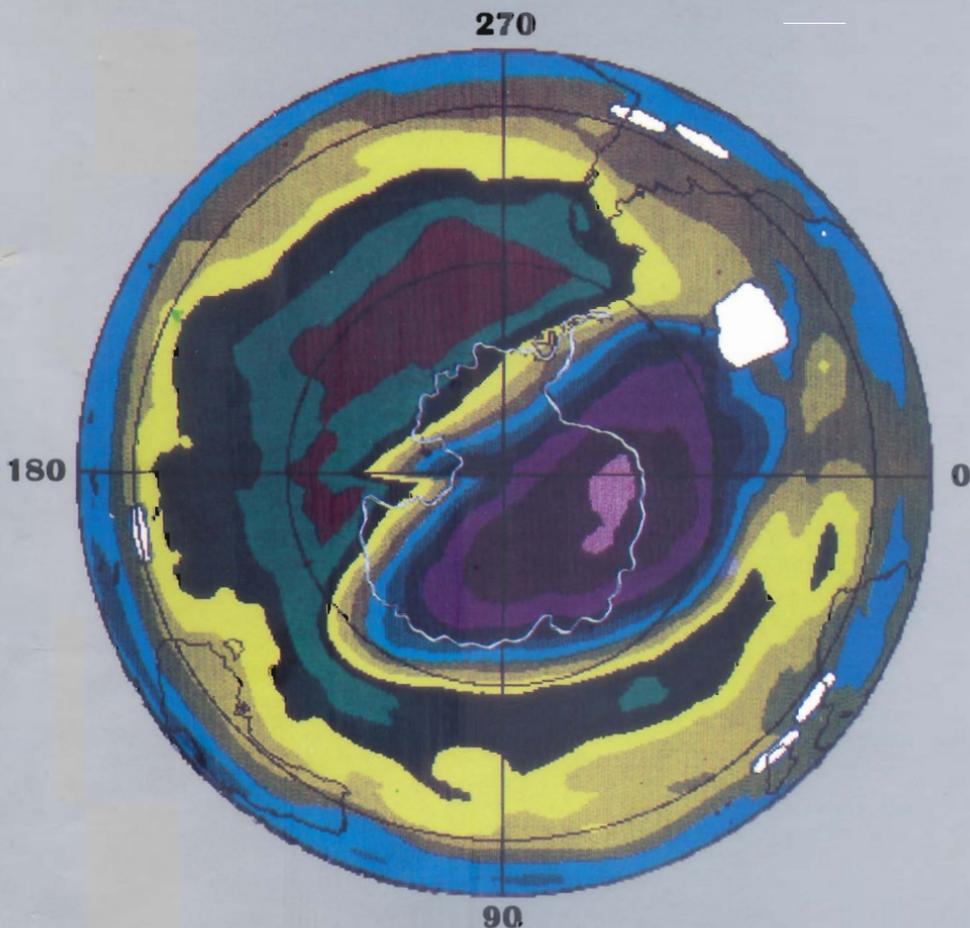


CIÊNCIAS ESPACIAIS E DA ATMOSFERA NA ANTÁRTICA

TRABALHOS DO SIMPÓSIO DE SERRA NEGRA (1994)

René A. Medrano-B
Enio B. Pereira
Editores



TRANSTEC EDITORIAL



**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

**Ciências espaciais e da atmosfera na Antártica /
René A. Medrano-B, Enio B. Pereira editores. --
São José dos Campos, SP : Transtec, 1995.**

**"Trabalhos do Simpósio de Serra Negra (1994)"
ISBN 85-85417-07-2**

**1. Atmosfera - Pesquisa - Antártica 2. Ciências
espaciais - Antártica I. Medrano-B, René A., 1939-
II. Pereira, Enio B., 1948-**

95-4823

CDD-500.50720989

Índices para catálogo sistemático:

1. Antártica : Pesquisas avançadas 500.50720989

ÍNDICE POR ASSUNTO

	PÁG.
PREFÁCIO	v
INTRODUÇÃO	vii
O SISTEMA POLÍTICO DO TRATADO ANTÁRTICO (Invited Paper)	01
Marcela M. Nicodemos	

METEOROLOGIA E GELO ANTÁRTICO

SATELLITE SENSING OF ANTARCTIC SEA ICE (Invited Paper)	87
C.L. Parkinson	
POLAR ICE RECORDS OF THE PAST CLIMATE AND ENVIRONMENT (Invited Paper).....	313
R.J. Delmas	
PHYSICAL CHARACTERISTICS OF ANTARCTIC SEA ICE (Invited Paper)	19
P. Wadhams	
HEAT TRANSPORT IN THE SURFACE LAYER EAST OF THE DRAKE PASSAGE ESTIMATED FROM A WOCE DRIFTER-FIRST RESULTS	117
M.R. Stevenson and R.B. de Souza	
ESTRATIGRAFIA GLACIAR EN LA PENINSULA ANTARTICA	279
A.J. Aristarain	
TROCA DE MASSAS ATMOSFÉRICAS ENTRE LATITUDES ALTAS E MÉDIAS NO MODELO GLOBAL DO NMC.....	131
R.M. Bevilacqua, P.M. Caplan e D.J.R. Nordemann	
INFLUÊNCIA DA CIRCULAÇÃO SUBANTÁRTICA NA OCORRÊNCIA DE UM EPISÓDIO FRIO NA REGIÃO SUL DO BRASIL	359
A.M.H. de Ávila, N.J. Ferreira, N.O. Calbete e V.B. Rao	

INFLUÊNCIA DA CIRCULAÇÃO SUBANTÁRTICA NA OCORRÊNCIA DE UM EPISÓDIO FRIO NA REGIÃO SUL DO BRASIL

Ana Maria Heuminski de Avila, Nelson Jesus Ferreira, Nuri Oyamburo de Calbete, Vadlamudi Brahmananda Rao

**Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, C.P. 515
12201-970 São José dos Campos-SP, Brasil**

ABSTRACT

During the period July 07-10, 1994, damage frost and snow fall occurred at several places over southern Brazil as a result of a strong cold air outbreak. The meteorological conditions associated with this episode are investigated in this study using satellite imagery, conventional data and the NMC grid point analysis. During this period cold air advection from sub-antarctic latitudes was observed in the low and medium troposphere. Also, a cut-off low and a trough merged in the Southwest Atlantic Ocean. The cut-off low coming from the Southeast Pacific Ocean crossed the Andes mountain following a quasi zonal path along 30° S and reached southwestern Atlantic near Uruguay. The trough amplified northwestward from sub-polar latitudes in the South Atlantic. The position of this cold low in the vicinity of southern Brazil and the establishment of a split flow pattern in the Southeastern Pacific Ocean channeled cold air equatorward favoring the occurrence of frost and snow fall in southern Brazil. An analysis of the quasi-geostrophic vorticity equation shows that the advection of relative vorticity was responsible for the eastward movement of the cut-off low. The results of this study suggest that sub-antarctic circulation plays an important role in the sequence of events that preceded this case.

RESUMO

No período de 7 a 10 de julho de 1994, a Região Sul do Brasil foi atingida por uma onda de frio que causou geadas intensas e queda de neve em diversos locais. Este evento é investigado neste trabalho utilizando-se imagens de satélites meteorológicos, análises de previsão numérica de tempo do "National Meteorological Center" (NMC) dos Estados Unidos da América e dados meteorológicos convencionais. Durante esse período ocorreu forte advecção de ar frio proveniente de latitudes subantárticas na média e baixa troposfera. Além disso, observou-se a junção de uma baixa

fria (média e alta troposfera) com um cavado localizado no Oceano Atlântico Sul. A baixa fria proveniente do Oceano Pacífico Sul, cruzou os Andes seguindo uma trajetória quase zonal ao longo da latitude 30°S , atingindo o Oceano Atlântico Sudoeste próximo do Uruguai. O cavado amplificou-se para noroeste a partir de latitudes subpolares no Atlântico Sul. A localização deste sistema de baixa fria na vizinhança do sul do Brasil e o estabelecimento de uma bifurcação na circulação atmosférica no Oceano Pacífico Sudeste permitiram um fluxo de ar frio para norte favorecendo a ocorrência de geadas e queda de neve em alguns locais. Análise da equação de vorticidade quase geostrófica mostra que a advecção da vorticidade foi responsável pelo deslocamento da baixa fria para leste. Os resultados obtidos sugerem que a circulação subantártica desempenhou um papel importante na seqüência de eventos que precedeu este caso.

