

## **Interação Trópicos Extratropicos – Um Estudo Utilizando Modelo de Água Rasa**

**Andréa de Oliveira Cardoso<sup>1</sup> e Simone Erotildes Teleginski Ferraz<sup>2</sup>**

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
Departamento de Ciências Atmosféricas

Bolsistas de Pós Graduação

<sup>1</sup>[andreca@model.iag.usp.br](mailto:andreca@model.iag.usp.br) , <sup>2</sup>[simonefe@model.iag.usp.br](mailto:simonefe@model.iag.usp.br)

**Pedro Leite da Silva Dias**

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
Departamento de Ciências Atmosféricas

**José Antonio Aravéquia**

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
Departamento de Ciências Atmosféricas

Bolsistas de Pós Graduação

*Filiação permanente: Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos –  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais CPTEC/INPE*

### **Abstract**

Numerical and observational studies suggest a interaction between tropical and extra-tropical areas in intraseasonal time scale. In this work this interaction is studied with a shallow water equation model in the sphere. Linear and non-linear integrations with an idealized heat source on the Zone of Convergence of the Atlantic and climatologic basic state of January show the interactions of ZCAS heat source with extra-tropical regions and with PNA and Eurasia patterns.

### **1. Introdução**

A maior parte da precipitação na região subtropical da América do Sul ocorre no verão, pois neste período há a atuação de zonas de convergência. Uma das mais abrangentes zonas de convergências da América do Sul é a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que é caracterizada por uma persistente faixa de nebulosidade orientada no sentido noroeste-sudeste.

Diversos estudos observacionais mostraram a relação entre a ZCAS e eventos extremos de chuva em São Paulo (Ferraz, 2000 e Silva Dias et al., 1988; 1991). Casarin e Kousky (1986), relacionaram a intensificação da anomalia negativa de radiação de onda longa (ROL) na Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS) a posterior intensificação da anomalia negativa de ROL na ZCAS e o enfraquecimento da segunda ao anterior enfraquecimento da primeira.

Do ponto de vista de influências remotas, já foram realizados alguns estudos numéricos que sugerem a possível conexão da ZCAS com sistemas que atuam em regiões extratropicais (Grimm, 1992;1995 e Gandu e Silva Dias, 1998).

Nesse estudo, são exploradas as possíveis influências inter hemisféricas deste importante sistema da América do Sul, a “ZCAS”, através de simulações utilizando um Modelo Espectral de Água Rasa na Esfera, baseado em Bonatti e Silva Dias, 1983.

### **2 – Metodologia**

#### **2.1 – Descrição do Modelo**

No presente trabalho utilizou-se o Modelo Espectral de Água Rasa na Esfera para investigar a resposta remota de uma fonte de massa na ZCAS. Este modelo utiliza os modos normais da versão linearizada por funções de Hough, que são as autofunções do sistema de equações da água rasa na esfera linearizado sobre o estado básico em repouso e com altura de referência especificada. Essas autofunções são dependentes do número de onda zonal ( $s$ ),

do índice meridional ( $l$ ), sendo que, para cada par ( $s, l$ ), existem três tipos de ondas com frequências distintas: duas ondas de gravidade que se propagam para leste e para oeste, respectivamente, e ondas de Rossby para oeste.

As equações básicas do modelo de água rasa na esfera, no qual mantêm-se somente as componentes rotacionais, são obtidas considerando as equações que governam um fluido incompressível na esfera e podem ser resumidas na equação 1:

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial}{\partial \phi} = N + F - D, \quad (1)$$

onde  $N$  é o termo de interação não-linear,  $F$  é o termo da forçante especificada e  $D$  é o termo de dissipação.

Esta equação expandida em  $u$ ,  $v$  e  $h$  gera o conjunto de equações primitivas barotrópico (Kasahara, 1977).

