.720 (10.056)</u>	1.654 (10.116)	1.107 (9.688)
5	3.233 (6.361)	2.954 (6.900)	3.005 (6.628)	2.529 (7.180)	<u>2.522 (7.305)</u>	2.402 (7.454)	1.477 (7.494)
6	3.707 (4.841)	3.509 (5.265)	3.553 (4.903)	2.987 (5.495)	<u>2.911 (5.724)</u>	2.832 (5.710)	1.937 (5.548)
7	3.859 (3.802)	3.789 (4.075)	3.697 (3.847)	3.374 (4.191)	<u>3.317 (4.329)</u>	3.192 (4.363)	2.308 (4.212)
8	4.050 (2.931)	4.071 (3.031)	3.927 (2.955)	3.636 (3.149)	<u>3.359 (3.439)</u>	3.338 (3.460)	2.628 (3.070)
9	4.617 (1.977)	4.443 (2.134)	4.467 (2.008)	4.027 (2.185)	<u>3.688 (2.476)</u>	3.677 (2.456)	3.159 (1.977)
10	5.192 (1.208)	5.204 (1.275)	4.929 (1.211)	4.756 (1.305)	<u>4.302 (1.568)</u>	4.415 (1.469)	3.859 (1.129)

Tabela 4.3 – Média das componentes *confiabilidade* (Rel) e *resolução* (Res, valores entre parênteses) do Brier skill score para todos os experimentos (colunas) e para todos os prazos de previsão (linhas). Os valores foram calculados considerando os intervalos de probabilidade de acordo com o número de membros do conjunto. Os valores referem-se à componente zonal do vento em 850 hPa sobre os trópicos. Para cada prazo de previsão, negritos identificam os melhores valores entre os experimentos OPER, TROP, EXT1 e EXT2. Sublinhados identificam os melhores resultados entre os experimentos EXT2 e ETSA. Os valores foram multiplicados por um fator de 10^2 .

Prazo de Previsão (dias)	Experimentos						
	OPER	TROP	EXT1	EXT2	ETSA	LNGR	BRCP
1	1.062 (3.968)	0.909 (4.008)	1.006 (4.088)	0.837 (4.173)	0.843 (4.165)	1.308 (3.768)	1.860 (4.042)
2	1.879 (2.532)	1.274 (2.711)	1.928 (2.598)	1.328 (2.804)	1.330 (2.801)	1.791 (2.701)	3.042 (2.157)
3	2.858 (1.632)	2.438 (1.653)	2.861 (1.633)	2.326 (1.680)	<u>2.324 (1.682)</u>	3.004 (1.579)	4.067 (1.244)
4	4.017 (1.046)	3.451 (1.057)	3.992 (1.062)	3.291 (1.096)	<u>3.290 (1.098)</u>	4.155 (0.958)	4.801 (0.882)
5	4.684 (0.687)	4.161 (0.664)	4.694 (0.688)	3.992 (0.676)	<u>3.991 (0.678)</u>	4.904 (0.588)	4.903 (0.629)
6	5.165 (0.417)	4.526 (0.403)	5.081 (0.421)	4.102 (0.440)	4.108 (0.431)	4.871 (0.372)	5.213 (0.394)
7	5.701 (0.235)	4.828 (0.220)	5.486 (0.226)	4.518 (0.238)	4.526 (0.235)	5.150 (0.198)	5.327 (0.229)
8	5.771 (0.161)	5.026 (0.142)	5.539 (0.144)	4.707 (0.163)	<u>4.704 (0.160)</u>	5.146 (0.125)	5.140 (0.162)
9	5.800 (0.108)	5.007 (0.089)	5.498 (0.120)	4.692 (0.110)	<u>4.681 (0.119)</u>	5.037 (0.076)	5.133 (0.163)
10	5.697 (0.109)	5.120 (0.063)	5.277 (0.101)	4.629 (0.109)	<u>4.623 (0.104)</u>	4.830 (0.045)	4.892 (0.212)

Tabela 4.4 – Média das componentes *confiabilidade* (Rel) e *resolução* (Res, valores entre parênteses) do Brier skill score para todos os experimentos (colunas) e para todos os prazos de previsão (linhas). Os valores foram calculados considerando os intervalos de probabilidade de acordo com o número de membros do conjunto. Os valores referem-se ao campo de altura geopotencial em 500 hPa sobre a América do Sul. Para cada prazo de previsão, negritos identificam os melhores valores entre os experimentos OPER, TROP, EXT1 e EXT2. Sublinhados identificam os melhores resultados entre os experimentos EXT2 e ETSA. Os valores foram multiplicados por um fator de 10^2 .

Prazo de Previsão (dias)	Experimentos						
	OPER	TROP	EXT1	EXT2	ETSA	LNGR	BRCP
1	0.043 (20.129)	0.107 (20.057)	0.041 (20.150)	0.109 (20.092)	0.365 (19.727)	0.467 (19.691)	0.109 (20.011)
2	0.580 (17.446)	0.307 (18.488)	0.544 (17.520)	0.266 (18.551)	<u>0.130 (18.843)</u>	0.207 (18.801)	0.587 (16.616)
3	1.466 (13.023)	0.920 (15.195)	1.467 (13.117)	0.783 (15.489)	<u>0.650 (16.121)</u>	0.720 (16.020)	1.312 (12.170)
4	1.844 (11.522)	1.157 (13.835)	1.808 (11.634)	0.988 (14.239)	<u>0.803 (14.667)</u>	0.847 (14.587)	1.392 (11.514)
5	2.180 (9.741)	1.529 (12.253)	2.189 (9.800)	1.342 (12.456)	<u>1.168 (12.619)</u>	1.390 (12.252)	1.545 (10.264)
6	3.608 (6.029)	2.501 (8.115)	3.562 (5.854)	2.228 (8.216)	<u>2.086 (8.437)</u>	2.245 (8.381)	2.670 (6.348)
7	5.648 (3.481)	3.837 (5.351)	5.865 (3.354)	3.614 (5.323)	<u>3.355 (5.568)</u>	3.352 (5.701)	4.486 (3.642)
8	5.183 (3.416)	3.779 (5.408)	4.947 (3.312)	3.459 (5.344)	<u>3.379 (5.571)</u>	3.278 (5.814)	3.592 (4.055)
9	4.606 (3.122)	3.986 (4.489)	4.512 (3.061)	3.612 (4.363)	<u>3.261 (4.867)</u>	3.216 (4.829)	3.401 (3.321)
10	6.628 (1.178)	5.698 (1.940)	6.413 (1.144)	5.157 (2.090)	<u>4.321 (2.795)</u>	4.455 (2.511)	4.432 (1.734)

4.3.3 Impacto de perturbações regionais calculadas sobre a AS

O impacto de incluir perturbações regionais sobre a região da América do Sul é avaliado nesta subsecção. No experimento ETSA, além da extensão das perturbações iniciais para os extratropicais e a inclusão de perturbações nos campos de P e Q, duas sub-regiões da América do Sul são consideradas no cálculo de perturbações regionais: Norte da América do Sul (NAS: 100W-10W; 20S-20N) e Sul da América do Sul (SAS: 110W-20; 60S-20S).

Os resultados de EXT2 são usados como referência para avaliar ETSA, uma vez que estes dois experimentos foram produzidos a partir de configurações similares do método de perturbação inicial, exceto pelas perturbações regionais adicionais sobre a AS em ETSA.

Em termos de qualidade do conjunto médio e do espalhamento do conjunto, a inclusão de novas perturbações regionais não tem impacto significativo sobre o HN (Figuras 4.18a,e). Sobre o HS (Figuras 4.18b,f), há um ligeiro impacto positivo em EM, mas não no espalhamento. Para U850, sobre os trópicos (Figuras 4.18c,g), os valores de PAC, RMSE e espalhamento são aproximadamente os mesmos de EXT2 para todos os prazos de previsão. Analisando os índices para a AS (Figuras 4.18d,h), observa-se que, na maioria dos prazos de previsão, ETSA é melhor do que EXT2. Para o prazo de previsão de 7 dias, o RMSE (espalhamento) são 53.41 (14.09) para EXT2 contra 52.98 (14.29) para ETSA.

Consistente com os resultados obtidos para qualidade do conjunto médio, as previsões probabilísticas não são melhoradas sobre o HN (Figura 4.19a e Tabela 4.1). Em contraste, sobre o HS, o BSS e o RES aumentaram enquanto o REL diminuiu, para quase todos os prazos de previsão (Figura 4.19b e Tabela 4.2). Previsões probabilísticas sobre TR são melhoradas em relação ao OPER, mas em relação ao EXT2, índices estatísticos similares foram obtidos para U850 (Figura 4.19c e Tabela 4.3). Sobre a AS, as previsões probabilísticas são melhoradas pelas novas perturbações regionais (Figura 4.19d e Tabela 4.4), no prazo de 7 dias, REL (RES) são 3.614 (5.323) para EXT2 e 3.355 (5.568) para ETSA.

PECA de ETSA revela um impacto menor sobre os extratropicais (HN e HS). Entretanto, perturbações extras sobre a AS claramente contribui para a melhoria da fração dos erros das previsões explicada pela perturbação das previsões sobre os trópicos e AS. Sobre TR, no prazo de 10 dias de previsão, para perturbações combinadas (linha grossa tracejado longo da Figura 4.19g), a correlação aumenta de cerca de 0.46 em EXT2 para cerca de 0.49 em ETSA.

O impacto das perturbações regionais do experimento ETSA é mais significativo sobre as regiões TR e AS, o que sugere que perturbações locais baseadas em EOF são capazes de capturar incertezas iniciais associadas com escalas menores e podem ser usadas para melhorar o crescimento das perturbações sobre as regiões alvo.

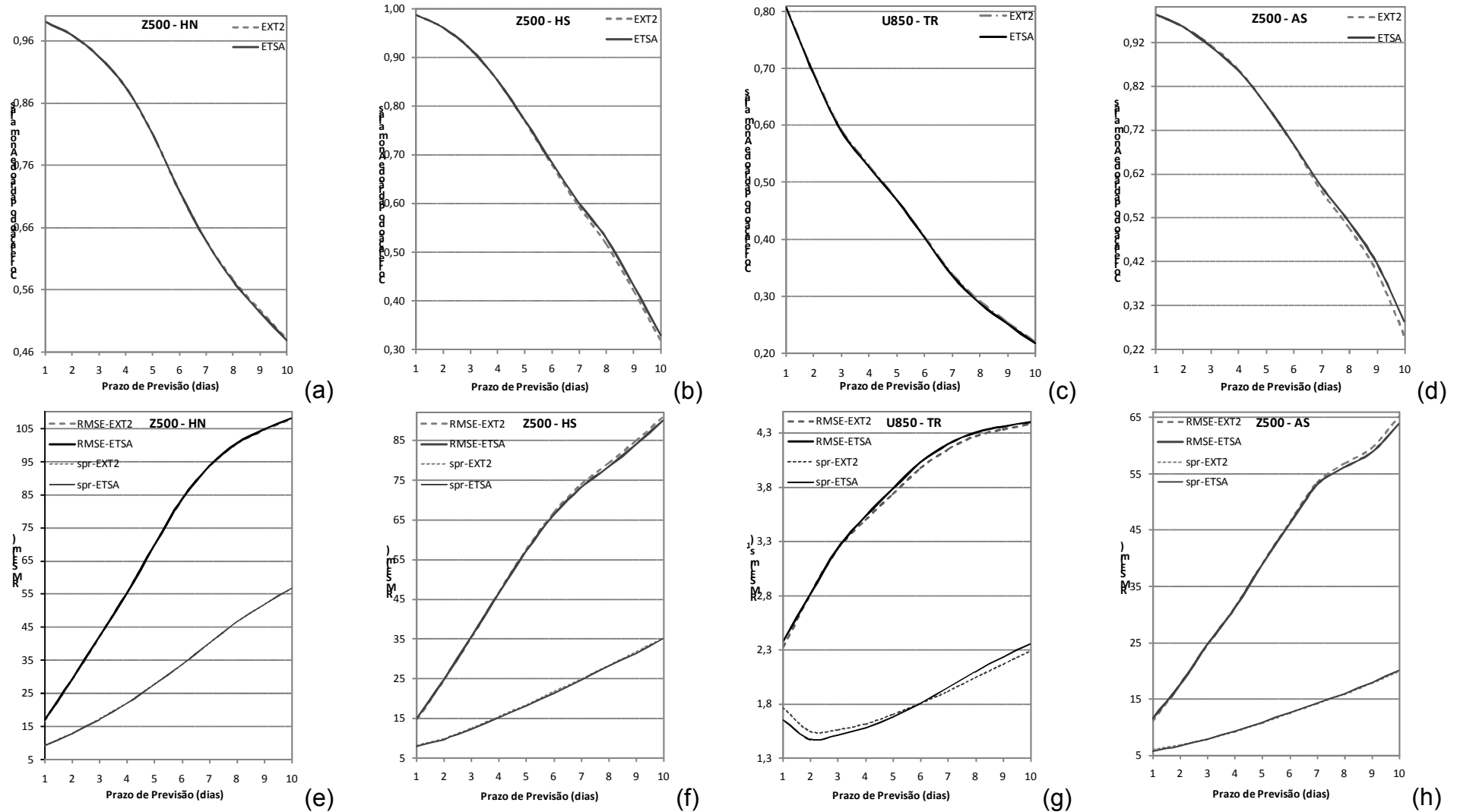


Figura 4.18 – Média no período de 15 de dezembro de 2004 a 15 de fevereiro de 2005. Painéis superiores: correlação do padrão de anomalias (PAC) do conjunto médio. Painéis inferiores: raiz do erro quadrático médio (RMSE) do conjunto médio (linhas grossas) e espalhamento do conjunto (linhas finas). Para os experimentos EXT2 (linhas tracejadas) e ETSA (linhas contínuas). Os valores referem-se à altura geopotencial em 500 hPa sobre as regiões: (a) e (e) Hemisfério Norte, (b) e (f) Hemisfério Sul e (d) e (h) América do Sul; e para a componente zonal do vento em 850 hPa sobre os trópicos em (c) e (g).

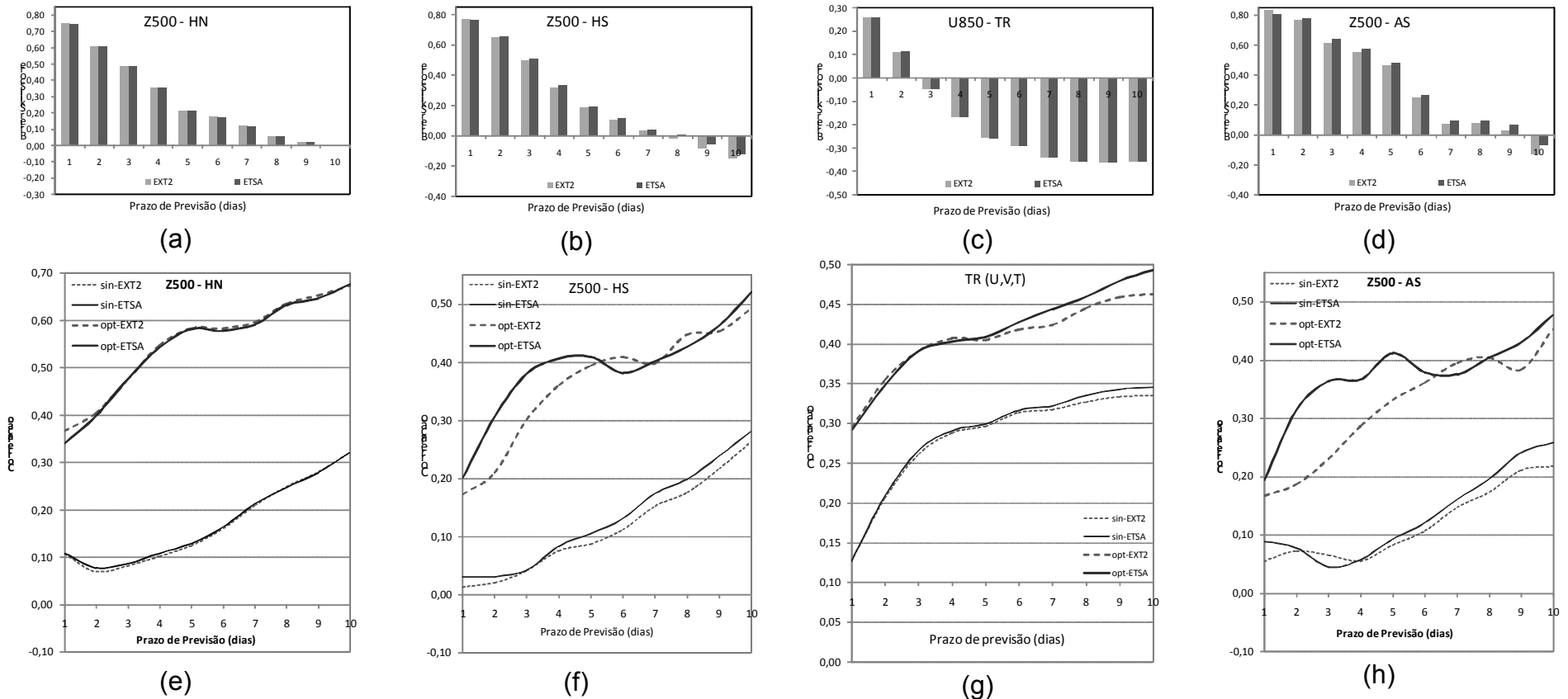


Figura 4.19 – Média no período de 15 de dezembro de 2004 a 15 de fevereiro de 2005. Painéis superiores: Brier skill score (BSS), considerando os intervalos de probabilidade de acordo com o número de membros do conjunto. Painéis inferiores: correlação entre os erros da previsão de controle e as perturbações do conjunto (PECA), valores médios das 14 perturbações individuais (linhas finas) e valores para uma combinação ótima das perturbações individuais (linhas grossas), para os experimentos EXT2 (linhas tracejadas) e ETSA (linhas contínuas). Os valores referem-se à altura geopotencial em 500 hPa sobre as regiões: (a) e (e) Hemisfério Norte, (b) e (f) Hemisfério Sul e (d) e (h) América do Sul; para a componente zonal do vento em 850 hPa sobre os trópicos em (c); e para o campo tri-dimensional multi-variável (U, V, T) em 850, 500 e 250 hPa sobre os trópicos em (g).

4.3.4 Seleção das perturbações EOF baseada na taxa de crescimento linear dos coeficientes das EOFs

Nesta seção, o impacto de selecionar os modos EOF baseado na tendência linear exibida pelos coeficientes das EOFs, de acordo com a inclinação de uma reta ajustada a tais coeficientes usando o método dos mínimos quadrados, é avaliado. Este experimento é denominado LNGR. Na configuração operacional e nos demais experimentos deste trabalho, o modo associado ao maior autovalor é selecionado para perturbar as condições iniciais. ZK1999 obtiveram que o autovetor associado ao maior autovalor era o modo cujos coeficientes apresentavam maior tendência de crescimento com o tempo. Entretanto, as perturbações dos experimentos deles foram confinadas às vizinhanças dos furacões, e em um número restrito de casos foi utilizado. A configuração das perturbações iniciais do experimento LNGR, ou seja, regiões perturbadas e campos perturbados, é a mesma do experimento ETSA. Este último experimento é usado como referência para avaliar o impacto da aplicação desta nova metodologia para selecionar as perturbações ótimas.

De acordo com a metodologia para o cálculo dos modos EOF, apresentado na seção 3.3, para cada perturbação aleatória adicionada a análise de controle, 11 modos (autovetores) são obtidos. Estes 11 modos são, então, ordenados de acordo com a magnitude do autovalor correspondente ($\lambda_{i=1,\dots,11}$), tal que $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_{11}$. Em seguida, os coeficientes destes modos são examinados com o objetivo de obter qual deles apresenta a maior tendência de crescimento. Considerando o período (60 dias) e as 5 regiões de perturbação utilizadas no experimento LNGR, a frequência com que os 4 primeiros modos foram selecionados como *perturbações EOF* é apresentado na Figura 4.20, para cada campo perturbado. Os 4 primeiros modos são selecionados em mais de 95% dos casos, exceto para a pressão à superfície na qual ela é selecionada em cerca de 88 % dos casos. Nota-se, claramente, que o modo 2 é o mais frequentemente selecionado para as perturbações nos campos de P, T e Q. Já para o campo de vento, o modo 1 é mais frequentemente selecionado e representa individualmente cerca de 70% dos modos selecionados. O segundo modo mais selecionado para o vento é o número 2, que é selecionado em

cerca de 25 % dos casos. Na região tropical, ao menos para o período considerado, o primeiro modo do campo de vento foi selecionado em todas as rodadas do conjunto. Este resultado concorda com aqueles de ZK1999 que também encontraram maior taxa de crescimento para os coeficientes do primeiro modo. Entretanto, os resultados indicam que o segundo modo é predominantemente selecionado quando as perturbações do campo de temperatura são analisadas

Os índices estatísticos médios do experimento LNGR são mostrados nas Figuras 4.21 e 4.22 e Tabelas 4.1 a 4.4. Uma análise geral dos índices indica que, quando comparado com os resultados de ETSA, a seleção das perturbações ótimas pelo crescimento linear dos coeficientes das EOFs tem um impacto ligeiramente positivo no desempenho do conjunto sobre os extratropicais (HN e HS), enquanto sobre os trópicos e AS o impacto é ligeiramente negativo.

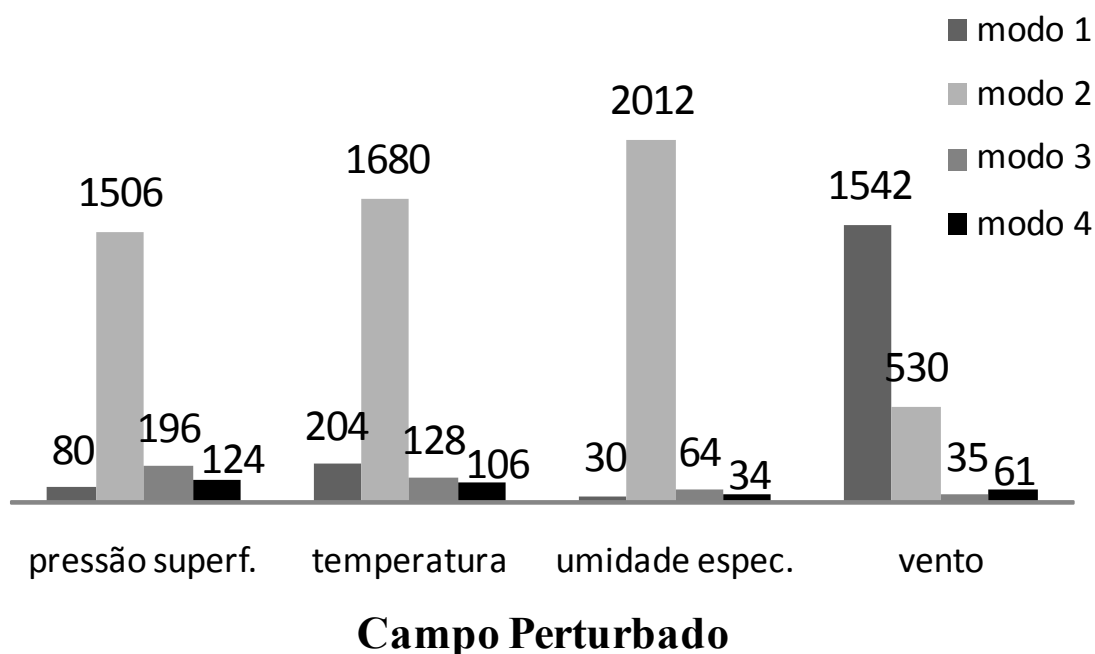


Figura 4.20 – Número de vezes que os modos EOF de 1 a 4 foram selecionados durante o período de 15 de dezembro de 2004 a 15 de fevereiro de 2005, para cada campo perturbado da análise no experimento LNGR. Os valores representam uma soma sobre todo o período (60 dias) usado neste estudo e sobre as cinco regiões perturbadas usadas no experimento LNGR.

A qualidade do conjunto médio e o espalhamento do conjunto são ligeiramente aumentados em quase todos os prazos de previsão sobre o HN e HS. Para o prazo de 7 dias, sobre o HN, o RMSE (espalhamento) são 73.10 (24.67) para ETSA contra 72.54 (25.58) no LNGR. As previsões probabilísticas também são melhoradas, como pode ser visto através do BSS nas Figuras 4.22a,b. As componentes do BSS (Tabelas 4.1 e 4.2) também confirmam a ligeira melhora do BSS nas regiões HN e HS, o que significa que as previsões probabilísticas reproduzem melhor a distribuição observada e são capazes de discernir melhor períodos com diferentes distribuições de frequências, nestas regiões. Os valores obtidos de REL (RES) sobre o HS, para o prazo de 7 dias foram 3.317 (4.329) em ETSA contra 3.192 (4.363) em LNGR.

Os valores de PECA do experimento LNGR são representados pelas linhas contínuas nas Figuras 4.22e,f,g,h. Sobre os extratropicais, melhorias na qualidade das perturbações do conjunto podem ser observadas para perturbações individuais nos prazos de 4, 5, 6 e 7 dias para o HN e 4, 5, 6, 7, 8 e 9 dias, para o HS. Sobre os trópicos, a qualidade das perturbações individuais é inferior a partir de 3 dias. Ainda nos trópicos, a combinação ótima das perturbações do LNGR explica menos a variância dos erros do que a combinação do ETSA, em todos os prazos de previsão. Resultados positivos de LNGR são observados sobre a AS para os prazos de previsão maiores do que 6 dias, tanto para perturbações individuais quanto para a combinação ótima delas, entretanto, para os prazos de 1 a 5 dias, a combinação ótima das perturbações LNGR é bastante inferior.

Os resultados do experimento LNGR indicam que a determinação do modo EOF a ser utilizado como perturbação inicial através do crescimento dos coeficientes das EOFs contribui para aumentar a qualidade das previsões por conjunto sobre as regiões HN e HS. Sobre os trópicos e América do Sul, o autovetor associado ao maior autovalor, assim como em ZK1999, parece ser a melhor opção a ser utilizado como perturbações iniciais.

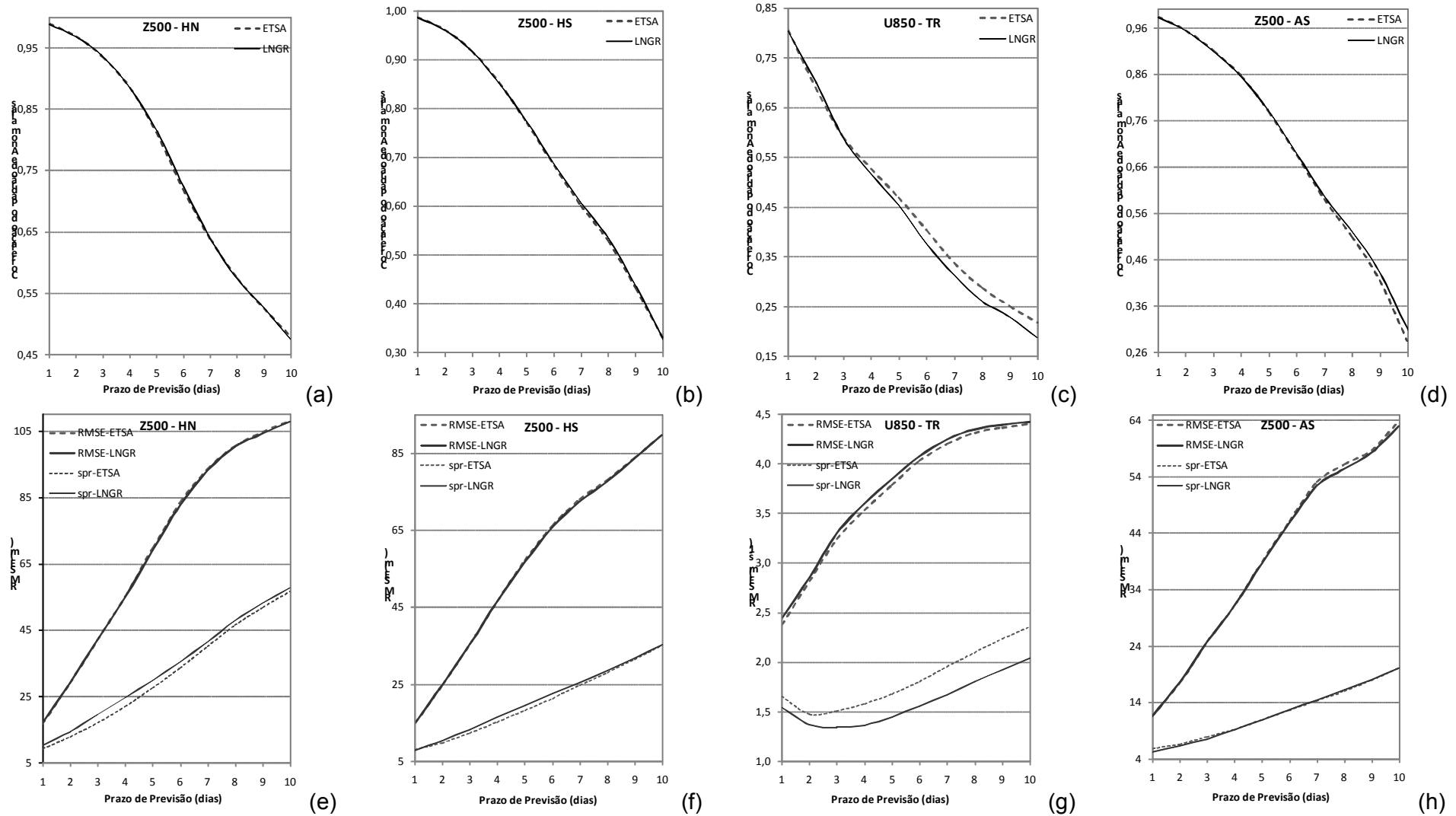


Figura 4.21 – Média no período de 15 de dezembro de 2004 a 15 de fevereiro de 2005. Painéis superiores: correlação do padrão de anomalias (PAC) do conjunto médio. Painéis inferiores: raiz do erro quadrático médio (RMSE) do conjunto médio (linhas grossas) e espalhamento do conjunto (linhas finas). Para os experimentos ETSA (linhas tracejadas) e LNGR (linhas contínuas). Os valores referem-se à altura geopotencial em 500 hPa sobre as regiões: (a) e (e) Hemisfério Norte, (b) e (f) Hemisfério Sul e (d) e (h) América do Sul; e para a componente zonal do vento em 850 hPa sobre os trópicos em (c) e (g).

