

IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE PREVISÕES “DEFASADAS” NO SISTEMA DE PREVISÃO DE TEMPO POR CONJUNTO DO CPTEC/INPE

**Lúcia Helena Ribas Machado¹, Antônio Marcos Mendonça¹,
Renata Weissmann Borges Mendonça¹, José Paulo Bonatti¹**

¹ Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) Cachoeira Paulista-SP, Brasil.

lucia@cptec.inpe.br, mendonca@cptec.inpe.br, renataw@cptec.inpe.br, bonatti@cptec.inpe.br

RESUMO

Neste trabalho é descrita a aplicação da técnica de previsões defasadas no sistema de previsão de tempo por conjuntos do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (EPS-CPTEC/INPE). Os dados do CPTEC/INPE consistem em uma amostra de dois meses com previsões de 15 dias para as variáveis altura geopotencial em 500 hPa, temperatura do ar no nível de 850 hPa e pressão ao nível médio do mar. O estudo consiste em investigar: 1) o desempenho do EPS-CPTEC/INPE utilizando a técnica de previsões defasadas comparado àquele do conjunto operacional; 2) a relação entre o espalhamento e o desempenho da previsão, a fim de avaliar o uso da dispersão como preditor do desempenho. Os resultados indicam que a utilização de previsões defasadas em 12h melhora o desempenho do conjunto operacional, contribuindo para aumentar o espalhamento do conjunto e, conseqüentemente, reduzir a subdispersão do sistema. Também foi observado que o conjunto defasado tem desempenho comparável àquele do conjunto operacional e que há uma tendência de desempenho alto quando o espalhamento é baixo, para os prazos de 5 e 7 dias de previsão. Estes resultados servem como base para a implementação operacional desta técnica, que apresenta baixo custo computacional, e contribui para a utilização mais eficiente das previsões por conjunto do CPTEC/INPE.

Palavras Chave: Previsão de Tempo por Conjuntos, Espalhamento, previsões defasadas

ABSTRACT

In this work we report the application of the lagged average forecasting technique to CPTEC/INPE ensemble forecast. The CPTEC/INPE data consist of two months samples of 15 day forecast for the variables 500 hPa geopotential height, air temperature at 850 hPa pressure level and mean sea level pressure. We focus on the following: 1) Does the lagged averaged ensemble forecast improve forecast skill compared with operational ensemble of CPTEC/INPE? 2) Is the dispersion of the ensemble useful in predicting forecast skill? The results indicate that the utilization of 12h-lagged average forecasts improves the performance of the operational ensemble contributing to increase the ensemble spread and, consequently, to reduce the under-dispersion of the system. Also we observed that lagged average forecast (LAF) shows similar performance to operational EPS-CPTEC/INPE and that there are a tendency to high skill for the ensemble mean when spread forecast is low for 5 and 7 day forecast. These results provide the basis for the operational implementation of the LAF technique, which has low computational cost, and contribute to a more efficient utilization of the CPTEC/INPE ensemble predictions.

Keywords: Ensemble Prediction System, Spread, Lagged Average Forecasts

1. INTRODUÇÃO

As previsões meteorológicas contêm erros que são inerentes ao processo de produção de tais prognósticos. A redução/perda do desempenho dos modelos em prever os movimentos de escala sinótica é causada pelo crescimento dos erros associados a ambos: às incertezas nas condições iniciais (Lorenz, 1963) e às imperfeições no modelo (Reynolds, 1994). Previsões partindo de condições iniciais ligeiramente distintas podem divergir fortemente após algum tempo de integração e, não existe uma única solução para o estado futuro da atmosfera, mas um conjunto de possíveis soluções. Desta forma, a técnica de previsão de tempo por conjunto pode ser uma ferramenta útil para tentar estimar a confiabilidade das previsões, uma vez que, de forma geral, pode considerar as incertezas das condições iniciais e do modelo em sua produção.

A forma mais simples de utilizar as previsões por conjunto é através do conjunto médio, que representa a melhor estimativa do estado futuro da atmosfera. A previsão do conjunto médio apresenta um desempenho melhor em relação àqueles dos membros individuais do conjunto uma vez que alguns erros individuais são cancelados na média (Murphy, 1988; Tracton e Kalnay, 1993).

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 é o intervalo de soluções possíveis da atmosfera e menor é o nível de confiabilidade de uma previsão, ou seja, os valores altos/baixos de espalhamento indicam baixa/alta confiabilidade da previsão (Barker, 1991).

A confiabilidade ou incerteza de uma previsão pode ser avaliada a partir do espalhamento do conjunto (Molteni e Palmer, 1991). O espalhamento pode ser calculado em relação ao conjunto médio ou em relação à previsão de controle e seu valor é definido como sendo a distância média quadrática dos membros em relação ao conjunto médio (Buizza, 1997).

A relação entre o desempenho da previsão e o espalhamento tem sido investigada por vários autores, como forma de avaliar a qualidade da previsão e indicar o limite de previsibilidade do sistema de previsão de tempo por conjunto. Segundo Hoffman e Kalnay (1983) existe uma forte relação entre a dispersão do conjunto e a perda de previsibilidade. Molteni e Palmer (1991) encontraram valores de correlação entre o espalhamento e o desempenho, em termos da raiz do erro quadrático médio (*RMS*), entre 0,3 e 0,4, no 7º dia de previsão, no Hemisfério Norte, para o campo de altura geopotencial em 500 hPa do Sistema de Previsão de Tempo por Conjunto (EPS) do European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Molteni et al. (1996) mostrou, através do diagrama de dispersão entre o *RMS* e o espalhamento das previsões de altura geopotencial em 500 hPa, sobre a região da Europa, que a dispersão e a relação espalhamento/desempenho são maiores no verão, sendo que o espalhamento está mais correlacionado com o desempenho das previsões nos prazos de 5 e 7 dias de previsão. Buizza (1997) também estudou a relação entre estas variáveis e encontrou que há 20% (45%) de correspondência entre o espalhamento e o desempenho de previsões perturbadas no 7º dia de previsão durante estações quentes (frias).

No Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE), o sistema de previsão de tempo por conjunto (EPS-CPTEC/INPE) foi implementado operacionalmente em outubro de 2001 (http://www.cptec.inpe.br/prevnum/exp_ensemble.shtml), motivado pelos estudos de Coutinho (1999), cujos resultados indicaram que a aplicação do conjunto no modelo de circulação geral atmosférico do CPTEC/INPE (MCGA-CPTEC/INPE) poderia trazer benefícios para a previsão de médio prazo para diversas regiões do globo e especialmente para a América do Sul. Mendonça e Bonatti (2004) compararam o desempenho das previsões do EPS-CPTEC/INPE para o período de outubro de 2001 a setembro de 2003 e verificaram que o desempenho do conjunto médio é, na média do período, superior àquele da previsão de controle (determinística). Entretanto, os resultados do trabalho de Mendonça e Bonatti (2006) mostraram que a taxa de crescimento do espalhamento das previsões do EPS-CPTEC/INPE é inferior à

taxa de crescimento dos erros do modelo, o que caracteriza o sistema como subdispersivo.

A utilização de previsões defasadas (“*lagged average forecast*” (*LAF*), em inglês) representa uma das primeiras tentativas de produzir previsões por conjunto e foi apresentada por Hoffman e Kalnay (1983). O método (LAF) considera um conjunto composto de previsões inicializadas a partir de análises consecutivas, em que são incluídas as previsões mais recentes e aquelas iniciadas em um ou mais dias antes. Uma das vantagens deste método é o aumento do número de previsões (membros do conjunto) sem custo operacional. A desvantagem é que as previsões mais antigas podem ter desempenho inferior às previsões mais recentes. Este problema pode ser contornado pela ponderação dos diferentes membros em função dos desempenhos relativos (Dalcher et al., 1988).

É apresentado um esquema para utilização de previsões defasadas no EPS-CPTEC/INPE e é avaliado o impacto da inclusão destas novas previsões no desempenho do conjunto. As principais características avaliadas são o desempenho do conjunto médio e o espalhamento do conjunto, através do cálculo da raiz do erro quadrático médio, da correlação de anomalias e do desvio padrão dos membros do conjunto. É também avaliada a relação entre o espalhamento e o desempenho das previsões de tempo por conjunto, a fim de investigar o uso do espalhamento como preditor do desempenho do EPS-CPTEC/INPE. Na seção 2 são descritos os dados e a metodologia utilizada neste estudo. Os resultados são discutidos na seção 3 e na seção 4 são apresentadas as conclusões.

2. METODOLOGIA

2.1 Dados

Os dados utilizados neste estudo são as condições iniciais (análises) fornecidas pelo National Centers for Environmental Predictions (NCEP) e as previsões de tempo por conjunto

do CPTEC/INPE, nos horários sinóticos 0000 UTC e 1200 UTC, na resolução T126L28 para o período de 10 de julho a 10 de setembro de 2007. Para o cálculo das anomalias do campo de geopotencial foi usado a Climatologia da Reanálise 2 do NCEP (Kanamitsu et al., 2002).