O truncamento deste modelo é tal que usando 23 modos na direção zonal, tem-se trinta e seis modos meridionais distribuídos na forma: doze de gravidade para leste, doze de gravidade para oeste e doze rotacionais (Rossby). A onda de Kelvin está incluída com o primeiro modo da classe de gravidade para oeste e a ondas mista Rossby - gravidade está incluída no primeiro modo da classe dos rotacionais.

### 3. Experimentos

#### 3.1 Forçante idealizada

Para calcular o aquecimento gerado na atmosfera pela forçante de massa, parte-se da equação da hidrostática:

$$\frac{\partial \phi}{\partial p} = -\frac{RT}{p}, \text{ integrando em } p:$$

$$\Delta \phi = RT \ln(p_0/p_s), \text{ sendo } \Delta \phi = \phi_s - \phi_0.$$

Considerando:  $p_0 = 1000\text{mb}$ ,  $p_s = 200\text{mb}$ ,  $\phi_s = \phi$  e  $\phi_0 = 0$  e diferenciando no tempo:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = R \frac{\partial T}{\partial t} \ln 5, \text{ e da equação da termodinâmica, têm-se:}$$

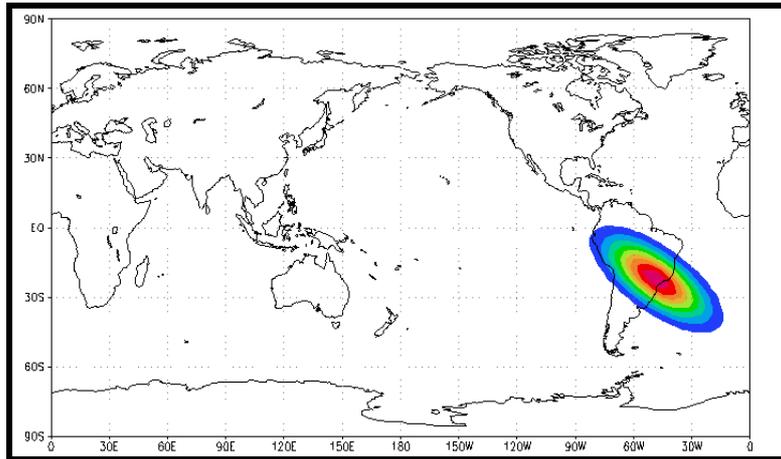
$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = R \frac{J}{c_p} \ln 5 \rightarrow \frac{J}{c_p} = \frac{\partial \phi}{\partial t} \frac{1}{R \ln 5} \cong \text{aquecimento de } 9\text{K por dia}$$

#### 3.2 Experimentos

Foram realizados 6 experimentos utilizando o modelo anteriormente descrito. Em todos os casos o modelo foi inicializado com uma fonte de massa sobre a região da ZCAS (descrita no item 3.1), numa banda orientada noroeste - sudeste. A posição e forma da fonte estão ilustradas na figura 1.

Os tipos de experimentos realizados, foram:

- a)** Não-linear com estado básico climatológico de janeiro, considerando-se todos os 36 modos meridionais, (NLCE);
- b)** Linear com estado básico climatológico de janeiro, considerando-se todos os 36 modos meridionais, (LCE);
- c)** Não-linear sem estado básico, considerando-se todos os 36 modos meridionais, (NLSE);
- d)** Linear sem estado básico, considerando-se todos os 36 modos meridionais, (LSE);
- e)** Linear com estado básico climatológico de janeiro, considerando somente os modos de Rossby, (LCE-R);
- f)** Não-linear com estado básico climatológico de janeiro, considerando somente os modos de Rossby, (NLCE-R);



