

Energética do trem de onda associado às geadas em Latitudes Tropicais

Virginia P. Silveira^(1*), Gabriela V. Müller⁽²⁾, Manoel A. Gan⁽¹⁾, Tércio Ambrizzi⁽³⁾

⁽¹⁾ CPTEC/INPE, São José dos Campos, SP, Brasil.

⁽²⁾ CICYTTP/CONICET, Diamante, Entre Ríos, Argentina

⁽³⁾ IAG/USP, São Paulo, Brasil

*email: virginia.silveira@cptec.inpe.br

ABSTRACT: This study presents a new vision on the extreme cold events that affect the tropical region of South America considering the energetic of wave train propagation associated to these systems. The geopotential height composite analysis indicate that the extreme cold events observed in tropical latitudes are associated with a single Rossby wave pattern propagating in the Pacific Ocean which rapidly drives the low level anticyclone from the southwest of the continent to low latitudes. This propagation involves a southern circulation due to the meridional wind penetration and consequently polar advection causing temperatures to drop below 0°C. The evolution of the kinetic energy maxima for frost events shows that the Downstream Development term was very important to the formation and to modulate the intensification and dissipation phase of the kinetic energy maxima. However, the baroclinic instability conversion was more important to increase the energy maxima.

Palavras-chave: geada, energética, Latitude Tropical

1 – INTRODUÇÃO

Embora o clima das regiões Tropical e Extratropical difere consideravelmente, em algumas ocasiões essas regiões são afetadas pelo mesmo sistema sinótico, como frentes frias que atravessam a América do Sul (AS). Grande parte desses sistemas não atinge baixas latitudes, quando atinge, sua trajetória é modificada minimizando seus impactos.

De acordo com Müller e Berri (2007) alguns eventos de geada na região Tropical da AS estão associados ao trem de ondas de Rossby, que inicia na região centro-leste do oceano Pacífico e propaga através das latitudes médias do Hemisfério Sul. Inicialmente a propagação é em direção ao pólo e após algum tempo curva-se em direção ao Equador. Quando chega ao continente, o trem de ondas segue para nordeste afetando todo o cone sul do AS.

Krishnamurti et al. (1999) associou a ampliação da onda de altos níveis nas latitudes médias, ao mecanismo de desenvolvimento Corrente Abaixo (*DCA*), proposto pela Orlanski e Katzfey (1991) para ciclones no Hemisfério Sul. Krishnamurti e colaboradores fizeram uma decomposição das ondas associadas a eventos da geada na região sudeste do Brasil, dividindo as ondas em escala sinótica, que se propaga para leste, e em ondas planetárias, que possuem características quase-estacionárias. O objetivo deste estudo foi analisar a energética das ondas associadas ao frio extremo nas latitudes Tropical da AS.

2 – CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DOS EVENTOS: DADOS E METODOLOGIA

A temperatura mínima diária (*Tmin*) da estação meteorológica do IAG/USP, localizado em uma área verde no parte sul da cidade de São Paulo foi usada como representante das Latitudes Tropicais. Os eventos de geada foram selecionados para o período de maio a setembro de 1950-2000 e classificados como geada quando, *Tmin* era menor que 0°C. Deste estudo foram encontrados seis eventos: 05/07/1953, 02/08/1955, 18/07/1975, 01/06/1979, 29/07/1990 e 17/07/2000.

Compostos desses eventos de geada foram feitos através dos dados da reanálise do NCEP/NCAR (Kalnay et al. 1996) para estudar a energética. A confiabilidade dos dados foi testada usando o teste-t.

A energética foi estudada através da Equação Energia Cinética do Distúrbio (K') (Equação 1), desenvolvida por Orlanski and Katzfey (1991):

$$\frac{\partial K'}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{V} K' - \nabla \cdot \vec{V}'_a \phi' - \omega' \alpha' - \vec{V}' \cdot (\vec{V}'_3 \cdot \nabla_3) \vec{V}' + \vec{V}' \cdot (\vec{V}'_3 \cdot \nabla_3) \vec{V}' - \frac{\partial}{\partial p} \omega K' - \frac{\partial}{\partial p} \omega' \phi' + RES \quad (1)$$

Onde: $\vec{V}$ é o vento horizontal e α a densidade específica. Nesta equação, a sobre barra é a média zonal e linha o desvio dessa média. O índice "3" nos vetores e operadores indica três dimensões, enquanto que o índice "a" representa o componente de vento ageostrófico. O primeiro termo da direita representa a convergência da K' , o segundo a convergência do fluxo ageostrófico, conhecida como *DCA*. O terceiro termo é a conversão baroclínica. Os termos de quarta e quinta estão associados ao cisalhamento de vento horizontal e considerados como conversão barotrópica. Os termos sexto e sétimo estão associados com a convergência do fluxo vertical de energia.