2.2 O Sistema de Previsão de Tempo por Conjunto do CPTEC/INPE

As previsões de tempo por conjunto do CPTEC/INPE são realizadas diariamente duas vezes ao dia (0000 e 1200 UTC) para um prazo de 15 dias. No total são gerados 15 membros (com as integrações do modelo partindo de diferentes condições iniciais), sendo um membro gerado a partir da condição inicial de controle (sem perturbações) e 14 a partir de condições iniciais perturbadas.

As condições iniciais perturbadas do EPS-CPTEC/INPE são geradas utilizando o método denominado “EOF-based perturbation”, desenvolvido por Zhang e Krishnamurti (1999). Este método considera que, durante os primeiros dias de integração do modelo, a perturbação cresce quase linearmente com o tempo. O procedimento de geração da perturbação consiste em adicionar à análise de controle (não perturbada) pequenas perturbações aleatórias, comparáveis aos erros de previsão; integrar o modelo por 36 horas (intervalo ótimo), a partir das análises de controle e perturbadas, com saídas a cada três horas. É realizada então uma análise de Funções Ortogonais Empíricas (EOF) da série temporal formada pela diferença entre a previsão perturbada e a de controle para a obtenção do modo de crescimento mais rápido (considerado como o autovetor associado ao maior autovalor). É realizado um re-escalamento destas perturbações de forma que o desvio padrão destas perturbações seja da ordem das perturbações iniciais. Este modo de crescimento mais rápido é somado e subtraído à condição inicial de controle para formar duas condições iniciais otimamente perturbadas.

2.3 Experimentos com EPS-CPTEC/INPE utilizando previsões defasadas

O novo sistema de previsão de tempo por conjunto a ser testado, conjunto defasado, é representado esquematicamente na Figura 1. Na técnica empregada neste trabalho são consideradas basicamente as previsões iniciando em um determinado tempo t (por exemplo, 00 UTC) e as previsões defasadas em 12 horas, isto é, $t-12h$. As primeiras correspondem aos membros do EPS-CPTEC/INPE atual e às últimas constituem os novos membros que serão agregados ao conjunto, aqui denominados membros defasados.

FIGURA 1

Para avaliar qual configuração é mais adequada ao adicionar previsões defasadas ao EPS-CPTEC/INPE, seis experimentos são avaliados, sendo três incluindo previsões defasadas, um considerando o EPS-CPTEC/INPE operacional e dois experimentos baseados em previsões determinísticas, com e sem defasagem. Os experimentos são:

- o oper15m, que corresponde ao conjunto operacional do CPTEC/INPE, com 15 membros inicializados a partir da análise mais recente. Este experimento será considerado como controle para os demais experimentos;
- o lag15m, cujo conjunto defasado é constituído de 15 membros obtidos a partir das previsões inicializadas 12h antes da previsão mais recente;
- o lag30m, ou conjunto defasado com 30 membros, composto de 15 membros do EPS-CPTEC/INPE, inicializados a partir da análise mais recente e 15 membros, iniciados a partir da análise defasada em 12 horas;
- o lag30mw, similar ao experimento anterior, exceto pelo fato que os membros do conjunto são ponderados pelo inverso do erro quadrático médio na área, média sobre os erros das previsões dos 15 dias anteriores ao da rodada considerada;
- o lagdet e o determ, constituídos de previsões determinísticas do modelo de circulação geral atmosférico (MCGA) do CPTEC/INPE, a partir de análises não perturbadas (apenas uma solução), inicializados a partir da análise defasada em 12h e da análise mais recente,

respectivamente.

Os vários experimentos propostos servem de parâmetro de comparação entre o desempenho das previsões dos modelos numéricos e estão esquematizados na Tabela 1. Nos experimentos lag30m e lag30mw, membros defasados são adicionados ao conjunto operacional do EPS-CPTEC/INPE. A realização destes dois experimentos visa avaliar qual a melhor forma de utilizar as previsões defasadas, ou seja, se há ou não a necessidade de ponderar as previsões mais recentes e defasadas pelos respectivos erros. O experimento oper15m, que representa a configuração operacional, é utilizado como referência para comparação com os experimentos lag30m e lag30mw. Será avaliado se o experimento lag30mw indica melhorias significativas sobre o lag30m, o que justificaria a implementação operacional dele, como fonte adicional de informação ao oper15m. Já o experimento lag15m é avaliado para verificar se, em média, as previsões por conjunto defasadas são muito diferentes das previsões dos 15 membros mais recentes (experimento oper15m). Comparação entre os experimentos determ e lagdet também é realizada com a finalidade de verificar se as previsões inicializadas com 12 horas de diferença possuem desempenhos significativamente diferentes. Isto ajudará a determinar a necessidade ou não de uma ponderação das previsões ao serem consideradas em um mesmo conjunto.

TABELA 1

2.4 Metodologias de Avaliação

A avaliação dos resultados deste estudo é baseada essencialmente em índices estatísticos. Os campos utilizados na realização deste estudo são a altura geopotencial em 500 hPa (Z500), a temperatura do ar no nível de 850 hPa (T850) e a pressão ao nível médio do mar (PNMM). Os índices estatísticos são calculados para as regiões dos extratropicais e trópicos, definidos como Hemisfério Sul (HS - 90°S a 20°S), Hemisfério Norte (HN - 90°N a 20°N) e trópicos (TR - 20°N

a 20°S), respectivamente. O enfoque principal deste estudo são os resultados dos extratropicais do Hemisfério Sul.

Os índices estatísticos utilizados para a avaliação são: a correlação de anomalias (*CA*), a raiz do erro quadrático médio (*RMS*), o espalhamento do conjunto (*SPD*) e o coeficiente de correlação linear (*r*), entre a *CA* e o *SPD*. Estes índices são brevemente descritos a seguir.

a) Conjunto Médio

A fim de comparar o desempenho das previsões do conjunto e a previsão de controle foi calculado o conjunto médio para cada ponto de grade *j* do modelo, de acordo com a equação

(1):

(1)

onde *i* é o índice para a previsão de cada membro, *N* é o número total de membros do conjunto, F_j^i é o campo previsto por cada membro *i* para cada ponto *j*, e EM_j é a previsão do conjunto médio.

b) Correlação de Anomalias

A correlação de anomalias (*CA*) é uma medida freqüentemente usada para avaliar o desempenho de modelos de previsão e é definida como a correlação entre uma anomalia (isto é, diferença em relação à climatologia) de um campo previsto e uma anomalia do campo da análise de verificação, ou seja, a correlação de anomalias é a razão entre a covariância e a raiz quadrada do produto de duas variâncias esperadas:

$$CA = 100 \times \frac{\sum_{j=1}^J [(F_j - C_j) \times (A_j - C_j)] \times W_j}{\left\{ \sum_{j=1}^J [(F_j - C_j)^2 \times W_j] \times \sum_{j=1}^J [(A_j - C_j)^2 \times W_j] \right\}^{\frac{1}{2}}}, \quad (2)$$

onde: (σ_j) significa o desvio da média na área, j é o índice para cada ponto de grade sobre as regiões de avaliação neste estudo (HN, TR e HS), J é o número total de pontos na área de estudo, W_j é o peso para a área que o ponto representa, definido como sendo o cosseno da latitude de cada ponto de grade j . F_j é o campo previsto, A_j é o campo analisado, C_j é o campo climatológico, $(F_j - C_j)$ é a anomalia prevista para o ponto j e $(A_j - C_j)$ é a anomalia observada no ponto j .

c) Espalhamento

O espalhamento do conjunto (*SPD*) fornece uma estimativa da confiabilidade ou incerteza de uma previsão. É definido como a distância média quadrática dos membros do conjunto em relação ao conjunto médio e é calculado conforme a equação:

$$SPD = \frac{\sum_{j=1}^J \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_j^i - EM_j)^2 \right]^{1/2} \times W_j}{\sum_{j=1}^J W_j}, \quad (3)$$

onde os campos e os índices da equação (3) assumem o significado descrito anteriormente.

d) Raiz do Erro Quadrático Médio

A raiz do erro quadrático médio na área (*RMS*) é definida como sendo a raiz quadrada da razão entre a soma das diferenças quadráticas entre os campos previstos F_j e analisados A_j , ponderado pelo peso W_j de cada ponto de grade, e a soma dos pesos W_j , da área avaliada:

$$RMS = \left\{ \frac{\sum_{j=1}^J (F_j - A_j)^2 \times W_j}{\sum_{j=1}^J W_j} \right\}^{1/2}, \quad (4)$$

e) Relação entre o desempenho do EPS-CPTEC/INPE e o Espalhamento

O coeficiente de correlação linear (r) entre a correlação de anomalias e o espalhamento do conjunto é calculado através da expressão:

$$r = \frac{1}{K} \frac{\sum_{k=1}^K (SPD_k - \hat{SPD})(CA_k - \hat{CA})}{\left[\sum_{k=1}^K (SPD_k - \hat{SPD})^2 \sum_{k=1}^K (CA_k - \hat{CA})^2 \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (5)$$

onde SPD e CA são o espalhamento e o desempenho da previsão, respectivamente, e K é o número de pares das variáveis SPD e CA . O circunflexo sobre as variáveis indica média no período considerado, ou seja, sobre o número de pares K de SPD e CA .