INTRODUÇÃO

Durante o inverno austral, freqüentemente a região sul do Brasil é afetada por fortes ondas de ar frio, ocasionando geada em vastas áreas e queda de neve em regiões montanhosas. Em situações desse tipo, os prejuízos são enormes, uma vez que, diversos setores produtivos de nossa sociedade de uma forma ou outra estão relacionados com a atividade agrícola. Assim, o aprimoramento do conhecimento dos processos físicos associados à ocorrência de ondas de ar frio no sul do Brasil, passa também pelo interesse de se contribuir para a minimização dos prejuízos envolvidos.

Nas últimas décadas foram feitos diversos estudos sobre a ocorrência de episódios frios no Brasil. Parmenter (1975) documentou pela primeira vez a evolução temporal de uma das maiores ondas de ar frio que já

afetou o território nacional, utilizando seqüências de imagens transmitidas por satélite meteorológico geoestacionário. As características das variações espaciais dos danos agrícolas causados por essa onda de ar frio foram estudadas por Tarifa et al (1977). Através de análises sinóticas da circulação atmosférica eles concluíram que existe correlação entre a posição do centro do anticiclone polar, a variação espacial das temperaturas mínimas absolutas e os danos causados pelas geadas.

Diversos aspectos da situação sinótica associada a uma onda de ar frio relativamente forte ocorrida em julho de 1972 no sul do Brasil, foram analisados por Hamilton e Tarifa (1978). Essas análises foram baseadas em imagens de satélites e numa quantidade limitada de dados meteorológicos convencionais do continente sul-americano.

Fortune e Kousky (1983) procurando identificar precursores sinóticos associados a ocorrência de duas grandes geadas ocorridas no Brasil em 1979 e 1981 estenderam o domínio espacial da área de estudo até o leste do Oceano Pacífico Sul. Eles utilizaram como base de dados as análises do modelo de previsão numérica de tempo do NMC, dados de bóias e imagens de satélites meteorológicos. Nesses dois casos analisados foi observado que 4 a 5 dias antes da ocorrência de geadas houve amplificação de uma onda longa na alta troposfera do Oceano Pacífico Sul. A crista dessa onda estava situada perto do sul dos Andes e o cavado a jusante, localizado nas longitudes do Brasil. Essa configuração do escoamento favorecia a advecção de ar de latitudes subantárticas para o interior do continente sulamericano. Além disso, no caso específico da geada de 1981 Fortune e Kousky observaram a formação de uma baixa despreendida na parte norte do cavado sobre o Oceano Atlântico Sul à leste da crista.

Seluchi e Nery (1992) estudaram as condições sinóticas médias características de situações de geadas na região de Maringá no Estado do Paraná, período de 1980 a 1988. Nesse estudo foram utilizados dados meteorológicos convencionais e análises do ECMWF (European Centre for Medium Range Weather and Forecasts). Eles concluíram que

anticiclones migratórios que se deslocam meridionalmente na retaguarda dos sistemas frontais desde o sul da Argentina, se intensificam ao cruzar os Andes, provocando geadas na região Sul do Brasil.

Os estudos mencionados anteriormente documentam várias características da circulação atmosférica, associadas as ocorrências de ondas de frio no sul do Brasil. Entretanto, pouco se comenta sobre as condições meteorológicas envolvendo queda de neve na região sul e o papel da circulação atmosférica nas latitudes subantárticas. Neste trabalho discute-se o papel dessa circulação e as principais características meteorológicas de uma situação sinótica ocorrida no sul do Brasil em julho de 1994. Este evento provocou geadas e queda de neve em áreas onde geralmente isto não ocorre.

DADOS E METODOLOGIA

Este estudo foi feito tendo como base de dados, imagens no canal espectral infravermelho, com resolução temporal de uma hora transmitidas pelo satélite meteorológico geostacionário METEOSAT-3. Essas imagens foram recebidas por uma estação de recepção localizada no INPE em São José dos Campos, SP. Além disso, utilizou-se também dados meteorológicos convencionais obtidos pelo Instituto Nacional de

Meteorologia (INMET), e análises meteorológicas em pontos de grade do NMC. Estas análises (campo de vento, geopotencial, temperatura e umidade), que apresentam resolução espacial de 2,5 x 2,5 graus de latitude/longitude foram obtidas pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), junto ao NMC. As análises do NMC incorporam todas as observações meteorológicas convencionais e não convencionais recebidas através do Global Telecommunications System (GTS) e talvez constituam-se numa das melhores representações do estado atmosférico numa escala regional. Uma descrição detalhada do modelo do NMC é apresentada por Kanamitsu (1989) e Kanamitsu et al (1991). A visualização gráfica das análises do NMC foi feita utilizando-se o software "Grid Analysis and Display System" (GrADS) (Doty, 1992), fornecida pelo "Center for Ocean-Land-Atmosphere Interactions" (COLA).

RESULTADOS

Para facilitar a discussão dos resultados e por conseqüência a compreensão dos processos físicos envolvidos, enfocou-se primeiro a situação meteorológica em superfície, incorporando a visão através das imagens de satélites meteorológico e posteriormente o quadro sinótico em altitude.

Situação Meteorológica em Superfície

No período de 7 a 10 de julho de 1994 o sul do Brasil foi invadido por uma onda de frio que causou geadas em diversos locais. Além disso, observou-se queda de neve em locais onde geralmente isto não ocorre. A análise apresentada nesta seção tem como objetivo identificar alguns padrões da circulação atmosférica que contribuíram para a ocorrência do evento mencionado.

A tabela 1 lista alguns locais onde foram observados geadas e queda de neve durante o período estudado. A penetração dessa onda de ar frio ocorreu poucos dias após a entrada de uma outra massa fria na região sul do Brasil. No caso de São Joaquim a temperatura média do mês de julho é de 5,9°C. Entretanto, a mínima no dia 9 de julho chegou a -9°C. Em geral a queda de neve ocorreu nas regiões montanhosas do Rio Grande do Sul e na Serra Catarinense, mas em alguns locais como Chapecó e Lages não nevava a seis anos.

A extensão da onda de frio atingiu o sul, sudeste e região central do Brasil. Em diversos locais a queda de temperatura na baixa troposfera (850 hPa) foi bastante acentuada (Figura 1), no Rio de Janeiro foi de 15°C e em Curitiba foi de 11°C entre os dias 8 e 9. Nas

outras localidades ao longo da costa leste do Brasil, o decréscimo maior de temperatura ocorreu entre os dias 7 e 8 de julho de 1994.

A evolução da situação sinótica em superfície durante o período mais crítico é apresentada na sequência de cartas dos dias 07 a 09 de julho de 1994 (Figuras 2 a 4). No dia 07/07/94 observa-se a presença de um amplo anticiclone polar deslocando-se para leste no extremo sul da América do Sul. A nordeste desse anticiclone um centro de baixa pressão esta associado a uma frente fria em formação no sul do Brasil. Nesta fase apenas parte da Argentina sofre influência do ar frio oriundo de latitudes subantárticas. No dia 08/07/94 o anticiclone polar como um todo desloca-se para nordeste afetando a Argentina, sul do Brasil e outros países vizinhos. A frente fria associada se estende até a região

central do Brasil, passando pelo estado de São Paulo. Observa-se também a formação de um cavado secundário estendendo-se do centro da baixa até Baía Blanca, na Argentina. Durante esse dia, embora alguns locais no sul do Brasil já estivessem sob influência da massa de ar de origem polar, a configuração do anticiclone não era favorável para canalizar ar frio para o interior do território brasileiro. Nota-se que parte do ar frio oriundo de latitudes subantárticas (entre 50°W e 70°W) sofre um deslocamento para nordeste no Oceano Atlântico Sul. Posteriormente, esse ar frio é advectado para o leste da Argentina, Uruguai e sul do Brasil. Em função dessa trajetória, as características originais da massa de ar polar modificaram-se, diminuindo sua intensidade.

