



Sistema de Previsão por Conjunto Global do CPTEC

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Janeiro 2018

1 Introdução

A previsibilidade numérica da atmosfera de forma determinística baseada em modelos dinâmicos, tem sido amplamente discutida desde que Lorenz (1963, 1965, 1969) observou que a solução de sistemas de equações semelhantes às que governam os movimentos atmosféricos apresentam dependência sensível em relação as condições iniciais fornecidas no início da integração. Lorenz notou que partindo de condições ligeiramente perturbadas, após algum tempo de integração, as soluções podem ser completamente diferentes. Ele foi o primeiro cientista a perceber a importância de tais fenômenos, que vieram a ser chamados “caóticos” devido ao comportamento irregular que apresentavam. Sabe-se que os modelos numéricos não conseguem reproduzir a enorme diversidade de fenômenos que influenciam a evolução das condições atmosféricas, o que seria suficiente para limitar o prazo de previsão. No entanto, mesmo que os modelos fossem perfeitos, os erros inerentes às observações utilizadas no momento de geração da análise (ie., a condição inicial), poderiam levar a uma



previsão que não seria verificada depois de alguns dias.

A técnica de previsão de tempo por conjunto (ensemble, em inglês) surgiu como uma tentativa de aumentar o prazo de previsão e a previsibilidade dos modelos dinâmicos. Em geral, supõe-se que os modelos sejam perfeitos e considerando apenas a incerteza na condição inicial, busca-se através de alguma técnica específica, estimar os erros associados às observações para criar um conjunto de condições iniciais perturbadas. O conjunto de previsões é obtido integrando-se o modelo a partir de cada uma destas novas análises perturbadas.

De forma ideal, um número infinito de condições iniciais seriam necessárias para representar todos os estados atmosféricos possíveis. Entretanto, isto seria impraticável, pois para cada condição inicial haveria uma realização do modelo. Como a taxa de crescimento dos erros depende do regime de circulação da atmosfera, da estação do ano, e do domínio geográfico, é possível construir um número limitado de perturbações “ótimas” que representem os modos de crescimento mais rápido associados aos padrões atmosféricos da condição inicial. A idéia é eliminar condições iniciais perturbadas que geram previsões muito semelhantes entre si e, através de um número menor de integrações, tentar estimar os cenários futuros mais prováveis associados à evolução dinâmico-caótica da atmosfera. Os dois mecanismos mais conhecidos para a perturbação das condições iniciais são o “Breeding of Growing Modes” – empregado no National Centers for Environmental Prediction (NCEP), nos Estados Unidos; e o “Singular Vectors” – utilizado pelo European Centre for Medium-Range Forecasts (ECMWF), na Europa. Embora utilizem metodologias diferentes, ambas as técnicas buscam estimar os modos de crescimento mais rápido associados aos erros na condição inicial. Ambos os centros têm adquirido experiência em previsão por conjunto, desenvolvido novos produtos e produzido um grande número de trabalhos, demonstrando ser esta uma ferramenta complementar muito



útil para a previsão numérica de tempo, especialmente de médio prazo.

Novas técnicas foram desenvolvidas ao longo da década de 2000 e envolvem a Assimilação de Dados. Exemplos destas novas técnicas envolvem o Filtro de Kalman por conjunto (Ensemble Kalman Filter, em inglês) e derivações, em que as perturbações são construídas a partir das diferenças entre cada membro e a média do conjunto de previsões. A grande vantagem destas novas técnicas, é que elas permitem que o sistema de previsão por conjunto seja utilizado para gerar o seu próprio conjunto de condições iniciais.

O Sistema de Previsão de tempo por Conjunto global (SPCON) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) teve sua origem no trabalho de dissertação de mestrado de Coutinho (1999). Seu trabalho 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 – especialmente para a América do Sul, o que constitui um avanço significativo dentro da meteorologia do Brasil. Assim, em outubro de 2001, o CPTEC iniciou operacionalmente a previsão de tempo global por conjunto.

Geralmente, a configuração adotada na implementação de um sistema de previsão por conjunto é escolhida em função da infra-estrutura da instituição que o emprega. No início dos anos 2000, o SPCON foi implementado com um modelo global de resolução TQ0062L028 (aproximadamente 200x200 km) e 15 membros, sendo um de controle (a partir da condição inicial sem perturbações) e 14 membros a partir de análises perturbadas. Uma primeira grande revisão do SPCON-CPTEC/INPE veio a ser realizada por Mendonça e Bonatti (2009); nesta revisão, as variáveis p_s (pressão em superfície) e q (umidade específica) foram adicionadas ao conjunto de perturbações. Além disso, introduziu-se também a regionalização das perturbações, isto é, diferentes parâmetros do processo de perturbação começaram a ser conside-

rados em diferentes regiões: Hemisfério Norte, Hemisfério Sul e setores norte e sul da América do Sul e testes com a correção de viés do conjunto de previsões (Cunningham et al. 2015). Assim como a versão original de Coutinho (1999), o conjunto de previsões era composto de 15 membros, as previsões tinham validade de até 15 dias, sendo realizadas duas vezes ao dia (00Z e 12Z) e na resolução TQ0126L28 (aproximadamente 100x100 km).

2 Método de perturbação da condição inicial

O mecanismo utilizado para a perturbação das condições iniciais é baseado no método aplicado por Zhang e Krishnamurti (1999) ao modelo global da Florida State University (FSU), nos Estados Unidos. Inicialmente proposto para previsão de furacões, o método denominado “EOF-based perturbation”, foi desenvolvido levando-se em conta o fato de que durante os primeiros dias de integração do modelo a perturbação cresce linearmente. Resumidamente, o procedimento para geração das condições iniciais perturbadas (Figura 1) consiste das seguintes etapas:

1. adicionar pequenas perturbações randômicas, comparáveis aos erros de previsão, a análise de controle (não perturbada);
2. integrar o modelo por 36 horas (intervalo ótimo) utilizando as análises perturbadas e de controle, com saídas a intervalos fixos de 3 horas;
3. subtrair a previsão de controle da previsão perturbada para cada horário de saída, obtendo uma série temporal de diferenças dos campos previstos;
4. realizar uma análise de Funções Ortogonais Empíricas (EOF – Empirical Orthogonal Functions, em inglês) para a série temporal de diferenças sobre as regiões de interesse, obtendo os autovetores (modos) associados aos maiores autova-

lores, que são as perturbações ótimas;

5. reescalonar as perturbações ótimas de forma que o desvio padrão destas perturbações sejam da ordem das perturbações iniciais;
6. construir um conjunto de estados iniciais adicionando e subtraindo estas perturbações ótimas, após o reescalonamento, à análise de controle.

