



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE – 7028 – TDI / 660

**SIMULAÇÃO DE GEADAS NO SUL DO BRASIL COM UM
MODELO DE ÁREA LIMITADA**

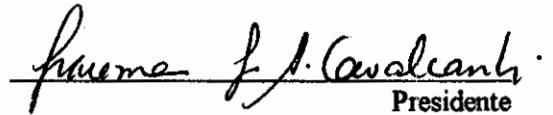
Marilene de Lima

Dissertação de Mestrado em Meteorologia, orientada pela Dra. Mary Toshie Kayano e pelo Dr. Valdir Innocentini, aprovada em novembro de 1997.

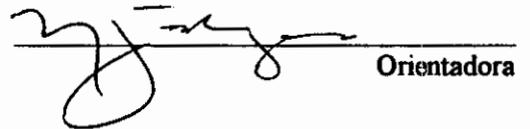
INPE
São José dos Campos
1997

Aprovada pela Banca Examinadora em
cumprimento a requisito exigido para a
obtenção do Título de Mestre em
Meteorologia

Dra. Iracema Fonseca de Albuquerque Cavalcanti


Presidente

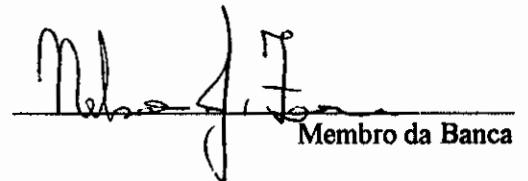
Dra. Mary Toshie Kayano


Orientadora

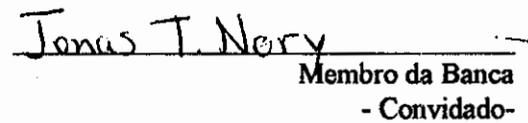
Dr. Valdir Innocentini


Orientador

Dr. Nelson Jesus Ferreira


Membro da Banca

Dr. Jonas Teixeira Nery


Membro da Banca
- Convidado -

Candidata: Marilene de Lima

São José dos Campos, 28 de novembro de 1997

Ao Mário Francisco Leal Quadro,
meteorologista, mestre na magia
de tornar o invisível em
“visível.gs”.

RESUMO

Neste trabalho foi testado o potencial do modelo de área limitada desenvolvido por pesquisadores da Divisão de Previsão Numérica do Japan Meteorological Agency para simular casos de geadas para o Sul do Brasil. Foram feitas simulações usando este modelo com 24 horas e 48 horas de antecedência ao primeiro dia de geada para 14 casos de geadas intensas que ocorreram na década de 80. O desempenho do modelo foi avaliado considerando quatro variáveis (temperatura próxima à superfície, pressão ao nível do mar, ventos e geopotencial em 200 hPa) e comparando os campos simulados com os campos das análises do próprio modelo, bem como os campos correspondentes nas análises do ECMWF. Comparações entre os campos simulados e as análises do próprio modelo do JMA mostram que, em geral, o modelo reproduz bem tanto o padrão como os valores das quatro variáveis, principalmente no que concerne às simulações com 24 horas de antecedência. Para simulações com 48 horas de antecedência, embora os padrões simulados e os das correspondentes análises sejam similares, os valores das variáveis em baixos níveis em alguns casos não foram bem simulados.

FROST SIMULATION IN THE SOUTHERN BRAZIL WHIT A
LIMITED AREA MODEL

ABSTRACT

In this work, the limited area model developed by researchers of the Numerical Prediction Division of the Japan Meteorological Agency was tested in simulating frosts in the Southern Brazil. Simulations have been done with 24 and 48 hours preceding the first day of frost, for 14 cases of severe frosts occurred at decade of 80. The model performance was evaluated considering four variables (temperature near the surface, sea level pressure, 200-hPa winds and geopotential height) and comparing simulated fields with those from the analysis of the model, as well as with the corresponding analyzed fields of the ECMWF. Comparisons between simulated and analyzed fields show that the model, in general reproduces the variable patterns and their values mainly for simulations with 24 hours of antecedence. For simulations with 48 hours of antecedence although the simulated and analyzed patterns are similar, the values of low level variables, in some cases have not been well reproduced.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE TABELAS.....	xxi
LISTA DE SIGLAS.....	xxiii
<u>CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO.....</u>	01
<u>CAPÍTULO 2 - DADOS E METODOLOGIA.....</u>	09
2.1 - Modelo.....	11
2.2 - Dados de Entrada do Modelo.....	12
2.3 - Simulações.....	12
2.4 - Análise das Saídas por EOF.....	13
<u>CAPÍTULO 3 - RESULTADOS.....</u>	15
3.1 - Comparações entre Simulações e Análises do JMA.....	15
3.1.1 - Simulações com 24 horas de Antecedência...	15
3.1.2 - Simulações com 48 horas de Antecedência...	20
3.2 - Comparações entre Simulações com 24 e 48 horas de Antecedência Versus Resultados de Algarve (1994).....	24
3.2.1 - Grupo 1.....	26
3.2.2 - Grupo 2.....	31
3.2.3 - Grupo 4.....	35
3.3 - Análise dos Grupos para o Dia Anterior à Ocorrência da Geada.....	39

3.3.1 - Grupo 1.....	40
3.3.2 - Grupo 2.....	44
3.3.3 - Grupo 4.....	48
3.4 - EOF da Variável Temperatura no Nível σ_1 ..	52
<u>CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS</u> <u>FUTUROS.....</u>	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
APÊNDICE A: <u>MODELO DE ÁREA LIMITADA (JMA).....</u>	67
A.1 - Características Gerais.....	67
A.2 - Projeção.....	67
A.3 - Distribuição Vertical das Variáveis.....	68
A.4 - Distribuição Horizontal das Variáveis.....	70
A.5 - Equações do Modelo.....	71
A.5.1 - Equações de Movimento.....	71
A.5.2 - Equação da Termodinâmica.....	71
A.5.3 - Equação para o Vapor de Água.....	72
A.5.4 - Equações da Continuidade de Massa.....	72
A.5.5 - Equação Hidrostática.....	72
A.6 - Processos Físicos.....	72
APÊNDICE B: <u>SIMULAÇÕES COM 24 HORAS DE</u> <u>ANTECEDÊNCIA E ANÁLISES DO MODELO JMA.</u>	75
APÊNDICE C: <u>FUNÇÕES ORTOGONAIS EMPÍRICAS (EOF's) ..</u>	87

