

## Previsão de Ondas Oceânicas por Ensemble: Uma Revisão e Estudo de Caso

LEANDRO FARINA

Instituto de Matemática, Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
CEP 91509-900, Porto Alegre, RS. email: farina@mat.ufrgs.br

(Recebido em 03/06. Aceito para publicação em 09/06)

**Abstract-** The ensemble numerical prediction of ocean waves is considered and all published works on this new topic in Geosciences are reviewed. A Wave Ensemble Prediction System is described where a global third-generation wave model is adopted. Twenty members are generated by a method based on Empirical Orthogonal Functions and a particular realistic case where several extreme wave events occurred is analysed.

**Keywords-** ocean wave, ensemble prediction, empirical orthogonal functions, WAM.

### INTRODUÇÃO

Previsões atmosféricas e oceanográficas obtiveram nas últimas décadas grandes benefícios através de avanços na tecnologia computacional, sensoriamento remoto e em modelos matemáticos mais sofisticados. Contudo, os correspondentes avanços na habilidade de prever os comportamentos do tempo e dos oceanos não foram tão significantes como esperados. Isso se deve à não linearidade de modelos atmosféricos podendo produzir resultados de curto e médio prazo que são qualitativamente distintos se pequenos erros estão presentes nas condições iniciais. Este caráter da atmosfera e indiretamente dos oceanos pode ser simbolizado pelo chamado *Efeito Borboleta*. Para a sua célebre palestra em dezembro de 1972, na ocasião do encontro da Associação Americana para o Progresso da Ciência, o meteorologista Edward Lorenz deu o título: “Previsibilidade: O bater de asas de uma borboleta no Brasil desencadeia um tornado no Texas?”, em uma alusão à sensibilidade da evolução dos fenômenos atmosféricos às condições iniciais e aos limites máximos da previsibilidade atmosférica.

A previsão numérica por ensemble é um método consolidado para melhorar o desempenho de modelos físico-matemáticos de previsão de clima e do tempo. Levando em consideração que sempre existem erros nas observações que são utilizadas e providas a um modelo, a idéia de uma única, determinística previsão se torna questionável. Por

outro lado, ao utilizar-se um conjunto (ou ensemble) de condições iniciais ou até de modelos perturbados com erros ou parâmetros representando as incertezas das medições, pode-se obter mais informações sobre o comportamento das soluções do modelo, geração de possíveis eventos distintos e probabilidades associadas a eles fornecendo assim uma maior confiabilidade da previsão final. Na modelagem de ondas oceânicas, o tópico ainda é recente e pouco foi pesquisado e documentado sobre esta técnica. A seguir, fazemos uma revisão do estado do conhecimento técnico-científico sobre o assunto.

No *Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), previsões de ondas por ensemble são operacionais e diárias desde junho de 1998. Neste centro, a partir de setembro de 2005, previsões de até 10 dias são fornecidas em uma malha com resolução de 0,25 X 0,25 graus para a previsão de controle e de 1 x 1 grau para os outros 50 membros do ensemble. A resolução espectral é de 24 direções e 30 frequências. Os parâmetros calculados são alturas significativas e períodos médios de marulho (*swell*), de vagas (*wind sea*) e do mar total. Os campos de ventos são originais do Sistema de Previsão por Ensemble (SPE) do ECMWF, que emprega o método dos Vetores Singulares. Nos *National Centers for Environmental Prediction* NCEP, análises ainda experimentais de previsões de ondas por ensemble começaram a ser disponibilizadas ao público em 2005.

Estudos iniciais sobre os benefícios potenciais da previsão por ensemble de ondas foram

conduzidos por Hoffschilt et. al. (2000) e Janssen (2000) no ECMWF. Neste trabalho uma aplicação do método à otimização de rotas de navios no Atlântico Norte foi descrita, onde apenas os ventos são perturbados.