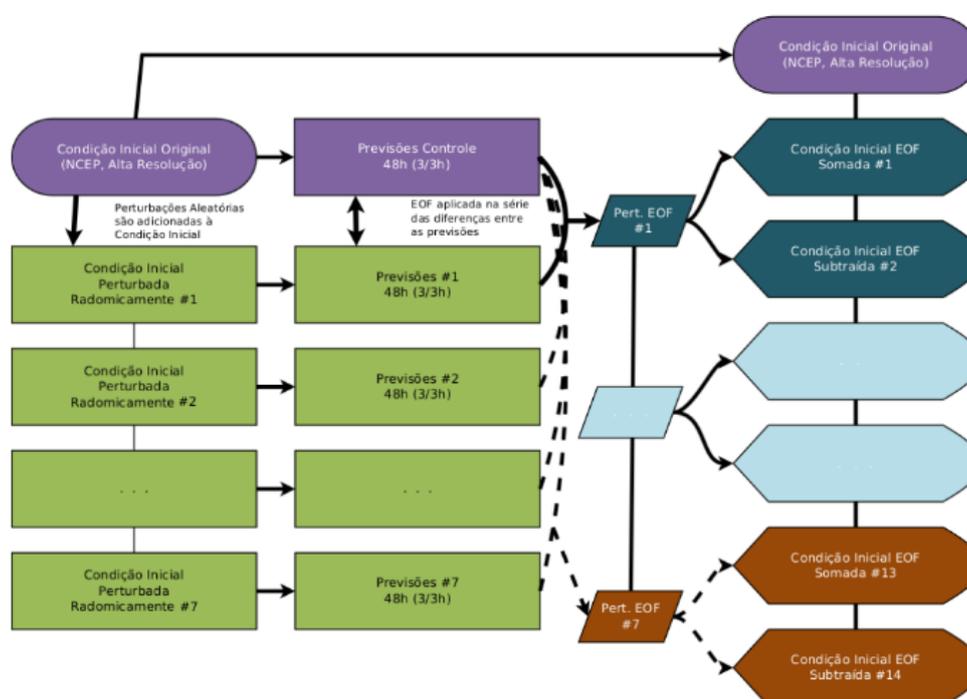


Figura 1: Esquema de perturbação da condição inicial do SPCON global do CPTEC, baseado em EOFs.

Para a previsão de furacões, Zhang e Krishnamurti (1999) propuseram perturbações em relação à posição inicial do furacão e o cálculo das EOFs em uma região vizinha ao furacão, já que lhes interessava a evolução de um evento severo específico. Entretanto, do ponto de vista de previsão do padrão da circulação geral da atmosfera, a aplicação de perturbações na posição de algum evento específico não parece ser razoável. Outras duas modificações foram acrescentadas ao método, a primeira, em relação a região perturbada que originalmente foi confinada a regiões vizinhas ao



furação. Para previsão global, Coutinho (1999) obteve que tentativas preliminares de confinar as perturbações em latitude e longitude, por exemplo, uma área sobre a América do Sul, não indicou bons resultados, pois, esse isolamento, eliminava o tratamento do crescimento das perturbações em regiões de influência relevante no desenvolvimento dos sistemas sinóticos. Seus resultados mostraram que a utilização de uma região mais estendida (45S a 30N e 0E a 360E) apresentava melhores resultados. A segunda modificação refere-se à intensidade das perturbações iniciais e de reescalonamento das perturbações ótimas. Zhang e Krishnamurti (1999) consideraram razoável que as perturbações iniciais fossem da ordem dos erros de previsão de 3 horas (eg., 3 m/s para o vento e de 0,6 K para a temperatura) e, para o reescalonamento das perturbações ótimas, consideraram que o desvio padrão destas perturbações, em relação à média total (horizontal e vertical), deviam ser de 1,5 m/s para o vento e 0,7 K para a temperatura. Como a região de perturbação foi alterada, valores mais adequados para as perturbações iniciais e para o reescalonamento foram testados. Valores um pouco maiores, 5,0 m/s para o vento e 1,5 K para a temperatura, obtidos do trabalho de Daley e Mayer (1986) para as perturbações iniciais e para o reescalonamento parecem produzir melhores resultados do que os sugeridos por Zhang e Krishnamurti (1999). Atualmente, o SPCON global do CP-TEC utiliza 3 m/s para o vento horizontal (componentes zonal e meridional), 0,6K para a temperatura, um perfil variado (Figura 2) para a perturbação da umidade específica, e 1 hPa para a pressão em superfície.

3 Cálculo das EOFs

Para realizar a análise de componentes principais, monta-se uma matriz de covariâncias com a série temporal de diferenças de temperatura disposta em cada coluna,

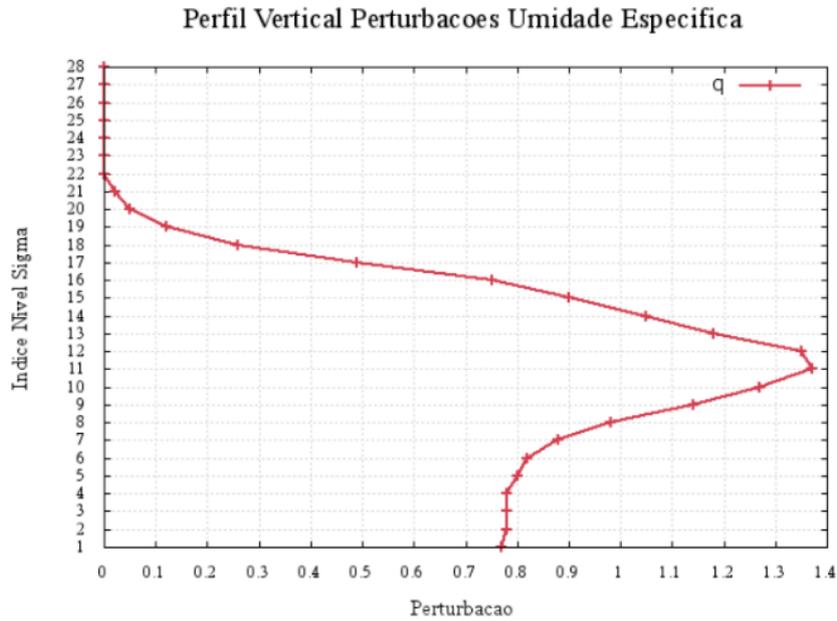


Figura 2: Perfil vertical das perturbações da Umidade Específica. (Bastarz et al. 2016)