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Mapa da localização das estações utilizadas por Algarve (1994). FONTE: Algarve (1994), p.39.....	9
2.2 - Área da simulação do modelo. A área à direita da linha pontilhada foi usada na técnica das EOF's.....	14
3.1 - Campos previstos da temperatura no nível σ 1 com 24 horas de antecedência para: (a) 30 de julho de 1980; (c) 23 de junho de 1987; (e) 01 de junho de 1988. Análisis da temperatura no nível σ 1 para: (b) 30 de julho de 1980; (d) 23 de junho de 1987 e (f) 01 de junho de 1988.....	16
3.2 - Campos previstos de PNM com 24 horas de antecedência para: (a) 15 de julho de 1980; (c) 23 de maio de 1987; (e) 24 de julho de 1988; (g) 3 de julho de 1989. Análises de PNM para: (b) 15 de julho de 1980; (d) 23 de maio de 1987; (f) 24 de julho de 1988; (h) 3 de julho de 1989.....	17
3.3 - Correlação entre as previsões de 24 horas e as correspondentes análises. Os símbolos significam: PNM, pressão ao nível do mar; t(sig1), temperatura no nível σ 1; u e v, componentes zonal e meridional do vento em 200 hPa; gh(200), altura geopotencial em 200 hPa.....	20

3.4 -	Correlação entre as previsões de 48 horas e as correspondentes análises. Os símbolos significam: PNM, pressão ao nível do mar; $t(\sigma_1)$, temperatura no nível σ_1 ; u e v, componentes zonal e meridional do vento em 200 hPa; gh(200), altura geopotencial em 200 hPa.....	22
3.5 -	Campos previstos de PNM com 48 horas de antecedência para:(a) 17 de junho de 1981; (c) 27 de junho de 1984. Análises de PNM para: (b) 17 de junho de 1980; (d) 27 de junho de 1984.....	23
3.6 -	Campos médios de temperatura próxima à superfície (°C) para o grupo 1: (a) análise do JMA; (b) análise do ECMWF; (c) previsão de 24 horas do JMA; (d) previsão de 48 horas do JMA.....	27
3.7 -	Campos médios para o grupo 1 de: (a) PNM (hPa) da análise do JMA; (b) geopotencial em 1000 hPa (mgs) das análises do ECMWF; (c) previsão de PNM do JMA para 24 horas; (d) previsão de PNM do JMA para 48 horas.....	28
3.8 -	Campos médios de geopotencial em 200 hPa para o grupo 1: (a) análise do JMA; (b) análise do ECMWF; (c) previsão de 24 horas do JMA; (d) previsão de 48 horas do JMA.....	30

3.9 - Campos médios do vento em 200 hPa para o grupo 1: (a) análise do JMA; (b) análise do ECMWF; (c) previsão de 24 horas do JMA; (d) previsão de 48 horas do JMA.....	31
3.10 - Campos médios de temperatura próxima à superfície (°C) para o grupo 2: (a) análise do JMA; (b) análise do ECMWF; (c) previsão de 24 horas do JMA; (d) previsão de 48 horas do JMA.....	32
3.11 - Campos médios para o grupo 2 de: (a) PNM (hPa) da análise do JMA; (b) geopotencial em 1000 hPa (mgs) das análises do ECMWF; (c) previsão de PNM do JMA para 24 horas; (d) previsão de PNM do JMA para 48 horas.....	33
3.12 - Campos médios de geopotencial em 200 hPa para o grupo 2: (a) análise do JMA; (b) análise do ECMWF; (c) previsão de 24 horas do JMA; (d) previsão de 48 horas do JMA.....	34
3.13 - Campos médios do vento (m/s) em 200 hPa para o grupo 2: (a) análise do JMA; (b) análise do ECMWF; (c) previsão de 24 horas do JMA; (d) previsão de 48 horas do JMA.....	35
3.14 - Campos médios da temperatura próxima à superfície (°C) para o grupo 4: (a) análise do JMA; (b) análise do ECMWF; (c) previsão de 24 horas do JMA; (d) previsão de 48 horas do JMA.....	36

3.15 - Campos médios para o grupo 4 de: (a) PNM (hPa) da análise do JMA; (b) geopotencial em 1000 hPa (mgp) das análises do ECMWF; (c) previsão de PNM do JMA para 24 horas; (d) previsão de PNM do JMA para 48 horas.....	37
3.16 - Campos médios de geopotencial em 200 hPa para o grupo 4: (a) análise do JMA; (b) análise do ECMWF; (c) previsão de 24 horas do JMA; (d) previsão de 48 horas do JMA.....	38
3.17 - Campos médios do vento em 200 hPa para o grupo 4: (a) análise do JMA; (b) análise do ECMWF; (c) previsão de 24 horas do JMA; (d) previsão de 48 horas do JMA.....	39
3.18 - Campos médios de temperatura próxima à superfície (°C) para o dia anterior às datas do grupo 1: (a) análise do ECMWF; (b) análise do JMA; (c) previsão de 24 horas do JMA.....	41
3.19 - (a) Campo médio do geopotencial em 1000 hPa (mgp) das análises do ECMWF para o dia anterior às datas do grupo 1; campos médios de PNM (hpa) para o grupo 1: (b) análise do JMA; (c) previsão de 24 horas do JMA.....	42
3.20 - Campos médios de geopotencial em 200 hPa para o dia anterior às datas do grupo 1: (a) análise do ECMWF; (b) análise do JMA; (c) previsão de 24 horas do JMA.....	43