Trabalhos adicionais, por Farina (2002) apresentam um procedimento formal para execução de um sistema de previsão de ondas por ensemble (SPOE) usando perturbações dos ventos de superfície e do espectro de ondas. Observou-se que mesmo impondo perturbações extremas no espectro inicial, o estado do mar tende a estabilizar quase que completamente após um período de 48 horas. Por outro lado, perturbando a condição atmosférica pôde-se gerar condições que evoluem em distintos estados do mar formando um ensemble de possíveis previsões. De fato, as condições atmosféricas não constituem condições iniciais apenas pois estas são os ventos e estes são prescritos para todo o intervalo do tempo em que o modelo é executado. Assim, obtém-se soluções do modelo divergentes entre si. O fenômeno da estabilização do espectro é evidenciado usando o método de *Breeding* para perturbar o espectro de ondas. As condições atmosféricas perturbadas são geradas pelo método do SPE do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) que é baseado em funções ortogonais empíricas. Estudos de casos globais onde o vento é perturbado são apresentados e analisados.

Saetra e Bidlot (2002 e 2004) apresentam previsões probabilísticas de ondas usando o SPOE do ECMWF. Novamente, apenas o campo de ventos é perturbado e o estudo de uma tempestade ocorrida em 10-11 de novembro de 2001 no Mar da Noruega é analisado utilizando as previsões de ondas por ensemble. Nesta tempestade, alturas significativas excederam 15 metros e a onda individual mais alta ocorrida foi de 25 metros. Embora o modelo não tenha conseguido prever tais ondas, o SPOE forneceu uma probabilidade de 50% para ondas com alturas significativas superiores a 8 m ocorrerem na região em questão. Nestes estudos, são realizadas comparações de previsões de ondas e de ventos por ensemble com dados de bóias e de atímetro do satélite ERS-2, em sua grande maioria, localizados no Hemisfério Norte. Usando diagramas de confiabilidade, uma muito boa confiabilidade das previsões probabilísticas é concluída, com restrições para previsões de ondas com alturas significativas acima de 6 a 8 metros.

Recentemente, Farina et al (2005) utilizaram uma linearização do modelo WAM para obter aproximações de membros do ensemble e resultados

numéricos foram apresentados. Este procedimento foi originalmente utilizado em um esquema de assimilação de dados dinâmico onde funções de Green têm um papel central. Tais aproximações permitem a execução de um SPOE em uma fração do tempo necessário para sua execução convencional. Os resultados sugeriram que as aproximações dos membros poderiam ser calculadas em adição aos membros convencionais do ensemble. Este procedimento dobraria o tamanho do ensemble com um pequeno custo computacional e geraria informações ausentes no SPOE original.

A seguir, descreveremos um sistema de previsão de ondas por ensemble baseado em (Farina, 2002) e apresentaremos alguns resultados computados.

## MÉTODO

Utilizamos o modelo de ondas de terceira geração WAM que é governado pela equação do balanço que descreve a evolução da *densidade de energia das ondas*, ou o espectro de ondas. Esta equação pode ser escrita como

$$\frac{DF}{Dt} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds}.$$

Aqui,

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{c}_g \cdot \nabla_{\mathbf{c}_g},$$

onde  $F$  é o espectro de ondas e  $\mathbf{c}_g$  é velocidade de grupo. O lado direito da equação do balanço contém os termos fonte:  $S_{in}$  descreve a geração e crescimento de ondas devido ao vento,  $S_{nl}$  representa as interações não-lineares entre conjuntos de quatro ondas ressonantes e  $S_{ds}$  fornece a parametrização da dissipação de ondas causada por fricção com o fundo e por quebra de ondas e águas profundas. Para resolver a equação (1), o espectro  $F$  em um tempo inicial e o campo de vento para todo o tempo devem ser prescritos. Um dos parâmetros mais analisados obtidos da solução do problema modelado é a altura significativa de ondas  $H_s$ , definida como a altura média do 1/3 das ondas mais altas. Pode ser mostrado que

$$H_s = 4\sqrt{E},$$

onde  $E$  representando a energia total de ondas em uma posição  $x$  e para um tempo  $t$ , é dada pela inte-

gral

$$E = \int_0^{2\pi\infty} \int_0 F(f, \theta) df d\theta,$$

sobre as frequências  $f$  e direções  $\theta$  de ondas.