sucessivamente, uma das matrizes de diferenças obtidas a cada 3 horas, a partir de 6 horas de integração do modelo. Assim, cada coluna representa uma matriz tridimensional (latitude x longitude x nível) disposta verticalmente. Desse modo, o conjunto total de dados de temperatura é expresso por uma matriz retangular de dimensão $S \times T$, onde $T = 11$ (número de saídas em 36 horas) e $S = N \times M \times L$, com $N =$ número de pontos de latitude, $M =$ número de pontos de longitude e $L =$ número de níveis.

A matriz de covariância é definida por:

$$H = \frac{L}{T} W^T W \quad (1)$$

onde, W^T é a matriz transposta de W . A matriz H é, claramente, uma matriz simétrica, logo, tem T autovalores reais λ_j e autovetores ortonormais E_j , cada um satisfazendo

$$HE_j = \lambda_j E_j \quad (2)$$

e a condição de ortonormalidade

$$E_i^T E_j = \delta_{ij} \quad (3)$$

onde δ_{ij} é a função delta de Kronecker.

Os autovalores de H são ordenados do maior para o menor, obtendo-se uma correspondente ordem nos autovetores associados (ordem decrescente da variância explicada por cada autovetor). A matriz W é representada na base E dos autovetores E_j como $W = YE$, onde a matriz E consiste dos vetores-linha E_j , normalmente chamados de funções ortogonais empíricas (EOFs). A matriz Y contém os coeficientes para os diferentes autovetores nos diferentes tempos e é função somente do tempo. Y é chamada de matriz das componentes principais. Os modos de crescimento mais rápido são facilmente selecionados através da evolução temporal dos coeficientes dos autovetores. Os modos cujos coeficientes aumentam rapidamente com o tempo são selecionados como os mais instáveis e este procedimento é válido também para a umidade específica e para a pressão em superfície.

Para a série temporal de diferenças do vento, o procedimento é análogo, mas considerando o vento como um vetor, através da composição de suas componentes zonal u e meridional v em um número complexo $u + iv$ (representado por um vetor no plano dos Complexos – Legler, 1983). Assim, para o cálculo da matriz H , toma-se a matriz complexa conjugada transposta W^* da matriz W formada pelos vetores de diferenças do vento, obtendo-se:

$$H = \frac{L}{T} W^* W \quad (4)$$

de forma que H é uma matriz Hermitiana, com autovalores reais e autovetores ortogonais.

4 Produtos da previsão por conjunto

A previsão de tempo por conjunto produz grande quantidade de informações e tem sido um desafio para os centros meteorológicos que implantaram este sistema condensar essas informações e extrair delas as características mais importantes para o previsor, ou para o usuário final. A forma mais simples de apresentar estas informações seria plotar todas as previsões dos membros em uma única página. No entanto, isto poderia causar interpretações subjetivas e discussões improdutivas; além disso, à medida que o número de membros do conjunto aumentasse seria difícil ter uma visão global de todos os padrões previstos. Esforços significativos têm sido dedicados ao desenvolvimento de produtos que sintetizem as informações do conjunto de previsões e que auxiliem a interpretação pelos previsores.

Os produtos mais comuns obtidos a partir da previsão de tempo por conjunto são apresentados e discutidos a seguir, eles fazem parte da rotina operacional de previsão de tempo do CPTEC e são disponibilizados via internet, na homepage do CPTEC pelo endereço <<http://previsaonumerica.cptec.inpe.br/>>.

4.1 Conjunto médio

É a forma mais condensada de obter informações da previsão por conjunto. Consiste em calcular a média das previsões considerando-se que todos os membros sejam igualmente prováveis de ocorrerem – desta forma, não se atribui peso a nenhuma previsão específica. O cálculo pode ser feito para cada ponto de grade j como segue:

$$EM_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_j^i \quad (5)$$

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

O conjunto médio pode ser considerado (para uma aproximação determinística) como a melhor estimativa da atmosfera futura, especialmente para previsão de médio prazo. Toth e Kalnay (1993), obtiveram que as correlações de anomalias do conjunto médio do NCEP para o geopotencial (em 500 hPa) eram 2% (3%) maiores sobre o Hemisfério Norte (Hemisfério Sul) do que a previsão determinística de 5 dias, numa resolução TQ0062. No ECMWF, Molteni et al. (1996) analisaram o skill (ie., a habilidade da previsão) do conjunto médio sobre o Hemisfério Norte para o campo de altura geopotencial em 500 hPa durante os invernos de 1992 e 1993, e primavera, verão e outono de 1993. Eles obtiveram que o Erro Quadrático Médio (EQM), médio de cada estação, apresentou melhora em relação à previsão de controle a partir de 4 a 5 dias. A Figura 3 apresenta uma comparação entre o EQM da previsão determinística em relação ao do conjunto médio, obtido por Coutinho (1999), para a altura geopotencial em 500 hPa durante um episódio de ciclogênese que ocorreu próximo à costa sul do Brasil em abril de 1998. Nota-se que o EQM do conjunto médio é menor do que o EQM da previsão de controle para todos os prazos de previsão.

