

ESTUDO DE CASO DA PRIMEIRA MASSA DE AR FRIO EM 1996 NO SUL DO BRASIL. OBSERVAÇÕES E RESULTADOS DO MODELO DE CIRCULAÇÃO GERAL DA ATMOSFERA DO CPTEC/COLA

**JOSÉ A. MARENGO, ANGEL G. CORNEJO, NURY C. OYAMBURO E
IRACEMA F. A. CAVALCANTI**

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)/INPE. Rodovia Presidente Dutra, km 40
CEP12.630-000 - Cachoeira Paulista-SP

RESUMO

Neste artigo, são apresentadas as análises do primeiro episódio de penetração de uma massa de ar frio que atingiu o Sul do Brasil nos dias 18-19 abril de 1996. Baixas temperaturas foram registradas no Sul e Sudeste do Brasil, e a massa de ar frio também atingiu o Oeste da Amazônia. Foram analisados os mecanismos dinâmicos deste evento e a situação sinótica com base em observações de superfície e de altos níveis da atmosfera. Uma comparação entre observações e resultados do modelo de circulação geral da atmosfera (MCGA) do CPTEC/COLA é feita, especificamente, para temperaturas mínimas e para as características de circulação durante este evento. Este evento foi selecionado por ser o primeiro caso de 1996 e para avaliar a performance do MCGA. Apesar de este evento não ter sido muito severo, ele fornece a oportunidade de comparar os padrões de circulação e temperatura produzidos pelo modelo relacionados com a penetração do ar frio sobre a América do Sul. As características observadas neste caso são semelhantes a outros casos de entradas de ar frio, porém menos intensas. Os resultados do modelo são consistentes com as observações, com algumas diferenças nas posições e intensidades dos sistemas.

ABSTRACT

In this paper the first episode of cold surges that affected southeastern Brazil on 18-19 April 1996 is studied. Low temperatures were registered in southern and southeastern Brazil, and the cold air reached western Amazonia. The synoptic situation and the dynamic mechanisms of this event are analyzed based on observations from the near surface and upper-level data. A comparison between the modeled and observed temperatures and circulation features in relation to this cold event is also discussed. We must indicate that this event was chosen because it was the first case of 1996 and we wanted to see the performance of the CPTEC/COLA global model. Even though the case study is not a very strong event, it gives the opportunity to assess the model in terms of depiction of the circulation and temperature fields related to the cold air penetration in South America. The observed characteristics analysed in this case were similar to other previous extreme cases studies, but less intense. Results from the model show a reduction of the minimum temperature in the analysed areas, although the observed values are lower, and the modeled fields at low and high levels are consistent with the observed fields, although with a little shift and less intensity.

1. INTRODUÇÃO

Geadas e temperaturas limitantes para a agricultura, no Sul do Brasil, são causadas pela entrada de ondas de frio provenientes de altas latitudes. Estas massas de ar frio são observadas durante os meses de abril a setembro. Eventos como este estendem-se muitas vezes, até a Região Amazônica e são denominados de "friagem", causando um declínio brusco da temperatura sobre esta região (Parmenter, 1976; Satyamurty et al., 1990; Marengo et al., 1997a,b). A frequência de ondas de frio no Sul do Brasil varia de ano para ano, sendo de zero até oito eventos (Seluchi e Nery, 1992; Algarve e Cavalcanti, 1994; Cornejo et al., 1997), e quase sempre está associada à ocorrência de geadas em grandes áreas sobre as Regiões Sul, sul da Região Centro-Oeste, São Paulo e regiões serranas de Minas Gerais.

Geralmente, as geadas causam grandes prejuízos para a agricultura de café no Brasil, tendo sido documentadas aquelas ocorridas em julho de 1975 (Parmenter, 1976; Girardi, 1983); maio de 1979 e julho de 1981 (Haddock et al., 1981; Fortune e Kouskǔ, 1983); julho de 1988 (Dapozzo e Silva Dias, 1994); junho e julho de 1994 (Marengo et al., 1997a, b). Os prejuízos consideráveis em 1995/96, devido às geadas de junho e julho de 1994, atingiram 50 e 80% em São Paulo e no Paraná, respectivamente. As previsões do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) para 1995/96 eram de 5 e 2 milhões de sacas em São Paulo e Paraná, respectivamente (Marengo et al., 1997a). Levantamentos realizados pelo USDA indicaram que a produção de café para 1995/96, em São Paulo, foi de 2,2 milhões de sacas (saca de 60 kg cada uma) e, no Paraná, foi de 0,2 milhões de sacas.

Na geada de julho de 1975 (talvez a mais intensa do século), a colheita de 1976-77 foi reduzida a 9,4 milhões de sacas, comparada com a produção média de 1961-80 de 19 milhões de sacas (Marengo et al., 1997a). Marshall (1983) e Zullo (comunicação pessoal, 1997) prepararam uma cronologia das ondas de frio que produziram prejuízos intensos no cultivo do café nas áreas produtoras do Sudeste do Brasil desde o final do século passado: 14 de junho de 1882, 16 de

julho de 1894, 25 de julho de 1895, 5 de julho de 1898, 18 de junho de 1899, 19 de agosto de 1902, 12 de agosto de 1904, 18 de julho de 1910, 23 de junho de 1911, 3 de setembro de 1912, 25 de junho de 1918, 25 de junho de 1928, 29 de junho de 1931, 14 de julho de 1993, 12 de julho de 1942, 15 de setembro de 1943, 5 de julho de 1953, 2 de agosto de 1955, 21 de julho de 1957, 7 de julho de 1962, 22 de junho de 1963, 28 de junho de 1964, 21 de agosto de 1965, 6 de agosto de 1966, 11 de julho de 1969, 18 de julho de 1975, 15 de agosto de 1978, 31 de maio de 1979, 21 de julho de 1981.

Com base nos trabalhos citados, foi feita uma atualização nesta tabela até 1994: 28 de julho de 1982, 15 de junho de 1983, 3 de agosto de 1983, 24 de agosto de 1984, 8 de junho de 1985, 2 de junho de 1986, 26 de julho de 1986, 26 de julho de 1988, 7 de julho de 1989, 22 de julho de 1990, 24 de julho de 1992, 15 de julho de 1993, 1º agosto de 1993, 26 de junho de 1994, 9 de julho de 1994, 10 de agosto de 1994. No ano de 1995 e até julho de 1996, não ocorreu nenhum episódio frio que prejudicasse o cultivo do café. No ano de 1997, alguns casos de geadas foram registrados nos dias 7-9 de junho nos estados do Sul e Sudeste do Brasil.

Os eventos considerados mais intensos foram os seguintes: 18 de junho de 1899, 19 de agosto de 1902, 25 de junho de 1918, 18 de julho de 1975, 31 de maio de 1979, 21 de julho de 1981, 26 de junho de 1994, e 10 de julho de 1994. Os critérios utilizados foram baseados nos danos à cultura de café.

No monitoramento da ocorrência de geadas, o problema é prever quais eventos vão evoluir, tornando-se intensos, e que poderão causar grandes prejuízos à agricultura da região, em especial ao café e à pastagem. Uma boa previsão possibilitará pôr em prática medidas de combate às geadas para proteger os cultivos e reduzir os danos.

As primeiras geadas de 1996 ocorreram entre os dias 18 e 19 de abril, e seguiram o padrão caracterizado como típico (Marengo et al., 1997a). A previsão numérica do tempo obtida pelo Modelo de Circu-

ção Geral da Atmosfera (MCGA) do CPTEC, realizada no dia 16 de abril, indicava a passagem de um sistema frontal pela Região Sul e, na sua retaguarda, a entrada de uma massa de ar frio polar continental que afetaria, com geadas, os Estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e regiões serranas do Paraná, nos dias 18, 19 e 20. Os resultados do modelo também indicavam o declínio de temperatura na Região Centro-Oeste e Sul, e no Vale do Paraíba. As observações mostraram um declínio acentuado de temperatura na Região Centro-Oeste, estendendo-se até o Sul da Amazônia, no dia 20. Na região do Vale do Paraíba, Estado de São Paulo, as temperaturas chegaram a declinar até 10°C no dia 19. Embora a previsão de temperatura mínima seja de valores baixos, os valores observados foram bem mais baixos.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo descrever o episódio de 18-19 de abril de 1996, tendo como base as observações recebidas pelo INMET/Brasília, as análises das 12:00 UTC do National Centers for

Environmental Prediction (NCEP, anterior INM) e os resultados do MCGA do CPTEC/COLA. Foram feitas previsões para os dias 16 a 18 de abril (os dias mais frios no Sul do Brasil), utilizando as condições iniciais dos dias 14 e 15 de abril de 1996 das 00:00 UTC. Nesta descrição, serão discutidos: a intensidade desta onda fria, sua extensão horizontal e alguns processos dinâmicos tais como a advecção de ar frio sobre as regiões afetadas. Esta avaliação pós-facto será útil para o futuro monitoramento e previsão dos eventos.