As simulações foram feitas num domínio global com resolução de 1.875 graus e usando a física da propagação de ondas em águas profundas. Um SPOE pode essencialmente empregar dois procedimentos para produzir seus membros: (i) gerar perturbações dos ventos de superfície, as forçantes do modelo e/ou (ii) fazer perturbações do espectro de ondas inicial, a principal variável do modelo. Estes dois procedimentos são descritos detalhada e formalmente em (Farina, 2002).

Perturbando o espectro de ondas, pode-se observar, com a integração no tempo do modelo, o denominado fenômeno de estabilização da forma do espectro. Ou seja, o estado do mar tende a rapidamente assumir uma condição padrão que é ditada pelos ventos de superfície. Este efeito é governado e existente devido às interações não-lineares entre grupo de quatro ondas ressonantes em águas profundas e também de três ondas, em águas rasas. Os campos de ventos foram perturbados entre as latitudes 50S e 10N, empregando um método baseado em funções ortogonais empíricas, originalmente desenvolvido por Zhang e Krishnamurti (1999) e adaptado por Coutinho (1999). Foram gerados 20 membros do ensemble. Estas perturbações da condição atmosférica de controle são separadas em dois grupos de 10, denotadas por 1P, 2P, ..., 10P e 1N, 2N, ..., 10N, onde P e N representam positivo e negativo, respectivamente e estão relacionados com a forma na qual as perturbações foram obtidas. Somados a solução de controle (previsão determinística, convencional) e à média do ensemble, forma-se um conjunto de 22 estados do mar a serem analisados. Calculou-se também uma solução de referência, definida como uma previsão de curto prazo com os ventos de maior confiabilidade à nossa disposição.

## RESULTADOS

Para este trabalho, estudamos o estado do mar global em 22 de junho de 2000 às 00 GMT. Esta escolha se deve a ocorrência de eventos de interesse em diversos locais do globo, notadamente no Hemisfério Sul. Em particular, verificaram-se fortes agitações marítimas ao sul do Brasil, devido a um ciclone extratropical; no sul da África e ao sudeste da Austrália, conforme mostrado na solução

de referência, mapa superior a esquerda na figura 1. Os outros mapas, nesta figura, mostram as previsões de 6 dias da altura significativa de ondas do controle (acima à direita), de membros do ensemble com o menor e com o maior erro quadrático médio global, o membro que melhor previu o evento extremo ao sul da África e a média do ensemble.

Observou-se que o evento de agitação marítima ao sul do Brasil foi previsto com 6 dias de antecedência pelo SPOE, visto que vários membros do ensemble mostraram esta agitação marítima. Esta indicação de evento extremo também é presente na média do ensemble, contudo com menor intensidade, como vemos na figura 2.

Na figura 3, vemos todos as previsões do ensemble, incluindo o controle, a média e a solução de referência. Observamos que o evento próximo ao sul da África foi previsto apenas por dois membros do ensemble, sendo um deles, o membro 4P, com um deslocamento do centro da agitação marítima e outro, o membro 6N, com ondas menos intensas. Notamos ainda que a previsão determinística, representada pelo controle não prevê o evento. Isso demonstra que não haveria previsão deste evento com uma previsão convencional.

Para o evento ao sudeste da Austrália houve um deslocamento para Leste da previsão do núcleo da agitação marítima. O membro 1N prevê a agitação com precisão espacial, porém o subestima, conforme visto na figura 4.

