



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/05.11.18.46-TDI

AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE PREVISÃO DE TEMPO GLOBAL POR CONJUNTO DO CPTEC NA PREVISÃO DE CICLONES NO SUL DA AMÉRICA DO SUL

Mônica Vaz Lima

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada
pelo Dr. Nelson Jesuz Ferreira, aprovada em 30 de maio de 2011.

URL do documento original:
<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39LS6C8>>

INPE
São José dos Campos
2011

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

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

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

Membros:

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

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

Dr^a Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

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

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

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

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

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

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

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

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



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/05.11.18.46-TDI

AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE PREVISÃO DE TEMPO GLOBAL POR CONJUNTO DO CPTEC NA PREVISÃO DE CICLONES NO SUL DA AMÉRICA DO SUL

Mônica Vaz Lima

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada
pelo Dr. Nelson Jesuz Ferreira, aprovada em 30 de maio de 2011.

URL do documento original:
<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39LS6C8>>

INPE
São José dos Campos
2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Lima, Mônica Vaz.

P75a Avaliação do sistema de previsão de tempo global por conjunto do CPTEC na previsão de ciclones no sul da América do Sul / Mônica Vaz Lima. – São José dos Campos : INPE, 2011.
xxii+73 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/05.11.18.46-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

Orientador : Dr. Nelson Jesus Ferreira.

1. Ciclone. 2. Previsão por conjunto. 3. Avaliação estatística. I.Título.

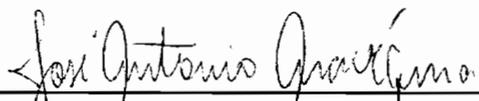
CDU 551.509.313.5 (8)

Copyright © 2011 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2011 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

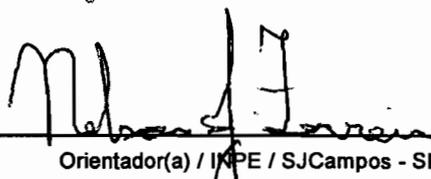
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Meteorologia

Dr. José Antônio Aravéquia



Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Nelson Jesuz Ferreira



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Antônio Marcos Mendonça



Convidado(a) / MCT / Brasília - DF

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

Aluno (a): Mônica Vaz Lima

São José dos Campos, 30 de maio de 2011

*“Somos o que fazemos repetidas vezes.
A excelência não é um ato e sim um hábito”.*

Aristóteles

A meu marido André e minha filha Helena com todo meu amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Dr Nelson Jesuz Ferreira, pela concretização deste sonho.

Ao Dr Kevin Hodges e a Dra Lizzie Froude, pelo apoio e ajuda na aplicação da metodologia desenvolvida por eles.

A minha filha Helena pela compreensão de tantas ausências às quais eram necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

A minha família que torce por mim mesmo que à distância.

Agradecemos aos amigos Demerval Moreira, Philipp Silva, José Felipe Farias e José Roberto Rozante, pessoas que foram essenciais na concretização deste trabalho.

Aos meus colegas de trabalho do grupo de previsão de tempo, pessoas que me ajudaram em todo o período de mestrado.

Aos meus colegas do mestrado (turma 2008) que sempre me incentivaram.

A energia positiva que nos leva à evolução nos enche de força, e que muitos traduzem como Deus, sem ela não conseguimos nem mesmo respirar.

Obrigada.

RESUMO

Neste trabalho avalia-se o Sistema de Previsão Global por Conjunto (SPGC) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) na previsão da intensidade e deslocamento de ciclones extratropicais. Os sistemas estudados tiveram origem nas áreas ciclogênicas da América do Sul (Golfo de San Matias e da Bacia do Prata). O período analisado compreende o inverno de 2009 (JJA). Uma metodologia objetiva, conhecida como "TRACK", foi usada para obter a gênese, intensidade, trajetória e duração dos sistemas meteorológicos estudados, por meio da variável vorticidade relativa no nível isobárico de 850 hPa. A validação das trajetórias do SPGC/CPTEC foi feita em relação à Análise do National Centers for Environmental Prediction (NCEP) degradada para a mesma resolução do modelo (T126). Para garantir a qualidade estatística foram empregados critérios de combinação da previsão com a análise: pelo menos 60% dos membros perturbados devem prever o sistema, dentro dos primeiros quatro intervalos de tempo das saídas do modelo (primeiro dia de previsão) e a distância geodésica entre os membros do conjunto e a análise deve ser inferior à 4°. Avaliou-se a intensidade, posição e velocidade de deslocamento dos ciclones previstos pelo SPGC/CPTEC com o skill e o espalhamento e o viés. O erro total do sistema (associado aos erros na velocidade e na posição) do conjunto médio e do controle foi semelhante. Porém, o espalhamento sugere uma baixa confiabilidade no conjunto médio. Os resultados chamam a atenção para a necessidade de se desenvolver mais estudos para aprimorar a previsibilidade do SPGC/CPTEC.

EVALUATION OF CPTEC GLOBAL ENSEMBLE PREDICTION SYSTEM ON THE PREDICTION OF CYCLONES IN SOUTHERN SOUTH AMERICA

ABSTRACT

The Global Ensemble Prediction System (GEPS) of the Center for Weather Prediction and Climatic Studies skill on prediction of extratropical cyclones intensity and displacement is evaluated in this work. The systems studied here were originated in cyclogenetic regions of South America (San Matias Gulf and Plate Basin regions). The period analysis includes the 2009 winter (JJA). To characterize the genesis, intensity, track and lifetime of the selected meteorological systems, an objective methodology called "TRACK" was used. The analysis was done using the 850 hPa relative vorticity. The validation of the SPGC/CPTEC tracks was made comparing to the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Analysis adjusted for the model gride (T126). To assure a statistical significance was used a combination criteria between forecast and analysis such that at least 60% of perturbed members should predict the cyclones within the first four time steps (from the first forecast day). Also the geodesic distance between the ensemble members and the analysis should be less than 4°. Intensity, position and displacement velocity of systems predicted by SPGC/CPTEC were evaluated according to the skill, scattering and bias. The total error of the system (associated to velocity and position errors) of the ensemble mean and control were similar. However, the scattering indicates a low confiability in the ensemble mean. The obtained results suggest the need for further studies to improve the SPGC/CPTEC predictability.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 3.1 - Densidade de Ciclogênese JJA, período 1979-2001 (Guia, 2011).....	27
Figura 3.2- Esquema de combinação espacial. A linha sólida representa a análise e as linhas rachuradas às previsões. As trajetórias A e B foram combinadas e a D não (de Froude 2007).....	29
Figura 4.1- Trajetória do ciclone formado na área ciclogênética do Golfo de San Matias as 00 UTC do dia 16/06/2009. linha vermelha= trajetória observada; linha preta= controle; linhas amarelas= membros perturbados.....	36
Figura 4. 2 -Trajetória do ciclone detectado na área ciclogênética do Golfo de San Matias às 00 UTC do dia 19/06/2009. linha vermelha= trajetória observada; linha preta= controle; linhas amarelas= membros perturbados.....	37
Figura 4.3 Trajetória do ciclone detectado na área ciclogênética da Bacia do Prata às 00 UTC do dia 16/07/2009. Linha vermelha= trajetória observada; linha preta= controle; linhas amarelas= membros perturbados.....	38
Figura 4.4 Trajetória do ciclone detectado na área ciclogênética da Bacia do Prata às 00 UTC do dia 22/07/2009. Linha vermelha= trajetória observada; linha preta= controle; linhas amarelas= membros perturbados.....	39
Figura 4.5 Trajetória do ciclone detectado na área ciclogênética da Bacia do Prata às 00 UTC do dia 3/08/2009. Linha vermelha= trajetória observada; linha preta= controle; linhas amarelas= membros perturbados.....	40
Figura 4.6 Trajetória do ciclone detectado na área ciclogênética do Golfo de San Matias às 00 UTC do dia 08/08/2009. Linha vermelha= trajetória observada; linha preta= controle; linhas amarelas= membros perturbados.....	41
Figura 4.7 Trajetória do ciclone detectado na área ciclogênética do Golfo de San Matias às 00 UTC do dia 10/08/2009. Linha vermelha= trajetória observada; linha preta= controle; linhas amarelas= membros perturbados.....	42
Figura 4.8 Trajetória do ciclone detectado na área ciclogênética do Golfo de San Matias às 00 UTC do dia 16/08/2009. Linha vermelha= trajetória observada; linha preta= controle; linhas amarelas= membros perturbados.....	43
Figura 4.9 Trajetória do ciclone detectado na área ciclogênética da Bacia do Prata às 00 UTC do dia 20/08/2009. Linha vermelha= trajetória observada; linha preta= controle; linhas amarelas= membros perturbados.....	44
Figura 4.10 Intensidade media dos membros perturbados (conjunto médio=, azul), intensidade do controle (vermelho) e análise (verde). O eixo y tem os valores da vorticidade relativa (10^{-5}); o eixo x tem os dias de previsão.	45
Figura 4.11- Distância geodésica media (em graus) dos membros perturbados (azul) e do controle (vermelho), erro total da posição. O eixo y tem os valores da distância geodésica em graus; o eixo x tem os dias de previsão. Eixo x são os dias de previsão. Eixo y é a distância geodésica.....	46
Figura 4.12 a) - Esquema ilustrativo de um espalhamento ideal; b) Esquema ilustrativo de um espalhamento inadequado. Adaptado de Kalnay, 2006....	48

Figura 4.13 - Skill da intensidade para o período estudado. Eixo y tem os valores do skill (%).....	49
Figura 4.14 - Espalhamento da Intensidade para o período estudado. O eixo x mostra os dias de previsão.	49
Figura 4.15 - Skill da posição para o período estudado. Eixo y tem os valores do skill (%).O eixo x mostra os dias de previsão.....	50
Figura 4.16 - Espalhamento da posição para o período estudado. O eixo x mostra os dias de previsão.	50
Figura 4.17 - Viés da intensidade para o período estudado. Eixo y é o viés; eixo x os dias de previsão.....	52
Figura 4.18 - Viés da velocidade para o período estudado. Eixo y é o viés; eixo x os dias de previsão.....	52
Figura 4.19 - Skill da Intensidade para os sistemas originados no Golfo de San Matias. Eixo y, é o skill, eixo x os dias de previsão.....	54
Figura 4.20 - Espalhamento da Intensidade para os sistemas originados no Golfo de San Matias. Eixo y é o espalhamento, eixo x os dias de previsão.....	54
Figura 4.21 - Skill da Posição para os sistemas originados no Golfo de San Matias Eixo y, é o skill, eixo x os dias de previsão.....	55
Figura 4.22 - Espalhamento da Posição para os sistemas originados no Golfo de San Matias. Eixo y é o espalhamento, eixo x os dias de previsão.	55
Figura 4.23 - Viés da Intensidade para os sistemas originados no Golfo de San Matias. Eixo y é o viés, eixo x são os dias de previsão.....	56
Figura 4.24 - Viés da Velocidade para os sistemas originados no Golfo de San Matias. Eixo y é o viés, eixo x são os dias de previsão.....	56
Figura 4.25 - Skill da Intensidade para os sistemas originados na Bacia do Prata. Eixo y, é o skill, eixo x os dias de previsão.....	57
Figura 4.26 Espalhamento da Intensidade para os sistemas originados na Bacia do Prata. Eixo y é o espalhamento, eixo x os dias de previsão.	58
Figura 4.27 - Skill da Posição para os sistemas originados na Bacia do Prata. Eixo y, é o skill, eixo x são os dias de previsão.....	58
Figura 4.28 - Espalhamento da Posição para os sistemas originados na Bacia do Prata. Eixo y é o espalhamento, eixo x os dias de previsão.	59
Figura 4.29 - Viés da Intensidade para os sistemas originados na Bacia do Prata. Eixo y é o viés, eixo x são os dias de previsão.....	59
Figura 4.30 - Viés da Velocidade para os sistemas originados na Bacia do Prata. Eixo y é o viés, eixo x são os dias de previsão.....	60

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 - Parâmetro d_{max} em graus para diferentes regiões. Neste estudo usou-se $d_{max}=6$ por analisar sistemas de latitudes médias no HS....	24
Tabela 3.2 - Ciclones estudados no mês de junho de 2009.....	25
Tabela 3.3 - Ciclones estudados no mês de julho de 2009.....	25
Tabela 3.4 - Ciclones estudados no mês de agosto de 2009.....	26

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

COLA	Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DJF	Dezembro, Janeiro e fevereiro
ECMWF	European Center for Medium-range Weather Forecasts
EOF	Função Ortogonal Empírica
ERA	Re-Analysis
HN	Hemisfério Norte
HS	Hemisfério Sul
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JJA	Junho, Julho, Agosto
DJF	Dezembro, Janeiro, Fevereiro
LFM-II	Limited Fine Mesh Model II
MCGA	Modelo de Circulação Geral da Atmosfera
MSC	Meteorological Service of Canada
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NMC	Nested Grid Model
PNMM	Pressão ao Nível do Mar
PECA	Perturbation Error Correlation Analysis
SPC	Sistema de Previsão por Conjunto
SPGC	Sistema de Previsão Global por Conjunto
T126	Truncamento de onda número 126 (100km no equador)
T382	Truncamento de onda número 382 (32km no equador)
L28	28 níveis verticais
UTC	Universal Time Coordinated
K	passo de tempo
d	distância geodésica

SUMÁRIO

Pág.

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
2.1. Definição e dinâmica associada aos storm tracks.....	5
2.2. Método track.....	7
2.3. Storms tracks	9
2.4. Previsão por conjunto	12
2.5. Avaliação do SPC	14
3. MODELO AVALIADO, DADOS E METODOLOGIA	19
3.1 Modelo avaliado e dados	19
3.1.1 sistema de previsão de tempo global por conjunto do CPTEC.....	19
3.1.2 Método track	21
3.1.3 Variável e período utilizado	24
3.2 Metodologia.....	28
3.2.1. Cálculo da distância de separação geodésica (d).....	29
3.2.2. Critérios de combinação T	30
3.2.3. Metodologia de avaliação do SPGC/CPTEC.....	30
3.2.3.1. Índices calculados.....	31
4. RESULTADOS.....	35
4.2. Conjunto médio e controle	44
4.2.1. Intensidade e posição	44
4.3. Skill e espalhamento da intensidade e da posição do SPC para JJA	46
4.4. Viés do conjunto médio para a intensidade e a velocidade	51
4.5. Avaliação dos sistemas divididos em área de origem.....	53
4.5.1. Sistemas formados no golfo de San Matias.....	53
4.5.2. Sistemas formados na Bacia do Prata.....	57
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
6. TRABALHOS FUTUROS	63
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

1. INTRODUÇÃO

A procura por novas formas de previsão e do aprimoramento das já existentes tem o intuito de melhorar os prognósticos de tempo, tanto de curto quanto de médio prazo. A avaliação do desempenho dos modelos numéricos é muito importante para as instituições que realizam previsão de tempo. As condições de tempo no centro-sul da América do Sul são muito influenciadas por ciclones subtropicais e extratropicais e pelos sistemas frontais associados a estes. Vários estudos foram feitos com este intuito, por exemplo, Pesqueiro (2001), Casseb (2004), Mesquita (2006), Mendes (2006), Froude (2007), Froude (2009), entre outros.

Lorenz inseriu o conceito do caos na previsão das condições atmosféricas em 1963, quando estudava um modelo simplificado de previsão numérica de tempo. Seu modelo seguiu um curso que não se enquadrava como randômico periódico ou convergente, que eram as categorias de padrões de variação de tempo até então conhecidas. Assim, nascia uma nova forma de prognosticar as condições atmosféricas de tempo baseada na teoria do caos. Ele introduziu uma forma de previsão diferente da forma determinística (baseada em uma única previsão). A previsão por conjunto é baseada em conceitos estatísticos aplicados a modelos que ainda conservam as equações primitivas, mas que, através de metodologias matemáticas, geram conjuntos de previsões produzidas com condições iniciais ligeiramente distintas entre si.

Em seu primeiro trabalho, Lorenz (1963) anteviu que os modelos numéricos inicializados com um conjunto de equações não lineares, não conseguiam e não conseguiriam reproduzir a enorme diversidade de fenômenos que influenciam a evolução das condições atmosféricas. Ele mostrou que estes modelos numéricos quando inicializados com condições ligeiramente perturbadas, após algum tempo de integração, as soluções tendem a ser

completamente diferentes e, devido a este comportamento irregular, associado à complexidade atmosférica, vieram a ser chamados de "caóticos".

Os modelos de previsão de tempo tradicionais representam os processos dinâmicos por meio das equações primitivas (não lineares), que são baseadas em um conjunto de equações, contendo a continuidade de massa para o ar seco e vapor de 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 a componente vertical do movimento são desprezados, além disso, a equação do momento vertical é substituída pela aproximação hidrostática (HOLTON, 2004).

“A previsão por conjunto fornece um método de extensão do limite intrínseco da previsibilidade de uma previsão determinística isolada. Integrando um conjunto de previsões, cada uma iniciando com condições iniciais levemente diferentes. Uma dessas previsões é integrada a partir de uma análise e é referida como previsão de controle. As condições iniciais para os outros membros do conjunto são obtidas aplicando perturbações à análise não perturbada, com o objetivo de amostrar a função densidade de probabilidade dos erros no estado inicial.” (FROUDE, 2007b).

A previsão de tempo por conjunto produz grande quantidade de informações e tem sido um desafio para os centros meteorológicos condensar essas informações e extrair delas as características mais importantes para o “meteorologista previsor”, ou para usuários interessados neste produto. Coutinho et al (1999) foram pioneiros em estudos sobre previsão por conjunto no Brasil; eles implementaram a metodologia desenvolvida no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), vinculado ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Atualmente o CPTEC/INPE opera um Sistema Global de Previsão por Conjunto (SPGC) com uma resolução horizontal de aproximadamente 100kmx100km, próximo ao equador e 28 camadas na vertical (T126L28), com previsões de médio prazo (até 15 dias).

Este SPGC é caracterizado por perturbações iniciais nos trópicos, baseada em funções ortogonais empíricas. Essa metodologia foi primeiramente aplicada ao estudo da trajetória de furacões por Zhang et al (1997).

Desde a implementação do SPGC/CPTEC, ênfase tem sido dada à avaliação do desempenho deste sistema de previsão (Machado et al. (2004), Cardoso et al., 2006; Mendonça, 2006; Mendonça, 2009 e Silva et al., 2008.. Deve se destacar que existe uma grande variedade de métricas estatísticas de interesse para a avaliação do desempenho dos modelos numéricos em simular a evolução dos padrões atmosféricos. A descrição completa do desempenho de um modelo exige a análise de um vasto conjunto destes parâmetros. No entanto, uma escolha cuidadosa de um número restrito de parâmetros permite, na maior parte dos casos, obterem-se boas informações sobre as principais deficiências e virtudes do sistema de previsão em avaliação.

Antes de avaliar o SPGC/CPTEC, quanto ao desempenho em simular a trajetória e intensidade de ciclones, é importante escolher uma metodologia adequada para detecção destes ciclones de forma direta e objetiva. Neste contexto, optou no presente estudo pelo método objetivo desenvolvido por Hodges (1994, 1995 e 1999a) que deriva a gênese, posição, trajetória, intensidade e duração dos sistemas ciclônicos. Dessa forma, este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho do SPGC/CPTEC, comparando os resultados deste modelo com a análise do National Centers for Environmental Prediction (NCEP).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Definição e dinâmica associada aos storm tracks

A correspondência entre uma grande variância entre o nível de 500 hPa e regiões com alta frequência de atividade ciclônica, aplicando um filtro passa banda, foi primeiramente estudado por Sawyer (1970) que avaliou a variável altura geopotencial em 500 hPa sobre o Oceano Atlântico Norte para um período de dois anos mostrando a existência das “Storm Tracks”. Blackmon et al. (1977) deram continuidade ao estudo de Sawyer, aplicando filtros (passa alta, passa banda e passa baixa frequência) no campo de altura geopotencial em 500 hPa, mas utilizando também outros parâmetros atmosféricos (pressão ao nível médio do mar, altura geopotencial em 300 hPa, temperatura e fluxo de calor em direção ao pólo no nível de 850 hPa). Nesse caso, o objetivo foi verificar o padrão destas variáveis com a atividade ciclônica, caracterizando as “Storm Tracks”, ou seja, áreas de formação e deslocamento preferenciais de ciclones. Além disso, eles destacam que as maiores precipitações e ventos fortes em superfície que ocorrem principalmente em períodos de inverno em latitudes médias estão associados com desenvolvimento de distúrbios baroclínicos.