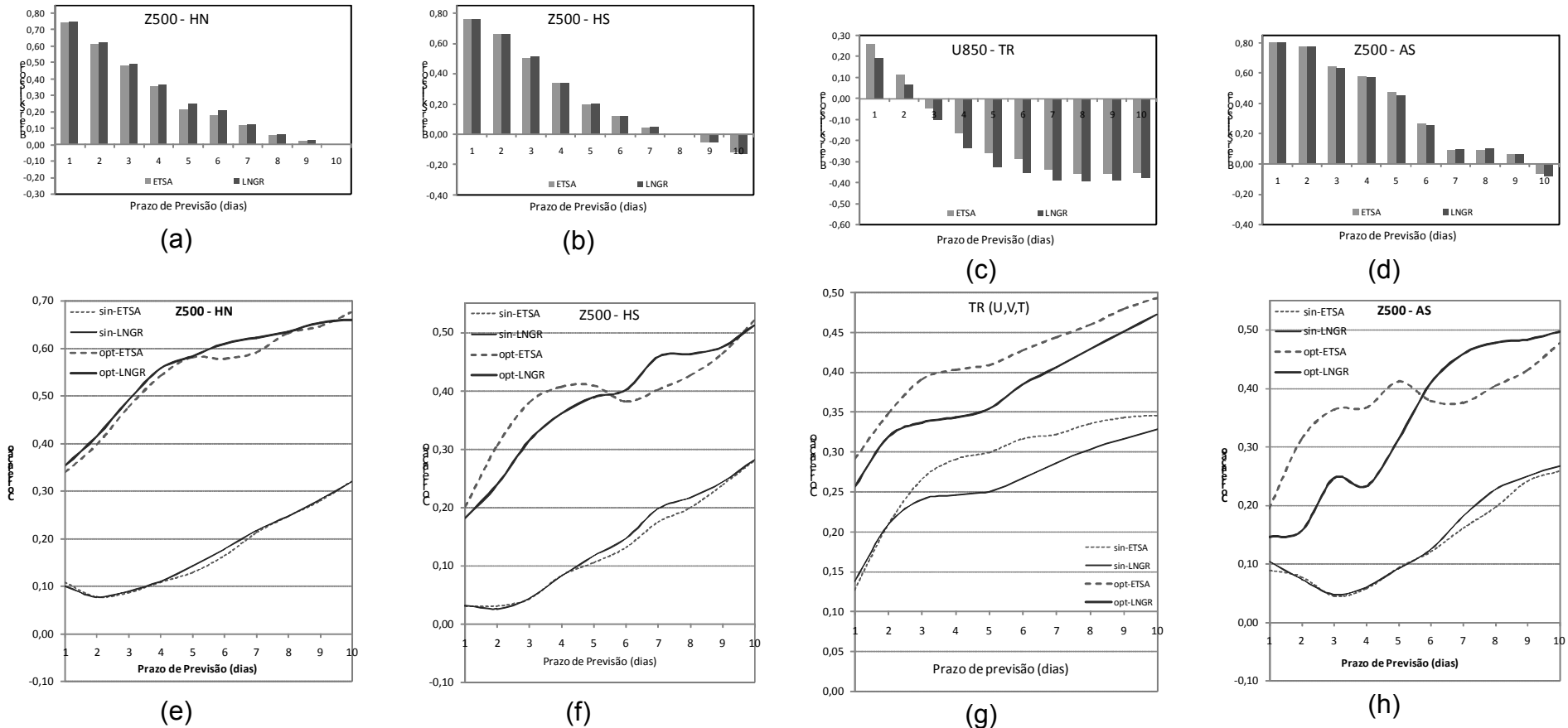


Figura 4.22 – Média no período de 15 de dezembro de 2004 a 15 de fevereiro de 2005. Painéis superiores: Brier skill score (BSS), considerando os intervalos de probabilidade de acordo com o número de membros do conjunto. Painéis inferiores: correlação entre os erros da previsão de controle e as perturbações do conjunto (PECA), valores médios das 14 perturbações individuais (linhas finas) e valores para uma combinação ótima das perturbações individuais (linhas grossas), para os experimentos ETSA (linhas tracejadas) e LNGR (linhas contínuas). Os valores referem-se à altura geopotencial em 500 hPa sobre as regiões: (a) e (e) Hemisfério Norte, (b) e (f) Hemisfério Sul e (d) e (h) América do Sul; para a componente zonal do vento em 850 hPa sobre os trópicos em (c); e para o campo tri-dimensional multi-variável (U,V,T) em 850, 500 e 250 hPa sobre os trópicos em (g).

4.3.5 Impacto de perturbações baseadas no *breeding of growing modes* simplificado

O experimento em que o método *breeding* simplificado é utilizado para produzir as condições iniciais perturbadas é denominado BRCP. Os resultados deste experimento são comparados aos resultados do experimento ETSA, já que este é o experimento que mais se aproxima do BRCP em termos de regiões perturbadas e campos perturbados.

Os resultados do experimento BRCP são apresentados nas Figuras 4.23 e 4.24 e nas Tabelas 4.1 a 4.4. Pode ser observado que, apesar de usar uma versão simplificada, as perturbações do método *breeding* produzem previsões por conjunto competitivas àquelas do método EOF. Analisando o desempenho do conjunto médio, observa-se que a correlação do padrão de anomalias e o RMSE são muito similares àqueles do experimento ETSA, sobre os extratropicais, HN e HS. Sobre os trópicos e a América do Sul, as correlações do padrão de anomalias são ligeiramente inferiores e o RMSE levemente pior. Em termos de espalhamento, o experimento BRCP leva vantagem em quase todas as regiões, e em quase todos os prazos de previsão. Mas, nitidamente, a região tropical é a que apresenta resultados menos favoráveis ao LNCR, pois o maior espalhamento alcançado nos prazos maiores do que 3 dias são acompanhados de erros maiores do conjunto médio, indicando que a dispersão alcançada pode não estar apontando na direção real de crescimento dos erros das previsões. Melhorias nas previsões de probabilidades são verificadas sobre o HN e HS para os prazos maiores do que 4 dias (Figuras 4.24a,b e Tabelas 4.1 e 4.2), enquanto nas regiões TR e AS há um decréscimo na qualidade das previsões (Figura 4.24c,d e Tabelas 4.3 e 4.4). Em termos do PECA (Figuras 4.24e,f,g,h), as perturbações das previsões do experimento BRCP explicam melhor a variância dos erros das previsões sobre o HN, nos prazos maiores do que 3 dias, nas perturbações individuais, e 5 dias, na combinação ótima, e sobre o HS em todos os prazos. Sobre a América do Sul, os valores de PECA são maiores nos prazos maiores do que 3 dias, nas perturbações individuais, e em quase todos os prazos, na combinação ótima das perturbações, apesar dos demais índices não terem demonstrado vantagens do BRCP sobre esta região.

Os valores de PECA sobre os trópicos confirmam os resultados encontrados nos demais índices. O experimento BRCP apresenta valores significativamente inferiores até os prazos de 7 dias, nas perturbações individuais, e de 6 dias, na combinação ótima. Isto confirma que nos trópicos, apesar do maior espalhamento do BRCP, as perturbações não convergem tão rapidamente para a direção de crescimento dos erros das previsões quanto no experimento EXT2.

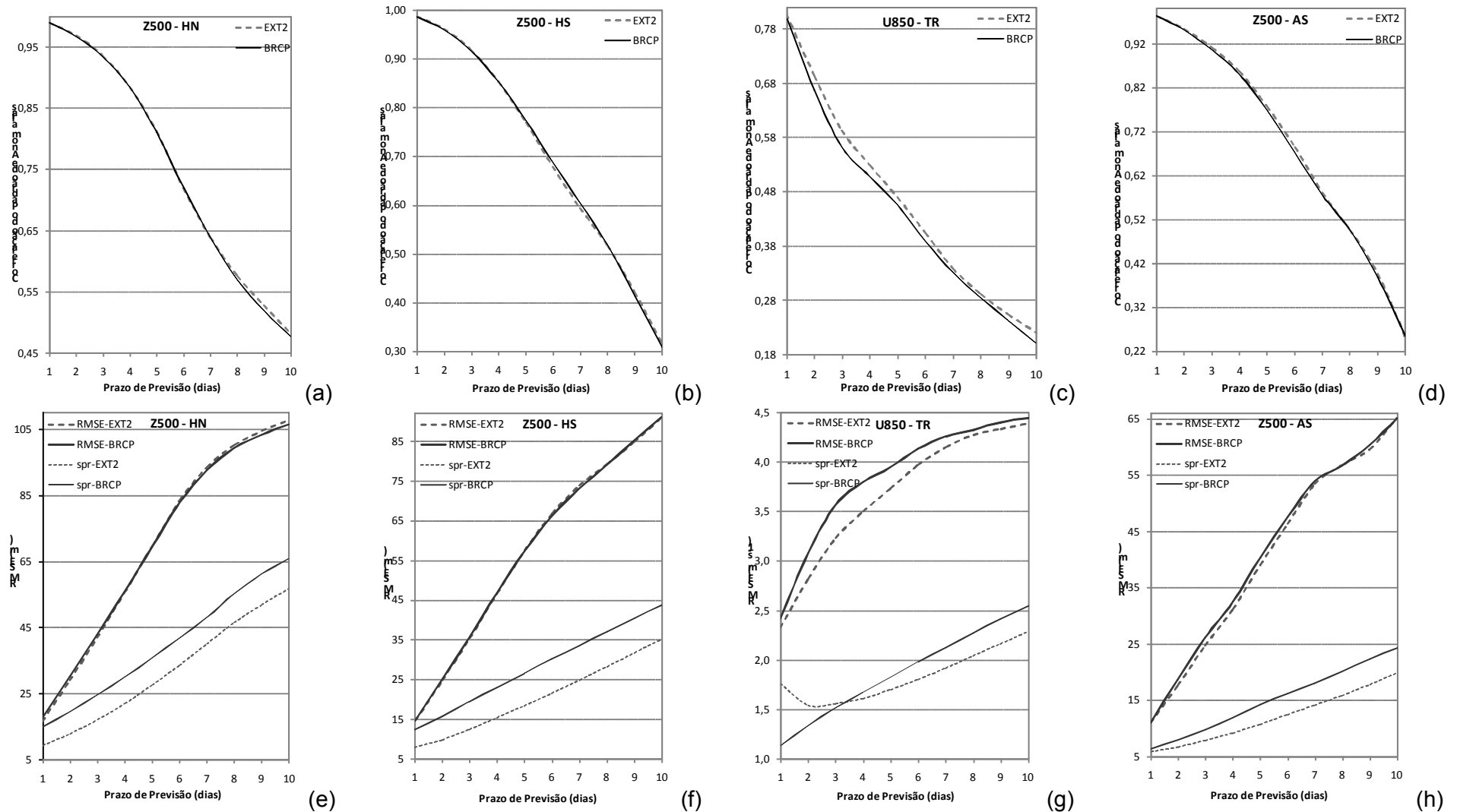


Figura 4.23 – Média no período de 15 de dezembro de 2004 a 15 de fevereiro de 2005. Painéis superiores: correlação do padrão de anomalias (PAC) do conjunto médio. Painéis inferiores: raiz do erro quadrático médio (RMSE) do conjunto médio (linhas grossas) e espalhamento do conjunto (linhas finas). Para os experimentos ETSA (linhas tracejadas) e LNGR (linhas contínuas). Os valores referem-se à altura geopotencial em 500 hPa sobre as regiões: (a) e (e) Hemisfério Norte, (b) e (f) Hemisfério Sul e (d) e (h) América do Sul; e para a componente zonal do vento em 850 hPa sobre os trópicos em (c) e (g).

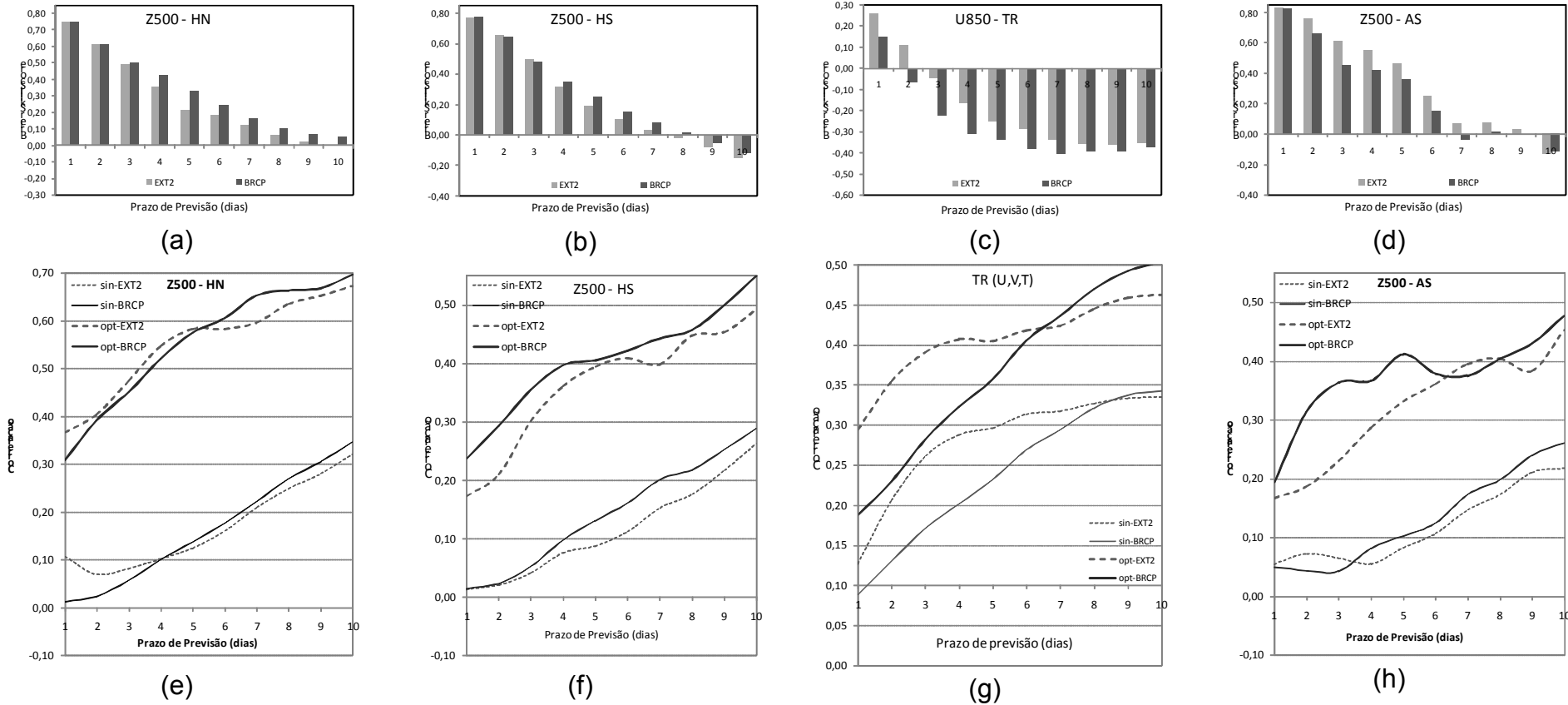


Figura 4.24 – Média no período de 15 de dezembro de 2004 a 15 de fevereiro de 2005. Painéis superiores: Brier skill score (BSS), considerando os intervalos de probabilidade de acordo com o número de membros do conjunto. Painéis inferiores: correlação entre os erros da previsão de controle e as perturbações do conjunto (PECA), valores médios das 14 perturbações individuais (linhas finas) e valores para uma combinação ótima das perturbações individuais (linhas grossas), para os experimentos EXT2 (linhas tracejadas) e BRCP (linhas contínuas). Os valores referem-se à altura geopotencial em 500 hPa sobre as regiões: (a) e (e) Hemisfério Norte, (b) e (f) Hemisfério Sul e (d) e (h) América do Sul; para a componente zonal do vento em 850 hPa sobre os trópicos em (c); e para o campo tri-dimensional multi-variável (U, V, T) em 850, 500 e 250 hPa sobre os trópicos em (g).

4.4 Estudo de caso: ciclone Catarina

Além das avaliações dos experimentos apresentadas nas seções anteriores, um estudo de caso de um evento severo é realizado. O evento meteorológico selecionado foi o ciclone Catarina. Procurar-se-á avaliar as características das perturbações iniciais e a influência que as modificações no procedimento de produção das análises perturbadas sugeridas neste trabalho exercem sobre o desempenho do conjunto. Em geral, eventos extremos são difíceis de serem previstos por modelos numéricos, especialmente em baixa resolução horizontal, como a utilizada aqui, uma grade de aproximadamente 100 x 100 km. Neste sentido, é motivador, e ao mesmo tempo um desafio, produzir informações confiáveis sobre o deslocamento e intensidade destes sistemas, especialmente frente à possibilidade de um futuro aquecimento global da atmosfera, no qual sistemas intensos como o Catarina podem se tornar mais freqüentes.

O ciclone Catarina desenvolveu-se sobre uma área onde não é comum se observar tais sistemas tropicais intensos. Ele iniciou-se sobre o Oceano Atlântico Sul, próximo a costa brasileira, por volta de 20 de março de 2004, como um ciclone extratropical, e começou a se mover em direção ao continente após sofrer uma transição tropical (mudança de uma estrutura típica de sistemas de latitudes médias para uma estrutura de sistemas tropicais), dois dias depois de sua origem, atingindo o continente em 28 de março (PEZZA e SIMMONDS, 2005). Climatologicamente, a região onde o Catarina se formou apresenta alto cisalhamento do vento e temperaturas da superfície do mar relativamente frias, que não são condições ideais para o desenvolvimento de ciclones tropicais (MCTAGGART-COWAN et al., 2006). Este sistema foi caracterizado em sua fase madura por um olho (Figura 4.25), típico de sistemas tropicais intensos tipo furacão, ventos intensos em suas bordas e deslocamento para oeste.. Estimativas por satélite indicaram que a pressão no centro do ciclone foi da ordem de 970-975 hPa, e vento sustentado de até 35 m s⁻¹ (SILVA DIAS et al., 2004).

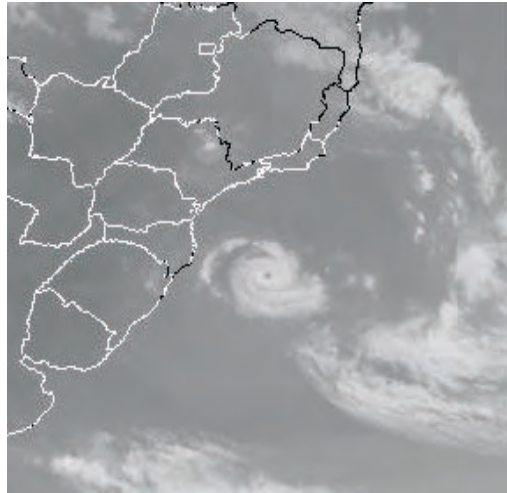


Figura 4.25 – Imagem no canal infravermelho do satélite GOES-12 válida para 13:39 UTC de 26 de Março de 2004. Pode ser visto o ciclone Catarina, com um *olho* bem configurado, próximo da costa brasileira. Fonte: Divisão de Satélites Ambientais – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DAS/CPTEC/INPE).

A Figura 4.26 mostra a representação do Catarina pela condição inicial do MCGA-CPTEC, para o dia 24 de março de 2004 às 1200 UTC, a partir dos campos de pressão ao nível médio do mar e intensidade do vento, e resolução horizontal T126. Verifica-se que a análise superestima significativamente a pressão no centro do ciclone (subestima sua intensidade). Para esta situação, o valor da pressão analisada no centro do sistema é de cerca de 1008 hPa. A intensidade dos ventos nas bordas do ciclone é relativamente menor do que aquelas estimadas por satélites. De acordo com a análise, o vento máximo ocorre na parte sul do sistema com intensidade em torno de 14 m s^{-1} . Esta subestimativa da intensidade do ciclone pela análise pode estar associada à relativa baixa resolução horizontal usada neste estudo e/ou devido à falta de observações convencionais nesta região. A representação inadequada do sistema pela condição inicial dificulta a simulação do evento pelos modelos

numéricos. Zhu e Thorpe (2006) encontraram que uma representação acurada dos ciclones extratropicais pelas condições iniciais é essencial para a previsão do desenvolvimento destes sistemas com algum acerto.

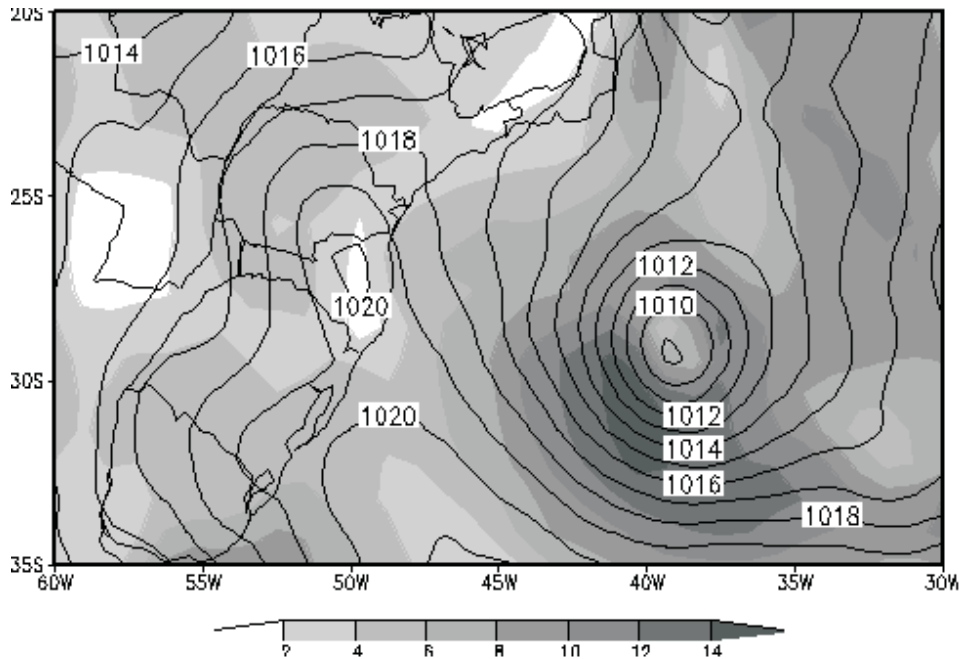


Figura 4.26 – Pressão ao nível médio do mar (hPa) (contornos) e velocidade do vento (m s^{-1}) (cores) sobre a região de atuação do ciclone Catarina para a condição inicial do NCEP de 24 de março de 2004 às 1200 UTC. A pressão no centro do ciclone é de cerca de 1008 hPa e os ventos mais intensos nas bordas dos sistema é de cerca de 14 m s^{-1} .

A trajetória do Catarina, de acordo com as análises do NCEP, é dada na Figura 4.27. O espaço entre dois pontos representa o deslocamento do sistema em um período de 12 horas. O ponto inicial da trajetória (ponto mais ao norte) indica a posição do sistema no dia 20 de março de 2004 às 1200 UTC. O último ponto,

quando o sistema já havia atingido o continente, representa o dia 28 de março de 2004 às 1200 UTC. Inicialmente, o sistema deslocou-se para sudeste. Em seguida, após uma mudança na sua estrutura dinâmica, de ciclone extratropical para ciclone tropical, ele seguiu para oeste, movendo-se em direção ao continente. Apesar da baixa resolução das análises utilizadas neste trabalho, a trajetória mostrada na Figura 4.27 é bastante semelhante àquela obtida das análises de alta resolução do ECMWF por Pezza e Simmonds (2005). Para traçar a trajetória apresentada na Figura 4.27, foi utilizado um método semi-automático, no qual as posições do centro do ciclone em cada análise são fornecidas e posteriormente graficadas, utilizando um *script* desenvolvido na linguagem *Grid Analysis and Display System* (GrADS).

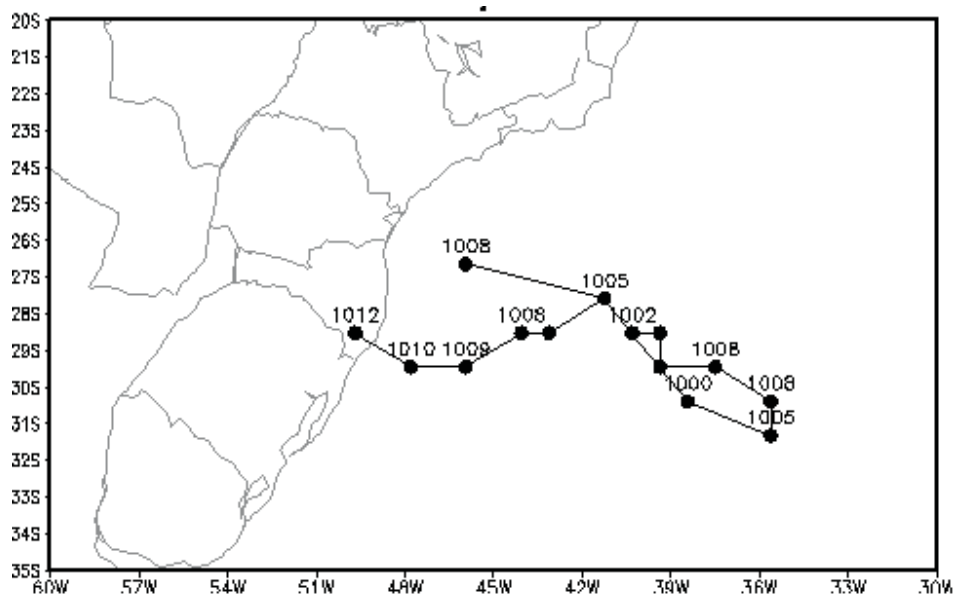


Figura 4.27 – Trajetória do ciclone Catarina segundo as análises do NCEP na resolução T126L28. A posição do ciclone a cada 12 horas é indicada pelos pontos. O ponto mais ao norte representa o início da trajetória em 20 de março de 2004 às 1200 UTC e o último ponto (sobre o continente) corresponde à posição final em 28 de março de 2004 às 1200 UTC.

Em geral, as previsões numéricas da evolução do Catarina, produzidas pelos centros meteorológicos operacionais, subestimaram sua intensidade e indicaram informações conflitantes sobre sua trajetória (SILVA DIAS et al., 2004). Previsões acuradas da intensidade e trajetória de sistemas severos como o Catarina podem representar uma quantidade menor de perdas de vidas humanas e uma redução dos danos causados pelos ventos e chuvas intensos.

Neste estudo de caso, as informações avaliadas são as previsões da trajetória e do valor da pressão no centro do ciclone, pelo conjunto. O impacto das modificações implementadas nos experimentos descritos nas seções anteriores sobre estas duas informações, também são avaliadas.

A condição inicial utilizada como estado básico para o estudo e para iniciar as simulações é a análise das 1200 UTC do dia 24 de março de 2004. Na Figura 4.28, é apresentada as perturbações iniciais do campo de pressão sobrepostas ao campo total (linhas pontilhadas), obtidas para a condição inicial considerada. As perturbações dos membros 1 e 2 são apresentadas nas colunas da direita e esquerda, respectivamente. Os experimentos OPER e EXT1 não possuem perturbações em P e, por isso, não são mostrados. No campo de pressão, as perturbações nos experimentos TROP, EXT2 e ETSA são semelhantes, exceto por pequenas diferenças nas magnitudes das perturbações. As perturbações do experimento LNDR são consideravelmente diferentes daquelas dos experimentos anteriores. Mas, em geral, as perturbações parecem estar relacionadas à presença do sistema. As perturbações *breeding* apresentam algum sinal na região do Catarina, mas não parecem estar relacionadas diretamente a ele.

Pressão ao Nível Medio do Mar – Perturbacoes Iniciais

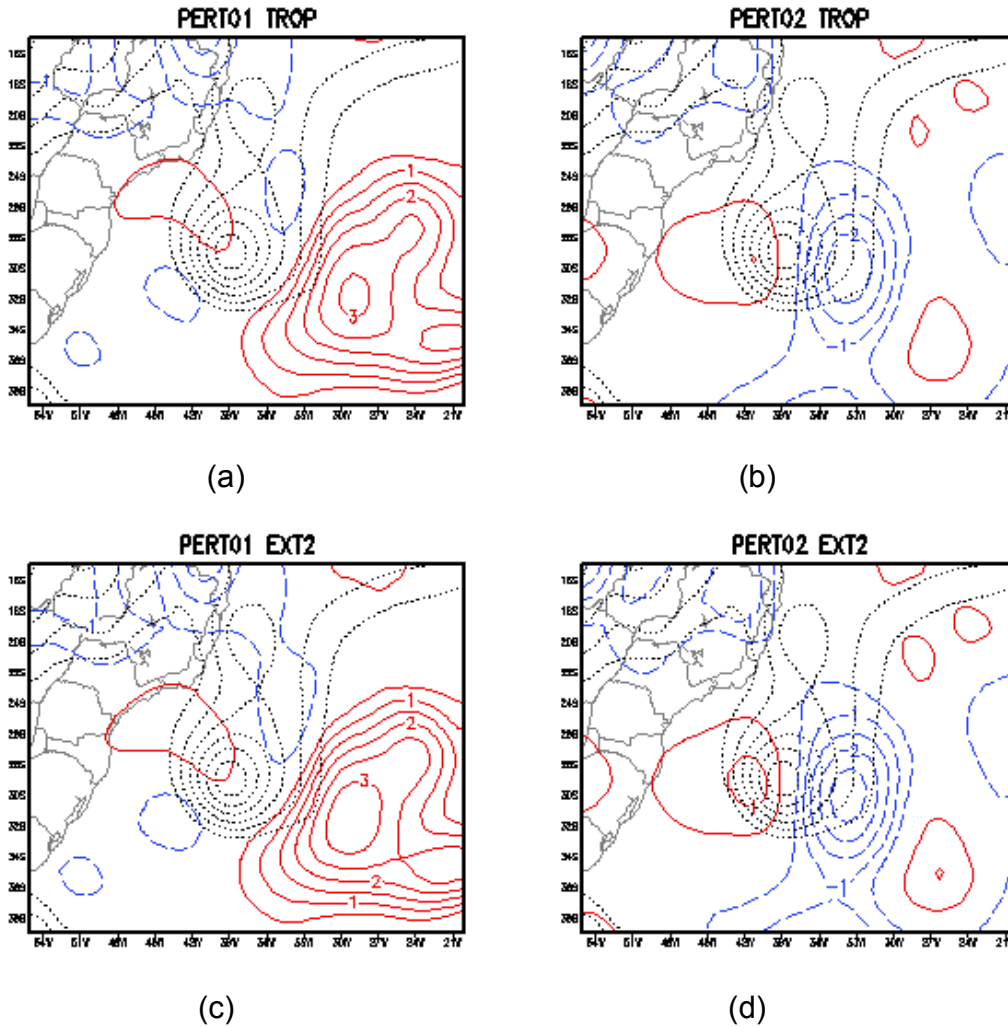
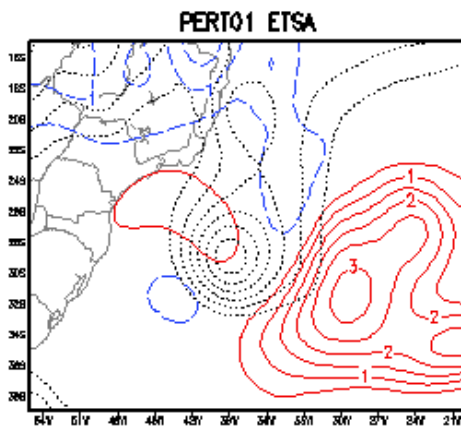
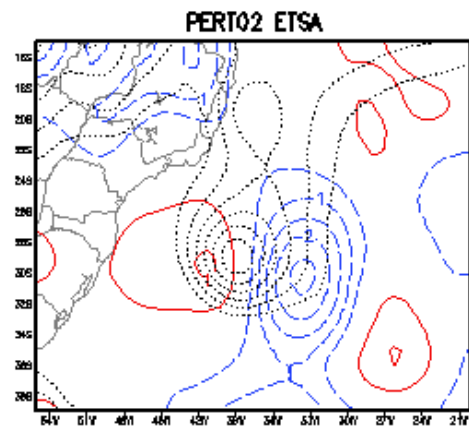


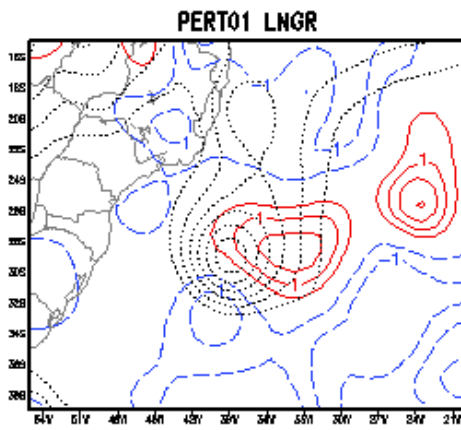
Figura 4.28 – Perturbações iniciais do campo de pressão à superfície (valores positivos: linhas contínuas; valores negativos: linhas tracejadas), sobrepostas ao campo de pressão ao nível médio do mar (linhas pontilhadas). A coluna da esquerda são para as perturbações do membro 1 e as da direita são do membro 2, para os experimentos TROP (a e b), EXT2 (c e d), ETSA (e e f), LNGR (g e h) e BRCP (i e j). Os experimentos OPER e EXT1 não contém perturbações no campo de pressão e por isso são omitidos. O valor da isóbara mais interna do campo de pressão é 1011 hPa e o intervalo entre elas é de 1 hPa. (Continua)



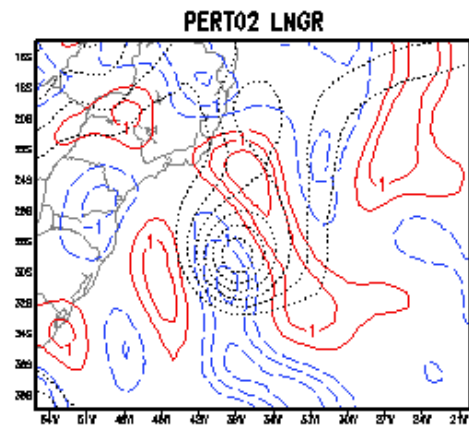
(e)



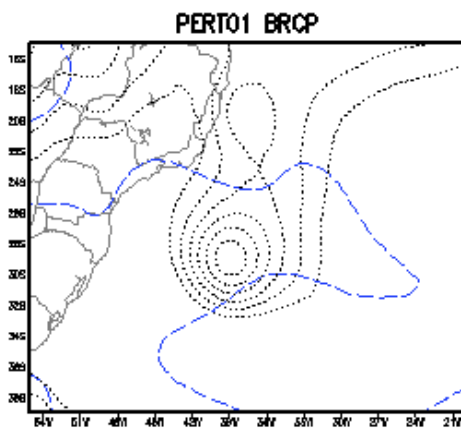
(f)



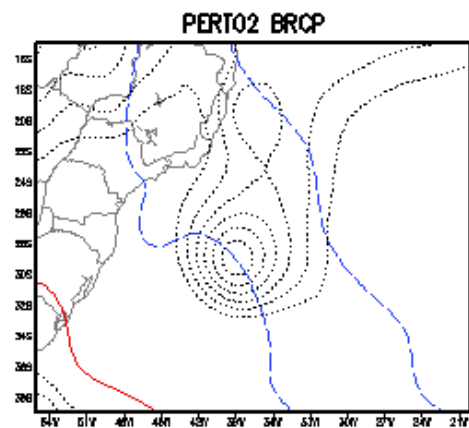
(g)



(h)



(i)



(j)

Figura 4.28 - Conclusão

A Figura 4.29 apresenta as perturbações iniciais da magnitude do vento em 500 hPa. Observa-se que para a magnitude do vento, os resultados dos experimentos diferem significativamente. Em geral, as perturbações parecem estar relacionadas à presença do Catarina, sendo que os experimentos EXT2 e ETSA são os que apresentam estruturas de escalas menores, enquanto o experimento BRCP apresenta perturbações de escalas maiores.