3.21 - Campos médios do vento em 200 hPa para o dia anterior às datas do grupo 1: (a) análise do ECMWF; (b) análise do JMA; (c) previsão de 24 horas do JMA.....	44
3.22 - Campos médios de temperatura próxima à superfície (°C) para o dia anterior às datas do grupo 2: (a) análise do JMA; (b) análise do ECMWF; (c) previsão de 24 horas do JMA....	45
3.23 - (a) Campo médio do geopotencial em 1000 hPa (mcp) das análises do ECMWF para o dia anterior às datas do grupo 2; campos médios de PNM (hpa) para o grupo 2: (b) análise do JMA; (c) previsão de 24 horas do JMA.....	46
3.24 - Campos médios de geopotencial em 200 hPa para o dia anterior às datas do grupo 2: (a) análise do ECMWF; (b) análise do JMA; (c) previsão de 24 horas do JMA.....	47
3.25 - Campos médios da variável do vento em 200 hPa para o dia anterior às datas do grupo 2: (a) análise do ECMWF; (b) análise do JMA; (c) previsão de 24 horas do JMA.....	48
3.26 - Campos médios de temperatura próxima à superfície (°C) para o dia anterior às datas do grupo 4: (a) análise do ECMWF; (b) análise do JMA; (c) previsão de 24 horas do JMA....	49
3.27 - (a) Campo médio do geopotencial em 1000 hPa (mcp) das análises do ECMWF para o dia anterior às datas do grupo 4; campos médios de PNM (hpa) para o grupo 4: (b) análise do JMA; (c) previsão de 24 horas do JMA.....	50

3.28 - Campos médios de geopotencial em 200 hPa para o dia anterior às datas do grupo 4: (a) análise do ECMWF; (b) análise do JMA; (c) previsão de 24 horas do JMA.....	51
3.29 - Campos médios da variável do vento em 200 hPa para o dia anterior às datas do grupo 4: (a) análise do ECMWF; (b) análise do JMA; (c) previsão de 24 horas do JMA.....	52
3.30 - Padrão espacial correspondente ao modo 1 da variável temperatura próxima à superfície....	54
3.31 - Gráfico da componente principal correspondente ao modo 1 da variável temperatura próxima à superfície, os intervalos do eixo x correspondem aos casos simulados.....	55
A.1 Área de integração do modelo utilizada neste trabalho.....	68
A.2 Distribuição vertical dos níveis σ . Os níveis σ e as espessuras das camadas estão em hPa, sendo pressão na superfície (p_0) de 1000hPa...	69
A.3 Grade horizontal Arakawa tipo B. Os componentes do vetor velocidade (u,v) estão deslocados em relação às outras variáveis (π , θ e q).....	70
B.1 Simulações do modelo JMA para a variável temperatura no nível σ_1 ($^{\circ}\text{C}$).....	75
B.2 Simulações do modelo JMA para a variável PNM (hPa).....	78

B.3	Simulações do modelo JMA para a variável geopotencial no nível de 200.....	81
B.4	Simulações do modelo JMA para a variável vento no nível de 200 hPa (m/s).....	84

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Casos de geadas totais usados para simulações	10
3.1 - Agrupamento dos 14 casos de geadas totais conforme Algarve (1994).....	25

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANL	Análise
DCM	Divisão de Ciências Meteorológicas
ECMWF	European Centre for Medium Range Weather Forecasts
EOF	Empirical Orthogonal Function
FCT	Forecast
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPMet	Instituto de Pesquisas Meteorológicas
JMA	Japan Meteorological Agency
MAL	Modelo de Área Limitada
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
PNM	Pressão ao Nível do Mar
PR	Paraná
RS	Rio Grande do Sul
SC	Santa Catarina
TMG	Tempo Médio de Greenwich

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

As regiões Sul e Sudeste do Brasil são afetadas por vários sistemas sinóticos e subsinóticos, assim como por alguns sistemas associados à circulação de grande escala e às circulações locais. Na escala sinótica, os sistemas frontais que se deslocam do Pacífico, passando pela Argentina, sul do Brasil e seguindo para o nordeste, estão entre as mais importantes perturbações atmosféricas responsáveis por precipitações e mudanças de temperatura em quase todo o País, mesmo nas regiões tropicais. A rotina diária da população pode ser transtornada por conseqüências inesperadas relacionadas à passagem de sistemas frontais intensos que podem ocasionar perdas irreparáveis de bens materiais e até de vidas humanas.

Nos meses de inverno, a passagem dos sistemas frontais seguidos de anticiclones extra-tropicais com ar frio e seco, podem provocar geadas no sul e sudeste do País. As geadas causam sérios impactos para a economia do País, não pela sua freqüência, mas sim pela sua intensidade. Este fenômeno, associado em geral à passagem de frentes frias, caracteriza-se pelo registro de temperaturas do ar abaixo de 0°C no local de sua ocorrência. Em conseqüência destas baixas temperaturas, a agricultura bem como a pecuária podem sofrer enormes prejuízos.

O Sul do País (Rio Grande do Sul-RS, Santa Catarina-SC e Paraná-PR) é a região onde ocorre o maior número de casos, embora tenham sido registradas geadas com prejuízos significativos na agricultura em outras áreas do País, como em Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, São Paulo (Tarifa et al., 1977; Fortune e Kousky, 1983). Tendo em vista que as geadas ocorrem em algumas regiões do País, cuja economia é bastante dependente da agricultura é altamente desejável dispor de previsões regionalizadas confiáveis e com alta resolução espacial. Isso é possível através de modelos numéricos de área limitada. O uso de modelos de área limitada em centros regionais de previsão de tempo, com capacidade computacional restrita, pode ter a vantagem de que alguns fenômenos regionais, ou com efeitos limitados a certas áreas, possam ser melhor detalhados.