Trenberth (1991) define “Storm Track” como sendo a região de máxima variância da altura geopotencial na média e alta troposfera para distúrbios com período de aproximadamente uma semana (escala sinótica). A consideração do tempo de vida implicou em trajetórias de tempestades que estão associadas à variação de geopotencial negativa ou positiva (centros de baixa ou de alta pressão no nível considerado, respectivamente) enquanto que estudos tradicionais incluíam somente centros de baixa pressão. Em seu trabalho ele ressalta a importância de incluir ambos os casos relacionando-os com a previsão de tempo e levando em conta que a advecção de vorticidade ciclônica

não surge somente com a aproximação de centros de baixa pressão, mas também com o movimento de perturbações de alta pressão. Neste estudo, focou-se a variação de alta frequência, na escala em torno de 1 a 10 dias, nos extratropicais no Hemisfério Sul (HS) e a relação com o fluxo médio. Ele também esquematizou a relação entre o “Storm Track”, o “Jet stream” (máximo de vento da corrente de jato) e os vórtices ciclônicos e anticiclônicos. Com o vento médio em 300 hPa ele documentou a localização da “Storm Track” para janeiro e julho (período de 1979-1989), além de ressaltar o uso do sistema de assimilação em 4 dimensões que fornece estimativa do campo de umidade, movimentos verticais e divergência para fluxos horizontais e verticais de temperatura, umidade, vorticidade e momentum, campos ligados a baroclinia da tempestade.

Rao (2002), define “Storm Tracks” como sendo uma região de grande variância nos campos de geopotencial e do vento meridional em 300 hPa. Ele analisou a Storm Track no HS para o inverno e verão, para um período de 19 anos, como Chang (1999), mas também incluiu as estações de transição (outono e primavera). Os resultados em relação às ondas baroclínicas mostraram que o desenvolvimento corrente abaixo do cavado ocorre ao longo da maioria das regiões em todas as quatro estações. Neste processo há transformação de energia potencial disponível em energia cinética pela circulação térmica nas direções zonal e vertical. Rao destaca a presença de “Storm Tracks” no cinturão de latitudes médias, em torno do paralelo 50 em ambos os Hemisférios, sendo mais forte no outono e mais fraca na primavera.

Guia (2011) desenvolveu um estudo sobre a climatologia de “Storm Tracks” que atuam na América do Sul. Em seu trabalho foram usados dados diários (6 em 6 horas) de vorticidade relativa nos níveis de 925, 850, 500 e 300 hPa da reanálise ERA-40 do ECMWF para o período de dezembro de 1978 a novembro de 2001 e a método TRACK (HODGES 1995, 1996, 1999). No que se refere a variabilidade sazonal para as áreas ciclogênicas do Sul da

América do Sul ela identificou que no inverno a densidade de ciclogêneses é maior que no verão no Golfo de San Matias, porém, para a da Bacia do Prata ela observou uma diminuição da densidade de ciclogêneses no inverno em relação ao verão.

2.2. Método track

Hodges (1994) aplicou uma técnica objetiva usualmente associada com processamento de imagens e de análise dinâmica de cenários para identificar “objetos” em imagens de satélites ou campos meteorológicos. Esta metodologia encontra pontos do objeto (variável em estudo) que podem estar em regiões isotrópicas de campos meteorológicos, como por exemplo, de vorticidade ou de pressão. O TRACK foi aplicado no estudo de ciclones extratropicais, particularmente, para caracterizar a gênese, deslocamento, intensidade e duração destes sistemas. Neste trabalho, o autor descreve o método para a identificação de fenômenos em escala sinótica que pode ser usado para análises objetivas de série de dados atmosféricos ou oceânicos, obtidos de modelos numéricos e de sensoriamento remoto. O método é aplicado para cada intervalo de tempo, e uma técnica de análise dinâmica “de cena” é então usada para ligar os pontos obtidos para formar as trajetórias.

Hodges (1995) modificou o algoritmo traçador de Saleri e Sethi (1990), aplicado para uma grade regular, aprimorando o “traçamento” da trajetória para a diminuição do erro dos dados gerados por projeções. Este trabalho mostra a aplicação da metodologia TRACK para um campo global de vorticidade relativa prevista pelo modelo.

Hodges (1996) ressalta a importância de analisar trajetórias de sistemas meteorológicos em um sentido quantitativo, uma vez que estes dados são úteis para o estudo climatológico e, em particular, para a validação de modelos numéricos, incluindo os de previsão climática. A abordagem deste estudo foi

determinar uma estatística sobre uma grade global. Em outras palavras, aborda como considerar uma distância radial de um ponto dentro de uma área retangular e como as estatísticas podem ser calculadas diretamente na esfera, deste modo evitando o uso das projeções. A variável usada foi o campo de vorticidade relativa, utilizada para determinar a distribuição da atividade ciclônica. Assim como Sinclair (1994), ele utilizou a vorticidade relativa em vez de PNMM ou do campo de geopotencial em 1000 hPa, destacando que os ciclones são melhor relacionados com vorticidade do que com mínimo ou máximo de pressão, além disso, os ciclones não aparecem no campo de pressão até que haja considerável desenvolvimento.

Hodges (1999a) aplicou o algoritmo TRACK para o domínio esférico com adaptações por meio de restrições no “traçamento” (através de funções custo) para uma aplicação mais realística. Segundo ele, o método do vizinho mais próximo pode não ser a aproximação mais correta. Neste trabalho, ele argumenta que um bom algoritmo de traçamento impõe restrições para excluir combinações contrárias ou erradas, para reduzir a “análise combinatória”. Hodges destaca que fixar restrições é geralmente aceitável para estudos regionais ou para estudos usando dados de baixa resolução e com poucos pontos.

Hodges (1999b) estendeu sua técnica para kernels não isotrópicos, ou seja, um estimador de intensidade em um ambiente que pode não possuir a mesma característica. Neste trabalho salientou-se a importância de trabalhar com dados no domínio esférico a fim de evitar perda da qualidade dos dados ao fazer projeções. Hodges destaca que há uma grande melhoria na distribuição da densidade da “variável estudada” ao longo da trajetória com o uso do kernel esférico não isotrópico, evitando uma distribuição ruidosa, e concentrando as probabilidades nas regiões das “trajetórias”.

2.3. Storms tracks

Akyildiz (1985) identificou erros sistemáticos no comportamento dos ciclones nos modelos operacionais em ponto de grade e em coeficientes espectrais do ECMWF para o HN. Os resultados indicaram que as previsões do modelo em pontos de grade (N48) tendem a deslocar a trajetória dos ciclones para sul, especialmente após o quarto dia de previsão, exceto próximo da Terra Nova onde se obteve um deslocamento para norte.

Gan (1992) realizou uma climatologia de ciclones para a América do Sul, entre os anos de 1979 e 1988 por meio de cartas sinóticas, imagens de satélite e dados mensais de radiossondagens de oito estações. Gan encontrou duas áreas de Storm Tracks para ciclones que ele chamou de áreas ciclogênicas: uma sobre o Uruguai e outra no Golfo de San Matias. Ele considerou dois processos ciclogênicos: a instabilidade baroclínica devido aos ventos de oeste e o efeito de montanha. Neste estudo, observou-se uma variabilidade interanual, sendo 1981 o ano com menos ciclogêneses e o ano de 1983, o com maior, este trabalho levou em conta eventos de La Niña e El Niño. O autor também encontrou uma variabilidade sazonal com o máximo de frequência de ciclogênese no inverno e um mínimo no verão.

Pesqueiro (2001) avaliou o modelo global de previsão numérica de tempo do CPTEC, com relação aos sistemas transientes de alta e baixa pressão e suas trajetórias no período entre setembro de 1998 e agosto de 1999, dividindo o período sazonalmente. As previsões utilizadas foram 24, 48, 72, 96 e 120 h, do campo de pressão ao nível médio do mar (MSLP) para o HS. Ele desenvolveu um método objetivo que localiza os sistemas de baixa e alta pressão mapeando suas trajetórias, com base nos critérios de Treut e Kalnay (1990) e Murray e Simmonds (2000).

Hoskins e Hodges (2002) salientam que existem duas aproximações básicas usadas para identificar “Storm Tracks”. A primeira é a identificação do sistema de tempo, traçamento dos pontos no tempo e obtenção de estatísticas da distribuição. A segunda é baseada na determinação de uma estatística simples para o grupo de pontos de grade, baseada de forma semelhante na variância e na banda de frequência associada com o que é considerado para a escala de tempo sinótica. Os autores avaliaram variâncias eulerianas para campos filtrados no tempo para vários parâmetros meteorológicos (uma delas é a vorticidade potencial isentrópica) para o inverno do HN, com 22 anos de dados (reanálise ERA15) para a alta e baixa troposfera.

Casseb (2004) analisou 22 anos de dados avaliando as variações sazonais das características dos Storm Tracks no Hemisfério Sul. Ele comparou os resultados obtidos com dados observacionais e com dados gerados pelo modelo do MCGA/CPTEC-COLA (para 10 anos) e verificou que o modelo reproduz a maioria das características observadas. Ele considerou que os quatro meses mais representativos das estações de verão, outono, inverno e primavera, são janeiro, abril, julho e outubro, respectivamente e diagnosticou que a periodicidade quase-quaternal esteve presente em todos os meses. O espectro de potência mostrou que a periodicidade é mais acentuada em outubro e fraca em janeiro. Por outro lado, a periodicidade decadal é significativa em julho, na região da Austrália e bem acentuada em outubro na região do “Storm Track” polar.

Bengtsson et al. (2004b) estudaram Storm Tracks aplicando a metodologia de Hoskins e Hodges (2002, 2003), para os campos de PNMM (pressão ao nível médio do mar) e vorticidade relativa (850, 500 e 250hPa), de sistemas de tempo de diferentes escalas. Os principais resultados obtidos foram: a PNMM tende a focar sistemas ciclônicos de grande escala e a vorticidade relativa os sistemas de menor escala espacial. A comparação foi desenvolvida entre os experimentos e o controle para comparar diretamente com o conjunto de

trajetórias de Hodges (2003 e 2004). Esta metodologia de critérios de combinação foi utilizada por Froude (2007) na avaliação do SPC/ECMWF e comparação com o SPC/NCEP. Hoskins et al. (2005), salientaram a importância de estudos deste tipo devido a necessidade de melhorar as previsões de tempo associadas aos ciclones extratropicais, caracterizando aspectos dos “Storm Tracks” no inverno e no verão do HS com dados da reanálise ERA40. Os autores mostraram que o tempo de vida dos sistemas é geralmente em torno de 5 a 6 dias. Eles detectaram duas áreas de “Storm Tracks”: uma subtropical e uma em latitudes altas. A subtropical é mais intensa no inverno do que no verão.

Uma climatologia de Storm Tracks foi apresentada por Mesquita (2006). Ele utilizou dados de reanálises do NCEP/NCAR para o inverno (dezembro-fevereiro) e verão (junho-agosto) do Hemisfério Norte, para um período de 54 anos (1948-2002). Ele dividiu a área de estudo em cinco sub-regiões estudando a gênese, intensidade, duração e deslocamento dos sistemas, aplicando a metodologia Track introduzida por Hodges (1995). Os resultados de Mesquita revelaram um tempo de vida médio das tempestades entre 5 e 7 dias no verão, enquanto Hoskins e Hodges (2002) encontraram um tempo médio de vida de 4 a 5 dias para o inverno do HN e entre 5 e 6 dias para o do HS.

Mendes (2006) estudou os ciclones extratropicais no Hemisfério Sul (HS), procurando uma melhor avaliação deste sistema em relação à distribuição espacial, variabilidade interanual e mecanismos de formação, a fim de fazer uma climatologia dos sistemas que atuam na América do Sul. Usou dados de reanálise do NCEP/NCAR para um período de 1979 a 2003 para identificá-los e encontrou um máximo local de ciclogênese na área que cobre o leste da Argentina, Uruguai e sul do Brasil. Ele observou que o Inverno e o Verão foram as estações do ano com maior e menor frequência de ciclones extratropicais, respectivamente. Esses resultados concordam com os estudos para o HN de

Hoskins e Hodges (2005). Segundo o autor, o tempo de vida dos ciclones extratropicais na AS não se distingue do verificado para todo o HS, com uma média de cerca de 3 dias. Em relação à distância total percorrida, as variações sazonais são maiores, já que as depressões móveis deslocam-se para leste no Inverno, e são substituídas por uma fração significativa de sistemas quasi-estacionários no Verão.

2.4. Previsão por conjunto

Lorenz (1963) mostrou que uma equação diferencial ordinária não-linear determinística de sistemas finitos pode ser designada para representar um fluxo forçado, dissipativo e hidrodinâmico. Além disso, as soluções para esta equação podem ser identificadas com as trajetórias no “espaço de fase”. Para este sistema com soluções limitadas, foram fundamentadas soluções não periódicas, ordinárias e instáveis com respeito a pequenas modificações. Assim, estas leves diferenças no estado inicial podem evoluir em consideráveis diferenças nos estágios seguintes (perturbações nas condições iniciais usadas em previsão por conjunto). Todas as soluções são fundamentadas para serem instáveis. Neste trabalho, Lorenz examinou a possibilidade de uma previsão de tempo estendida (de longo prazo). Ele trabalhou com sistemas de equações determinísticas idealizadas de sistemas hidrodinâmicos, com interesse principal em soluções não periódicas (soluções as quais nunca repetem exatamente sua história passada, e onde todas as repetições aproximadas são de duração finita).

Posteriormente, Lorenz (1965) estudou a previsibilidade do modelo atmosférico de “28 variáveis” construído através da expansão das equações de um modelo geostrófico de dois níveis em séries truncadas duplas de Fourier. O modelo inclui interações não-lineares entre distúrbios de três diferentes comprimentos de onda. Soluções não-periódicas dependentes do tempo são determinadas

por integração numérica. A taxa de crescimento dos pequenos erros iniciais foi estudada através da comparação das soluções a partir de condições iniciais levemente diferentes. Observou-se que o tempo requerido para os erros crescerem (comparáveis aos erros observados na atmosfera) até tornarem-se intoleráveis é fortemente dependente do padrão de circulação em atividade, e varia de poucos dias a poucas semanas.

Zhang e Krishnamurti (1999) ilustraram a potencialidade da técnica de previsão por conjunto para melhorar previsões de furacão no modelo espectral global da Universidade do Estado da Florida. Este método consiste em perturbar a posição inicial do furacão e o ambiente em grande escala em que a tempestade está inserida. A perturbação da posição foi feita deslocando-se em pequenas distâncias para sentidos diferentes o furacão observado. A análise de funções ortogonais empíricas (EOF) foi usada para encontrar modos de crescimento rápido no estado inicial. Mostrou-se que as previsões do modelo, nos termos da trilha do furacão e de outras variáveis físicas, são muito sensíveis à posição inicial do furacão, à intensidade e ao seu ambiente em grande escala. Os resultados da análise de EOF mostraram também que os modos de crescimento rápido podem ser usados para reduzir a incerteza inicial na análise. A previsão do furacão obtida por estatísticas do conjunto de previsões conduz a uma considerável melhoria nas previsões da trajetória. Para as previsões da intensidade, a previsão por conjunto permite o cálculo de diversos índices estatísticos. O conjunto médio dos membros individuais do SPC fornece uma estimativa da intensidade média prevista. A distribuição espacial dos membros do conjunto fornece uma indicação das regiões previstas com maior chance para o deslocamento do sistema.

Coutinho (1999) idealizou a Previsão por Conjunto do CPTEC. Ela adaptou a metodologia de Zhang (1997) para geração de perturbações apropriada para a região tropical e com uma análise de componentes principais identificando as perturbações de crescimento rápido.

Mendonça (2002) explica a metodologia usada na previsão por conjunto do CPTEC que teve origem no trabalho de Coutinho 1999 e sua implementação em outubro de 2001, quando o SPGC/CPTEC iniciou operacionalmente suas atividades. Segundo o autor, a configuração adotada na implementação de um SPC é escolhida em função da infraestrutura da instituição que o emprega. O CPTEC na época tinha um supercomputador NEC/SX4 com 8 processadores e uma ampla rede de servidoras e estações de trabalho. Isto permitiu a implementação de um SPC com um modelo global T062L28 (aproximadamente 200X200 km próximo ao equador) e 15 membros, sendo um de controle (a partir da condição inicial sem perturbação) e 14 membros de análises perturbadas.

Mendonça e Bonatti (2009) avaliaram o desempenho do SPGC/CPTEC aplicando as perturbações em diferentes áreas do globo. Eles concluíram que o experimento no qual as perturbações foram aplicadas nos extratropicais e nos trópicos simultaneamente foi o que apresentou melhores resultados.

2.5. Avaliação do SPC

Silbergger et al (1982) fez uma análise de erros sistemáticos na previsão de ciclones, utilizando o modelo NMC LFM-II. O autor concluiu que a velocidade de deslocamento dos ciclones era muito lenta em outubro e novembro e muito rápida em março e abril.

Tracton e Kalnay (1993) avaliaram o SPC/NMC. Eles consideram como hipótese que um grande espalhamento, um amplo range de possibilidades, indica um baixo nível de confiabilidade no resultado. Neste trabalho ressaltam que a relação de espalhamento e confiabilidade leva a relação do espalhamento com o desempenho das previsões. No entanto, eles destacam que as correlações entre o espalhamento e o desempenho geralmente tem uma razão pequena.

Buizza (1996) faz uma avaliação da correlação entre o espalhamento do conjunto médio e o skill para o SPC/ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Neste trabalho ele define o espalhamento como a distância média dos membros perturbados para o controle (membro sem perturbação). Para a avaliação do espalhamento, considera o skill da previsão de controle e do conjunto médio e o espalhamento do SPC. Também comparou o skill do conjunto médio com o skill do controle (utilizando correlação de anomalias). Seus resultados mostraram que a relação entre pequeno espalhamento do conjunto com alto skill do conjunto médio é menor do que com a correspondente medida usando o skill da previsão de controle.

Buizza (2004) fala sobre as metodologias usadas no ECMWF, Meteorological Service of Canadá (MSC) e no National Centers for Environmental Prediction (NCEP) para simular as condições iniciais da previsão por conjunto. As características dos três sistemas de previsão por conjunto são comparadas para um período de três meses, de maio a julho de 2002. O autor salienta que os pequenos erros nas condições iniciais aumentam rapidamente e afetam a previsibilidade do modelo, e que os erros dos modelos devido às aproximações utilizadas para simular os processos atmosféricos diminuem o skill da previsão determinística de uma forma imprevisível. Em sua avaliação estatística, ele considerou três atributos (MURPHY, 1973): a confiabilidade estatística (ou consistência); a resolução estatística; e a discriminação. Após estas considerações, calculou índices como Pattern Anomaly Correlation (PAC), Relative Operating Characteristics (ROCs), Root-Mean-Square (RMS) e Brier Skill Score. Sabendo que as características dos padrões de perturbação são diferentes para os três SPC, ele usou uma medida para avaliar o desempenho de previsões por conjunto, desenvolvida por Wei e Toth (2003), a Perturbation versus Error Correlation Analysis (PECA). Os resultados obtidos levaram a conclusão de que o espalhamento da previsão por conjunto é insuficiente para

sistematicamente capturar a atmosfera real, sugerindo que nenhum dos três SPCs era hábil o suficiente quanto à simulação dos erros das condições iniciais da previsão. Segundo ele, a relação entre pontos fortes e fracos dos três, obtida em seu estudo, pode servir de guia para o desenvolvimento futuro de técnicas de previsão por conjunto ou de melhora das já existentes.

Machado et al. (2004) fala dos erros inerentes ao processo de produção de um prognóstico. Neste trabalho ela usa o espalhamento como um preditor do desempenho do SPC/CPTEC e a variabilidade dos membros como forma de avaliar a incerteza da previsão. Quanto maior o espalhamento dos membros do conjunto, maior é o intervalo de soluções possíveis e menor é o nível de confiabilidade da previsão. Os resultados obtidos sugerem que o maior desempenho das previsões esteja relacionado com espalhamento pequeno.

Kalnay et al. (2006) discorre sobre o espalhamento associado a um bom SPC e a um SPC ruim. O SPC bom é aquele que a análise no tempo parece um dos membros do conjunto. Neste caso, a média do conjunto é mais próxima ao observado do que o controle devido à filtragem linear de erros, e o espalhamento está relacionado ao erro da previsão. Caso contrário, devido a uma má escolha de perturbações iniciais e/ou por deficiências do modelo, as previsões não são capazes de acompanhar a trajetória observada, e mantêm-se relativamente próximas umas das outras e afastadas em relação ao observado. Para o desenvolvimento da Previsão Numérica de Tempo (PNT), avaliar um SPC e caracterizá-lo como ruim é bastante útil, pois chama a atenção para a necessidade de melhoria.