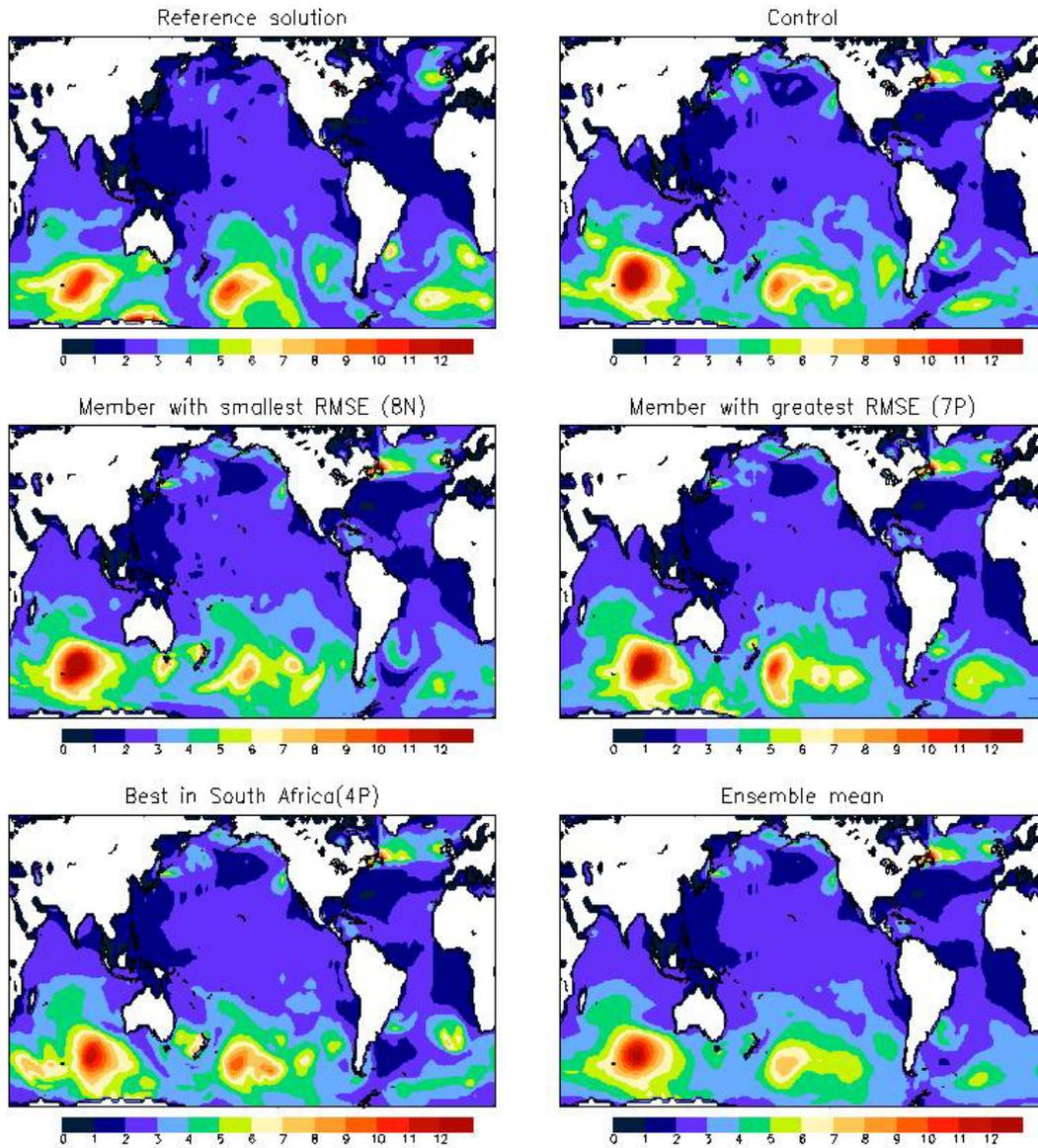
Concluindo esta seção, a figura 5 mostra o erro quadrático médio global entre os membros do ensemble e a solução de referência. Observamos que apenas 3 membros têm desempenho global melhor do que a média do ensemble o que indica que em casos onde não há ocorrência de eventos extremos a média do ensemble é sempre uma previsão razoável.