Dependendo das condições atmosféricas, as geadas são classificadas em geadas por radiação ou por advecção de ar frio. A geada por advecção se forma devido à penetração de larga escala de ar frio durante vários dias ou noites, e tem como característica o registro de ventos moderados a fortes e uma atmosfera bem misturada. Em algumas ocasiões, posterior à passagem de sistemas frontais, a massa de ar frio associada ao sistema de alta pressão permanece em algumas regiões, nas quais pode ocorrer intensa perda radiativa pela superfície durante a noite devido à ausência de nebulosidade e baixa umidade. As geadas assim formadas são chamadas geadas por radiação, que por sua vez são classificadas em branca ou negra (Tubelis e Nascimento, 1980). Eles definem geada branca como o congelamento da umidade junto ao solo por dois processos:

havendo vapor de água suficiente no ar, inicialmente a temperatura da superfície e do ponto de orvalho do ar se igualam em um valor superior a 0°C formando o orvalho, depois a temperatura da superfície cai até 0°C e o orvalho se congela; no outro processo a igualdade entre as temperaturas da superfície e do ponto de orvalho do ar acontecem abaixo de 0°C, nessas condições o vapor de água do ar sublima-se sobre a superfície cobrindo-a com uma camada de cristal de gelo. A geada negra por radiação é aquela em que a quantidade de água disponível na atmosfera tem temperatura muito abaixo de zero. Segundo Ometto (1981), a geada negra que é pouco comum porém mais prejudicial para as culturas, acontece quando a temperatura do ar próximo à superfície é negativa. Este tipo de geada congela não só a água sobre os vegetais, como também a sua seiva, danificando o tecido vegetal.

Camargo (1984) definiu como geada central aquela que se forma pela passagem de um centro de alta pressão e como geada frontal a que ocorre quando a frente fria está penetrando sobre a região. A segunda acontece por advecção de ar frio e é do tipo mais freqüente no centro-sul do Brasil.

A maioria das pesquisas sobre geadas no Brasil têm se limitado ao estudo de casos (por exemplo, Fortune e Kousky, 1983; Tarifa et al., 1977), sendo pouco os estudos encontrados na literatura que enfocam os aspectos climatológicos.

Tarifa et al. (1977) estudaram a geada de 18 de julho de 1975 no Estado de São Paulo, que trouxe consideráveis perdas na cafeicultura local. A ocorrência de tal geada esteve associada à passagem de uma frente fria precedida por uma intensa onda de calor com um anticiclone polar continental bem definido. Eles notaram uma relação direta entre a posição do anticiclone e a variação espacial das temperaturas mínimas absolutas e sugeriram que é possível prever a intensidade do resfriamento a partir da intensidade do anticiclone. Para a ocorrência do fenômeno no Estado de São Paulo, eles observaram que as pressões reduzidas ao nível do mar devem permanecer entre 1028 e 1030 hPa no anticiclone. A geada ocorreu na periferia do anticiclone e não no seu centro como era de esperar por ser a área de maior calma e limpidez da atmosfera. Os autores sugeriram que para melhorar a previsão deste fenômeno seria necessário aprofundar os estudos das inter-relações entre a circulação de ar superior, circulação de superfície e o comportamento de elementos meteorológicos junto ao solo.

Hamilton e Tarifa (1978) descreveram os aspectos sinóticos relacionados à incursão de ar frio de origem polar durante a segunda semana de julho de 1972, que atingiu o Brasil com baixas temperaturas e a consequente formação de geadas, causando prejuízo às plantações de café nos Estados do Paraná e São Paulo. Para a análise do fenômeno foram utilizados dados de radiossondagem, de superfície e de satélite, cuja combinação forneceu detalhes da estrutura tridimensional da atmosfera, do ciclo de vida e das características sinóticas associadas. As geadas

ocorreram nas áreas sob céu claro dentro de uma circulação de oeste seca e convectivamente estável ao leste do centro de um anticiclone frio abaixo de 700 hPa. Nos baixos níveis este anticiclone seguiu uma trajetória continental desde o sul da Argentina até em torno de 30°S. No sul do Brasil ocorreu ciclogênese que se deslocou para sudeste. As áreas afetadas com geadas situaram-se a leste do anticiclone.

Fortune et al. (1982) analisaram dois casos de geadas ocorridas no Brasil, uma em 1979 e outra em 1981. Eles notaram que a circulação atmosférica sobre o Oceano Pacífico Sul Central podem apresentar com antecedência uma indicação da chegada de frentes intensas no Brasil. Em 1979, uma configuração de ondas longas em altos níveis deslocou-se lentamente sobre o Pacífico e amplificou-se, quatro a cinco dias antes do registro das geadas no Brasil. A crista da onda longa, com sua maior amplitude, encontrava-se próxima aos Andes e a jusante um cavado localizava-se próximo ao Brasil sobre o Atlântico Sul. Esta configuração canalizou ar frio para latitudes mais baixas, numa trajetória continental. A frontogênese no centro do Pacífico é uma evidência da amplificação da onda. Em 1981, as ondas longas no Pacífico estiveram tão amplificadas como em 1979, mas o setor norte do cavado no Atlântico Sul despreendeu-se do resto da onda. Houve ocorrência de geada quatro dias após a passagem do ciclone desprendido no sul do Brasil, que atingiu áreas ao norte do Trópico de Capricórnio. Fortune et al. (1982) concluíram que é possível prever a ocorrência de geadas no Brasil com antecedência de quatro a cinco dias, monitorando as

perturbações significativas nas ondas longas no Pacífico Sul.

Para auxiliar na previsão de ocorrência de geadas na região de Maringá, Seluchi e Nery (1992) analisaram as condições meteorológicas e associaram a ocorrência de geadas no sul do Brasil à passagem de frentes frias intensas com a conseqüente entrada de anticiclones migratórios intensos pelo sul da Argentina. Para a região de Maringá, Nery et al. (1995) desenvolveram um método estatístico de previsão de geadas usando dados de superfície, no qual são usadas a temperatura mínima, a temperatura de bulbo úmido, e a nebulosidade do dia anterior à ocorrência do fenômeno.

Avila et al. (1994) estudaram um caso de ocorrência de geada na Região Sul do Brasil no período de 7 a 10 de julho de 1994, utilizando imagens de satélites, análises do National Meteorological Center (NMC) e dados meteorológicos convencionais. Eles observaram advecção de ar frio na média e baixa troposfera, uma baixa fria principalmente na média troposfera próximo ao sul do Brasil e uma bifurcação na circulação atmosférica nos altos níveis no Oceano Pacífico Sudeste que facilitou a entrada de ar frio para o norte. Os autores sugerem que a circulação subantártica tem papel importante na seqüência de eventos anteriores ao período do caso analisado.