Froude (2007a) aplicou a metodologia desenvolvida por Hodges (1995, 1996, 1998) para estudar ciclones extratropicais, sua gênese, trajetória e duração, comparando o uso de diferentes tipos de dados observados (radiosondagens, satélite, dados de superfície, e análise do modelo), com dados da Reanálise ERA40. A autora destaca a importância de investir em reanálises a fim de

obter resultados mais consistentes. Froude (2007b) salienta a importância de bons modelos numéricos de previsão, assim como Buizza, ressaltando a necessidade de boas condições iniciais para o modelo. Mesmo pequenos erros nas condições iniciais se propagam com o passar do tempo, baixando a confiabilidade da previsão. Neste estudo ela avalia a habilidade da previsão de ciclones extratropicais das previsões por conjunto do NCEP e do ECMWF, para o período de 1 ano, em ambos Hemisférios. Froude obteve de forma global que o SPC do ECMWF tem um nível de desempenho ligeiramente superior ao do NCEP, exceto para o Hemisfério Sul (HS), onde o sistema do NCEP apresentou melhor precisão com relação à intensidade das tempestades. Os resultados de ambos SPCs indicaram uma previsão melhor da posição dos ciclones extratropicais do que de suas intensidades e que existe um espalhamento (dispersão entre os membros do conjunto) maior nas previsões de intensidade do que de posição do sistema.

Silva et al. (2008), avalia a habilidade do SPGC/CPTEC quanto às previsões de temperatura mínimas e máximas. Neste trabalho, a avaliação estatística é feita com o viés, o erro quadrático médio e o coeficiente de correlação de anomalia.

Recentemente, Froude (2009) obteve uma avaliação estatística das diferenças regionais na previsão de Storm Tracks no HS e HN, para um ano de dados no período de 6 janeiro de 2005 à 5 janeiro de 2006, com dados do SPC/ECMWF e da análise do modelo operacional do ECMWF. Ela verificou que erros na velocidade de propagação dos ciclones contribuem mais para erros na posição do que para erros na direção de propagação do sistema, obtendo que: entre as regiões estudadas no Hemisfério Norte, a do Atlântico teve um erro na posição dos ciclones maior; no Hemisfério Sul, a variação do erro entre as regiões estudadas não foi significativa; na intensidade do sistema, ela verificou que o erro médio do SPC/ECMWF é maior acima do oceano (Atlântico e Pacífico) do que sobre o continente. A autora encontrou, no erro médio para cada região, que ao longo da trajetória o erro é maior na posição do que na direção,

mostrando que a velocidade de propagação dos ciclones contribui mais para este tipo de erro do que a direção de propagação da tempestade. Ela também verificou que a previsão de uma estrutura vertical incorreta do sistema afeta significativamente a previsão da intensidade e da velocidade de propagação da tempestade.

Machado et al. (2010) aplicaram a técnica de aproveitamento de previsões defasadas. Ela ressalta que os erros das previsões são inerentes ao processo de produção do diagnóstico. Ela argumenta que a previsão média do conjunto representa a melhor estimativa do estado futuro da atmosfera, pois o conjunto médio apresenta um desempenho melhor em relação aqueles dos membros individuais uma vez que alguns erros individuais são cancelados na média. Aborda o espalhamento e sua relação com o desempenho da previsão.

3. MODELO AVALIADO, DADOS E METODOLOGIA

3.1 Modelo avaliado e dados

3.1.1 sistema de previsão de tempo global por conjunto do CPTEC

No CPTEC, a previsão de tempo por conjunto começou com a dissertação de Coutinho (1999). Ela mostrou que a aplicação da previsão de tempo global por conjunto ao modelo de circulação geral atmosférico do CPTEC poderia trazer benefícios para a previsão de médio prazo para diversas regiões do globo, em especial para a América do Sul. Em outubro de 2001, a previsão de tempo por conjunto tornou-se operacional no CPTEC/INPE. A configuração adotada na implementação de um sistema de previsão por conjunto é escolhida considerando-se a infra-estrutura da instituição que o emprega. Atualmente o SPGC/CPTEC tem resolução T126L28 (grade com resolução horizontal de aproximadamente 100x100 km, próximo ao equador e 28 camadas na vertical), com 15 membros, sendo 14 integrados com perturbações nas condições iniciais e 1 a previsão de controle, integrada com as condições iniciais do NCEP sem perturbação. O mecanismo de perturbação usado é o *EOF-based perturbation* de Zhang e Krishnamurti (1999). Este método de perturbação baseado em EOF, foi desenvolvido tendo em vista o fato de que durante os primeiros dias de integração do modelo (cerca de 1,5 dias), as perturbações apresentam crescimento aproximadamente linear.

Os passos para a produção das condições iniciais perturbadas com o método EOF-Based Perturbation Operacional do CPTEC/INPE são:

- a) “n” pequenas perturbações aleatórias são adicionadas aos campos de temperatura e das componentes meridionais do vento, da análise de controle (atualmente $n = 7$). Estas perturbações são normalmente distribuídas com média zero e desvio padrão comparável ao Erro da

previsão de 3 h (de 3 m s^{-1} para o campo de vento e de 0,6 K para o campo de temperatura);

b) “n” análises perturbadas aleatoriamente resultantes e a análise de controle são usadas para integrar o modelo de 36 horas (intervalo ótimo), com saídas a cada 3 horas de integração. Nenhuma suavização horizontal ou vertical ou balanço é imposto para as perturbações iniciais aleatórias, porém as 6 primeiras horas de integração do modelo são descartadas de forma a permitir um auto-ajuste do modelo as condições iniciais perturbadas e, conseqüentemente, o desenvolvimento de perturbações das previsões mais balanceadas;

c) “n” séries temporais da diferença dos campos previstos são construídas subtraindo-se a previsão de controle da previsão perturbada para cada saída do modelo com intervalo de 3 horas;

d) Uma análise de EOF é realizada para cada “n” série temporal em um domínio de interesse para determinar os autovetores da EOF cujos coeficientes aumentam rapidamente com o tempo. Estes autovetores são considerados como EOF perturbadas.

e) Estas perturbações são reescaladas de forma que o desvio padrão destas seja da mesma ordem das perturbações iniciais;

f) adicionando e subtraindo estas perturbações reescaladas à análise de controle e se produz um conjunto de “2n” estados iniciais perturbados dando origem aos 14 membros perturbados (7 positivos e 7 negativos).

Encontrar as perturbações de crescimento rápido, citadas no item “d”, consiste em obter as direções que explicam a máxima quantidade de variância, na qual

as previsões perturbadas aleatoriamente divergem da previsão de controle em um período de otimização em um sentido linear. A Análise de EOF é útil para esta finalidade. 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, descrita no item “c” (MENDONÇA, 2009).

3.1.2 Método track

É uma metodologia objetiva para a detecção e acompanhamento da evolução de sistemas meteorológicos desenvolvida por Hodges (1994, 1995, 1999).

A metodologia TRACK identifica características de interesse em campos meteorológicos e traça sua trajetória. Para ciclones extratropicais a frequência mínima dos dados é de seis horas para o cálculo apurado do Storm Track.

a) Escolha da variável:

Estudos anteriores utilizaram variáveis como o campo de geopotencial, Buizza 1996 (1984), e PNMM, como Murray e Simmonds (1991b). Optar pela utilização do campo de ξ_{850} em relação aos campos anteriores esta associada com algumas considerações: Os campos de geopotencial em 1000 hPa e PNMM são extrapolados de modelo tendo como consequência a possibilidade de serem mais sensível ao escoamento básico e a representação da orografia do modelo, inibindo a detecção do sistema. Com o campo de ξ_{850} identificam-se características em menor escala, tendo pouca influência do fluxo de grande escala. Assim, a característica em estudo pode ser identificada mais cedo no estágio do desenvolvimento do sistema.

Após a escolha da melhor variável para a aplicação da metodologia seguem quatro estágios principais: filtragem dos dados, identificação do objeto, identificação e traçamento do ponto característico.

b) Filtragem

O estágio de filtragem envolve a aplicação de um filtro espectral para os campos do dado bruto para remover a escala planetária com número de onda menor ou igual a 5 (HOSKINS; HODGES, 2002). Isto é necessário para alguns campos, como PNMM, para que as características sinóticas (em torno de 1000km) possam ser identificadas sem serem mascaradas pela grande escala (onda longa acima de 1000km). Para características de pequena escala, identificadas por campos como a ξ_{850} , este filtro tem muito pouco impacto (ANDERSON et al, 2003). O dado também é truncado para o número total de onda zonal 42 (T42) para identificar apenas características de escala sinótica. Este truncamento é necessário para campos semelhantes a vorticidade, para evitar identificação de estruturas de escala muito pequena. O filtro de Hoskins (SARDESHMUKH; HOSKINS, 1984) é aplicado para reduzir o fenômeno de Gibbs.

b) identificação de grupos (objeto)

Os objetos são identificados do campo residual (obtido após a aplicação da filtragem). Estes objetos são regiões em torno de extremos negativos (vorticidade ciclônica-HS) no campo filtrado ξ_{850} . O primeiro estágio no processo de identificação do objeto é a classificação de todos os pontos do objeto ou pontos base (background) usando o limiar de $10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ para a ξ_{850} (HOSKINS; HODGES, 2003), obtendo os extremos negativos (HS) desta variável. Pontos que têm intensidade maior ou igual a este limiar são considerados para serem pontos do objeto e aqueles que têm uma intensidade menor do que esta, são considerados pontos de “background”.

Os pontos do objeto são particionados em grupos distintos, onde cada grupo corresponde a qualquer dois pontos adjacentes ao objeto (Hodges, 1994).

c) Identificação dos pontos extremos

O objetivo desse estágio é identificar o ponto extremo em cada passo de tempo dentro de cada um dos objetos. Como a resolução do dado filtrado é somente T42, os pontos extremos serão significantes limites para a suavização potencial das trajetórias calculadas no estágio final do método. A técnica usada é a de Dierckx (1981, 1984) para a interpolação ou suavização do dado assim que o extremo for localizado dentro de uma caixa de grade. O algoritmo de maximização de Goldfarb (1969) é então usado para identificar os pontos característicos. Para maiores detalhes ver Hodges (1995).

d) Traçamento

O estágio de traçamento é baseado no método de Sethi e Jain (1987) e Salari e Sethi (1990), mas estendido para o domínio esférico (HODGES, 1995).

O traçamento inicia ligando os pontos característicos consecutivos na linha do tempo usando a busca do vizinho mais próximo, que requer que a distância de separação entre dois pontos característicos deve ser menor do que o limite superior do deslocamento (d_{max}). Como a velocidade (intensidade) de movimento da característica pode variar com o local do globo, o limite superior da distancia d_{max} tem que ser regionalmente variável, neste trabalho usa-se o valor para latitudes médias extraído de Froude (2006), Tabela 3.1. Mas, a dificuldade de uma boa malha de dados existe e sabe-se que as trajetórias podem estar incompletas, não detalhando a extensão do sistema para a série de tempo. Então, serão usados pontos fantasmas, metodologia primeiramente utilizada por Salari e Sethi (1990), e uma extensão da metodologia de Sethi e Jain (1987), para evitar que apareçam e desapareçam os pontos característicos durante a série de tempo. Toda distância de separação entre pontos característicos são calculados usando a norma geodésica para evitar um viés que pode ser introduzido quando se usa projeções.

Tabela 3.1 - Parâmetro d_{max} em graus para diferentes regiões. Neste estudo utilizou-se $d_{max}=6$ por analisar sistemas de latitudes médias no HS.

Região	1	2	3
latitude	-20 a -90	-20 a 20	20 a 90
d_{max}	6	3	6

Fonte: Froude (2006).

3.1.3 Variável e período utilizado

Neste estudo, utilizou-se os mínimos de vorticidade relativa no nível de pressão de 850 hPa (ξ_{850}) (Hodges 1995) para o período de inverno de 2009 (JJA) considerando-se uma persistência de no mínimo dois dias e um deslocamento de 1000 km, deste mínimo, para caracterizar um ciclone (Hoskins e Hodges, 2005).

Com este método obteve-se a origem, a intensidade, o deslocamento, a velocidade e a duração de cada sistema, com os dados de previsão dos 15 membros do SPGC/CPTEC. Estes dados foram comparados com os obtidos da análise do NCEP com resolução T382, degradada para a grade T126, que é a utilizada pelo SPGC/CPTEC.

Os sistemas estudados tiveram origem nas áreas ciclogênicas do Golfo de San Matias, nordeste da Patagônia Argentina, e da Bacia do Prata formada pelo Nordeste da Argentina, Uruguai e Rio Grande do Sul (Figura 3.1). Esta avaliação do SPGC/CPTEC considerou somente os ciclones com gênese na análise da 00 UTC. As Tabelas 3.2, 3.3 e 3.4 destacam as características de cada ciclone estudado para junho, julho e agosto respectivamente.

Tabela 3.2 - Ciclones estudados no mês de junho de 2009.

Dia 16:	<p>Origem sobre o oceano a sudeste do Golfo de San Matias.</p> <p>Onze passos de tempo, três dias incompletos de duração;</p> <p>Todos os membros indicaram o mínimo de vorticidade relativa no primeiro passo de tempo e até o último.</p>
Dia 19	<p>Origem no Golfo de San Matias.</p> <p>Teve duração de 19 passos de tempo. Cinco dias incompletos de previsão;</p> <p>Todos os membros indicaram o mínimo de vorticidade relativa.</p> <p>Mas apenas 6 membros indicaram no primeiro passo de tempo e todos previram até o último.</p> <p>Um membro indicou apenas no quinto passo de tempo.</p>

Tabela 3.3 - Ciclones estudados no mês de julho de 2009.

Dia 16	<p>Formou-se na bacia do prata, a oeste do RS;</p> <p>Foram 16 passos de tempo. Quatro dias de duração;</p> <p>Todos os membros indicaram o sistema desde o primeiro passo de tempo;</p> <p>Foi uma ótima previsão. Todos previram muito próximo da formação.</p>
Dia 22	<p>Formou-se na Bacia do Prata;</p> <p>42 passos de tempo. Sete dias de duração. Onze dias incompletos de duração;</p> <p>Nove membros indicaram no primeiro passo de tempo e os outros 6 no segundo. Nenhum membro previu até o final, no máximo até o 28^o passo de tempo (oito dias de previsão).</p>

Tabela 3.4: Ciclones estudados no mês de agosto de 2009. -

Dia 03	Golfo de San Matias; 19 passos de tempo. Cinco dias incompletos de duração; 9 membros indicaram no primeiro passo de tempo.
Dia 8	Golfo de San Matias; 10 passos de tempo. Três dias incompletos de duração; Todos membros previram no primeiro passo de tempo e até o último.
Dia 10	Bacia do Prata; 24 passos de tempo. Cinco dias incompletos de duração; 6 membros previram no primeiro passo de tempo; Todos membros indicaram o sistema.
Dia 16	Golfo de San Matias; 27 passos de tempo. Sete dias incompletos de duração; 4 membros não previram e nenhum membro indicou a duração do sistema, todos chegaram ao sexto dia.
Dia 20	Bacia do Prata; 27 passos de tempo. Sete dias incompletos de duração; Um membro indicou o sistema no segundo passo de tempo; Um membro indicou o sistema apenas no terceiro dia; 8 membros não indicaram o final do sistema.

Obs: A maioria dos sistemas de junho e julho não foi indicada no primeiro passo de tempo. Isto pode estar associado à intensidade do sistema em sua formação, ou ao limiar de vorticidade de $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (HOSKINS; HODGES, 2005) ou devido à resolução horizontal do modelo (uma grade de 100 km pode perder informação do campo de vorticidade relativa).

A escolha da área de estudo está associada à atuação dos ciclones, formados entre o Sul do continente e o Atlântico Sudoeste, nas condições de tempo. Assim, se torna muito importante conhecer a evolução destes sistemas e saber qual a melhor metodologia para prever sua evolução. Por isso, há necessidade de estudos neste sentido.

É importante prever a posição, intensidade e evolução do sistema meteorológico para poder alertar a população quanto a possibilidade de transtornos em seu caminho.

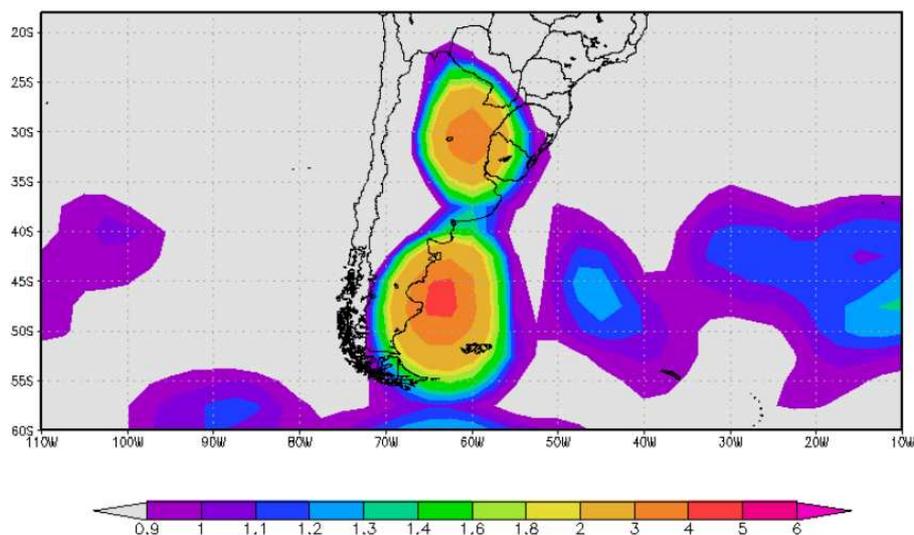


Figura 3.1 - Densidade de Ciclogênese JJA, período 1979-2001.
Fonte: Guia (2011).

3.2 Metodologia

Após obter as posições no tempo e a intensidade das previsões e da análise, calcula-se a distância geodésica entre os membros e a análise em cada ponto, a distância entre os pontos de cada trajetória e a velocidade entre os passos de tempo, calculando médias diárias e com estes dados gera-se a avaliação estatística.

Para que um ciclone possa fazer parte da amostra devem-se levar em consideração os seguintes critérios, a fim de garantir a qualidade estatística (FROUDE, 2007b):

- a) a origem do sistema foi prevista pelo SPGC dentro dos primeiros quatro passos de tempo, $k=4$;
- b) a distância geodésica (d) entre os membros e a análise, explicada na subseção 3.2.1, (Figura 3.2) deve ser inferior ou igual a 4 graus ($d \leq 4^\circ$) nas quatro primeiras integrações do modelo (k). Neste estudo considera-se $k=1$; ou seja, na primeira saída do modelo (previsão de 6 horas) a distância geodésica deverá ser inferior a 4° .
- c) um mínimo de 60% das saídas do modelo combinam com a análise (critério de combinação T, subseção 3.2.2).

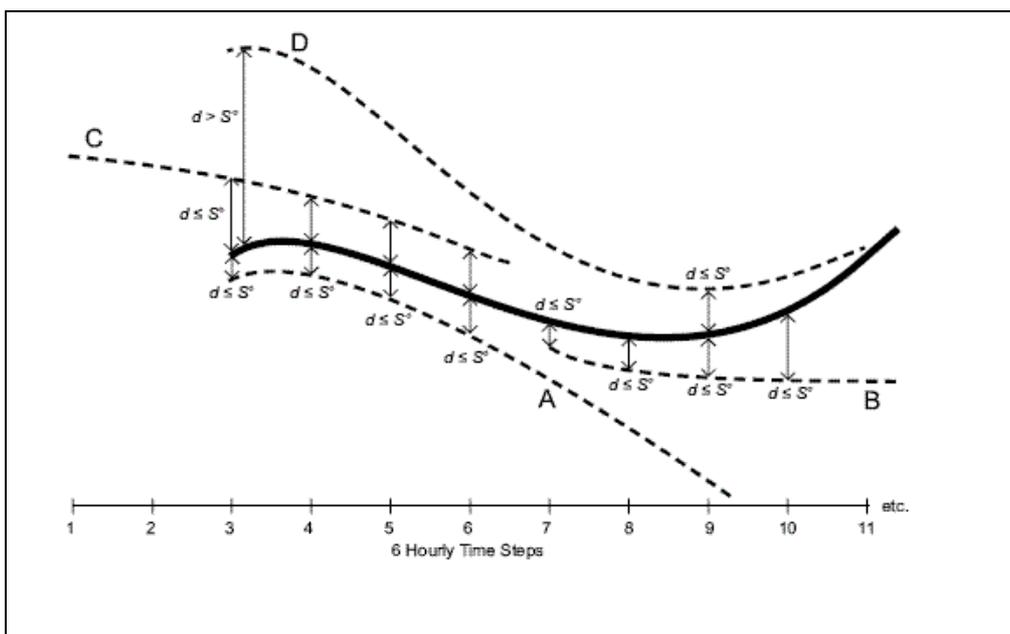


Figura 3.2 - Esquema de combinação espacial. A linha sólida representa a análise e as linhas rachuradas às previsões. As trajetórias A e B foram combinadas e a D não.
 Fonte: Froude (2007).