3. DESCRIÇÃO DO EVENTO

a. Temperatura mínima na superfície

A Tabela 1 e Figura 1 mostram as séries temporais das temperaturas mínimas de algumas cidades do Brasil ocorridas entre 12 e 21 de abril de 1996. Na localidade de Boa Vista-RR, a temperatura não declinou muito, enquanto que, na cidade de Tarauacá-AC, a temperatura decresceu 4°C entre os dias 18 e 19 de abril. Na parte central do Estado do Amazonas, em Manicoré, a

Tabela 1: Temperaturas mínimas (°C) no período de 12 a 21 abril de 1996 para estações do Sudeste e Sul do Brasil (fontes: INMET, SIMEPAR)

Estação	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Patos de Minas-MG	21,0	21,0	22,2	22,2	23,2		12,0	12,6	14,4	17,5
Barbacena-MG	16,9	16,6	16,8	17,5	16,9	17,4		9,9		11,5
Catanduva-SP	19,8	20,6	20,8	20,9	21,5	20,8	17,1	12,0	15,0	14,9
São Paulo-SP	19,2		19,4	20,1	20,3		14,0	12,4	16,4	14,1
Campo Mourão-PR	18,6	18,9	19,6	18,7	20,2	12,0		19,4	11,8	13,1
Curitiba-PR	17,2	17,4	17,9	16,9	19,4	12,0		17,6	11,4	10,0
Indaial-PR	20,4	21,2	21,0	21,4	21,8	15,2	9,0	20,4	11,4	12,2
Campos Novos-PR	16,0	16,1	16,6	18,2	15,6	6,4	3,5	16,2	7,8	10,7
Iraí-RS	19,0	19,4	18,8	20,0	18,6	8,4		17,4	7,6	10,8
Passo Fundo-RS	16,0	17,4	17,8	18,2	15,0	7,0		18,9	8,4	10,7
Caxias do Sul-RS	17,0	18,6	19,4	19,0	15,4	7,2		18,3	9,9	11,3

temperatura do ar decresceu 3°C entre os dias 17 e 18 de abril. No norte do Estado de São Paulo o dia 19 foi o mais frio, enquanto que, nas regiões serranas do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, a temperatura mais baixa ocorreu no dia 18, quando as temperaturas alcançaram 0°C, e a queda foi de até 15°C.

Neste, dia ocorreram geadas em Bom Jesus-RS e em São Joaquim-SC que registraram temperaturas mínimas de 0°C e 0,3°C, respectivamente. É importante ressaltar que, no dia seguinte, houve uma elevação da temperatura de até 12°C no Sul do Brasil (Fig. 1), e a temperatura do ar voltou a declinar no dia seguinte.

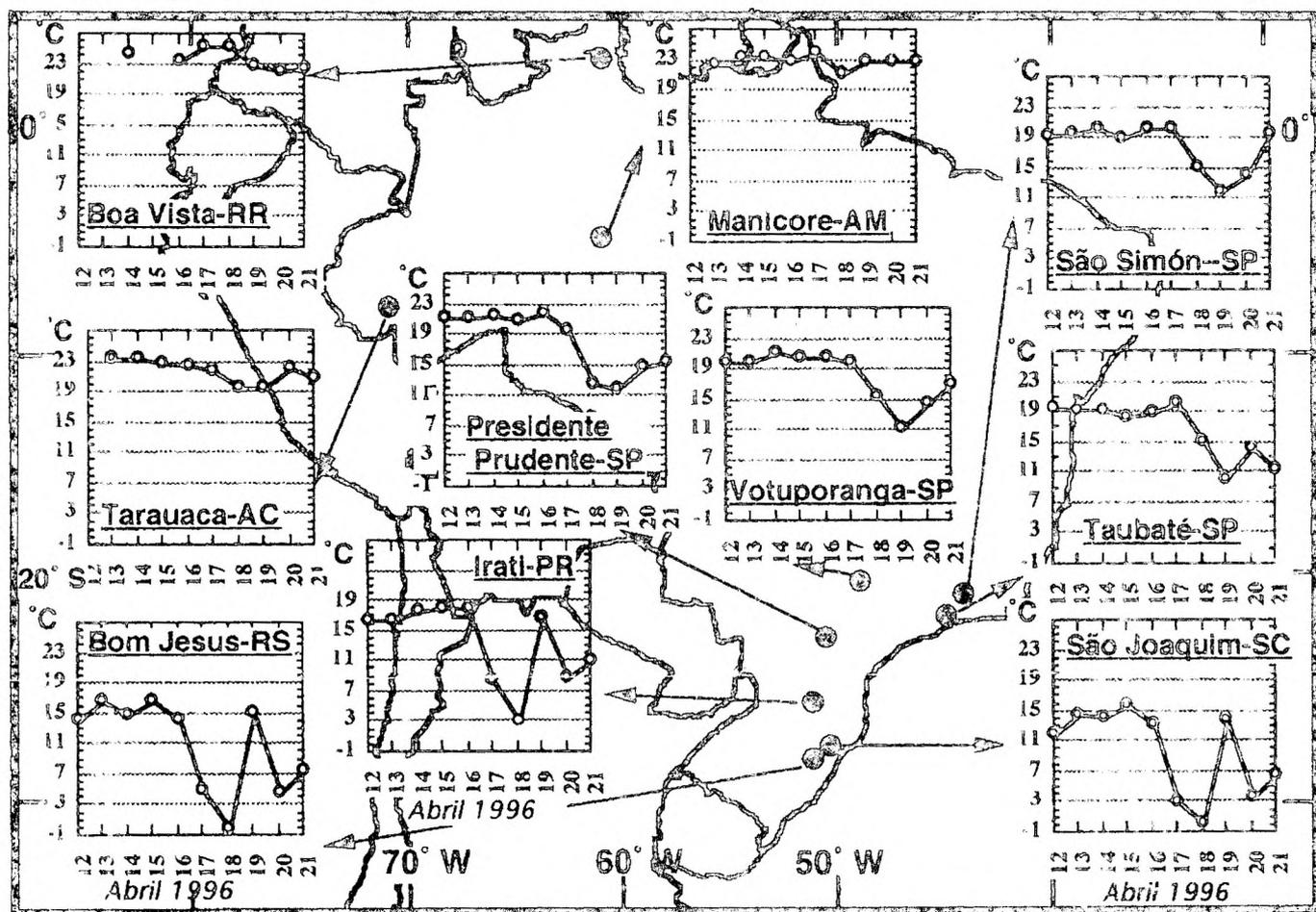


Figura 1 Evolução das temperaturas mínimas observadas na Amazônia e sul do Brasil no período 12-21 abril 1996 (fontes de dados: INMET SIMEPAR).

Isto se deve à entrada de uma nova massa de ar frio, porém menos intensa que a anterior. Este segundo resfriamento pode ser visto nas séries temporais das estações de São Paulo.

b. Análise Sinótica

Nos campos analisados do NCEP, de pressão ao nível do mar (Fig. 2a-d), e nas cartas sinóticas plotadas no CPTEC para as 12 UTC, do dia 16 ao dia 19, observa-se a propagação da alta pressão do Oceano Pacífico para o Oceano Atlântico, passando sobre a América do Sul. Associado aos centros de

baixa pressão e das configurações das isóbaras, pode-se observar o deslocamento de um sistema frontal desde o Uruguai até a costa leste do Brasil.

O anticiclone frio, na retaguarda do sistema frontal, encontrava-se, no dia 16, próximo à costa do Chile, deslocando-se nos dias posteriores para o continente. No dia 17, a alta pressão deslocou-se para o norte-nordeste, seguindo uma trajetória meridional ao longo do lado este da Cordilheira dos Andes, com centro de 1024 hPa em 30°S, estando associada à entrada de ar frio sobre o Sul do Brasil. No dia 18, o anticiclo-

se localizava sobre o Uruguai e sul/sudoeste do Brasil, com um centro de 1024 hPa, entre 27 e 40°S. Nas Regiões Sul e Centro-Oeste, o vento predominante era do quadrante sul, enquanto que no litoral da Região Sudeste os ventos predominantes eram do quadrante sudeste. Pela orientação das isóbaras e pelos ventos de sul/sudeste, pode-se inferir que há penetração do ar frio sobre estas regiões. No dia 19, o centro do anticiclone encontrava-se no Oceano Atlântico

A massa de ar frio não foi tão intensa, comparada com os outros eventos frios intensos identificados na literatura (Marango et al., 1997a, Cornejo et al., 1997). O anticiclone frio levou três dias para deslocar-se desde a costa chilena até a Região Sul do Brasil e mais um dia para alcançar a Região Sudeste. As análises do CPTEC para os campos de umidade relativa a 850 hPa (não mostrados aqui) indicaram o contraste de umidade entre a massa de ar frio e a massa de ar

