

# FONTES CONVECTIVAS TROPICAIS EM UM MODELO BAROCLÍNICO ESPECTRAL GLOBAL USANDO FUNÇÕES DE HOUGH

José Paulo Bonatti

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais -INPE  
Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC

## ABSTRACT

A fully spectral baroclinic model based on Hough Functions is used to study the influence of the tropical convective heat sources over South America. The sources are stabilised using analytical approximation to an outgoing longwave radiation climatological data for summer. It is analysed the energy exchange between vertical and horizontal modes.

## 1 - INTRODUÇÃO

O Brasil está sob a influência direta de três regiões de convergência/convecção locais: Amazônia (CAMZ) e Zona de convergência da América do Sul (ZCAS), principalmente no verão, e a zona de convergência intertropical (ZCIT). Existe a influência remota da região de convergência/convecção da Indonésia (CIND) e da zona de convergência do Pacífico Sul (ZCPS), principalmente em anos de El-Niño, e há também alguma indicação de que a região de convecção da África (CAFR) poderia afetar a região do Atlântico tropical e o norte/NE do Brasil. É muito importante, portanto, o conhecimento desses processos para que se possa modelá-los adequadamente e obter previsões melhores principalmente sobre a região tropical da América do Sul.

Vários estudos tem sido feitos sobre o efeito da convecção tropical na dinâmica da atmosfera. Os modelos utilizados, ou são muito complexos (Modelos Atmosféricos de Circulação Geral - MACG), ou são simples o suficiente para isolar o processo em estudo porém são barotrópicos, ou ainda que baroclínicos em geral são em diferenças finitas. Nesses tipos de modelos consegue-se estudar a resposta final, porém a maneira como a energia foi dispersada para atingí-la fica muito difícil de ser analisada. Existem também estudos usando modelos espectrais baroclínicos porém são lineares e sobre um plano  $f$  ou  $\beta$ . Nesses modelos, os campos são separados em médias mais perturbações e procedida uma linearização. Os resultados mostram que modos verticais internos, com estrutura baroclínica são mais favoravelmente excitados na região tropical, devido ao efeito do aquecimento diabático, causando uma resposta remota em latitudes médias para o modo externo (estrutura barotrópica equivalente), na presença de cisalhamento vertical do escoamento médio zonal.

## 2 - DESCRIÇÃO DO MODELO

É utilizado um modelo espectral global, usando funções de Hough (MFH), para estudos da dinâmica de grande escala, principalmente em resposta à transferência remota de energia associada às fontes de calor tropicais (Andrade, 1994). O modelo é baroclínico, não-linear e permite o uso de fontes de calor pré-fixadas. O modelo é também espectral na dimensão vertical através do uso de solução analítica da equação da estrutura vertical do vento e do geopotencial generalizado. Este tipo de procedimento proporciona a análise das trocas de energia entre os modos verticais e os horizontais.

O MFH é equivalente à parte dinâmica dos MACG normalmente usados em simulações climáticas e mesmo em previsão numérica de tempo para médio prazo. Nos MACG a estrutura horizontal é expandida em harmônicos esféricos e a vertical e tempo é resolvida em diferenças finitas. No MFH a estrutura horizontal e inclusive os termos não-lineares como um todo, são expandidos em funções de Hough. As funções de Hough são a solução analítica do próprio MFH linearizado sobre um estado básico em repouso e com temperatura função apenas da vertical. A parte vertical é tratada

espectralmente, do ponto de vista que é usada a solução analítica da estrutura vertical do vento e do geopotencial generalizado como base para expansão nessa dimensão. Após esse procedimento, a equação final para os coeficientes de expansão é semelhante a de um oscilador harmônico acoplado (por ser não-linear) e forçado (por incluir fontes pré-especificadas), permitindo uma solução semi-analítica no tempo: considera-se que os forçantes e termos não-lineares são constantes durante o intervalo de tempo do modelo.

O MFH permite uma inicialização diabática não-linear por modos normais. A inicialização é necessária principalmente quando as condições iniciais são análises do NCEP (National Centers for Environmental Predictions - USA). Nesse caso, os dados não estão balanceados de acordo com as equações do modelo e poderão surgir ondas de gravidade espúrias durante a integração se não for feito um tratamento adequado das condições iniciais. É necessário que as condições iniciais contendam o escoamento médio zonal com cisalhamento vertical para se estudar completamente a resposta remota. Com condições iniciais contendo apenas o escoamento médio zonal, a inicialização também é necessária.