**Figura 1:** Fonte de massa na ZCAS

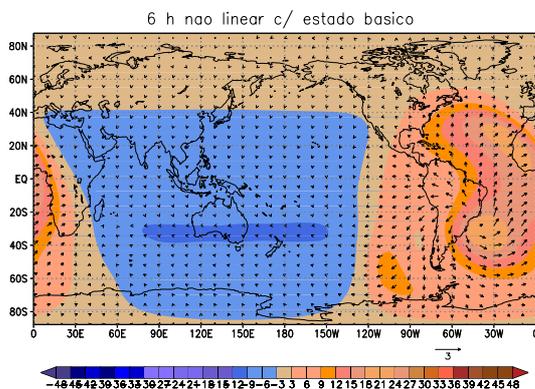
É importante destacar que em todos os experimentos realizados com estados básicos, utilizou-se a climatologia do mês janeiro, visto que é um período de grande possibilidade de ocorrência de ZCAS.

Para todos os experimentos foram gerados diagramas de Hovmöller em duas regiões: 40°N-20°N e 40°S-20°S. Esse diagrama foi calculado da seguinte maneira: Inicialmente foi feita uma média em cada uma das regiões acima, e a seguir foi representado esse resultado num diagrama *tempo x longitude*. Sendo o eixo y múltiplo de 6h, ou seja, o primeiro valor 4 corresponde a 4 x 6h = 24h, o segundo valor 8 corresponde a 8x6h = 48h, e o último valor 76 corresponde a 76x6h = 456h.

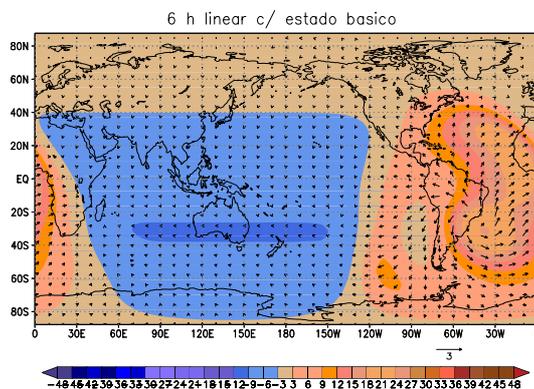
#### 4. Resultados e Conclusões

Nesse item serão apresentados os principais resultados encontrados nos 6 experimentos descritos anteriormente. Todos os experimentos apresentados nesse estudo utilizam uma fonte de massa idealizada que corresponde, aproximadamente, a um aquecimento de 9K/dia (conforme item 3.1).

Na figura 2 são apresentadas as primeiras horas das 2 simulações iniciais (integração linear e não-linear com estado básico de janeiro). Nas primeiras 6 horas do experimento a interação entre os modos (na integração não-linear) não altera de forma significativa a resposta e observa-se que a resposta nos campos do vento e geopotencial é muito similar. Um núcleo de divergência sobre a fonte é identificado através do campo do vento, observam-se também núcleos de convergência a noroeste e sudoeste da fonte (a figura de divergência não é mostrada).

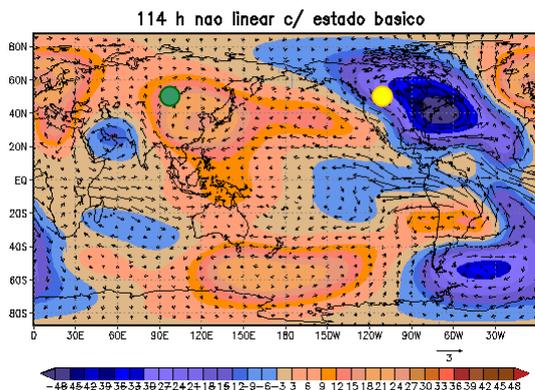


**Figura 2a:** Simulação não-linear com estado básico de janeiro. O campo sombreado representa a perturbação do geopotencial e as setas representam a perturbação do campo do vento; 6h de integração.