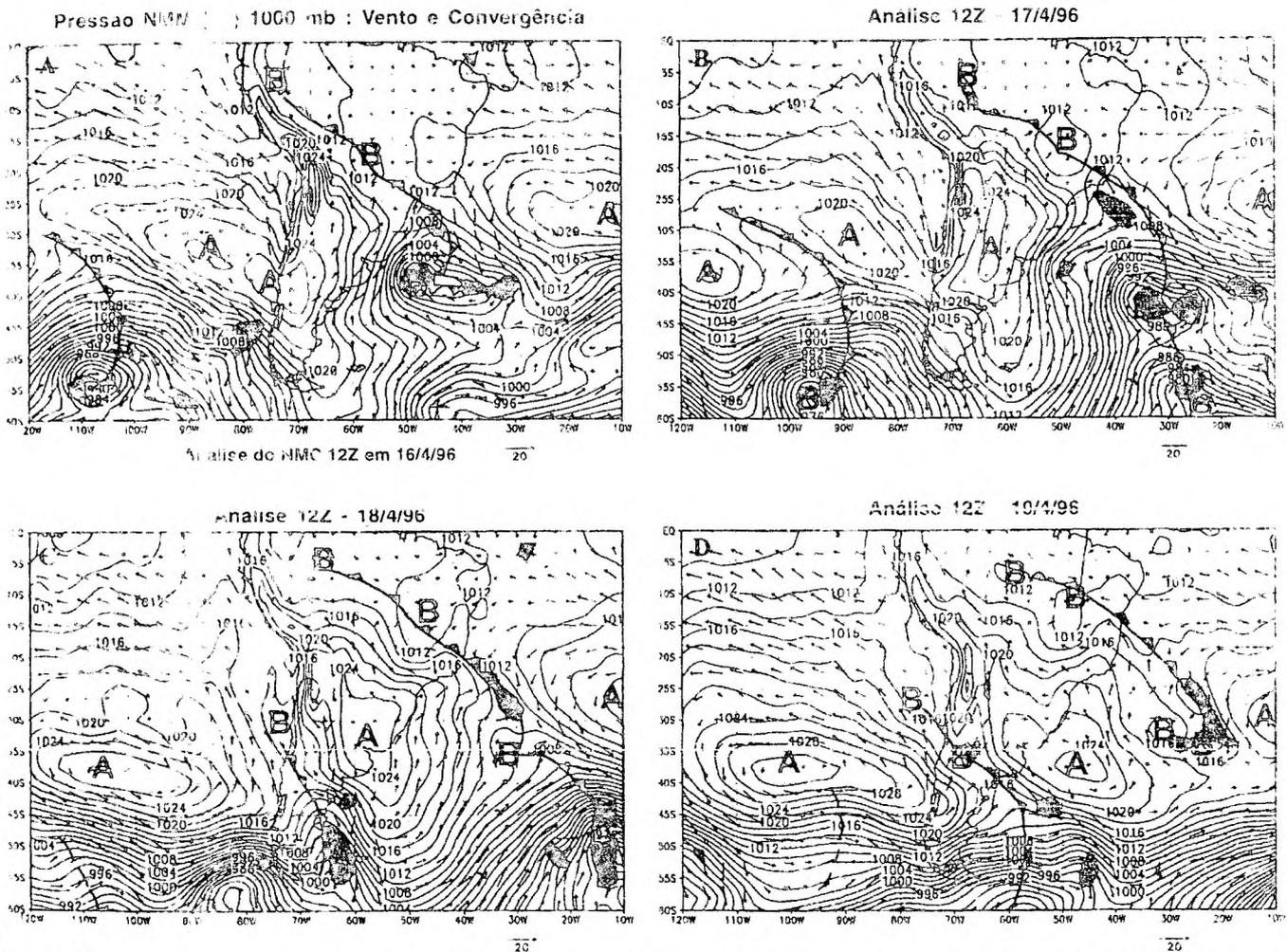


Figura 2 - Análises de superfície realizadas no CPTEC para as 12 00 UTC nos dias 16 (a), 17 (b), 18 (c) e 19 (d) de abril 1996. Os mapas mostram pressão ao nível de 1000 hPa, vento em 1000 hPa, e as áreas sombreadas indicam valores de convergência menores de $-2 \times 10^{-5} s^{-1}$. Na escala de vento e na fladão a parte baixa-direita ($m s^{-1}$)

quente. O contraste entre temperatura e umidade entre as massas de ar foi maior e mais acentuado nas estações localizadas na Região Sul e Sudeste do Brasil

Em um evento muito severo, ocorrido no dia 26 junho de 1994 (Marango et al., 1997b), houve

queda de temperatura e de umidade na Reserva Jarú (Sudoeste da Amazônia, em Ji-Paraná, Rondônia) entre 25 e 26 de junho (Fig. 3a). Neste evento, a temperatura do ar atingiu $9,3^{\circ}C$ depois de descer $12^{\circ}C$ em 24 horas, e a umidade (indicada pela temperatura de bulbo úmido) também experimentou um declínio de

15°C. Em 18-19 abril de 1996 (Fig. 3b), as mudanças

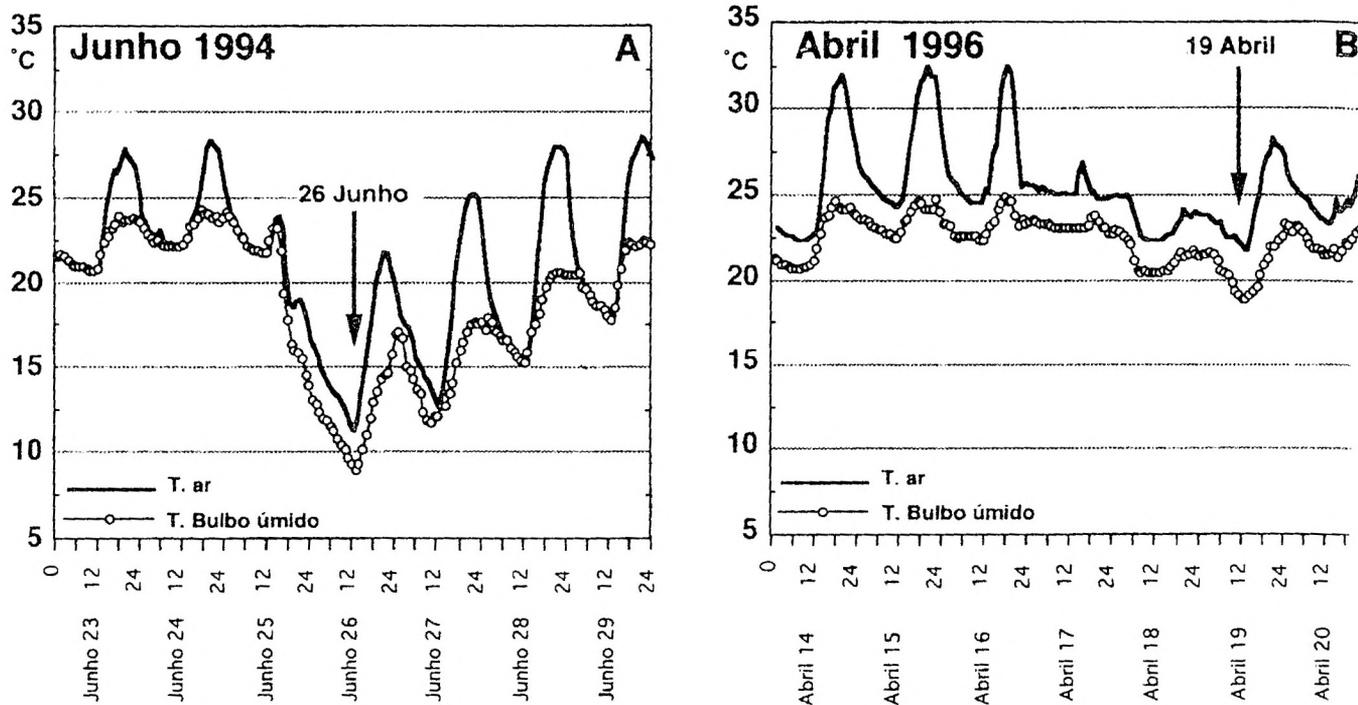


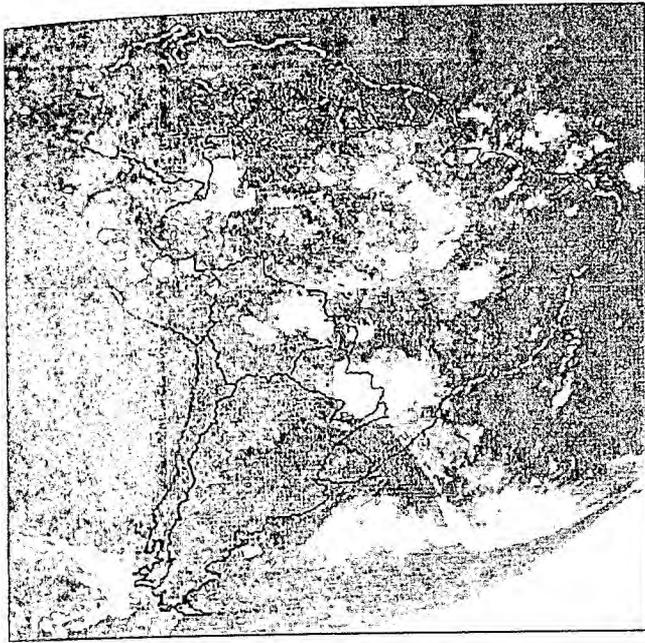
Figura 3 - Evolução das temperaturas de bulbo seco e úmido na Reserva Jaru (Ji-Paraná-RO, 10° 05'S, 61° 55' W), para (a) o evento frio de junho de 1994 (severíssimo) e para (b) o evento frio de 18-19 de abril de 1996.

em temperatura e umidade não são tão intensas como em junho de 1994. No presente caso, a temperatura do ar decresceu 4°C e a temperatura de bulbo úmido também experimentou um declínio da mesma ordem.