## CONCLUSÕES

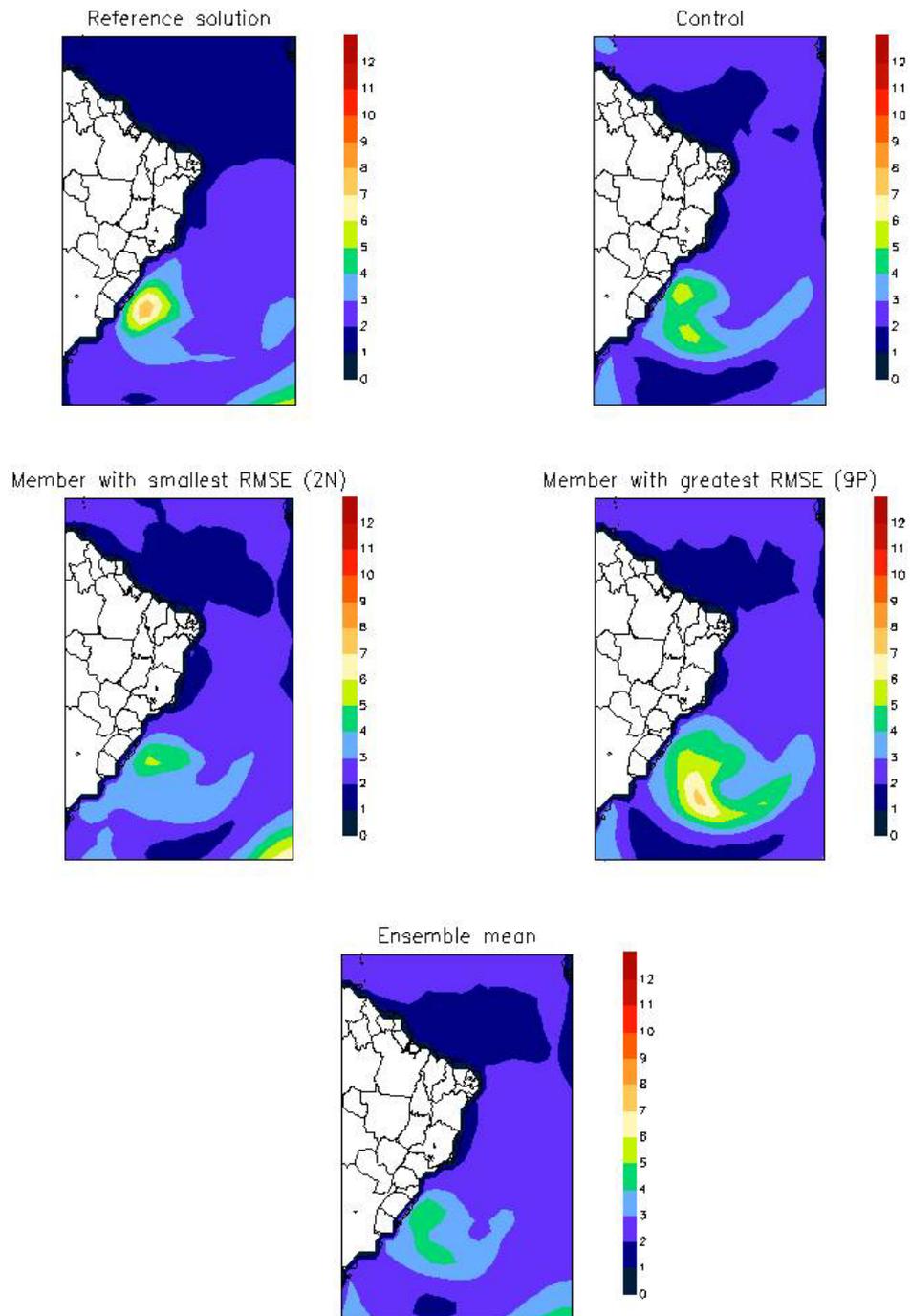
Neste trabalho, apresentamos uma revisão do estado atual do conhecimento e pesquisa acerca do ainda recente tópico da previsão de ondas oceânicas por ensemble. Como o tópico é novo, apenas poucos trabalhos estão publicados o que torna esta revisão breve. Este método abre a possibilidade de estabelecer previsões de maior precisão e para eventos oceanográficos extremos que alternativamente não figurariam em previsões convencionais, como ilustrado no estudo de caso descrito na seção anterior. Ademais, utilizando um SPOE pode-se obter distribuições de probabilidades e estimar a chance de ocorrência de eventos com im-

pactos ambientais graves. Estes impactos podem ser decorrentes, por exemplo, de operações de exploração de petróleo em águas profundas, ressacas geradas por ciclones ou furacões em orlas de diversas cidades do Brasil e da vulnerabilidade da navegação marítima a estados extremos do mar. Talvez o único ponto desfavorável em um SPOE seja o seu elevado custo de computação, visto que vários membros e