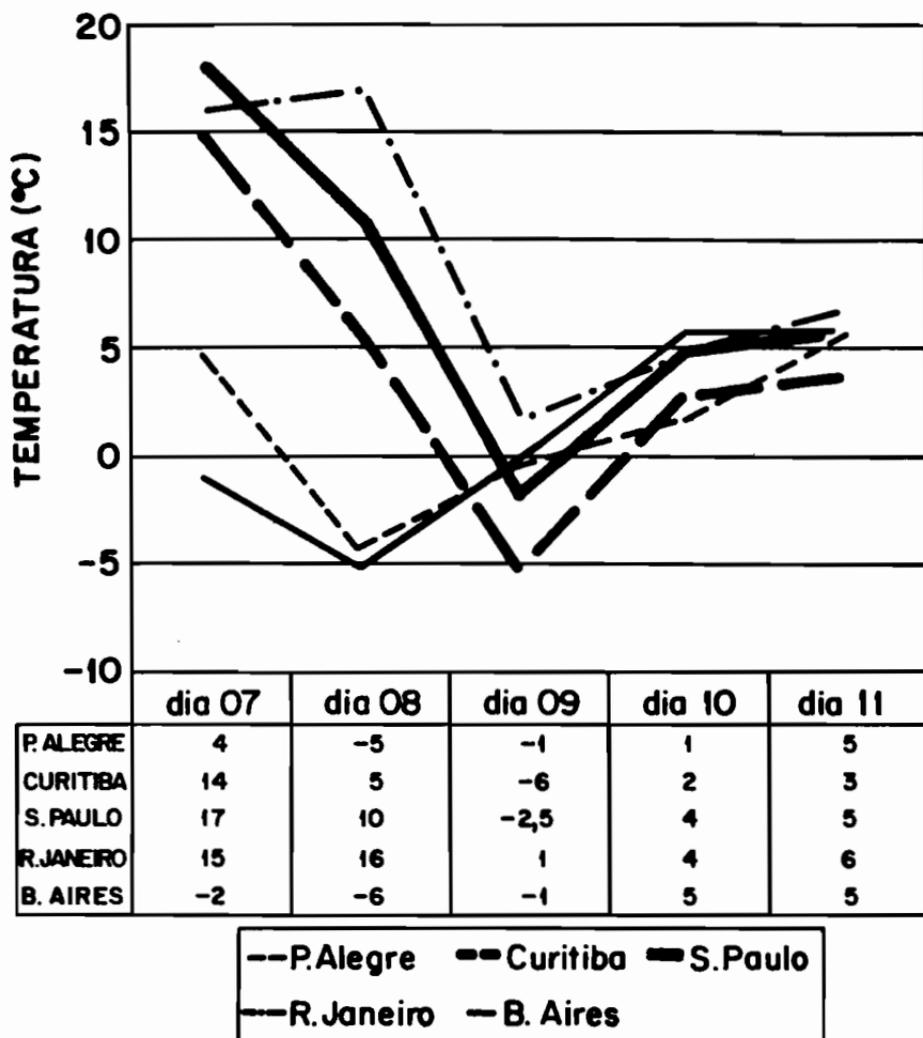


Figura 1 - Extensão da onda de frio no nível de 850 hPa para o período de 07 a 11 de julho de 1994 de acordo com dados de radiosondagens. Os dados de São Paulo para o dia 09 foram interpolados usando as informações de Curitiba e Rio de Janeiro.

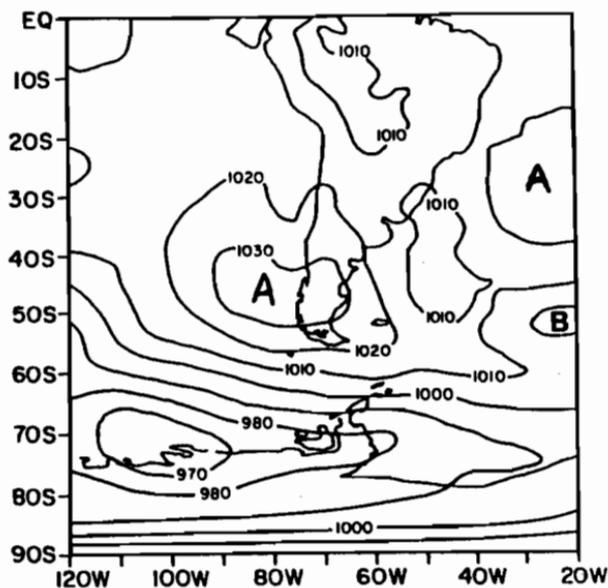


Figura 2 - Pressão reduzida ao nível médio do mar, dia 07/07/94, 00 Z: fonte NMC.

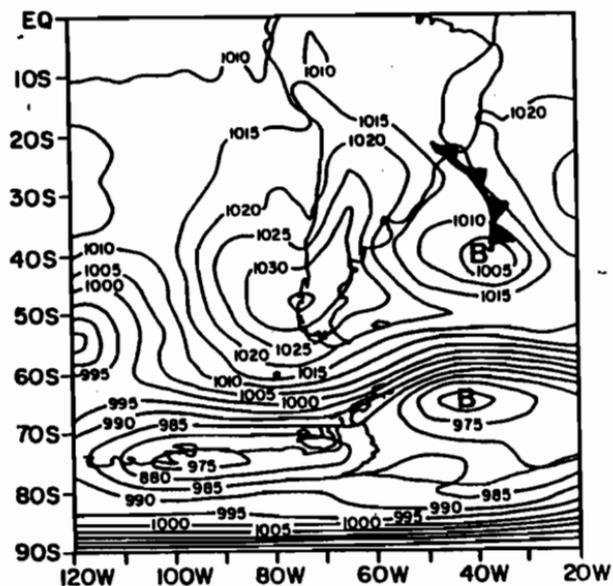


Figura 3 - Pressão reduzida ao nível médio do mar, dia 08/07/94, 00 Z: fonte NMC.

Tabela 1 - Ocorrência de Geadas e Neve no Sul do Brasil, período de 8 a 10 de julho de 1994. (Fonte INMET)

Estação	Estado	Data	Fenômeno observado	Temperatura mínima
Itajaí	(SC)	08	geada fraca	0,5°C
Itajaí	(SC)	10	geada fraca	0,5°C
Blumenau	(SC)	10	geada fraca	3,5°C
Urussanga	(SC)	09	geada mediana	-2,5°C
Urussanga	(SC)	10	geada fraca	-1,7°C
Turvo (SC)	(SC)	09	geada fraca	1,0°C
Ituporanga	(SC)	09	neve	-3,2°C
Ituporanga	(SC)	10	geada mediana	-2,4°C
S. Joaquim	(SC)	08	geada fraca	-1,2°C
S. Joaquim	(SC)	09	neve	-9,0°C
S. Joaquim	(SC)	10	geada forte	-8,0°C
Lages	(SC)	09	neve	-3,0°C
Lages	(SC)	10	geada fraca	-0,2°C
Caçador	(SC)	09	geada forte/neve	-5,8°C
Caçador	(SC)	10	geada fraca	0,0°C
C. Novos	(SC)	09	neve	-3,2°C
C. Novos	(SC)	10	geada fraca	-1,4°C
B. Luz	(SC)	09	neve	-4,0°C
B. Luz	(SC)	10	geada mediana	-2,8°C
M. Oeste	(SC)	09	geada mediana	-2,4°C
M. Oeste	(SC)	10	geada fraca	-0,2°C
Chapecó	(SC)	09	neve	-3,0°C
Curitibanos	(SC)	09	geada forte/neve	-6,2°C
Curitibanos	(SC)	10	geada fraca	-1,2°C
Lebon Regis	(SC)	08	geada mediana	-2,7°C
Lebon Regis	(SC)	09	neve	-4,8°C
Lebon Regis	(SC)	10	geada mediana	-2,2°C
Fraiburgo	(SC)	08	geada fraca	2,2°C
Fraiburgo	(SC)	09	neve	-1,9°C
Fraiburgo	(SC)	10	geada fraca	-1,8°C
Londrina	(PR)	10	geada fraca	11,0°C
Maringá	(PR)	09	geada forte	-3,7°C
Castro	(PR)	09	geada forte	-6,6°C
Irati	(PR)	09	geada forte	-6,5°C
Bagé	(RS)	08	neve	-3,5°C
Santa Maria	(RS)	10	geada forte	-5,8°C
S.L. Gonzaga	(RS)	10	geada forte	-5,9°C
Passo Fundo	(RS)	10	geada moderada	-2,0°C
Porto Alegre	(RS)	08	chuva congelada	4,8°C
Uruguaiana	(RS)	08	geada fraca	-1,0°C
Uruguaiana	(RS)	10	geada forte	-6,6°C

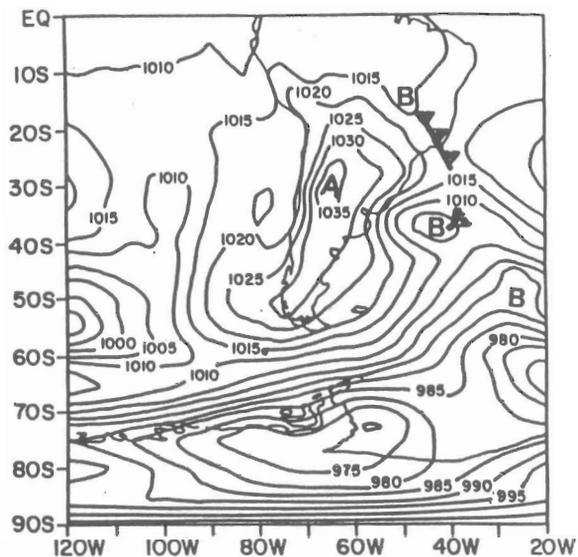


Figura 4 - Pressão reduzida ao nível médio do mar, dia 09/07/94, 00 Z: fonte NMC.