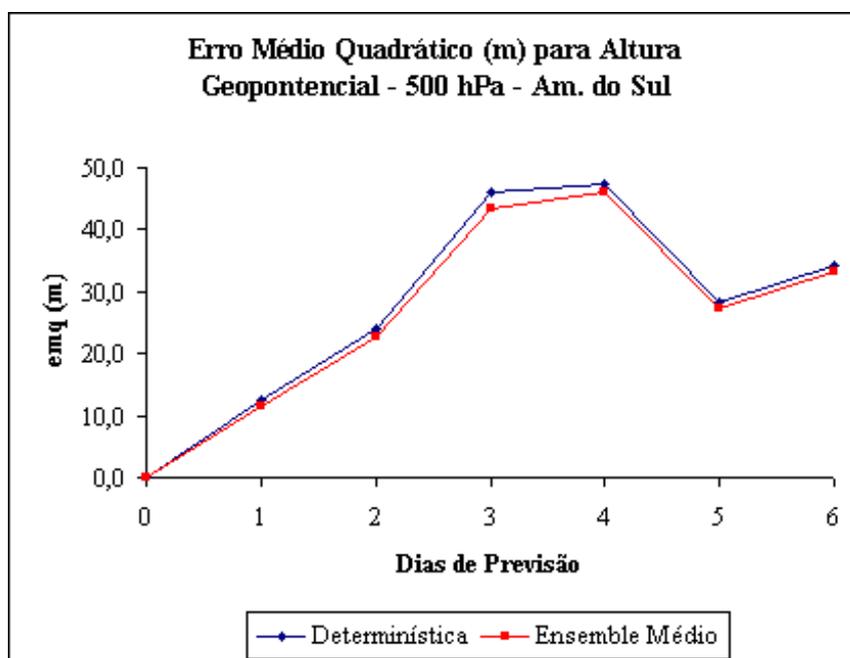


Figura 3: Erro Quadrático Médio (EQM) da Altura Geopotencial em 500 hPa, região da América do Sul, para a previsão determinística e para o conjunto médio. Previsão a partir de 27/04/1998 00Z.

4.2 Espalhamento do Conjunto

Uma informação muito significativa que pode ser obtida da previsão por conjunto está relacionada a capacidade de estimar a incerteza associada a determinado padrão atmosférico previsto. Trabalhos realizados por Buizza (1997) e Whitaker e Loughé (1998) para os sistemas de previsão por conjunto do ECMWF e do NCEP – respectivamente, mostraram haver determinada correlação entre o espalhamento do conjunto e os erros das previsões. A incerteza ou confiabilidade de uma previsão é avaliada, portanto, em função do espalhamento do conjunto de previsões, definido como o desvio padrão das previsões em relação ao conjunto médio (EM – Ensemble Mean, em inglês). Para regiões onde há menor espalhamento é atribuído maior confiabilidade à previsão e, para regiões onde os membros estejam afastados é atribuído menor confiabilidade. O espalhamento do conjunto para cada ponto de grade j pode

ser calculado como segue:

$$SPR_j = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_j^i - EM_j)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

onde N é o número de membros do conjunto e F_j^i e EM_j são as previsões de cada membro do conjunto e a previsão do conjunto médio, respectivamente.

O espalhamento do conjunto pode ser calculado para qualquer variável desejada; geralmente, são plotados no mesmo gráfico a previsão do conjunto médio e o espalhamento daquele campo, como pode ser observado na Figura 4, que apresenta a previsão de 5 dias para a altura geopotencial em 500 hPa. Através do espalhamento pode-se avaliar geograficamente as regiões onde há maior discordância entre os membros do conjunto, ou seja, a incerteza. Para este episódio, a Figura 4 sugere que o cavado previsto a leste da América do Sul apresenta maior confiabilidade do que a crista que se encontra a sudoeste deste cavado.

4.3 Diagramas “Spaghetti”

Os diagramas “Spaghetti” consistem, essencialmente, em plotar em um único gráfico a previsão de alguns contornos específicos dos diversos membros do conjunto, como apresentado na Figura 5 para os contornos de 0 e 15 graus Celsius da temperatura no nível de 850 hPa. Através destes diagramas pode-se fazer uma espécie de análise de agrupamento gráfica para identificar os cenários futuros mais prováveis, de acordo com o número de previsões que apontam naquela direção.

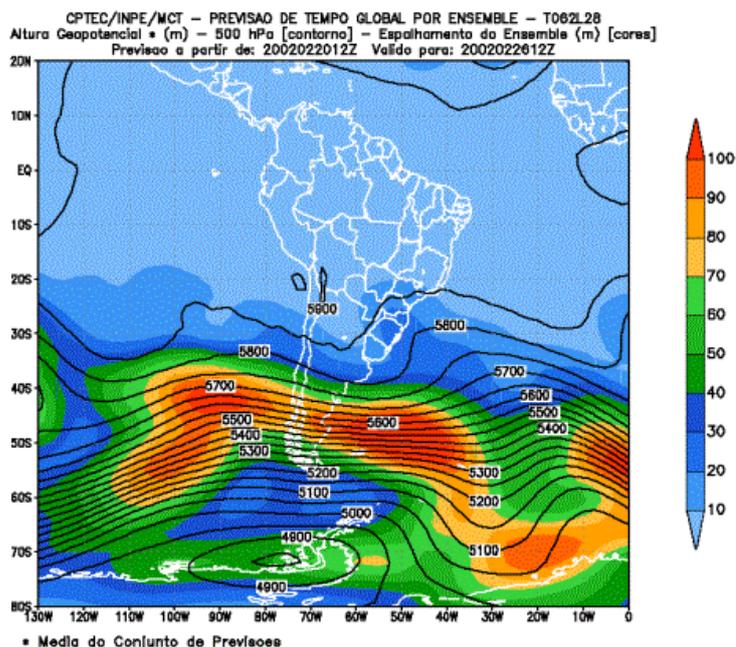


Figura 4: Conjunto médio (contornos) e espalhamento (cores) para a altura geopotencial em 500 hPa. Previsão de 6 dias.