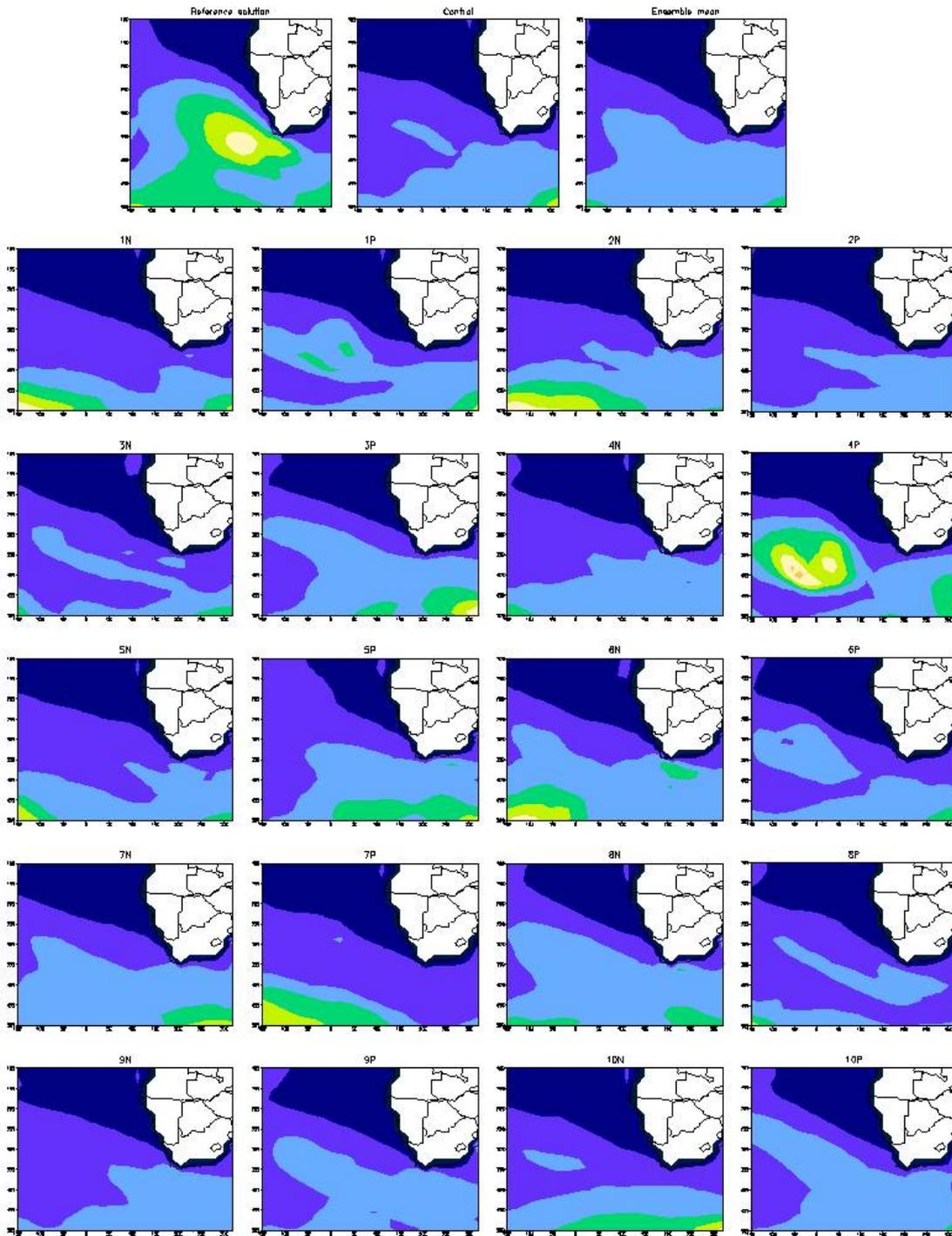
previsões são calculados. Estudos visando a redução desta demanda computacional estão em andamento e resultados iniciais (Farina et. al., 2005) mostraram como viabilizar o aumento do número de membros do ensemble ou o aumento da resolução do modelo. Isto possibilita, entre outras coisas, a aplicação do SPOE em centros com recursos computacionais reduzidos.