As Figs. 4a-d mostram as imagens no canal infravermelho do satélite GOES 8, para os dias 16, 17, 18 e 19, às 12:00 UTC. Nota-se a área de pressão alta sobre o Oceano Pacífico e litoral do Chile, no dia 16, indicando o predomínio e extensão da massa de ar frio, com subsidência e nuvens do tipo estrato na área do anticiclone, que, por sua vez, influencia também a Argentina. No dia 17, o anticiclone situa-se no Norte da Argentina e a frente fria estende-se sobre o Norte de São Paulo, Rio de Janeiro e Sul de Minas Gerais. No dia 18, a massa de ar frio estende-se sobre a Argentina e estados do Sul e Sudeste do Brasil, com o centro do anticiclone sobre o Uruguai e Rio Grande do Sul. No dia 19, o centro do anticiclone situa-se sobre o Atlân-

tico Sul e a frente fria localiza-se no litoral do Nordeste. Baixas temperaturas ainda foram registradas em Rondônia, São Paulo, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Nota-se também um incremento da convecção sobre a Amazônia ou, mais especificamente, no Nordeste do Peru, e nos estados do Amazonas e Pará, nos dias 18 e 19 de abril.

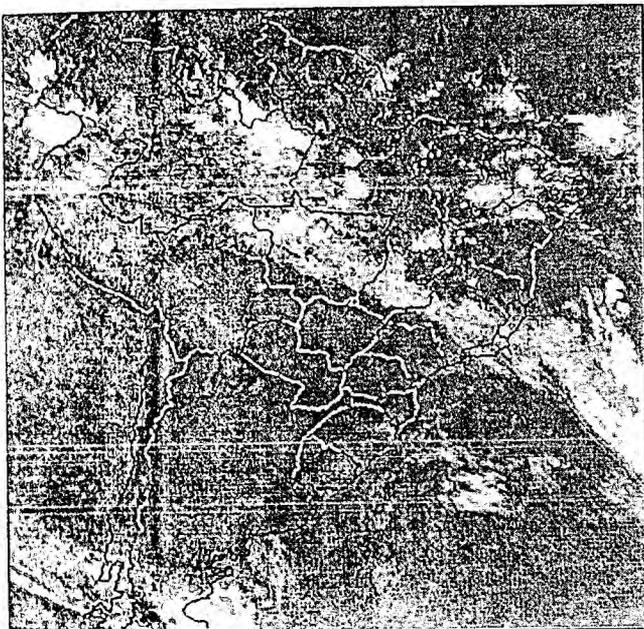
As análises realizadas no CPTEC indicam ocorrência de chuvas fracas sobre o Rio de Janeiro, Minas Gerais e Tocantins entre os dias 17 e 18 de abril, e sobre o Norte de Minas e Goiás entre os dias 18 e 19 de abril, e no Sul da Bahia entre os dias 19 e 20 de abril. Essas precipitações foram consistentes com a presença de um sistema frontal analisado nas imagens de satélite (Fig. 4), e no campo de pressão à superfície (Fig. 2). Na região Sul e parte do Sudeste do Brasil, o tempo permaneceu sem nuvens.



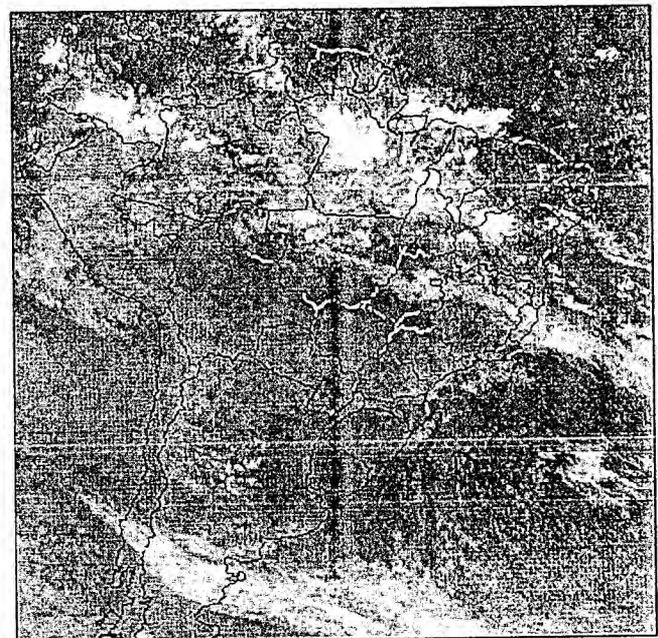
a) 16/04/96, 12 UTC



b) 17/04/96, 12 UTC



c) 18/04/96, 12 UTC



d) 19/04/96, 12 UTC

Figura 4 - Imagens do satélite GOES-8, no canal infravermelho, para as 12:00 UTC nos dias 16 (a), 17 (b), 18 (c) e 19 (d) de abril

2). Na região Sul e parte do Sudeste do Brasil, o céu permaneceu sem nuvens.

O deslocamento de uma crista/cavado nos níveis altos (250 hPa), pelo Sul/Sudeste da América do Sul pode ser observado na Fig. 5. No dia 18, essa

configuração está bem amplificada, e o escoamento de latitudes médias atinge latitudes tropicais. A posição da crista/cavado é favorável, nesse dia, para a entrada de ar frio sobre a América do Sul, desde os baixos até os altos níveis.