Para se chegar ao MFH separa-se as estruturas horizontal e vertical das equações primitivas em coordenadas esféricas na horizontal e sigma na vertical. Essa separação é obtida considerando-se uma transformada vertical cujo “kernel” é a estrutura vertical do vento zonal e meridional e do geopotencial generalizado. Dessa forma obtém-se uma equação diferencial ordinária homogênea de segunda ordem, que forma um problema de Sturm-Liouville com as condições de contorno consideradas (velocidade vertical em coordenada sigma nula na superfície e no topo do modelo). A solução desse problema pode ser analítica ao se considerar a estabilidade estática constante em coordenadas vertical logarítmico da pressão. Os autovalores desse problema são chamados de altura equivalente e as autofunções de modos verticais, correspondentes a um modo chamado de externo (altura equivalente maior), pois sua solução é exponencial, e os demais de internos (alturas equivalentes menores), com solução senoidal. Se o problema fosse linear, as equações da estrutura horizontal seriam formalmente idênticas às equações lineares da água-rasa. Como o problema é não-linear e diabático, aparecem coeficientes de interação entre os modos verticais para esse termos. A solução da estrutura horizontal é feita através da expansão das variáveis prognósticas (vento zonal, meridional e geopotencial generalizado) sobre a solução da parte linear (as funções de Hough), e usando o método das transformadas de Orszag, ou seja, os termos não-lineares são expandidos como um todo (não são usados coeficientes de interação). Para tanto, a cada passo de tempo deve-se sair do espaço de fase e recompor-se os campos, calcular os termos não-lineares e expandí-los novamente. Esse procedimento não é adotado na vertical pois apenas poucos modos verticais são utilizados, enquanto que na horizontal o número de modos é muito grande, tornando inviável o uso desses coeficientes. Os detalhes das equações estão em Andrade (1994).

O problema horizontal é resolvido para truncamento romboidal (número de modos meridionais igual ao número de modos zonais para todo o espectro zonal). O truncamento romboidal tem maior resolução meridional, o que resolve melhor o problema de propagação meridional de energia sendo bom para estudo de fontes de calor. O modelo é testado para resolução horizontal média romboidal 31 (R31). Para a resolução vertical adota-se 5 modos verticais (20 níveis).

Os dados utilizados são as reanálises do NCEP e são analisados dados de radiação de onda longa emergente, principalmente sobre a região tropical, para se estabelecer a localização e forma analítica das fontes de calor latente nessa região.

### **3 - RESULTADOS**

O estudo das trocas de energia entre os modos verticais e sua propagação meridional exige a presença de vento zonal com cisalhamento vertical. Para isso realizou-se experimentos com um campo médio zonal observado e inicializado pelo método dos modos normais não-linear diabático. As fontes de calor

foram dimensionadas com forma e posição comparáveis à convecção observadas nas regiões tropicais (CAFR, CIND e CAMZ), durante o verão do Hemisfério Sul, tomando-se como base a radiação de onda longa climatológica para os meses de dezembro a janeiro, anos de 1974 a 1983.

As figuras 1 e 2 mostram a vorticidade e as figuras 3 e 4 a divergência inicializadas e não-inicializadas, respectivamente, em uma secção vertical e tempo para um ponto próximo a CAMZ. Nota-se que o efeito da inicialização sobre a vorticidade é pequeno, enquanto que é muito forte sobre a divergência. Isso se deve ao fato que as ondas de gravidade são resultado das variações da divergência no tempo. Para uma caracterização mais rápida da inicialização, na figura 5 é mostrada a variação da pressão à superfície inicializada e não-inicializada, que é um resultado auto-explicativo.

Nas figuras 6 e 7 são mostrados os campos de altura geopotencial para os níveis de 850 e 200 hPa, respectivamente. Concentrando a análise sobre a América do Sul, nota-se a permência de um sistema de baixa na região da Baixa do Chaco, enquanto que em altos níveis a região com alta mais intensa está deslocada sobre a costa oeste da América do Sul, em relação a posição observada da Alta da Bolívia. A formação dessa alta em altitude é resultado da propagação para oeste das ondas de Rossby. Há que se incluir no modelo processos que ancorem a alta em altitude, como a topografia, processos de superfície e de camada limite.

A resposta atmosférica em latitudes médias mostra-se mais intensa para a simulação realizada com um campo inicial diferente de zero, e mais intensa no Hemisfério Norte. A análise energética dos experimentos mostrou que ocorrem trocas de energia entre os modos verticais para o experimento com condição inicial observada, associadas ao cisalhamento vertical do escoamento zonal médio. Essas trocas são tais que os modos internos, com altura equivalente da ordem de 230 m, são excitados nas regiões das fontes e interagem com o modo externo, com altura equivalente da ordem de 10120 m, na sua propagação para latitudes médias. O resultado mostra que a porcentagem de energia por modos verticais é maior para modos internos com 230 m na região tropical, o mesmo ocorrendo para o modo externo em latitudes médias (figuras 8 e 9). Isso está em acordo com as observações.