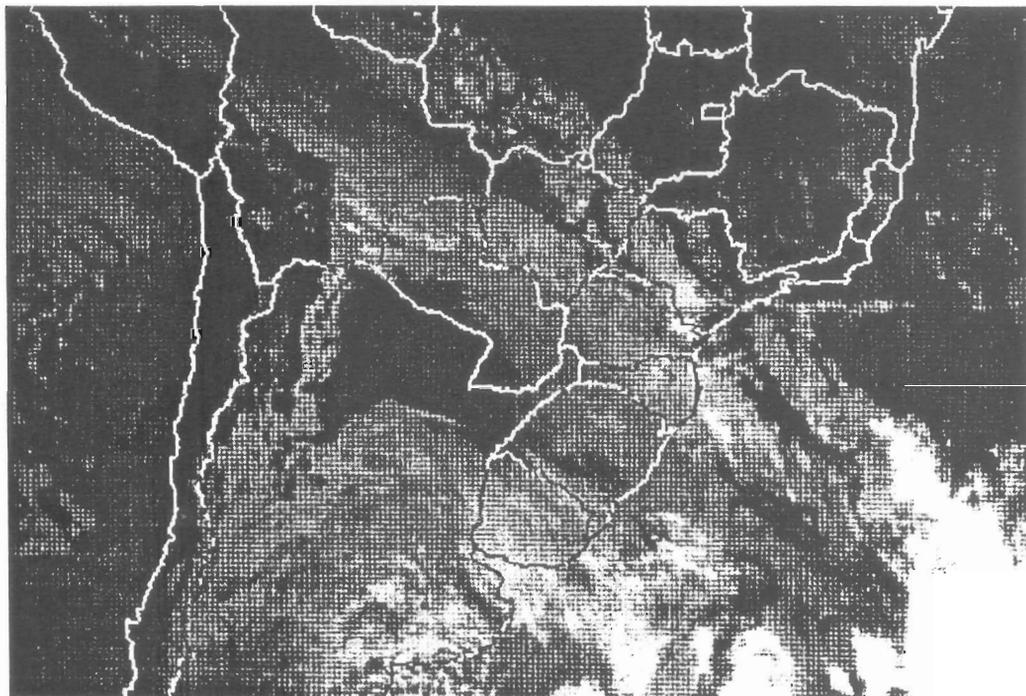


Figura 5 - Imagem do satélite meteorológico METEOSAT-3, canal infravermelho, 07/07/94, 18:00 Z.

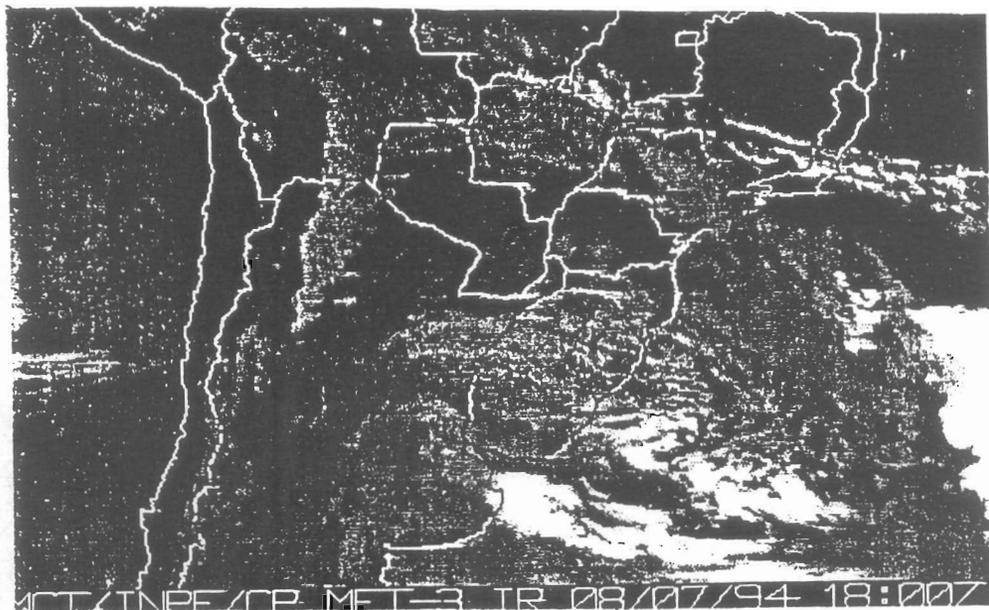


Figura 6 - Imagem do satélite meteorológico METEOSAT-3, canal infravermelho, 08/07/94, 18:00 Z.

No próximo dia (09/07/94) o anticiclone (pressão de 1035 hPa no centro), posiciona-se no centro-norte da Argentina. Nota-se, que o anticiclone polar refletindo a evolução do cavado/crista em ar superior, expandiu-se meridionalmente para norte, atingindo a faixa oeste do Brasil central. Como o centro de baixa no Oceano Atlântico Sudoeste não se deslocou significativamente em relação ao dia anterior,

aparentemente o aprofundamento do cavado secundário e a aproximação do anticiclone polar aumentou o gradiente de pressão e conseqüentemente, a circulação ciclônica na vizinhança do sudeste do Uruguai. Assim, ocorreria um influxo de ar relativamente úmido em alguns locais dessa região.

No dia 10/07/94 o anticiclone polar (não mostrado), ainda intenso, deslocou-se para o

nordeste da Argentina, dominando a circulação atmosférica sobre grande parte do continente sul-americano. A localização de seu centro orientava o ar frio para o Oceano Atlântico Sul e vizinhança da costa leste do Uruguai e sul do Brasil. Por outro lado, a frente fria enfraquecida, estendia-se do centro de baixa pressão localizado no Oceano Atlântico Sul até o sul da Região Nordeste do Brasil. O cavado secundário associado ao centro de baixa enfraqueceu e acompanhou o deslocamento da frente.

Alternativamente, a seqüência de imagens infravermelho (Figuras 5 a 7) obtidas pelo satélite meteorológico METEOSAT-3 mostra a evolução da situação sinótica discutida anteriormente. No dia 07/07/94 em "A" a área (branca) de nebulosidade de origem convectiva, mostra um aglomerado de nuvens associado a um cavado que se amplificou para norte à partir das ilhas Malvinas. Em "B" a nebulosidade ciriforme denota a presença da baixa desprendida (níveis médio e alto) que se formou no Oceano Pacífico Leste, deslocando-se zonalmente para o continente. No dia 08/07/94 a ausência de nebulosidade no centro-oeste da Argentina estava associada a entrada do anticiclone no sul do continente. As áreas de

nebulosidade convectivas a leste/sudeste da costa do Rio Grande do Sul e do Uruguai estão associadas com a presença de uma circulação ciclônica na média e alta troposfera. As imagens de satélite sugerem que essa circulação ciclônica modula a formação de nebulosidade e a entrada de umidade oceânica no continente. Mais ao norte, a faixa de nebulosidade que se estende do sudoeste da Amazônia, passando pelo norte de São Paulo até o Oceano Atlântico define a localização da frente fria. No dia 09/07/94 a presença do anticiclone polar no centro-norte da Argentina, impediu a formação de nebulosidade em grandes áreas. As áreas brancas com nebulosidade convectiva no Oceano Atlântico, ainda indicam a presença da circulação ciclônica associada a um centro de ar frio e vortacidade na média troposfera.