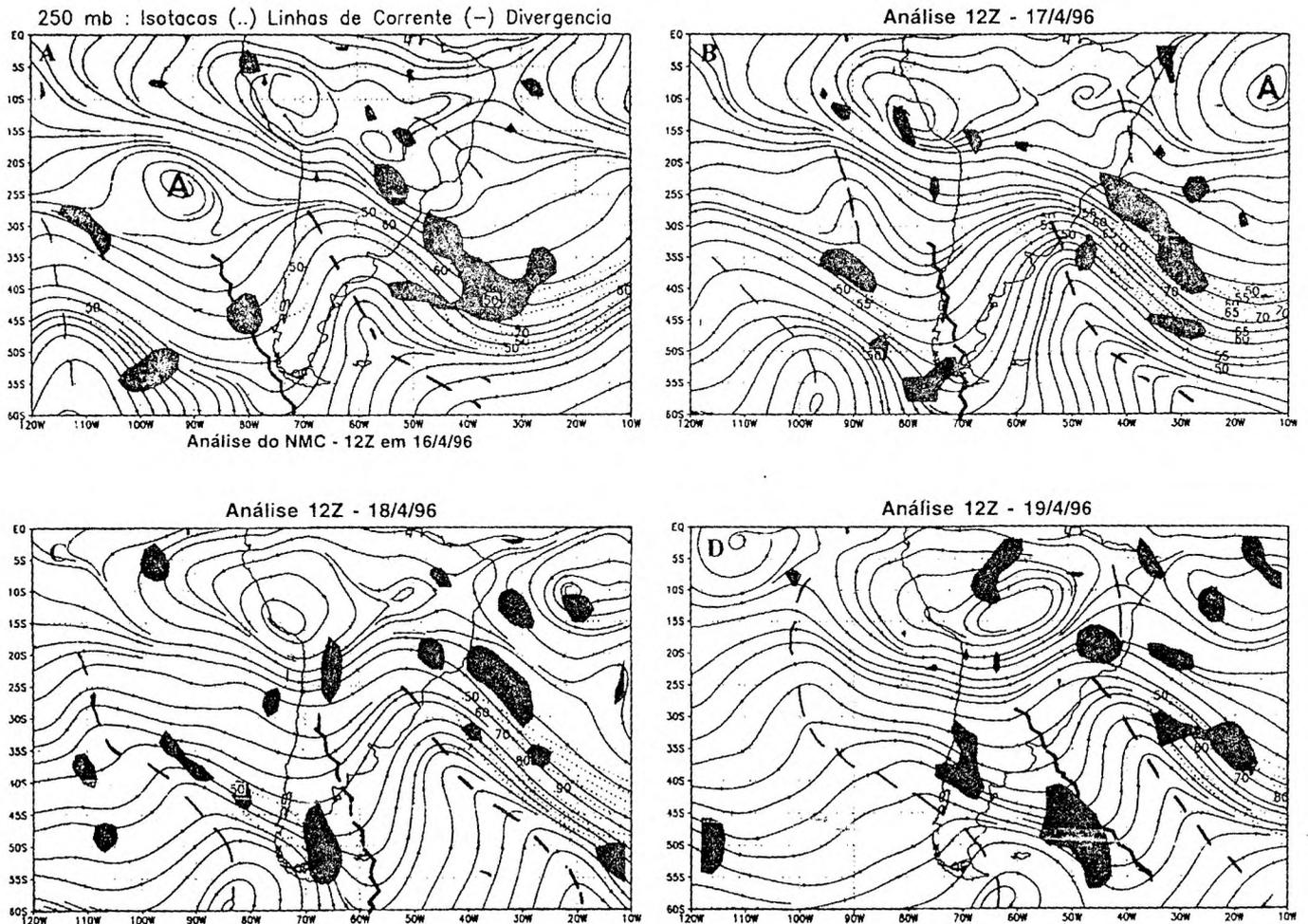


Figura 5 - Campo de escoamento ($m s^{-1}$) em 250 hPa obtido das análises do CPTEC para as 12:00 UTC nos dias 16 (a), 17 (b), 18 (c) e 19 (d) de abril de 1996. As áreas sombreadas indicam divergência acima de $2 \times 10^{-5} s^{-1}$.

4. RESULTADOS DO MODELO

Os resultados da previsão de 24 horas para o dia 16 de abril, realizada com o modelo do CPTEC, mostravam uma queda acentuada da temperatura sobre o Rio Grande do Sul e Santa Catarina, e para as 48 horas seguintes, previam a ocorrência de baixas temperaturas sobre os Estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Estado do Paraná, principalmente nas regiões serranas. Nos resultados para 72 horas, o modelo previa um ligeiro aquecimento sobre toda a Região Sul, devido ao enfraquecimento da massa de ar frio sobre o continente, com o centro do anticiclone no Oceano Atlântico. É importante ressaltar que os dados observados (Fig. 1) comprovam a evolução temporal da temperatura prevista pelo modelo. Os resultados da previsão para o dia 18 indicavam altas pres-

sões sobre os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina e declínio acentuado de temperatura, com possibilidade de ocorrência de geada nessas regiões. Os valores observados de temperatura mínima, conforme a Figura 1, mostram um novo resfriamento no dia 20, nas localidades de Bom Jesus-RS, São Joaquim-SC e em Irati-PR.

Comparando os resultados do modelo para a previsão do dia 16, (rodado com condições iniciais do dia 14 de abril), com as observações (Fig. 6a, b), nota-se a similaridade na posição das frentes associadas ao sistema de baixa pressão situado sobre o Atlântico. O anticiclone frio penetra na América do Sul, com centro de 1026 hPa, localizado entre $35^{\circ} S$ e $40^{\circ} S$ enquanto que o modelo mostra o centro da massa de ar frio com forma alongada norte-sul com uma intensidade de 103°

Estudo de caso da primeira massa de ar frio em 1996 no Sul do Brasil. Observações e resultados do Modelo de Circulação Geral da Atmosfera do CPTEC/COLA

hPa localizado também entre 35° S e 40° S. Na previsão para o dia 18, o modelo mostra a posição do ciclone e a frente fria a oeste do observado (Fig. 6c,d).

O anticiclone observado localiza-se em 32° S/57° W e o previsto pelo modelo situa-se numa posição a noroeste do observado, com uma intensidade maior.

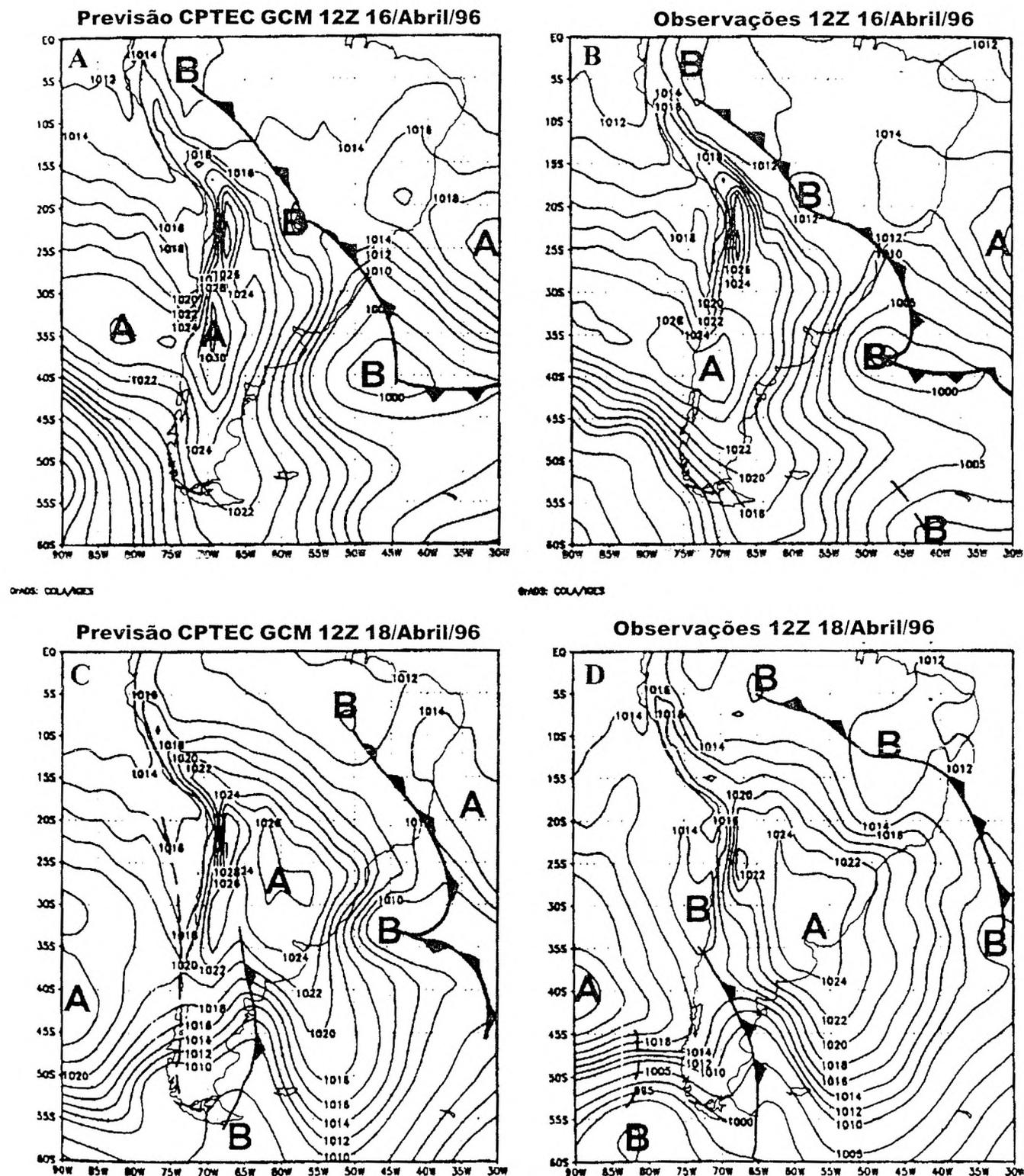


Figura 6 - Análises de superfície obtidas da previsão do modelo do CPTEC para as 1200 UTC (a, c) e das observações (b, d) para os dias 16 de abril de 1996 (a, b) e 18 de abril de 1996 (c, d). O intervalo de análise é de 2 hPa.

Comparado com o campo de geopotencial observado no dia 16, no nível de 500 hPa, (Fig. 7b), a crista produzida pelo modelo (Fig. 7a) está localizada a oeste da costa do Chile, enquanto, nas observações, o eixo da crista está inclinado com uma orientação NW/SE. Em 300 hPa (Fig. 8a e Fig.8b), as configurações

são semelhantes, porém os eixos dos cavados e cristas estão situados a oeste daqueles em 500hPa. No dia 18, o dia mais frio, nota-se que a crista e o cavado se deslocaram para leste e estão mais amplificados no campo observado comparado com o resultado do modelo.