4.4 Previsão de Probabilidades

A previsão de probabilidades é um dos produtos de grande aplicabilidade que pode ser gerado a partir da previsão de tempo por conjunto, sendo geralmente expressa de forma relativa (%). Dado um limiar pré-estabelecido, suponhamos precipitação acumulada em 24 horas acima de 1 mm, o que praticamente representa a possibilidade ou não de chuva, pode-se estimar, especialmente, quais são as regiões mais prováveis de ocorrência de precipitação nas últimas 24 horas de previsão do modelo. Para regiões que apontam probabilidades acima de 65%, para um limiar de 1 mm, as condições atmosféricas indicam possibilidade de ocorrência de precipitação, embora não se possa afirmar nada a respeito da intensidade, apenas que deve haver precipitação. Por outro lado, regiões que apresentam probabilidades abaixo de 35%, para o limiar de 1 mm, as condições atmosféricas indicam que existem pouquíssimas chances de ocorrência de algum tipo de precipitação. Para tentar discriminar qual

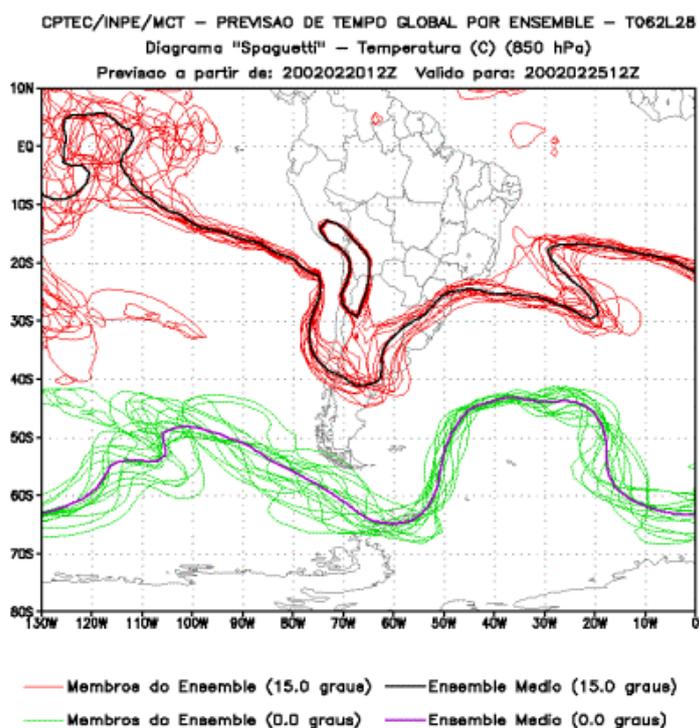


Figura 5: Diagrama “Spaguetti” para os contornos de 15.0 e 0.0 graus Celsius para região da América do Sul. Previsão de 5 dias.

é a categoria de precipitação prevista para determinada região, pode-se classificar a quantidade de precipitação em categorias conforme apresentado na Tabela 1 e, em seguida, calcular as probabilidades para os demais limiares, plotando os gráficos em uma única figura.

Tabela 1: Classificação das precipitações acumuladas em 24 horas em categorias e seus respectivos limiares

Categorias	Limiares (mm)
Chuva/Não-Chuva	1.0
Fraca	5.0
Moderada	10.0
Forte	20.0

O cálculo das probabilidades é realizado considerando-se que todos os membros do conjunto são equiprováveis, ou seja, não se atribui nenhuma espécie de peso para os membros. Desta forma, a probabilidade de ocorrência de um evento, para cada ponto de grade, pode ser calculado de acordo com a expressão:

$$P_j = 100 * \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_j^i \quad (7)$$

onde N é o número de membros e O_j^i é 1 se o evento é previsto, e 0 se o evento não é previsto. O evento pode ser, por exemplo, precipitação acima de um dos limiares da Tabela 1.

Outros parâmetros, além da precipitação, poderiam ser utilizados para o cálculo das probabilidades, tais como, altura geopotencial em 500 hPa acima de 5500 m, temperatura do ar no nível de 850 hPa abaixo de 0 graus Celsius, intensidade do vento à superfície acima de 10 m/s.

A Figura 6 apresenta a previsão de probabilidades de precipitação acumulada em 24 horas, válida para o dia 25/02/2002 às 12Z (previsão de 120 horas). No canto



superior esquerdo são apresentadas as probabilidades de ocorrência de precipitação acima de 1mm, ou seja, chuva ou não chuva. Mendonça (1999), observou que o modelo global do CPTEC possui uma tendência a superestimar o número de pontos onde efetivamente ocorre algum tipo de precipitação, desta forma, é possível que os membros do conjunto estejam superestimando as regiões de ocorrência de precipitação. Por isso, regiões que apresentam probabilidade acima de 65% podem ser consideradas com possibilidades de ocorrência de algum tipo de precipitação, por outro lado, probabilidades abaixo de 65% podem ser consideradas com poucas chances de ocorrência de precipitação. Adicionalmente, nas regiões onde as probabilidades são menores do que 35% é provável que nenhuma precipitação ocorra. Para os mapas de 5 e 10 mm (superior direito e inferior esquerdo), pode-se considerar que probabilidades acima de 65% indicam grande possibilidade de ocorrência de precipitações moderadas ou fortes, por outro lado, probabilidades abaixo de 65% indicam poucas chances de precipitação acima de 5 e 10 mm. O mapa inferior esquerdo, limiar de 20 mm, representa uma tentativa de prever as probabilidades de ocorrência de chuvas intensas, entretanto, à medida que o limiar de precipitação aumenta, o número de pontos onde se verificam chuvas acima deste limiar diminui, ou seja, o evento torna-se mais raro, conseqüentemente, mais difícil de ser previsto pelo modelo. Como foi observado por Mendonça (1999), a versão avaliada do modelo global do CPTEC (diferente da versão atual) apresenta tendência a subestimar o número de pontos com chuvas intensas. Por este motivo, as probabilidades para este limiar diminuem drasticamente, assim, pode-se considerar que regiões que apresentam probabilidades acima de 5% têm, potencialmente, chances de ocorrência de precipitação acima de 20 mm, o que não necessariamente, indicam chuvas intensas, pois esta quantidade corresponde ao acumulado em 24 horas.

Como neste sistema de previsão por conjunto é utilizado um modelo global, cuja

resolução horizontal é de aproximadamente 200x200 Km, é prudente considerar que as probabilidades previstas têm como origem a precipitação resultante dos padrões sinóticos da atmosfera, por isso, não se descarta a possibilidade da influência de fenômenos localizados, que podem determinar a condição do tempo local.