Velocidade do Vento – 500 hPa – Perturbacoes Iniciais

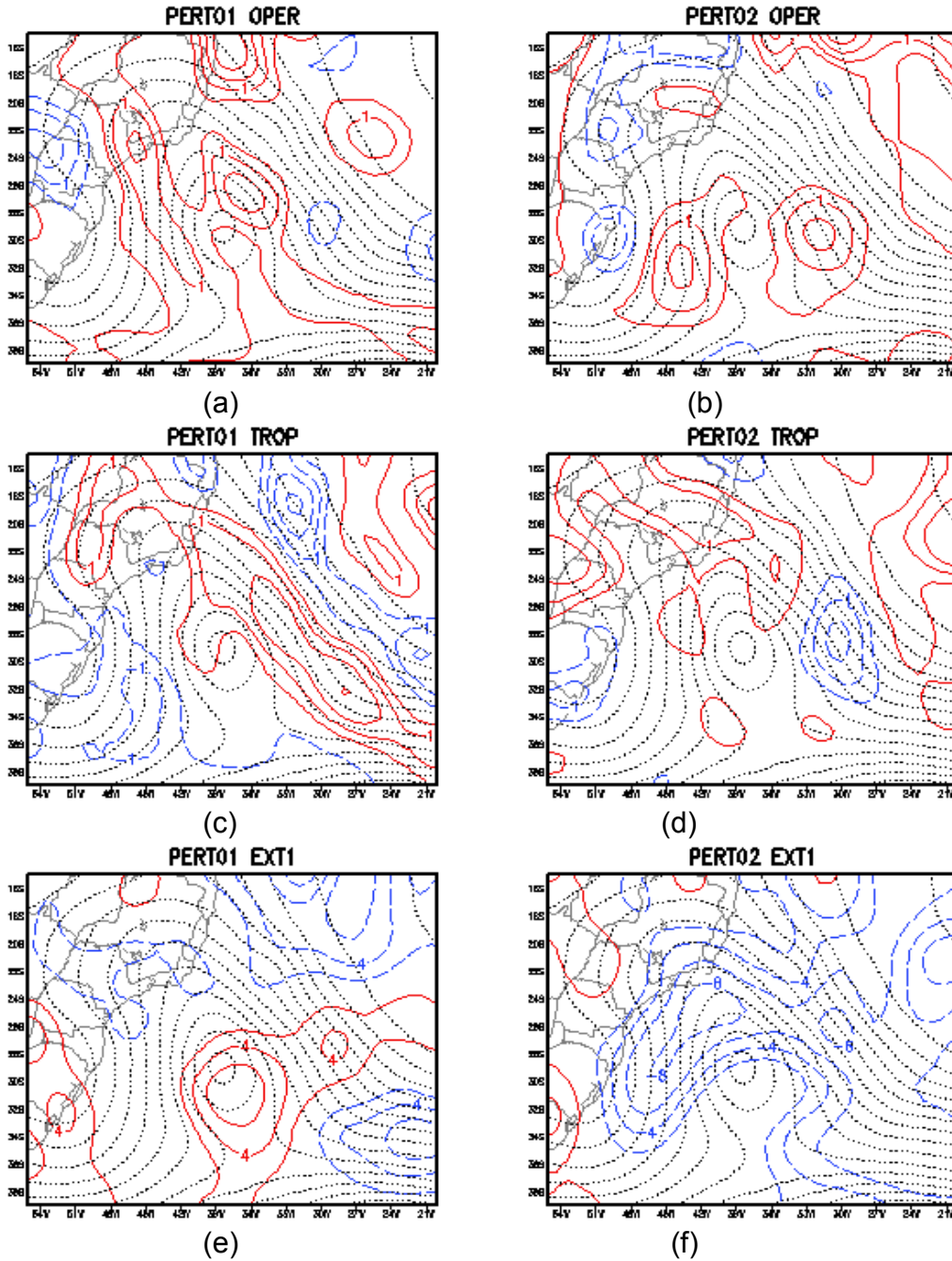


Figura 4.29 – Perturbações iniciais na magnitude do campo de vento em 500 hPa (valores positivos: linhas contínuas; valores negativos: linhas tracejadas), sobrepostas ao campo de altura geopotencial em 500 hPa (linhas pontilhadas). A coluna da esquerda são para as perturbações do membro 1 e as da direita são do membro 2, para os experimentos OPER (a e b), TROP (c e d), EXT1 (e e f), EXT2 (g e h), ETSA (i e j), LNGR (k e l) e BRCP (m e n). O valor da isolinha de altura geopotencial mais interna é 5780 m e o intervalo entre elas é de 10 m. (Continua)

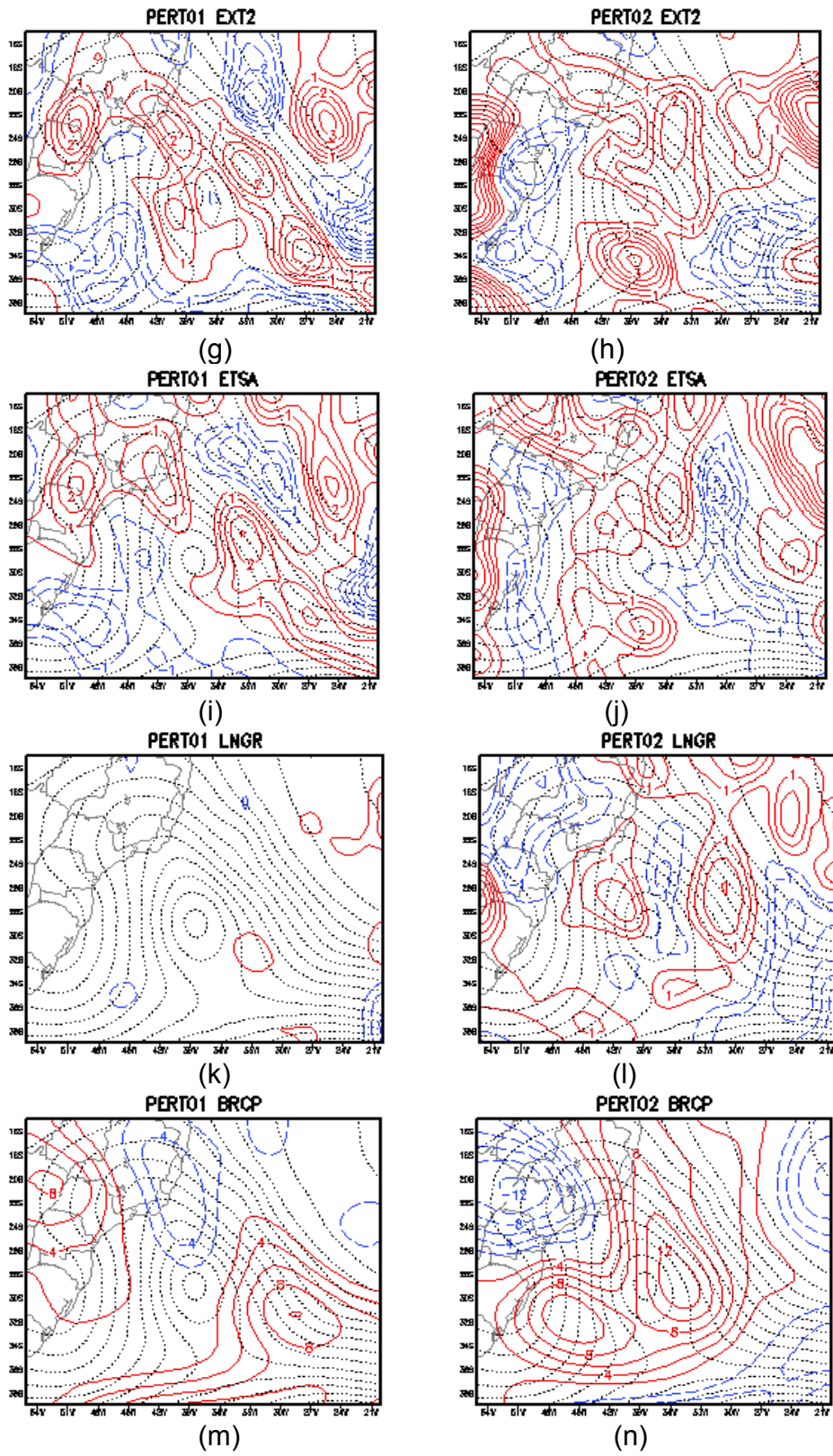


Figura 4.29 - Conclusão

Na Figura 4.30 são apresentadas as simulações da trajetória do Catarina em cada experimento. Nota-se claramente que o MCGA do CPTEC não consegue simular adequadamente a evolução do sistema. A previsão de controle (linhas tracejadas) é capaz de simular o sistema apenas até o prazo de previsão de 48 horas. De 24 de março às 1200 UTC até às 0000 UTC do dia 26 de março, o Catarina moveu-se para noroeste e, em seguida, assumiu uma propagação para oeste. A trajetória do ciclone indicada pela previsão de controle é deslocada para norte em relação àquela observada. Os membros do conjunto (pontos) do experimento OPER apresentam grande espalhamento nas previsões da posição do ciclone. Alguns membros são capazes de simular o sistema até a previsão de 72 horas, e a mudança na direção do deslocamento do sistema. Entretanto, em geral, os membros do conjunto também indicam trajetórias ao norte daquela observada. Os resultados dos demais experimentos (Figuras 4.25b-g) indicam que aqueles experimentos com perturbações extratropicais e perturbações nos campos de P e Q aplicadas simultaneamente (EXT2, ETSA e LNGR) apresentam maiores espalhamentos nas trajetórias previstas, melhorando a sobreposição com a trajetória analisada.

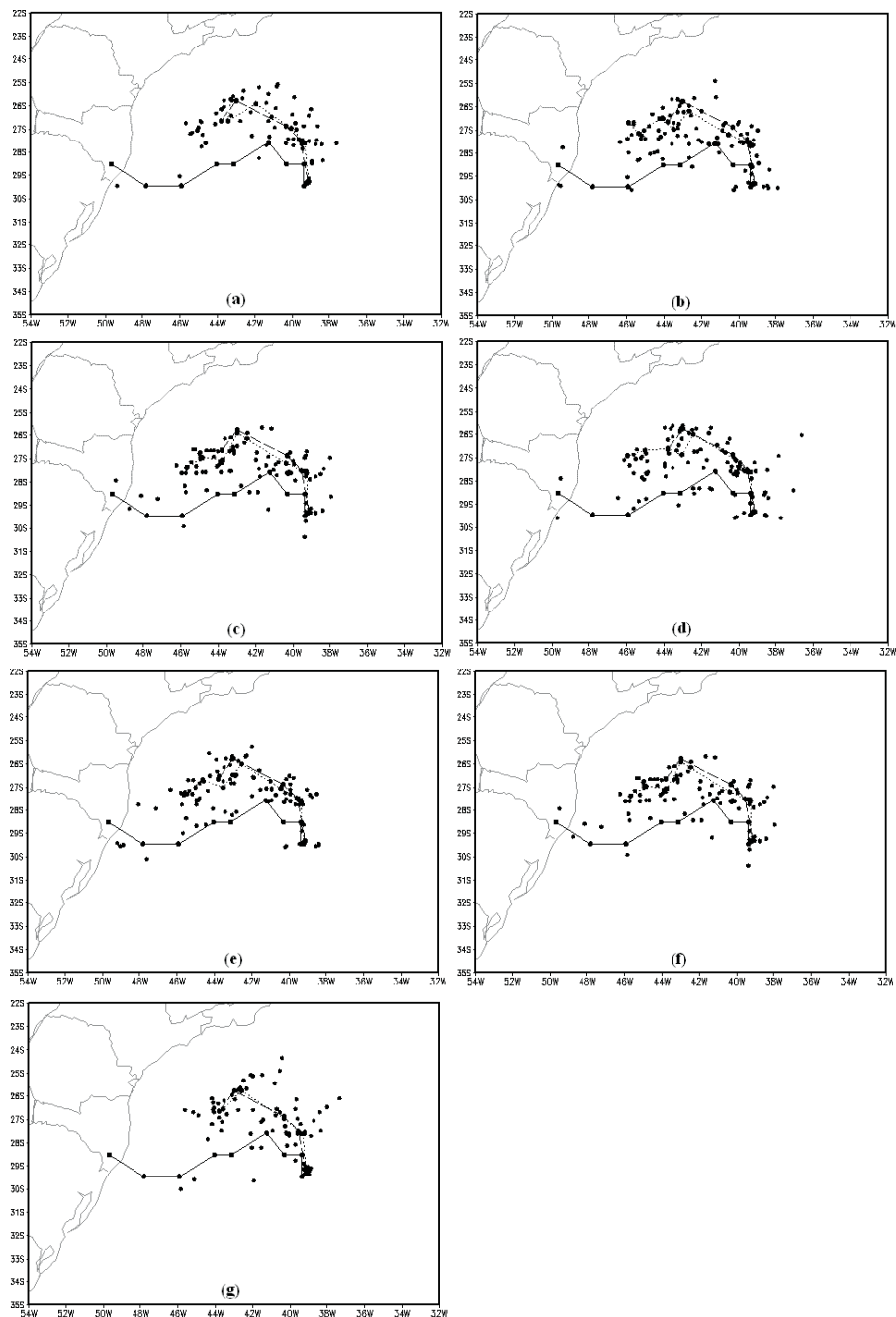


Figura 4.30 – Previsão de trajetória do Catarina iniciada a partir de 24 de março de 2004 as 1200 UTC. O prazo máximo de previsão é de quatro dias e as posições são indicadas para cada 12 horas de previsão. As trajetórias são baseadas nas análises do NCEP (linhas sólidas), previsões de controle (linhas tracejadas), conjunto médio (linha pontilhada) e membros individuais do conjunto (pontos). Os painéis referem-se aos experimentos (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR e (g) BRCP.

A Figura 4.31 apresenta os resultados das simulações da pressão no centro do ciclone. Nota-se que o valor da pressão no centro do ciclone é superestimado pela previsão de controle (linha tracejada). Este resultado também foi obtido por Bonatti et al. (2006) numa simulação do episódio Catarina usando uma versão do MCGA-CPTEC em alta resolução (T511L64, cerca de 22 Km). A superestimativa da pressão no centro do ciclone é devido, em parte, à posição onde o modelo localiza o máximo da fonte de calor (em torno de 500 hPa), enquanto nas análises, ele foi observado em torno de 850 hPa.

Para o experimento OPER (Figura 4.31a), é verificado que os valores de pressão previstos (pontos) são maiores do que aqueles observados, em todos os prazos de previsão. Embora o conjunto médio (linha pontilhada) tenha conseguido indicar o ciclone por 12 horas a mais do que a previsão de controle, ele indica valores muito semelhantes àqueles da previsão de controle. A aplicação de perturbações nos extratropicais, no experimento EXT1 (Figura 4.31c), produz um pequeno aumento na dispersão dos membros do conjunto e melhora ligeiramente a previsão do conjunto médio. Entretanto, os valores de pressão previstos são mais altos do que aqueles observados. Com perturbações adicionais nos campos de pressão à superfície e umidade específica no experimento TROP (Figura 4.31b), o conjunto médio simula o ciclone até a previsão de 72 horas, embora os valores do conjunto médio ainda sejam muito próximos aos valores do controle nos prazos de previsão mais curtos. A inclusão de perturbações adicionais nos extratropicais e nos campos P e Q, no experimento EXT2, aumenta o espalhamento dos membros do conjunto e torna a previsão da pressão no centro do ciclone do conjunto médio mais próxima dos valores das análises. Além disso, na previsão de 12 horas, os membros do conjunto capturam o valor verificado na análise. O impacto de perturbações regionais sobre a América do Sul no desempenho das previsões por conjunto pode ser avaliado através dos resultados do experimento ETSA (Figura 4.31e). É evidente que tais perturbações contribuem para produzir previsões da pressão no centro do ciclone com valores menores do que aqueles obtidos na previsão de controle. Os valores do conjunto médio são relativamente mais próximos dos

valores das análises. Os resultados do experimento LNGR (Figura 4.31f) são similares àqueles do experimento ETSA, exceto que um decréscimo no espalhamento do conjunto é observado. Os resultados dos experimentos ETSA e LNGR sugerem que a maior parte das melhorias no desempenho das previsões, em relação aos demais experimentos, está associada à aplicação de perturbações regionais sobre a América do Sul. Este resultado concorda com aqueles de ZK1999 e Puri et al. (2001) que sugerem o cálculo de perturbações adicionais sobre uma área limitada à vizinhança de ciclones tropicais a fim de melhorar as previsões de sistemas meteorológicos severos. O experimento BRCP apresenta resultados semelhantes àqueles da versão operacional, embora um pequeno aumento no espalhamento do conjunto seja verificado (Figura 4.31g).

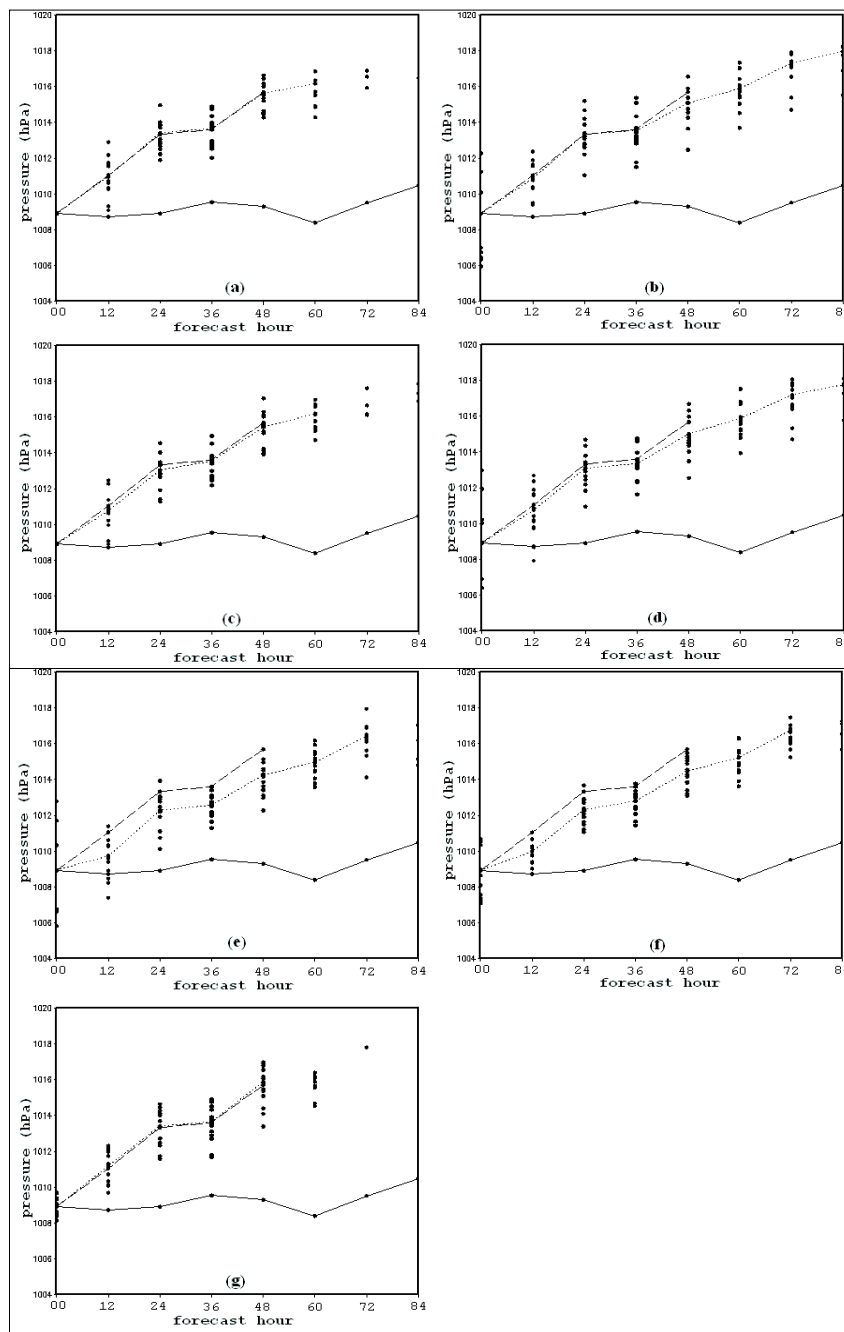


Figura 4.31 – Valor da pressão reduzida ao nível do mar no centro do ciclone Catarina. Previsão iniciada em 24 de março de 2004 as 1200 UTC, em função do tempo (em horas) baseado nas análises do NCEP (linhas sólidas), previsão de controle (linhas tracejadas), conjunto médio (linhas pontilhadas) e membros individuais do conjunto (pontos). Os painéis referem-se aos experimentos (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2, (e) ETSA, (f) LNGR e (g) BRCP.

5 CONCLUSÕES

A qualidade das previsões numéricas de tempo melhorou significativamente nas décadas recentes. Alguns fatores que contribuíram fortemente para este avanço foram o rápido desenvolvimento computacional, o advento da assimilação de dados de satélite e uma melhor representação dos fenômenos atmosféricos pelos modelos numéricos. Neste contexto, a previsão de tempo por conjunto foi desenvolvida como uma resposta natural do conhecimento do comportamento caótico da atmosfera, a impossibilidade de eliminar todas as incertezas das condições iniciais e a representação incompleta dos processos físicos e dinâmicos da atmosfera dentro dos modelos numéricos.

Neste trabalho procurou-se estudar a habilidade do método de geração de condições iniciais perturbadas EOF em produzir perturbações adequadas para as latitudes médias. Não existe um método perfeito para geração de perturbações, seja nos trópicos ou extratropicais, entretanto espera-se que o método seja capaz de produzir perturbações que representem incertezas que têm potencial de crescimento com o tempo. Em latitudes médias, a instabilidade baroclínica é o principal mecanismo responsável pelo desenvolvimento das perturbações. Desta forma, as perturbações produzidas por um esquema de perturbação devem estar associadas a este mecanismo para reproduzir adequadamente as incertezas nas condições iniciais que crescerão com o tempo. Outro aspecto analisado foi a capacidade do método EOF em produzir perturbações regionais sobre a AS que estejam associadas aos sistemas locais. Além disso, procurou-se generalizar a seleção do modo EOF tomado como perturbação ótima, através da proposição de um método para selecionar as perturbações através dos coeficientes temporais das EOFs. O método de perturbação breeding também foi considerado nas avaliações.

Os resultados foram avaliados segundo as características das perturbações, procurando identificar os mecanismos responsáveis pelo seu desenvolvimento, contextualizando-as em relação a resultados de outros métodos publicados em

trabalhos obtidos da literatura, e através da avaliação da capacidade de tais perturbações de produzir previsões que incorporem elementos destas novas perturbações, traduzidas em previsões com maior qualidade. Um estudo de caso para o evento particularmente intenso, o ciclone Catarina, também foi analisado.

Os resultados mostraram que as perturbações baseadas em EOF extratropicais desenvolvem-se preferencialmente próximas a regiões com alta baroclinicidade em latitudes médias e próximas a áreas de sistemas sinóticos importantes que atuam nos trópicos-extratropicais do Hemisfério Sul durante o verão austral. Também foi obtido que as perturbações em P e Q são importantes para obter perturbações que são espacialmente mais organizadas e com estrutura mais baroclínica, em latitudes médias. Esta modificação também produz perturbações que crescem mais rápido do que naqueles casos em que não são aplicadas perturbações em P e Q, durante a integração não linear do modelo.

O perfil vertical da energia total das perturbações, no tempo inicial, apresentou dois máximos nos experimentos EOF, um próximo da tropopausa e outro nos baixos/médios níveis. O máximo nos altos níveis atmosféricos é devido principalmente a contribuição cinética das perturbações, enquanto em baixos/médios níveis, o máximo deve-se às contribuições das perturbações na temperatura (quando não há perturbações na umidade) e a umidade específica nos experimentos em que há perturbações neste campo. A evolução não linear de 48 horas das perturbações mostrou uma concentração maior da energia total nos altos e baixos níveis (dois máximos bem pronunciados). O aumento da energia nos altos níveis está relacionado à propagação da energia cinética para cima, das perturbações inclinadas contra o cisalhamento do vento básico com a vertical. A comparação com perturbações randômicas indicou que os modos EOF apresentam maior crescimento, ou seja, modos atmosféricos instáveis estão sendo selecionados.

A análise espectral da energia total das perturbações indicou que a maior parte da energia é concentrada nas ondas com número de onda até 35, no tempo

inicial, e que há um deslocamento da energia dos modos mais curtos em direção às ondas de escala longa e média, após a integração não linear de 48 horas do modelo.

Consistente com os resultados acima, as avaliações estatísticas indicaram que as perturbações baseadas em EOF extratropicais estendem-se sobre um subespaço no espaço de fase representando erros de crescimento rápido, contribuindo para melhoria da qualidade das previsões por conjunto, tanto num sentido determinístico quanto probabilístico e, além disso, inclui mais diversidade às perturbações iniciais do sistema. Estas perturbações extras têm um efeito positivo no desempenho do EPS, principalmente sobre os extratropicais. Perturbações nos campos de P e Q permitem a inclusão de mais diversidade às perturbações iniciais e produzem uma melhoria da qualidade das previsões por conjunto principalmente sobre os trópicos. A combinação destas duas perturbações extras é capaz de reproduzir os principais efeitos positivos que são observados quando cada uma é aplicada individualmente, e provou ser uma configuração mais adequada para o método de perturbação inicial.

Perturbações baseadas em EOF regionais calculadas separadamente sobre o norte da América do Sul e sul da América do Sul em adição a perturbações hemisféricas contribuíram em um sentido geral para melhoria das previsões locais sobre a região alvo.

A seleção dos modos EOF mais instáveis através da tendência linear dos coeficientes temporais das EOFs mostrou ser importante para produzir previsões mais acuradas sobre os extratropicais. Sobre os trópicos, a seleção sistemática do primeiro modo apresentou resultados melhores.

O método breeding simplificado apresentou desempenho semelhante ao método EOF nos extratropicais, apresentando ligeira vantagem apenas em relação ao espalhamento dos membros do conjunto nesta região. Entretanto nos trópicos e América do Sul, o método EOF apresentou melhores resultados, indicando que a utilização deste método nestas regiões é uma opção mais adequada.

Os resultados do estudo de caso revelaram que a intensidade do ciclone é subestimada pelas condições iniciais, ou seja, a pressão no centro do sistema é maior e os ventos nas bordas do ciclone são mais fracos do que aqueles estimados de informações de satélite. Para a rodada do conjunto operacional (experimento OPER) iniciado às 1200 UTC do dia 24 de março de 2004, as previsões superestimam os valores das pressões das análises e não indicaram um ciclone bem configurado em previsões com prazos maiores do que 48 horas. Perturbações adicionais nos extratropicais e nos campos P e Q aumentam este prazo por mais 24 horas, além de melhorar a previsão do valor da pressão no centro do sistema. Os melhores resultados foram obtidos com os experimentos nos quais perturbações regionais adicionais sobre a América do Sul foram calculadas (experimentos ETSA e LNGR).

Em geral, a utilização de perturbações EOF nas latitudes médias, incluindo os campos de pressão à superfície e umidade específica, produziu impacto positivo na qualidade das previsões.