Quadro sinótico em altitude

Esta seção apresenta as principais características da circulação troposférica para o período de 07 a 09 de julho de 1994. As configurações do campo da altura geopotencial nos níveis troposféricos altos, médios e baixos estão apresentadas nas Figuras 8 a 10, respectivamente.

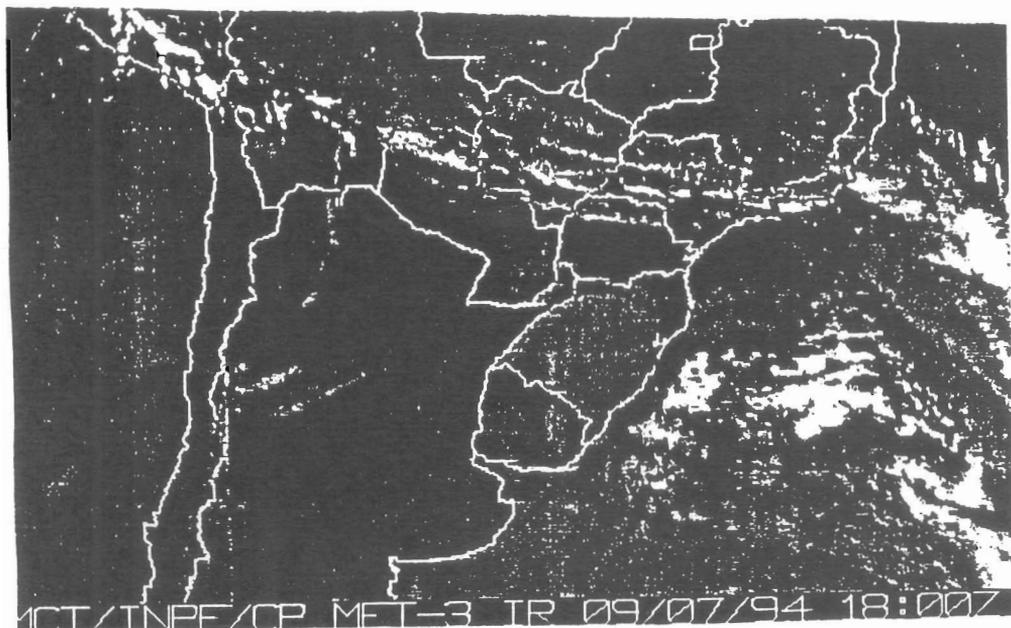


Figura 7 - Imagem do satélite meteorológico METEOSAT-3, canal infravermelho, 09/07/94, 18:00 Z.

Nos altos níveis (Figuras 8) observa-se a presença de um sistema de ondas longas no Oceano Pacífico Sudeste, associado a uma bifurcação do escoamento (aproximadamente em 30°S e 110°W), e a presença de um cavado orientado de sudeste para noroeste no sul da América do Sul. Esse cavado formou-se devido a junção de uma baixa desprendida que deslocou-se zonalmente para o continente vinda do Oceano Pacífico Leste, com um cavado que amplificou-se para noroeste a partir do Oceano Atlântico Sul. No dia 08 houve um lento deslocamento do

cavado para leste e uma baixa desprendida estabeleceu-se a leste/sudeste do Uruguai. Nota-se, também, que o cavado assume uma orientação mais meridional em relação ao dia anterior. No dia 9 observa-se apenas um cavado a sudeste do Uruguai e a baixa desprendida abriu-se.

Na média e baixa troposfera a evolução do campo da altura geopotencial (Figuras 9 e 10), possibilita identificar melhor a estrutura tridimensional do sistema meteorológico em questão. Torna-se evidente que a baixa

desprendida vinda do Pacífico localizava-se essencialmente na média troposfera. Ao cruzar os Andes ela abre-se, posteriormente fecha-se novamente na vizinhança do sudeste da costa do Uruguai e vinte e quatro horas depois abre-se novamente. A intensidade da advecção fria nessa região estava associada com o aprofundamento dessa baixa fria nos dias 8 e 9.

A queda de neve observada em diversos locais no sul do Brasil durante o período em estudo, aparentemente foi modulada pela presença da circulação ciclônica e ocorrência de ventos fortes na média troposfera. Essa situação é ilustrada na Figura 11, a qual mostra a evolução temporal do perfil vertical do vento em alguns níveis isobáricos sobre Porto Alegre e Rio Grande do Sul. Observa-se nos altos níveis uma corrente de jato durante todo o período analisado. Observa-se também a presença de ventos fortes de sudoeste (velocidade de 50 nós) nos níveis de 500 e 700 hPa no dia 09. Ao sul deste local o vento predominante (não mostrado) era de sul, vindo do Oceano. Neste caso as condições são favoráveis para ocorrer o transporte da umidade necessária para a formação de neve.

Outra característica marcante é que a configuração da circulação atmosférica na vizinhança sul da América do Sul

não era significativamente diferente na média e alta troposfera. Entretanto, houve grande variabilidade vertical na estrutura térmica da troposfera no período em questão. Para ilustrar essa situação apresenta-se na Figura 12 a variação temporal da temperatura observada em diversos níveis troposféricos sob Porto Alegre e Rio Grande do Sul. Nota-se que as mudanças mais acentuadas ocorreram na média troposfera (700 e 500 hPa), entre os dias 07 e 08.

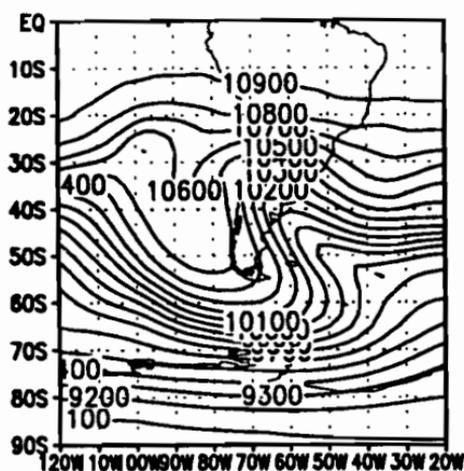
Análise da equação da vortacidade

Com o intuito de avaliar quantitativamente os principais mecanismos responsáveis pelo deslocamento do sistema de tempo que afetou o sul do Brasil no período de 07 a 10 de julho de 1994, avaliou-se a contribuição relativa dos diversos termos da equação da vortacidade expressa por:

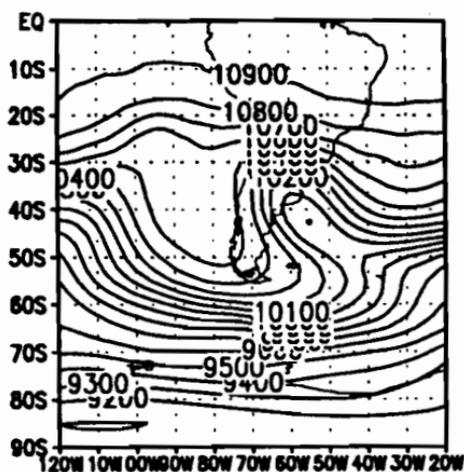
$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \underbrace{V_i \cdot \nabla \zeta}_A + \underbrace{\beta v}_B + \underbrace{(\zeta + f) \nabla \cdot V}_C = 0 \quad (1)$$

(A) (B) (C) (D)

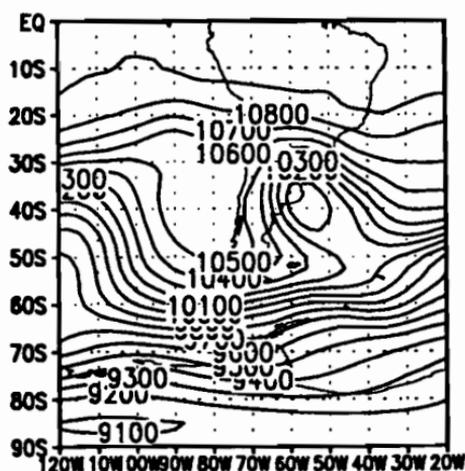
onde o termo (A) representa a variação local da vortacidade relativa, (B) a advecção horizontal da vortacidade relativa, (C) a advecção de vortacidade planetária e (D) o termo de divergência.