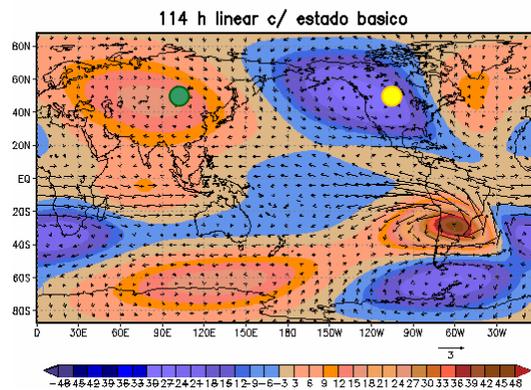


**Figura 2b:** Simulação linear com estado básico de janeiro. O campo sombreado representa a perturbação do geopotencial e as setas representam a perturbação do campo do vento; 6h de integração.

Após 24h de integração a interação não-linear entre os modos já atua na resposta do sistema e ondas de Rossby, propagando-se para oeste, começam a surgir em ambos os experimentos. Uma região com valores contrários de geopotencial surge entre 30°N e 50°N (no Atlântico Norte), após 42h de integração. Esse núcleo é mais intenso no caso linear, mas após 60h ele apresenta uma forte intensificação no LCE. A sudoeste da fonte há propagação para latitudes mais altas do hemisfério sul, em ambos os experimentos. A propagação de ondas para latitudes mais altas do hemisfério norte ocorre, principalmente, no experimento não-linear. Pode-se observar que em torno das 114h uma forte região com geopotencial negativo estabelece-se sobre o hemisfério norte (em torno de 60°N – 40°N). Essa região é conhecida por fazer parte de um dos três pontos do Padrão PNA, (circulo em amarelo na figura 3). O mesmo acontece na região do Padrão Eurásia (60°E), (circulo em verde na figura 3), (figura 3). Outro fator importante a se notar é que no caso linear a resposta local a forçante é mais forte (figura 3), e no caso não-linear a interação com o estado básico ocasionou uma maior propagação em ondas no modo Rossby.



**Figura 3a:** Simulação não-linear com estado básico de janeiro. O campo sombreado representa a perturbação do geopotencial e as setas representam a perturbação do campo do vento; 114h de integração.



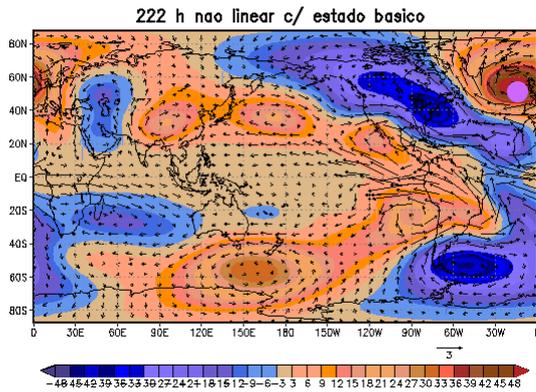
**Figura 3b:** Simulação linear com estado básico de janeiro. O campo sombreado representa a perturbação do geopotencial e as setas representam a perturbação do campo do vento; 114h de integração.

Observa-se a leste do padrão PNA um núcleo forte sobre o Reino Unido. A princípio suspeitava-se este núcleo poderia ser devido a instabilidade barotrópica do ambiente, (circulo lilás na figura 4), (figura 4). Essa hipótese foi testada com o cálculo da condição de instabilidade barotrópica, obtida a partir da vorticidade absoluta. Essa

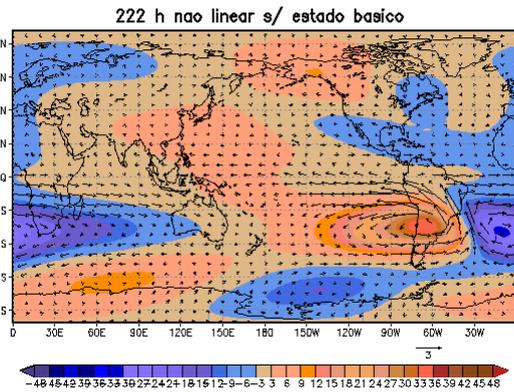
condição impõe que  $\frac{\partial \xi_a}{\partial y}$  mude de sinal em algum lugar do domínio, para que haja condição de instabilidade