3.2.1. Cálculo da distância de separação geodésica (d)

A Distância de Separação Geodésica (d), entre os pontos A, da trajetória prevista e B da trajetória da análise, é definida como a distância do semicírculo entre estes dois pontos. Este procedimento (assumindo que a Terra seja uma esfera perfeita) é dado por $\cos^{-1}(P_a P_b)$, onde P_a e P_b são vetores unitários direcionados do centro da Terra até os pontos A e B, respectivamente. Esta medida geodésica é usada para se evitar quaisquer desvios causados pelo trabalho com projeções (a distância de separação geodésica d em relação a S° corresponde à mesma distância em km em qualquer latitude) (FROUDE, 2007b). Esta forma de cálculo de distância é bastante empregada para calcular grandes distâncias sobre a terra, as quais podem sofrer influência da curvatura da terra.

3.2.2. Critérios de combinação T

A percentagem de pontos em que a previsão e a análise coincidem no tempo representado pela letra T , é calculada pela seguinte fórmula:

$$T = 100 \frac{2n_m}{n_a + n_f} \quad (3.1)$$

Onde n_a e n_f representam o número total de pontos nas trajetórias da análise e da previsão, respectivamente, e n_m denota o número de pontos na trajetória da previsão que coincide no tempo com a da análise, que deverá ser de no mínimo 60% dos pontos.

3.2.3. Metodologia de avaliação do SPGC/CPTEC

Os índices aplicados ao SPGC/CPTEC mostram o comportamento do conjunto médio SPGC/CPTEC na previsão de ciclones formados no Sul da América do sul e oceano Atlântico Sul adjacente. As variáveis avaliadas são as intensidades, posições (desvio do membro em relação à análise) e velocidades. A avaliação estatística foi para os primeiros sete dias de previsão, pois devido à pequena amostra de dados e ao tempo de duração dos ciclones, a qualidade estatística seria prejudicada (FROUDE, 2007b).

3.2.3.1. Índices calculados

A avaliação do desempenho do SPGC/CPTEC médio foi feita com base nos índices estatísticos: erro médio (viés), espalhamento em termos do erro quadrático médio e o skill. Esta avaliação estatística foi realizada para sete dias de integração.

O Skill e o espalhamento dão o comportamento do conjunto, que pode ser classificado em ideal ou não ideal (KALNAY, 2006). Já o viés nos mostra o desempenho do modelo na previsão da velocidade e da intensidade dos ciclones estudados (super ou subestimativa).

Viés: é uma forma de avaliar se o modelo considerado superestima ou subestima a intensidade de um sistema ou a ocorrência deste (ver equação 3.2). Valores negativos estão associados à subestimativa e positivos à superestimativa.

$$VIÉS = \frac{1}{n} \sum (F - A) \quad (3.2)$$

Onde n é o número de eventos avaliados, F é a previsão média do SPGC e A é a análise do modelo.

Espalhamento: é uma das medidas padrões da acurácia de um modelo. A variabilidade dos membros do conjunto, ou espalhamento, pode fornecer uma medida da incerteza da previsão. Idealmente quanto maior o espalhamento dos membros do conjunto, maior o intervalo de soluções possíveis da atmosfera e menor é o nível de confiabilidade de uma previsão (MENDONÇA, 2004). Este índice ressalta grandes erros, já que eleva as diferenças ao quadrado. Quanto maior o valor, mais afastada da realidade (análise) está a previsão. A incerteza ou confiabilidade de uma previsão é avaliada em função do espalhamento do

conjunto de previsões. Ele é definido como o desvio padrão das previsões em relação à média do conjunto. Um menor espalhamento está relacionado à maior confiabilidade da previsão, onde há um maior espalhamento confirma-se uma confiabilidade menor (MENDONÇA; BONATTI 2002).

Neste estudo o espalhamento foi avaliado em termos do erro quadrático médio, expresso por:

$$EMSE = \left[\frac{1}{n} \sum (F_i - A)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

Onde F_i é a previsão do SPGC médio para cada evento avaliado.

Skill: É a habilidade da média do SPGC (ver equação 3.4). Ele avalia a previsão média do SPGC levando em conta a previsão determinística (membro sem perturbação ou controle) e a análise. Valor próximo de 100% é o ideal. Indica que a previsão avaliada está semelhante à análise (WILKS, 1995). Caso o valor observado seja 0% não houve melhora da previsão com o SPGC em relação à previsão sem perturbação; e se tiver valor negativo então a previsão média do SPGC teve um aproveitamento pior que a determinística.

$$SKILL = \frac{(A - A_{ref})}{(0 - A_{perf})} \cdot 100 \quad (3.4)$$

Onde:

A = média Membros do SPC;

A_{ref} = previsão sem perturbação da condição inicial;

A_{perf} = análise.

A metodologia utilizada encontra-se ilustrada no diagrama a seguir.



4. RESULTADOS

A pluma de trajetórias previstas e a trajetória observada são mostrados para cada ciclone estudado nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9. Deve-se destacar que foram considerados apenas sistemas detectados na análise da 00 UTC e que o SPGC/CPTEC tenha previsto nos primeiros 4 passos de tempo (ou seja, nas primeiras quatro integrações que são de 6 em 6 horas). Dos casos estudados, cinco ciclones formaram-se no Golfo de San Matias (Figuras 4.1, 4.2, 4.6, 4.7 e 4.8) e quatro na Bacia do Prata (Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.9). Os sistemas com maior deslocamento formaram-se na Bacia do Prata (Figuras 4.4 e 4.9). O deslocamento em formato de espiral em direção ao pólo (VIDAL, 2011) também foi verificado, principalmente nos sistemas com maior trajetória. Possivelmente essa característica está associada ao suporte dinâmico da corrente de jato em altitude e a intensidade da onda baroclínica associada ao gradiente horizontal de temperatura (RAO, 2001).

As Tabelas 3.2, 3.3 e 3.4 mostram características de cada ciclone nos meses de junho, julho e agosto, respectivamente. O mês de agosto teve o maior número de ciclones estudados; dos nove ciclones estudados cinco ocorreram em agosto (Tabela 3.4). Qualitativamente (Figuras 4.1 a 4.9) verifica-se que na grande maioria dos casos estudados a trajetória observada ficou fora da pluma de trajetórias previstas pelo SPGC. O sistema no qual esta diferença entre a trajetória prevista pelo conjunto e a observada foi mais significativa, ou seja, a previsão que teve o pior desempenho do conjunto em relação à posição foi a do ciclone formado no Golfo de San Matias no dia 16 de junho (Figura 4.1). Nesse caso, todos os membros do conjunto afastam-se do observado já no primeiro dia de integração. Embora o modelo tenha previsto o ciclone do primeiro tempo de integração até o último (Tabela 3.2), o erro total da posição em cada passo de tempo, gerado pelo erro na velocidade e na posição, foi o maior observado, (Figura não mostrada).

O ciclone (Figura 4.3) que teve melhor previsibilidade quanto a posição formou na Bacia do Prata no dia 16 de julho. Além da previsão satisfatória da posição o conjunto indicou o sistema desde a primeira integração e previu sua ciclólise (Tabela 3.3).

Quanto à intensidade tanto o controle quanto o conjunto médio subestimaram todos os ciclones (Figura 4.10).

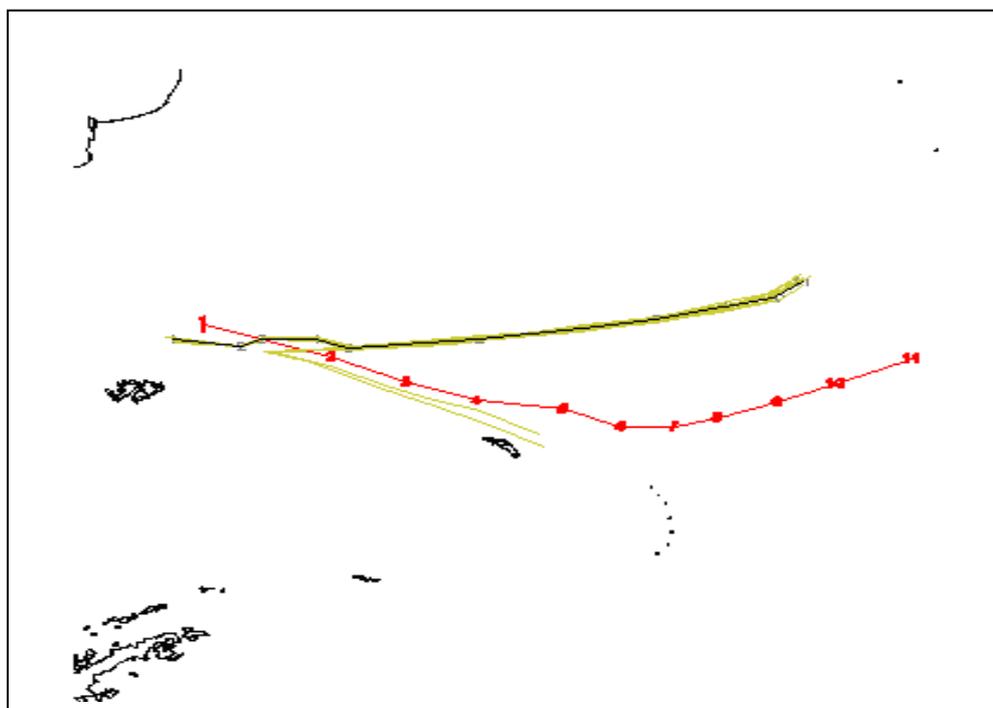


Figura 4.1 - Trajetória do ciclone formado na área ciclogênica do Golfo de San Matias as 00 UTC do dia 16/06/2009, com duração de 11 passos de tempo. A linha vermelha é a trajetória observada, análise NCEP; linha preta é o controle, ou seja, membro do SPGC/CPTEC sem perturbação; linhas amarelas são os 14 membros perturbados do SPGC/CPTEC.

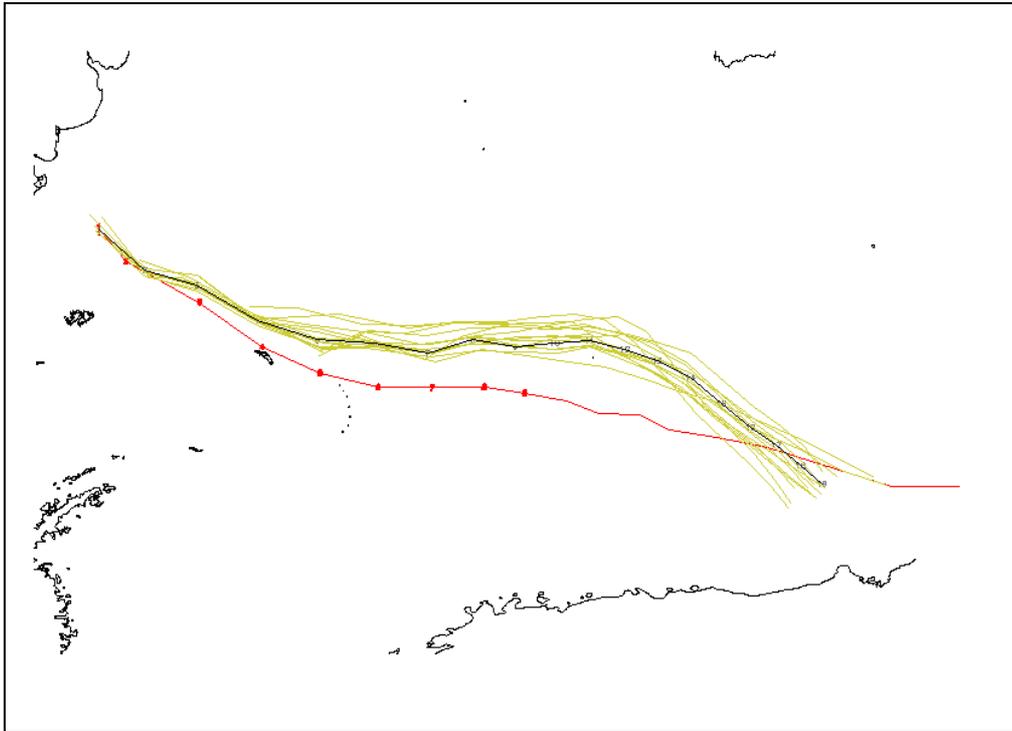


Figura 4.2 - Trajetória do ciclone detectado na área ciclogénica do Golfo de San Matias às 00 UTC do dia 19/06/2009, com duração de 19 passo de tempo. A linha vermelha é a trajetória observada, análise NCEP; linha preta é o controle, ou seja, membro do SPGC/CPTEC sem perturbação; linhas amarelas são os 14 membros perturbados do SPGC/CPTEC.

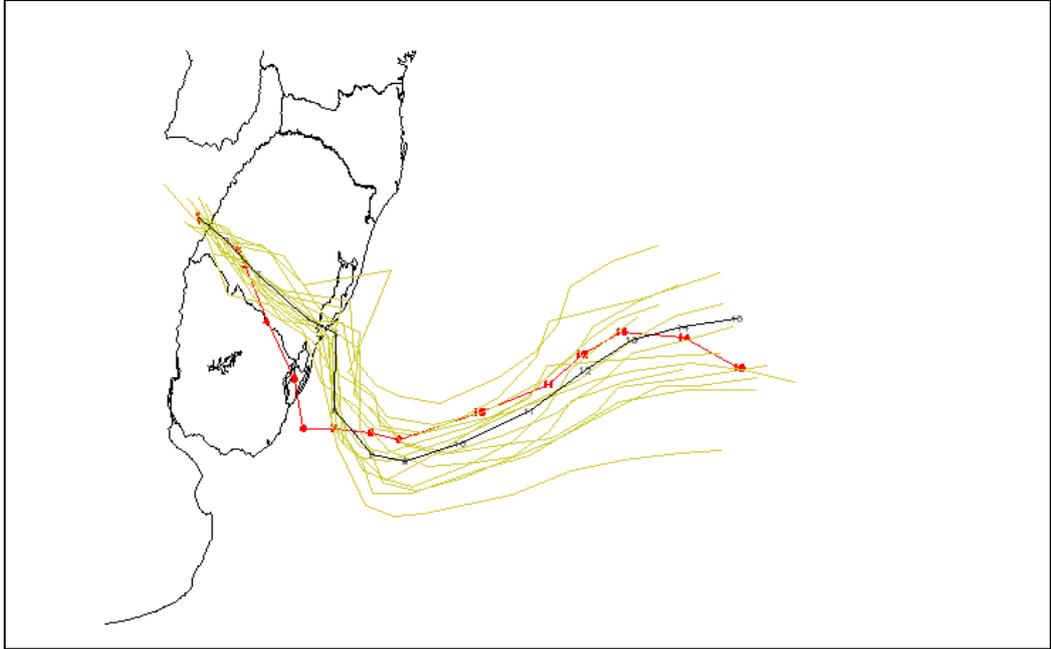


Figura 4.3 - Trajetória do ciclone detectado na área ciclogénica da Bacia do Prata às 00 UTC do dia 16/07/2009, com duração de 16 passos de tempo. A linha vermelha é a trajetória observada, análise NCEP; linha preta é o controle, ou seja, membro do SPGC/CPTEC sem perturbação; linhas amarelas são os 14 membros perturbados do SPGC/CPTEC.

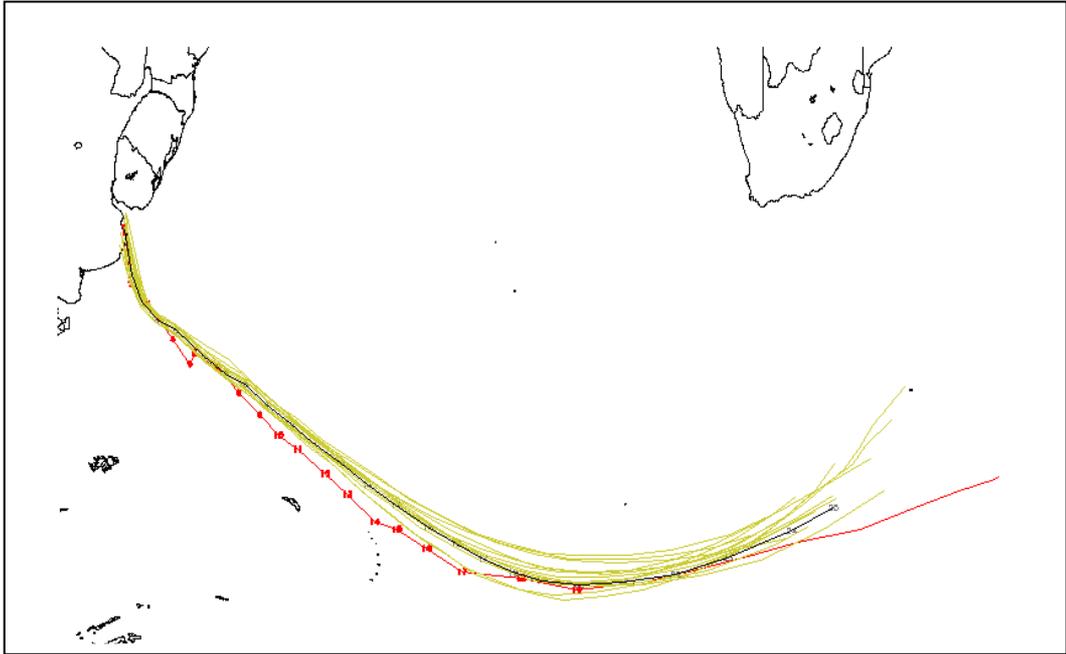


Figura 4.4 - Trajetória do ciclone detectado na área ciclogênica da Baía do Prata às 00 UTC do dia 22/07/2009, com duração de 42 passos de tempo. A linha vermelha é a trajetória observada, análise NCEP; linha preta é o controle, ou seja, membro do SPGC/CPTEC sem perturbação; linhas amarelas são os 14 membros perturbados do SPGC/CPTEC.

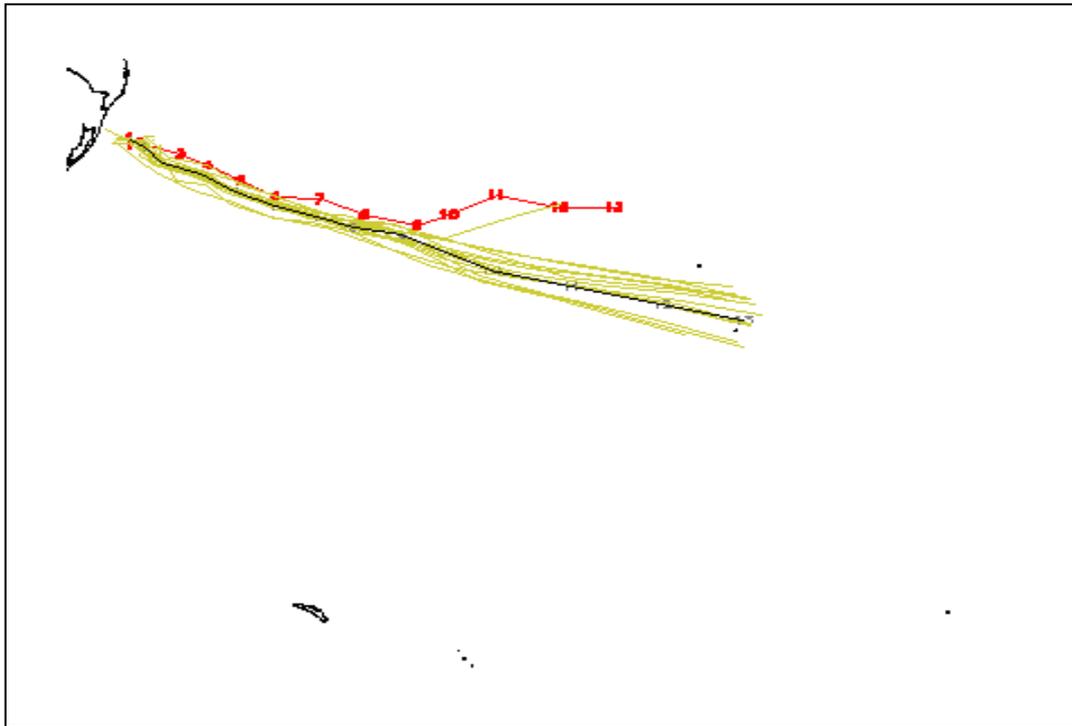


Figura 4.5 - Trajetória do ciclone detectado na área ciclogênica da Bacia do Prata às 00 UTC do dia 3/08/2009, com duração de 19 passos de tempo. A linha vermelha é a trajetória observada, análise NCEP; linha preta é o controle, ou seja, membro do SPGC/CPTEC sem perturbação; linhas amarelas são os 14 membros perturbados do SPGC/CPTEC.