O cálculo do coeficiente de correlação linear é utilizado para avaliar as relações baixo espalhamento/alto desempenho e alto espalhamento/baixo desempenho ou, em outras palavras, se quando o espalhamento (SPD) foi maior do que \hat{SPD} , o desempenho do conjunto (CA) foi menor do que \hat{CA} e vice-versa. A referência para indicar alto ou baixo espalhamento/desempenho é a média do espalhamento e do desempenho do período considerado. O coeficiente de correlação pode variar de -1 a 1 , entretanto, são os valores negativos do coeficiente de correlação entre SPD e CA que mostram que o espalhamento pode ser utilizado como um indicador da confiabilidade da previsão.

3. RESULTADOS

Nesta seção, os resultados dos experimentos realizados são apresentados e discutidos. Nas subseções 3.1 e 3.2 os desempenhos dos experimentos são avaliados e comparados entre si, em termos da correlação de anomalias e da raiz do erro quadrático médio, respectivamente, e na subseção 3.3 é discutida a relação entre o desempenho do conjunto médio e o espalhamento do conjunto.

3.1. Desempenho dos experimentos usando correlação de anomalias

Nas Figuras 2, 3 e 4 são apresentadas as correlações de anomalias dos campos de altura

geopotencial (Z500), temperatura do ar em 850 hPa (T850) e pressão ao nível médio do mar (PNMM), respectivamente, para cada prazo de previsão e para as regiões (a) HN, (b) TR e (c) HS.

Observa-se que nos extratropicais (HN e HS) os desempenhos dos experimentos com previsões por conjunto (oper15m, lag15m, lag30m e lag30mw) são melhores do que os desempenhos dos experimentos com previsões determinísticas (determ e lagdet), para os três campos analisados e para todos os prazos de previsão.

Os desempenhos dos experimentos em que as previsões por conjunto mais recentes são combinadas com as previsões por conjunto defasadas em 12h, sem (lag30m) e com (lag30mw) ponderação pelos erros, mostram que o experimento lag30m apresenta resultados melhores ou semelhantes ao do lag30mw, tanto no HN quanto no HS, para os três campos considerados (Figs. 2a,c; 3a,c; 4a,c). Esta aparente discrepância entre os resultados pode estar associada à forma como o peso de cada conjunto de previsões está sendo calculado. Neste trabalho, os pesos foram obtidos como sendo a média do *RMS* das 15 previsões mais recentes, mediado na área considerada. Isto implica em assumir que o erro é uniforme para todos os pontos de grade de cada região. Talvez se os pesos fossem calculados para cada ponto de grade, os resultados fossem diferentes. Esta investigação será realizada posteriormente. O objetivo deste trabalho é mostrar que a utilização simples das previsões defasadas em 12h pode ser utilizada para adicionar informações úteis às previsões por conjunto operacionais do CPTEC/INPE, o que é verificado nos resultados apresentados nas Figs. 2, 3 e 4.

FIGURAS 2, 3 e 4

3.2. Comparação dos desempenhos dos experimentos através da raiz do erro quadrático médio e do espalhamento

O *RMS* e o *SPD* das previsões de cada um dos experimentos, para as variáveis Z500, T850 e PNMM são apresentados nas Figuras 5, 6 e 7, respectivamente.

Uma análise geral dos valores de *RMS* de cada experimento indica que os resultados estão de acordo com aqueles obtidos em termos de *CA*, ou seja, menores erros são verificados nos experimentos que utilizam previsões por conjunto. É importante observar que os resultados são similares para todas as variáveis analisadas. Destaca-se o desempenho ligeiramente superior do experimento lag30m em relação ao experimento oper15m, tanto em termos de *RMS*, que quanto menor melhor, quanto em termos de *SPD*, que, de maneira geral, quanto mais próximo do valor do *RMS* melhor (Figs. 5a,c; 6a,c e 7a,c). O resultado mais relevante é, certamente, o impacto da utilização de previsões defasadas no *SPD* das previsões, principalmente nos extratropicais do HN e do HS, como pode ser observado nas Figs. 5a,c; 6a,c e 7a,c para as variáveis Z500, T850 e PNMM, respectivamente. Nota-se que, no experimento lag30m, o espalhamento das previsões é aumentado em praticamente todos os prazos de previsão. O aumento do espalhamento, juntamente com uma ligeira diminuição do *RMS* das previsões, indica que a inclusão das previsões defasadas contribui para tornar as previsões por conjunto do CPTEC/INPE mais balanceadas, ou seja, ajudam a diminuir a subdispersão do sistema, o que provavelmente refletirá em previsões de probabilidades melhores.

FIGURAS 5, 6 e 7

3.3. Relação entre o espalhamento e o desempenho do conjunto

A relação entre o *SPD* e a *CA* é avaliada a partir das seguintes análises: i) o diagrama de dispersão do *SPD* versus *CA*, calculando a correlação linear r entre estas variáveis; e ii) a tabela de contingência, baseada no número de ocorrências que se encontram nos diferentes quadrantes

selecionados a partir das medianas.

Os diagramas de dispersão do espalhamento/desempenho do conjunto do HS são apresentados nas Figs.8, 9 e 10, para as variáveis Z500, T850 e PNMM, respectivamente. Embora a avaliação tenha sido realizada para todos os prazos de previsão, neste estudo são apresentados os resultados para os prazos de previsão de 5 e 7 dias, para os experimentos (a) oper15m e (b) lag30m. O diagrama de dispersão é dividido pelos valores medianos do espalhamento e do desempenho do conjunto, linhas horizontal e vertical que dividem os gráficos em quatro quadrantes. Os quadrantes são numerados no sentido horário, começando no canto superior esquerdo. O número de pontos contidos em cada quadrante é apresentado nos vértices da figura. Isto permite construir uma tabela de contingência 2x2 para os valores de espalhamento grande/pequeno e de desempenho alto/baixo (Tabela 2). Nota-se que usando a mediana para definir as categorias da tabela de contingência obtém-se uma tabela necessariamente simétrica (Molteni et al, 1996). As áreas 1 e 3 representam o resultado desejado, isto é, quando há correspondência inversa entre o espalhamento e o desempenho da previsão: os pontos da área 1 indicam o número de vezes em que o espalhamento foi pequeno e o desempenho foi alto ($X_{me}Y_{ma}$), enquanto que, os pontos da área 3 representam o número de vezes em que o espalhamento foi grande e o desempenho foi baixo ($X_{ma}Y_{me}$). As áreas 2 e 4 representam os erros, isto é, os casos em que esta correspondência inversa não foi verificada.

FIGURAS 8, 9 e 10

Analisando as Figs. 8, 9 e 10, observa-se que a diagonal entre os quadrantes 1 e 3 é mais populosa que a dos quadrantes 2 e 4, para os prazos de previsão mostrados. Isto indica que há uma relação inversa entre o espalhamento e o desempenho do conjunto, ou seja, na maioria dos casos o pequeno (grande) espalhamento dos membros do conjunto está associado com alto (baixo) desempenho do conjunto médio.

As Tabelas 2, 3 e 4 mostram a frequência absoluta, a frequência relativa, entre parêntesis, e o coeficiente de correlação (r) entre o *SPD* e a *CA* dos experimentos lag30m e oper15m, para os prazos de previsão de 5, 7, 9 e 13 dias, nos extratropicos do HS. Nas tabelas são apresentadas as quatro combinações dos valores de x (*SPD*) e y (*CA*), maiores (X_{ma} , Y_{ma}) ou menores (X_{me} , Y_{me}) que a mediana.

TABELAS 2, 3 e 4

Comparando os vários prazos de previsão das Tabelas 2, 3 e 4 de contingência observa-se que o prazo de 7 dias apresenta a maior frequência de casos de *CA* alta e *SPD* pequeno, com valores de 27% e 32% para Z500, 32% e 34% para T850 e 30% e 29% para a PNMM, nos experimentos oper15m e lag30m, respectivamente. Este prazo também apresentou a maior correlação inversa entre estas variáveis, com valores de r de -0,20 para Z500, -0,30 para T850, e -0,40 para PNMM para ambos os experimentos.

Os valores de r , embora baixos, estão de acordo com os encontrados na literatura. Mendonça e Bonatti (2004) encontraram valores de r de -0,086 e -0,067 para o quinto e sétimo dia de previsão, respectivamente, usando previsões por conjunto na resolução de T062L28 do modelo do CPTEC/INPE, para o período de outubro de 2001 a setembro de 2003. Molteni e Palmer (1991) obtiveram valores de correlação linear entre 0,3 e 0,4 para o prazo de previsão de 7 dias, no Hemisfério Norte. Molteni et al. (1996) encontraram valores de correlação de 0,56 e 0,59, para o inverno e verão, respectivamente, para o EPS do ECMWF, usando valores de *RMS* médio nos prazos de 5 a 7 dias.