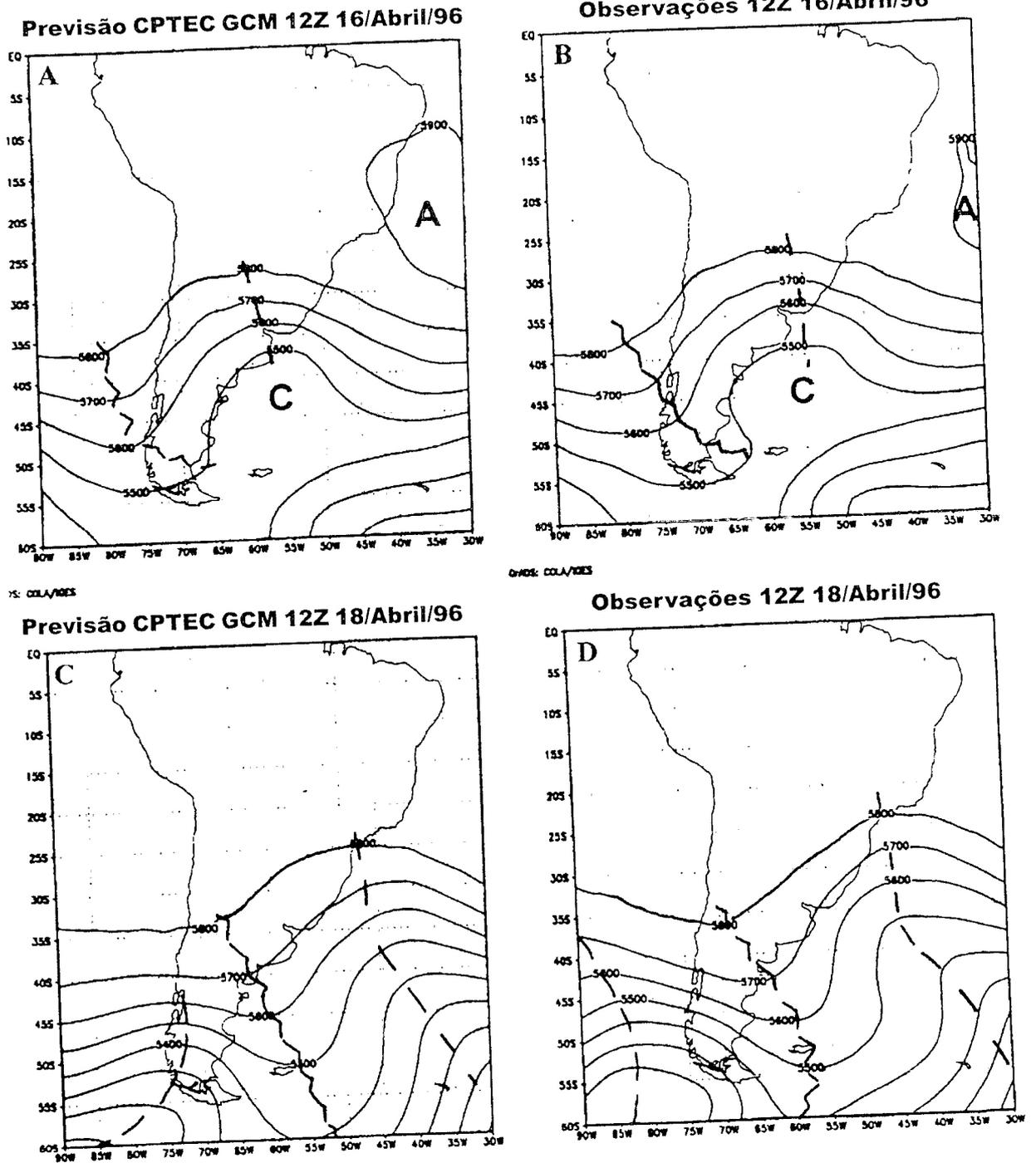


Figura 7 - Análises de 500 hPa obtidas da previsão do modelo do CPTEC para as 12:00 UTC (a, c) e das observações (b, d) para os dias 16 de abril de 1996 (a, b) e 18 de abril de 1996 (c, d). O intervalo de análise é de 2-hPa.

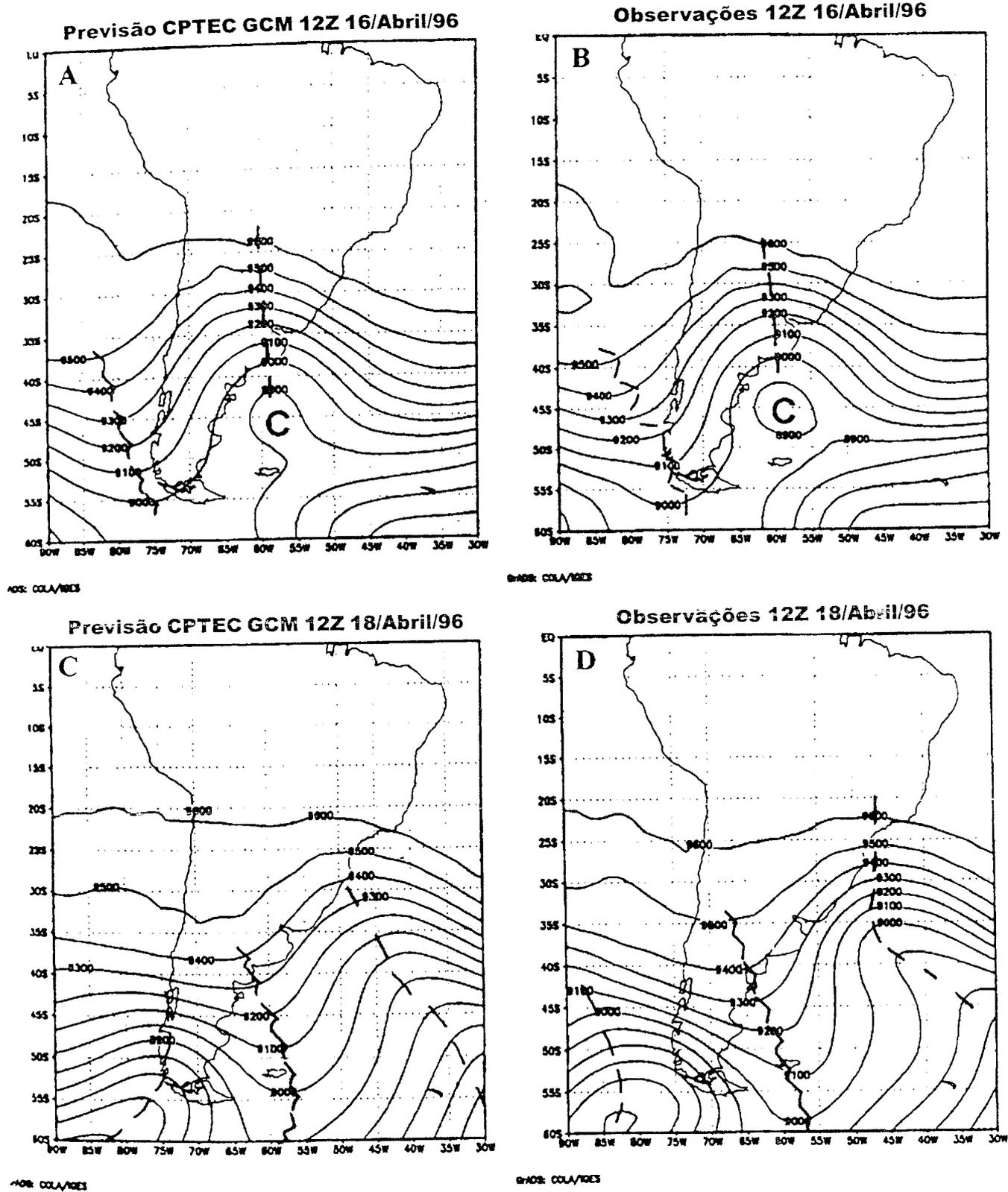


Figura 8 - Análises de 300 hPa obtidas da previsão do modelo do CPTEC para as 12:00 UTC (a, c) e das observações (b, d) para os dias 16 de abril de 1996 (a, b) e 18 de abril de 1996 (c, d). O intervalo de análise é de 2 hPa.

O campo de temperatura mínima prevista, fornecida pelo modelo (Fig. 9), mostra valores de 4 °C sobre o Norte do Rio Grande do Sul, de 2 °C entre o Norte de Santa Catarina e Paraná, e valores de 16 °C no Vale do Paraíba, em São Paulo. Comparando essa

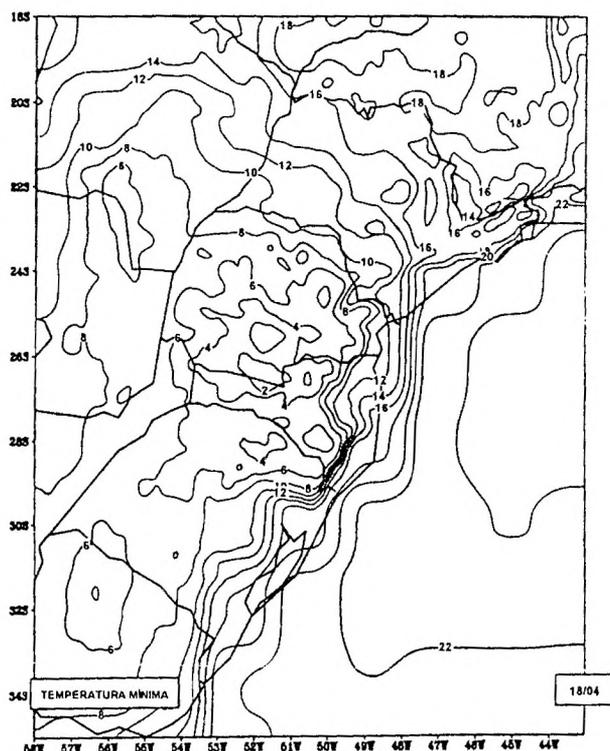


Figura 9 - Temperaturas mínimas previstas pelo modelo do CPTEC para o dia 18 de abril 1996. O intervalo de análise é de 2 °C.

previsão com os valores observados da Fig. 1, nota-se que, embora a previsão de temperatura mínima seja de valores baixos, os valores observados foram bem mais baixos.