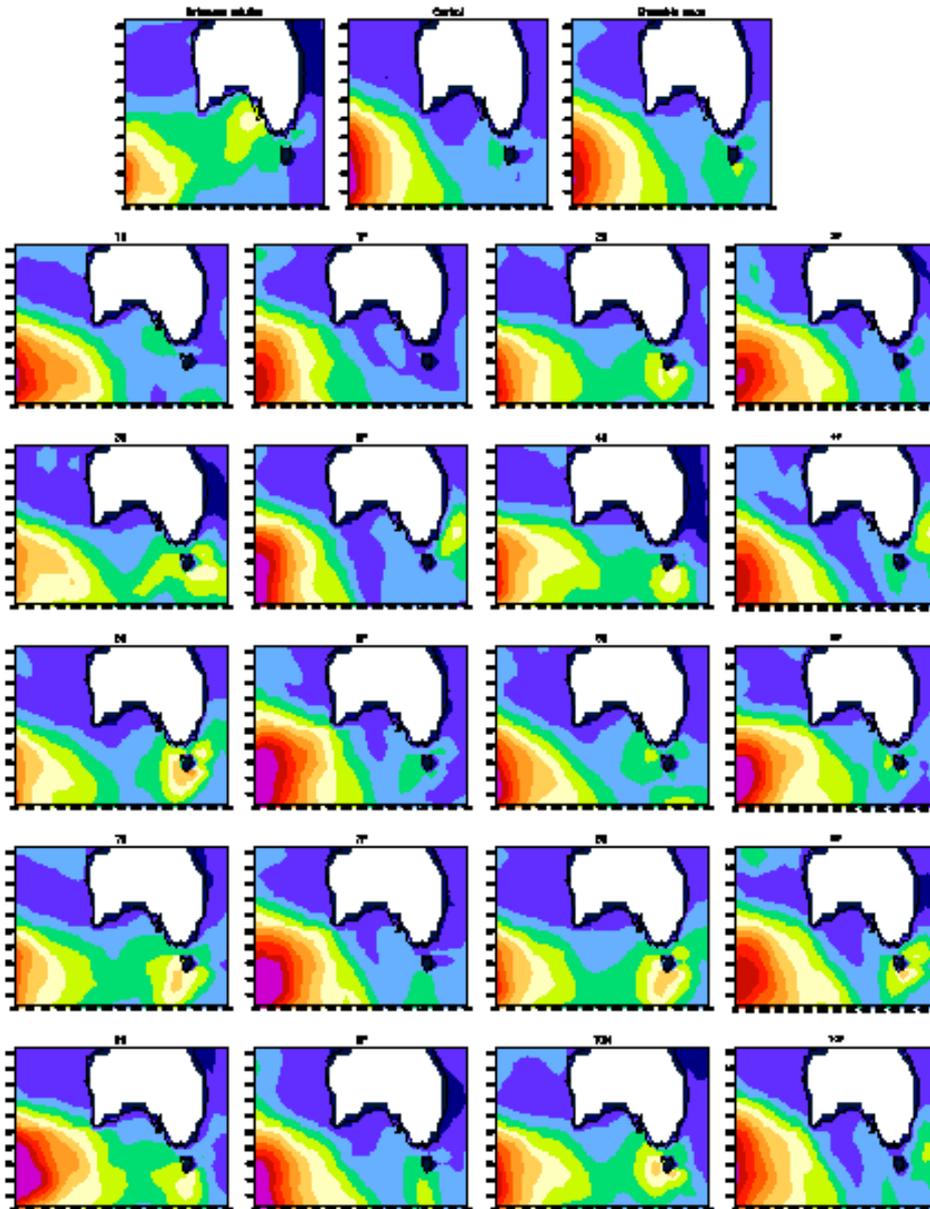
**Figura 1** – Altura significativa de ondas para 22 de junho de 2000 às 00 GMT previstas com 144 horas de antecedência. No mapa acima à esquerda, a solução de referência, ou verificação. Acima à direita, a previsão do controle. Abaixo, à direita, a média de todos os membros do ensemble. Os demais mapas mostram, como indicado na figura, as previsões de 6 dias dos membros com menor e maior erro quadrático médio e do membro com a melhor previsão da agitação marítima ocorrida próximo ao sul da África.