3 - RESULTADOS

O campo de anomalia do vento meridional em 300hPa (Figura não mostrada) para geadas em São Paulo mostra um único padrão de propagação de onda com valores significativos de anomalia desde 5 dias antes. As anomalias se tornam mais intensas no dia anterior ao evento. Esta configuração é similar aos casos de geadas generalizadas menos persistente na região do Pampa Úmido obtidos por Müller e Berri (2007) e semelhante ao típico padrão de propagação do trem de onda de Rossby das ondas de frio amplamente estudado na literatura (Fortune e Kousky 1983, Marengo et al. 1997, Garreaud 2000, Marengo et al. 2002). Este padrão é caracterizado por uma frente fria que segue uma trajetória nordeste - sudoeste com anticiclone pós-frontal que entram no continente em altas latitudes. Escobar (2007) através de uma análise sinótica dos campos de pressão ao nível do mar e da altura geopotencial em 500hPa associada a ondas de frio na cidade de São Paulo, observou que este é o padrão principal na análise de componentes principais e explica 29,3% da variância. Em níveis médios da atmosfera, a circulação associada a este padrão consiste de uma intensa crista no oceano Pacífico, perto da costa chilena, e um cavado que se estende do interior do continente ao oceano Atlântico Sul, como mostrado por Escobar (2007). Desta forma, o fluxo de ar frio confinado favorece a incursão de sistemas migratórios até centro-oeste e sudeste do Brasil, com a evolução de uma onda de frio na AS (Garreaud 2000, Cavalcanti).

A evolução da K' em 300hPa nos compostos apresenta máximos de energia ao redor do Hemisfério Sul. No entanto, só os máximos entre 120°E a 20°W e 30°S e 40°S no Dia-5 (Fig.1a) parecem ter alguma influência nos eventos de geada. O máximo de K' em 115°W–40°S ($K1$) está localizado corrente abaixo do cavado associado aos eventos (Fig. não mostrada). No Dia-4 (Fig. 1e), um máximo de energia ($K2$) desenvolve corrente abaixo da $K1$ em 80°W–45°S. Ambos os valores máximos estão associados com a crista sobre a costa oeste da AS, onde $K1$ localiza-se corrente acima do eixo da cordilheira e $K2$ corrente abaixo. No Dia-2.5 (Fig. 1i), outro centro de máxima K' ($K3$) desenvolvido ao longo da costa sul do Brasil. Estes três máximos tornam-se estacionários até o Dia-1 (Fig. não mostrada). Durante este período, houve dispersão de energia cinética, pois $K1$ decai e $K2$ intensifica. No Dia0 (Fig. 1m), $K3$ decai, mas continuou fraco sobre o Atlântico Sul até o Dia2.5 (Fig. não mostrada).