Um outro fator interessante é a avaliação das interações entre modos horizontais. Uma avaliação pode ser feita calculando-se a energia total de todos os modos horizontais, para cada modo vertical, e a energia total por modo horizontal. Na figuras 10 a 13 encontra-se, respectivamente, a porcentagem de energia, para o modo interno dominante (230 m), para os modos horizontais de Rossby, Kelvin, Misto Rossby-Gravidade e Gravidade Inercial. Nota-se a dominância dos modos de Rossby na região das altas em altos níveis (figura 10), a dominância dos modos de Kelvin para as regiões próximas ao equador e leste das fontes (figura 11), enquanto que a importância relativa dos modos Misto (figura 12) e dos modos de Gravidade (figura 13) são desprezíveis. Nota-se que há casos onde a porcentagem é maior que 100%, essas regiões correspondem a locais onde a interferência entre as ondas é destrutiva, como será discutido a seguir.

A diferença entre a energia total em um dado modo vertical e a energia somada em Rossby, Kelvin, Mista e Gravidade, dá a energia representativa das interações entre os modos horizontais. A porcentagem da energia total relativa às interações entre diferentes modos horizontais permite avaliar as interferências entre essas ondas, verificando-se a dominância desse efeito na faixa intertropical, entre 35°S e 35°N (figura 14) para o modo interno dominante. Nota-se ainda na figura 14 que as regiões negativas correspondem a interferência destrutiva (ao longo do Equador), enquanto que as positivas a interferência construtiva (entre 15°S e 30°S e 15°N e 30°N)

#### **4 - CONCLUSÃO**

O MFH apesar de não possuir as parametrizações físicas na forma tradicional, mostrou-se uma ferramenta muito útil e importante na análise qualitativa e quantitativa dos escoamentos associados aos

modos de Rossby, Kelvin e Misto Rossby-Gravidade e Gravidade, em resposta ao aquecimento convectivo. O MFH permite também o detalhamento da distribuição de energias cinética, potencial disponível e total, para cada um dos modos horizontais de oscilação, fixado um modo vertical, bem como para as interferências entre esses modos horizontais. O modelo permite também a análise da distribuição e troca de energia entre os modos verticais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, C. R. Análise das trocas de energia entre modos verticais e horizontais, em resposta à fontes tropicais de calor de grande escala. São José dos Campos, INPE, 1994. (INPE-5681-TDI/567)