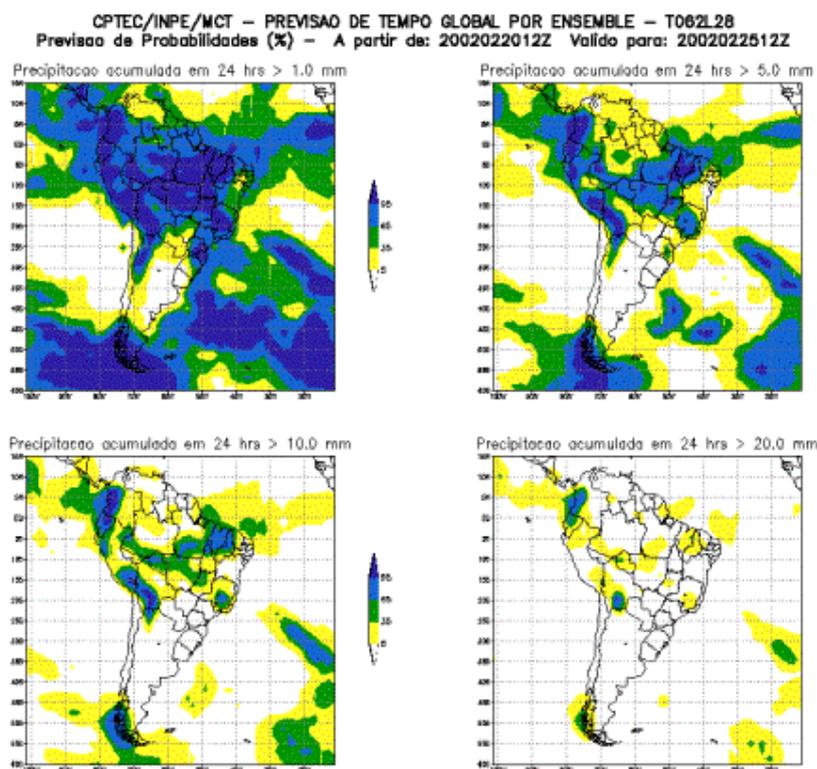


Figura 6: Previsão de probabilidades para os limiares de precipitação da tabela 1. Previsão de 5 dias.

4.5 Plumas de Probabilidades

A previsão de probabilidades (Seção 4.4) é construída de forma a apresentar a distribuição espacial de probabilidades para um determinado prazo de previsão, por exemplo, 24, 48 e 72 horas. Alternativamente, as plumas de probabilidades apresentam a evolução temporal da distribuição de probabilidades para um determinado ponto de grade do modelo. A Figura 7 apresenta um exemplo para a cidade de São

Paulo. Como pode ser observado, para o campo de precipitação não são calculadas as probabilidades – neste caso, são plotados os valores de precipitação em milímetros por hora, previstos pelos membros do conjunto. Para os demais campos, a probabilidade é calculada considerando-se que as previsões dos membros do conjunto sejam igualmente prováveis.

A probabilidade, para cada passo de tempo, é calculada pela razão entre o número de membros que preveem, por exemplo, temperatura em torno de 15.0°C , dentro de um intervalo de 1.0°C , pelo número de membros total. Considerar um intervalo de 1.0°C , significa que todos os membros que previram, em um determinado passo de tempo, temperaturas entre 14.5°C e 15.4°C estão classificados em um mesmo grupo, de 15.0°C .

A escolha dos intervalos deve ser adequada para cada variável, ou seja, deve ser escolhido de forma que a variação de metade deste intervalo, para cima ou para baixo, em torno de um valor específico, não seja significativo. Tomemos como exemplo a previsão de temperatura para o dia 25 de fevereiro, horário 00Z, da Figura 7. Pode-se verificar que foi previsto com 80% a 100% de probabilidade que a temperatura esteja em torno de 22.0°C , ou seja, entre 21.5°C e 22.4°C . Analogamente, os valores mais prováveis dos demais campos podem ser acessados a partir dos gráficos subsequentes, lembrando que o intervalo, ou desvio, em torno do valor obtido é de 3% para a umidade relativa à superfície, 2.0 m/s para a intensidade do vento horizontal à superfície e 3 hPa para a pressão à superfície.

Uma informação importante que pode ser obtida das plumas de probabilidade está relacionada à confiabilidade do evento previsto. No caso da precipitação, onde são plotadas as previsões de cada membro, podemos ver antes do dia 21 e entre os dias 22 e 23 de fevereiro (Figura 7) que todos os membros do conjunto preveem um máximo de precipitação aproximadamente no mesmo horário, embora se observe alguma



divergência quanto à intensidade. Desta forma, pode-se atribuir maior confiabilidade a esta previsão e considerar que há possibilidade de chuvas intensas, uma vez que o período, entre o início e o final da precipitação é razoavelmente curto. Entre os dias 21 e 22 de fevereiro os membros do conjunto preveem precipitação razoável, apesar de que não há concordância quanto ao horário das chuvas. Visualmente, podemos dividir as previsões em dois grupos, um que prevê o máximo de precipitação no início da tarde e outro que prevê o máximo de precipitação no início da noite. Nesse caso, a confiabilidade quanto ao horário de ocorrência do máximo de precipitação é menor, mas os membros concordam que deve haver chuva entre o início da tarde e o final da noite deste dia. Do dia 23 ao dia 25, apenas alguns membros preveem precipitação fraca, nesse caso, é provável que não ocorra precipitação durante este período. Entre os dias 25 e 26, a previsão indica possibilidade de precipitação de intensidade fraca. A partir do dia 26, começa haver grande dispersão entre os membros, o que indica baixa confiabilidade. No entanto, os membros concordam quanto à possibilidade de precipitação até mesmo de chuvas intensas, previstas por alguns membros.