Whitaker e Lough (1998) encontraram maiores valores de correlação entre o *RMS* e o *SPD* para os prazos de 5 e 6 dias. No trabalho de Barker (1991), maiores valores de correlação foram obtidos em torno do prazo de previsão de 12 dias. Segundo estes trabalhos, num sistema de previsão por conjunto perfeito, a variabilidade diária do

espalhamento e, então, a correlação erro/espalhamento pode se originar de uma das duas fontes: 1) variação diária na amplitude do erro da análise; 2) variação diária na taxa de crescimento da perturbação inicial associada com a variação na instabilidade atmosférica. Para previsões de tempo de curto prazo (1 a 3 dias) a fonte 1 é dominante, enquanto, a 2 domina para prazos longos. Como a variação das amplitudes das perturbações não está bem correlacionada com as variações diárias dos erros das previsões de curto prazo, é provável que as perturbações iniciais não estejam representando adequadamente as variações diárias do erro da análise. Desta forma, as correlações *RMS/SPD* estão associadas às variações diárias na instabilidade atmosférica. Como este mecanismo não pode produzir variabilidade no espalhamento para prazos curtos, e para prazos longos a correlação *RMS/SPD* deve se aproximar de zero, a correlação entre o *RMS/SPD* deve ter um pico em médio prazo. A correlação *RMS/SPD* deve tender a zero em prazos de previsão longos uma vez que a distribuição dos membros do conjunto se aproxima da distribuição climatológica do modelo, a qual não varia dia-a-dia. Assim, o *SPD* não pode ser utilizado para prever variações no desempenho da previsão por conjunto em longos prazos. De forma análoga, neste artigo, obteve-se máximo de correlação negativa entre a *CA* e o *SPD* para as previsões de médio prazo (7 dias).

De forma geral, os resultados obtidos no experimento lag30m foram comparáveis aos do oper15m, o que valida o uso de previsões defasadas na previsão de tempo por conjunto do CPTEC/INPE. Assim, o lag30m constitui uma fonte alternativa de dados para o EPS-CPTEC/INPE já que usa as previsões provenientes da análise defasada, que contém informações independentes da análise operacional mais recente, com a vantagem de não ter custo computacional adicional.

4. CONCLUSÕES

Foi avaliado o impacto da utilização de previsões defasadas nas previsões de tempo por conjunto operacionais do CPTEC/INPE. O conjunto defasado avaliado neste trabalho é uma média do conjunto composto pelas 15 previsões perturbadas produzidas pela análise mais recente do dia corrente e por 15 previsões inicializadas a partir da análise de 12h antes.

Diversos experimentos foram avaliados com a finalidade de determinar a melhor estratégia para combinar tais conjuntos de previsões: as previsões determinísticas mais recentes (determ) e as defasadas (lagdet); os conjuntos de previsões mais recente ou operacional (oper15m) e o defasado (lag15m); e as combinações dos conjuntos mais recente e defasado sem (lag30m) e com (lag30mw) ponderação pelo erro. A avaliação foi realizada usando índices estatísticos para as variáveis altura geopotencial em 500 hPa, temperatura do ar em 850 hPa e pressão ao nível médio do mar, no período de 10 de julho a 10 de setembro de 2007.

A análise dos resultados mostrou que a inclusão de previsões defasadas como membros do conjunto contribui para manter e/ou aumentar o desempenho das previsões por conjunto em todas as regiões, HN, TR e HS e para os três campos avaliados. Além disso, o conjunto composto por membros mais recentes e defasados apresentou um aumento do espalhamento do conjunto, contribuindo para reduzir a subdispersão do conjunto, com a vantagem de não adicionar custo computacional no processamento operacional das previsões, já que utiliza previsões processadas anteriormente.

A comparação dos resultados dos pares de experimentos determ e lagdet, e oper15m e lag15m indicou que os desempenhos das previsões defasadas são ligeiramente inferiores às mais recentes, indicando que a combinação destas duas previsões deve ser ponderada, na tentativa de compensar os erros relativos dos membros provenientes de análises mais antigas. No

experimento lag30mw, 15 membros defasados foram combinados com os 15 mais recentes considerando uma ponderação pelo inverso da raiz do erro quadrático médio, mediado na região de interesse e médio das 15 previsões mais recentes. Os resultados indicaram que esta ponderação, entretanto, não contribui para um melhor desempenho do conjunto quando comparado ao experimento lag30m, em que os 30 membros foram considerados sem ponderação.

Outro aspecto investigado foi o uso do espalhamento como preditor do desempenho da previsão por conjunto (EPS-CPTEC/INPE). Para isto, foram comparadas as previsões geradas a partir dos experimentos oper15m, da versão operacional do EPS-CPTEC/INPE, e o lag30m, de previsões defasadas. A análise do diagrama de dispersão e da tabela de contingência das variáveis espalhamento e desempenho, para os prazos de previsão de 5, 7, 9 e 13 dias, mostrou que o espalhamento do conjunto pode ser utilizado como indicador do desempenho do conjunto especialmente para os prazos de 5 e 7 dias. Os resultados indicaram que a correspondência espalhamento pequeno/desempenho alto e vice-versa é mais acentuada para o prazo de previsão de 7 dias. Este resultado foi obtido para ambos os experimentos, oper15m e lag30m, e não foram encontradas diferenças significativas entre eles, o que valida o uso de previsões defasadas como uma fonte adicional de informações para a previsão por conjunto do CPTEC/INPE.

A utilização de membros defasados pode ser uma fonte efetiva de dados adicionais para a previsão de tempo por conjunto do CPTEC/INPE. A inclusão de previsões defasadas ao conjunto operacional tem um impacto positivo no desempenho das previsões atuais. O experimento lag30m indicou um aumento no espalhamento do conjunto em relação ao oper 15m, minimizando assim, a subdispersão do EPS-CPTEC/INPE. O desempenho do sistema no HS, usando 30 membros, foi ligeiramente maior comparado ao oper15m, com um aumento na correlação de anomalias e redução do *RMS*. Embora esta técnica não resolva totalmente a questão da subdispersão do conjunto, representa uma alternativa simples e de fácil implementação operacional, além de ter baixo custo computacional, já que os membros

adicionais são obtidos da rodada anterior a mais recente.

Os resultados deste trabalho ajudam a avaliar e aprimorar o sistema de previsão de tempo por conjunto do CPTEC/INPE. Contribui, também, para apresentar uma forma objetiva de obter informações úteis da previsão de tempo por conjunto, que tem potencial para uso operacional: a relação espalhamento/desempenho das previsões. Além disso, os resultados apresentados servem como parâmetro para a implementação operacional desta metodologia no EPS do CPTEC/INPE.

5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARKER, T. The relationship between spread and forecast error in extended-range forecast. **J. Climate**, 4, p.733-742, 1991.
- BUIZZA, R. Potential forecast skill of ensemble prediction and spread and skill distributions of the ECMWF ensemble prediction system. **Mon. Wea. Rev.**, 125, p. 99-119., 1997.
- COUTINHO, M. M. **Previsão por conjuntos utilizando perturbações baseadas em componentes principais**, 1999. 136p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.
- DALCHER, A.; KALNAY, E. HOFFMAN, R. Medium Range Lagged Average Forecast. **Mon. Wea. Rev.**, 116, p. 402-415, 1988.
- HOFFMAN, R. N.; KALNAY, E. Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting. **Tellus**, 35A, p.100-118, 1983.
- KANAMITSU, M., W. EBISUZAKI, J. WOOLLEN, S-K YANG, J. J. HNILO, M. FIORINO, G. L. POTTER, NCEP-DEO AMIP-II Reanalysis (R-2). **Bul. of the Atmos. Met. Soc.**, p.1631-1643, 2002.
- LORENZ, E.N. Deterministic non-periodic flow. **J. Atmos. Sci.**, 20, p.130-141, 1963.
- MENDONÇA, A.M; BONATTI, J.P. Experiments with EOF-based perturbation method to ensemble weather forecasting in middle latitudes. In: Proceedings of ICSHMO, 8, 2006, Foz

do Iguaçú, Brazil, April 24-28, p.1829-1832.

MENDONÇA, A.M.; BONATTI, J.P. Avaliação objetiva do sistema de previsão de tempo global por ensemble do CPTEC/INPE e relação entre o espalhamento e o desempenho do ensemble médio. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, XIII, 29 de agosto a 03 de setembro, 2004, Fortaleza, CE, Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Fortaleza, CE, Brasil, 2004.

MOLTENI, F.; BUIZZA, R.; PALMER, T.N.; PETROLIAGIS; T. The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. **Quart. J. Roy. Meteor. Soc.**, 122, p.73-119, 1996.

MOLTENI, F.; PALMER, T.N. A real-time scheme for the prediction of forecast skill. **Mon. Wea. Rev.**, 119, p.299-323, 1991.

MURPHY, J.M. The impact of the ensemble forecast on predictability. **Q. J. R. Meteorol. Soc.** 114, p.463-493, 1988.

REYNOLDS, C. A.; WEBSTER, P. J.; KALNAY, E. Random error growth in NMC's global forecasts. **Mon. Wea. Rev.**, 122, p.1281-1305, 1994.

TRACTON, M. S.; KALNAY, E. Operational ensemble prediction at the National Meteorological Center. Practical aspects. **Wea. Forecasting**, 8, p.379-398, 1993.

WHITAKER, J.S; LOUGHE, A. The Relationship between Ensemble Spread and Ensemble Mean Skill. **Mon.Wea.Rev.**, v .126, p.3292-3302, 1998.