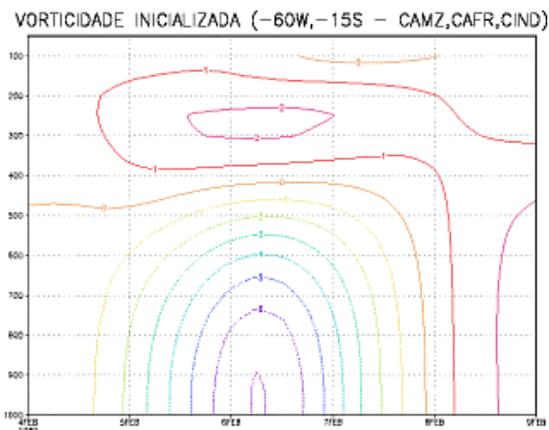


Figura 1

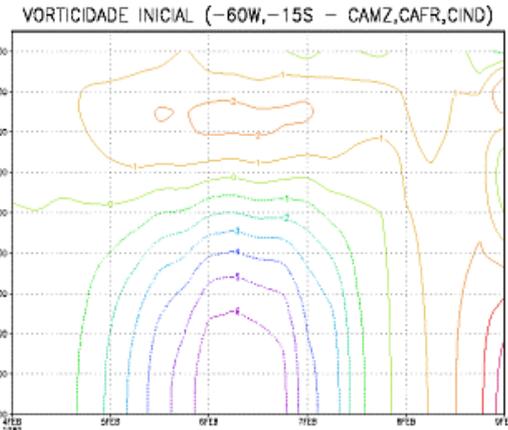


Figura 2

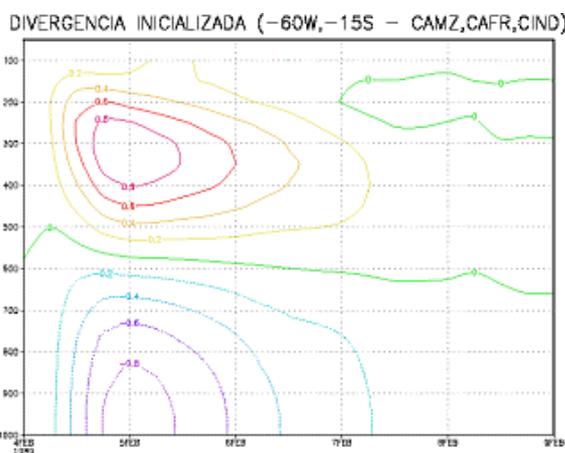


Figura 3

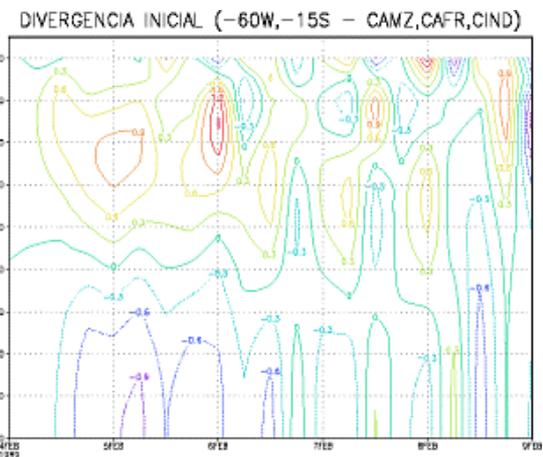


Figura 4

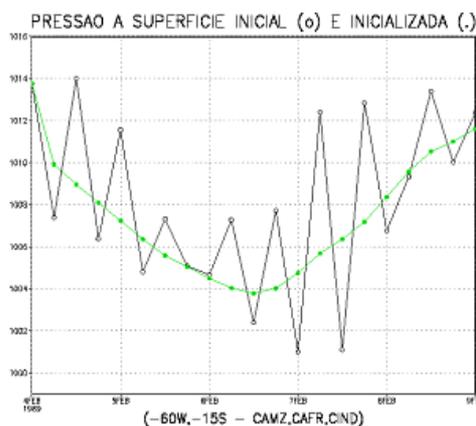


Figura 5

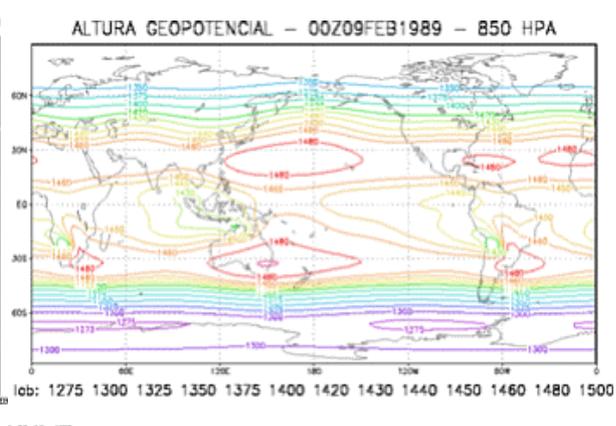


Figura 6

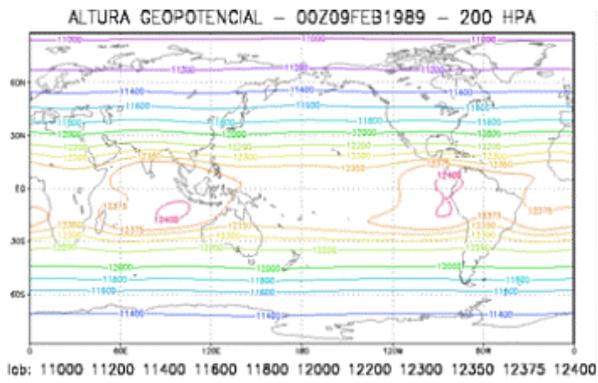


Figura 7