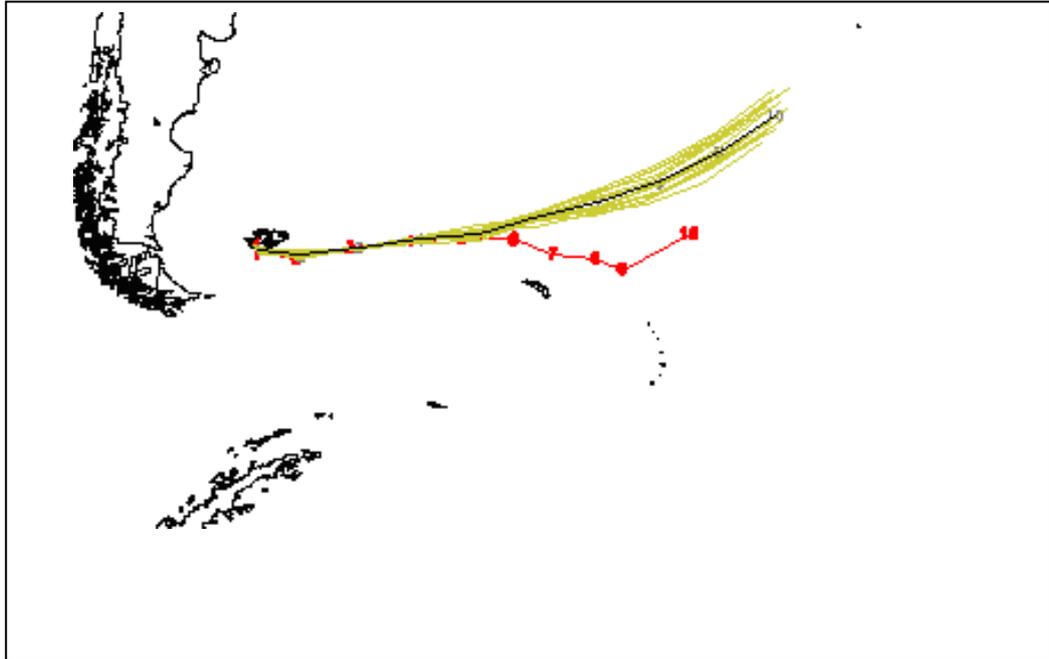


Figura 4.6 - Trajetória do ciclone detectado na área ciclogénica do Golfo de San Matias às 00 UTC do dia 08/08/2009, com duração de 10 passos de tempo. A linha vermelha é a trajetória observada, análise NCEP; linha preta é o controle, ou seja, membro do SPGC/CPTEC sem perturbação; linhas amarelas são os 14 membros perturbados do SPGC/CPTEC.

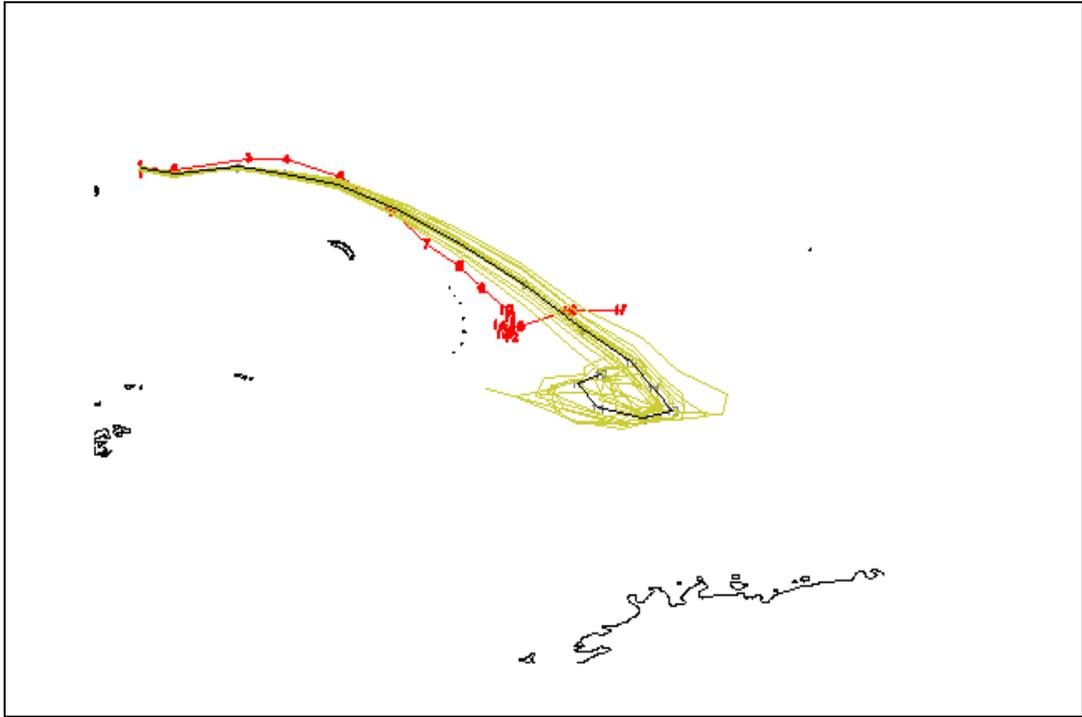


Figura 4.7 - Trajetória do ciclone detectado na área ciclogénica do Golfo de San Matias às 00 UTC do dia 10/08/2009, com duração de 24 passos de tempo. A linha vermelha é a trajetória observada, análise NCEP; linha preta é o controle, ou seja, membro do SPGC/CPTEC sem perturbação; linhas amarelas são os 14 membros perturbados do SPGC/CPTEC.

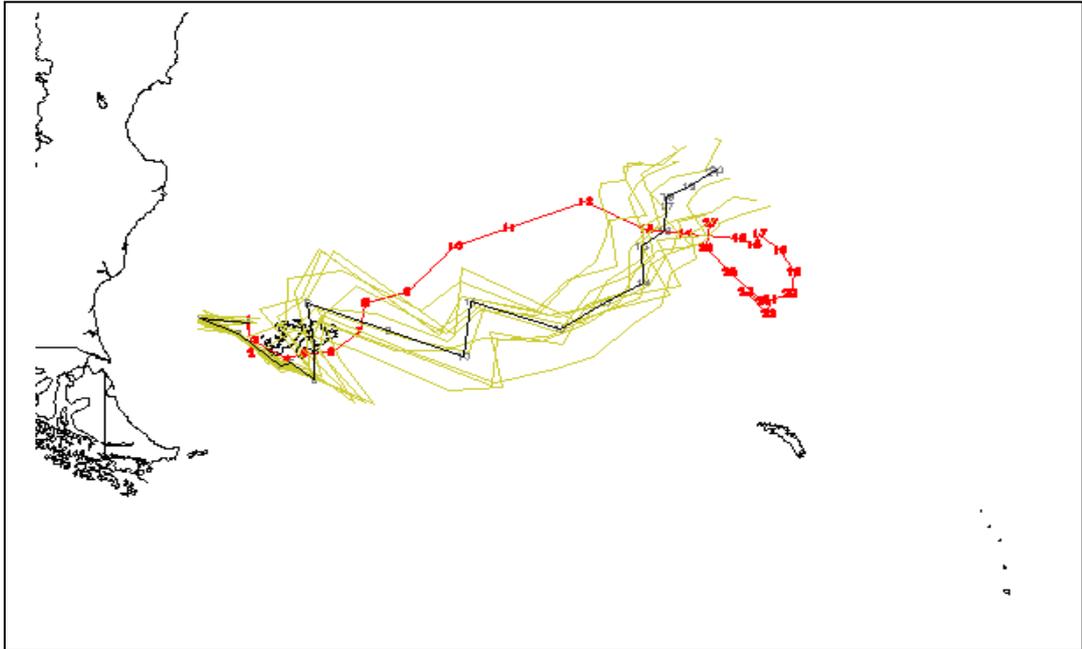


Figura 4.8 - Trajetória do ciclone detectado na área ciclogénica do Golfo de San Matias às 00 UTC do dia 16/08/2009, com duração de 27 passos de tempo. A linha vermelha é a trajetória observada, análise NCEP; linha preta é o controle, ou seja, membro do SPGC/CPTEC sem perturbação; linhas amarelas são os 14 membros perturbados do SPGC/CPTEC.

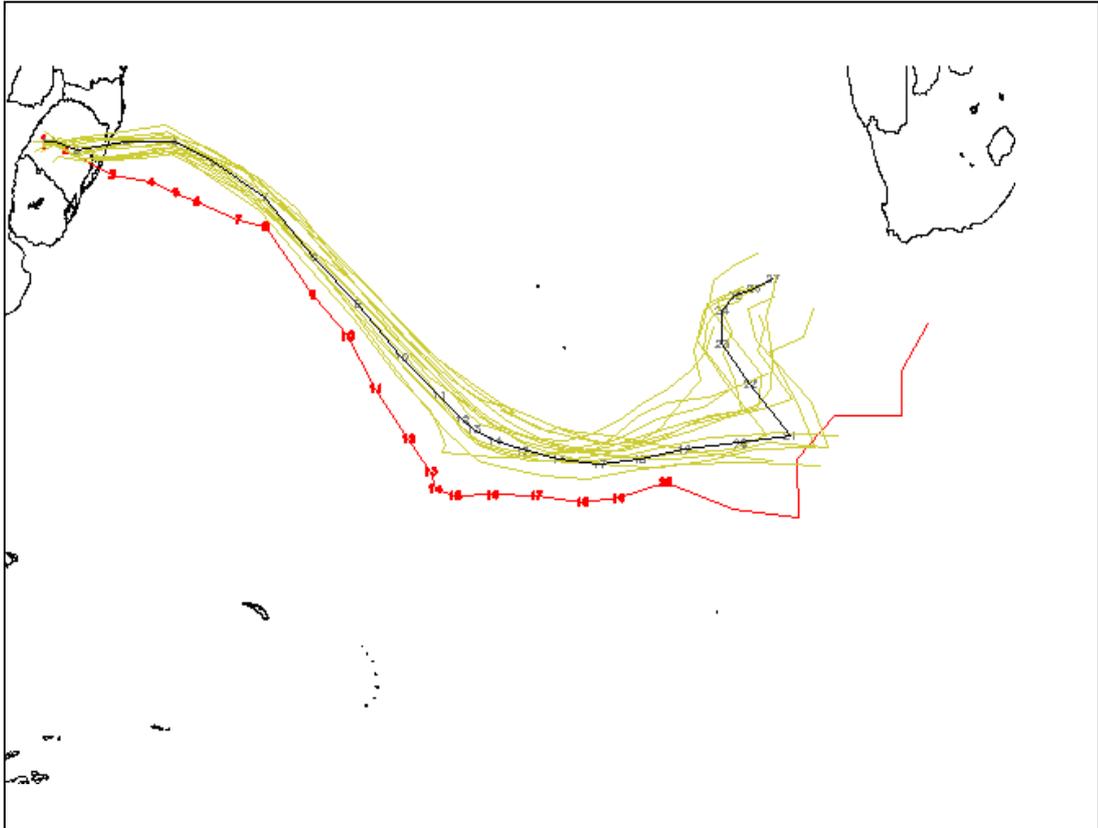


Figura 4.9 - Trajetória do ciclone detectado na área ciclogênica da Bacia do Prata às 00 UTC do dia 20/08/2009, com duração de 27 passo de tempo. A linha vermelha é a trajetória observada, análise NCEP; linha preta é o controle, ou seja, membro do SPGC/CPTEC sem perturbação; linhas amarelas são os 14 membros perturbados do SPGC/CPTEC.

4.2. Conjunto médio e controle

4.2.1. Intensidade e posição

Observa-se, na média dos episódios analisados e para cada prazo de previsão, um desempenho bastante parecido do conjunto médio e do controle para a previsão da intensidade dos ciclones (Figura 4.10). Comparando com a intensidade observada vemos que tanto o conjunto médio quanto o controle indicaram os ciclones com intensidade bem menor que a observada. Esta “subestimativa” pode estar associada à dificuldade do SPC em indicar o ciclone

no primeiro passo de tempo, mesmo que o sistema já tenha sido detectado na análise. Um fator observado em 20% dos casos foi não indicar a duração dos sistemas mais longos. Esta subestimativa pode estar associada à baixa resolução do modelo.

O erro na posição, chamado de erro total (e que aqui foi calculado como a distância geodésica entre cada membro e a análise) é resultado de dois outros erros (não mostrados): o erro ao longo da trajetória que ocorre porque a tempestade prevista tem velocidade de propagação diferente da tempestade observada, e o erro transversal à trajetória que ocorre porque a tempestade prevista toma uma trajetória diferente da tempestade observada (Froude, 2007b). Quanto à comparação da distância geodésica do conjunto médio e do controle, para a média dos episódios avaliados, observa-se um comportamento bastante semelhante (Figura 4.11). Este comportamento pode estar associado ao baixo espalhamento dos membros do conjunto, como pode ser observado nas Figuras de 4.1 a 4.9.

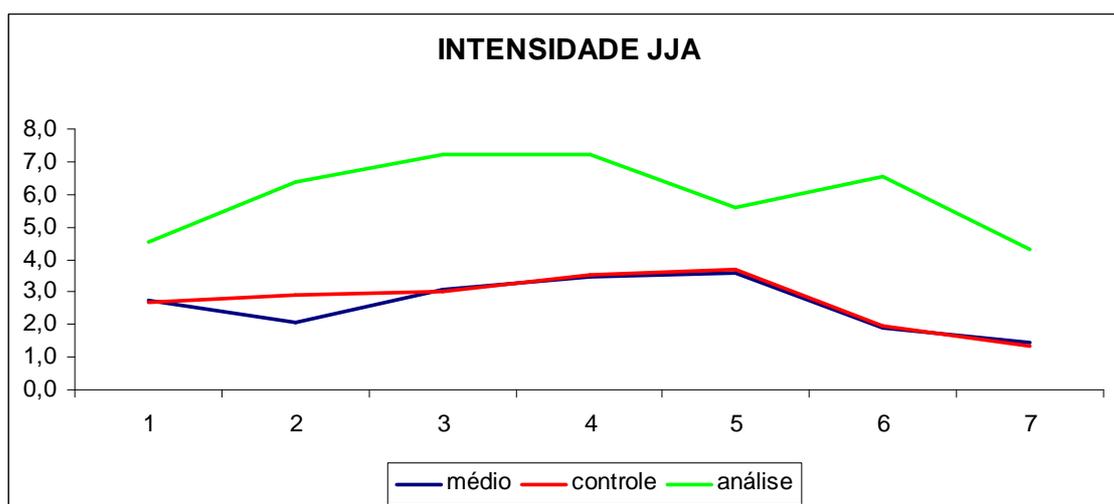


Figura 4.10 - Intensidade média dos membros perturbados (conjunto médio=, azul), intensidade do controle (vermelho) e análise (verde). O eixo y tem os valores da vorticidade relativa (10^{-5}); o eixo x tem os dias de previsão.

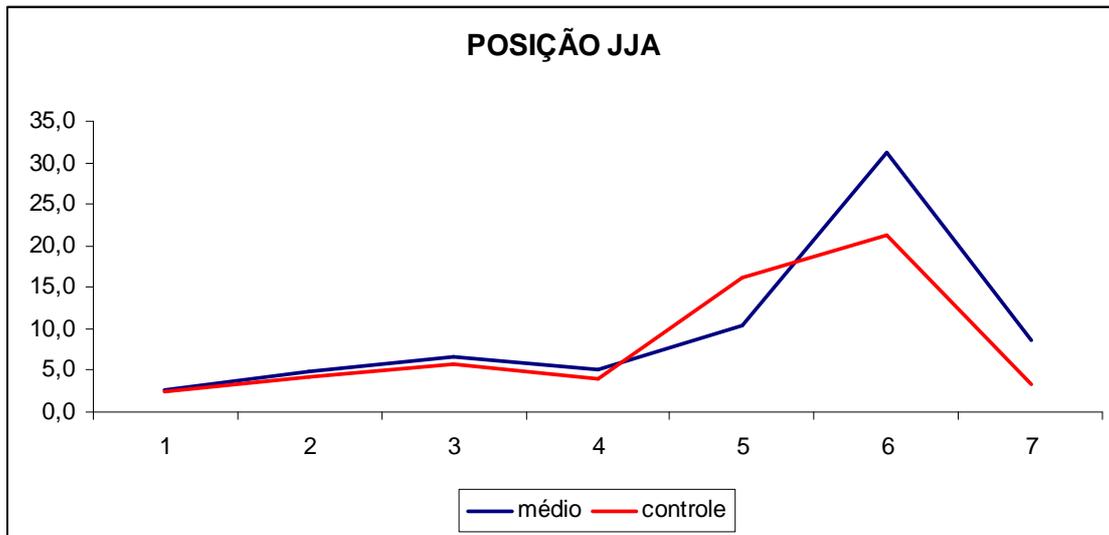


Figura 4.11 - Distância geodésica média (em graus) dos membros perturbados (azul) e do controle (vermelho), erro total da posição. O eixo y tem os valores da distância geodésica em graus; o eixo x tem os dias de previsão. Eixo x são os dias de previsão. Eixo y é a distância geodésica.

4.3. Skill e espalhamento da intensidade e da posição do spc para JJA

Observa-se, para a intensidade dos sistemas, que o skill do conjunto médio em relação à previsão de controle (Figura 4.13) inicia com valores negativos mostrando um desempenho maior do controle (membro sem perturbação) nas primeiras integrações do SPGC. Isto é reflexo dos membros que não indicaram o sistema no primeiro passo de tempo. Ainda no primeiro dia de previsão tem-se uma inversão para valores positivos de skill e que persiste até o quinto dia, mostrando que a previsão média do conjunto foi melhor até o quinto dia de previsão quando o skill mudou de sinal passando a um melhor aproveitamento do controle. Entre o sexto e sétimo dia, a previsão média do conjunto predomina sobre a previsão determinística.

O espalhamento (Figura 4.14) calculado em termos do erro quadrático médio (RMSE), cresce a partir do quinto dia de previsão, seu crescimento é quase linear, principalmente entre os dias seis e sete (final do período avaliado).

Comparando os resultados do skill e do espalhamento para a intensidade dos ciclones no período (Figuras 4.13 e 4.14), mostram principalmente no segundo dia de previsão, um crescimento do skill positivo, o que indica que a média do SPGC foi melhor que o determinístico (controle, membro sem perturbação). No espalhamento para este período observa-se pouca variação, porém os valores são baixos. Segundo estudos anteriores, como Buizza (1996), há uma relação direta entre o espalhamento e a destreza do modelo. Baixos valores de espalhamento são relacionados com alto valor de skill e vice-versa. No entanto, Kalnay et al (2006) ressalta que esta relação depende do comportamento da pluma de previsões (espalhamento) em relação ao observado.

Segundo Kalnay (2006) as previsões por conjunto podem ser divididas em “boas e ruins”, dependendo do espalhamento do conjunto (Figura 4.12a e b). Uma previsão por conjunto ideal tem a análise como um valor intermediário dentro de sua pluma de previsão (Figura 4.12a). Quando se compara o previsto e o observado verifica-se que o observado e a média do conjunto são valores intermediários em relação aos membros (valores intermediários entre os membros iniciados com perturbações positiva e negativa) (Figura 4;12a). Quando o SPC não está dentro do padrão ideal tem a média do conjunto divergindo em relação ao observado (esquema 14b). Desta forma, a trajetória da análise fica fora do intervalo entre os membros com perturbações positiva e negativa.