ZHANG, Z.; KRISHNAMURTI, T.N. A perturbation method for hurricane ensemble predictions. **Mon.Wea.Rev.**, v. 122, p.447-469, 1999.

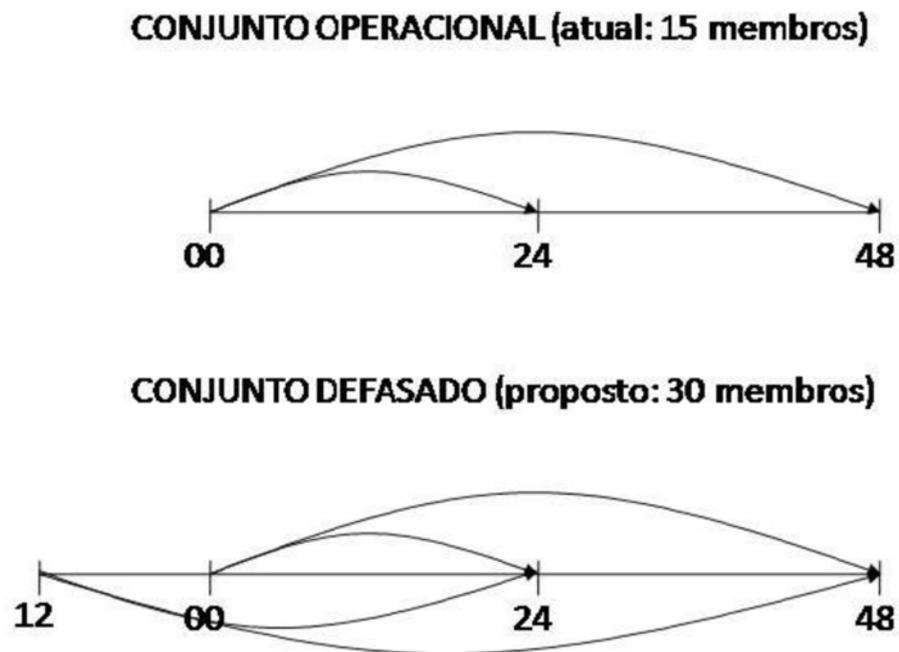


Figura 1 - Descrição esquemática da técnica de previsões defasadas da previsão de tempo por conjunto.

Tabela 1 – Experimentos utilizando a técnica de previsões defasadas

Experimentos	No. de Membros	Previsões Não Defasadas	Previsões Defasadas
lag30m	30	15 membros da rodada mais recente	15 membros inicializados 12 horas antes da rodada mais recente
lag30mw	30 Ponderados pelo inverso do erro quadrático médio da área	15 membros da rodada mais recente	15 membros inicializados 12 horas antes da rodada mais recente
lag15m	15	-	15 membros inicializados 12 horas antes da rodada mais recente
oper15m	15	15 membros da rodada mais recente	-
determ	1	1 membro (análise não perturbada)	-
lagdet	1	-	1 membro (análise não perturbada de 12 horas antes da rodada mais recente)

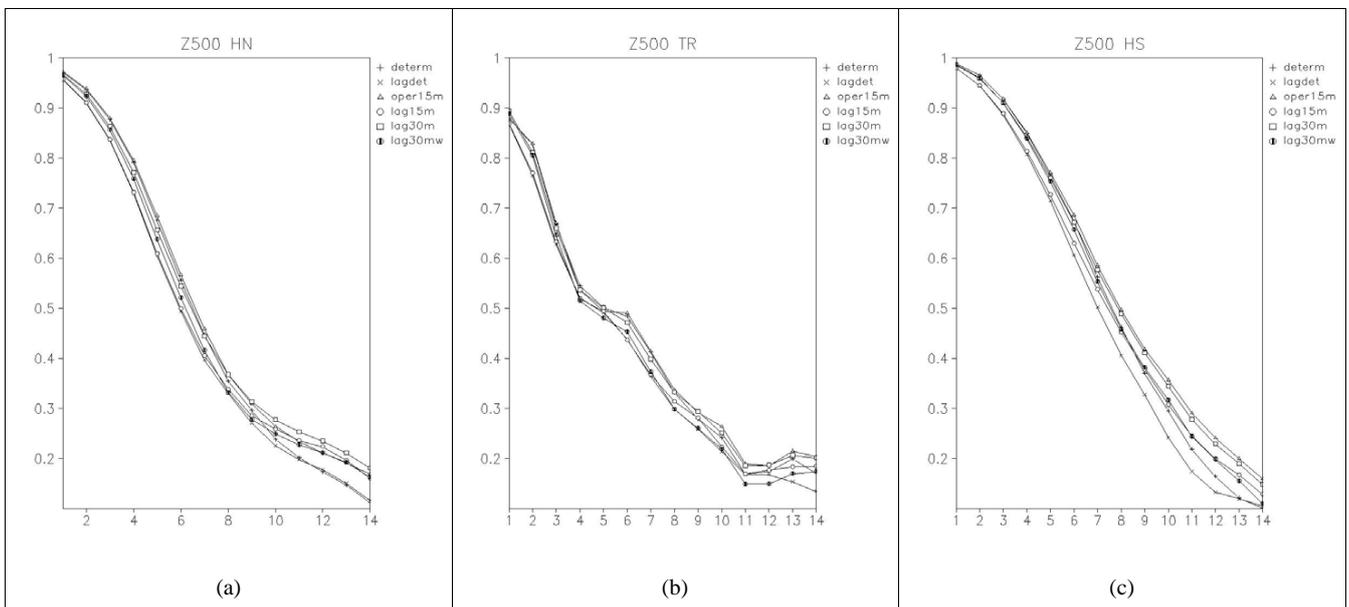


Figura 2 - Correlação de anomalias da altura geopotencial em 500 hPa (ordenada - y) em função do prazo de previsão (abscissa - x) para os vários experimentos: (a) HN, (b) TR e (c) HS. A unidade do eixo x é dias.

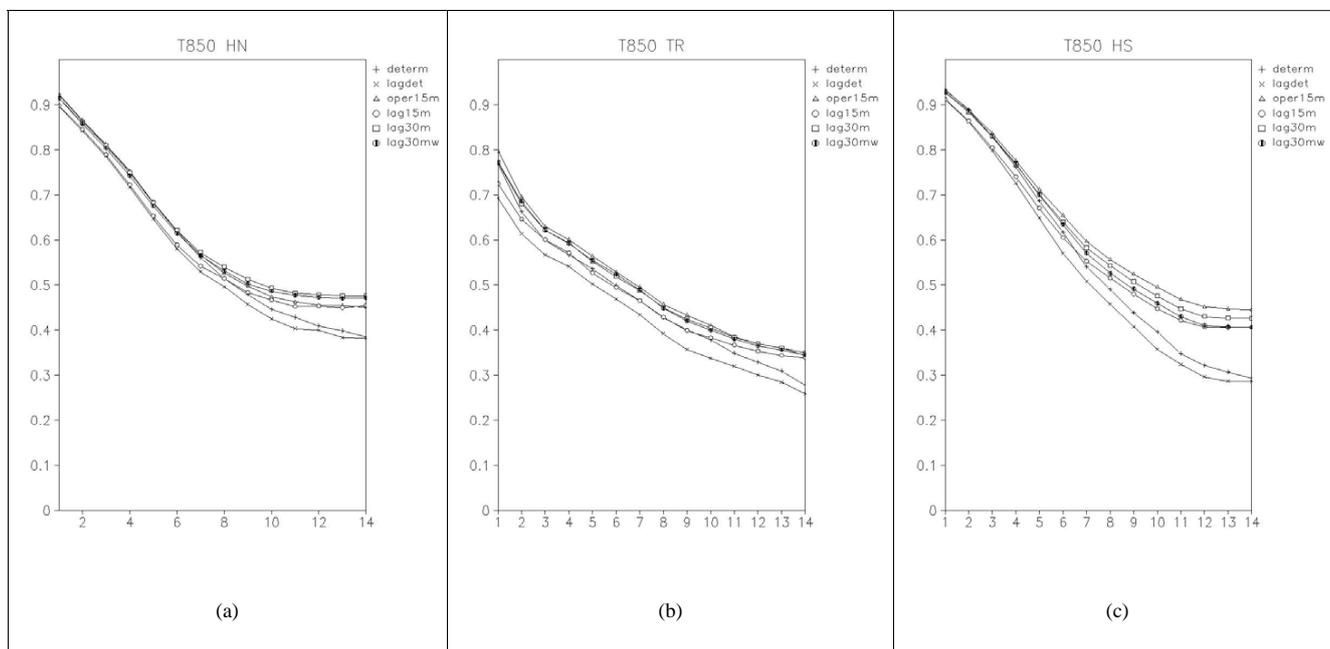


Figura 3 - Correlação de anomalias da temperatura do ar em 850 hPa (ordenada - y) em função do prazo de previsão (abscissa - x) para os vários experimentos: (a) HN, (b) TR e (c) HS. A unidade do eixo x é dias.