Com relação à previsibilidade do modelo global do CPTEC/COLA, os resultados acima foram discutidos para os campos de temperatura, pressão e circulação em superfície, e circulação em altos níveis, para as 12:00 UT dos dias 16-19 de abril de 1996. As condições iniciais utilizadas foram as das 12:00 UT do dia 14 de abril de 1996. A Tabela 2 mostra o skill do modelo para pressão e temperatura virtual próxima à superfície, e para os níveis de 250 e 500 hPa. O skill foi calculado seguindo Bonatti (1996). Na tabela, nota-se que o skill decresce quando a previsão é feita com 6 dias de antecedência (Skill menor de 50%). Com até 4 dias de antecedência, o skill é maior que 60%. Nos principais centros operacionais de meteorologia do mundo (incluindo o CPTEC), é usado um limite de skill menor que 60% para indicar que a previsão não é confiável. No presente estudo, o skill para pressão e temperatura na superfície foi de 75% e 84%, respectivamente, com 4 dias de antecedência. O skill das previsões nos altos níveis foi de 87%. Isto indica que as previsões do modelo rodado com condições iniciais de 14 de abril de 1996 são confiáveis, e que o modelo do CPTEC/COLA captura o fenômeno, como indicado nas seções anteriores.

Tabela 2. Skill (%) do modelo global CPTEC/COLA rodado usando condições iniciais das análises espectrais do NCEP, para superfície, 500 e 250 hPa. O skill é avaliado para a América do Sul e a previsão é para as 12:00 UT do dia 18 de abril de 1996.

Data inicial 12:00 UT	Dias de previsão	1000 hPa Pressão ao nível do mar	1000 hPa Temp. virtual	500 hPa- altura geopot.	250 hPa- altura geopot.
12/04/96	6	41,11	44,24	46,78	48,72
13/04/96	5	75,19	63,20	79,81	73,89
14/04/96	4	75,61	84,84	90,04	87,56
15/04/96	3	83,60	86,89	91,29	93,43
16/04/96	2	88,85	87,00	96,72	97,40
17/04/96	1	94,07	90,85	97,13	97,94

5. ÍNDICES PARA UM MONITORAMENTO NO SUL DA AMÉRICA DO SUL.

O campo da altura geopotencial em 300 hPa (linhas contínuas) e o campo de Pressão a nível do mar (PNM) (regiões escuras, representando a Alta Pressão-AP e regiões mais claras representando as Baixas Pressões-BP) são mostrados na Fig. 10a, para o dia mais frio no sudeste do Brasil. Em 300 hPa, a presença destes sistemas crista/cavado, com deslocamento para leste, é típico de todas as entradas de massa de ar frio no continente. A localização destes sistemas indica que o vento geostrófico de Sudoeste advectou ar frio proveniente das latitudes altas para o

Sudeste do Brasil. Esta hipótese pode ser comprovada na Fig. 10e que mostra a série temporal do índice TSB definido como a temperatura média na área denominada SB situada no sudeste do Brasil, e do índice Z85H-Z85L, sendo Z85H (Z85L) a média da altura geopotencial de 850 hPa na região de Alta Pressão-AP (Baixa Pressão-BP). Assim definido, Z85H-Z85L representa o gradiente de pressão, que é um índice do vento geostrófico. Pode-se ver que os maiores declínios da TSB ocorrem simultaneamente com os valores de Z85H-Z85L, supondo-se que o vento geostrófico de Sudoeste que advecta ar frio, seria ao menos parcialmente responsável pela queda das temperaturas.

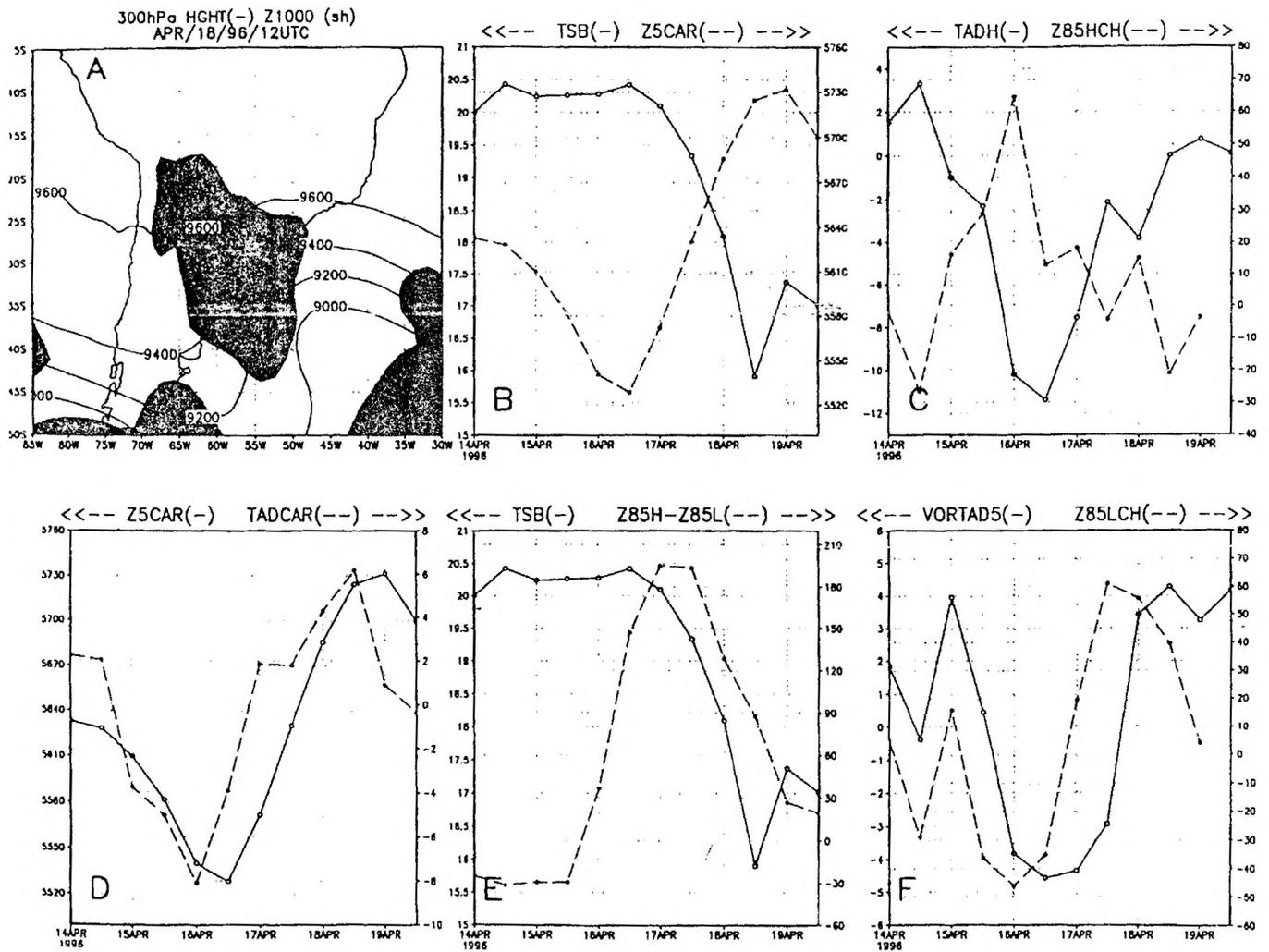


Figura 10 - Algumas características dinâmicas usadas nas análises: (a) altura geopotencial em 300 hPa (m). As áreas sombreadas indicam a alta em 1000 hPa; (b) Índices de temperatura no Sul do Brasil (TSB, °C) e de altura geopotencial em 500 hPa sobre o centro da Argentina durante o período de 14-19 de abril de 1996; (c) Índices de advecção de temperatura em 700 hPa (TADH, em $10^{-5} \text{ }^\circ\text{K s}^{-1}$) e de variação em 6 horas da altura geopotencial em 850 hPa (Z85HCH, m); (d) Índices de advecção de temperatura em 700 hPa (TADCAR, em $10^{-5} \text{ }^\circ\text{K s}^{-1}$) e altura geopotencial em 500 hPa (Z5CAR, m); (e) Índice de temperatura no sul do Brasil (TSB, °C) e o índice Z85H-Z85L (m), sendo Z85H (Z85L) a média da altura geopotencial de 850 hPa na região de alta pressão (baixa pressão); (f) Índices de uma média de advecção de vorticidade em 500 hPa em uma região próxima à baixa pressão (VORTAD5, em 10^{-10} s^{-2}) e da variação em 6 horas da altura geopotencial na mesma região (Z85LCH, m).