dia 07

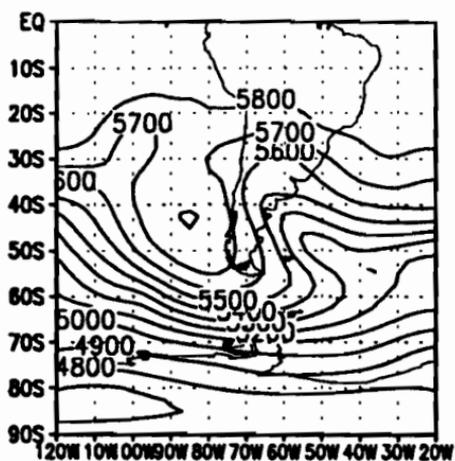


dia 08

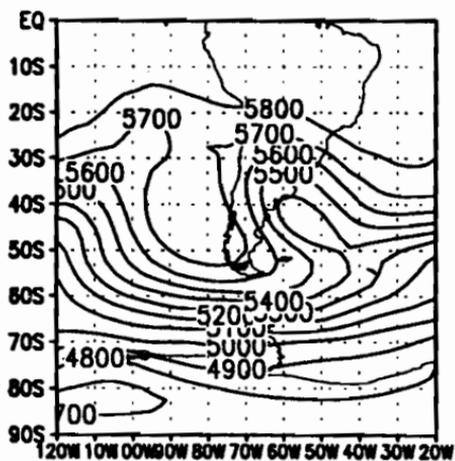


dia 09

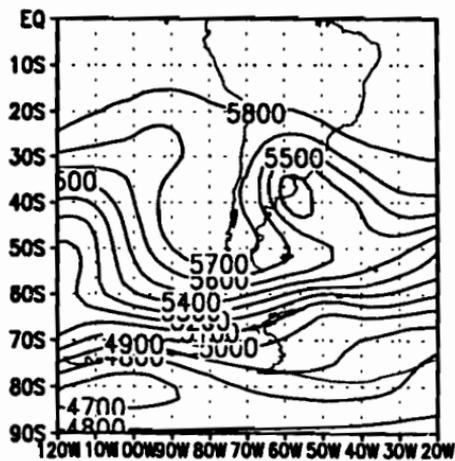
Figura 8 - Altura geopotencial, 250 hPa, dias 07 e 08 e 09 de julho de 1994, 00 Z: fonte NMC.



dia 07

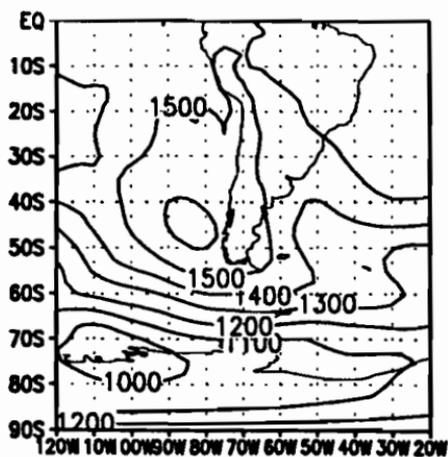


dia 08

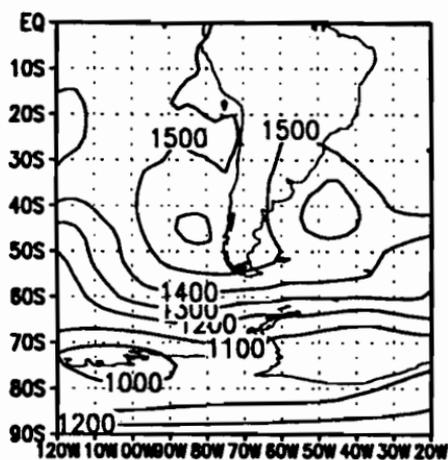


dia 09

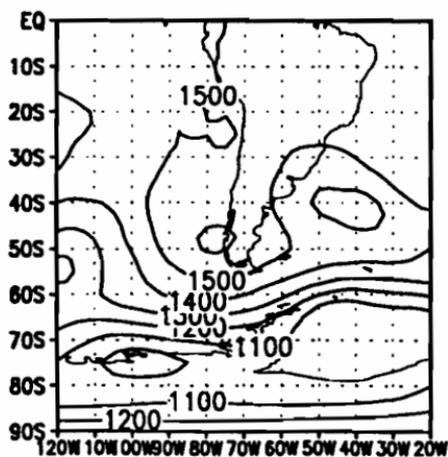
Figura 9 - Altura geopotencial, 500 hPa, dias 07 e 08 e 09 de julho de 1994, 00 Z: fonte NMC.



dia 07



dia 08



dia 09

Figura 10 - Altura geopotencial, 850 hPa, dias 07 e 08 e 09 de julho de 1994, 00 Z: fonte NMC.

De acordo com (1) a advecção de vorticidade relativa é responsável pelo deslocamento para leste dos cavados/cristas e a advecção de vorticidade planetária responsável pelo deslocamento para oeste desse sistema. Esse último termo é importante no caso da presença de ondas de escala planetária. Assim, o termo (C) atua como um freio no deslocamento das ondas. O termo de divergência está associado com a intensificação dos sistemas.

Para avaliar a contribuição dos principais termos da equação da vorticidade, definiu-se uma máscara acompanhando o cavado (associado a baixa) em altos níveis durante o período de 06 a 09 de julho de 1994, (tabela 2). Observa-se em geral o domínio da advecção de vorticidade relativa, seguido pela divergência, exceto no dia 06 quando o segundo termo dominante era a advecção de vorticidade planetária. Assim, no dia 06 tanto a advecção de vorticidade relativa como a divergência negativa contribuíam para deslocar o sistema para leste. A partir do dia 07 os termos de divergência positiva e a advecção de vorticidade planetária atuam no sentido de frear esse deslocamento para leste. Importante lembrar também, que fisicamente a divergência positiva atua no sentido de enfraquecer o

aumento da vorticidade ciclônica induzida pela advecção de vorticidade relativa.

Em síntese, antes da baixa penetrar no continente a advecção de vorticidade relativa e convergência, ambas contribuíam para o deslocamento do sistema para leste. Por outro lado, quando a baixa deslocou-se sobre o continente e Oceano Atlântico, a justaposição dos efeitos da divergência e advecção de vorticidade planetária desacelerava o movimento da baixa.

As Figuras 13 e 14 mostram como exemplo os campos da advecção de vorticidade relativa e planetária para o dia 09/07/94. No Oceano Atlântico a leste do Rio Grande do Sul, observa-se um centro de advecção de vorticidade negativa/ciclônica (Figura 13). Este centro denota a presença de um cavado e movimentos verticais ascendentes na região. O campo da advecção de vorticidade planetária (Figura 14), revela a presença de um trem de ondas estendendo-se do Oceano Pacífico Sul passando pelo extremo sul do continente sul-americano e deslocando para nordeste no Oceano Atlântico Sul.