Os resultados deste trabalho podem ser utilizados como referência para o aprimoramento do método EOF utilizado operacionalmente no CPTEC/INPE. Além disso, a utilização de índices estatísticos mais adequados para a avaliação das previsões por conjunto pode contribuir para o desenvolvimento de uma forma mais abrangente de medir a qualidade das previsões numéricas de tempo.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se como trabalhos futuros estudar a importância da instabilidade barotrópica no desenvolvimento das perturbações EOF e breeding. Além disso, estudar a influência de perturbações nos processos físicos na qualidade das previsões por conjunto do CPTEC/INPE, através da implementação de alguma técnica de perturbação estocástica ou utilizando multi-modelo, a exemplo do que é feito operacionalmente no MSC e ECMWF. O uso de análises de controle criadas pelo próprio MCGA do CPTEC para gerar condições iniciais usando perturbações EOF é outro tema relevante a ser investigado. Atualmente, um ciclo de assimilação de dados baseado no Physical-space Statistical Analysis System (COHN et al. 1998) associado com o MCGA do CPTEC está rodando em uma suíte operacional paralela. A implementação de uma versão do *local ensemble Kalman filter* (OTT et al., 2004) para assimilação de dados e previsão por conjunto encontra-se em andamento no CPTEC/INPE, e uma comparação destes dois métodos de perturbação pode ser bastante útil, tanto do ponto de vista teórico quanto do ponto de vista prático.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTHES, R.A. A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model. **Mon. Wea. Rev.**, v. 105, p. 270-286, 1977.
- ARAKAWA, A.; SCHUBERT, W.H. Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I. **J. Atmos. Sci.**, v. 31, p. 674-701, 1974.
- ARAVÉQUIA, J.A. **Funções de influência com dependência temporal: aplicações na interpretação da deriva de prognósticos de tempo e da gênese de anomalias climáticas**. 2003. 257p. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo. 2003.
- ÁTGER, F. The skill of ensemble prediction systems. **Mon. Wea. Rev.**, v. 127, p. 1941-1953, 1999.
- BADGER, J.; HOSKINS, J. Simple initial value problems and mechanisms for baroclinic growth. **J. Atmos. Sci.**, v. 58, p. 38-49, 2001.
- BARKMEIJER, J.; BUIZZA, R.; PALMER, T. N.; PURI, K.; MAHFOUF, J-F. Tropical singular vectors computed with linearized diabatic physics. **Quart. J. Roy. Meteor. Soc.**, v. 127, p. 685-708, 2001.
- BISHOP, C.H.; ETHEERTON, B.J.; MAJUMDAR, S. Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part I: theoretical aspects. **Mon. Wea. Rev.**, v. 129, p. 420-436, 2001.
- BLACKMON, M.L. A climatological spectral study of the 500 mb geopotential height of the northern hemisphere. **J. Atmos. Sci.**, v. 33, p. 1607-1623, 1976.
- BONATTI, J. P. **Alguns aspectos observados e teóricos do aquecimento estratosférico brusco nos Hemisférios Sul e Norte**. 1979. 155 p. (INPE-1671-TDL/016). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1979. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2005/06.17.18.44>>. Acesso em: 28 nov. 2008.
- BONATTI, J. P. Modelo de circulação geral atmosférica do CPTEC. **Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, v. on line, n. Especial 10 anos, 1996. (INPE-12799-PRE/8089). Disponível em: <<http://tucupi.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliesp10a/bonatti.html>>. Acesso em: 28 nov. 2008.

BONATTI, J.P., Verificação estatística do modelo global do CPTEC. In: Anais do IX Congresso Brasileiro de Meteorologia, 1996, Campos do Jordão, Brasil. **Anais...** Campos do Jordão, Brasil: 1996 p. 1453-1456.

BONATTI, J.P.; RAO, V.B.; SILVA DIAS, P.L. On the westward propagation of catarina storm. In: 8th. International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, 2006, Foz do Iguaçu, Brasil. **Proceedings...** Foz do Iguaçu, Brasil: 2006 p. 1659-1675.

BUIZZA, R. Potential forecast skill of ensemble prediction and spread and skill distributions of the ECMWF ensemble prediction system. **Mon. Wea. Rev.**, v.125, p. 99-119, 1997.

BUIZZA, R.; MILLER, M.J.; PALMER, T.N. Stochastic simulation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system. **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, v. 125, p. 2887-2908, 1999.

BUIZZA, R.; HOUTEKAMER, P.L.; TOTH, Z.; PELLERIN, G.; WEI, M.; ZHU, Y. A comparison of the ECMWF, MSC, and NCEP Global Ensemble Prediction Systems. **Mon. Wea. Rev.**, v.133, p. 1076-1097, 2005.

CHARNEY, J.G. The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. **J. Meteor.**, v. 4, p. 135-163, 1947.

COHN, S.E.; SILVA, A.; GUO, J.; SIENKIEWICZ, M.; LAMICH, D. Assessing the effects of data selection with the DAO Physical-space Statistical Analysis System. **Mon. Wea. Rev.**, v. 126, p. 2913-2926, 1998.

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

COUTINHO, M.M.; HOSKINS, B.J.; BUIZZA, R. The influence of physical process on extratropical singular vectors. **J. Atmos. Sci.**, v. 61, p. 195-209, 2004.

DALEY, R.; MAYER, T. Estimates of global analysis error from the global weather experiment observational network. **Mon. Wea. Rev.**, v. 114, p. 1642-1653, 1986.

DAVIES, R. **Documentation of the solar radiation parameterization in the GLAS climate model.**, 1982. 57 p. NASA Tech. Memo. 83961

DERBER, J. ; BOUTTIER, F. A reformulation of the background error covariance in the ECMWF Global Data Assimilation System. **Tellus** , v. 51A, p. 195-221, 1999.

- EHRENDORFER, M.; ERRICO, R.M.; RAEDER, K.D. Singular-vector perturbation growth in a primitive equation model with moist physics. **J. Atmos. Sci.**, v. 56, p. 1627-1648.
- FARINA, L.; MENDONÇA, A.M.; BONATTI, J.P. Approximation of ensemble members in ocean wave prediction. **Tellus**, v. 57A, p. 204-216, 2005.
- GRELL, G.A.; DEVENYI, D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. **Geophys. Res. Lett.**, v. 29, DOI:10.1029/2002GL0153, 2002.
- GRIMM, A.M.; SILVA DIAS, P.L. Analysis of tropical-extratropical interactions with influence functions of a barotropic model. **J. Atmos. Sci.**, v. 52, p. 3538-3555, 1995.
- HAMILL, T.M. Ensemble-based data assimilation. In: Seminar on Predictability of Weather and Climate, 2002, Reading, UK. **Proceedings...** Reading, UK: ECMWF, 2002, p. 83-105.
- HAMILL, T.M.; SNYDER, C., WHITAKER, J.S. Ensemble forecasts and the properties of flow-dependent analysis-error covariance singular vectors. **Mon. Wea. Rev.**, v.131, p. 1741-1758, 2003.
- HARSHVARDHAN, T.; DAVIS, R.; RANDALL, D.A; CORSETTI, T.G. A fast radiation parameterization for general circulation models. **J. Geophys. Res.**, v. 92, p. 1009-1016, 1987.
- HOLTON, J.R. An Introduction to Dynamic Meteorology. 5a. ed., Academic Press, 2004.
- HOSKINS, B.J.; KAROLY, J. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. **J. Atmos. Sci.**, v. 38, p. 1179-1196, 1981.
- HOSKINS, B.J.; VALDES, P.J. On the existence of storm tracks. **J. Atmos. Sci.**, v. 47, p. 1854-1864, 1990.
- HOSKINS, B.J.; BUIZZA, R.; BADGER, J. The nature of singular growth and structure. **Quart. J. Roy. Meteor. Soc.**, v. 126, p. 1565-1580, 2000.
- HOUTEKAMER, P.L.; LEFAIVREM, L.; DEROME, J.; RITCHIE, H.; MITCHELL, H.L. A system simulation approach to ensemble prediction. **Mon. Wea. Rev.**, v. 124, p. 1225-1242, 1996.
- KALNAY, E.; MO, K.C.; PAEGLE, J. Large-amplitude, short-scale stationary Rossby waves in the Southern Hemisphere: Observation and mechanistic experiments to determine their origin. **J. Atmos. Sci.**, v. 43, n. 3, p. 252-275, 1986.

KALNAY, E.; CORAZZA, M.; YANG, S.-C.; HUNT, B.; KOSTELICH, E.; OTT, E.; PATIL, D.J.; SZUNYOUGH, I.; YORKE, J.; ZIMIN, A. Data assimilation via local ensemble Kalman filtering. In: SEMINAR ON PREDICTABILITY OF WEATHER AND CLIMATE, 2002, Reading, UK. **Proceedings...** Reading, UK: ECMWF, 2002 p. 41-45.

KANAMITSU, M.; EBISUZAKI, W.; WOOLLEN, J. ; YANG, S-K.; HNILO, J.J.; FIORINO, M.; POTTER, G.L. NCEP-DEO AMIP-II Reanalysis (R-2). **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 83, p. 1631-1643, 2002.

KINTER, J.L.; DEWITT, D.; DIRMEYER, P.A.; FENNESSY, M.J.; KIRTMAN, B.P.; MARX, L.; SCHNEIDER, E.K.; SHUKLA, J.; STRAUS, D.M. **The COLA atmosphere-biosphere general circulation model Volume 1: Formulation.** Calverton, MD: Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies. COLA Staff, Report N.o 51, 1997.

KODAMA, Y. M. Large-scale common features of sub-tropical convergence zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and SACZ) part I: characteristics of subtropical frontal zones. **J. Meteor. Soc. Japan**, v. 70, p. 813-836, 1992.

KRISHNAMURTI, T.N.; KISHTAWAL, C.M.; ZHANG, Z.; LAROW, T.; BACHIOCHI, D.; WILLIFORD, E. Multimodel ensemble forecasts for weather and seasonal climate. **J. Climate**, v.13, p. 4196-4216, 2000.

KUO, H.L. On the formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection. **J. Atmos. Sci.**, v. 22, p. 40-63, 1965.

LACIS A.; HANSEN, J.E. A parameterization of the absorption of solar radiation in the Earth's atmosphere. **J. Atmos. Sci.**, v. 31, p. 118-133, 1974.

LEGLER, D.M. Empirical Orthogonal Function Analysis of Wind Vectors over the Tropical Pacific Region. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 64, p. 234-241, 1983.

LEITH, C.E. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts. **Mon. Wea. Rev.**, v. 102, p. 409-418, 1974.

LIEBMANN, B.; HARTMANN, D.L. An observational study of tropical-midlatitude interaction on intraseasonal time scales during winter. **J. Atmos. Sci.**, v. 41, p. 3333-3350, 1984.

LORENZ, E.N. Deterministic non-periodic flow. **J. Atmos. Sci.**, v. 20, p. 130-141, 1963.

LORENZ, E.N. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. **Tellus**, v. 17, p. 321-333, 1965.

- LORENZ, E.N. The predictability of a flow which possesses many scales of motion. **Tellus**, v. 21, p. 289-307, 1969.
- MCTAGGART-COWAN, R.; BOSART, L.F.; DAVIS, C.A.; ATALLAH, E.H.; GYAKUM, J.R. EMANUEL, K.A. Analysis of Hurricane Catarina (2004). **Mon. Wea. Rev.**, v. 134, p.3029-3053, 2006.
- MELLOR, G.L.; YAMADA, T. Development of a turbulence closure model geophysical fluid problem. **Rev. Geophys. Space Phys.**, v. 20, p. 851-875, 1982.
- MENDONÇA, A.M.; BONATTI, J.P. O sistema de previsão de tempo global por ensemble do CPTEC. In: XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2002, Foz do Iguaçu, Brasil. **Anais...** Foz do Iguaçu, Brasil: 2002.
- MENDONÇA, A.M.; BONATTI, J.P. Experiments with EOF-based perturbation method to ensemble weather forecasting in midlatitudes. In: 8th. International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, 2006, Foz do Iguaçu, Brazil. **Proceedings...** Foz do Iguaçu, Brazil: 2006.
- MENDONÇA, R.W.B.; BONATTI, J.P. Estudo da energética modal para episódios de ZCAS. Parte I: Análise Observacional. **Rev. Bras. Meteorologia**, 2008. (aceito para publicação).
- MO, K.C.; HIGGINS, R.W. The Pacific-South American Modes and Tropical Convection during the Southern Hemisphere Winter. **Mon. Wea. Rev.**, v. 126, p. 1581-1596, 1998.
- MOLTENI, F.; BUIZZA, R.; PALMER, T.N.; PETROLIAGIS, T. The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. **Quart. J. Roy. Meteor. Soc.**, v. 122, p. 73-119, 1996.
- MOORTHI, S.; SUAREZ, M.J. Relaxed Arakawa-Schubert: a parameterization of moist convection for general circulation models. **Mon. Wea. Rev.**, v. 120, p. 978-1002, 1992.
- NMC Development Division Staff Research version of the medium range forecast model. **NMC Documentation Series #1** (available from the Development Division, NMC, Washington, D.C. 20233), 1988.
- OTT, E.; HUNT, B.R.; SZUNYOUGH, I.; ZIMIN, A.V.; KOSTELICH, E.J.; CORAZZA, M.; KALNAY, E.; PATIL, D.J.; YOURKE, J.A. A local ensemble Kalman filter for atmospheric data assimilation. **Tellus**, v. 56A, p. 415-428, 2004.
- PEZZA A.B.; SIMMONDS, I. The first South Atlantic hurricane: Unprecedented blocking, low shear and climate change. **Geophys. Res. Lett.**, v. 32, L15712. DOI:10.1029/2005GL023390, 2005.

- PURI, K.; BARKMEIJER, J.; PALMER, T.N. Ensemble prediction of tropical cyclones using targeted diabatic singular vectors. **Quart. J. Roy. Meteor. Soc.**, v. 127, p. 709-731, 2001.
- RABIER, F.; JÄRVINEN, H.; KLINKER, E.; MAHFOUF, J-F.; SIMMONS, A. The ECMWF operational implementation of four-dimensional variational assimilation. I: experimental results with simplified physics. **Quart. J. Roy. Meteor. Soc.**, v.126, p. 1143-1170, 2000.
- RANDEL, W.J.; STANFORD, J.L. The observed life cycle of a baroclinic instability. **J. Atmos. Sci.**, v. 42, p. 1364-1373, 1985.
- REYNOLDS, C.A.; WEBSTER, P.J.; KALNAY, E. Random error growth in NMC's global forecasts. **Mon. Wea. Rev.**, v. 122, p. 1281-1305, 1994.
- SATO, N.; SELLERS, P.J.; RANDALL, D.A.; SCHNEIDER, E.K.; SHUKLA, J.; KINTER III, J.L.; HOU, Y.-T.; ALBERTAZZI, E. Implementing the simple biosphere model in a general circulation model: Methodologies and results. **NASA Contractor Report** 185509, 76 pp., 1989.
- SELUCHI, M.E.; SAULO, A.C.; NICOLINI, M.; SATYAMURTY, P. The northwestern argentinean low: a study of two typical events. **Mon. Wea. Rev.**, v. 131, p. 2361-2378, 2003.
- SILVA DIAS, P.L.; SILVA DIAS, M.A.F.; SELUCHI, M.; DINIZ, F.A. O ciclone Catarina: Análise preliminar da estrutura, dinâmica e previsibilidade. In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2004, Fortaleza, Brasil. **Anais...** Fortaleza, Brasil: 2004.
- SIVILLO, J.K.; AHLQUIST, J.E.; TOTH, Z. An Ensemble Forecasting Primer. **Wea. Forecasting**, v.12, p. 809-818, 1997.
- TIEDTKE, M. The sensitivity of the time-mean large-scale flow to cumulus convection in the ECMWF model. In: Workshop on Convection in Large-Scale Numerical Models, 1983, Reading, UK. **Proceedings...** Reading, UK: ECMWF, 1983, p. 297-316.
- TOTH, Z.; KALNAY, E. Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations. **Bull. Am. Meteorol. Soc.**, v. 74, p. 2317-2330, 1993.
- TOTH, Z., KALNAY, E. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. **Mon. Wea. Rev.**, v. 125, p. 3297-3319, 1997.
- TRACTON, M.S.; KALNAY, E. Operational ensemble prediction at the National Meteorological Center. Practical aspects. **Wea. Forecasting**, v. 8, p. 379-398, 1993.

WALLACE, J.M.; GUTZLER, D.S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. **Mon. Wea. Rev.**, v. 109, p. 784-812, 1981.

WANG, X.; BISHOP, C.H. A comparison of breeding and ensemble transform Kalman filter ensemble forecast schemes. **J. Atmos. Sci.**, v. 60, p. 1140-1158, 2003.

WEBSTER, P.J.; CHANG, H. Atmospheric wave propagation in heterogeneous flow: basic flow controls on tropical-extratropical interaction and equatorial wave modification. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v. 27, p. 91-134, 1997.

WEI, M.; TOTH, Z. A new measure of ensemble performance: perturbation versus error correlation analysis (PECA). **Mon. Wea. Rev.**, v. 131, p. 1549-1565, 2003.

WEI, M.; TOTH, Z.; WOBUS, R.; ZHU, Y.; BISHOP, C.H.; WANG, X. Ensemble transform Kalman filter-based ensemble perturbations in an operational global prediction system at NCEP. **Tellus**, v. 58A, p. 28-44, 2006.

WHITAKER, J.S.; LOUGHE, A.F. The relationship between ensemble spread and ensemble mean skill. **Mon. Wea. Rev.**, 126, 3292-3302, 1998.

WILKS, D.S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. Academic Press, 467 pp, 1995.

WMO Manual on the global data-processing system. WMO 485, 217 pp., 1992.

XUE, Y.; SELLERS, P.J.; KINTER III, J.L.; SHUKLA, J.A simplified biosphere model for global climate studies. **J. Climate**, v. 4, p. 345-364, 1991.

ZHANG, Z. **Hurricane ensemble prediction using EOF-based perturbations**. 1997a. 173p. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade do Estado da Flórida, EUA. 1997a.

ZHANG, Z. **Algoritmo de geração de perturbações baseadas em EOF para temperatura e vento**. (The Florida State University, 1997b). Comunicação pessoal.

ZHANG, Z.; KRISHNAMURTI, T.N. A perturbation method for hurricane ensemble predictions. **Mon. Wea. Rev.**, v. 127, p. 447-469, 1999

ZHU H.; THORPE, A. Predictability of extratropical cyclones: the influence of initial condition and model uncertainties. **J. Atmos. Sci.**, v. 63, p. 1483-1497, 2006.

ANEXO A – Artigo aceito para publicação no periódico Monthly Weather Review.

Experiments with EOF-Based Perturbation Methods and their Impact on the CPTEC/INPE Ensemble Prediction System

Antônio Marcos Mendonça
and

José Paulo Bonatti

Center for Weather Prediction and Climate Studies (CPTEC), National Institute for Space Research (INPE), Cachoeira Paulista, São Paulo, Brazil

Corresponding author address: Antônio Mendonça, CPTEC/INPE, Rod. Presidente Dutra, Km 40, Cachoeira Paulista, CEP 12630-000, SP, Brazil
E-mail: marcos.mendonca@cptec.inpe.br

ABSTRACT

The impact of modifications of the perturbation method based on empirical orthogonal functions (EOF method) used operationally upon the ensemble prediction system (EPS) at CPTEC/INPE is evaluated. The main changes proposed in this study are: to apply the EOF method to perturb the midlatitudes; apply additional perturbations to the surface pressure (P) and specific humidity (Q) fields; and, compute regional perturbations over South America. The impact of these modifications in the characteristics of the initial perturbations and in the quality of the EPS forecasts is investigated. The EPS forecasts are evaluated through average statistical scores over the period 15 December 2004 to 15 February 2005. The statistical scores used in the evaluation are pattern anomaly correlation, root mean square error, ensemble spread, Brier skill score and perturbation versus error correlation analysis (PECA). Results indicate that with the inclusion of perturbations on P and Q , EOF-based perturbations acquire a more baroclinic structure. It is also observed that the simultaneous application of additional perturbations both in the extratropics and to the P and Q fields improves the performance of CPTEC-EPS and enhances the quality of forecast perturbations. Moreover, regional EOF-based perturbations computed over South America have positive impact on the ensemble forecasts over the target region.

1. Introduction

Atmospheric forecasts with high skill are an objective and at the same time a challenge to numerical weather prediction. In order to increase the quality of the numerical weather forecasts, two main factors must be taken into account: the representation of physical and dynamical processes in the atmosphere by numerical models, and an initial condition that reproduces realistically the atmospheric state at the beginning of the model integration. The fast development of computational technology over the last few decades has provided conditions for a better representation of the physical and dynamical atmospheric processes by numerical models. At the same time, the advent of the meteorological satellite information has increased significantly the quantity of data which, in addition to demanding improvements in the methods of data assimilation (Hamill, 2002, Kalnay et al., 2002, Rabier et al., 2000) has contributed to producing high quality analyses. However, despite the advances in representing atmospheric processes by numerical models and the production of accurate analyses, numerical forecasts diverge from observed atmospheric evolution after some days of model integration. The sources of numerical weather forecast errors are mainly the two previously-described factors: deficiencies of the models in representing dynamical and physical processes of the real atmosphere, or *external error*; and uncertainties in the state of the atmosphere at the initial time, or *internal error* (Reynolds et al., 1994).

The model uncertainties were considered in the development of ensemble forecasting systems that run the model a number of times with different parameterization schemes to create a set of perturbed forecasts (Krishnamurti et al., 2000 and Houtekamer et al., 1996). The model uncertainties were also treated following a method described by

Buizza et al. (1999). In their scheme, the random model errors due to the physical parameterization processes are simulated by including stochastic perturbations in the parameterized diabatic tendency for any component of the state vector.

The importance of the initial-state uncertainties in forecast errors is explained by *chaos theory* which, in a simplified form, is related to the sensitivity that some nonlinear deterministic dynamic systems exhibit with respect to initial and boundary conditions as they evolve in time (Lorenz, 1963, 1965 and 1969). The atmosphere is an example of a chaotic system, i.e., slightly different initial conditions may lead to significantly different final solutions. Thus even in a perfect model scenario, since the atmospheric state is not completely represented by the analyses, the unavoidable errors will grow as the model evolves with time, degrading the quality of forecast until it eventually lacks any useful skill.

Some ensemble weather prediction systems do not take into account the uncertainties in numerical models and consider only the uncertainties in the initial conditions. In these systems, one of the most important characteristics is the strategy used to generate the perturbed analysis. Under the perfect-model hypothesis, they try to estimate perturbations that have potential to grow in time and can produce a set of forecasts that are diverse enough to give an impression of the likely range of future atmospheric states (Buizza, et al., 1999).

The National Centers for Environmental Prediction (NCEP) and the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) in 1992 were the centers that pioneered in the implementation of operational ensemble weather forecasting. They used the methods of *breeding of growing modes* (Toth and Kalnay, 1993) and *singular vectors*

(Molteni et al., 1996) to generate perturbed initial conditions. Later, other methods for generating perturbed analysis and ensemble forecasting were developed, such as the perturbed-observation approach (Houtekamer et al., 1996) and more recently, perturbation methods based on ensemble Kalman filters (Wei et al., 2006; Houtekamer et al. 2005; Ott et al., 2004; Wang and Bishop, 2003; Bishop et al., 2001).

Zhang and Krishnamurti (1999, hereinafter ZK1999) developed a procedure for generating initial ensemble perturbations based on principal component analysis (empirical orthogonal functions - EOF) called *EOF-based perturbations* (or, the EOF method), in order to produce hurricane ensemble forecasts. In this method, those eigenvectors whose EOF coefficients increase rapidly with time are selected to generate perturbed analyses.

Coutinho (1999) performed adaptations to the EOF method in order to produce perturbed initial conditions with the atmospheric general circulation model (AGCM) of the Center for Weather Prediction and Climate Studies / National Institute for Space Research (CPTEC/INPE). The ensemble forecasts initialized with the EOF method presented better results when compared with ensemble predictions based on random initial perturbations. Moreover, the EOF ensemble mean forecasts presented better performance than the control forecasts. In October 2001, the CPTEC/INPE started to produce operational ensemble weather forecasts using the approach described in Coutinho (1999). In Farina et al. (2005) the EOF method together with the CPTEC-AGCM was also used to generate perturbed surface wind stress in order to force an ocean wave model and produce ocean wave ensemble predictions.

Mendonça and Bonatti (2006) evaluated the CPTEC/INPE ensemble prediction system (EPS) using statistical scores (anomaly correlation, root mean square error (rmse), standard deviation spread) and showed that, at least for 500-hPa geopotential height, the CPTEC/INPE ensemble forecasts are under-dispersive, i.e., the ensemble spread is smaller than the rmse of the ensemble mean forecasts. In an attempt to reduce this deficiency it was suggested that modifications be made in the region used to compute the initial perturbations. In the operational version, the perturbations were computed in a latitude belt between 45S and 30N for temperature and wind fields. They found that the application of the EOF method to calculate additional extratropical perturbations enhances the performance of CPTEC-EPS, mainly for 24h and 48h forecast lead times.

The influence of extratropical systems upon tropical region dynamics and vice versa was studied by Palmer (1988). Connections between anomalies in tropical atmospheric systems and the observed variability in determined extratropical regions at several time scales have been described in work by Mo and Higgins (1998), Simmons (1982), Hoskins and Karoly (1981), and others. On the other hand, the propagation of transient systems from midlatitudes toward the tropics may be a source of energy for tropical systems. Liebmann and Hartmann (1984) concluded that on time scales of 5 to 10 days, midlatitude systems exert strong influence over the tropical atmosphere. Thus, the perturbation growth in the midlatitudes may influence the quality of the forecasts in the tropics through tropical-extratropical atmospheric interaction. Reynolds et al. (1994) found that the random error growth in the NCEP-AGCM over the extratropics due to model dynamical instability is much greater than over the tropics. As a consequence,

Zhang (1997) suggested that it would be better to generate perturbations over midlatitudes and tropics separately.

In view of such evidence, we investigate in this paper the influence that midlatitude EOF-based perturbations have on the quality of the CPTEC/INPE ensemble forecasts in both global and local scales, especially over South America. Moreover, we evaluate the impact of applying perturbations to the surface pressure and specific humidity, which are prognostic fields of the model but are not perturbed in the operational version of the CPTEC-EPS. For evaluation, a number of experiments are carried out, in which the EOF method configuration (region used to compute the unstable modes and perturbed fields) is modified. Each experiment is evaluated according to the structure of the initial perturbations and using average statistical scores for two months (15 December 2004 to 15 February 2005). Our motivation for performing this investigation is to attempt to improve the quality of the CPTEC/INPE ensemble forecasts and demonstrate the current status of our ensemble prediction system.

Brief descriptions of the data set, the methodology used to configure the experiments and the statistical scores computed to evaluate the results are presented in section 2. The results are discussed in section 3 and conclusions are presented in section 4.

2. Data and methodology

a. Initial conditions, climatology and period of evaluation

The control initial conditions (without perturbations) used in this study are the 1200 UTC daily spectral analyses obtained from NCEP by CPTEC/INPE to produce operational ensemble weather forecasts. The horizontal spectral truncation used here is T126, i.e., triangular truncation at zonal wave number 126. To avoid aliasing in the solution of nonlinear terms of model equations it is necessary to use approximately a number of points in the zonal direction equivalent to three times the shortest wave number considered, which corresponds to approximately a 0.94° longitude x latitude resolution in grid space. In the vertical, the atmosphere is divided into 28 sigma layers (L28). For evaluations, these initial conditions are considered as the best estimate of the real atmospheric state.

For each CPTEC-EPS simulation, seven EOF-based perturbations are generated and added (subtracted) to (from) the control analysis, creating a set of fourteen perturbed initial conditions. Each ensemble member represents an integration of the CPTEC-AGCM up to 10 days lead time from a perturbed initial condition or from the control analysis. The result obtained from each EPS simulation is an ensemble of 15 members for each forecast range.

The period considered for the evaluation of the experiments by use of statistical scores is from 15 December 2004 to 15 February 2005 (Southern Hemisphere summer). In South America, climatology indicates intense convective activity over the northern and central parts of the continent during this period. The Intertropical Convergence Zone (ITCZ), the South Atlantic Convergence Zone (SACZ), the Subtropical Jet Stream, the Bolivian High and the Northeastern Brazilian Trough are the most significant synoptic scale systems that influence the weather conditions in this region during the summer

season. This period was chosen because of the relatively low predictability that numerical models exhibit over South America around this time of year, in consequence of the strong role that physical processes, especially deep convection, play in the forecasts over this region. We are particularly interested in the impact of the modifications to the initial perturbations proposed in each experiment upon the quality of the ensemble forecast, especially over South America; thus these weather forecasts have particular relevance for economic and social activities during this period.

The NCEP Reanalysis 2 climatology (Kanamitsu et al., 2002) is used to calculate analysis and ensemble forecast anomalies and climatological standard deviation of the 500-hPa geopotential height and of the 850-hPa horizontal wind fields.

b. CPTEC/INPE atmospheric general circulation model

The model used in this study is the CPTEC-AGCM at the same resolution as the analyses (T126L28). Briefly, the CPTEC-AGCM is based on the spectral solution of the primitive dynamic equations in the form of divergence and vorticity, virtual temperature, specific humidity and logarithm of the surface pressure, and includes sub-grid processes through parameterizations. Details of the model can be obtained in Kinter et al. (1997).

The main physical processes included in the CPTEC-AGCM are:

- Kuo-type deep convection;
- shallow convection;
- large-scale condensation;
- Simplified Simple Biosphere land surface scheme (SSiB);

- bulk aerodynamics scheme over oceans;
- planetary boundary layer based on the Mellor-Yamada closure scheme;
- radiative fluxes (short wave and long wave) based on a band model;
- interaction of radiation with clouds.

c. The CPTEC/INPE operational EOF-based perturbation method

The procedure employed to generate the perturbed atmospheric initial conditions is based on the method developed by ZK1999, originally proposed for hurricane forecasting using the Florida State University (FSU) AGCM. This method, called *EOF-based perturbations*, was developed in view of the fact that during the first few days (around 1.5 days) of model integration, perturbations grow linearly.

The procedure used at CPTEC/INPE for producing perturbed analyses can be outlined in the following steps:

- a) n random small perturbations (currently $n=7$) are added to the temperature and horizontal wind components fields of the control analysis. These perturbations are normally distributed with mean zero and standard deviation comparable to that of the 3-h forecast error (3 m s^{-1} for the wind field and 0.6 K for the temperature field);
- b) the resulting n randomly perturbed analyses and the control analysis are used to integrate the model for 36 h, with results saved every 3 h. No horizontal or vertical smoothing or balance is imposed for the random initial perturbations; however the 6 first hours of model integration is discarded in order to allow a self-adjustment of the

- model to the perturbed initial conditions and consequently develop more balanced forecast perturbations;
- c) n time series of the difference field forecasts are constructed by subtracting the control forecast from the perturbed forecasts at each time increment of 3 h;
- d) an EOF analysis is performed for each n time series on a domain of interest to determine the eigenvectors whose EOF coefficients increase rapidly with time. These eigenvectors are considered as the EOF perturbations.
- e) these perturbations are rescaled in order to make their standard deviation of the same order as the initial perturbations;
- f) adding (subtracting) these rescaled perturbations to (from) the control analysis produces an ensemble of $2n$ initial perturbed states.

Finding the EOF perturbations cited in item d) consists of obtaining the directions that explain the maximum amount of variance in which the randomly perturbed forecasts diverge from the control forecast in a period of time of approximately linear growth. The EOF analysis is useful for this purpose. In this case, it is based on the solution of an eigenvalue problem of the covariance matrix obtained from the difference time series, described in item c). Taking into account the N points over a specified domain, an $M \times N$ dataset matrix \mathbf{X} of these difference time series is constructed; where M is the number of model outputs during the period from 6 to 36h with interval of 3h ($M = 11$). The $N \times N$ covariance matrix is defined as $\mathbf{C}=(1/M)\mathbf{X}^T\mathbf{X}$, where the superscript T denotes the transpose matrix. \mathbf{C} is symmetric and has N real eigenvalues λ_i and \mathbf{e}_i orthonormal eigenvectors. The eigenvectors are obtained from the decomposition $\mathbf{C}\mathbf{E}=\mathbf{E}\mathbf{\Lambda}$, where \mathbf{E} is the matrix with the eigenvectors \mathbf{e}_i as its columns, and $\mathbf{\Lambda}$ is the matrix with the

eigenvalues λ_i , along its diagonal and zeros elsewhere. The eigenvalues of \mathbf{C} are ordered from the largest to the smallest giving a corresponding order in associated eigenvectors (descending order of explained variance per each eigenvector). The dataset matrix \mathbf{X} can be expanded with respect to the base of eigenvectors \mathbf{e}_i as $\mathbf{X}=\mathbf{E}\mathbf{Z}$. The matrix \mathbf{Z} contains coefficients for different eigenvectors at different times. \mathbf{Z} is called principal component (PC) matrix. The growing modes can be selected through the time evolution of the eigenvector coefficients. Currently, the operational CPTEC-EPS considers only the eigenvectors associated with the largest eigenvalue for perturbing the initial conditions.