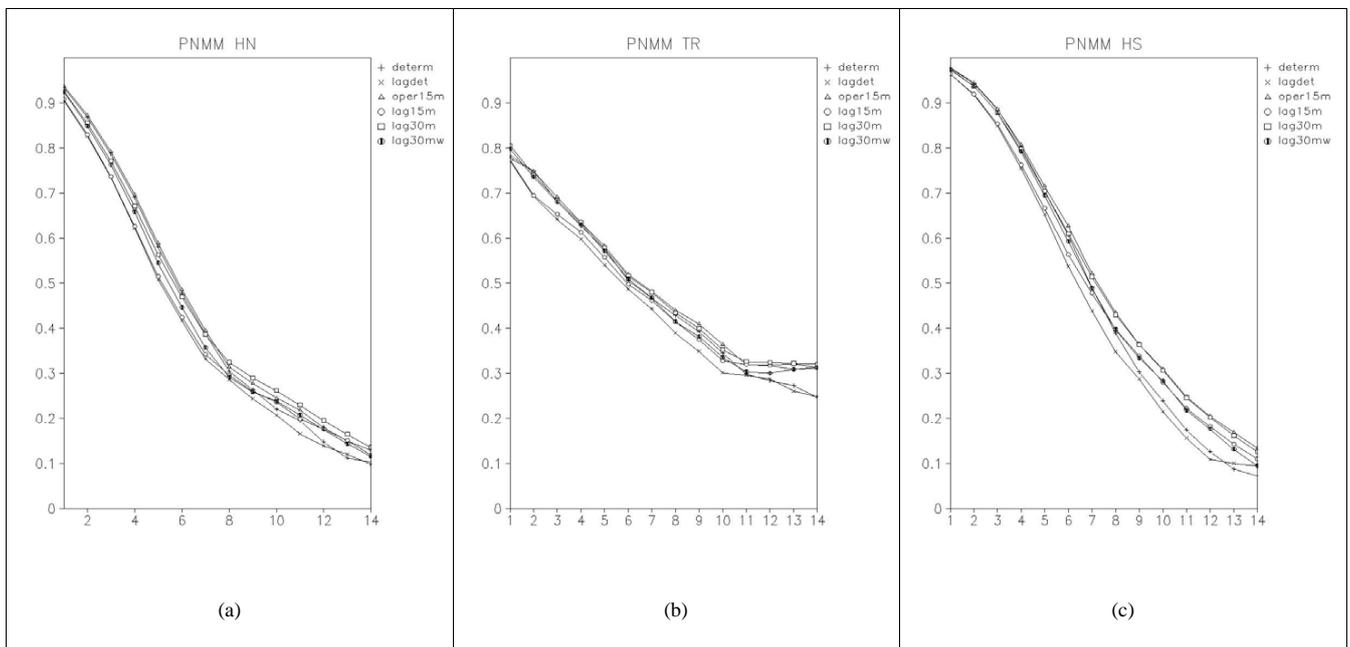


Figura 4 - Correlação de anomalias da pressão ao nível médio do mar (ordenada - y) em função do prazo de previsão (abscissa - x) para os vários experimentos: (a) HN, (b) TR e (c) HS. A unidade do eixo x é dias.

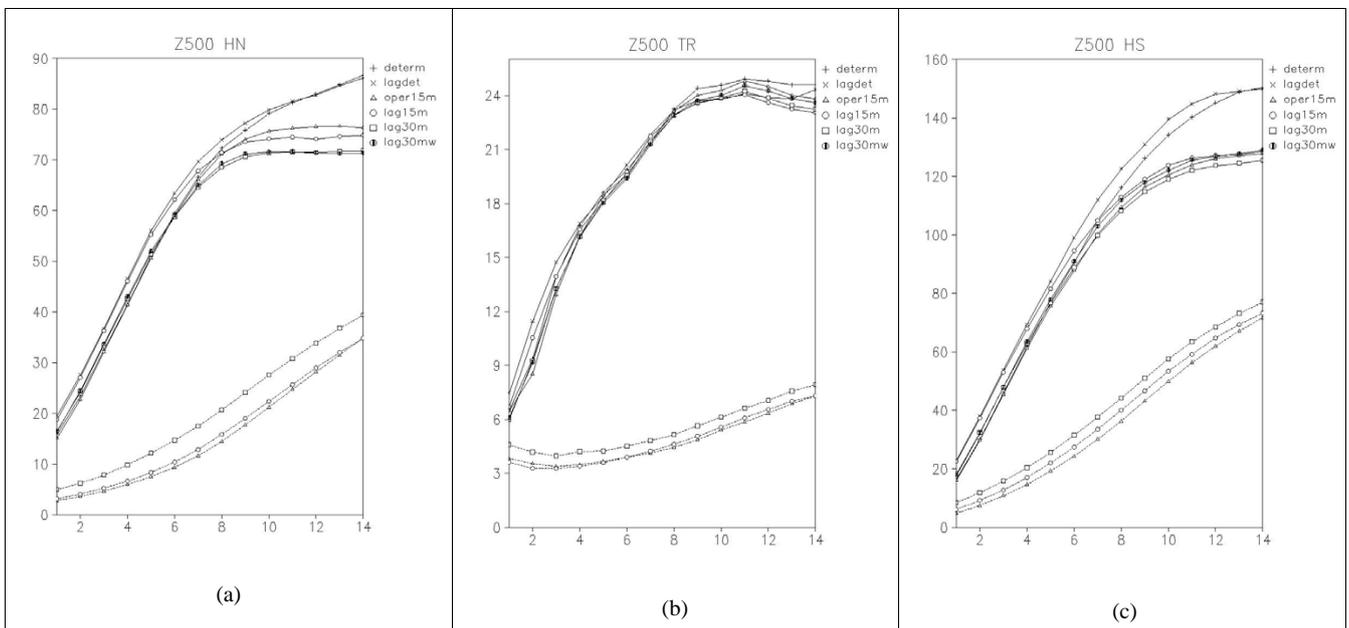


Figura 5 – Raiz do erro quadrático médio (linhas contínuas) e espalhamento (linhas tracejadas) do campo de altura geopotencial em 500 hPa (ordenada - y), em função do prazo de previsão (abscissa - x), para os diferentes experimentos: (a) HN, (b) TR e (c) HS. As unidades dos eixos y e x são m e dias, respectivamente.

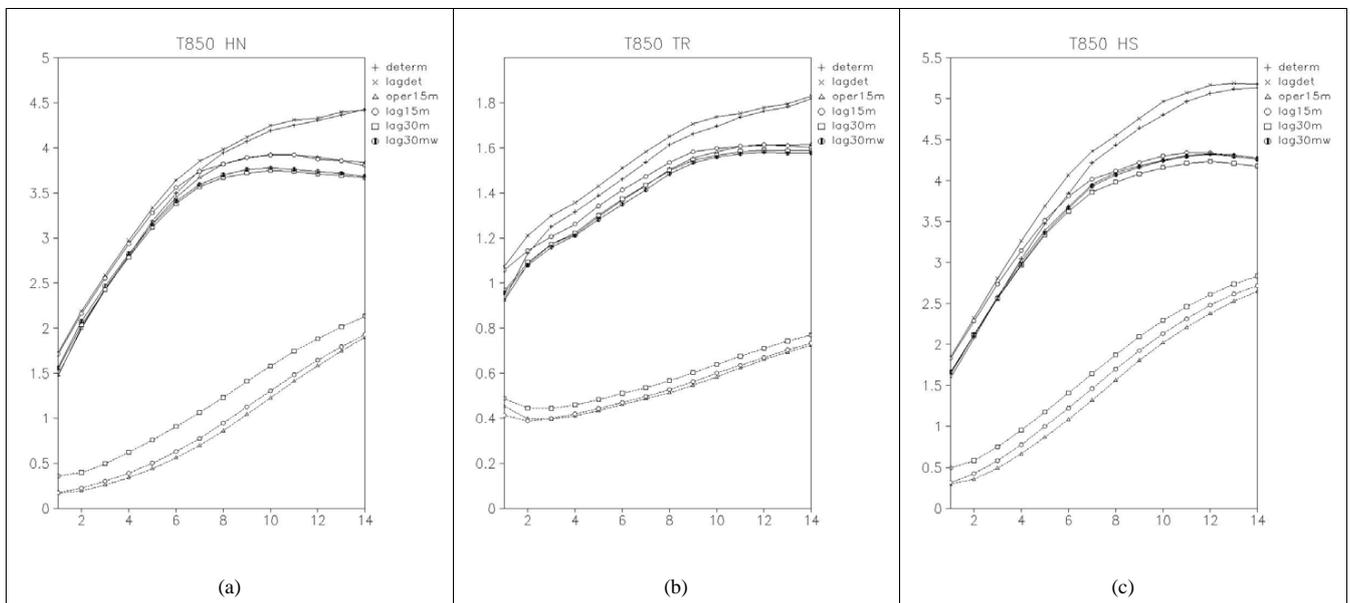


Figura 6 - Raiz do erro quadrático médio (linhas contínuas) e espalhamento (linhas tracejadas) do campo de temperatura do ar em 850 hPa (ordenada - y), em função do prazo de previsão (abscissa - x), para os diferentes experimentos: (a) HN, (b) TR e (c) HS. As unidades dos eixos y e x são K e dias, respectivamente.