Dentre alguns poucos estudos dos aspectos climatológicos das geadas destacam-se o de Nimer (1979) e de Algarve (1994). Nimer (1979) apresentou resultados

climatológicos referentes aos fatores que podem influir na formação de geadas na Região Sul do Brasil tais como a latitude, o relevo e a proximidade da costa oceânica.

Recentemente, Algarve (1994) apresentou um estudo climatológico de geadas no Sul do Brasil, no período de inverno (de Abril a Setembro de 1980 a 1989), e determinou alguns padrões típicos da circulação atmosférica relacionados a geadas para usá-los como guias na rotina operacional de previsão do fenômeno. Notou como características principais: passagem de no mínimo dois sistemas frontais pelo Sul do Brasil em um período curto de tempo (3 dias) antes da ocorrência da geada; deslocamento da crista em 200 hPa mais rápido em latitudes altas que auxilia o aprofundamento do cavado sobre o Sul do Brasil e em consequência favorece a entrada de ar frio de origem Antártica; predominância de vento de sul/sudoeste nos altos e baixos níveis na região de estudo. Em todos os casos, foram notados uma crista de ar superior sobre o Sul da América do Sul e a sudeste, um cavado intenso em altos níveis e circulação ciclônica nos baixos níveis; bifurcação no escoamento em 200 hPa no Pacífico e defasagem entre os escoamentos de latitudes altas e subtropicais naquela região nos dias anteriores, e de mesma fase no dia de ocorrência do fenômeno sobre a América do Sul.

O objetivo do presente trabalho foi avaliar o potencial de um Modelo de Área Limitada (MAL) para a simulação de geadas na Região Sul do Brasil. Escolheu-se o modelo desenvolvido no Japan Meteorological Agency (JMA), por estar disponível e ter sido utilizado no estudo de

sistemas sinóticos sobre o sudeste do Brasil (Innocentini e Caetano, 1996). Também testes para a operacionalização do mesmo vem sendo realizados desde 1997 na Divisão de Ciências Meteorológicas (DCM) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e no Instituto de Pesquisas Meteorológicas (IPMet).

Com este modelo foram realizadas simulações de vários casos de geadas anteriormente selecionados por Algarve (1994), e classificados por ela como geadas totais. No período de 1980 a 1989 ela encontrou 15 casos de geadas totais, destes foram utilizados 14 casos para simulações.

Os campos simulados de temperatura próxima à superfície, pressão ao nível do mar (PNM), geopotencial em 200 hPa e ventos em 200 hPa foram comparados com os correspondentes das análises do próprio modelo do JMA e do European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF). O modelo de área limitada faz um tratamento hidrostático que diferencia sua análise com a do ECMWF. Isso torna importante essas comparações. Foi aplicada a técnica das funções ortogonais empíricas para a temperatura próxima à superfície com o objetivo de avaliar o desempenho do modelo para os diversos casos. A análise das amplitudes (séries temporais) dos modos permite investigar a diferença na intensidade de um caso para o outro.

CAPÍTULO 2

DADOS E METODOLOGIA

Algarve (1994) realizou uma minuciosa seleção de casos de geadas para a Região Sul do Brasil ocorridas no período de abril a setembro dos anos de 1980 a 1989. Ela fez uma classificação destas geadas conforme suas extensões e documentou as características da circulação atmosférica associadas a diversas classes. Conforme sua classificação, 15 casos foram chamados de geadas totais, e se referem às que atingiram grande parte da Região Sul do Brasil ou seja todas as estações analisadas (Figura 2.1) registraram temperaturas negativas ou então, pelo menos, 3 delas registraram temperatura igual a 0°C e as demais valores negativos.

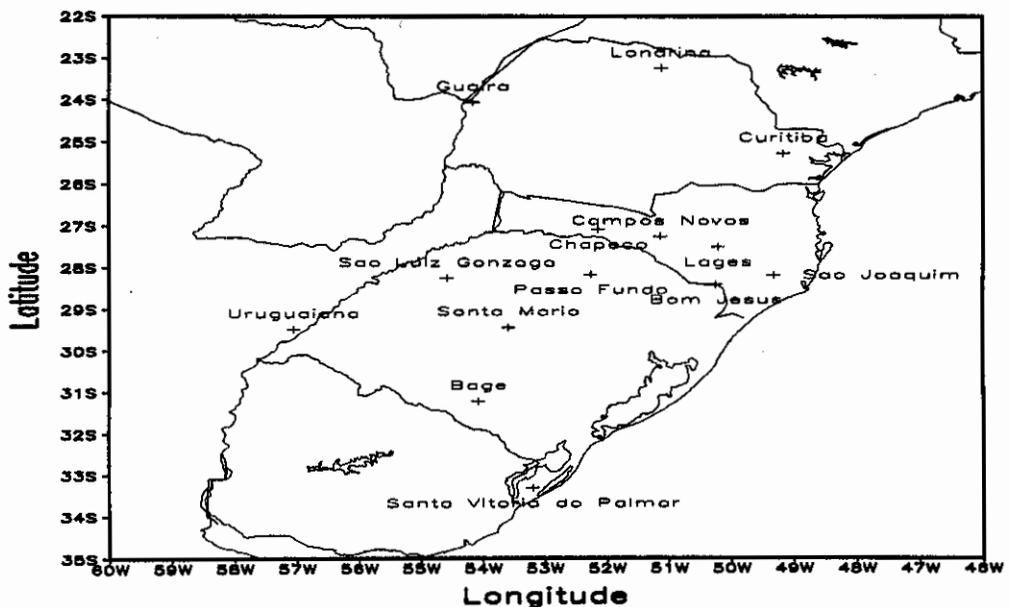


Fig. 2.1 - Mapa da localização das estações utilizadas por Algarve (1994).