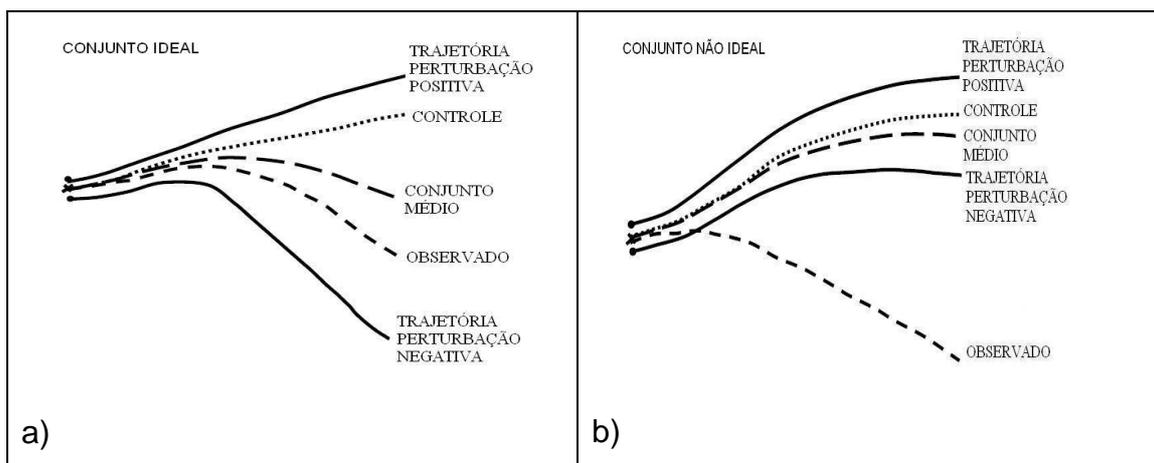


Figura 4.12 - a) Esquema ilustrativo de um espalhamento ideal dos membros de um SPC; b) Esquema ilustrativo de um espalhamento inadequado dos membros de um SPC. Adaptado de Kalnay (2006).

Para visualizar o comportamento do SPGC/CPTEC quanto a sua trajetória em relação ao observado nas Figuras de 4.1 a 4.9 apresenta-se a pluma de trajetórias previstas e também a trajetória observada. Ressalta-se que o modelo foi inicializado com a análise em que já foi detectado o mínimo de vorticidade relativa em 850 hPa. Quando comparamos as trajetórias (Figuras 4.15 e 4.16) concluímos que a previsão do SPGC ainda não alcançou condições ideais. Isto indica a necessidade de melhorias e qualifica o SPGC/CPTEC, segundo Kalnay (2006), como não sendo um conjunto ideal (Figura 4.12b).

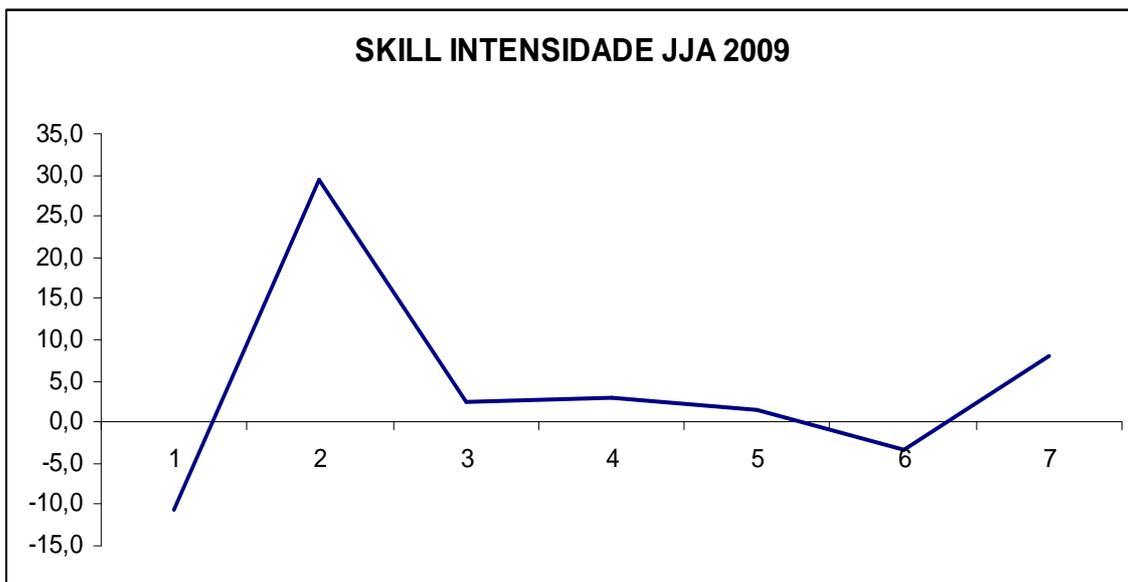


Figura 4.13 - Skill da intensidade para o período estudado. Eixo y tem os valores do skill (%). O eixo x mostra os dias de previsão.

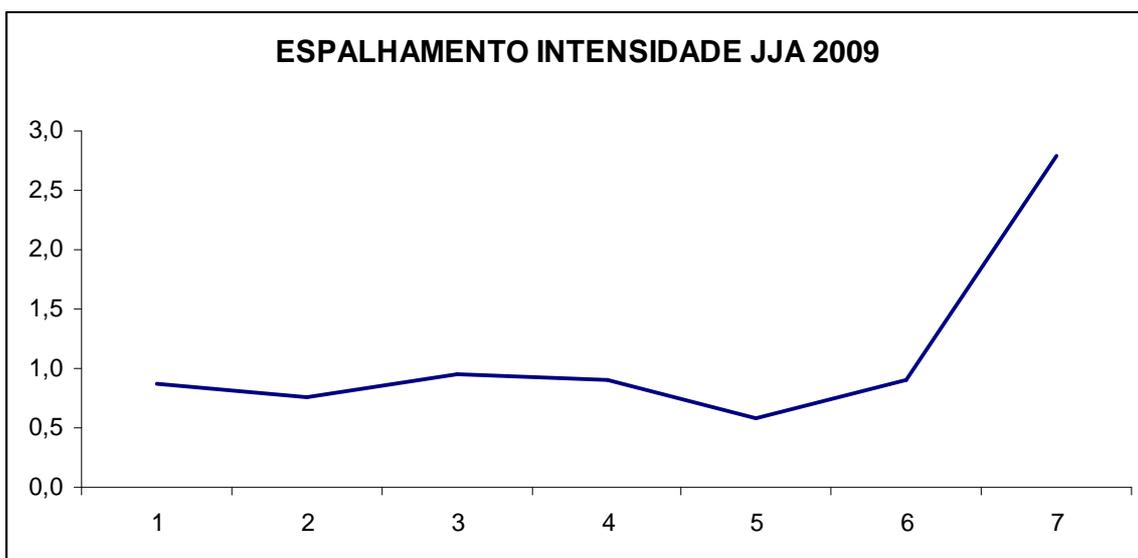


Figura 4.14 - Espalhamento da Intensidade para o período estudado. O eixo x mostra os dias de previsão.

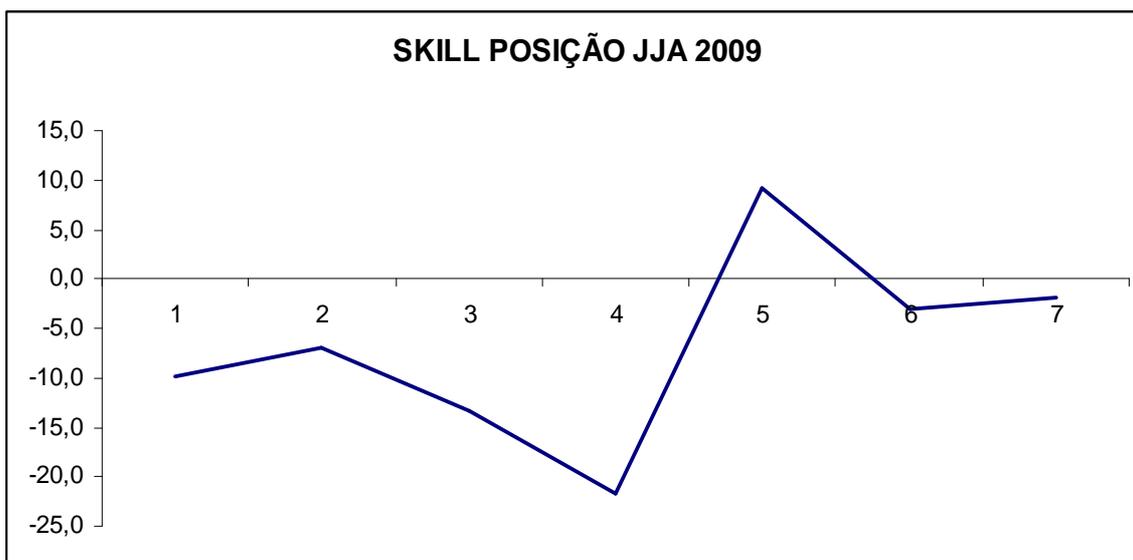


Figura 4.15 - Skill da posição para o período de inverno de 2009. Eixo y tem os valores do skill (%). O eixo x mostra os dias de previsão.

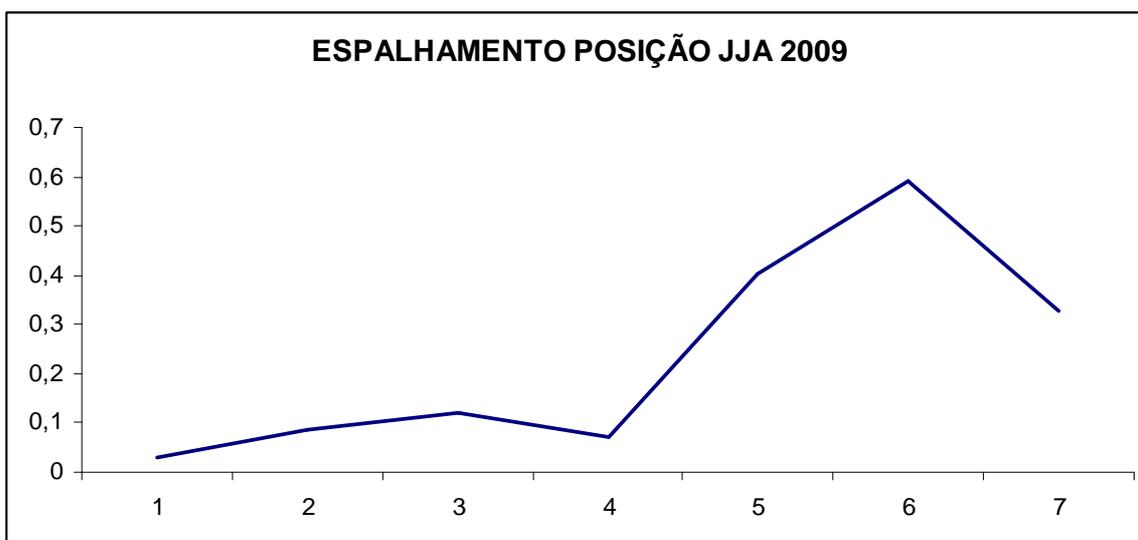


Figura 4.16 - Espalhamento da posição para o período estudado. O eixo x mostra os dias de previsão.

Quanto à posição (Figura 4.15) a média do SPGC teve um aproveitamento inferior ao controle em grande parte do tempo. No quinto dia de previsão verifica-se uma melhora no skill da média do SPGC, voltando a valores

negativos no sexto dia. Entre o sexto e sétimo dia o skill apresenta novamente valores positivos, chegando a 30%.

O RMSE do SPGC/CPTEC foi calculado entre os membros perturbados e a média dos membros. Em geral, observa-se que o espalhamento aumenta a partir do quarto dia de previsão (Figura 4.16). Esse aumento (em termos de RMSE) está associado com o skill mais baixo da previsão para a intensidade (Figuras 4.13 e 4.14, respectivamente). No entanto, para a posição do ciclone, o skill do conjunto foi negativo indicando um aproveitamento inferior ao do controle no início da previsão. Além disto, o RMSE foi maior no final da previsão (Figuras 4.15 e 4.16).

4.4. Viés do conjunto médio para a intensidade e a velocidade

Nesse caso, o viés indica se o modelo está super ou subestimando a intensidade e a velocidade de propagação do ciclone. Para a média dos sistemas estudados, observa-se que tanto para a intensidade quanto para a velocidade, encontrou-se um viés negativo (Figuras 4.17 e 4.18, respectivamente) indicando uma subestimativa do SPGC. Quanto à intensidade (Figura 4.17), ocorreu uma subestimativa em todos os tempos; Para a velocidade (Figura 4.17), houve períodos de previsão, principalmente no segundo e terceiro dia de previsão, com superestimativas (o SPGC indicou o sistema estava mais veloz do que foi observado). O comportamento do viés da velocidade (Figura 4.18) foi irregular. No final do período a subestimativa foi mais significativa.

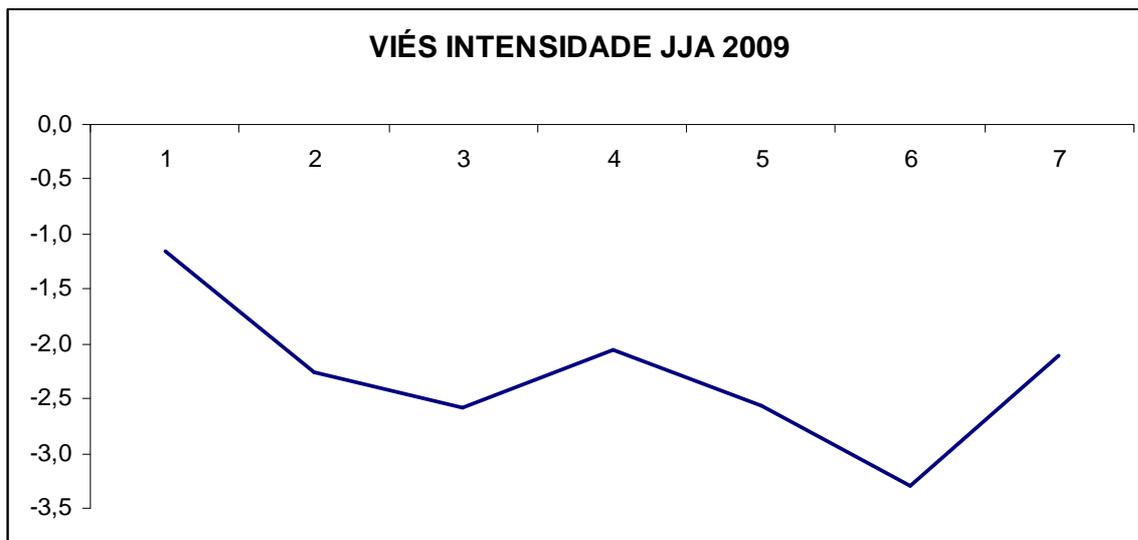


Figura 4.17 - Viés da intensidade para o período de inverno de 2009. Eixo y é o viés; eixo x os dias de previsão.

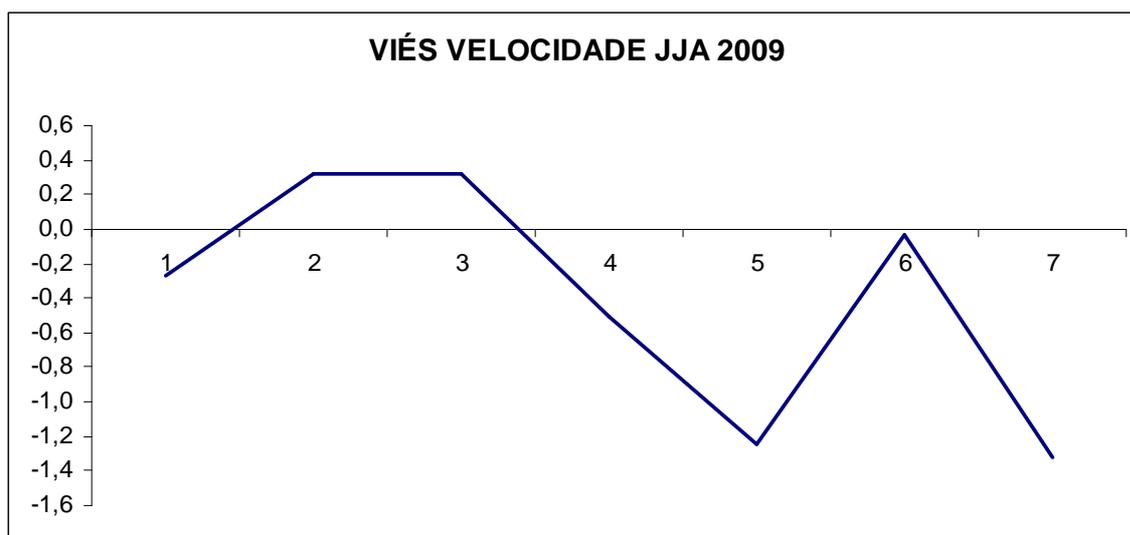


Figura 4.18 - Viés da velocidade para o período de inverno de 2009. Eixo y é o viés; eixo x os dias de previsão.

O viés da velocidade (Figura 4.17) mostra um padrão irregular. A previsão do período começa subestimando, passa a superestimar nos dias dois e três, voltando a subestimar no quarto dia e amplificando e mantendo a subestimativa até o sétimo dia.

4.5. Avaliação dos sistemas divididos em área de origem

4.5.1. Sistemas formados no golfo de San Matias

Observa-se um skill positivo para a intensidade dos sistemas formados no Golfo de San Matias (Figura 4.19). Nos primeiros dois dias os valores de skill foram praticamente zero, quando a previsão de controle e do conjunto médio, são muito semelhantes; e entre o terceiro e o sexto dias o skill foi bom para o conjunto médio, embora baixo (inferior a 16%), ou seja, verificou-se um aumento do desempenho do conjunto médio. Quanto ao espalhamento da previsão da intensidade e da posição (Figuras 4.20 e 4.22 respectivamente), a tendência do SPGC/CPTEC foi de aumentar o espalhamento com o aumento do intervalo de tempo. Como o RMSE é calculado com os membros em relação ao conjunto médio, conclui-se que embora a previsão de conjunto tenha tido um espalhamento pequeno no início da previsão, ela teve um posicionamento bastante diferente do observado (Figura 4.21). Dessa forma, a relação de baixo skill e alto espalhamento e vice-versa não está clara, mostrando que a correlação entre o espalhamento e o skill é pequena (TRACTON; KALNAY, 1993) e depende da pluma da previsão por conjunto, ou seja, da dispersão dos membros do SPGC. No campo de espalhamento, para as duas variáveis (Figuras 4.20 e 4.22) no final do período houve uma diminuição, porém, levando em consideração que poucos sistemas tiveram duração até o sétimo dia, a confiabilidade deste resultado é baixa e deve ser desconsiderada.

Quanto ao viés do modelo (Figuras 4.23 e 4.24), verifica-se um valor negativo para a intensidade em todo o período de previsão (Figura 4.23) o que deixa clara a subestimativa da previsão. Já para a velocidade (Figura 4.24) o viés é positivo no início da previsão passando a negativo a partir do quarto dia de previsão. Isto mostra uma irregularidade na previsão da velocidade do ciclone, e não tem uma grande relação com o prazo de previsão. Esta irregularidade na velocidade não foi observada nos sistemas originados na Bacia do Prata (Figuras 4.29 e 4.30).