barotrópica. Após esse cálculo verificou-se que essa condição não era satisfeita. O que sugere que esse padrão deve estar sendo excitado por outro mecanismo, por exemplo, pela interação não-linear com ondas de Kelvin ressonantes. Esta hipótese é reforçada pelo fato de que esse padrão só está presente nos experimentos não-lineares e com estado básico. Grimm (1992) já havia observado esse fato e notou que em seu trabalho esse sinal era fraco, o que concorda com nossos resultados, já que em seu trabalho eram considerados apenas ondas de Rossby. Esse padrão aparece, principalmente na integração não-linear, mantendo-se sobre todo o período da integração.

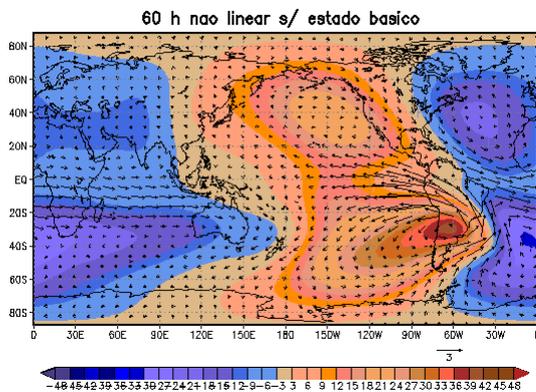
Após 294h de integração o modelo se estabiliza para o caso de integração não-linear e após 200h no caso de integração linear. Uma característica a se notar é o comportamento zonal dos campos de vento e geopotencial na integração linear, após a estabilização.



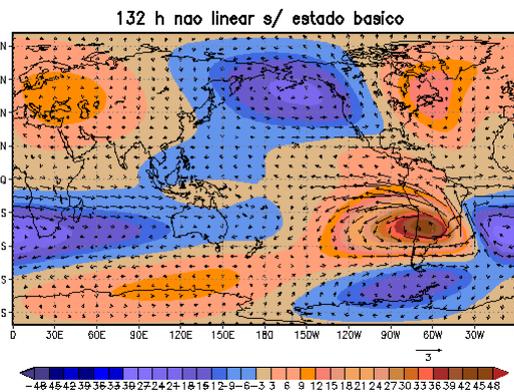
**Figura 4a:** Simulação não-linear com estado básico de janeiro. O campo sombreado representa a perturbação do geopotencial e as setas representam a perturbação do campo do vento; 114h de integração.



**Figura 4b:** Simulação linear com estado básico de janeiro. O campo sombreado representa a perturbação do geopotencial e as setas representam a perturbação do campo do vento; 114h de integração.



**Figura 5a:** Simulação não-linear sem estado básico. O campo sombreado representa a perturbação do geopotencial e as setas representam a perturbação do campo do vento; 60h de integração.



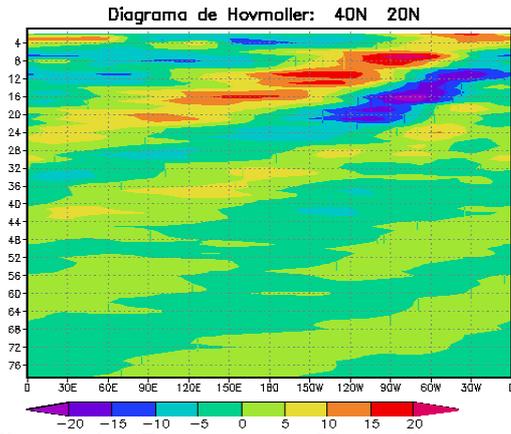
**Figura 5b:** Simulação linear sem estado básico. O campo sombreado representa a perturbação do geopotencial e as setas representam a perturbação do campo do vento; 132h de integração.