For the difference time series of wind fields the procedure is analogous, but its components (zonal component δu and meridional component δv) are used to compose a complex number $\delta u + i \delta v$, according to the methodology described in Legler (1983). Thus, to evaluate the matrix \mathbf{C} , the complex conjugate transpose \mathbf{X}^* of matrix \mathbf{X} , formed by difference time series of wind field, is considered in order to obtain $\mathbf{C}=(1/M)\mathbf{X}^*\mathbf{X}$. \mathbf{C} is symmetric and is composed of complex elements, except in the diagonals, which are real. By definition, \mathbf{C} is a Hermitian matrix with real eigenvalues and orthonormal eigenvectors.

For hurricane forecasting, ZK1999 proposed perturbations in the hurricane initial position and the computation of the empirical orthogonal functions in the neighborhood of the hurricane. For global weather forecasting at CPTEC/INPE, perturbations are not applied to the initial position of any meteorological system. Coutinho (1999) noticed that restricting the perturbations to just a limited area, e.g., over South America region, did not produce good results. This constraint had affected the perturbation growth in regions relevant to the development of the synoptic systems. Coutinho (1999) found better results

using an extended region (45S-30N; 00E 360E). This region was adopted in the operational version of CPTEC-EPS.

In the perturbation rescaling procedure, each perturbed field is rescaled in order to have a previously-specified standard deviation in the domain. Specifically, suppose that the original standard deviation of EOF perturbations is σ_i and the prior specified standard deviation is σ_j ; then each grid point in that region is multiplied by the factor (σ_j/σ_i) so that perturbations acquires the desired amplitude. Notice that this operation does not change the structure of the perturbations since it just adjusts their intensity. With respect to the intensity of the perturbation rescaling, ZK1999 considered that it was reasonable to assume that the perturbations had an order of magnitude comparable to that of the 3-h forecast error (3 m s^{-1} for the wind field and 0.6 K for the temperature field). Coutinho (1999) obtained better results using 5.0 m s^{-1} and 1.5 K (from Daley and Mayer, 1986) for the perturbation amplitudes in the rescale procedure. These latter perturbation amplitudes were adopted in the version of the EOF-based method implemented operationally at CPTEC/INPE, and are also used in all experiments in this study.

As mentioned previously, the EOF method uses randomly perturbed initial conditions to integrate the full nonlinear model in order to identify, in a linear sense, the main directions of perturbation growth. Hamill et al. (2003) present an approach for generating approximate singular vectors (SVs) using a very large ensemble of forecasts started from a randomly perturbed control analysis. For computing the SVs, they first produce an ensemble of initial conditions that contain, besides the reference initial condition, a number of randomly perturbed initial states that are designed to be white in a total-energy norm, i.e., have equal energy in all resolved scales; perturbations are

sufficiently small to assure that they will evolve linearly. Next, the fully nonlinear model is integrated out to 48 h from each analysis of the ensemble. An algebraic procedure is used to combine linearly the ensemble forecasts in order to obtain the largest variance in total energy; this same linear combination is applied to the initial ensemble to determine the leading initial-time SVs. Their SV approach has in common with EOF method the use of the full nonlinear model to evolve the random initial perturbations and the hypothesis that perturbations will evolve linearly during the optimization time. However, the two methods are essentially different in terms of other characteristics. The SV perturbations are determined according to the variance in the total-energy norm and demand a large number of members to produce good approximations of the true singular vectors, since the method considers that the sample covariance matrices, based on the analysis and forecast ensembles, must approximate the analysis and forecast error covariance matrices which is achieved only with a infinite number of members. In the EOF method, perturbations are computed as the main direction in which a randomly perturbed nonlinear forecast diverges from the nonlinear control forecast, i.e., the eigenvector associated with the largest eigenvalue computed from the time series of the difference fields; in the EOF method, for each randomly perturbed initial condition, a supposed growing perturbation is obtained.

d. Experimental design

The main aspects considered in configuring the procedure for generating perturbed initial conditions in each experiment are: i) the application of the EOF-based

method to generate perturbations in midlatitudes; ii) perturbations on surface pressure and specific humidity fields, which are prognostic fields of the CPTEC-AGCM and are not perturbed in the operational version of CPTEC-EPS.

The application of EOF-based perturbations in the surface pressure field may perhaps replace partially the perturbations in the position of meteorological systems, originally used by ZK1999 in hurricane initial positions. For the surface pressure field, the amplitude of random initial perturbations and of perturbation rescaling is 1.0 hPa, obtained from Anderson et al. (2005). In the case of the specific humidity field, the random initial perturbations and perturbation rescaling are performed in each vertical layer separately, using as reference the vertical background standard deviation distribution values for the ECMWF global data assimilation system, presented in Derber and Bouttier (1999). Those values were linearly interpolated from ECMWF-AGCM vertical coordinates for CPTEC-AGCM sigma layers before their application. The interpolated values for each CPTEC-AGCM sigma layer are shown in Table 1.

While the perturbation growth over midlatitudes is mainly caused by dynamic instability (according to linear perturbation theory), in the tropics the perturbations are strongly influenced by physical processes at smaller scales than those resolved by models and exhibit a growth rate much smaller than that over the extratropics (Zhang, 1997; Reynolds et al., 1994). Therefore, it is more reasonable to generate perturbations over the extratropics and tropics separately. Special treatment of perturbations over the tropics was inserted at the ECMWF-EPS through the computation of tropical singular vectors over target areas (Barkmeijer et al., 2001; Puri et al., 2001). At NCEP, a regional rescaling, based on analysis uncertainties, contributed to the improvement of the

ensemble mean skill over the tropics and the Southern Hemisphere (Toth and Kalnay, 1997). In those experiments in which EOF-based perturbations are extended to midlatitudes, we consider it more suitable to calculate the perturbations for the tropics and extratropics separately. In an attempt to obtain better-adjusted EOF-based perturbations for South America, regional perturbations are computed over two almost homogeneous areas with respect to the influence of meteorological systems: a sector with tropical regime, strongly influenced by convective systems (Northern South America: 100W-10W; 20S-20N); and a region influenced by baroclinic systems (Southern South America: 110W-20W, 60S-20S). Overall, six regions are considered in the computation of EOF-based perturbations, depending on the configuration used for each experiment (to be described later):

- Northern Hemisphere (NH): 0-360W; 20N-90N;
- Southern Hemisphere (SH): 0-360W; 20S-90S;
- Tropics (TR): 0-360W; 20S-20N;
- Extended Tropics (ETR): 0-360W; 45S-30N;
- Northern South America (NSA): 100W-10W; 20S-20N;
- Southern South America (SSA): 110W-20W; 60S-20S.

In order to evaluate the impact that the proposed modifications in the operational CPTEC-EPS perturbation scheme has on the ensemble forecast quality, five experiments are carried out: Experiment OPER--considered as a reference for other experiments--represents the operational configuration used currently at CPTEC/INPE. In this case, the zonal and meridional wind components (U, V) and temperature (T) fields are perturbed

over an extended tropical region (ETR); in the second experiment (EXT1), perturbations are computed for three global regions, Northern Hemisphere (NH), Southern Hemisphere (SH) and tropics (TR), and the perturbed fields are again U , V and T ; in the third experiment, defined as TROP the perturbed region is the same as the operational version (OPER), but includes perturbations to surface pressure (P) and specific humidity (Q) fields (which were not perturbed in the former experiment); in the fourth experiment (EXT2), perturbations in three global regions NH, SH and TR are combined with additional perturbations to P and Q fields; in the fifth experiment, ETSA, besides perturbations in midlatitudes (NH and SH) and the tropics (TR), additional perturbations for two different sectors of South America (Northern South America--NSA and Southern South America--SSA) are computed, and the perturbed fields are P, T, Q, U and V . A list of the experiments and their respective characteristics is presented in Table 2.

e. Measures of forecast performance

The verification is performed using the 500-hPa geopotential height (Z500) field over the Northern Hemisphere (NH, 20N-80N), Southern Hemisphere (SH, 80S-20S) and South America (SA, 110W-10W; 60S-15N). The Z500 field provides relevant information about synoptic scale flow and is one of the most commonly used weather fields, mainly over midlatitudes. Over region TR the variables used were the zonal and meridional components of wind at 850 hPa (U850 and V850) or a combination of three variables, temperature (T) and wind (U, V) at three levels, 850, 500 and 250 hPa. Following Wei and Toth (2003), a new variable p is defined with $p=(U, V, \alpha T)$, where

$\alpha = (C_p/T_r)^{1/2}$, $C_p = 1004.0 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ is the specific heat at constant pressure for dry air and T_r is a reference temperature. For each pressure level, T_r is obtained by linear interpolation from *Standard Atmosphere Data* (Holton, 2004).

The quality of the atmospheric pattern predictions and probability forecasts is assessed through the ensemble mean and probability distribution of ensemble members, respectively. The perturbation growth is evaluated through the evolution of ensemble spread. In order to measure the quality of ensemble mean forecasts, the pattern anomaly correlation (PAC) and root mean square error (rmse) are calculated. The ensemble spread is measured by computing the standard deviation of ensemble members with respect to the ensemble mean. As described in Wilks (1995), the Brier skill score (BSS) and its components (reliability--REL and resolution--RES) are calculated to verify the quality of the probabilistic forecasts. The BSS reliability component (REL) measures the calibration or conditional bias of the forecasts and the BSS resolution component (RES) summarizes the ability of the forecasts to discern subsample forecast periods with different relative frequencies of the event.

The components of the Brier skill score are computed using the probability forecasts of 500-hPa geopotential height anomaly greater or lesser than one climatological standard deviation or, over tropics, the probability of U850 and V850 anomaly greater or lesser than 5 m s^{-1} . The probability intervals are established according to the number of ensemble members, following the methodology presented in the report *Manual on the Global Data-Processing System*, edited by World Meteorological Organization (WMO, 1992).

The quality of ensemble perturbations is investigated using the methodology developed by Wei and Toth (2003), called *perturbation versus error correlation analysis* (PECA). While the ensemble spread can be easily changed by multiplying the initial perturbations by a scalar number, perfect pattern spread is not affected by such a change. The pattern spread can only be changed through the introduction of more diversity in the initial ensemble perturbation patterns. The PECA measures the amount of variance that individual and/or optimally combined ensemble perturbations can explain in forecast error fields. In this study, an average over 14 individual PECA values, i.e., 14 correlations between the forecast errors and 14 individual ensemble perturbations (indicated by *sin*), and the PECA values for a correlation between the forecast errors and an optimal combination of the 14 individual ensemble perturbations (indicated by *opt*) are presented. Over the hemispheric regions (NH and SH) and South America, PECA is computed for Z500 and over the tropics it is calculated for the three-dimensional variable $p(U,V,T)$ defined earlier.

PAC, BSS, RES and PECA are positively-oriented indices, so the higher index values indicate better results. On the other hand, rmse and REL are negatively oriented with lower index values indicating better performances.

Each CPTEC-EPS run produces an ensemble of 15 forecasts (14 perturbed and 1 control) integrated for up to 10 days. To compute statistical indices, except for PECA, the fields from both forecasts and analyses are interpolated to a regular 2.5 x 2.5 –degree grid, as in WMO (1992). The results presented in Figures and Tables represent the average of statistical indices over the period 15 December 2004 to 15 February 2005.

3. Results

a. Characteristics of the EOF perturbations

Figure 1 shows the global pattern of EOF perturbations for each experiment in terms of the 500-hPa geopotential height field and the corresponding spread for initial conditions, averaged over January 2005. For a further reference, a simple measure of the atmospheric instability is also provided--the Eady index--computed following Hoskins and Valdes (1990):

$$\sigma_e = 0.31 \frac{f}{N} \frac{du}{dz} \quad (1)$$

where N is the static stability; f is the Coriolis parameter; u is the magnitude of the vector wind; for computations the 300-hPa and 1000-hPa potential temperature and wind are used.

In OPER and TROP perturbations are applied to an extended tropical belt, and in consequence no perturbations are observed in latitudes beyond 30N and 45S. In OPER and EXT1 perturbations are on average almost half of those in other experiments (in Figs. 1a,c perturbations are scaled by 2). Since the same rescaling method and perturbation amplitude were used for all experiments, these differences in amplitude resulted from the application, or not, of perturbations to P and Q . Beyond differences in amplitude, experiments with and without perturbations on P and Q present significant differences with respect to the horizontal pattern. OPER and EXT1 produce similar perturbation in the tropical region (30S-30N). Intense perturbation centers can be observed over the three ocean basins and over Paraguay in South America. The center over South America seems

to be associated with the constant low pressure observed in this region during the Southern Hemisphere summer. Near the equator, intense nuclei of perturbations over the Pacific and Indian Oceans seem to be related to the Inter-tropical Convergence Zone (ITCZ) and the action of the Asian monsoon, respectively. These patterns indicate that deep convection and release of latent heating during the model evolution have a preponderant role in the development of perturbations. Over the Atlantic, however, perturbations are elongated over almost the whole tropical ocean basin and seem not to be related to a synoptic system, except near the equator where the ITCZ could be having some influence. Over NH midlatitudes, EXT1 produces a maximum over the Pacific Ocean that resembles the region of maximum Eady index seen in Fig. 1f. Over SH midlatitudes, perturbations are smaller than those observed in NH and shifted equatorward of the latitudes where the maxima of the Eady Index are observed.

Experiments TROP, EXT2 and ETSA produce similar preferred regions for perturbation development, except for TROP over midlatitudes, where no perturbations are applied in this experiment. In contrast with the results of OPER and EXT1, over the tropics, perturbations are not spread through almost the whole region, but are more concentrated in regions with strong convective activity: northern South America and the western Pacific. In the subtropics of the Southern Hemisphere intense perturbations are observed, concentrated over regions in which large-scale condensation is important to maintenance of the systems and represents a mode of interaction between the tropics and extra-tropics, by means of the two well-known systems that occur during Southern Hemisphere summer over the South Pacific and South Atlantic, called the South Pacific Convergence Zone (SPCZ) and the South Atlantic Convergence Zone (SACZ),

respectively. These two phenomena are associated with the intense convective activity in the western Pacific and northern South America and seem to dominate the development of EOF perturbations over the tropics/subtropics of the Southern Hemisphere. These two preferred regions for EOF perturbation developments coincide with regions pointed out in earlier studies (Kalnay et al., 1986; Grimm and Silva Dias, 1995) as sources of disturbances for many other regions around the globe through propagation of Rossby wave trains that will influence the atmospheric regime in remote regions.

Over NH midlatitudes, EXT2 and ETSA show three preferred regions for perturbation development: the western and central North Pacific, eastern North America and the western North Atlantic and northern Europe. Examining the Eady index (Fig. 1f) we observe that those preferred regions for perturbation development are close to regions with relative larger instability, suggesting that EOF perturbations are associated with baroclinic instability. Over SH midlatitudes, two centers of relatively intense perturbations appear around 120E and 120W. Both of these preferred regions are close to areas of relative maxima of the Eady index, suggesting again that EOF perturbations in midlatitudes are related to baroclinic instability.

Buizza et al. (2005) compared the performance of ECMWF, MSC and NCEP ensembles over the Northern Hemisphere. Although the period is different from that used here (they present the average characteristics of the three ensembles for May 2002), it may be useful to do a qualitative comparison between their results and the results of the EOF method. In terms of average value of ensemble spread it is observed that the EOF method produces approximately the same order of magnitude, around 30 m, over midlatitudes in the experiments TROP, EXT2 and ETSA, that they found for MSC and

NCEP ensembles. However, the EOF method does not produce relatively strong perturbations over the polar region, as observed in MSC-EPS and NCEP-EPS. In midlatitudes, EOF perturbations preferentially developed close to regions of maximum Eady index. This characteristic is also observed for the ECMWF-EPS. Near the tropics the EOF method produces perturbations that are, at least in terms of values, closer to those of the MSC ensemble, though for different reasons: more spread observed in MSC-EPS in this region is associated with the intrinsic characteristics of the method, i.e., different versions of the model, perturbations on observations, etc, while in the EOF method larger perturbations are associated with the computation of perturbations specifically over tropics.

After a general discussion based on the average characteristics of the EOF perturbations, a randomly selected case (12 UTC 20 January 2005) is used to investigate better the main effects of using different configurations in the EOF method (in each experiment) on the dynamic structure of the EOF-based perturbations.

The area considered in this evaluation is centered in midlatitudes over the South Atlantic Ocean. Figure 2 depict the synoptic systems that were acting at that time. At the surface a cyclone is observed (located near 50W and 42S with minimum mslp of around 990 hPa) and part of a larger anticyclone in the upper right corner of Fig. 2a. In general, the associated circulation presents an approximate geostrophic balance. The cyclone is projected through the vertical almost without any tilt, as indicated by the geopotential height at 500 hPa (Fig 2b) and 250 hPa (Fig 2c), which show a configuration typical of a barotropic system. The subtropical jet at the 250-hPa pressure level is also observed acting over the northernmost part of the region considered, producing a relatively intense

vertical wind shear. As a consequence, this region is identified as presenting a relatively high baroclinicity according to the Eady index, which can be identified at around 20W-15W and 45S in Fig. 2b, with an absolute maximum of about 0.9 day^{-1} .

Since the EOF perturbations are computed separately for each analysis field, an important issue is whether these perturbations are balanced with each other. This point is addressed in Fig. 3, where the first EOF perturbations of the wind field at 1000 hPa are superimposed on perturbations of surface pressure for each experiment. Experiments OPER and EXT1 do not have perturbations on P and Q , so no contours of P perturbations appear in Figs. 3a,c. Weak wind perturbations are observed for OPER and EXT1 along with a poorly-organized horizontal perturbation pattern mainly in OPER; in EXT1 a small cyclonic region appears near the upper right corner of Fig. 3c. When perturbations are additionally computed for P and Q over the region ETR, a zonally elongated perturbation region centered around 30W and near the boundary of the perturbation domain (45S), is produced for surface pressure (Fig 3b). This main perturbation has maximum negative amplitude of around -4 hPa. From geostrophic theory, negative perturbations will induce cyclonic circulation around them. Wind perturbations are slightly enhanced compared with perturbations in OPER and it can be seen that the cyclonic circulation is tied to the perturbations on P , with an almost geostrophic balance. When perturbations are computed as extratropical EOFs, we observe that the disturbances extend southward over a large area, reaching around 52S (Fig. 3d). Perturbation amplitudes are increased by around -6 hPa on P and 5 m s^{-1} on wind. Two less intense nuclei of positive perturbations on P are observed near longitude 45W. Again, we can notice that wind perturbations are approximately geostrophic and present cyclonic

circulation over negative perturbations and anticyclonic rotation over positive perturbations. For the analyzed region for this case, the target EOF perturbations over South America contribute to diminish slightly the perturbation amplitudes (Fig. 3e), however the horizontal pattern remains almost the same as that observed in EXT2. The results indicate that although no constraint is imposed on the perturbations and they have been computed separately for each field, an approximate balance among them is obtained, mainly when perturbations are included to surface pressure and specific humidity. This result is derived from the fact that although the model integration is started from a randomly perturbed initial condition, the error field gets organized after some hours. By commencing the EOF analysis from hour 6, contamination due to random effects is avoided.

Another relevant point to be investigated is the vertical structure of EOF perturbations, which can reveal some hints about the nature of perturbations and mechanisms for perturbation growth. For this purpose, a vertical cross-section of the first EOF perturbation of meridional wind component (V) is presented for the selected case at 44S at the initial time (Fig. 4) and 45S at t+48-h forecast (Fig. 5).

We find first that the perturbations of experiment OPER present the least organized vertical structure at the initial time (Fig. 4a). The corresponding configuration of the EOF method does not seem to be able to capture the main mechanisms of perturbation growth in midlatitudes. The extratropical perturbations of EXT1 (Fig. 4c) present discontinuous nuclei that show westward tilt with vertical, suggesting that at least in parts they are associated with baroclinic instability. When perturbations on P and Q are included (experiments TROP, EXT2 and ETSA) a structure more typical of baroclinic

systems is verified in the perturbations. Except for the intensity (in EXT2 they are more intense), perturbations in these three last experiments maintain many similarities (Figs.4b,d,e). Consistent with the surface perturbations in Figs. 3b,d,e, we can observe a branch of negative perturbations localized approximately between 25W and 10W near the surface that extends up to around 200 hPa. A branch of positive perturbations is also observed in the west side of those negative perturbations. The westward tilt of perturbations in the vertical indicates a baroclinic structure, suggesting that this mechanism is associated with the EOF perturbation growth in midlatitudes.

Nonlinear evolution of the EOF perturbations is presented in Fig. 5 for lead time 48 h. Less growth were found in experiment OPER. This is consistent with results presented earlier in Fig. 4, since this experiment had less-organized initial perturbations. A positive maximum in the perturbations is observed close to 20-10W in OPER, extending from surface up to around 200 hPa. In EXT1, perturbations are more intense than in OPER and a branch of negative perturbations can be observed close to 10W. Applying perturbations to P and Q , it is noticed that perturbations acquire more organized vertical structure. In experiments TROP, EXT2 and ETSA, positive perturbations are observed between 25W and 15W and a branch of negative perturbations is observed around 10-0W (Figs. 5b,d,e). As expected, the domain in which initial perturbations are applied plays a significant role in the growth rate of the forecast perturbations. When the extratropics are disturbed (experiments EXT2 and ETSA) perturbations grow faster than in the case in which perturbations are applied only over the extended tropics (TROP). For this particular case, perturbations of EXT2 grow faster than in any other experiment.

In all experiments, the westward tilt of initial perturbations was reduced after the 48-h nonlinear evolution and forecast perturbations acquire a barotropic structure. This behavior is similar to that pointed out by Randel and Stanford (1985) for the life cycle of medium-scale waves in midlatitudes in the Southern Hemisphere summer: baroclinic growth in the initial stages and barotropic decay, with loss of energy to the zonal mean flow. These results are also similar to those found by Hoskins et al. (2000) and Coutinho et al. (2004) for the growth of ECMWF extratropical singular vectors.

b. Performance of the ensemble experiments based on statistical scores

The performance of the control forecast was compared to the performance of experiment OPER to assess the advantages that operational CPTEC-EPS forecasts have relative to control forecasts in a deterministic sense. Aiming to investigate the impact of modifications in the initial perturbation procedure of each experiment upon the performance of CPTEC-EPS, we analyze the results according to two main sets of configurations of the procedure for the generation of the perturbed initial conditions. Investigated first are the impact of including perturbations to surface pressure and specific humidity fields, and the extension of EOF-based perturbations to the extratropics. After that, the impact of computing regional perturbations over South America is assessed. For brevity, over the tropics only results of U850 will be presented, since V850 shows rather similar results and analogous conclusions are obtained for both.

1) CONTROL VS. ENSEMBLE MEAN FORECASTS

For a crude idea of benefits that EPS adds to the performance of CPTEC forecasts, pattern anomaly correlation and root mean square error of the control forecast (CF) were computed and presented as solid-thin-black lines in Figs. 6 and 7. In Fig. 6, the error bars for a confidence level of 90 % of experiment OPER are shown for each lead time. The error bars of other experiments are similar to those of OPER so they were omitted.

The PAC values indicate that the ensemble mean (EM) is better than CF, except only for the two first lead times over NH and SH, and for the first four lead times over SA. Over SA, for the 7-day forecasts, PAC values are 0.572 and 0.561 for EM and CF, respectively. It is also observed that in the sample used it is not possible discriminate between the pattern anomaly correlation of these two forecasts with a 90 % confidence level. When rmse is considered, it is evident that the ensemble mean (EM) outperforms the control forecast in all regions and at all lead times, with the most significant improvements observed for U850 over tropics. For lead time 10 over the TR, indices are 4.48 and 5.21 for EM and CF, respectively, which represents an improvement of almost 14 %.

The results obtained here are consistent with those presented in Buizza et al. (2005) for May-Jun-Jul 2002 over the NH for the ECMWF, MSC and NCEP operational ensembles and those presented in Toth and Kalnay (1997) for 6 May-14 Jun 1992 over the NH, SH and tropics for the NCEP operational ensemble. It is important to emphasize that the two works cited are used as just a rough reference because they use different periods and different ensemble sizes.

2) IMPACT OF COMPUTING ADDITIONAL EOF-BASED PERTURBATIONS FOR THE EXTRATROPICS AND FOR SURFACE PRESSURE AND SPECIFIC HUMIDITY FIELDS

In this subsection, the impact on the CPTEC-EPS of computing additional EOF-based perturbations for the extratropics and for surface pressure and specific humidity fields is discussed. These modifications were considered individually or combined in experiments OPER, TROP, EXT1 and EXT2.

Three statistical scores (PAC, rmse, and spread) for these experiments are shown for all evaluated regions in Figs. 6 and 7. The results of all experiments are analyzed and compared with each other.

Assessing the quality of ensemble mean and ensemble spread, we notice that maintaining the operational perturbation region and including perturbations to P and Q fields (experiment TROP) yields ensemble forecasts that perform better than the operational version, mainly over NH. For this region at lead time 8, the anomaly correlation values are 0.550 for OPER against 0.560 for TROP, and the corresponding rmse (spread) values are 104.95 (33.62) for OPER and 103.75 (34.48) for TROP. Over other regions, the results show a slight tendency for TROP to be better than OPER but this is not true for all lead times; for example, over SA at lead time 7 the spread of TROP (12.94) is smaller than OPER (13.04). The results of PAC are not significant when compared to the 90 % confidence level error bars.

Perturbations to P and Q fields improve the probabilistic forecasts of EPS. The BSS index is presented in Fig. 8. It is observed that BSS is especially increased for the tropics and SA regions, mainly for lead times beyond 2. The components of the BSS are shown in Tables 3 to 6. For the four evaluated experiments, the best indices are highlighted in boldface. When indices are similar for more than one experiment, all of them are highlighted. In general, RES is greater and REL is smaller for TROP. Over SA at lead time 7, REL (RES) are 5.648 (3.481) for OPER and 3.837 (5.351) for TROP, which indicates an improvement for probabilistic forecasts.

PECA values indicate that extra initial perturbations to P and Q in experiment TROP do not provide significant diversity to forecast perturbations over the extratropics (NH and SH) and SA, since indices are similar for OPER and TROP (Fig. 9a,b,c). Over the tropics (Fig. 9c), the impact is slightly positive, mainly for lead times longer than 3 days when individual perturbations are considered.

In experiment EXT1 the extension of EOF-based perturbations to the extratropics is tested. The application of these extra perturbations has a positive impact on the NH and SH regions (Figs. 6a,b and 7a,b). The ensemble mean of EXT1 performs better than OPER for all lead times. Over NH, the ensemble spread of EXT1 is almost double that of OPER for lead time 1 (7.35 against 3.97). For U850, over the tropics (Figs. 6c and 7c), PAC and rmse are not much affected, but spread is diminished for lead times beyond 6. Over SA (Figs. 6d and 7d), the ensemble spread is increased, but in terms of PAC and rmse the EXT1 ensemble mean performs better mainly for lead times beyond 6.

In terms of probabilistic forecasts, greater positive effects are observed again over NH and SH (Fig. 8a,b and Tables 3 and 4). The impact on TR is approximately neutral

according to BSS. Probabilistic forecasts are slightly better over SA (Fig. 8d) and it can be seen that the main contribution comes from improvements in the forecast reliability (Table 6).

It is evident that perturbations in the extratropics, represented by the dotted lines in Fig. 9, have significant impact on the quality of the forecast perturbations over NH and a slight impact over SH and SA. Over the tropics, impact is slightly negative. This probably is the reason for the adverse results obtained for the quality of ensemble forecasts over TR in EXT1.

Results of EXT1 show that forecasts over extratropical regions are improved when extratropical EOF-based perturbations are computed, which means that more spread and variety are incorporated in the forecasts when these extra perturbations are included in the initial conditions. Moreover, midlatitudes yield the best results. As presented in Fig. 1c, initial EOF perturbations of EXT1 in midlatitudes are concentrated close to regions with higher baroclinicity as measured by the Eady index (Fig. 1f). Since baroclinic instability is the main mechanism responsible for synoptic system development in midlatitudes then this suggests that the EOF-based method is able to capture part of that mechanism of perturbation growth. The computation of unstable modes on a more restricted belt (20N-20S) seems to have eliminated some important characteristics for perturbation growth in the tropics. Eliminating the subtropics from the computation of tropical-EOF perturbations may have inhibited the influence of tropic-extratropic interactions, which should have affected the development of perturbations.

As found in the experiments TROP and EXT1, separate EOF-based perturbations in the extratropics and on P and Q fields have, in general, positive impact on the

performance of CPTEC-EPS mainly over the tropics and midlatitudes, respectively. In experiment EXT2 the impact on the ensemble performance of using a combination of these two modifications in the perturbation method configuration is investigated.

The quality of the ensemble mean and the ensemble spread is enhanced over all verification regions for most of the lead times (Figs 6 and 7). Over NH at lead time 7, the rmse (spread) are 97.79 (26.97) for OPER and 93.46 (40.00) for EXT2. It is clear that the most significant impact is on ensemble spread, which increases by a factor of almost 2 in this case.

Improvements in the ensemble spread contribute to produce more balanced probability forecasts, which can be noticed through their effect on the reduction of the probabilistic forecast reliability (REL) (Tables 3 to 6) for almost all lead times. The capacity to discern subsample forecast periods with different relative frequencies of the event was also improved. The RES values in EXT2 are larger than in experiments OPER, TROP and EXT1; for example, at lead time 7 over SH, values are 3.802 for OPER and 4.191 for EXT2. The BSS (Fig. 8) also indicates that better probabilistic forecasts are produced combining additional EOF-based perturbations in the extratropics and on P and Q fields with tropical EOF-based perturbations.

PECA of EXT2 (long dash-dotted lines in Fig. 9) indicates that combining perturbations in the extratropics with perturbations on P and Q fields is able to reproduce the individual improvements that were observed over particular regions when both modifications are applied separately in experiments TROP and EXT1. Thus the combination of those extra initial perturbations seemed to create more diversity in the

initial perturbation patterns, which contributed to the improvement of the variance of the forecast error explained by ensemble perturbations.

The results presented in this subsection are in agreement with results of subsection 3a, i.e., applying perturbations to P and Q and extending those perturbations to the extratropics contributes to the generation of better-suited initial perturbations and consequently improved ensemble forecasts. The results also indicate that the under-dispersion of the system is alleviated, although in spite of this it remains under-dispersive. A rough qualitative comparison of these results with those of Buizza et al. (2005) (they use a different period and a smaller number of members) reveals that, in terms of rmse and spread in midlatitudes, the CPTEC-EPS presents less balance between the growth of rmse and spread, indicating that it is more under-dispersive. It is remembered that they found that the ECMWF, MSC and NCEP-EPSs showed under-dispersion only for lead times beyond 5, 4 and 4 days, respectively. In terms of quality of probabilistic forecasts, BSS of the CPTEC-EPS presented positive values approximately up to the same range that was found by Buizza et al. (2005) over midlatitudes for ECMWF, MSC and NCEP ensembles, around lead time 6 or 7 days.