Para os demais campos, onde são apresentadas a previsão de controle (linha sólida) e as probabilidades (cores), se considerarmos um momento específico, a soma das probabilidades de cada uma das variáveis deve totalizar 100%. Desta forma, os horários que apresentam maior dispersão entre os membros, ou menor confiabilidade, estão relacionados aos momentos em que há maiores regiões com probabilidades entre 1% e 20%, ou seja, regiões onde a cor azul se destaca em relação às demais. Um exemplo deste comportamento pode ser visto na Figura 7 na acentuada queda da umidade relativa prevista para o período diurno entre os dias 23 e 24 de fevereiro. Nesse caso, os membros concordam quanto à diminuição da umidade, entretanto, há divergências quanto à magnitude desta diminuição; é previsto que a umidade tenha um mínimo entre 40% e 75%, embora seja mais provável que ela esteja em torno

de 55% na tarde do dia 23. Embora seja mais provável que o mínimo de umidade relativa esteja em torno 55%, a confiabilidade desta previsão é pequena, pois este valor é previsto apenas com cerca de 20% a 40% de chances de ocorrência.

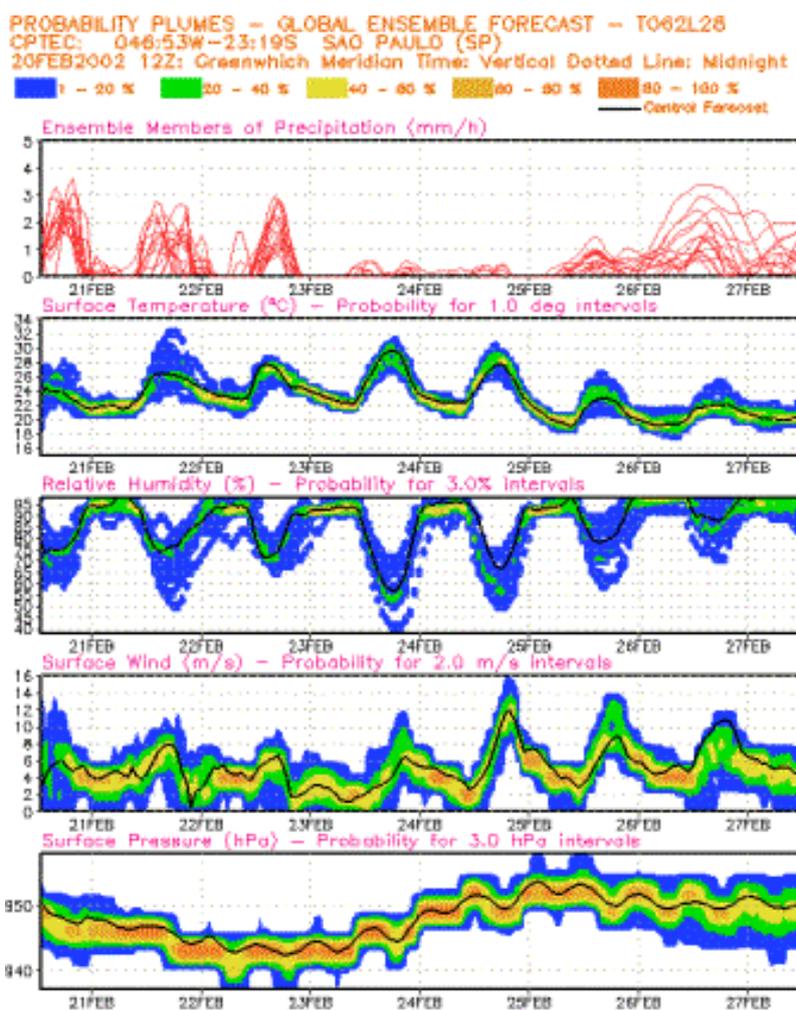


Figura 7: Plumagens de probabilidades para o ponto de grade onde está situada a cidade de São Paulo. Previsão a partir do dia 20/02/2002 12Z. De cima para baixo: o primeiro gráfico apresenta a previsão dos membros do conjunto para a precipitação. Em seguida, as plumagens de probabilidades: segundo gráfico para a temperatura à superfície; terceiro gráfico para a umidade relativa à superfície; no quarto gráfico a intensidade do vento à superfície e no quinto gráfico a pressão à superfície. A curva sólida preta indica a previsão de controle, e as linhas pontilhadas verticais indicam o horário 00Z.

5 Discussão

Desde que foram criados os primeiros modelos dinâmicos para a previsão numérica do tempo sabia-se que o índice de acerto destas previsões era limitado e as falhas dos modelos geralmente eram associadas ao tratamento inadequado dos processos físicos da atmosfera. Certamente estes erros seriam capazes de limitar o prazo da previsão. Entretanto, Lorenz observou que o conjunto de equações que descrevem os movimentos atmosféricos apresenta dependência sensível em relação à condição inicial, ou seja, pequenos erros nas condições iniciais podem ocasionar grandes erros em uma previsão futura mesmo que os modelos fossem perfeitos. Esta descoberta mostrou que não basta melhorar a descrição dos fenômenos atmosféricos pelos modelos, mas é preciso levar em conta a incerteza associada as observações utilizadas na geração da condição inicial.

Ao longo das últimas décadas foram desenvolvidos e testados diversos mecanismos de perturbação de condições iniciais com a finalidade de estimar os erros inerentes às condições iniciais convencionais. Os mecanismos que empregam um tratamento dinâmico-estatístico para estimar os modos de crescimento mais rápido das perturbações iniciais, durante a integração do modelo, têm mostrado maior eficiência para geração de condições iniciais perturbadas. Os métodos mais conhecidos são aqueles empregados pelo NCEP e pelo ECMWF. No CPTEC, adotou-se um mecanismo que foi desenvolvido por Zhang e Krishnamurti (1999) e primeiramente utilizado para a previsão de trajetória de furacões, chamado “EOF-based perturbations”, e adaptado para previsão de tempo global por Coutinho (1999).

Extraír da previsão de tempo por conjunto as informações mais significativas e produtos que sejam aplicáveis de forma operacional, tem sido um grande desafio para pesquisadores e usuários deste sistema. Diversos produtos, tais como os descritos na



Seção 4, foram desenvolvidos para auxiliar os previsores e os tomadores de decisões. Apesar disso, o intercâmbio de informações, bem como as avaliações destes produtos podem ser de grande valia para o desenvolvimento de novos produtos e a melhoria do sistema como um todo.

O sistema de previsão de tempo por conjunto do CPTEC, iniciado operacionalmente em outubro de 2001, busca fornecer à comunidade meteorológica brasileira mais uma ferramenta no âmbito da previsão numérica do tempo e representa uma tentativa de tratar o sistema atmosférico mais adequadamente, ou seja, como um sistema caótico.