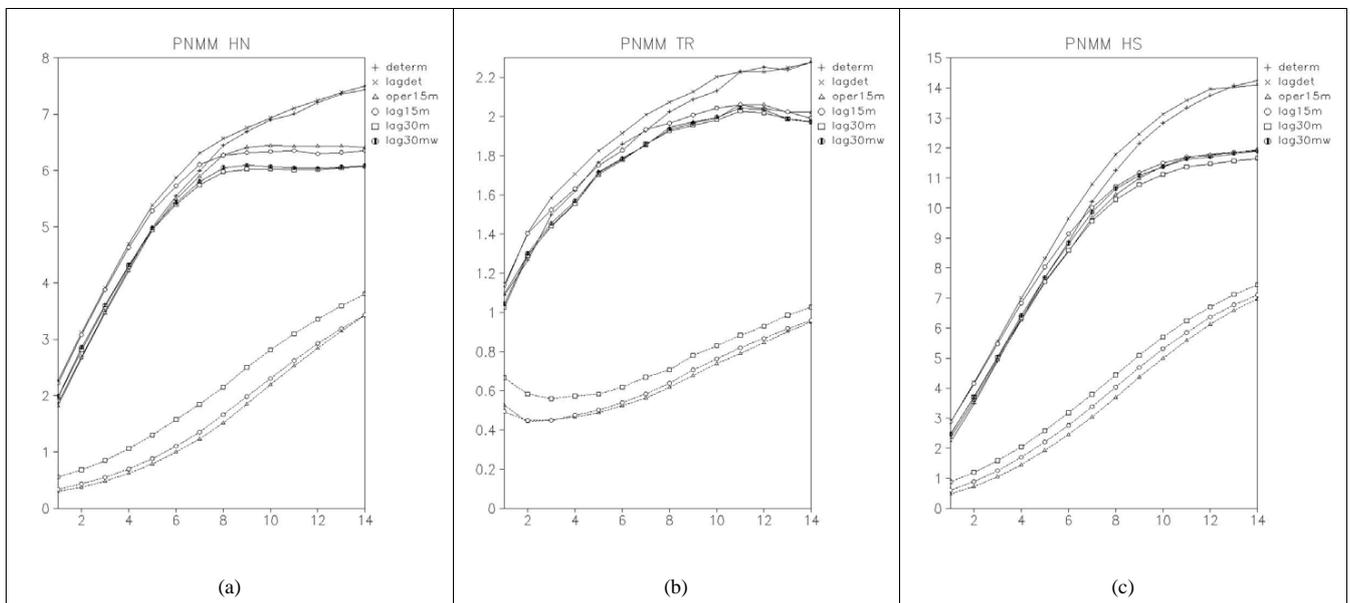


Figura 7 - Raiz do erro quadrático médio (linhas contínuas) e espalhamento (linhas tracejadas) do campo de pressão ao nível médio do mar (ordenada - y), em função do prazo de previsão (abscissa - x), para os diferentes experimentos: (a) HN, (b) TR e (c) HS. As unidades dos eixos y e x são hPa e dias, respectivamente.

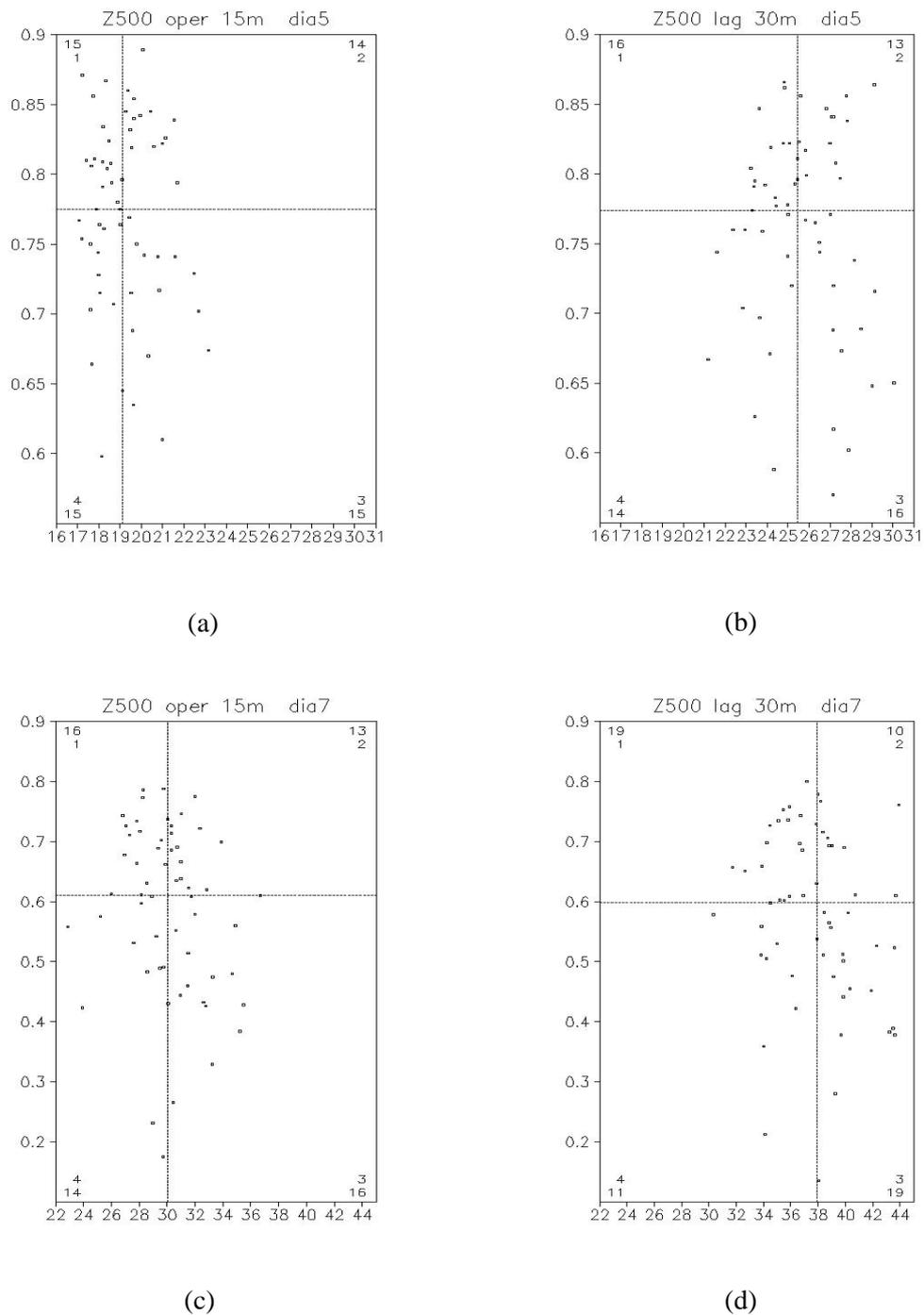
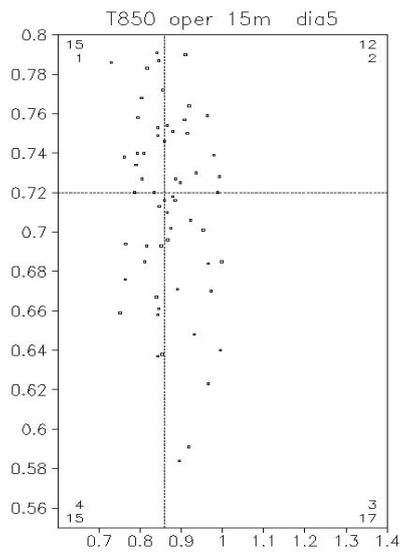
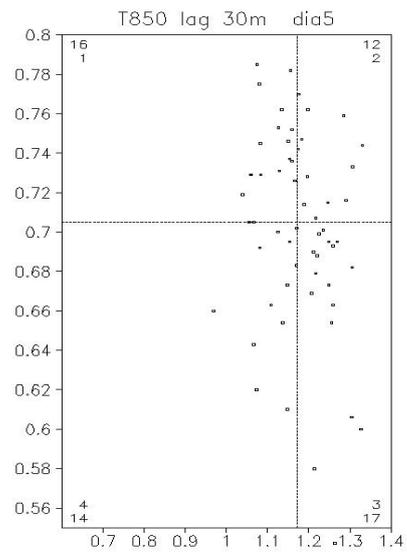


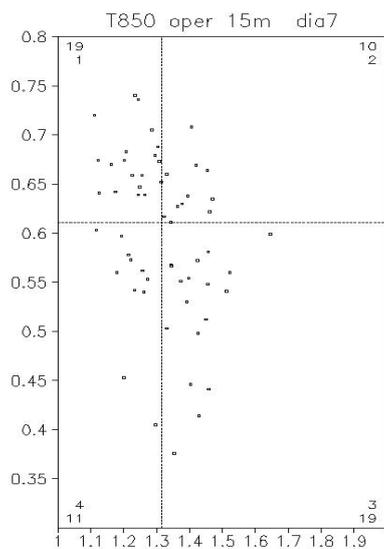
Figura 8 - Diagrama de dispersão entre o desempenho (ordenada) versus espalhamento da previsão (abscissa) da altura geopotencial em 500 hPa (Z500) no HS, para 5^o e 7^o dia de previsão dos experimentos: oper15m (a) e (c) e lag30m (b) e (d), respectivamente, em uma amostra de 59 dias válidos.