A existência da interação entre a forçante e o estado básico é decisiva para a configuração da resposta remota. Na figura 5 é apresentada a resposta do experimento não-linear com forçante, sem estado básico (para dois horários de integração).

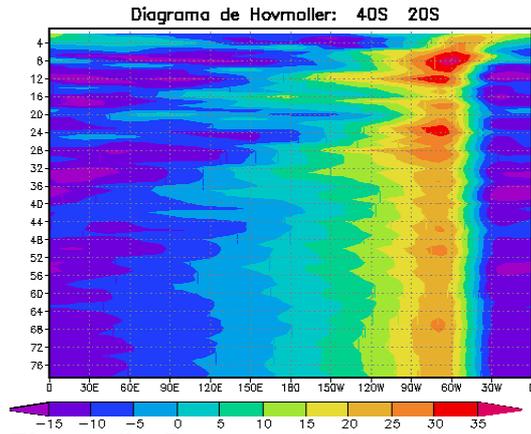
Comparando e resumindo os três experimentos apresentados até o momento: NLCE, LCE e NLSE, alguns pontos podem ser destacados:

No experimento NLSE a resposta é praticamente zonal com relação a fonte, apresentando pouca propagação para o Hemisfério Sul e alguma propagação para o Hemisfério Norte. Observando o diagrama de Hovmöller (figuras 6), fica evidente que, entre 40°S e 20°S (posição aproximada da fonte), a resposta é zonal, como dito acima, e entre 40°N e 20°N, há apenas pouca propagação nas primeiras horas de integração. Nos diagramas para o experimento NLCE e LCE (figuras 7 e 8, respectivamente), verifica-se que na região próxima a forçante a resposta local é mais forte no caso NLCE, no entanto, observa-se que a resposta a leste da forçante permanece sobre todo o período nos dois experimentos, assim como, no caso NLSE (figura 6). A resposta para a região entre 40°N e 20°N para os dois experimentos (NLCE e LCE) é um pouco diferente, no caso NLCE um padrão entre 0 e 90°W mantém-se constante sobre toda a integração, enquanto que no caso LCE apresenta um pequeno deslocamento até 144h de integração, desintensificando a seguir.

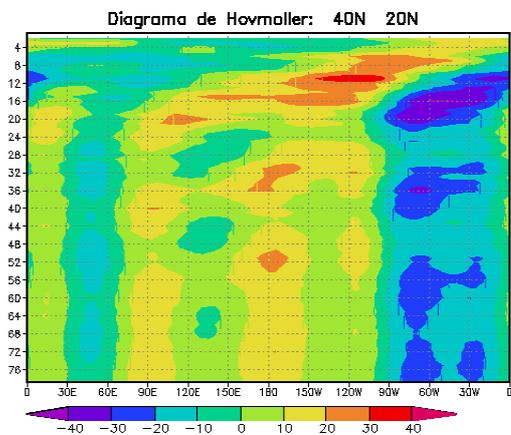
Observou-se nos três experimentos (NLCE, LCE e NLSE) que a energia inicialmente emana da fonte e se dispersa por uma região preferencial. O caso LSE (não apresentado) é muito semelhante ao caso LCE, exceto que estabiliza-se mais cedo.



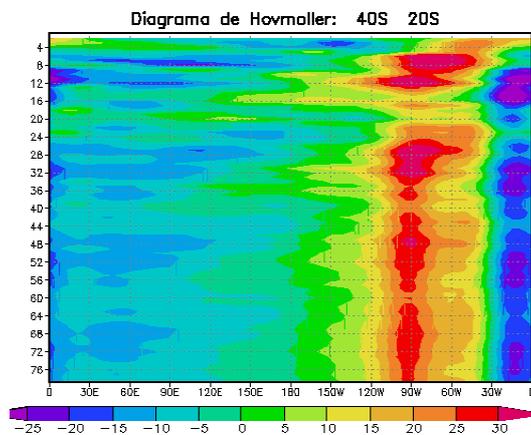
**Figura 6a:** Diagrama de Hovmöller para o experimento NLSE. Corte em 40°N-20°N