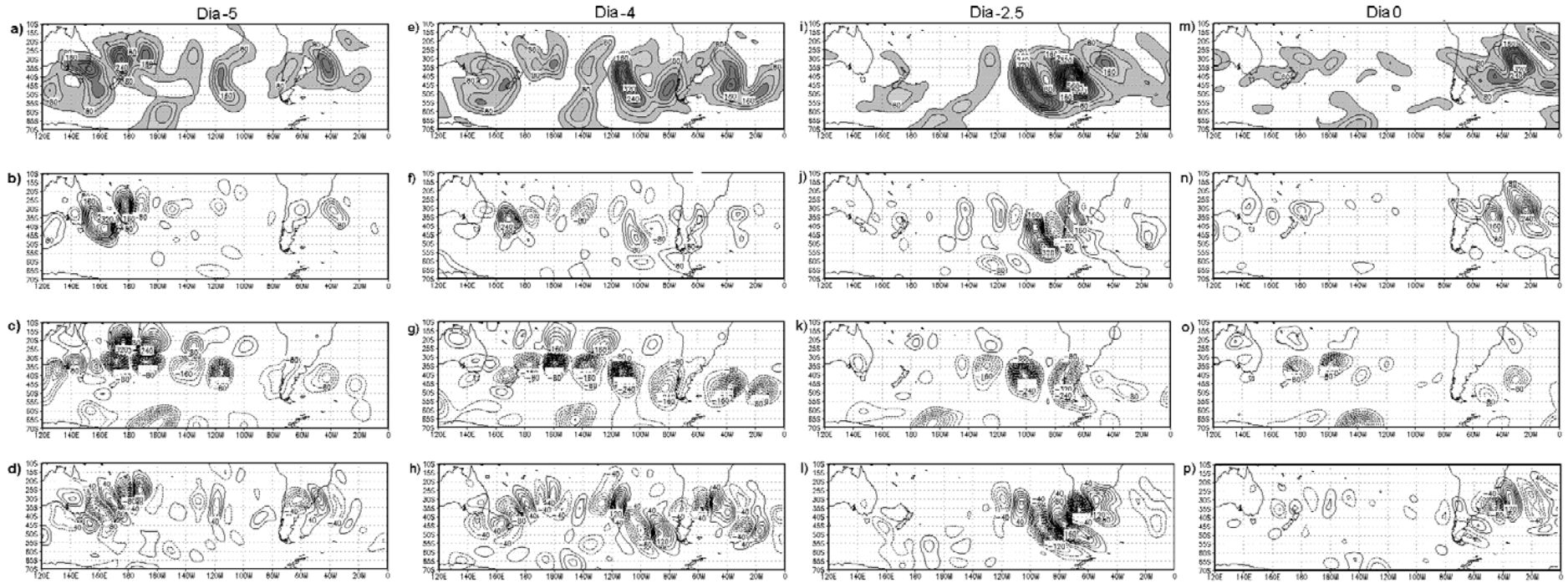


Figura 1 – Isolinhas de K' (primeira linha), Conversão Baroclínica (segunda linha), Conversão Barotrópica (terceira linha) e Termo DCA (quarta linha) para o Dia-5 (primeira coluna), Dia-4 (segunda coluna), Dia-2.5 (terceira coluna) e Dia0 (quarta coluna). Unidades $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$, exceto K' $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$. Os valores da K' acima de $40 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ estão preenchidos.

Pode-se ver que não há contribuição das conversões baroclínica e barotrópica no Dia-5 para $K1$ (Fig. 1b e 1c, respectivamente), pois esses termos, em torno da máxima, foram negativos. Portanto, o termo DCA foi a principal fonte de K' para a formação deste centro (Fig. 1d). Este resultado está de acordo com Chang (2000) que observou que, exceto para a primeira onda, os outros se desenvolvem através da convergência do fluxo ageostrófico. Durante a fase de intensificação (24h seguinte), $K1$ está associado com a conversão baroclínica (Fig. 1f) e convergência do fluxo ageostrófico (Fig. 1h). Neste momento (Dia-4) o termo DCA apresentou uma nova região de divergência no lado leste do $K1$ (extração de energia) e convergência corrente abaixo da região de divergência. Esta situação foi importante, pois nesta região a convergência do fluxo ageostrófico desenvolveu o $K2$ (Fig. 1e), isto é, a fonte de energia cinética do $K2$ foi a energia exportada pelo $K1$ e importados para esta região. Portanto, como $K1$, $K2$ não se formam devido à conversão baroclínica, porque seus valores são negativos em torno de $K2$ e positivo a leste (Fig. 1f). O padrão do fluxo ageostrófico continua por mais 36h (Fig. 1l), quando uma nova região de convergência do fluxo ageostrófico forma-se ao longo da costa sul do Brasil. Esta região de convergência contribuiu para o desenvolvimento do $K3$ sobre esta região no Dia-2,5 (Fig. 1i), embora uma pequena contribuição da conversão baroclínica também é observada (Fig. 1j). Por outro lado, $K1$ está decaindo neste dia devido a divergência do fluxo de ageostrófico na região, mesmo sendo positiva a conversão baroclínica. Após este dia (Fig. não mostrada), o $K2$ também começa a fase de dissipação associado com o mesmo processo. Durante todo o período, o termo barotrópico manteve-se negativa (Fig. 1), semelhante aos sistemas baroclínicos (Randell e Stanford, 1985).