Outras informações sobre o estado atual e diagnósticos mais detalhados sobre o sistema de previsão por conjunto global do CPTEC, podem ser encontradas em Bastarz et al. (2016).

Referências

- Bastarz, C. F., L. F. Sapucci, J. P. Bonatti e L. G. G. de Gonçalves. 2016. *Sistema de Modelagem por Conjunto (SMC) (Versão Inicial V0.0)*. 98. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/08.17.14.20>.
- Buizza, R. 1997. "Potential Forecast Skill of Ensemble Prediction and Spread and Skill Distributions of the ECMWF Ensemble Prediction System." *Monthly Weather Review* 125 (1): 99–119. doi:10.1175/1520-0493(1997)125<0099:PFSOEP>2.0.CO;2. eprint: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1997\)125<0099:PFSOEP>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<0099:PFSOEP>2.0.CO;2). [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1997\)125%3C0099:PFSOEP%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125%3C0099:PFSOEP%3E2.0.CO;2).



- Coutinho, M. M. 1999. “Previsão por Conjuntos Utilizando Perturbações Baseadas em Componentes Principais.” Tese de doutorado, Dissertação (Mestrado em Meteorologia)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.
- Cunningham, C., Bonatti J. P. e M. Ferreira. 2015. “Assessing Improved CPTEC Probabilistic Forecasts on Medium-Range Timescale.” *Meteorological Applications* 22 (3): 378–384. ISSN: 1469-8080. doi:10.1002/met.1464. <http://dx.doi.org/10.1002/met.1464>.
- Daley, R., e T. Mayer. 1986. “Estimates of Global Analysis Error from the Global Weather Experiment Observational Network.” *Monthly Weather Review* 114 (9): 1642–1653. doi:10.1175/1520-0493(1986)114<1642:EOGAEF>2.0.CO;2. eprint: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1986\)114<1642:EOGAEF>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1986)114<1642:EOGAEF>2.0.CO;2). [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1986\)114%3C1642:EOGAEF%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1986)114%3C1642:EOGAEF%3E2.0.CO;2).
- Legler, D. M. 1983. “Empirical Orthogonal Function Analysis of Wind Vectors over the Tropical Pacific Region.” *Bulletin of the American Meteorological Society* 64 (3): 234–241. doi:10.1175/1520-0477(1983)064<0234:EOFA0W>2.0.CO;2. eprint: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1983\)064<0234:EOFA0W>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1983)064<0234:EOFA0W>2.0.CO;2). [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1983\)064%3C0234:EOFA0W%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1983)064%3C0234:EOFA0W%3E2.0.CO;2).
- Lorenz, E. N. 1963. “Deterministic Nonperiodic Flow.” *Journal of the Atmospheric Sciences* 20 (2): 130–141. doi:10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2. eprint: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020<0130:DNF>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2). [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020%3C0130:DNF%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020%3C0130:DNF%3E2.0.CO;2).



- Lorenz, E. N. 1965. “A Study of the Predictability of a 28-Variable Atmospheric Model.” *Tellus* 17 (3): 321–333. ISSN: 2153-3490. doi:10.1111/j.2153-3490.1965.tb01424.x. <http://dx.doi.org/10.1111/j.2153-3490.1965.tb01424.x>.
- . 1969. “The Predictability of a Flow Which Possesses Many Scales of Motion.” *Tellus* 21 (3): 289–307. ISSN: 2153-3490. doi:10.1111/j.2153-3490.1969.tb00444.x. <http://dx.doi.org/10.1111/j.2153-3490.1969.tb00444.x>.
- Mendonça, A. M. 1999. “Desempenho do Modelo Global CPTEC/COLA Durante Episódios de ZCAS, Utilizando os Esquemas de Convecção Profunda T Kuo e Arakawa-Schubert Relaxada.” Tese de doutorado, (Doutorado em Meteorologia)- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999. <http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2003/05.23.14.33>.
- Mendonça, A. M., e J. P. Bonatti. 2009. “Experiments with EOF-Based Perturbation Methods and Their Impact on the CPTEC/INPE Ensemble Prediction System.” *Monthly Weather Review* 137 (4): 1438–1459. doi:10.1175/2008MWR2581.1. eprint: <http://dx.doi.org/10.1175/2008MWR2581.1>. <http://dx.doi.org/10.1175/2008MWR2581.1>.
- Molteni, F., R. Buizza, T. N. Palmer e T. Petroliagis. 1996. “The ECMWF Ensemble Prediction System: Methodology and Validation.” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 122 (529): 73–119. ISSN: 1477-870X. doi:10.1002/qj.49712252905. <http://dx.doi.org/10.1002/qj.49712252905>.



- Toth, Z., e E. Kalnay. 1993. “Ensemble Forecasting at NMC: The Generation of Perturbations.” *Bulletin of the American Meteorological Society* 74 (12): 2317–2330. doi:10.1175/1520-0477(1993)074<2317:EFANTG>2.0.CO;2. eprint: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1993\)074<2317:EFANTG>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1993)074<2317:EFANTG>2.0.CO;2). [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1993\)074%3C2317:EFANTG%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1993)074%3C2317:EFANTG%3E2.0.CO;2).
- Whitaker, J. S., e A. F. Loughe. 1998. “The Relationship Between Ensemble Spread and Ensemble Mean Skill.” *Monthly Weather Review* 126 (12): 3292–3302. doi:10.1175/1520-0493(1998)126<3292:TRBESA>2.0.CO;2. eprint: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<3292:TRBESA>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<3292:TRBESA>2.0.CO;2). [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126%3C3292:TRBESA%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126%3C3292:TRBESA%3E2.0.CO;2).
- Zhang, Z., e T. N. Krishnamurti. 1999. “A Perturbation Method for Hurricane Ensemble Predictions.” *Monthly Weather Review* 127 (4): 447–469. doi:10.1175/1520-0493(1999)127<0447:APMFHE>2.0.CO;2. eprint: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<0447:APMFHE>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<0447:APMFHE>2.0.CO;2). [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127%3C0447:APMFHE%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127%3C0447:APMFHE%3E2.0.CO;2).