**Figura 6b:** Diagrama de Hovmöller para o experimento NLSE. Corte em 40°S-20°S

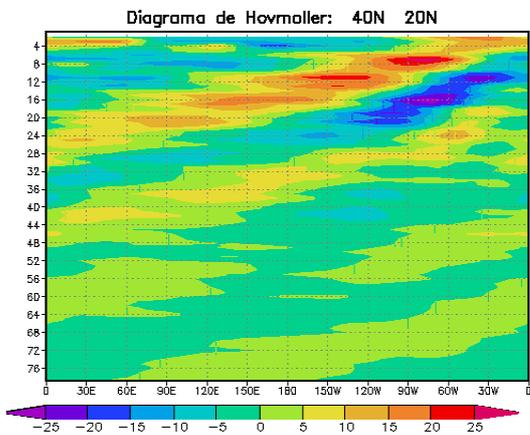


**Figura 7a:** Diagrama de Hovmöller para o experimento NLCE. Corte em 40°N-20°N

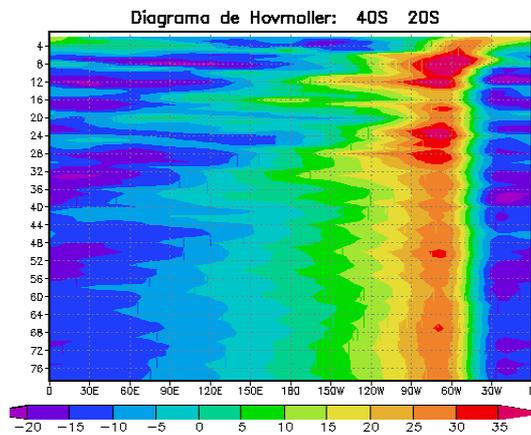


**Figura 7b:** Diagrama de Hovmöller para o experimento NLCE. Corte em 40°S-20°S

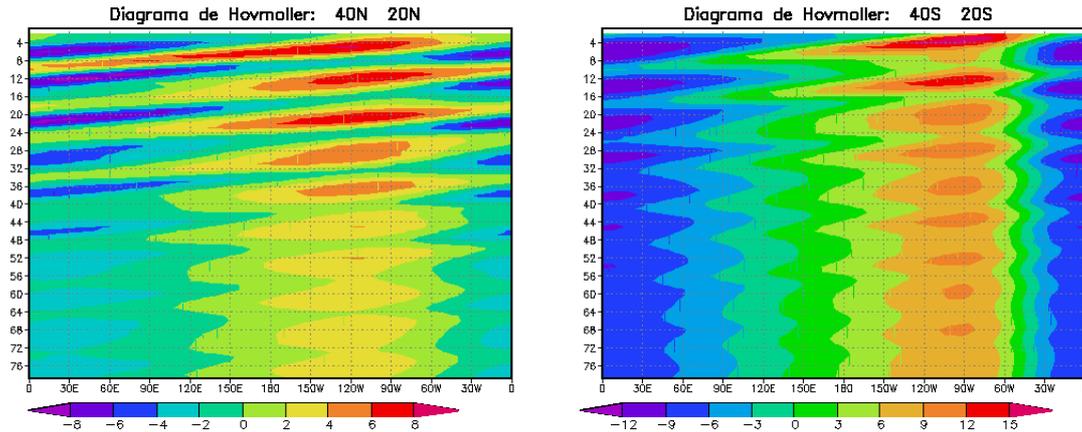
Na análise dos experimentos LCE-R e NLCE-R (não mostrados), observou-se uma configuração (no experimento LCE-R) muito semelhante ao caso LCE, mostrando no caso linear grande parte da resposta se deve as ondas de Rossby e a resposta sobre os modos mais rápidos e curtos em grande parte é eliminada pela dissipação. No caso NLCE-R observa-se a propagação de ondas de Rossby nos dois hemisférios. O diagrama de Hovmöller (figura 9) desse experimento mostra para a região 40°S e 20°S uma resposta zonal e mais extensa do que no caso onde todas as ondas foram consideradas. Para região 40°N e 20°N são verificadas propagações para outras regiões, mas por poucos dias. Essa diferença entre o caso onde todas as ondas são incluídas (LCE e NLCE), está associada a influência de ondas mais rápidas que interagem com o estado básico recebendo energia em algumas regiões preferenciais.