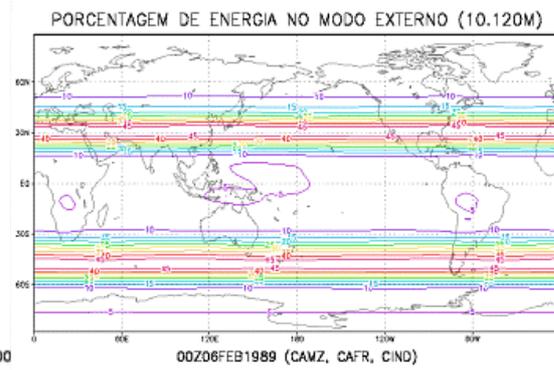


Figura 8

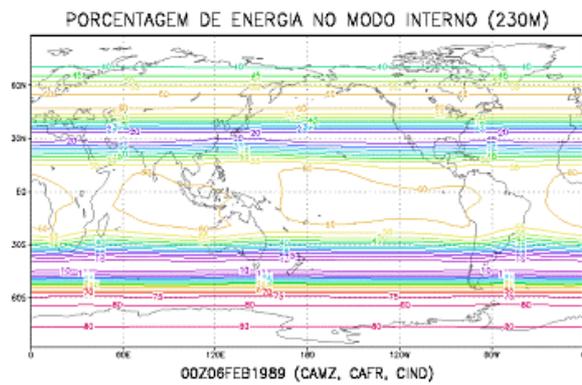


Figura 9

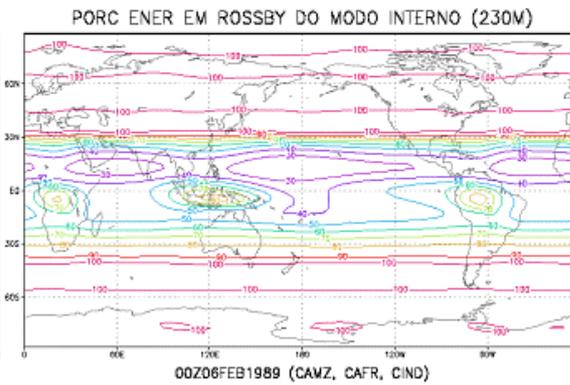


Figura 10

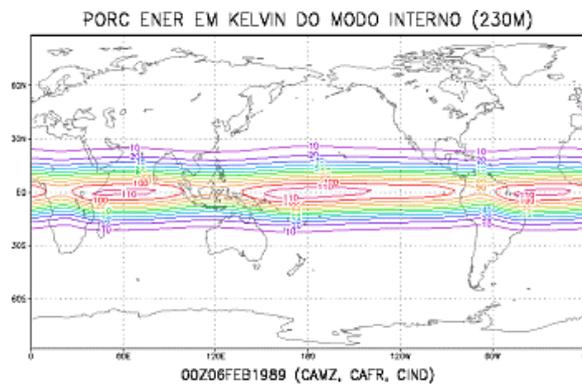


Figura 11

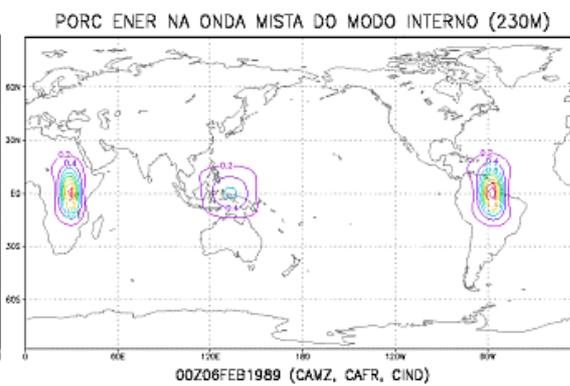


Figura 12

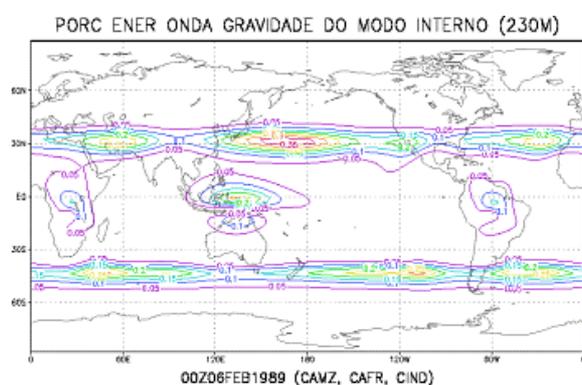


Figura 13

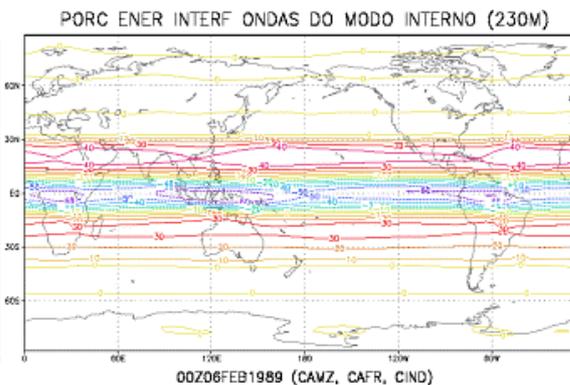


Figura 14