Wei and Toth (2003) compared the quality of perturbation patterns of the ECMWF and NCEP EPSs using PECA for April 2001. Wei et al. (2006) also used PECA to study the correlation between ensemble perturbations and forecast errors for two methods of producing initial perturbations with NCEP global forecasting system: breeding of growing modes and a version of an ensemble transform Kalman filter. In this case the period used was 15 January-15 February 2003. Over midlatitudes, the PECA values obtained with the EOF method are qualitatively comparable to those shown in Wei

and Toth (2003) and Wei et al. (2006). In general, it is observed that the PECA values increase with increasing lead time. This is related to the convergence of both the perturbation and the error patterns to a small subspace of growing patterns (Wei and Toth, 2003). Over the tropics, the PECA obtained with the EOF method for the three-dimensional variable $p(U,V,T)$ presents a behavior similar to those found by Wei and Toth (2003), though values are closer to those exhibited by the ECMWF-EPS.

3) IMPACT OF REGIONAL PERTURBATIONS COMPUTED OVER SA

The impact of including regional perturbations over the South America region is assessed in this subsection. In experiment ETSA, besides the extension of initial perturbations to the extratropics and the inclusion of perturbations on P and Q fields, two South America sub-regions are considered in order to compute regional perturbations: Northern South America (NSA: 100W-10W; 20S-20N) and Southern South America (SSA: 110W-20W; 60S-20S).

The results of EXT2 are used as a reference for evaluating ETSA, since they were produced from a similar configuration of the initial perturbation method, except with additional regional perturbations over SA in ETSA.

In terms of quality of ensemble mean and ensemble spread, including new regional perturbations does not have significant impact over NH (Figs. 6a and 7a). Over SH (Figs. 6b and 7b) there is a slight positive impact on EM, but not on spread. For U850, over the tropics (Figs. 6c and 7c), PAC, rmse and spread values are approximately the same as in EXT2 for all lead times. The main purpose of this experiment is to attempt

to produce better forecasts over SA. Looking at the indices for SA (Figs. 6d and 7d), it is observed that at many of the lead times, ETSA is more skillful than EXT2. For lead time 7, the rmse (spread) are 53.41 (14.09) for EXT2 against 52.98(14.29) for ETSA.

Consistent with the results obtained for quality of the ensemble mean, probabilistic forecasts are not improved over NH (Fig. 8a and Table 3). In contrast, over SH, BSS and RES increased while REL diminished for almost all lead times (Fig. 8b and Table 4). Probabilistic forecasts over TR are enhanced in relation to OPER, but in relation to EXT2 similar statistical scores were found for U850 (Fig. 8c and Table 5). Over SA, probabilistic forecasts are enhanced by the new regional perturbations (Fig. 8d and Table 6), at lead time 7, REL (RES) are 3.614 (5.323) for EXT2 and 3.355 (5.568) for ETSA.

PECA for ETSA reveals a smaller impact over the extratropics (NH and SH). However, extra perturbations over SA clearly contribute to the improvement of the fraction of forecast error explained by perturbation forecasts over the tropics and SA. Over TR, at lead time 10 for combined perturbations (thick long-dashed line of Fig. 9c), the correlation increases from around 0.46 in EXT2 to around 0.49 in ETSA.

The impact of the regional perturbations of experiment ETSA is more significant over regions TR and SA which suggests that local EOF-based perturbations are able to capture initial uncertainties associated with small scales and can be used to improve the perturbation growth over the target regions.

4. Discussion and conclusions

The effect of using the EOF method to insert extra initial perturbations in the extratropics and to surface pressure and specific humidity fields in the CPTEC/INPE Ensemble Prediction System was addressed in this study. Also, the computation of regional perturbations over South America was studied. Under the perfect-model hypothesis, five experiments were performed by modifying the regions used to compute the initial perturbations and applying perturbations to the P and Q fields. The impact of such changes was assessed analyzing the structure of the EOF-based perturbations and using statistical scores to measure the quality of the forecasts in each experiment over a 2-month period, from 15 December 2004 to 15 February 2005.

Our results showed that extratropical EOF-based perturbations develop preferentially near regions with high baroclinicity in midlatitudes and close to areas of important synoptic systems that act in the tropics-extratropics of the Southern Hemisphere during the austral summer. We also found that additional perturbations on P and Q are important in obtaining perturbations that are spatially more organized and with more baroclinic structures in midlatitudes. This modification also seems to produce perturbations that grow faster than in those cases in which no perturbations are applied to P and Q , during the nonlinear model integration.

Consistent with results above, statistical evaluation indicates that extratropical EOF-based perturbations span a subspace in the phase space representing fast-growing errors, contributing to the enhancement of the ensemble forecast quality in both a deterministic and probabilistic sense and, moreover, including more diversity in the CPTEC-EPS initial perturbations. These extra perturbations have a positive effect on EPS performance, mainly over the extratropics. Perturbations to P and Q fields allow the

inclusion of more diversity in the initial perturbations and produce an improvement of the ensemble forecast quality mainly over the tropics. The combination of these two extra perturbations is able to reproduce the main positive effects that are observed when each one is applied individually, and proved to be a more suitable configuration for the initial perturbation method.

Regional EOF-based perturbations computed separately over northern South America and southern South America in addition to hemispheric perturbations contributed in a general sense to the improvement of local forecasts over the target region.

Overall, the application of the EOF method to perturb midlatitude variables, including surface pressure and specific humidity fields, produced positive impact on the quality of CPTEC-EPS and alleviated the under-dispersion of the system. We suggest that part of this CPTEC-EPS under-dispersion is associated with rapid error growth in the CPTEC-AGCM in the first 24 hours of model integration due to two main reasons: starting the integration with an analysis that is not produced by the same model and the presence of deficiencies in physical parameterizations. Therefore we intend to investigate, in future work, the influence that perturbations in physical processes have on the quality of CPTEC/INPE ensemble forecasts, as has been done operationally at MSC and ECMWF. The use of control analyses created by CPTEC-AGCM itself to generate EOF-perturbed initial conditions will be also investigated. Currently, a data assimilation cycle based on the Physical-space Statistical Analysis System (Cohn et al. 1998) associated with the CPTEC-AGCM is running in a parallel operational suite. The implementation of a local ensemble Kalman filter (Ott et al., 2004) version for data

assimilation and ensemble forecasting is in progress at CPTEC/INPE and should also be evaluated.

The results of this study encourage an operational implementation of additional EOF-based perturbations in the extratropics and on P and Q fields, as well as, regional perturbations over South America at CPTEC-EPS in order to improve the quality of CPTEC/INPE ensemble forecasts.

Acknowledgments.

We thank Dr T. N. Krishnamurti and Dr. Z. Zhang from the Florida State University (FSU - USA) for providing the original computational procedures of the EOF method. We would also like to thank Dr. M. M. Coutinho for her effort in adapting the original procedures of the EOF method for the CPTEC-AGCM and her helpful support during the operational implementation of the CPTEC-EPS. Thanks are also due to Dr. Peter Caplan, for going through the manuscript, and to the anonymous reviewers for the suggestions.

References

- Anderson, J.L., B. Wyman, S. Zhang, and T. Hoar, 2005: Assimilation of surface pressure observations using an ensemble filter in an idealized global atmospheric prediction system. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 2925-2938.
- Barkmeijer, J., R. Buizza, T. N. Palmer, K. Puri, and J-F. Mahfouf, 2001: Tropical singular vectors computed with linearized diabatic physics. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 685-708.
- Bishop, C. H., B. J. Etherton, and S. Majumdar, 2001: Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part I: theoretical aspects. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 420-436.
- Buizza, R., M. J. Miller, and T. N. Palmer, 1999: Stochastic simulation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 2887-2908.
- _____, P. L. Houtekamer, Z. Toth, G. Pellerin, M. Wei, and Y. Zhu, 2005: A comparison of the ECMWF, MSC, and NCEP Global Ensemble Prediction Systems. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 1076-1097.
- Cohn, S. E., A. Silva, J. Guo, M. Sienkiewicz, and D. Lamich, 1998: Assessing the effects of data selection with the DAO Physical-space Statistical Analysis System. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 2913-2926.
- Coutinho, M. M., 1999: Previsão por conjuntos utilizando perturbações baseadas em componentes principais. (Ensemble prediction using principal-component-based

- perturbations). M. S. Dissertation, Brazilian National Institute for Space Research (INPE), S. J. Campos, SP, Brazil, 136 pp.
- _____, B. J. Hoskins, and R. Buizza, 2004: The influence of physical processes on extratropical singular vectors. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 195-209.
- Daley, R., and T. Mayer, 1986: Estimates of global analysis error from the global weather experiment observational network. *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 1642-1653.
- Derber, J., and F. Bouttier, 1999: A reformulation of the background error covariance in the ECMWF Global Data Assimilation System. *Tellus* , **51A**, 195-221.
- Farina, L., A. M. Mendonça, and J. P. Bonatti, 2005: Approximation of ensemble members in ocean wave prediction. *Tellus* , **57A**, 204-216.
- Grimm, A. M., and P. L. S. Dias, 1995: Analysis of Tropical-Extratropical Interactions with Influence Functions of a Barotropic Model. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 3538-3555.
- Hamill, T. M., 2002: Ensemble-based data assimilation. Proceedings, *Seminar on Predictability of Weather and Climate*, Reading, UK, ECMWF, 83-105.
- _____, C. Snyder, and J. S. Whitaker, 2003: Ensemble forecasts and the properties of flow-dependent analysis-error covariance singular vectors. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1741-1758.
- Hoskins, B. J., and J. Karoly, 1981: The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. *J. Atmos. Sci.*, **38**, 1179-1196.
- _____, and P. J. Valdes, 1990: On the existence of storm-tracks. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 1854-1864.

_____, R. Buizza, and J. Badger, 2000: The nature of singular growth and structure. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 1565-1580.

Houtekamer, P. L., L. Lefaivrem, J. Derome, H. Ritchie, and H. L. Mitchell, 1996: A system simulation approach to ensemble prediction. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 1225-1242.

_____, H. L. Mitchell, G. Pellerin, M. Buehner, M. Charron, L. Spacek, and B. Hansen, 2005: Atmospheric data assimilation with an ensemble Kalman filter: results with real observations. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 604-620.

Kalnay, E., M. Corazza, S-C. Yang, B. Hunt, E. Kostelich, E. Ott, D. J. Patil, I. Szunyough, J. Yorke, and A. Zimin, 2002: Data assimilation via local ensemble Kalman filtering. Proceedings, *Seminar on Predictability of Weather and Climate*, Reading, UK, ECMWF, 41-45.

_____, K. C. Mo, and J. Paegle, 1986: Large-amplitude, short-scale stationary Rossby waves in the Southern Hemisphere: observations and mechanistic experiments to determine their origin. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 252-275.

Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S-K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter, 2002: NCEP-DEO AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 1631-1643.

Kinter, J. L., D. DeWitt, P. A. Dirmeyer, M. J. Fennessy, B. P. Kirtman, L. Marx, E. K. Schneider, J. Shukla, and D. M. Straus, 1997: The COLA atmosphere-biosphere

general circulation model Volume 1: Formulation. COLA Report 51, COLA Staff, 49 pp.

Krishnamurti, T. N., C. M. Kishtawal, Z. Zhang, T. LaRow, D. Bachiochi, and E. Williford, 2000: Multimodel ensemble forecasts for weather and seasonal climate. *J. Climate*, **13**, 4196-4216.

Legler, D. M., 1983: Empirical orthogonal function analysis of wind vectors over the tropical pacific region. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **64**, 234-241.

Liebmann, B., and D. L. Hartmann, 1984: An observational study of tropical-midlatitude interaction on intraseasonal time scales during winter. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 3333-3350.

Lorenz, E. N., 1963: Deterministic non-periodic flow. *J. Atmos. Sci.*, **20**, 130-141.

_____, 1965: A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. *Tellus*, **17A**, 321-333.

_____, 1969: The predictability of a flow which possesses many scales of motion. *Tellus*, **21A**, 289-307.

Mendonça, A. M., and J. P. Bonatti, 2006: Experiments with EOF-based perturbation method to ensemble weather forecasting in midlatitudes. Proceedings, *8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*, Foz do Iguaçu, PR, INPE, 1829-1832.

Mo, K. C., and R. W. Higgins, 1998: The Pacific-South American Modes and Tropical Convection during the Southern Hemisphere Winter. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 1581-1596.

- Molteni, F., R. Buizza, T. N. Palmer, and T. Petroligis, 1996: The ECMWF Ensemble Prediction System: Methodology and validation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **122**, 73-119
- Ott, E., B. R. Hunt, I. Szunyogh, A. V. Zimin, E. J. Kostelich, M. Corazza, E. Kalnay, D. J. Patil, and J. A. Yourke, 2004: A local ensemble Kalman filter for atmospheric data assimilation. *Tellus*, **56A**, 415-428.
- Palmer, T. N., 1988: Large-scale tropical, extratropical interactions on time-scales of a few days to a season. *Aust. Met. Mag.*, **36**, 107-125.
- Puri, K., J. Barkmeijer, and T. N. Palmer, 2001: Ensemble prediction of tropical cyclones using targeted diabatic singular vectors. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 709-731.
- Rabier, F., H. Järvinen, E. Klinker, J-F. Mahfouf, and A. Simmons, 2000: The ECMWF operational implementation of four-dimensional variational assimilation. I: experimental results with simplified physics. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 1143-1170.
- Randel, W. J., and J. L. Stanford, 1985: The observed life cycle of a baroclinic instability. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 1364-1373.
- Reynolds, C. A., P. J. Webster, and E. Kalnay, 1994: Random error growth in NMC's global forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 1281-1305.
- Simmons, A. J., 1982: The forcing of stationary wave motion by tropical diabatic heating. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **108**, 503-534.
- Toth, Z., and E. Kalnay, 1993: Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **74**, 2317-2330.

- ____, and ____, 1997: Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 3297-3319.
- Wang, X., and C. H. Bishop, 2003: A comparison of breeding and ensemble transform Kalman filter ensemble forecast schemes. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 1140-1158.
- Wei, M., and Z. Toth, 2003: A new measure of ensemble performance: perturbation versus error correlation analysis (PECA). *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1549-1565.
- ____, Z. Toth, R. Wobus, Y. Zhu, C. H. Bishop, and X. Wang, 2006: Ensemble transform Kalman filter-based ensemble perturbations in an operational global prediction system at NCEP. *Tellus*, **58A**, 28-44.
- Wilks, D. S., 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, 467 pp.
- WMO, 1992: Manual on the global data-processing system. WMO 485, 217 pp.
- Zhang, Z., 1997: Hurricane ensemble prediction using EOF-based perturbations. PhD Dissertation, Florida State University, Florida, USA, 173 pp.
- ____, and T. N. Krishnamurti, 1999: A perturbation method for hurricane ensemble predictions. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 447-469.

List of Figures

Fig. 1. January 2005 initial-time average for 500-hPa geopotential height. Ensemble mean (lines) and standard deviation (shading) for experiments: (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2 and (e) ETSA; Absolute value of Eady index in (f). Contour interval is 5 m for ensemble standard deviations, and 0.2 day^{-1} for Eady index in (f). In (a) and (c), values of ensemble standard deviations are multiplied by 2.

Fig. 2. Overview of the randomly selected initial state for 1200 UTC 20 January 2005 over South Atlantic Ocean: (a) Mean sea level pressure (hPa) and 1000-hPa wind vector (ms^{-1}); (b) 500-hPa geopotential height (m, contours) and Eady index (day^{-1} , shading); (c) 250-hPa geopotential height (m) and wind vector (m s^{-1}). Contour interval is 0.3 day^{-1} for Eady index in (b). The reference for wind magnitude is indicated below the panels (a) and (c).

Fig. 3. 1200 UTC 20 January 2005 initial EOF perturbations of surface pressure and wind vector obtained from the difference time series between the control forecast and the random forecast started from the first randomly perturbed initial condition ($n=1$, see section 2c), for experiments: (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2 and (e) ETSA. Contour interval is 1 hPa for surface pressure. The reference for wind magnitude is indicated below the panels.

Fig. 4. 1200 UTC 20 January 2005 longitude-pressure cross-sections of EOF perturbations at 44S for meridional wind at initial time, obtained from the difference time

series between the control forecast and the random forecast started from the first randomly perturbed initial condition ($n=1$, see section 2c), for experiments: (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2 and (e) ETSA. Contour interval is 1 m s^{-1} .

Fig. 5. Longitude-pressure cross-sections of 48-h nonlinear evolution for the meridional wind perturbations presented in Fig. 4, but at 45S, obtained as the difference between the 48-h forecasts started from the control initial condition (CIC) and the perturbed initial condition in which the EOF-based perturbations presented in Figs. 3-4 were added to the CIC. The time of control initial condition is 1200 UTC 20 January 2005. For experiments: (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2 and (e) ETSA.

Fig. 6. 15 December 2004 – 15 February 2005 average pattern anomaly correlation (PAC) for the deterministic (DET, solid black lines) and the ensemble mean forecasts for experiments OPER (solid grey lines), TROP (short dashed lines), EXT1 (dotted lines), EXT2 (long dash dotted lines) and ETSA (long dashed lines). Values refer to the 500-hPa geopotential height over regions: (a) Northern Hemisphere, (b) Southern Hemisphere and (d) South America; and for 850-hPa zonal wind component over Tropics in (c). Vertical bars indicate the statistical errors for a confidence level of 90 %, for experiment OPER.

Fig. 7. 15 December 2004 – 15 February 2005 average root mean square error (rmse) of the ensemble mean forecasts (thick lines) and ensemble standard deviation (thin lines) for experiments OPER (solid lines), TROP (short dashed lines), EXT1 (dotted lines), EXT2 (long dash-dotted lines) and ETSA (long dashed lines). The solid-thin-black lines represent the average rmse of the deterministic forecasts (DET). Values refer to the 500-

hPa geopotential height over the regions: (a) Northern Hemisphere, (b) Southern Hemisphere and (d) South America; and for 850-hPa zonal wind component over Tropics in (c).

Fig. 8. 15 December 2004 – 15 February 2005 average Brier skill score for experiments OPER, TROP, EXT1, EXT2 and ETSA. Values have been computed considering the probability intervals according to the number of ensemble members and refer to the 500-hPa geopotential height over the regions: (a) Northern Hemisphere, (b) Southern Hemisphere and (d) South America; and for 850-hPa zonal wind component over Tropics in (c).

Fig. 9. 15 December 2004 – 15 February 2005 average correlation between control forecast error and ensemble perturbations for experiments OPER, TROP, EXT1, EXT2, and ETSA. Thin lines represent values averaged over 14 individual ensemble perturbations (sin) while thick lines represent values for an optimal combination of the individual perturbations (opt). Values refer to the 500-hPa geopotential height over the regions: (a) Northern Hemisphere, (b) Southern Hemisphere and (d) South America; and for multivariate three-dimensional field (U, V, T) at 850, 500 and 250-hPa, over Tropics in (c).

TABLE 1. Standard deviation values used to rescale the specific humidity perturbations, for each sigma level (σ) of CPTEC-AGCM. The values are multiplied by a factor of 10^3 .

σ	<i>std</i>	σ	<i>std</i>	σ	<i>std</i>	σ	<i>std</i>
1	0.77	8	0.98	15	0.90	22	0.00
2	0.78	9	1.14	16	0.75	23	0.00
3	0.78	10	1.27	17	0.49	24	0.00
4	0.78	11	1.37	18	0.26	25	0.00
5	0.80	12	1.35	19	0.12	26	0.00
6	0.82	13	1.18	20	0.05	27	0.00
7	0.88	14	1.05	21	0.02	28	0.00

TABLE 2. List of experiments and the respective perturbed regions and perturbed fields used in each experiment.

<i>Experiment</i>	<i>Regions used to compute perturbations</i>	<i>Perturbed fields</i>
OPER	ETR	T,U,V
EXT1	NH,SH,TR	T,U,V
TROP	ETR	P,T,Q,U,V
EXT2	NH,SH,TR	P,T,Q,U,V
ETSA	NH,SH,TR,NSA,SSA	P,T,Q,U,V

TABLE 3. Average reliability (REL) and resolution (RES, values in brackets) contributions to Brier Skill Score for all experiments (columns) and for all forecast lead time (rows). Values have been computed considering the probability intervals according to the number of ensemble members. Values refer to 500-hPa geopotential height field over Northern Hemisphere. For each lead time, bold identifies the best value among experiments OPER, TROP, EXT1 and EXT2. Underline identifies the best result between experiments EXT2 and ETSA. Values are multiplied by a factor of 10^2 .

Forecast Lead		Experiments				
Time (days)	OPER	TROP	EXT1	EXT2	ETSA	
1	0.449 (16.834)	0.399 (16.995)	0.280 (17.940)	0.151 (18.491)	0.164 (18.353)	
2	1.254 (13.240)	0.997 (14.378)	0.843 (14.595)	0.544 (15.790)	<u>0.537 (15.805)</u>	
3	2.055 (10.716)	1.760 (11.573)	1.255 (12.455)	0.951 (13.165)	0.974 (13.019)	
4	3.140 (8.252)	2.741 (8.970)	1.846 (10.029)	1.494 (10.330)	<u>1.489 (10.353)</u>	
5	4.422 (5.961)	4.284 (6.013)	2.599 (7.411)	2.204 (7.536)	2.213 (7.533)	
6	5.399 (4.310)	5.234 (4.413)	2.824 (6.094)	2.226 (6.458)	2.259 (6.409)	
7	4.855 (3.849)	4.620 (3.990)	2.810 (4.902)	2.348 (5.021)	2.384 (4.986)	
8	4.421 (3.499)	4.162 (3.589)	2.888 (3.974)	2.570 (3.917)	2.593 (3.883)	
9	4.226 (2.918)	4.185 (2.856)	2.866 (3.240)	2.614 (3.120)	2.617 (3.116)	
10	4.000 (2.374)	3.999 (2.324)	2.702 (2.705)	2.486 (2.583)	2.493 (2.577)	

TABLE 4. Average reliability (REL) and resolution (RES, values in brackets) contributions to Brier Skill Score for all experiments (columns) and for all forecast lead time (rows). Values have been computed considering the probability intervals according to the number of ensemble members. Values refer to 500-hPa geopotential height field over Southern Hemisphere. For each lead time, bold identifies the best value among experiments OPER, TROP, EXT1 and EXT2. Underline identifies the best result between experiments EXT2 and ETSA. Values are multiplied by a factor of 10^2 .

Forecast Lead		Experiments				
Time (days)	OPER	TROP	EXT1	EXT2	ETSA	
1	0.278 (18.934)	0.322 (19.100)	0.257 (19.080)	0.186 (19.410)	0.246 (19.223)	
2	0.692 (15.534)	0.558 (16.280)	0.673 (15.834)	0.427 (16.734)	<u>0.417 (16.825)</u>	
3	1.487 (11.941)	1.206 (12.905)	1.417 (12.392)	0.975 (13.333)	<u>0.938 (13.476)</u>	
4	2.479 (8.654)	2.179 (9.318)	2.424 (8.780)	1.810 (9.729)	<u>1.720 (10.056)</u>	
5	3.233 (6.361)	2.954 (6.900)	3.005 (6.628)	2.529 (7.180)	<u>2.522 (7.305)</u>	
6	3.707 (4.841)	3.509 (5.265)	3.553 (4.903)	2.987 (5.495)	<u>2.911 (5.724)</u>	
7	3.859 (3.802)	3.789 (4.075)	3.697 (3.847)	3.374 (4.191)	<u>3.317 (4.329)</u>	
8	4.050 (2.931)	4.071 (3.031)	3.927 (2.955)	3.636 (3.149)	<u>3.359 (3.439)</u>	
9	4.617 (1.977)	4.443 (2.134)	4.467 (2.008)	4.027 (2.185)	<u>3.688 (2.476)</u>	
10	5.192 (1.208)	5.204 (1.275)	4.929 (1.211)	4.756 (1.305)	<u>4.302 (1.568)</u>	

TABLE 5. Average reliability (REL) and resolution (RES, values in brackets) contributions to Brier Skill Score for all experiments (columns) and for all forecast lead time (rows). Values have been computed considering the probability intervals according to the number of ensemble members. Values refer to 850-hPa zonal wind field over Tropics. For each lead time, bold identifies the best value among experiments OPER, TROP, EXT1 and EXT2. Underline identifies the best result between experiments EXT2 and ETSA. Values are multiplied by a factor of 10^2 .

Forecast Lead Time (days)	Experiments				
	OPER	TROP	EXT1	EXT2	ETSA
1	1.062 (3.968)	0.909 (4.008)	1.006 (4.088)	0.837 (4.173)	0.843 (4.165)
2	1.879 (2.532)	1.274 (2.711)	1.928 (2.598)	1.328 (2.804)	1.330 (2.801)
3	2.858 (1.632)	2.438 (1.653)	2.861 (1.633)	2.326 (1.680)	<u>2.324 (1.682)</u>
4	4.017 (1.046)	3.451 (1.057)	3.992 (1.062)	3.291 (1.096)	<u>3.290 (1.098)</u>
5	4.684 (0.687)	4.161 (0.664)	4.694 (0.688)	3.992 (0.676)	<u>3.991 (0.678)</u>
6	5.165 (0.417)	4.526 (0.403)	5.081 (0.421)	4.102 (0.440)	4.108 (0.431)
7	5.701 (0.235)	4.828 (0.220)	5.486 (0.226)	4.518 (0.238)	4.526 (0.235)
8	5.771 (0.161)	5.026 (0.142)	5.539 (0.144)	4.707 (0.163)	<u>4.704 (0.160)</u>
9	5.800 (0.108)	5.007 (0.089)	5.498 (0.120)	4.692 (0.110)	<u>4.681 (0.119)</u>
10	5.697 (0.109)	5.120 (0.063)	5.277 (0.101)	4.629 (0.109)	<u>4.623 (0.104)</u>

TABLE 6. Average reliability (REL) and resolution (RES, values in brackets) contributions to Brier Skill Score for all experiments (columns) and for all forecast lead time (rows). Values have been computed considering the probability intervals according to the number of ensemble members. Values refer to 500-hPa geopotential height field over South America. For each lead time, bold identifies the best value among experiments OPER, TROP, EXT1 and EXT2. Underline identifies the best result between experiments EXT2 and ETSA. Values are multiplied by a factor of 10^2 .

Forecast Lead		Experiments				
Time (days)	OPER	TROP	EXT1	EXT2	ETSA	
1	0.043 (20.129)	0.107 (20.057)	0.041 (20.150)	0.109 (20.092)	0.365 (19.727)	
2	0.580 (17.446)	0.307 (18.488)	0.544 (17.520)	0.266 (18.551)	<u>0.130 (18.843)</u>	
3	1.466 (13.023)	0.920 (15.195)	1.467 (13.117)	0.783 (15.489)	<u>0.650 (16.121)</u>	
4	1.844 (11.522)	1.157 (13.835)	1.808 (11.634)	0.988 (14.239)	<u>0.803 (14.667)</u>	
5	2.180 (9.741)	1.529 (12.253)	2.189 (9.800)	1.342 (12.456)	<u>1.168 (12.619)</u>	
6	3.608 (6.029)	2.501 (8.115)	3.562 (5.854)	2.228 (8.216)	<u>2.086 (8.437)</u>	
7	5.648 (3.481)	3.837 (5.351)	5.865 (3.354)	3.614 (5.323)	<u>3.355 (5.568)</u>	
8	5.183 (3.416)	3.779 (5.408)	4.947 (3.312)	3.459 (5.344)	<u>3.379 (5.571)</u>	
9	4.606 (3.122)	3.986 (4.489)	4.512 (3.061)	3.612 (4.363)	<u>3.261 (4.867)</u>	
10	6.628 (1.178)	5.698 (1.940)	6.413 (1.144)	5.157 (2.090)	<u>4.321 (2.795)</u>	

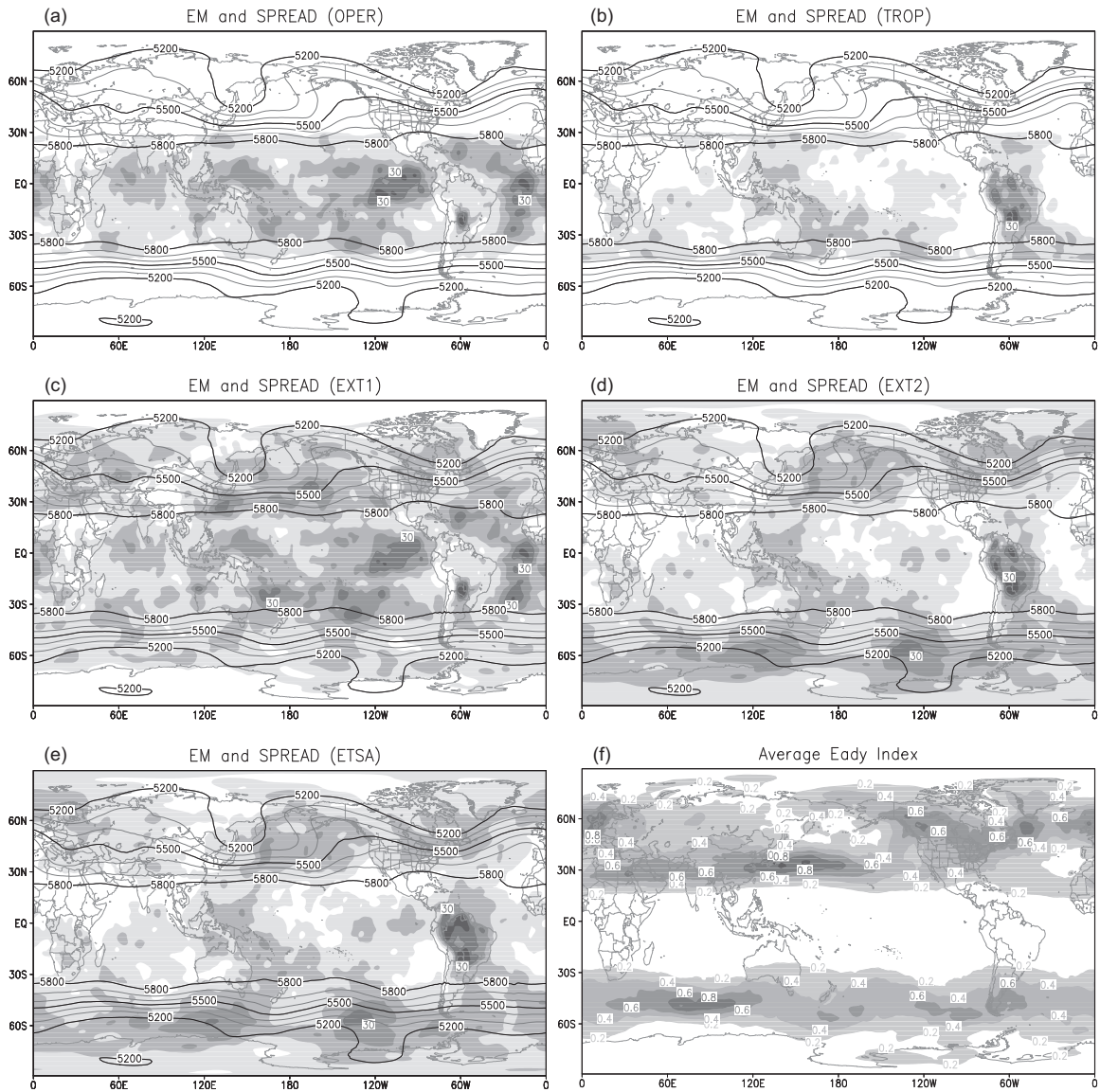


Fig. 1. January 2005 initial-time average for 500-hPa geopotential height. Ensemble mean (lines) and standard deviation (shading) for experiments: (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2 and (e) ETSA; Absolute value of Eady index in (f). Contour interval is 5 m for ensemble standard deviations, and 0.2 day^{-1} for Eady index in (f). In (a) and (c), values of ensemble standard deviations are multiplied by 2.