**Figura 8a:** Diagrama de Hovmöller para o experimento LCE. Corte em 40°N-20°N



**Figura 8b:** Diagrama de Hovmöller para o experimento LCE. Corte em 40°S-20°S



**Figura 9a:** Diagrama de Hovmöller para o experimento NLCE-R. Corte em 40°N-20°N **Figura 9b:** Diagrama de Hovmöller para o experimento NLCE-R. Corte em 40°S-20°S

Portanto, a partir desses resultados, fica evidente que há propagação de ondas para os extratropicos emanando da região da ZCAS. Sugerindo, dessa maneira, uma relação não-linear ZCAS – extratropicos, o que concorda com a literatura. Isso ficou evidente, principalmente nos experimentos não-lineares completos (onde todas as ondas eram consideradas).

**Agradecimentos:** A FAPESP e CAPES pelo apoio financeiro e ao Carlos F. M. Raupp pelas discussões esclarecedoras.

### 5. Referencias Bibliográficas:

- Bonatti, J. P.; Silva Dias, P. L.;** 1983: *Um Modelo Barotrópico Global com Iniciação por Modos Normais* . Nota técnica do INPE: INPE-2674-RPE/428.
- Casarin, D. P.; Kousky, V. E.;** 1986: *Anomalias de precipitação no sul do Brasil e variações na circulação atmosférica*. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 1, 83-90.
- Ferraz, S.E.T,** 2000: *Oscilações Intrasazonais no Sul e Sudeste do Brasil durante o Verão*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Ciências Atmosféricas, IAG-USP, São Paulo (SP),157p.
- Gandu, A. W.; Silva Dias, P.L.;** 1998: *Impact of Tropical Heat Sources on the South American Tropospheric Upper Circulation and Subsidence*. J. Geophys. Res., 103, 6001-6015.
- Grimm, A. M.;** 1992: *Influência Remota de Fontes Tropicais Anômalas de Calor*. Tese de Doutorado. Departamento de Ciências Atmosféricas, IAG-USP, São Paulo (SP), 216p.
- \_\_\_\_\_ ; **Silva Dias, P. L.;** 1995: *Analysis of Tropical – Extratropical Interactions with Influence Functions of a Barotropic Model*. Journal of the Atmospheric Sciences, v. 52, 3538-3555.
- Kasahara, A.;** 1977: *Numerical integration of the global barotropic primitive equation with Hough harmonic expansions*. Journal of the Atmospheric Sciences, v. 34 (5), 687-701.
- Silva Dias, P. L.; Caplan, P.; Kousky, E. V.;** 1988: *As Chuvas Intensas de Fevereiro de 1988: Circulação Global e Previsibilidade*. Congresso Brasileiro de Meteorologia, 5, Rio de Janeiro.2, p. IX. 6-10.
- \_\_\_\_\_ ; **Etchichury, P.; Scolar, J.; Pereira Filho, A. J.; Satyamurty, P.; Silva Dias, M. A. F.; Grammelsbacher, I.; Grammelsbacher, E.;** 1991: *As Chuvas de 1991 na Região de São Paulo*. Climanálise, 6-5, 44-51.