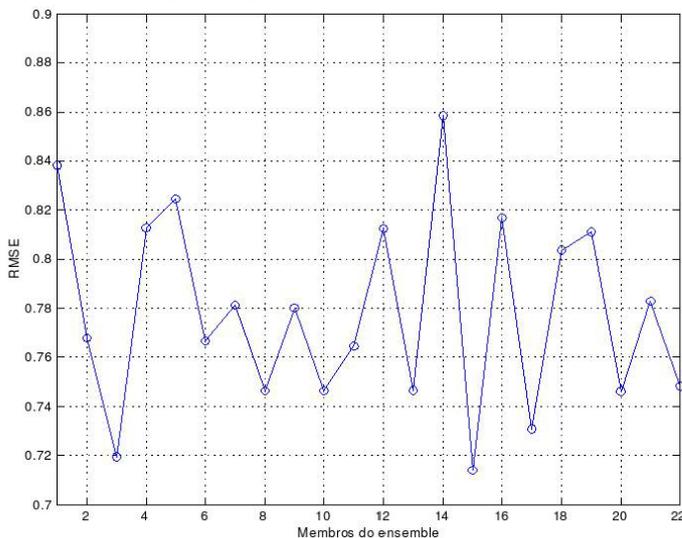
**Figura 2** – Altura significativa de ondas para 22 junho de 2000 às 00 GMT previstas com 144 horas de antecedência. No mapa acima à esquerda, a solução de referência, ou verificação. Acima à direita, a previsão do controle. No meio, à esquerda e à direita, os membros do ensemble com menor e maior erro quadrático médio, respectivamente. Em baixo, a média de todos os membros do ensemble.



**Figura 3** – Altura significativa de ondas próximo ao Sul da África para 22 junho de 2000 às 00 GMT previstas com 144 horas de antecedência. No mapa acima à esquerda, a solução de referência, ou verificação. Acima ao centro, a previsão do controle. Acima, à esquerda, a média de todos os membros do ensemble. Os demais mapas da figura mostram todos os membros do ensemble de 1N,1P à 10N,10P.



**Figura 4** – Altura significativa de ondas próximo à Austrália para 22 junho de 2000 às 00 GMT previstas com 144 horas de antecedência. No mapa acima à esquerda, a solução de referência, ou verificação. Acima ao centro, a previsão do controle. Acima, à esquerda, a média de todos os membros do ensemble. Os demais mapas da figura mostram todos os membros do ensemble de 1N,1P à 10N,10P.



**Figura 5** – Erro quadrático médio global para as previsões de 144 h, para cada membro do ensemble. Os membros são representados pelos números de 1 a 20, na ordem 1N, 1P,2N,2P,...10N,10P. O controle é indicado pela abcissa 21 e a média do ensemble, por 22.

## REFERÊNCIAS

- Coutinho, M.M. 1999. **Previsão por conjuntos utilizando perturbações baseadas em componentes principais**. 135p.. São José dos Campos. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, INPE.
- Farina, L. 2002. On ensemble prediction of ocean waves. **Tellus 54A**: 149-158.
- Farina, L; Mendonça, A. M. & Bonatti, J. P. 2005. Approximation of ensemble members in ocean wave prediction. **Tellus 57A**: 204-216.
- Hoffschmidt, M.; Bidlot, J.R.; Hansen, B. & Janssen, P. A. E. M., 1999. Potential Benefit of Ensemble Forecastas for Ship Routing. **Memorando técnico do ECMWF, 287**, Reading, Grã-Bretanha.
- Janssen, P. A. E. M..2000. Potential benefits of ensemble prediction of waves. **Newsletter do ECMWF, 86**:3-6.
- Saetra , O.& Bidlot, J.-R. 2002. Probabilistic forecasts for ocean waves. **Newsletter do ECMWF, 95**: 2-9.
- Saetra, O. & Bidlot, J. -R. 2004. Potential benefits of using probabilistic forecasts for waves and marine winds based on the ECMWF ensemble prediction system. **Weather and Forecasting, 19**: 673-689.
- Zhang, Z & Krishnamurti, T. N., 1999. A perturbation method for hurricane ensemble predictions. **Monthly Weather Review, 127**: 447-469.