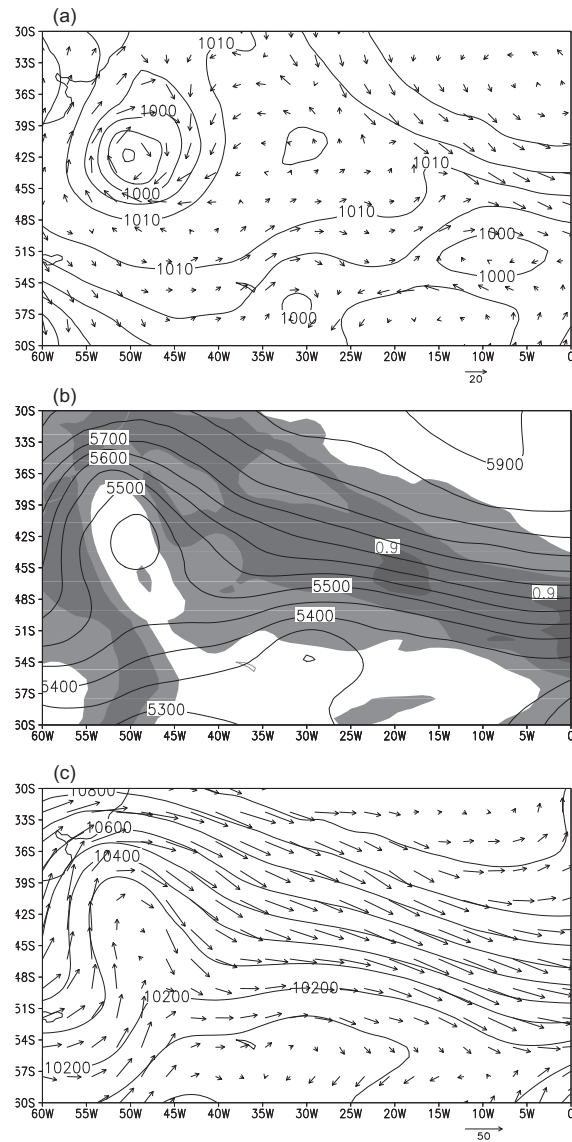


Fig. 2. Overview of the randomly selected initial state for 1200 UTC 20 January 2005 over South Atlantic Ocean: (a) Mean sea level pressure (hPa) and 1000-hPa wind vector (m s^{-1}); (b) 500-hPa geopotential height (m, contours) and Eady index (day^{-1} , shading); (c) 250-hPa geopotential height (m) and wind vector (m s^{-1}). Contour interval is 0.3 day^{-1} for Eady index in (b). The reference for wind magnitude is indicated below the panels (a) and (c).

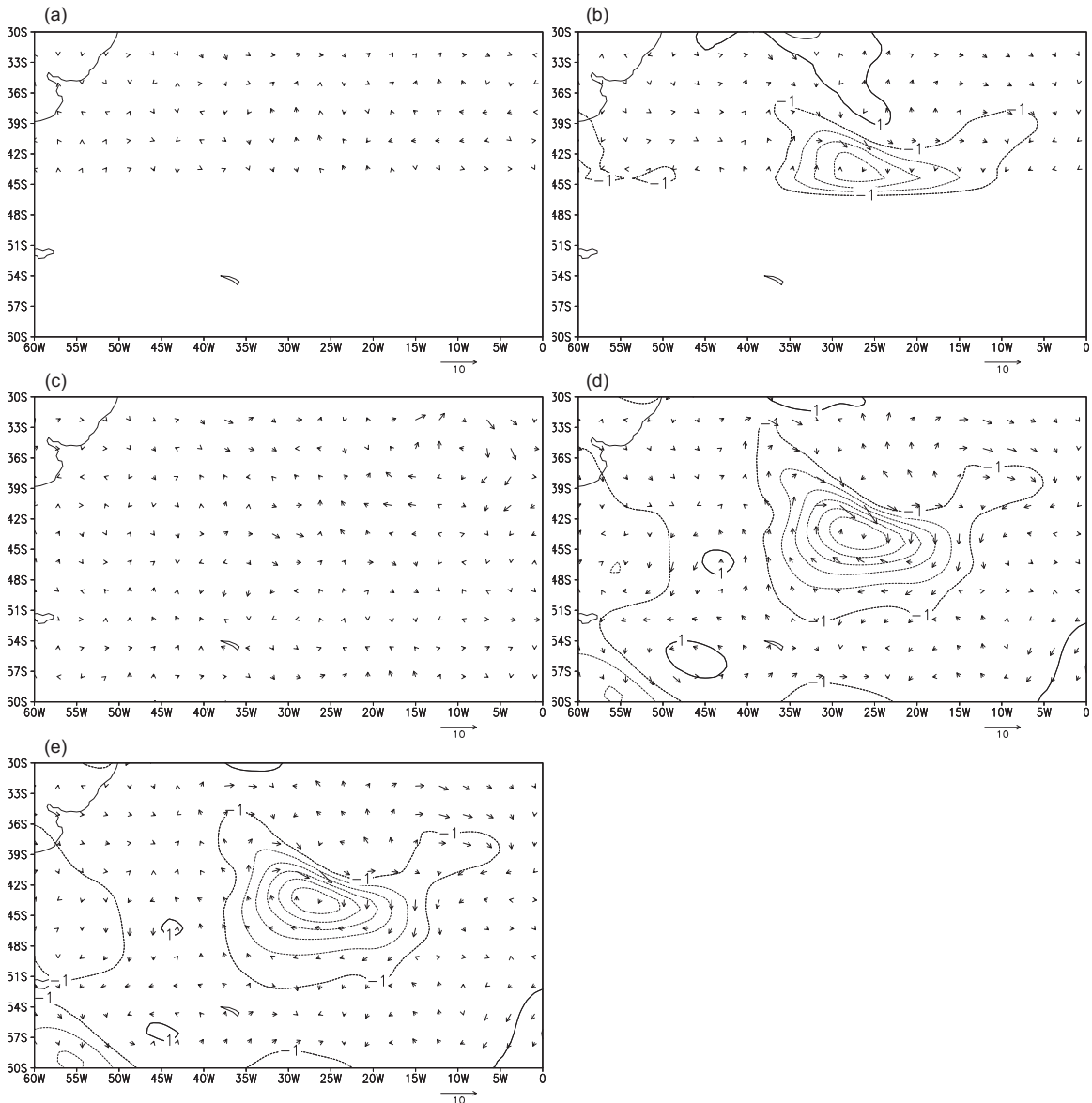


Fig. 3. 1200 UTC 20 January 2005 initial EOF perturbations of surface pressure and wind vector obtained from the difference time series between the control forecast and the random forecast started from the first randomly perturbed initial condition ($n=1$, see section 2c), for experiments: (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2 and (e) ETSA. Contour interval is 1 hPa for surface pressure. The reference for wind magnitude is indicated below the panels.

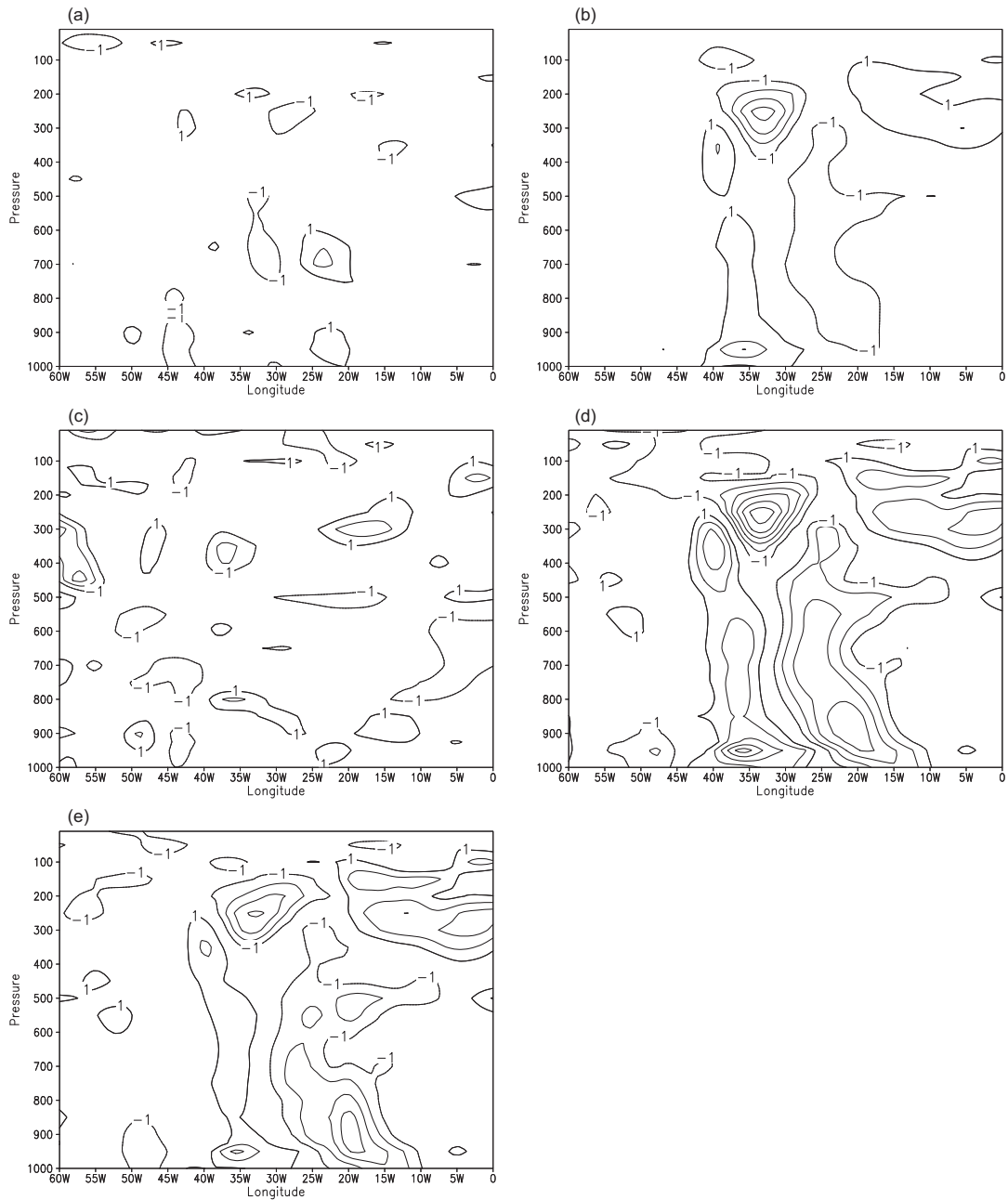


Fig. 4. 1200 UTC 20 January 2005 longitude-pressure cross-sections of EOF perturbations at 44S for meridional wind at initial time, obtained from the difference time series between the control forecast and the random forecast started from the first randomly perturbed initial condition ($n=1$, see section 2c), for experiments: (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2 and (e) ETSA. Contour interval is 1 m s^{-1} .

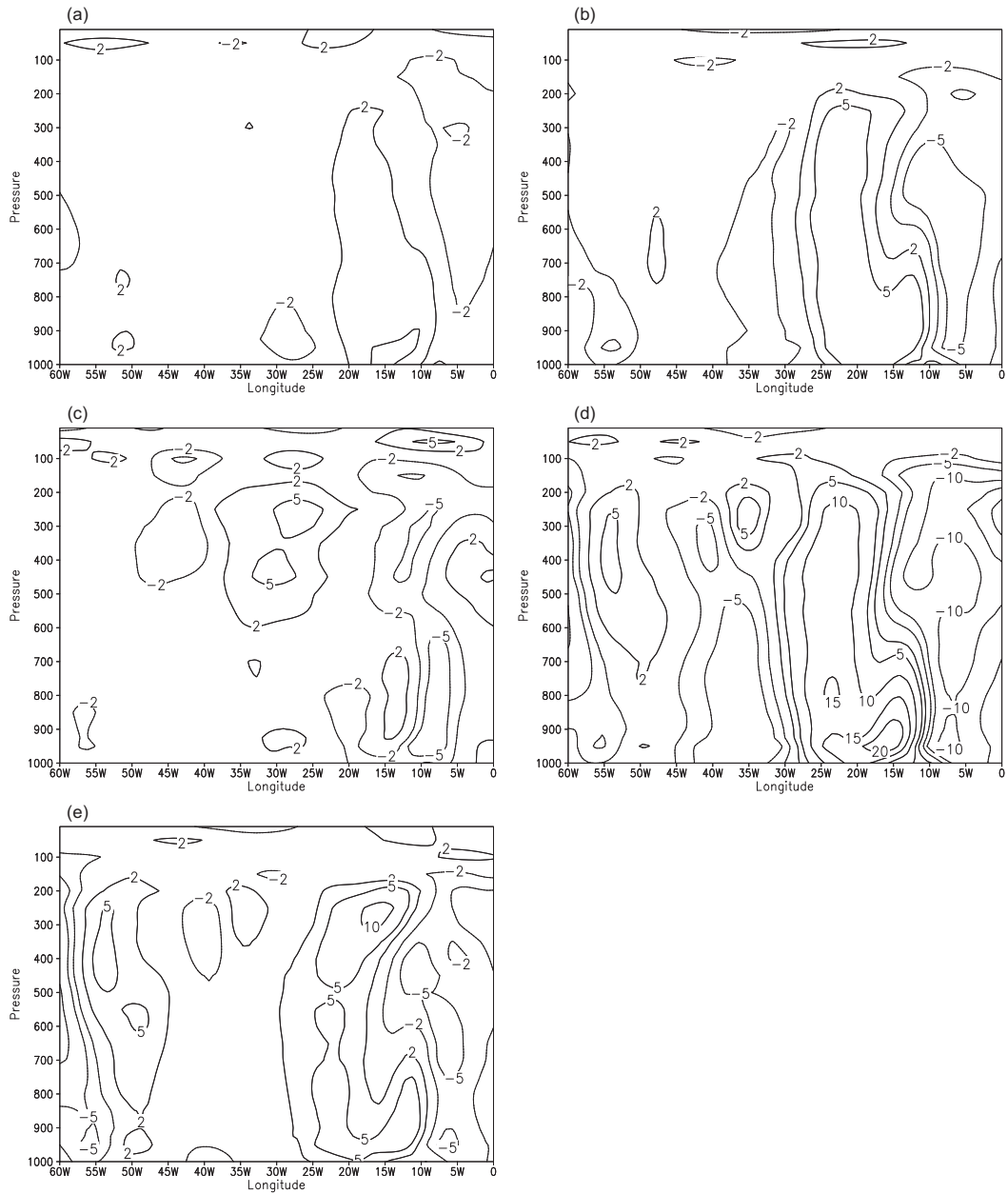


Fig. 5. Longitude-pressure cross-sections of 48-h nonlinear evolution of the meridional wind perturbations presented in Fig. 4, but at 45S, obtained as the difference between the 48-h forecasts started from the control initial condition (CIC) and the perturbed initial condition in which the EOF-based perturbations presented in Figs. 3-4 were added to the CIC. The time of control initial condition is 1200 UTC 20 January 2005. For experiments: (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2 and (e) ETSA.

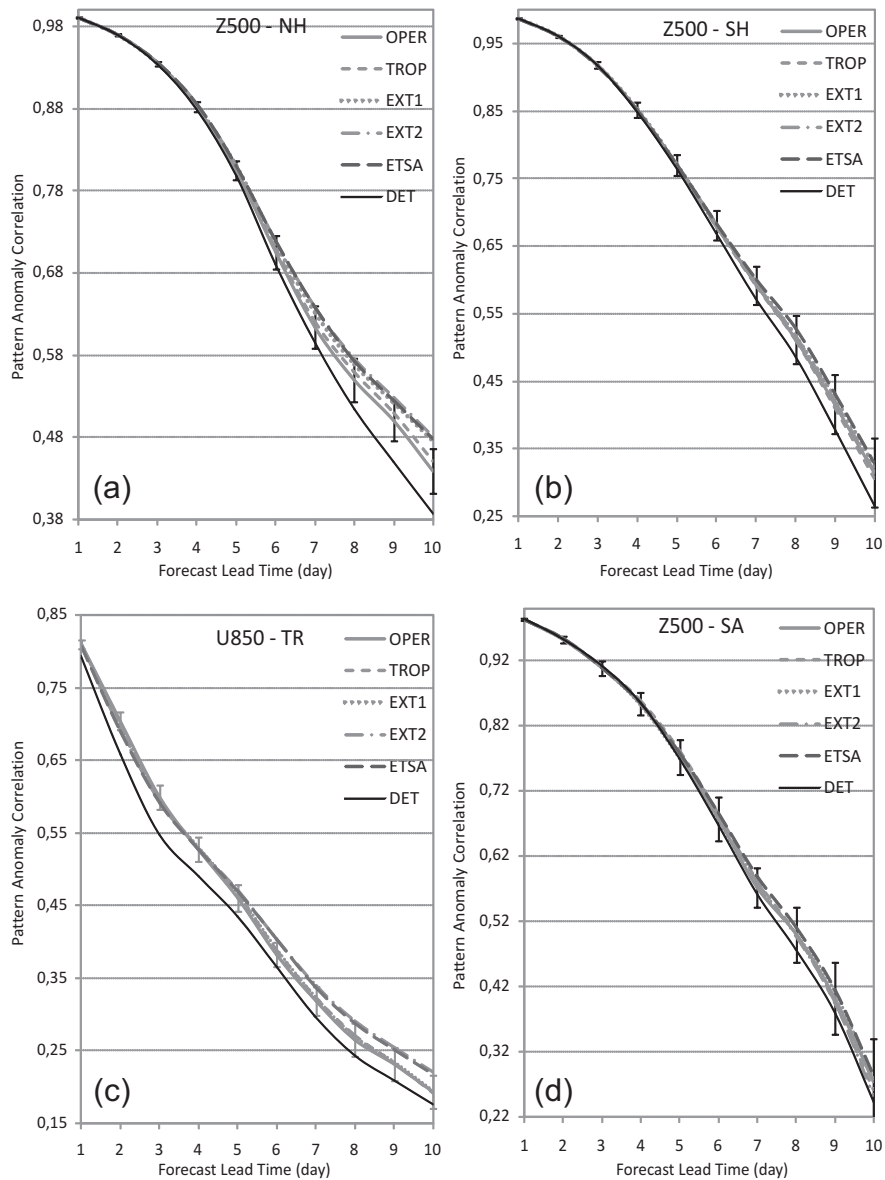


Fig. 6. 15 December 2004 – 15 February 2005 average pattern anomaly correlation (PAC) for the deterministic (DET, solid black lines) and the ensemble mean forecasts for experiments OPER (solid grey lines), TROP (short dashed lines), EXT1 (dotted lines), EXT2 (long dash dotted lines) and ETSA (long dashed lines). Values refer to the 500-hPa geopotential height over regions: (a) Northern Hemisphere, (b) Southern Hemisphere and (d) South America; and for 850-hPa zonal wind component over Tropics in (c). Vertical bars indicate the statistical errors for a confidence level of 90 %, for experiment OPER.

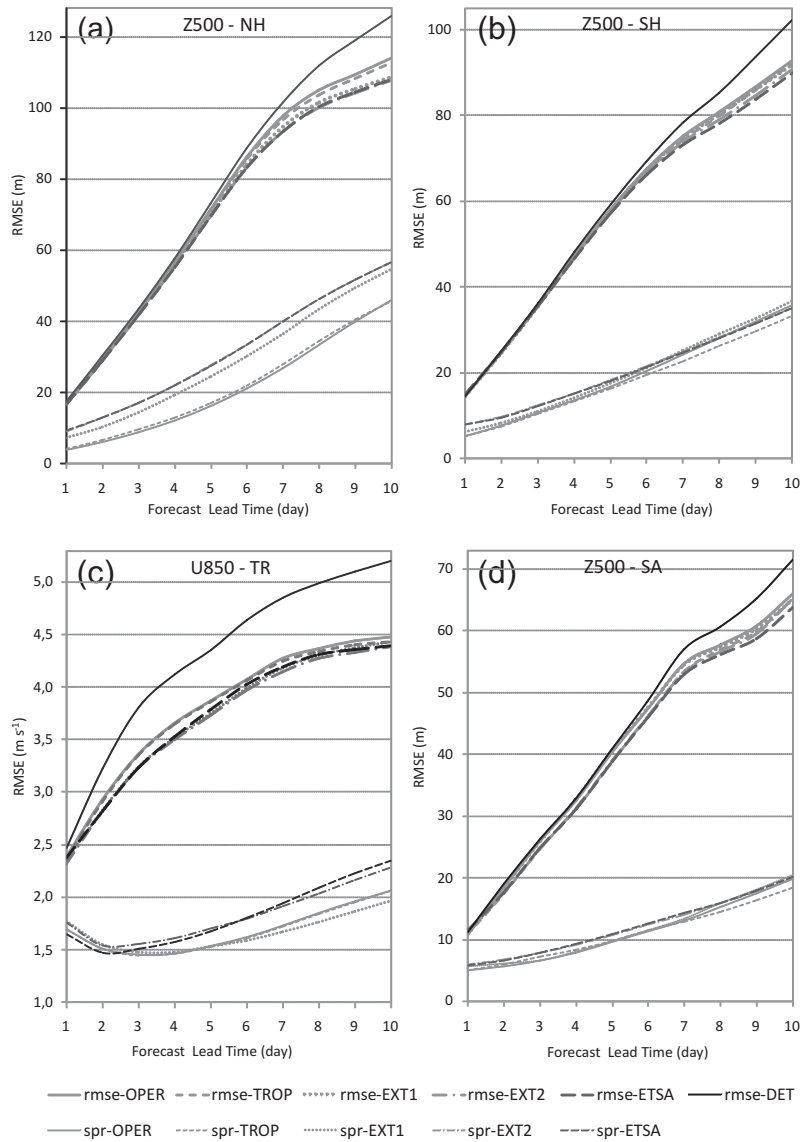


Fig. 7. 15 December 2004 – 15 February 2005 average root mean square error (rmse) of the ensemble mean forecasts (thick lines) and ensemble standard deviation (thin lines) for experiments OPER (solid lines), TROP (short dashed lines), EXT1 (dotted lines), EXT2 (long dash-dotted lines) and ETSA (long dashed lines). The solid-thin-black lines represent the average rmse of the deterministic forecasts (DET). Values refer to the 500-hPa geopotential height over the regions: (a) Northern Hemisphere, (b) Southern Hemisphere and (d) South America; and for 850-hPa zonal wind component over Tropics in (c).

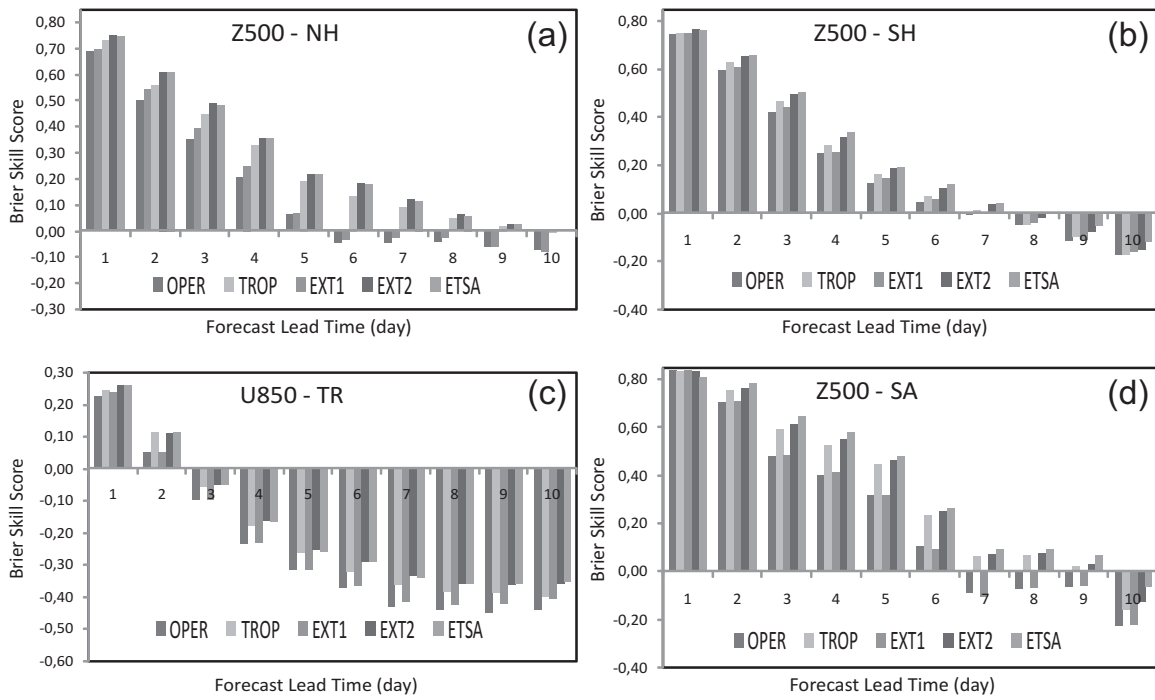


Fig. 8. 15 December 2004 – 15 February 2005 average Brier skill score for experiments OPER, TROP, EXT1, EXT2 and ETSA. Values have been computed considering the probability intervals according to the number of ensemble members and refer to the 500-hPa geopotential height over the regions: (a) Northern Hemisphere, (b) Southern Hemisphere and (d) South America; and for 850-hPa zonal wind component over Tropics in (c).

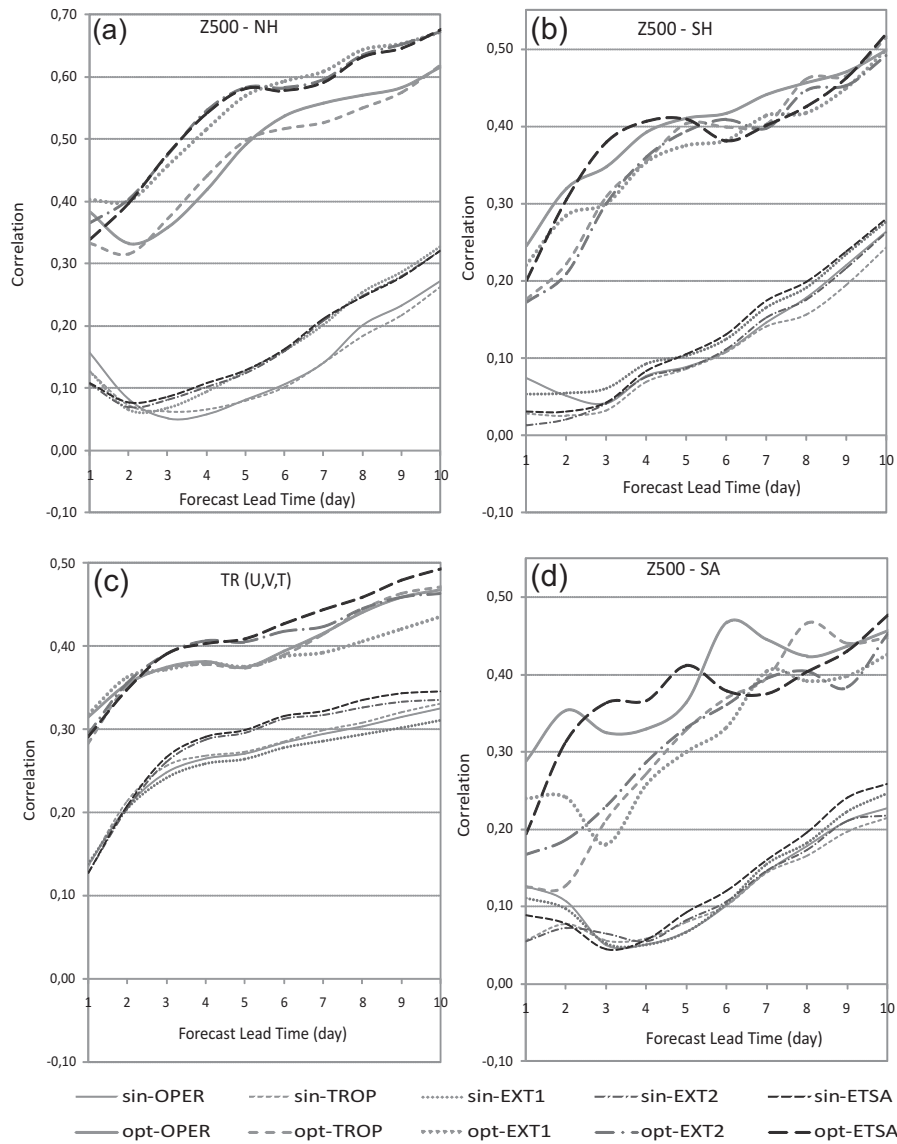


Fig. 9. 15 December 2004 – 15 February 2005 average correlation between control forecast error and ensemble perturbations for experiments OPER, TROP, EXT1, EXT2, and ETSA. Thin lines represent values averaged over 14 individual ensemble perturbations (sin) while thick lines represent values for an optimal combination of the individual perturbations (opt). Values refer to the 500-hPa geopotential height over the regions: (a) Northern Hemisphere, (b) Southern Hemisphere and (d) South America; and for multivariate three-dimensional field (U, V, T) at 850, 500 and 250-hPa, over Tropics in (c).

ANEXO B – Artigo submetido para o periódico Atmospheric Science Letters, sob revisão.

Full article title: Improving the CPTEC ensemble forecasting for the hurricane Catarina using extra EOF initial perturbations

Short title: Improving the CPTEC ensemble forecasting for the hurricane Catarina

Antônio Marcos Mendonça* , José Paulo Bonatti
Center for Weather Prediction and Climate Studies (CPTEC), National Institute for Space Research (INPE), Cachoeira Paulista, São Paulo, Brazil

Keywords: ensemble weather forecasting, tropical cyclone, hurricane Catarina

* Corresponding author address:
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
Rod. Presidente Dutra, Km 40
CPTEC/INPE
Cachoeira Paulista - SP
CEP: 12630-000
Brazil
E-mail: mendonca@cptec.inpe.br
Tel.: +55 12 3186-8531
Fax: +55 12 3101-2835

Abstract

Hurricane Catarina, occurred in March 2004, represented the first confirmed hurricane over South Atlantic Ocean. Typically, Brazilian operational forecasts at time of Catarina failed in predicting its development. In this paper we show that the method for producing perturbed initial conditions based on empirical orthogonal functions (EOF method) could be used to perturb the extratropics and to compute perturbations for a target area over South America in order to improve the performance of the ensemble prediction system of the Center for Weather Prediction and Climate Studies (CPTEC) for predicting the intensity and the trajectory of the hurricane Catarina.

1. Introduction

Hurricane Catarina developed over an area where it is not common to observe such intense tropical systems. It initiated over the South Atlantic Ocean near the Brazilian coast around 20 March 2004 as an extratropical cyclone. It started moving toward the continent after a tropical transition two days later its origin, making landfall around 28 March (Pezza and Simmonds, 2005). Climatologically, the region where Catarina formed presents high wind shear and relatively cold sea surface temperature which are not ideal conditions for tropical cyclone developments (McTaggart-Cowan et al., 2006). In general, numerical predictions of Catarina's evolution produced by the Brazilian meteorological operational centers underestimated its intensity and indicated conflicting information concerning the trajectory (Silva Dias et al., 2004). Particularly, the weather forecasts based on the ensemble prediction system (EPS) of the Center for Weather Prediction and Climate Studies (CPTEC) which was operational in that period did not present satisfactory performance in simulating the system.