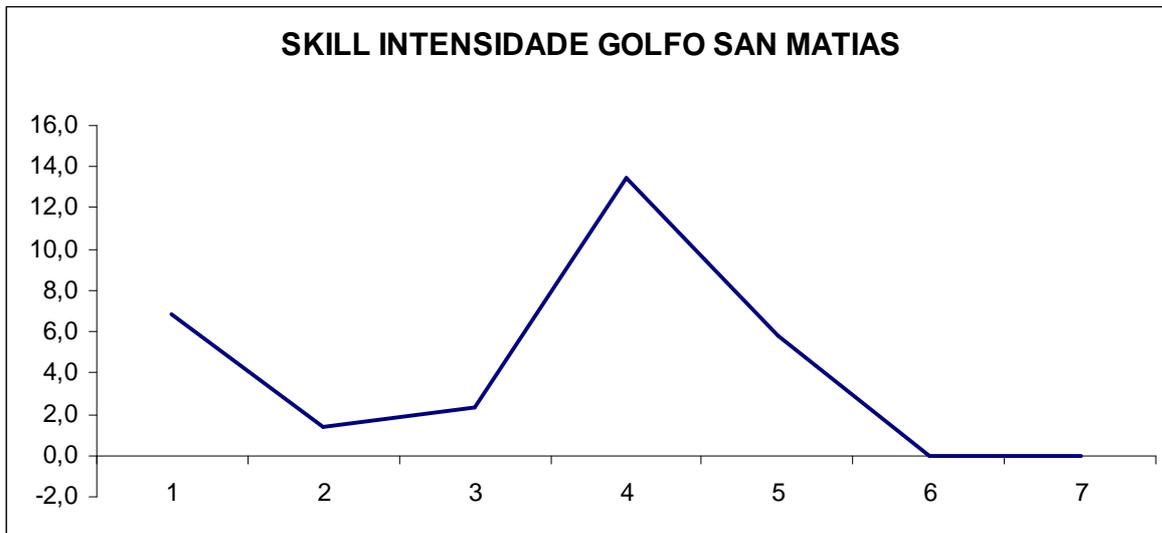


Figura 4.19 - Skill da Intensidade para os sistemas originados no Golfo de San Matias. Eixo y, é o skill, eixo x os dias de previsão.

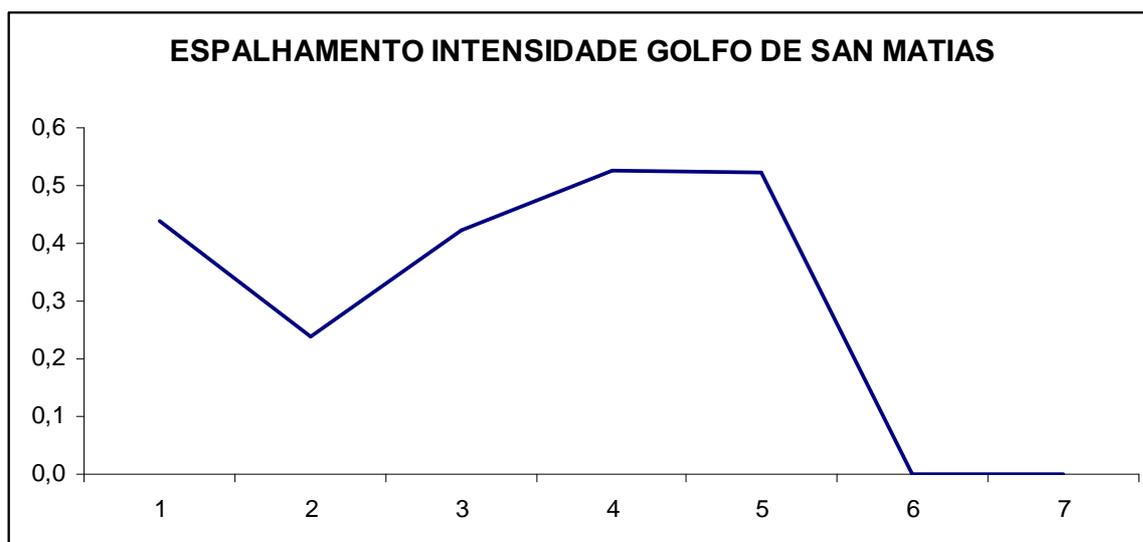


Figura 4.20 - Espalhamento da Intensidade para os sistemas originados no Golfo de San Matias. Eixo y é o espalhamento, eixo x os dias de previsão.

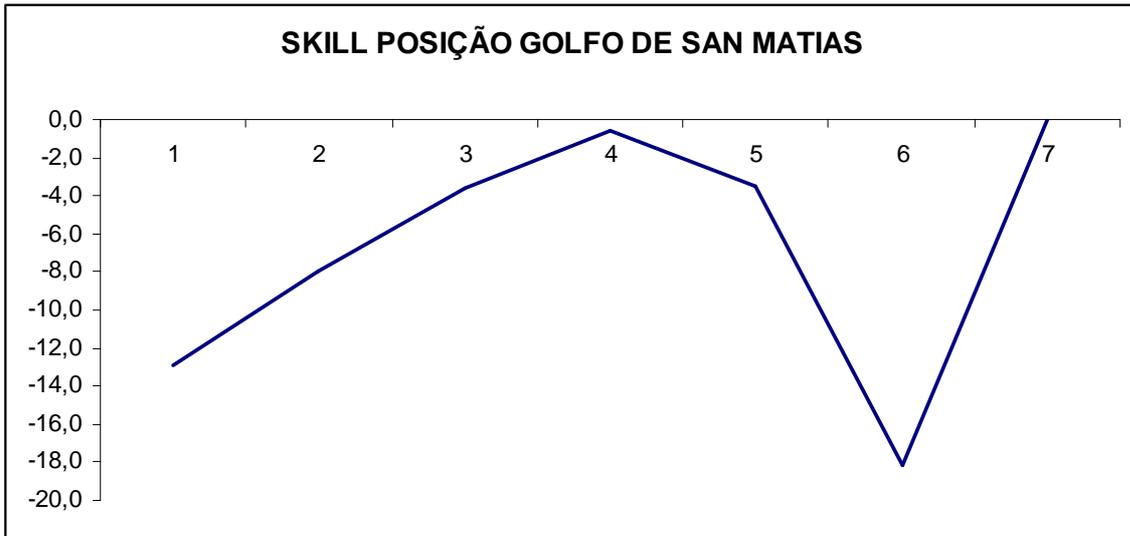


Figura 4.21 - Skill da Posição para os sistemas originados no Golfo de San Matias Eixo y, é o skill, eixo x os dias de previsão.

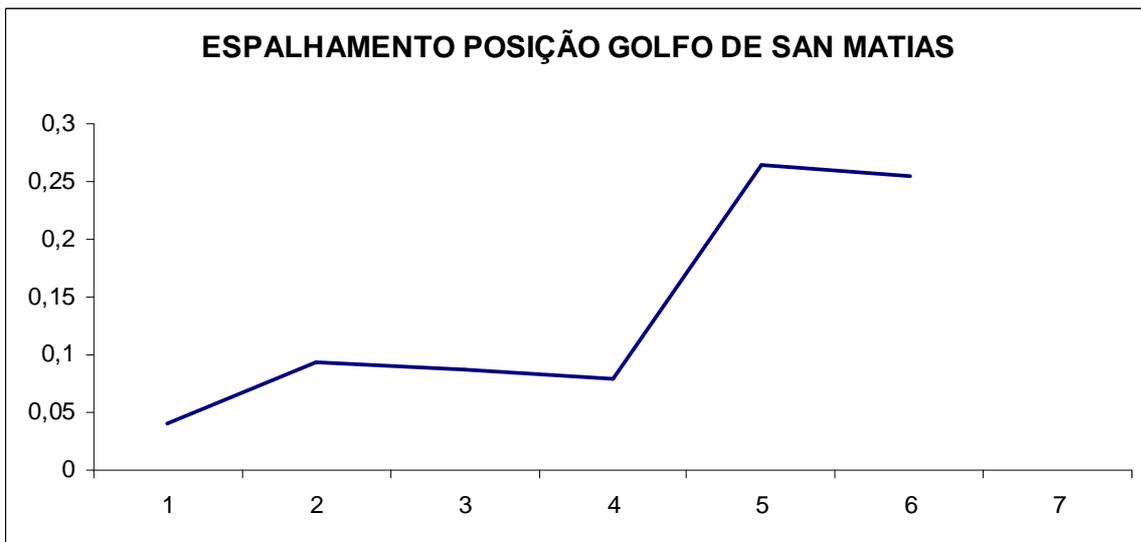


Figura 4.22 - Espalhamento da Posição para os sistemas originados no Golfo de San Matias. Eixo y é o espalhamento, eixo x os dias de previsão.

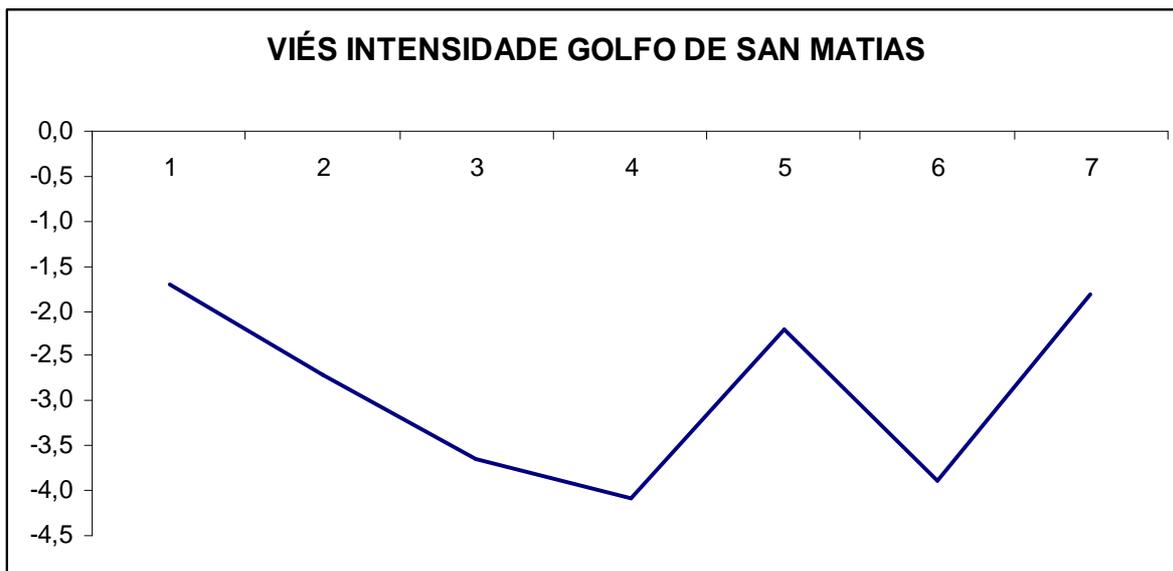


Figura 4.23 - Viés da Intensidade para os sistemas originados no Golfo de San Matias. Eixo y é o viés, eixo x são os dias de previsão.

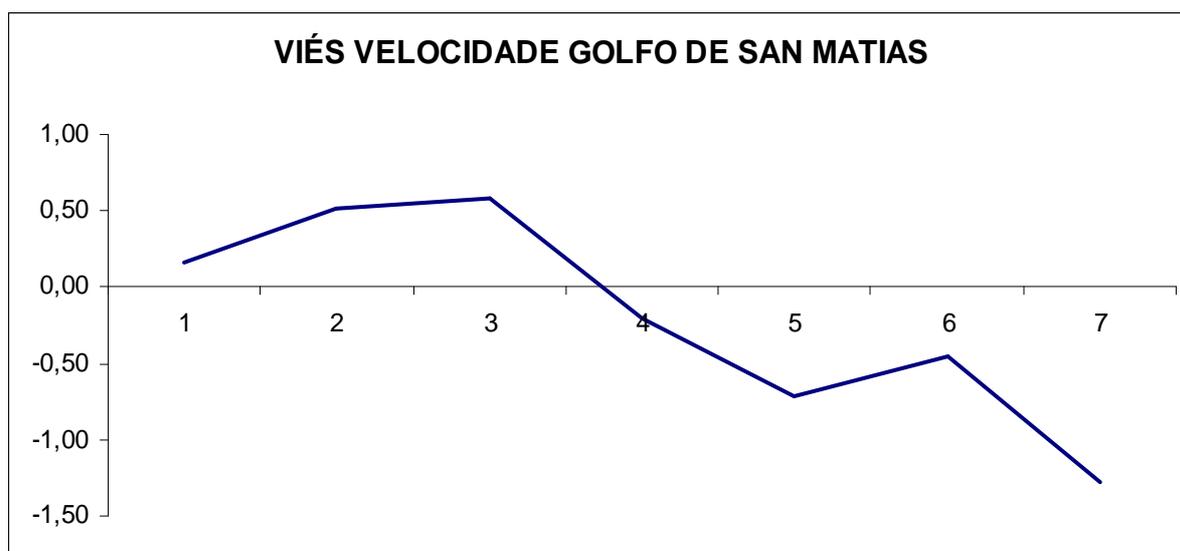


Figura 4.24 - Viés da Velocidade para os sistemas originados no Golfo de San Matias. Eixo y é o viés, eixo x são os dias de previsão.

4.5.2. Sistemas formados na Bacia do Prata

Para os sistemas originados na Bacia do Prata (Figuras 4.25 a 4.30) o skill da intensidade média é próximo de zero em grande parte da previsão (Figura 4.25), indicando um aproveitamento do conjunto em torno do valor do controle. O skill da posição (Figura 4.27) mostrou valores maiores que 10%, porém negativos, o que mostra um aproveitamento do conjunto médio inferior ao do controle, principalmente até o quinto dia da previsão, quando o skill embora baixo, era positivo. O espalhamento foi inversamente proporcional ao skill, principalmente para a posição e em vários prazos de previsão (Figura 4.28). Para a intensidade (Figura 4.26) o espalhamento aumentou de forma quase linear a partir do sexto dia de previsão. No entanto, o skill (Figura 27) foi bastante pequeno não ficando clara uma diminuição neste período, apenas no sexto dia ele foi à zero mostrando uma previsão de conjunto semelhante à de controle.

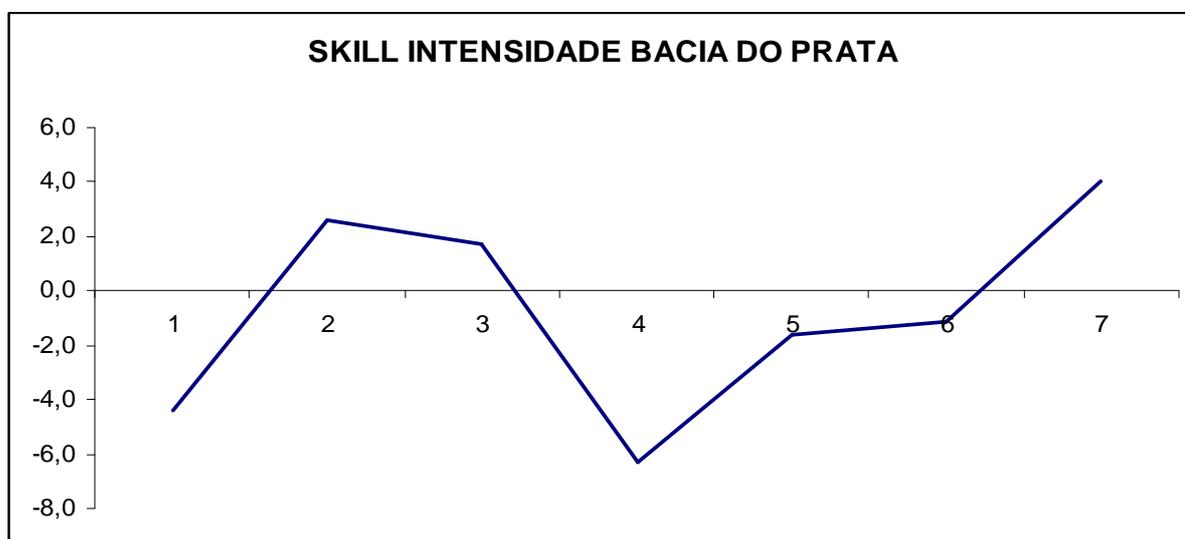


Figura 4.25 - Skill da Intensidade para os sistemas originados na Bacia do Prata. Eixo y, é o skill, eixo x os dias de previsão.

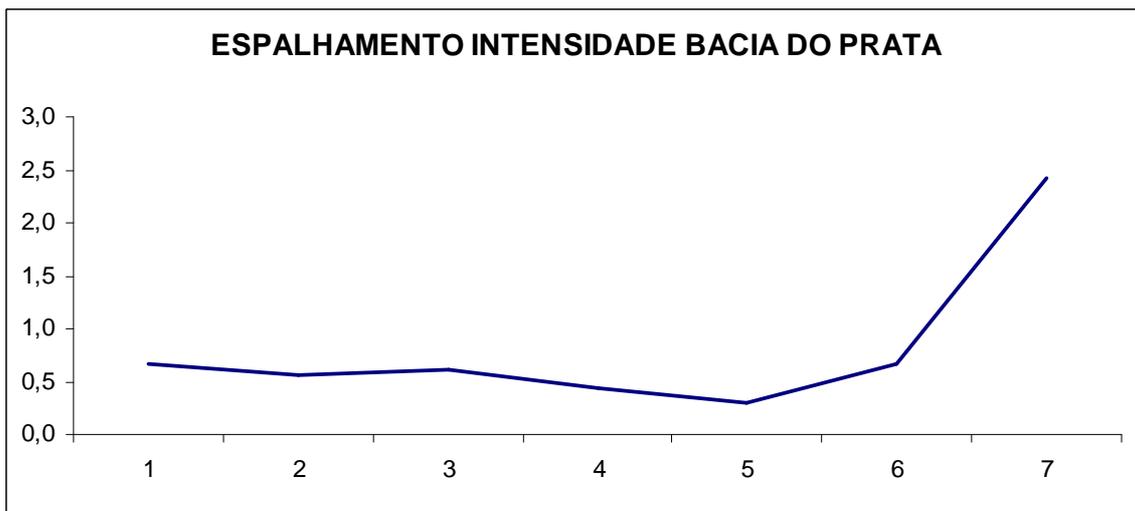


Figura 4.26 - Espalhamento da Intensidade para os sistemas originados na Bacia do Prata. Eixo y é o espalhamento, eixo x os dias de previsão.

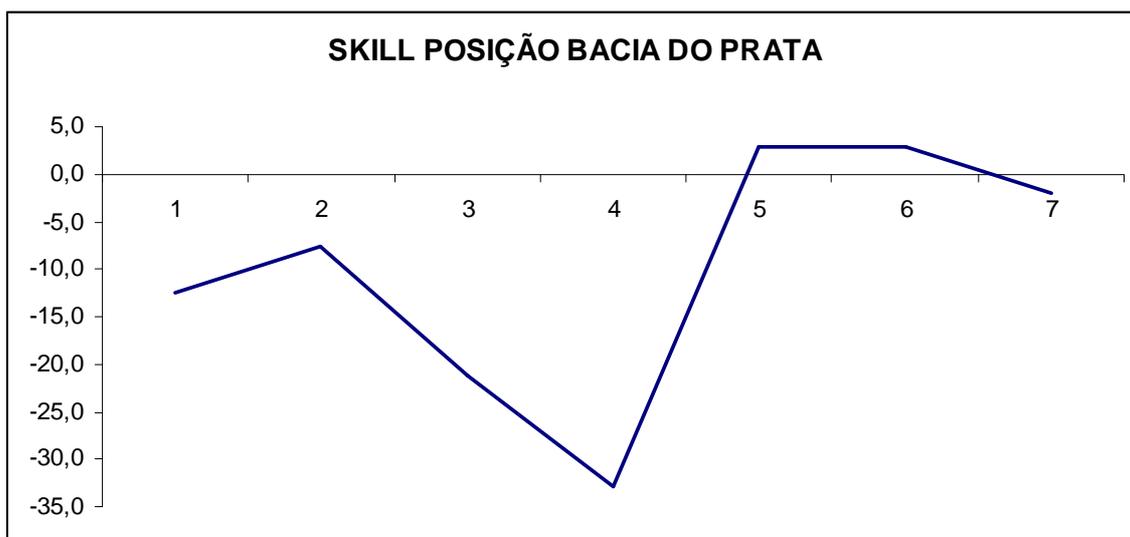


Figura 4.27 - Skill da Posição para os sistemas originados na Bacia do Prata. Eixo y, é o skill, eixo x são os dias de previsão.