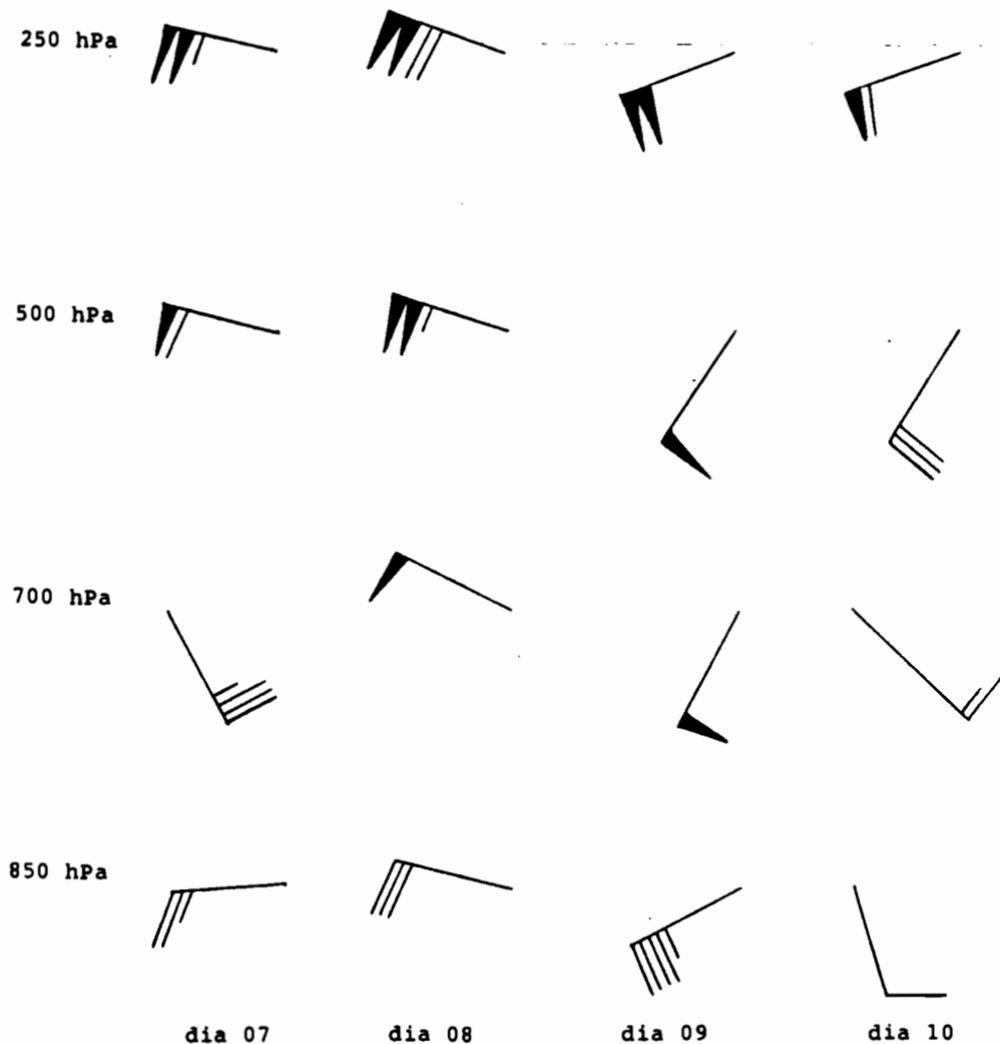


Figura 11 - Variação temporal do perfil vertical do vento sob a estação de radiossondagem de Porto Alegre para o período de 07 a 10 de julho de 1994, 12:00 Z.

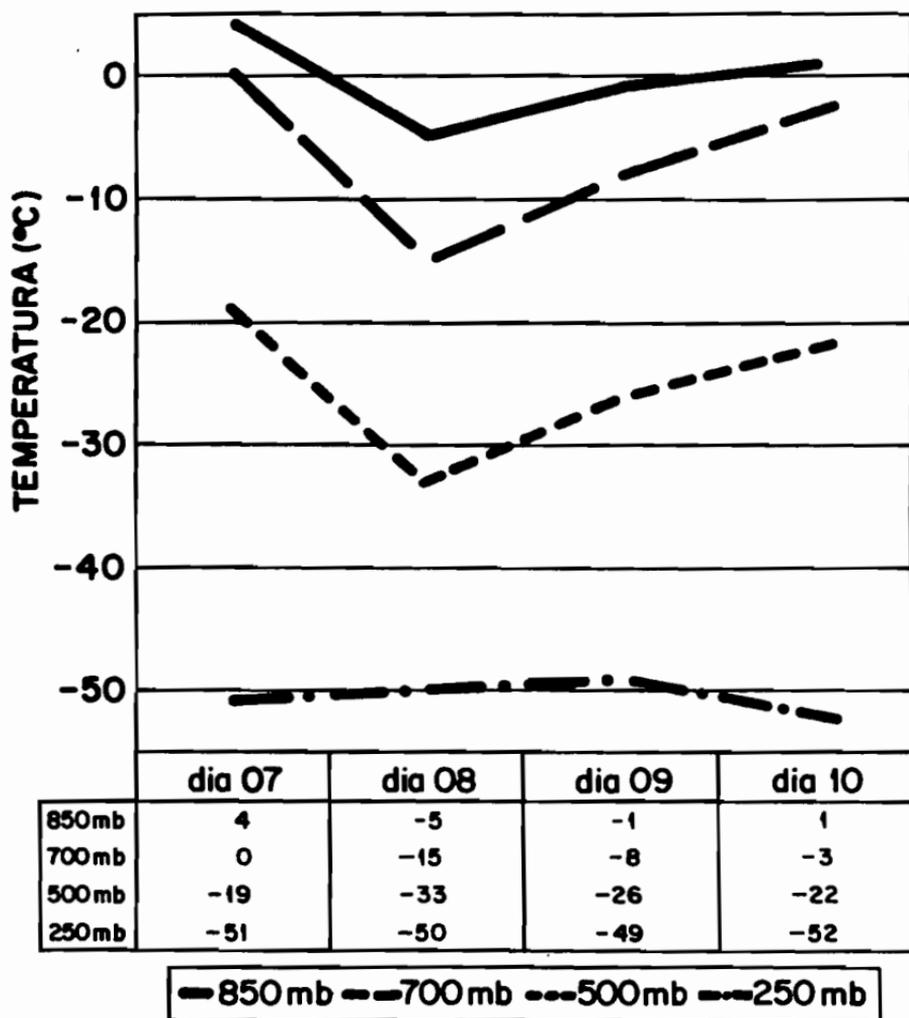


Figura 12 - Variação temporal do perfil vertical da temperatura sob a estação de radiossondagem de Porto Alegre para o período de 07 a 10 de julho de 1994, 12:00 Z.

ADV. VORT. REL. EM 250 hPa - 09/07/94

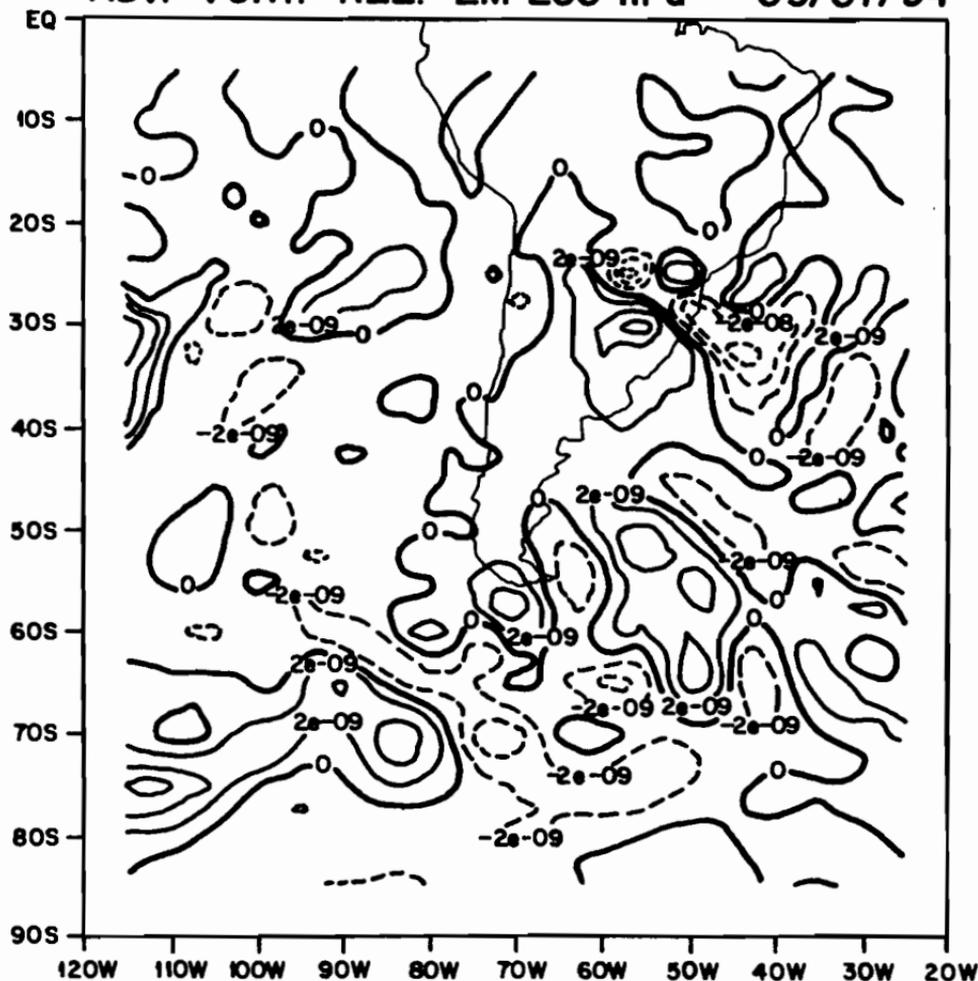


Figura 13 - Advecção de vorticidade relativa (s^{-2}), 250 hPa, dia 09/07/94, 00 Z.