FONTE: Algarve (1994), p.39.

Dos 15 casos de geadas totais foram selecionados 14 (Tabela 1). O caso correspondente à data 8 de julho de 1988 apresentou problemas de instabilidade computacional durante o processo de simulação e portanto não foi possível incluí-lo neste estudo. O domínio para as simulações está compreendido entre 100°W e 20°W e entre 10°S e 40°S (Figura 2.2), e inclui a área atingida por geadas no sul do Brasil. A projeção usada na simulação foi a estereográfica polar.

TABELA 2.1 - CASOS DE GEADAS TOTAIS USADOS PARA SIMULAÇÕES

CASO No.	DATA
Caso 1	3 de Junho de 1980
Caso 2	26 de Junho de 1980
Caso 3	15 de Julho de 1980
Caso 4	30 de Julho de 1980
Caso 5	17 de Junho de 1981
Caso 6	27 de Junho de 1984
Caso 7	22 de Julho de 1984
Caso 8	11 de Julho de 1985
Caso 9	23 de Maio de 1987
Caso 10	13 de Junho de 1987
Caso 11	23 de Junho de 1987
Caso 12	1° de Junho de 1988
Caso 13	24 de Julho de 1988
Caso 14	3 de Julho de 1989

Os dados de entrada do modelo foram extraídos das análises do modelo de circulação geral do European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) disponíveis para o período de 1980 a 1989. Foram utilizados os dados diários de temperatura do ar, componentes zonal

(u) e meridional (v) do vento nos níveis de 1000, 850, 700, 500, 300, 200 e 100hPa como condições iniciais do modelo. Estes dados estão em ponto de grade com resolução de 2,5° de latitude e longitude.

2.1 Modelo

O modelo a ser utilizado foi desenvolvido por pesquisadores da Divisão de Previsão Numérica do JMA (Yamagishi, 1980; Tatsumi, 1983) e modificado por Nagata e Ogura (1991). O modelo é hidrostático e emprega as equações primitivas em forma de fluxo discretizadas. Maiores detalhes sobre este modelo são apresentados no Apêndice A.

A versão atual do modelo permite o uso da projeção estereográfica polar ou cilíndrica Mercator com latitude padrão definida pelos objetivos a serem pesquisados e 16 níveis verticais no sistema de coordenadas sigma (σ).

O número de pontos de grade e espaçamento horizontal é especificado pelo usuário. Neste trabalho foi usada uma grade de aproximadamente 100 km de espaçamento na projeção estereográfica polar.

Para iniciar as simulações os dados da análise global do ECMWF foram interpolados para a grade do modelo, bem como na vertical para os níveis σ utilizando interpolação cúbica.

2.2 Dados de Entrada do Modelo

Os arquivos iniciais para as simulações contém informações do horário de início da simulação e dados para atualizar as fronteiras do modelo durante o período da simulação. Os arquivos acessados para gerar as condições iniciais e de fronteira para o modelo incluem os dados do ECMWF para a região da América do Sul e vizinhanças, cobertura global de água, topografia, temperatura média mensal da superfície do mar para todo o globo, e o fator de evapotranspiração médio mensal para todo o globo.

2.3 Simulações

Para cada caso foram feitas duas simulações de 48 horas inicializando a integração do modelo, respectivamente 48 horas e 24 horas antes das 12 TMG do dia da geada. Por exemplo, para o "caso 1" e simulação com 24 horas de antecedência, o período simulado começa às 12 TMG do dia 2 de junho de 1980 e termina às 12 TMG do dia 4 de junho de 1980. O intervalo de tempo usado na simulação é de 15 minutos e as saídas são gravadas a cada 3 horas, de forma que cada caso contém 17 saídas.

As variáveis armazenadas para análise são pressão ao nível do mar (PNM), temperatura no nível σ_1 , geopotencial em 200 hPa, e vento horizontal em 200 hPa. As saídas destas variáveis a cada 3 horas das simulações para 48 horas e 24 horas, assim como as análises do ECMWF

(interpolados) nas datas da ocorrência de geadas de cada caso são mostradas no Apêndice B.

As saídas do modelo estão na projeção estereográfica polar, com espaçamento horizontal de 100 km, com longitude padrão em 55°W e latitude padrão de 60°S para a projeção horizontal. As coordenadas do ponto (1,1) da grade do modelo são 40°S e 100°W.

2.4 Análise das Saídas por EOF

Em Meteorologia a descrição de um campo utilizando um número pequeno de funções e coeficientes temporais associados para explicar uma fração maior da variância total é conseguido com sucesso utilizando as funções ortogonais empíricas. Neste trabalho esta técnica é utilizada para determinar o padrão dominante de temperatura no nível σ_1 e investigar a diferença entre os 14 casos considerando observações do mesmo tipo (registro de temperaturas baixas sobre a Região Sul do Brasil) e sob o efeito de um fenômeno comum (ocorrência de geadas na região de estudo).

A técnica das EOFs foi aplicada às saídas do modelo para a temperatura no nível σ_1 para a área limitada pelos meridianos 60°W e 20°W e pelos paralelos 40°S e 10°S (Figura 2.2). Esta área é menor que a simulada para destacar a Região Sul do Brasil, excluindo os Andes. Uma análise usando a técnica de EOF para a temperatura de toda a área simulada ressaltaria o padrão sobre os Andes onde ocorrem os mais fortes gradientes horizontais de

temperatura, como mostra a Figura 2.2 que corresponde à análise do modelo do JMA para o dia 03 de junho de 1980.

Para determinar o padrão dominante da temperatura, foram usados os 14 casos simulados com 24 horas de antecedência. Estes casos totalizam 238 saídas. A formulação matemática da técnica das EOFs é detalhada no Apêndice C.