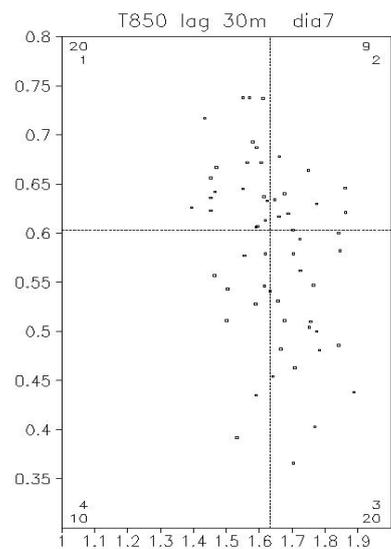
(a)



(b)

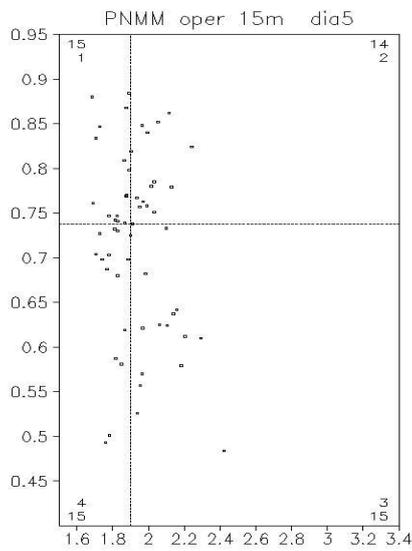


(c)

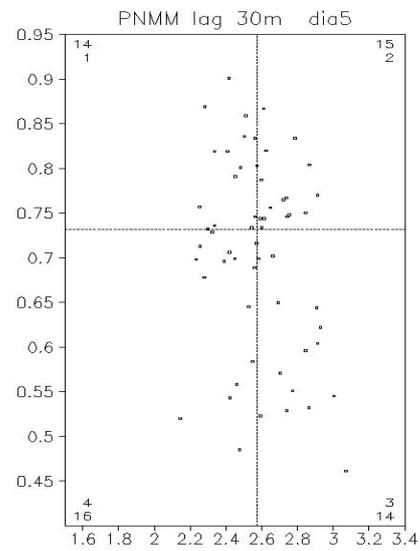


(d)

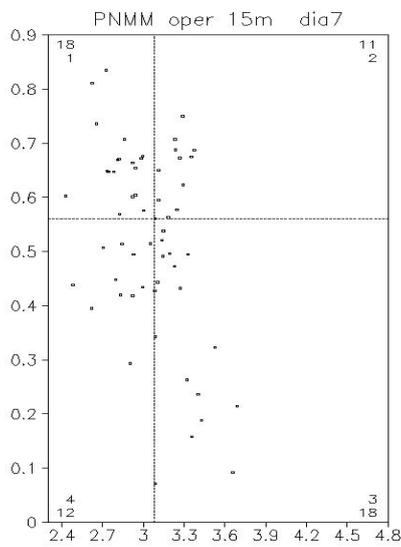
Figura 9 - Diagrama de dispersão entre o desempenho (ordenada) versus espalhamento da previsão (abscissa) da temperatura no nível de 850 hPa (T850) no HS, para 5^o e 7^o dia de previsão dos experimentos: oper15m (a) e (c) e lag30m (b) e (d), respectivamente, em uma amostra de 59 dias válidos.



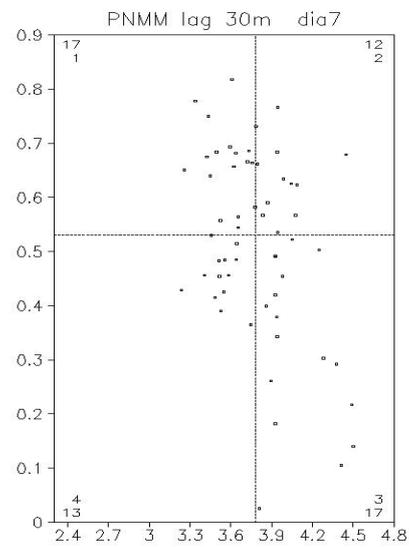
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 10 - Diagrama de dispersão entre o desempenho (ordenada) versus espalhamento da previsão (abscissa) da pressão ao nível do mar (PNMM) no HS, para 5^o e 7^o dia de previsão dos experimentos: oper15m (a) e (c) e lag30m (b) e (d), respectivamente, em uma amostra de 59 dias válidos.

Tabela 2 – Tabela de contingência para o espalhamento e desempenho da previsão do conjunto operacional (oper15m) e defasado (lag30m), para os vários prazos de previsão, no HS. São apresentados os valores absolutos e relativos (entre parêntesis) de cada categoria, baseados na mediana, e o coeficiente de correlação (r) entre o espalhamento e desempenho da previsão. Os valores de espalhamento pequeno e desempenho alto são grifados.

Z500 oper15m								
	Dia 5 $r = -0,128$		Dia 7 $r = -0,198$		Dia 9 $r = 0,083$		Dia 13 $r = 0,179$	
	Xme	Xma	Xme	Xma	Xme	Xma	Xme	Xma
Yma	15(25,42)	14(23,73)	16(27,12)	13(22,03)	15(25,42)	14(23,73)	16(27,12)	13(22,03)
Yme	15(25,42)	15(25,42)	14(23,73)	16(27,12)	15(25,42)	15(25,42)	14(23,73)	16(27,12)
Z500 lag30m								
	Dia 5 $r = -0,076$		Dia 7 $r = -0,196$		Dia 9 $r = 0,019$		Dia 13 $r = 0,066$	
	Xme	Xma	Xme	Xma	Xme	Xma	Xme	Xma
Yma	16(27,12)	13(22,03)	19(32,20)	10(16,95)	14(23,73)	15(25,42)	17(28,81)	12(20,34)
Yme	14(23,73)	16(27,12)	11(18,64)	19(32,20)	16(27,12)	14(23,73)	13(22,03)	17(28,81)

Tabela 3 – Tabela de contingência para o espalhamento e desempenho da previsão da T850 do conjunto operacional (oper15m) e defasado (lagged30m), para os vários prazos de previsão, no HS, São apresentados os valores absolutos e relativos (entre parêntesis) de cada categoria, baseados na mediana, e o coeficiente de correlação (r) entre o espalhamento e desempenho da previsão. Os valores de espalhamento pequeno e desempenho alto são grifados.

T850 oper15m								
	Dia 5 $r = -0,203$		Dia 7 $r = -0,315$		Dia 9 $r = -0,105$		Dia 13 $r = 0,205$	
	Xme	Xma	Xme	Xma	Xme	Xma	Xme	Xma
Yma	15(25,42)	12(20,34)	19(32,20)	10(16,94)	15(25,42)	14(23,73)	15(25,42)	13(22,03)
Yme	15(25,42)	17(28,81)	11(18,64)	19(32,20)	15(25,42)	15(25,42)	15(25,42)	16(27,12)
T850 lag30m								
	Dia 5 $r = -0,213$		Dia 7 $r = -0,335$		Dia 9 $r = -0,108$		Dia 13 $r = -0,120$	
	Xme	Xma	Xme	Xma	Xme	Xma	Xme	Xma
Yma	16(27,12)	12(20,34)	20(33,90)	9(15,25)	17(28,81)	12(20,34)	17(28,81)	12(20,34)
Yme	14(23,73)	17(28,81)	10(16,95)	20(33,90)	13(22,03)	17(28,81)	13(22,03)	17(28,81)

Tabela 4 – Tabela de contingência para o espalhamento e desempenho da previsão da PNMM do conjunto operacional (oper15m) e defasado (lagged30m), para os vários prazos de previsão, no HS. São apresentados os valores absolutos e relativos (entre parêntesis) de cada categoria, baseados na mediana, e o coeficiente de correlação (r) entre o espalhamento e desempenho da previsão. Os valores de espalhamento pequeno e desempenho alto são grifados.

PNMM oper15m								
	Dia 5 $r = -0,213$		Dia 7 $r = -0,425$		Dia 9 $r = -0,251$		Dia 13 $r = -0,236$	
	Xme	Xma	Xme	Xma	Xme	Xma	Xme	Xma
Yma	15(25,42)	14(23,73)	18(30,31)	11(18,64)	17(28,81)	12(20,34)	17(28,81)	12(20,34)
Yme	15(25,42)	15(25,42)	12(20,34)	18(30,31)	13(22,03)	17(28,81)	13(22,03)	17(28,81)
PNMM lag30m								
	Dia 5 $r = -0,255$		Dia 7 $r = -0,406$		Dia 9 $r = -0,309$		Dia 13 $r = -0,430$	
	Xme	Xma	Xme	Xma	Xme	Xma	Xme	Xma
Yma	14(23,73)	15(25,42)	17(28,81)	12(20,34)	19(32,20)	10(16,95)	21(35,59)	8(13,56)
Yme	16(27,12)	14(23,73)	13(22,03)	17(28,81)	11(18,64)	19(32,20)	9(15,25)	21(35,59)