The EPS-CPTEC at the time of Catarina's occurrence was a perfect model approach with perturbation on initial conditions applied to temperature and wind fields on a latitude belt 45°S-30°N (Mendonça and Bonatti, 2006). The initial perturbations were computed using the Empirical Orthogonal Function method (EOF method) developed by Zhang and Krishnamurti (1999) (hereinafter ZK1999). ZK1999 demonstrated that the EOF method produces suitable perturbations for hurricane predictions when the hurricane's initial position is perturbed and the EOF initial perturbations are computed in the vicinity of the tropical system. Coutinho (1999) adapted the EOF method to the CPTEC Atmospheric General Circulation Model (CPTEC-AGCM) in order to produce ensemble predictions mainly over South America. For this purpose, perturbations were applied for temperature and wind analysis fields over a broad area 45°S-30°N, since the restriction of the perturbation for a more limited area had affected the perturbation growth in regions relevant to the development of the synoptic systems.

Accurate forecasts of intensity and trajectory of a severe system like the hurricane Catarina may represent a lesser amount of loss of human lives and a reduction of damages caused by the associated strong winds and heavy rain. We suppose that the EOF perturbations could represent better the uncertainty associated to the Catarina event if the method would be adjusted to incorporate new elements in the perturbed initial conditions such as perturbations on surface pressure (P) and specific humidity (Q) fields, extratropical perturbations and the computation of initial perturbations on a target area in the vicinity of the system. The influence that these new elements have on the CPTEC-EPS is investigated by analyzing how the trajectory and the cyclone central pressure are simulated when these new elements are incorporated individually or combined in the CPTEC-EPS perturbed initial perturbations.

Descriptions of initial conditions, CPTEC-AGCM, EOF method and detail of the experiments performed in this study are described in section 2. A synoptic view of Hurricane Catarina and the results are discussed in section 3. In section 4 the conclusions are presented.

2. Data and methodology

2.1. Initial conditions and CPTEC atmospheric general circulation model

The initial conditions (control analyses) used in this study are the spectral analyses generated by the National Center for Environmental Prediction (NCEP) and

kindly provided for the CPTEC producing operational ensemble weather forecasts. The current resolution used for ensemble forecasts are approximately 0.975° longitude x latitude in grid space and 28 sigma layers in the vertical. The 0000 UTC and 1200 UTC analyses of the period surrounding Hurricane Catarina (20 March 2004 through 28 March 2004) are considered for CPTEC-EPS simulations and forecast evaluations.

The model used in this study is the CPTEC-AGCM at the same resolution as the analyses. Briefly, the CPTEC-AGCM is based on the spectral solution of the primitive dynamic equations in the form of divergence and vorticity, virtual temperature, specific humidity and logarithm of the surface pressure, and includes sub-grid processes through physical parameterizations. Details of the model can be obtained in Kinter et al. (1997).

2.2. The operational CPTEC-EPS

The procedure employed to generate the perturbed atmospheric initial conditions is based on the method developed by ZK1999, originally proposed for hurricane forecasting using the Florida State University (FSU) AGCM. This method, called *EOF-based perturbation*, was developed in view of the fact that during the first few days of model integration, perturbations grow linearly. The procedure for producing perturbed analyses is outlined in the following steps:

- a) n random small perturbations are added to the control analysis;
- b) the resulting n random perturbed analysis and the control analysis are used to integrate the model for 36 h (optimal interval) saving results every 3 h;
- c) n temporal series of difference field forecasts are constructed by subtracting the control forecast from the perturbed forecasts at each time increment of 3 h;
- d) an EOF analysis of the temporal series is performed on a domain of interest in order to obtain the fastest-growing perturbations (considered as the eigenmodes associated with the largest eigenvalues). These modes are called *optimal perturbations*. More details of the EOF computation can be found in ZK1999;
- e) the *optimal perturbations* are rescaled in order to make their standard deviation of the same order as the initial perturbations;
- f) adding (subtracting) these rescaled *optimal perturbations* to (from) the control analysis produces an ensemble of $2n$ initial perturbed states.

For each CPTEC-EPS simulation, seven EOF-based perturbations are generated and added (subtracted) to (from) the control analysis, creating a set of fourteen perturbed initial conditions. Each ensemble member represents an integration of the CPTEC-AGCM up to 15 days lead time from a perturbed initial condition or from the control analysis. The result obtained from each EPS simulation is an ensemble of 15 members for each forecast range.

2.3. Experimental design

While the perturbation growth over midlatitudes is mainly caused by dynamic instability (according to linear perturbation theory), in the tropics the perturbations are strongly influenced by physical processes at smaller scales than those resolved by models and exhibit a growth rate much smaller than that over the extratropics (Zhang, 1997; Reynolds et al., 1994). Therefore, it is more reasonable to generate perturbations over extratropics and tropics separately. Special treatment of perturbations over the tropics was inserted at the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) EPS through the computation of tropical singular vectors over target areas (Barkmeijer et al., 2001; Puri et al., 2001). At NCEP, a regional rescaling, based on

analysis uncertainties, contributed to the enhancement of the ensemble mean skill over the tropics and the Southern Hemisphere (Toth and Kalnay, 1997). In those experiments in which EOF-based perturbations are extended to midlatitudes, we consider it is more suitable to calculate the perturbations for the tropics and extratropics separately. In an attempt to obtain better-adjusted EOF-based perturbations for South America, regional perturbations are computed over two almost homogeneous areas with respect to the influence of meteorological systems: a sector with tropical regime, strongly influenced by convective systems (Northern South America: 100W-10W; 20S-20N); and a region influenced by baroclinic systems (Southern South America: 110W-20W, 60S-20S). Overall, six regions are considered in the computation of EOF-based perturbations, depending on the configuration used for each experiment (to be described later):

- Northern Hemisphere (NH): 0-360W; 20N-90N;
- Southern Hemisphere (SH): 0-360W; 20S-90S;
- Tropics (TR): 0-360W; 20S-20N;
- Extended Tropics (ETR): 0-360W; 45S-30N;
- Northern South America (NSA): 100W-10W; 20S-20N;
- Southern South America (SSA): 110W-20W; 60S-20S.

Another source of initial uncertainties is the two analysis fields that are not perturbed in the operational EOF method configuration: surface pressure and specific humidity fields. Initial EOF perturbations for both fields are proposed in an attempt to introduce more diversity to CPTEC-EPS perturbed initial conditions.

In order to evaluate the impacts that the proposed modifications in the operational CPTEC-EPS perturbation scheme have on the ensemble forecast, five experiments are carried out: Experiment OPER--considered as a reference for other experiments--represents the operational configuration used currently at CPTEC, in this case, the zonal and meridional wind components (U,V) and temperature (T) fields are perturbed over an extended tropical region (TRE); in the second experiment (EXT1), perturbations are computed for three global regions, Northern Hemisphere (NH), Southern Hemisphere (SH) and tropics (TR), and the perturbed fields are again U, V and T; in the third experiment, defined as TROP the perturbed region is the same as the operational version (OPER), but includes perturbations to surface pressure (P) and specific humidity (Q) fields (which were not perturbed in the former experiment); in the fourth experiment (EXT2), perturbations in three global regions NH, SH and TR are combined with additional perturbations to P and Q fields; in the fifth experiment, ETSA, besides perturbations in midlatitudes (NH and SH) and the tropics (TR), additional perturbations for two different sectors of South America (Northern South America--NSA and Southern South America--SSA) are computed, and the perturbed fields are P,T,Q,U and V. A list of the experiments and their respective characteristics is presented in Table 1.

3. Results

3.1. Description of Catarina according to analyses

The selected meteorological event, called Catarina, occurred in March 2004 near the Brazilian coast. It was characterized in its mature phase by an eye (Fig. 1), typical of intense tropical systems such as hurricanes, with strong winds and westward

displacement. More detailed analyses indicate that Catarina began as an extratropical cyclone embedded in a frontal system and underwent a tropical transition two days later under low vertical wind shear over near-average sea surface temperatures (Pezza and Simmonds, 2005). Satellite estimates indicated that the cyclone's central pressure was about 970-975 hPa, with sustained winds of up to 35 m/s (Silva Dias et al., 2004).

Figure 2 shows the representation of Catarina by NCEP initial conditions at 1200 UTC 24 March 2004 as seen by msl pressure and wind intensity fields, at the horizontal resolution used in this study. It can be verified that the analysis significantly overestimates the cyclone central pressure (underestimates its intensity). For this situation, the analysed pressure value inside the center of the system is around 1008 hPa. The wind magnitude on the cyclone boundaries is relatively smaller than those estimated by satellite. According to the analysis, the largest wind speed - around 14 m/s - occurs in the southern part of the system. Part of the underestimation of the cyclone intensity by the analysis may be associated to the relatively low resolution used in this study. The inadequate representation of the system by the initial conditions makes difficult the simulation of the event by numerical models. Zhu and Thorpe (2006) found that an accurate representation of the initial conditions for extratropical cyclones is essential for predicting the development of these systems with some skill.

The trajectory of Catarina, as represented by the NCEP analyses, is given in Fig. 3. The space between two points represents the displacement of the system over a period of 12 hours. The initial point of the trajectory (northernmost point) indicates the position of the system at 1200 UTC 20 March 2004. The last point, when the center of the system had already reached the continent, was 1200 UTC 28 March 2004. Initially, the system moved southeastward. Then, after a change in its dynamic structure from extratropical cyclone to tropical cyclone, it turned westward, moving toward the continent. Despite the low resolution of the analyses used in this study, the trajectory shown in Fig. 3 is similar to that obtained from ECMWF high-resolution analyses by Pezza and Simmonds (2005).

3.2. Results from ensemble simulation experiments

The prediction of Catarina event is carried out in order to investigate the influence that the modifications in the procedure of producing perturbed analyses suggested in this study have on the performance of the CPTEC-EPS. In general, prediction of severe events by numerical models is difficult, especially at the low resolution (about 100 Km) used here. Nevertheless, we try here to assess whether such modifications add useful information to CPTEC ensemble weather forecasts. This study aims to assess mainly the ensemble prediction of the cyclone trajectory and the value of the central pressure. The information about the trajectory and intensity of the cyclone is valuable for an analysis of the risk of damage if the system should strike.

For each experiment, ensemble simulation started at 1200 UTC 24 March 2004. In Fig. 4a, it is clearly noticed that the model is deficient in simulating the evolution of the system. The control prediction (dashed lines) is able to simulate the system only up to forecast hour 48. From 1200 UTC 24 March until 0000 UTC 26 March, Catarina moved northwest, then, it turned westward. The cyclone trajectory predicted by the control forecast shows a more northward displacement than was observed. The ensemble members (dots) of the operational configuration (experiment OPER) present a large spread in forecasts of the cyclone position. Some members are able to simulate the system up to forecast hour 72 and are able to simulate the change in the system's direction of motion. However, in general, the ensemble members also indicate

trajectories to the north of those observed. The results of other experiments (Figs. 4b-g) indicate that those experiments with extratropical perturbations and perturbations on P and Q fields applied simultaneously (EXT2 and ETSA) present greater spreads in the predicted trajectories, enhancing the overlap with the analyzed track. The inclusion of perturbations to surface pressure and specific humidity fields (experiments TROP, EXT2 and ETSA) causes an increased dispersion of the cyclone initial position when compared with the experiments without these perturbations (experiments OPER and EXT1). This result suggests that perturbations, mainly to surface pressure, can produce an effect similar to those applied to cyclone position by Zhang (1997).

Figure 5 shows the results of central pressure predictions. It is observed that the cyclone central pressure value is overestimated by the control prediction (dashed line). This result was also obtained by Bonatti et al. (2006) in a simulation of the Catarina episode, using a high resolution (T511L64, about 22 Km) version of CPTEC-AGCM model. The overestimate of the cyclone central pressure is due in part to the position at which the model locates the maximum heating source--around 500hPa--whereas it was observed at around 850hPa in the analyses.

For experiment OPER (Fig. 5a), it is verified that the forecasted values of msl pressure (dots) are higher than those observed at all forecast lead times. Although the ensemble mean (dotted line) was able to maintain the cyclone 12 hours longer than the control forecast did, it shows values very close to that of the control. The application of perturbations in the extratropics in experiment EXT1 (Fig. 5c) produces a small growth in the ensemble spread and slightly improves the ensemble mean prediction. However, the predicted pressure values are higher than those observed. With additional perturbations to surface pressure and specific humidity fields in experiment TROP (Fig. 5b), the ensemble mean maintains the cyclone out to forecast hour 84, although the ensemble mean values are still very close to the control values at the first few forecast lead times. The inclusion of additional perturbations in the extratropics and on P and Q fields in experiment EXT2 increases the spread and simulates central pressure values, as seen in the ensemble mean, closer to the analyzed values. Moreover, at forecast hour 12 the ensemble members capture the value verified in the analysis. The impact of regional perturbations over South America on the performance of ensemble forecasts can be assessed through the results of experiment ETSA (Fig. 5e). It is evident that such perturbations contribute to produce forecasted values of central pressure lower than those obtained in the control experiment (OPER). The ensemble mean values are closer to the observed values.

Generally, the results indicate that the experiment ETSA improves the forecast performance more than do the other experiments. This effect is associated with the application of regional perturbations to the region of South America surrounding Catarina's position. This result is in agreement with those of Puri et al. (2001) who found that reasonable spreads in the tracks for tropical cyclone (TC) prediction are only obtained if a target area around the TC, or in the particular region of the TC, is used in the derivation of the singular vectors.

4. Conclusion

The effect of using the EOF method to insert extra initial perturbations to the extratropics and to surface pressure and specific humidity fields in the CPTEC Ensemble Prediction System is addressed in this study. Also, the computation of regional perturbations over South America is tested. Under the perfect-model hypothesis, five experiments were performed by modifying the regions used to compute

the initial perturbations and applying perturbations to P and Q fields. The impacts of such changes were assessed through the results of the experiments for the particularly intense cyclone Catarina that occurred over South Atlantic in March 2004.

The results revealed that cyclone intensity is underestimated by initial conditions, i.e., the minimum central pressure is higher and the wind on the cyclone periphery is weaker than value estimated from satellite information. Operational ensemble forecasts overestimate the analysed central pressure values and do not indicate a well-configured cyclone after 60 hours forecast lead time. Additional perturbations in the extratropics and to P and Q fields extend that range for an extra 24 hours, and also improve forecasts of cyclone central pressure. The best results were obtained when additional regional perturbations over South America are computed: the number of ensemble members capturing the cyclone track was increased and values of central pressure closer to the analysed values were forecasted.

The results of this study encourage an operational implementation of additional EOF-based perturbations in the extratropics and on P and Q fields, as well as, regional perturbations over South America at CPTEC-EPS in order to improve the quality of CPTEC ensemble forecasts.

References

- Barkmeijer J, Buizza R, Palmer TN, Puri K, Mahfouf J-F. 2001. Tropical singular vectors computed with linearized diabatic physics. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 127 : 685-708.
- Bonatti JP, Rao VB, Silva Dias PL. 2006. On the westward propagation of Catarina storm. *Proceedings of 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*, 24-28 April 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brazil.
- Coutinho MM. 1999. Previsão por conjuntos utilizando perturbações baseadas em componentes principais. (Ensemble prediction using principal-component-based perturbations). M. Sc. Dissertation, INPE, São José dos Campos, SP, Brazil, 136 pp.
- Kinter JL, DeWitt D, Dirmeyer PA, Fennessy MJ, Kirtman BP, Marx L, Schneider EK, Shukla J, Straus DM. 1997. The COLA atmosphere-biosphere general circulation model. Volume 1: Formulation. Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies. Calverton, MD, COLA Staff, Report N.o 51.
- McTaggart-Cowan R, Bosart LF, Davis CA, Atallah EH, Gyakum JR, Emanuel KA. 2006. Analysis of Hurricane Catarina (2004). *Monthly Weather Review* 134 : 3029-3053.
- Mendonça AM, Bonatti JP. 2006. Experiments with EOF-based perturbation method to ensemble weather forecasting in midlatitudes. *Proceedings of 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*, 24-28 April 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brazil.
- Pezza AB, Simmonds I. 2005. The first South Atlantic hurricane: Unprecedented blocking, low shear and climate change. *Geophysical Research Letters* 32 : L15712. DOI:10.1029/2005GL023390.
- Puri K, Barkmeijer J, Palmer TN. 2001. Ensemble Prediction of tropical cyclones using targeted diabatic singular vectors. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 127 : 709-731.

- Reynolds CA, Webster PJ, Kalnay E. 1994. Random error growth in NMC's global forecasts. *Monthly Weather Review* 122 : 1281-1305.
- Silva Dias PL, Silva Dias MAF, Seluchi M, Diniz FA. 2004. O ciclone Catarina: Análise preliminar da estrutura, dinâmica e previsibilidade (in Portuguese). XIII Brazilian Meteorological Conference, Brazilian Meteorological Society, 29 August-3 September 2004, Fortaleza, CE, Brazil.
- Toth Z, Kalnay E. 1997. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. *Monthly Weather Review* 125 : 3297-3319.
- Zhang Z. 1997. Hurricane ensemble prediction using EOF-based perturbations. PhD Dissertation, Florida State University, Florida, 173 pp.
- Zhang Z, Krishnamurti TN. 1999. A perturbation method for hurricane ensemble predictions. *Monthly Weather Review* 127 : 447-469.
- Zhu H, Thorpe A. 2006. Predictability of extratropical cyclones: the influence of initial condition and model uncertainties. *Journal of the Atmospheric Science* 63 : 1483-1497.

Figure Legends

Fig. 1. Satellite image from GOES-12 Infrared channel at 1339 UTC 26 March 2004. Hurricane Catarina's well-configured eye near the Brazilian Coast can be seen. From: Environmental Satellite Division - Center for Environmental Prediction - National Institute for Space Research (DSA/CPTEC/INPE).

Fig. 2. Mean sea level pressure (hPa) (contours) and wind speed (m/s) (shaded) fields over Catarina region for the CPTEC-AGCM initial condition at 1200 UTC 24 March 2004. The cyclone central pressure is about 1008 hPa and highest wind speed in the neighborhood of the system is about 14 m/s.

Fig. 3. Cyclone Catarina's track as seen by NCEP analyses at T126L28 resolution. The cyclone position is plotted for each 12 hours. The most northern point represents the beginning of the trajectory at 1200 UTC 20 March 2004 and the last point (over the continent) corresponds to the final position at 1200 UTC 28 March 2004.

Fig.4. Catarina track prediction, starting from 1200 UTC 24 March 2004. The tracks are over four days and positions are plotted for each 12 hours. Trajectories is based on NCEP analyses (solid lines), control forecast (dashed lines), ensemble mean (dotted lines) and individual ensemble members (dots). The panels refer to experiments (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2 and (e) ETSA.

Fig.5. Catarina central pressure, starting from 1200 UTC 24 March 2004, as a function of time (in hours) based on NCEP analyses (solid lines), control forecast (dashed lines), ensemble mean (dotted lines) and individual ensemble members (dots). The panels refer to experiments (a) OPER, (b) TROP, (c) EXT1, (d) EXT2 and (e) ETSA.

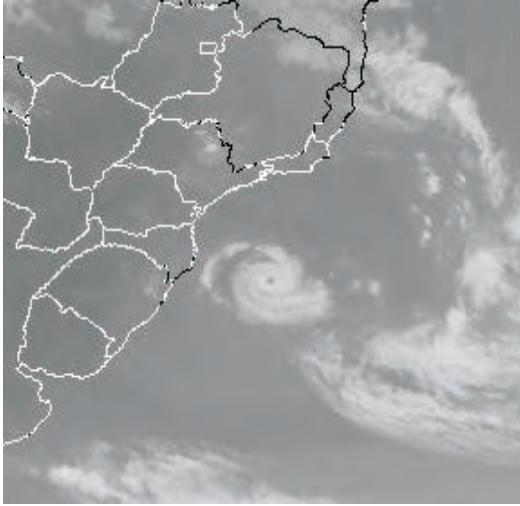


Fig. 1

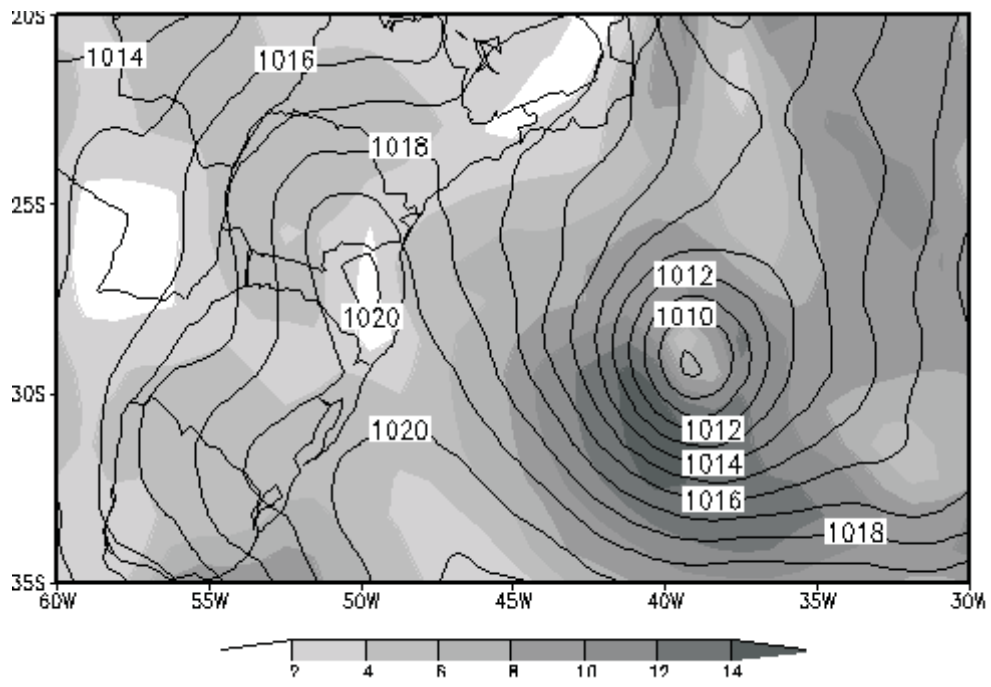


Fig. 2

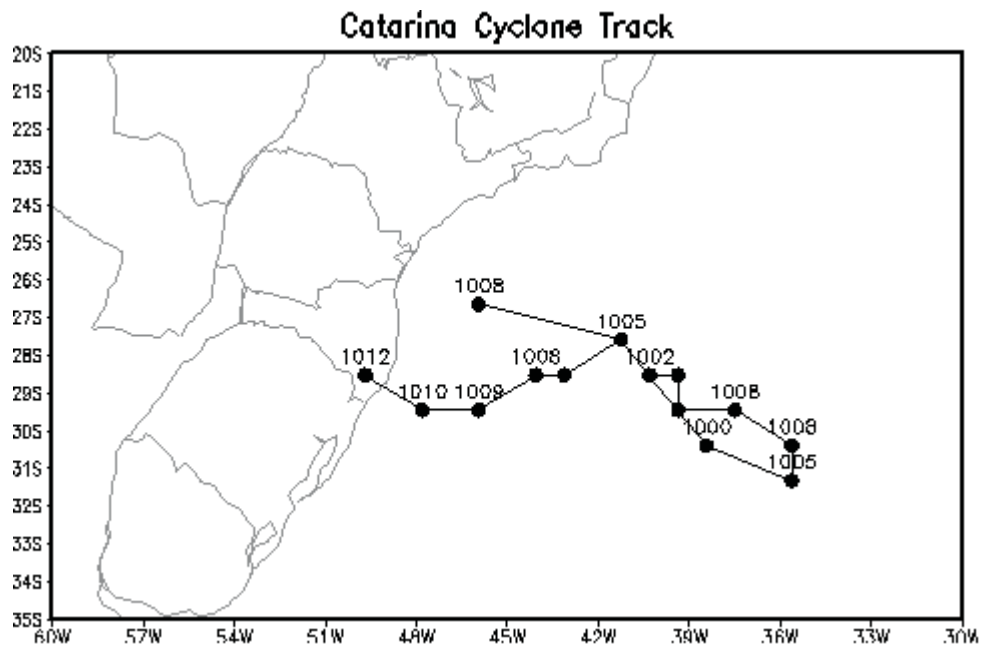


Fig. 3

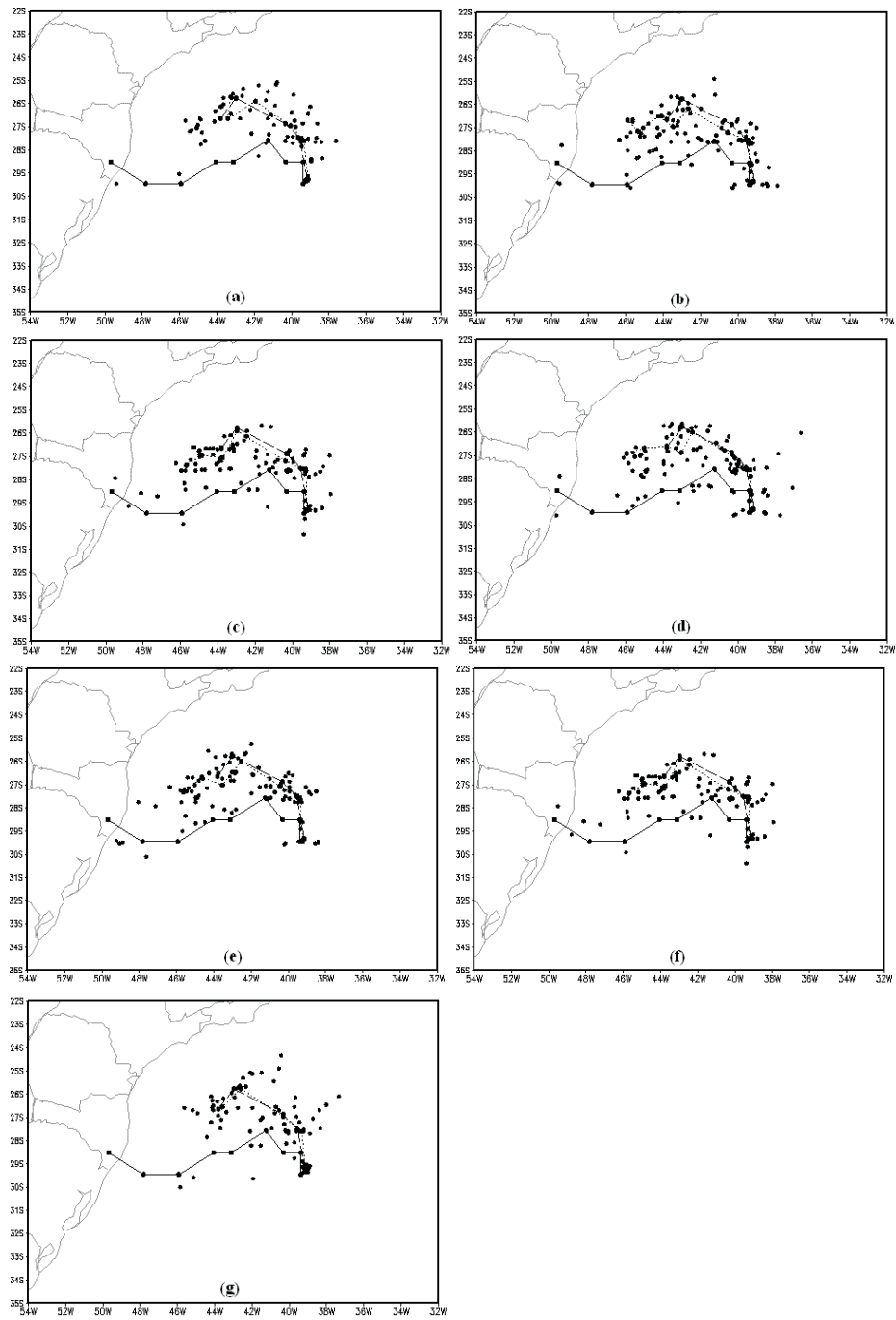


Fig. 4

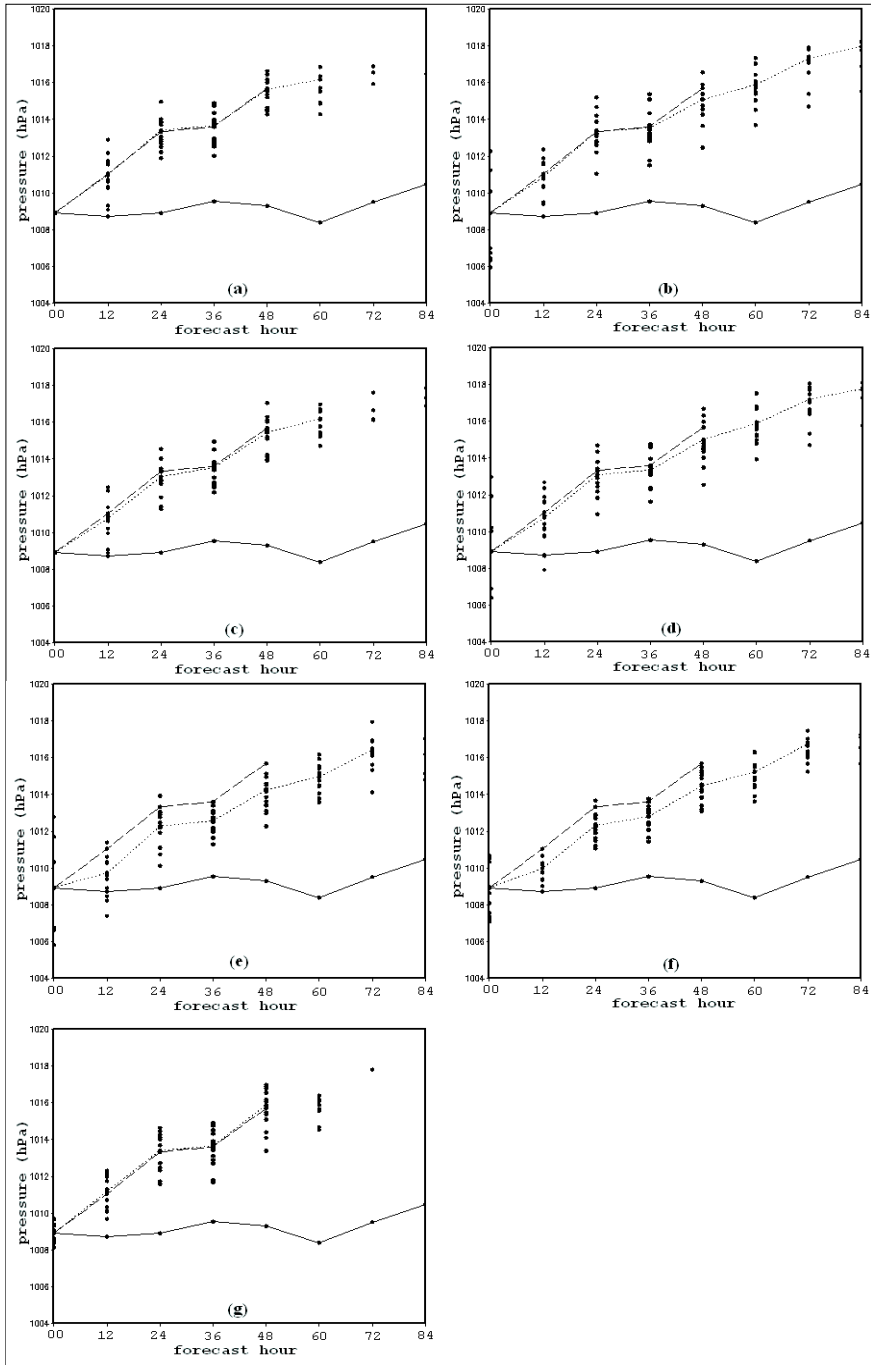


Fig. 5

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.