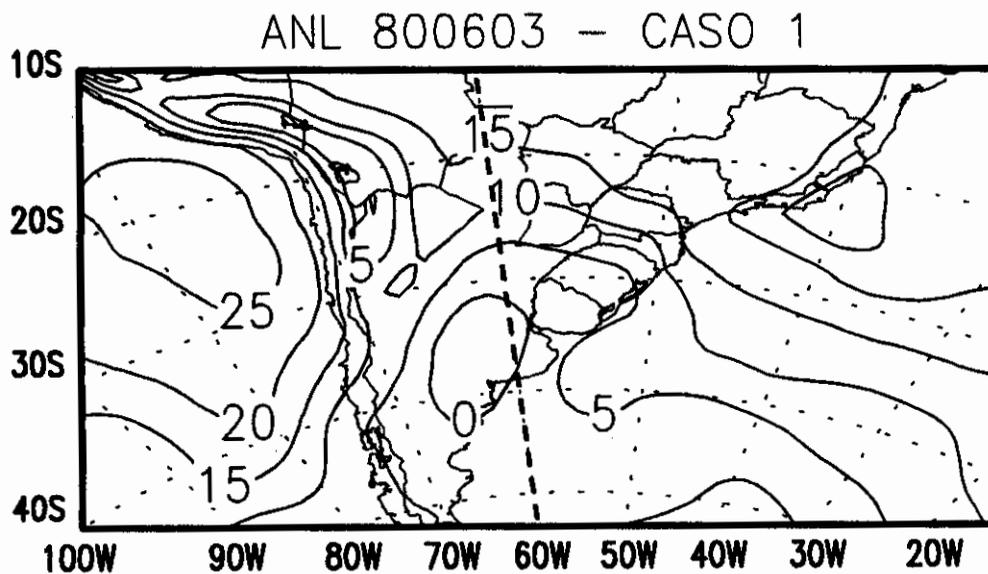


Fig. 2.2 - Área da simulação do modelo. A área à direita da linha pontilhada foi usada na técnica das EOF's.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

3.1 Comparações entre simulações e análises do modelo do JMA

Neste item serão feitas comparações entre os campos das variáveis simuladas e as análises do modelo do JMA nas datas correspondentes.

Em vista de terem sido realizadas duas simulações (48 e 24 horas antes do dia da geada), e das variáveis analisadas serem 4 para cada um dos 14 casos, se as comparações com os campos observados forem realizadas para cada um dos casos, o número de mapas é consideravelmente grande, tornando o processo extremamente tedioso. Assim, destacam-se apenas os aspectos gerais dos campos simulados e observados mostrados no Apêndice B.

3.1.1 Simulações com 24 horas de antecedência

Os campos de temperatura no nível σ_1 simulada na Região Sul do Brasil em geral apresentam uma razoável concordância com as análises do modelo. Em um caso (caso 12) a previsão subestima as temperaturas observadas na análise. Este erro na simulação pode ser atribuído à ocorrência de varios episódios de geadas num curto espaço de tempo em datas anteriores à do caso 12, assim, o solo ainda permanecia resfriado quando ocorreu a nova geada total que se repetiu durante dez dias. Em dois (casos 4 e

11) os valores simulados são ligeiramente superestimados (Figura 3.1). Os campos de PNM simulada também mostram concordância com as correspondentes análises. Em 2 casos os valores previstos sobre a região são subestimados (casos 3 e 9) e em 2 (casos 13 e 14) são superestimados (Figura 3.2).

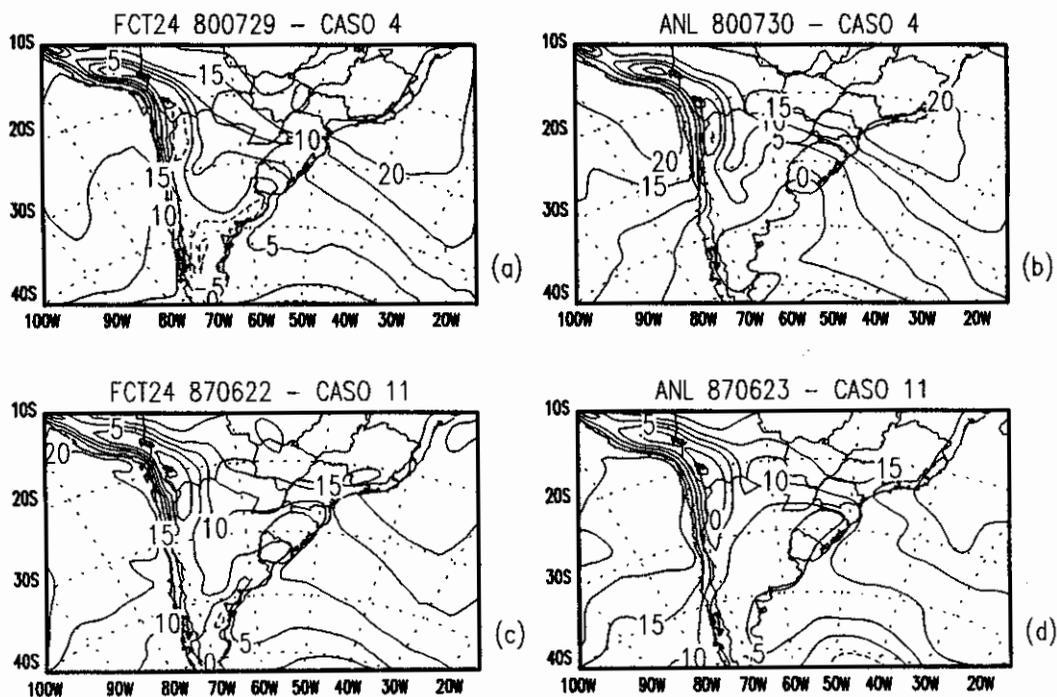


Fig. 3.1 - Campos previstos da temperatura no nível σ_1 com 24 horas de antecedência para: (a) 30 de julho de 1980; (c) 23 de junho de 1987; (e) 01 de junho de 1988. Análises da temperatura no nível σ_1 para: (b) 30 de julho de 1980; (d) 23 de junho de 1987; (f) 01 de junho de 1988.