No caso da Alta Pressão-AP, definiram-se os índices TADH como a advecção de temperatura no campo de 700 hPa e Z85HCH como a variação em 6 horas da altura geopotencial (AG) no campo de 850 hPa. O último índice é um indicador, se for positivo (negativo), de que a AG está aumentando (diminuindo). A Fig. 10c mostra as séries temporais dos índices TADH e Z85HCH, os quais apresentam uma defasagem de 180 graus, isto é, quando um deles está crescendo, o outro decresce. Isto significa que, quando o índice Z85HCH tem valores positivos, como aconteceu no dia 16 de abril, a Alta pressão-AP estava intensificando e a advecção térmica em 700 hPa era negativa. Este comportamento sugere que movimentos descendentes, associados com advecção negativa na baixa troposfera, poderia haver produzido divergência nos níveis mais baixos (perto de 850 mb). Isto resultaria em um incremento de pressão nos níveis próximos da superfície.

A formação da baixa pressão (BP) (sombreado claro na Fig. 10a) pode estar associada a movimentos ascendentes relacionados à presença de valores significativos de advecção de vortacidade na média troposfera. A baixa pressão é observada na parte dianteira do cavado na média e alta troposfera. A confirmação desta hipótese é obtida definindo-se o índice VORTAD5 que é uma média de advecção de vortacidade no campo de 500 hPa em uma região próxima à BP. Definiu-se, também, Z85LCH que é a variação em 6 horas da altura geopotencial no campo de 850 hPa na mesma região. Valores positivos (negativos) deste índice indicam que a BP está enfraquecendo (intensificando). A Fig. 10f mostra que os índices VORTAD5 e Z85LCH têm um comportamento semelhante. Por exemplo, quando VORTAD5 tem valores negativos associados à advecção de vortacidade ciclônica (AVC), o índice Z85LCH também tende a ter valores negativos. Isso implica a diminuição de pressão próxima à superfície, relacionada com a AVC, convergência e aumento de vortacidade ciclônica nos baixos níveis.

A Fig. 10b mostra a série temporal de TSB e de outro índice, Z5CAR, definido como a média da altura geopotencial em 500 hPa em uma região deno-

minada CAR (Centro da Argentina). Pode-se ver que Z5CAR alcança um valor mínimo aproximadamente 48 horas antes de que a TSB o faça, sugerindo que isto seria um indicador de previsão de temperaturas baixas no SB, (Marengo et al., 1997a). A advecção de temperatura em 700 hPa (TADCAR) e a altura geopotencial em 500 hPa (Z5CAR), na região CAR, têm um comportamento semelhante (Fig. 10d), mostrando a passagem do cavado e a advecção negativa de temperatura.

6. CONCLUSÕES

As características observadas, neste caso, da primeira massa de ar frio de 1996 sobre o Brasil foram semelhantes a outros casos estudados em que ocorreram geadas intensas, ou seja, houve a atuação do sistema crista/cavado em altos níveis, houve a passagem de um sistema frontal pelo sul/sudeste do Brasil, com o acompanhamento de alta pressão com altos valores, e escoamento de sul/sudeste dirigido para o continente. Apesar dessas características, a massa de ar frio não foi tão intensa quanto nos casos severos, e as quedas de temperatura e de pressão de vapor foram bem menores que em alguns casos intensos observados em 1994.

De acordo com as pesquisas anteriores mencionadas e com o presente estudo, sobre massas de ar frio que atingem o Sul do Brasil, é sugerido que a região central da Argentina (CAR) é muito importante no monitoramento e previsão desses eventos no Sul do Brasil. Baixas temperaturas no Sul do Brasil poderiam ser associadas à advecção de ar frio de latitudes mais altas e à perda de energia pela radiação de ondas longas que é característica de regiões de alta pressão com céu claro. Os padrões de circulação nos níveis médio (500 hPa) e superiores (250 e 300 hPa) mostram sistema de crista/cavado, que é característico neste eventos sobre o Oceano Pacífico, perto do litoral do Chile, alguns dias antes do dia mais frio no Sul do Brasil. Este é um precursor do evento. Índices relacionados com a altura geopotencial em 850 hPa, advecção de temperatura em 700 hPa e advecção de vortacidade em 500 hPa, poderiam também ser usados como precursores nestes eventos frios. Aproximadamente 4

de temperatura em 700 hPa e advecção de vorticidade em 500 hPa, poderiam também ser usados como precursores nestes eventos frios. Aproximadamente 48 horas depois que estes índices alcançam valores mínimos, o evento frio é registrado no Sul do Brasil. Isto indicaria que os mencionados índices poderiam ser usados como indicadores da intensidade do fenômeno.

Quanto ao desempenho do modelo do CPTEC, as previsões feitas com até 5 dias de antecedência mostraram um skill maior que 60% para a América do Sul, e os campos em baixos e altos níveis obtidos pelo modelo foram consistentes com os observados, apresentando pequenas diferenças relacionadas com a posição e intensidade dos sistemas. O modelo superestimou as temperaturas mínimas. Os valores observados foram menores do que os previstos, contudo o modelo indicava uma diminuição das temperaturas nas regiões afetadas.

Este estudo mostra, portanto, a possibilidade de monitoramento da entrada de massas de ar frio que causam geadas sobre o Brasil, através de cálculos de índices associados a aspectos dinâmicos da circulação, e através da previsão numérica com o MCGA a qual fornece, com alguma antecedência, as configurações típicas dos casos de geadas, e as temperaturas mínimas previstas.

7- AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido durante o período no qual Jose Marengo e Angel Cornejo foram pesquisadores visitantes do Programa RHAE do CNPq, no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), INPE.

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALGARVE, V. R., CAVALCANTI, I.F.A. Características da Circulação atmosférica associadas à ocorrência de geadas no Sul do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 7, 1994, Belo Horizonte. *Anais...*, 1994, p.545-7.

BONATTI, J. P., Verificação estatística do modelo global do CPTEC. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 9, 1996, Campos do Jordão. *Anais...*, 1996, p.1453-6

CORNEJO, A. G., MARENGO, J., CAVALCANTI, I. F., DA SILVA, A. Cold Outbreaks in Tropical and Extra tropical South America during 1985-1993. *Int. J. Climatol.*, 1997, (in press).

DAPOZZO, J., SILVA DIAS, M. A. F. Um estudo de caso da penetração do ar polar em latitudes baixas: julho de 1988. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 7, 1994, Belo Horizonte. *Anais...*, p.601-6.

FORTUNE, M., KOUSKY, V. E. Two severe freezes in Brazil: precursors and synoptic evolution. *Mon. Weath. Rev.*, v.111, p.181-6, 1983.

GIRARDI, C. El Pozo de los Andes. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON SOUTHERN HEMISPHERE METEOROLOGY, 1, 1983, São José dos Campos, *Proceedings...*, p.226-9.

HADDOCK, D., MOTTA, R., McINTURFF, M., HALPERT, M., SMELSER, R. Freeze hits Brazilian Coffee area on July 20 and 21, 1981. *Weekly Weath. Crop Bull.*, v.68, p.25-7, 1981.

MARSHALL, C. F. The World Coffee Trade. Cambridge: Woodhead-Faulkner, 1983. 254p.

MARENGO, J., CORNEJO, A., SATYAMURTY, P., NOBRE, C., SEA, W. Cold surges in tropical and extratropical South America: Three events of winter 1994. *Mon. Weath. Rev.*, v.125, p.2759-86, 1997.

MARENGO, J., NOBRE, C., CULF, A. Climatic impacts of the "Friagens" in forested and deforested regions in Amazon Basin **J. App. Met.**, v.36, p.1553-66, 1997.

PARMENTER, F. A Southern Hemisphere cold front passage at the equator. **Bull. Am. Meteorol. Soc.**, v.57, p.1435-40, 1976.

SATYAMURTY, P., ETCHICHURRI, P., STUDZINSKY, C., CALBETE, N., LOPEZ, R., GLAMMELSBACHER, I., GLAMMELSBACHER, E.A. A primeira friagem de 1990: uma descrição sinótica. **Climanálise**, v.5, n.5, p.43-51, 1990.

SELUCHI, M., NERY, J. Condiciones meteorológicas asociadas a la ocurrencia de heladas en la region de Maringá. **Rev. Bras. Meteorol.**, v.7, p.523-34, 1992.