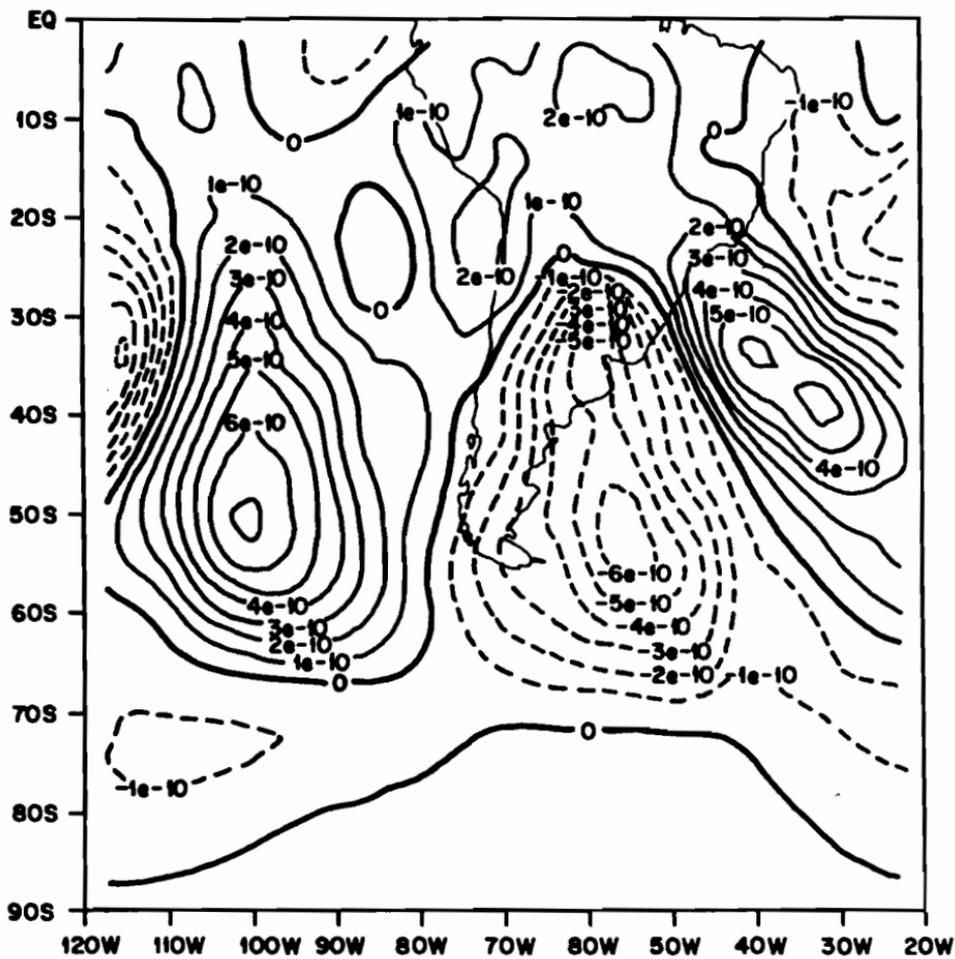


Figura 14 - Advecção de vorticidade planetária (s^{-2}), 300 hPa, dia 09/07/94, 00 Z.

Tabela 2 - Valores médios dos termos da equação da vorticidade (s^{-2}) numa área (5° latitude x 5° longitude) na frente do cavado da baixa desprendida no sul da América do Sul, durante o período de 06 a 09 de julho de 1994, no nível de 300 hPa.

Local	Dia 06	Dia 07	Dia 08	Dia 09
33,5°S; 44,5° W	32,5°S; 66,5°W	30,5°S; 53,5° W	35,5°S; 52,5° W	
advecção de vorticidade relativa $6,0 \times 10^{-9}$	$-9,2 \times 10^{-10}$	$-6,4 \times 10^{-9}$	$-1,5 \times 10^{-9}$	
advecção de vorticidade planetária	$2,3 \times 10^{-10}$	$5,7 \times 10^{-10}$	$3,8 \times 10^{-10}$	$5,2 \times 10^{-10}$
termo da divergência $3,5 \times 10^{-9}$	$-1,2 \times 10^{-10}$	$3,6 \times 10^{-9}$	$8,3 \times 10^{-10}$	

Considerações Finais

Os resultados obtidos evidenciam a importância da circulação subantártica para advectar ar frio para o interior do continente sul-americano durante o episódio frio que ocorreu no sul do Brasil entre 07 a 10 de julho de 1994. O quadro sinótico em superfície revela o estabelecimento de um forte anticiclone polar na Argentina e a presença de um cavado secundário associado ao centro de baixa pressão do sistema frontal. A posição do centro de alta guiou a entrada da massa de ar frio no sul do Brasil, mas o frio mais intenso foi dirigido para áreas oceânicas. O cavado secundário possibilitou a entrada de umidade

oceânica para o Uruguai e o sul do Brasil favorecendo assim, a queda de neve.

Em ar superior a configuração do escoamento associado ao episódio frio no sul do Brasil em julho de 1994 foi caracterizada por uma bifurcação do escoamento associada a presença de ondas longas no Oceano Pacífico Sul. Além disso, a junção de uma baixa fria (nível troposférico médio e alto) vinda do Oceano Pacífico com um cavado que se amplificou para noroeste à partir de latitudes subantárticas no Oceano Atlântico Sudoeste, resultou em ciclogênese à leste/sudeste do Uruguai. Assim, a presença da crista de onda longa na vizinhança do extremo sul do América do Sul

possibilitou a entrada de ar frio para o Brasil. A intensidade do frio nessa região estava associada com a presença de uma baixa fria próximo do Uruguai. Aparentemente, a queda de neve observada em diversos locais do sul do Brasil foi modulada pela presença dessa baixa.

A análise da equação da vorticidade mostra que durante o período considerado o deslocamento da baixa fria para leste, foi devido o predomínio da advecção de vorticidade relativa. O termo de divergência negativa inicialmente contribuiu para esse efeito, mas uma vez que a baixa penetra na América do Sul, a divergência atua no mesmo sentido da advecção da vorticidade planetária, retardando o deslocamento para leste. Além disso, a advecção de vorticidade planetária mostrou muito bem o estabelecimento de um trem de ondas longas estendendo-se do Oceano Pacífico Sul até o sudoeste do Oceano Atlântico.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao revisor anônimo pelas valiosas sugestões, à Maria Cristina Lourenço, Alessandra de Godoy Rocha e Angela Yuri Harada pela ajuda na obtenção dos campos utilizados e ao Dr. Rene A. Medrano-Balboa pelo estímulo, Márcia Maria dos Santos pela organização do texto. O

primeiro autor agradece ao Projeto METEOSUL e ao CNPq/RHAE pela concessão da bolsa de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Doty, B.E., Using the grid analysis and display system, Maryland Center for Ocean-Land-Atmosphere Interactions (COLA), University of Maryland, Jan. 1992.
- Fortune, M.A., V.E. Kousky, Two severe freezes in Brazil: precursors and synoptic evolution, *Monthly Weather Review*, 111 (01):181-196, Jan. 1983.
- Hamilton, M.G., J.R. Tarifa, Synoptic aspects of a polar outbreak leading to frost in tropical Brazil, July 1972. *Monthly Weather Review*, 106(11):1545-1556, Nov. 1978.
- Kanamitsu, M., Description of the NMC global data assimilation and forecast system, *Weather and Forecasting*, 4:334-342, 1989.
- Kanamitsu, M., J.C. Alpert, K.A. Campana, P.M. Caplan, Deaven, D.G., M. Iredell, B. Katz, H.L. Pan, J. Sela, G.H. White, Recent changes implemented into the global forecast system at NMC, *Weather and Forecasting*, 1: 1-12, 1991.
- Parmenter, F.C., A southern hemisphere cold front passage at the equator, *Bulletin of American Meteorological Society*, 57(12): 1435-1440, Dec. 1976.

Seluchi, M.E., J.T. Nery,
Condições meteorológicas
asociadas a la ocorrência de
heladas en la region de Maringá,
Revista Brasileira de Meteorologia,
7(1): 523- 534, Jun. 1992.

Tarifa, J.R., H.S. Pinto, R.R. Affonsi,
M.J. Pedro Jr., A gênese dos
episódios meteorológicos de julho
de 1975 e a variação espacial dos
danos causados pelas geadas à
cafeicultura no estado de São
Paulo, *Ciência e Cultura, São
Paulo*, 29(12): 1362-1374, Dez.
1977.