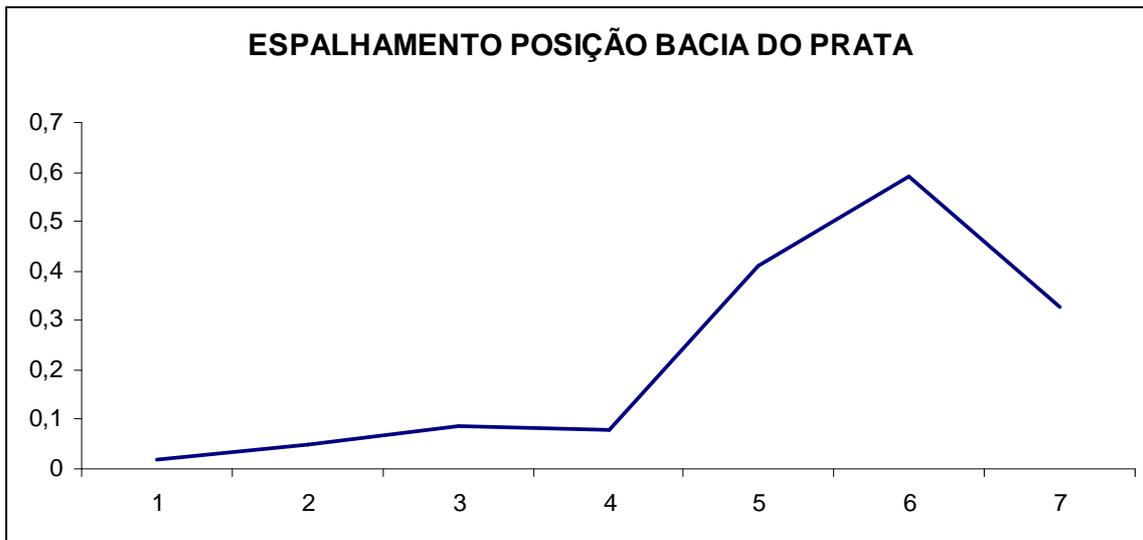


Figura 4.28 - Espalhamento da Posição para os sistemas originados na Bacia do Prata. Eixo y é o espalhamento, eixo x os dias de previsão.

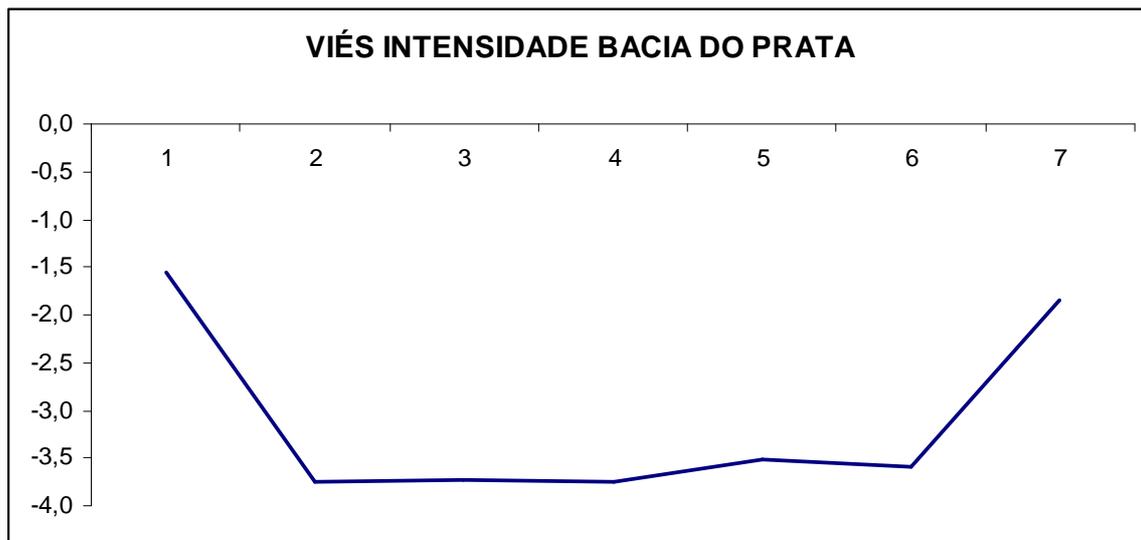


Figura 4.29 - Viés da Intensidade para os sistemas originados na Bacia do Prata. Eixo y é o viés, eixo x são os dias de previsão.

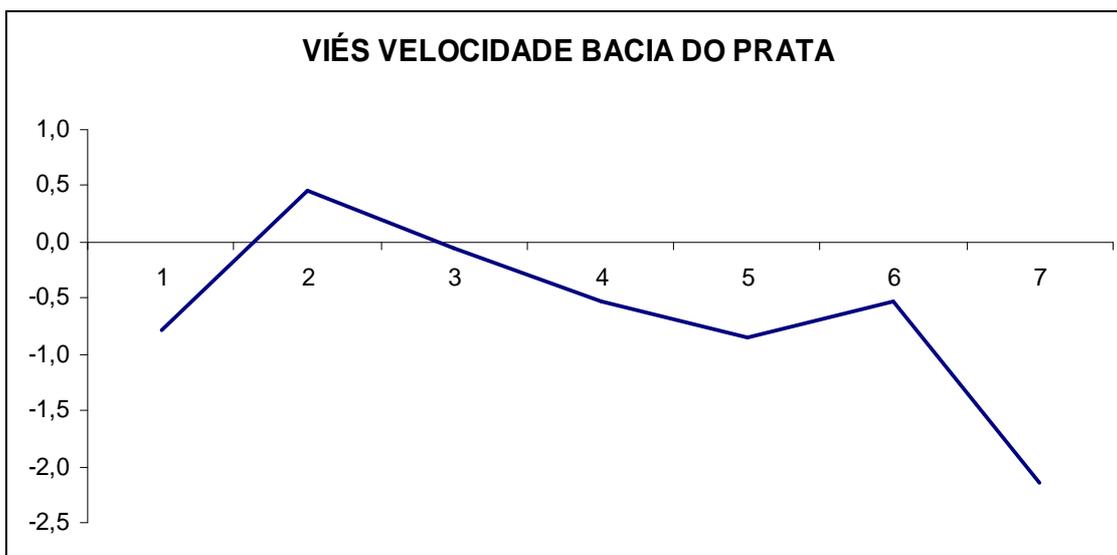


Figura 4.30 - Viés da Velocidade para os sistemas originados na Bacia do Prata. Eixo y é o viés, eixo x são os dias de previsão.

O viés para os sistemas originados na Bacia do Prata mostra que tanto para a intensidade quanto para a velocidade (Figuras 4.29 e 4.30 respectivamente) o comportamento foi semelhante aos que se formaram no Golfo de San Matias (Figuras 4.23 e 4.24 respectivamente) em que se observa uma subestimativa da intensidade dos sistemas em todo o período (Figura 4.29) e uma superestimativa da velocidade entre o segundo e o terceiro dias de previsão (Figura 4.30).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A previsão por conjunto ou previsão probabilística é um conceito ainda em estudo e com grande expectativa de aplicação em previsão de tempo em curto e médio prazo. Por isso, investimentos em SPC e a avaliação destes são muito importantes.

O propósito de avaliar o SPGC/CPTEC quanto à previsão de ciclones originados na América do Sul e adjacências foi alcançado. Os resultados chamam a atenção quanto à necessidade de melhorias no SPGC/CPTEC. Estudos vêm sendo realizados, inclusive visando novas formas de perturbações em outras áreas do globo e em outros campos da análise (MENDONÇA, 2009) e são muito importantes além de gerar boas expectativas.

Neste trabalho chama a atenção o baixo skill do conjunto médio e o baixo espalhamento do período, independente da variável.

No skill, ficou clara a proximidade da previsão de controle com o conjunto médio e em alguns períodos o melhor desempenho da previsão determinística, o que demonstra certa desvantagem do SPGC/CPTEC.

A relação entre skill e espalhamento, seguindo a metodologia de Kalnay, 2006, não caracterizou a previsão probabilística do CPTEC como ideal.

Os resultados obtidos mostram que o viés da velocidade média do SPGC/CPTEC (Figura 4.18) foi subestimado. No entanto com valores inferiores a 1,5 o que pode ser considerado um bom resultado. O viés da intensidade média do SPGC/CPTEC teve valores elevados (até 4,5), mas com predomínio de subestimativa do conjunto. A subestimativa da posição, velocidade e intensidade, predominou durante o período de estudo. Este fator pode ser reflexo da baixa resolução espacial do modelo.

O erro total do sistema em relação à posição mostrou valores acima de 20 graus de distância geodésica depois do quinto dia de previsão, o que também indica um aproveitamento não ideal do SPGC/CPTEC na previsão dos ciclones estudados neste trabalho. Embora a avaliação tenha iniciada a partir do horário em que o sistema foi detectado na análise, nem todos os membros do conjunto indicavam o sistema nos primeiros passos de tempo. Assim, sugere-se que a subestimativa do SPGC pode estar associada às condições sinóticas de ar superior o que reflete na intensidade do sistema obtida com valores de vortacidade relativa.

Quando se avalia os ciclones por áreas de formação, observa-se que os sistemas originados no Golfo de San Matias tiveram um skill melhor para os valores de intensidade em relação aos sistemas formados na Bacia do Prata. Além disto, houve um melhor aproveitamento do conjunto médio em relação ao controle.

6. TRABALHOS FUTUROS

- Aplicar o Track e a avaliação estatística para períodos maiores, incluindo uma avaliação sazonal.
- Analisar o comportamento dos sistemas transientes nos altos e médios níveis troposféricos e relacionar com a origem do ciclone em superfície. Como um exemplo, verificar os centros de vorticidade relativa em 500 hPa e o posicionamento e intensidade das correntes de jato em altitude, para avaliar a situação da onda baroclínica associada ao ciclone na formação e no decorrer da previsão;
- Realizar uma climatologia de vorticidade relativa para os anos de dados do SPGC/CPTEC e avaliar este modelo em relação à sua climatologia.
- Comparar os dados obtidos para o SPGC/CPTEC com dados de reanálise, como por exemplo do ERA Ínterim (ECMWF).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKYILDIZ, V. Systematic errors in the behavior of cyclones in the ECMWF operational models. *Tellus*. v.37A, p. 297-308, 1985.

BENGTSSON L.; HODGES, K. I.; HAGEMAN, S. Sensitivity of large scale atmospheric analyses to humidity observations and its impact on the global water cycle and tropical and extratropical weather systems. *Tellus*, v. 56A, p. 202-217, 2004a.

BENGTSSON L.; HODGES, K. I.; HAGEMAN, S. Sensitivity of ERA40 reanalysis to the observing system: determination of the global atmospheric circulation from reduced observations. *Tellus*, v. 56A, p. 456-471, 2004b.

BENGTSSON, L.; HODGES, K. I.; FROUDE, L. S. R. Global observations and forecast skill. *Tellus*, v. 57A, p. 515-527, 2005.

BLACKMON, L. Na Observation study of the northern hemisphere wintertime circulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*. v. 34, p.1040-1053, 1977.

BRAHMANANDA RAO; CARMO, A. M. C.; FRANCHITO, H. S. Seasonal variations in the southern hemisphere storm tracks and associated wave propagation. *Journal of the Atmospheric Sciences*. v. 59, p.1029-1040, 2001.

BRIER, G.W. Verification of forecast expressed in terms probability. *Monthly Weather Review*. v. 78, p. 1-3, 1950.

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.

BUIZZA, R.; HOUTEKAMER, P. L.; TOTH Z.; PELLERIN G.; WEI M.; YUEJIAN ZHU A comparison of the ECMWF, MSC, and NCEP global ensemble prediction systems. *Monthly Weather Review*. v.133, p.1076-1097, 2005.

CARDOSO, A. O.; MENDONÇA, A. M.; ARAVÉQUIA, J. A.; BONATTI, J. P.; SILVA DIAS, P. L. Correção estatística das previsões de tempo por conjunto do MGCA CPTEC/COLA através da remoção do viés. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XIV - (CBMET), , Florianópolis, SC. *Anais...* 2006. Papel. (INPE-14294-PRE/9382). Disponível em: <<http://www.sbmet.org.br/congresso/index.html>>. Acesso em: 02 ago. 2011.

CARMO, A. M. C. *Os storm tracks no hemisfério sul*. 2002. 125 p. (INPE-11585-TDI/962). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2005/01.25.16.05>>. Acesso em: 02 ago. 2011.

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

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

FROUDE, L. R. S. *The Predictability of Storm Tracks*. A Thesis submitted for the degree of doctor of philosophy. Environmental Systems Science Center. The University of Reading, 2006.

FROUDE, L. S. R.; BENGTSSON, L.; HODGES, K. I. Storm Tracking and Ensemble Prediction. In: A. Tsonis; J. Elsner, (eds.). *20 Years of Nonlinear Dynamics in Geosciences*. S.l.: Springer, 2007.

FROUDE, L. S. R.; BENGTSSON L.; HODGES, K. I. The predictability of extratropical storm tracks and the sensitivity of their prediction to the observing system. *Monthly Weather Review*. v.135, p.315-333, 2007a.

FROUDE, L. S. R.; BENGTSSON L.; HODGES, K. I. The prediction of storm tracks by the ECMWF and NCEP ensemble prediction systems. *Monthly Weather Review*. v.135, p. 2545-2567, 2007b.

FROUDE, L. S. R. Regional differences in the prediction of extratropical cyclones by ECMWF ensemble prediction system. *Monthly Weather Review*. v. 137, p. 893-911, 2009.

GAN, M. A. *Ciclogeneses e ciclones sobre a America do Sul*. 1992. 221 p. (INPE-5400-TDI/479). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1992. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/08.19.11.11>>. Acesso em: 02 ago. 2011.

GUIA, C. V. F. *Análises das características sinóticas das trajetórias dos ciclones extratropicais que atuam na América do Sul e vizinhanças*. 2011. 120 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2010/11.26.17.17-TDI). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/38LS7UE>>. Acesso em: 02 ago. 2011.

HODGES, K. I. A general method for tracking analysis and its application to meteorological data. *Monthly Weather Review*. v. 122, p. 2573-2586, 1994.

HODGES, K. I. Feature tracking on the unit sphere. *Monthly Weather Review*. v.123, p. 3458-3465, 1995.

HODGES, K. I. Spherical nonparametric estimators applied to the UGAMP model integration for AMIP. *Monthly Weather Review*, v. 124, p. 2914-2932, 1996.

HODGES, K. I. Adaptive constraints for feature tracking. *Monthly Weather Review*, v. 127, p. 1362-1373, 1999a.

HODGES, K. I. Extension of spherical nonparametric estimators to non isotropic kernels: An oceanographic application. *Monthly Weather Review*, v. 127, p. 214-227, 1999b.

HODGES, K. I.; HOSKINS, B. J.; BOYLE, J.; THORNCROFT, C. D. A comparison of recent reanalysis datasets using objective feature tracking: Storm tracks and tropical easterly waves. *Monthly Weather Review*. v. 131, p. 2012-2037, 2003.

HOSKINS, B.J.; HODGES, K. L. New perspective on the northern hemisphere winter storm tracks. *Journal Atmospheric Sciences*, v. 59, p. 1041-1061, 2002.

HOSKINS, B.J.; HODGES, K. L. A New Perspective on the southern hemisphere storm tracks. *Journal of Climate*, v. 18, 4108-4129, 2005.

KALNAY, E.; HUNT, B. R.; OTT, E.; SZUNYOGH, I. Ensemble forecasting and data assimilation: two problems with the same solution? In: T. N. Palmer; R. Hagedorn (eds). *Predictability of weather and climate*. New York: Cambridge University Press, 2006.

- LEITH, C. E. Theoretical skill of monte carlo forecasts. *Monthly Weather Review*, v. 102, p. 409-418, 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.
- LE TREUT, H.; KALNAY, E. Comparison of observed and simulated cyclone frequency distribution as determined by an objective method. *Atmosphere*, v. 3, p. 57-71, 1990.
- LORENZ, E. N. Deterministic non-periodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 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.
- MACHADO, L. H. R.; MENDONÇA, A. M.; WEISSMANN, R. B. M.; BONATTI, J. P. Avaliação do uso do espalhamento como preditor do desempenho da previsão de tempo por conjuntos do CPTEC/INPE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16., 2010, Belem, PA. *Anais...* 2010. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/38E2UFE>>. Acesso em: 02 ago. 2011.
- MACHADO et al. Impact da utilização de previsões defasadas no sistema de previsão por conjunto do CPTEC INPE. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, n.1, p. 54-69, 2010.

MENDES D. *Regimes de circulação no Atlântico Sul e sua relação com a localização e intensidade de sistemas activos e com o balanço de vapor na região*. Tese (Doutorado em meteorologia) - Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Física, 2006.

MENDONÇA, A. M.; BONATTI, J. P. O sistema de previsão de tempo global por ensemble do CPTEC. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002, Foz de Iguaçu (PR). *Anais...* 2002. p. 3341-3351. Disponível em: <<http://urlib.net/cptec.inpe.br/walmeida/2003/07.31.15.12>>. Acesso em: 02 ago. 2011. CD-ROM. (INPE-10145-PRE/5673).

MENDONÇA, A. M.; BONATTI, J. P. Experiments with EOF-Based perturbation methods and their impact on the CPTEC/INPE ensemble prediction system. *Monthly Weather Review*, v. 137, n. 4, p. 1438-1459, Abril 2009. doi: <[10.1175/2008MWR2581.1](https://doi.org/10.1175/2008MWR2581.1)>

MENDONÇA, A. M.; BONATTI, J. P. Avaliação objetiva do sistema de previsão de tempo global por ensemble do CPTEC e relação entre o espalhamento e o desempenho do ensemble médio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13., 2004, Fortaleza. *Anais...* 2004. CD-ROM. (INPE-12067-PRE/7413). Disponível em: <<http://urlib.net/cptec.inpe.br/walmeida/2004/09.27.09.40>>. Acesso em: 02 ago. 2011.

MENDONÇA, A. M.; BONATTI, J. P. Experiments with EOF-Based perturbation method to ensemble weather forecasting in middle latitudes. In:

INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOUTHERN HEMISPHERE
METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY, 8. (ICSHMO), 2006, Foz do Iguaçu.
Proceedings... 2006. p. 1829-1832. CD-ROM; On-line. (INPE-13835-
PRE/9017). Disponível em:
<http://urlib.net/cptec.inpe.br/adm_conf/2005/10.31.12.25>. Acesso em: 02 ago.
2011.

MESQUITA, S. M. *Tracking summer extratropical storms: a climatologically
overview and variability on the northern hemisphere*. Tese (Doutorado em
Meteorologia) - University of Bergen, Norway, 2006.

MURRAY, R., J.; SIMMONDS, I. 1991. A numerical scheme for tracking cyclone
centers from digital data. Part I: development and operation of the scheme.
Aust. Meteor. Mag., v. 39, p. 155-166, 1991.

PESQUERO, J. F. *Um estudo de avaliação estatística do modelo global do
CPTEC com relação ao número, trajetória e intensidade de ciclones e
anticiclones para o Hemisfério Sul*. 2001. 149 p. (INPE-10306-TDI/918).
Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas
Espaciais, São José dos Campos, 2001. Disponível em:
<<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2004/01.28.07.50>>. Acesso em: 02 ago.
2011

RAO, V.B.; CARMO, A.M.C.; FRANQUITO, S. H. Seasonal variations in the
southern hemisphere storm tracks and associated wave propagation. *Journal
Atmospheric Sciences*, v. 59, p.1029-1040, 2002.

SALERI, V.; SETHI, I. K. Feature point correspondence in the presence of
occlusion. *IEEE Trans. PAMI*, v. 12, p. 87-91, 1990.

SAWYER, J. S. Observational characteristics of atmospheric fluctuations with a time scale of a month. *Quarterly Journal Meteorology Society*, v. 96, p. 610-625, 1970.

SETHI, I. K.; JAIN, R. Finding trajectories of feature points in a monocular image sequence. *IEEE Trans. PAMI*, v. 9, p. 56-73, 1987.

SILVA et al. Determinação das previsões de temperatura mínimas e máximas a partir do histórico das previsões de tempo por conjunto do CPTEC. *Revista Brasileira de Meteorologia*. v. 23, n.4, p. 431-449, 2008.

SILBERBERG, S. R.; BOSART, L. F. An analysis of systematic cyclone errors in the NMC LFM-II model during the 1978-79 cool season. *Monthly Weather Review*, v. 110, n. 44, p. 254-271, 1982.

TRACTON, M., S.; KALNAY, E. Operational ensemble prediction at the national meteorological aspects. *Weather and Forecasting*. v. 8, n. 3, p. 379-398, 1993.

TRENBERTH, K. Storm tracks in the southern hemisphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*. v. 48, p. 2159-2178, 1991.

ZHANG, Z. *Hurricane ensemble prediction using eof-based perturbations*. PhD Dissertation. The Florida State University, Florida, 1997.174 p.

ZHANG, Z.; KRISHNAMURTI, T.N. A perturbation method for hurricane ensemble predictions. *Monthly Weather Review*. v. 127, p. 447-469, 1999.

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.

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

<http://www.cptec.inpe.br/previsaonumerica/ensemble>

<http://www.ecmwf.int/forecast/guide.html>

<http://www.nerc-essc.ac.uk/~kih/TRACK/Track.html>