Em geral, o termo DCA foi importante durante a formação e a fase de máxima dissipação dos centros de K' . Já a conversão baroclínica foi positiva durante as fases de intensificação e de dissipação, e a conversão barotrópica somente extraiu energia K' e a converteu em energia cinética do estado básico. Assim, a evolução da máxima energia cinética concorda com a Teoria do Desenvolvimento Corrente Abaixo Baroclínico ($DCAB$) proposto por Orlanski e Sheldon (1993) e também observado por Danielson et al. (2006) em um estudo de caso sobre o oceano Pacífico Norte.

3 - DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Os eventos de geada na região tropical estão associados a um único padrão de onda, com uma propagação a partir do oceano Pacífico e que se deslocam para a AS, com uma trajetória tipo arco, que termina no oceano Atlântico. Esta trajetória já foi amplamente documentada para eventos mais intensos que alcançam essas latitudes.

A energética mostrou três centros de máxima energia cinética associados com a onda que provocou a geada. A formação destes centros de máxima foi associada à convergência do fluxo ageostrófico, porém a conversão baroclínica também foi importante durante a fase de intensificação. Esta evolução foi semelhante à teoria $DCAB$ proposta por Orlanski e Sheldon (1993). Como no sistema baroclínico, a conversão barotrópica apenas converte energia do distúrbio em energia cinética zonal.

O resultado deste estudo pode ser de grande ajuda para os meteorologistas para a previsão de eventos de geada através da evolução dos padrões de propagação de ondas no Hemisfério Sul.

4 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHANG, E.K.M. Wave packets and life cycles of troughs in the upper troposphere: Examples from the Southern Hemisphere summer season of 1984/85. **Mon. Wea. Rev.**, v.128, n.1, p.25–50, 2000.

- DANIELSON, R.E., J.R. GYAKUM, AND D.N. STRAUB. A Case Study of Downstream Baroclinic Development over the North Pacific Ocean. Part II: Diagnoses of Eddy Energy and Wave Activity. **Mon. Wea. Rev.**, v.134, p.1549–1567, 2006.
- ESCOBAR, G.C.J. Padrões Sinóticos Associados a ondas de frio na cidade de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.22, n.2, p.240-253, 2007.
- FORTUNE, M., AND V.E. KOUSKY. Two severe freezes in Brazil: precursors and synoptic evolution. **Mon. Wea. Rev.**, v.11, p.181-196, 1983.
- GARREAUD, R. Cold Air Incursions over Subtropical South America: Mean Structure and Dynamics. **Mon. Wea. Rev.**, v.128, p.2544-2559, 2000.
- KALNAY, E., et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.77, p.437–471, 1996.
- KRISHNAMURTY, T.N., M. TEWARI, D.R CHAKRABORTY, J.A. MARENGO, P.L. SILVA DIAS, AND, P. SATYAMURTI. Downstream amplification: A possible precursor to major freeze events over south-eastern Brazil'. **Weather and Forecasting**, v.14, p.242-270, 1999.
- MARENGO, J. A., A. CORNEJO, P. SATYAMURTY, C. NOBRE, AND W. SEA. Cold surges in tropical and extratropical South America: The strong event in June 1994. **Mon. Wea. Rev.**, v.125, p.2759-2786, 1997.
- MARENGO, J.A., T. AMBRIZZI, G. KILADIS, AND B. LIEBMANN. Upper-air wave trains over the Pacific Ocean and wintertime cold surges in tropical-subtropical South America leading to Freezes in Southern and Southeastern Brazil. **Theor. Appl. Climat.**, v.74, p.243-247, 2002.
- MÜLLER G.V., AND G.J. BERRI. Atmospheric Circulation Associated with Persistent Generalized Frosts in Central-Southern South America. **Mon. Wea. Rev.**, v.135, n.4, p.1268-1289, 2007.
- ORLANSKI, I., AND J. KATZFEY. The Life Cycle of a Cyclone Wave in the Southern Hemisphere. Part I: Eddy Energy Budget. **Journal Atmospheric Sciences**, v.48, n.17, p.1972–1998, 1991.
- ORLANSKI, I., AND J. SHELDON. A Case of Downstream Baroclinic Development over Western North America. **Mon. Wea. Rev.**, v.121, p.2929–2950, 1993.
- RANDEL, W.J., AND J.L. STANFORD. The Observed Life Cycle of a Baroclinic Instability. **J. Atmos. Sci.**, v.42, p.1364–1373, 1985.