(continua)

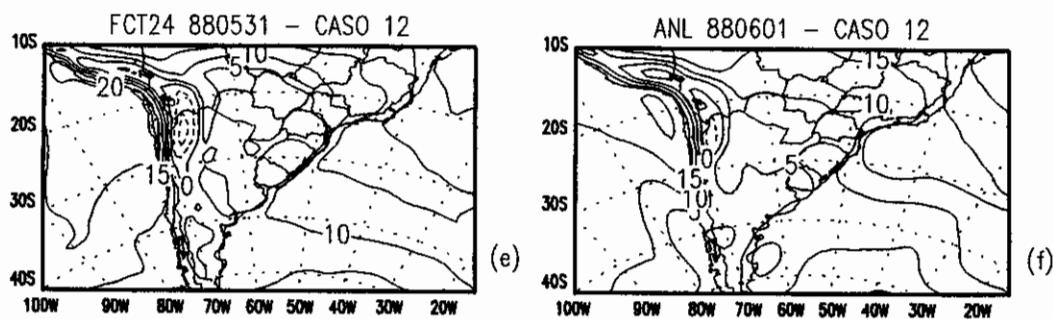


Fig. 3.1 - Conclusão

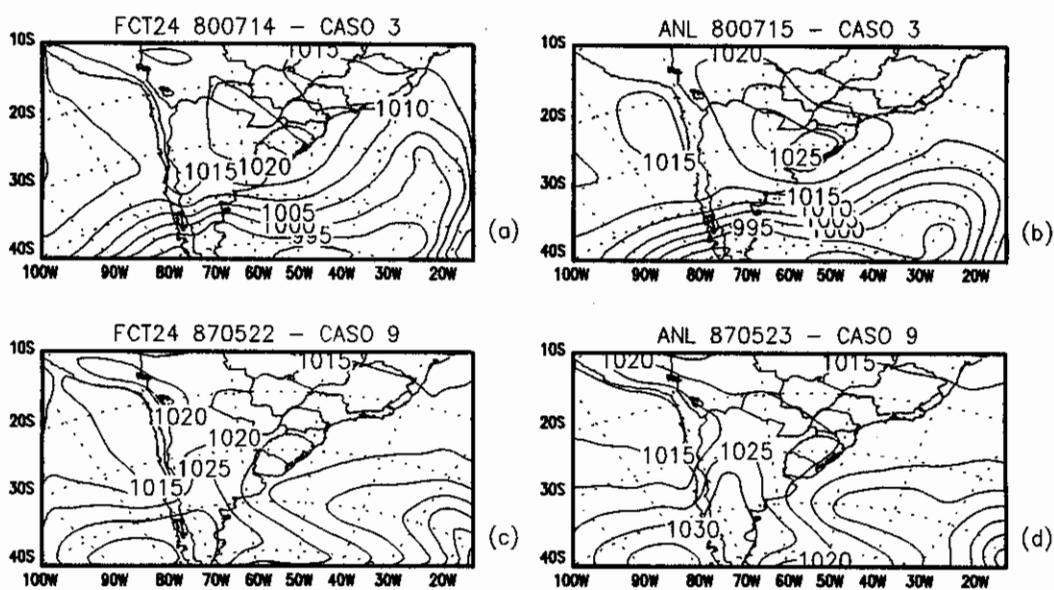


Fig. 3.2 - Campos previstos de PNM com 24 horas de antecedência para: (a) 15 de julho de 1980; (c) 23 de maio de 1987; (e) 24 de julho de 1988; (g) 3 de julho de 1989. Análises de PNM para: (b) 15 de julho de 1980; (d) 23 de maio de 1987; (f) 24 de julho de 1988; (h) 3 de julho de 1989.

(continua)

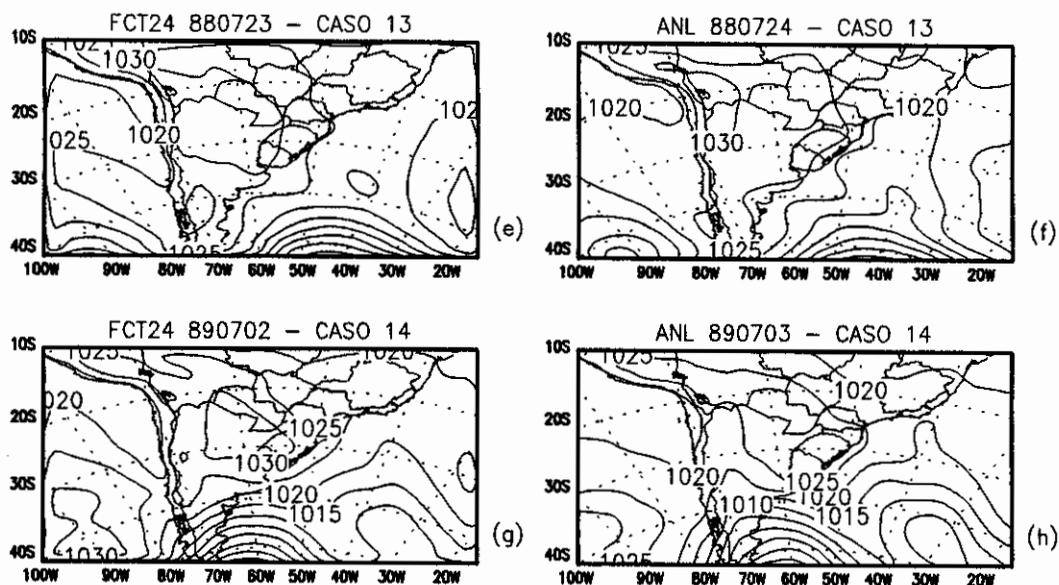


Fig. 3.2 - Conclusão

Os campos simulados e as correspondentes análises de geopotencial em 200 hPa são muito similares. O modelo simula com precisão a posição e intensidade do cavado próximo, ou às vezes, sobre o sul da América do Sul que se intensifica em altos níveis nos casos de ocorrência de geadas.

Com relação aos campos de vento em 200 hPa, o modelo mostra um ótimo desempenho. Ressalta-se que o modelo reproduz o jato subtropical em altos níveis associado à passagem de sistemas frontais, que é notado nas análises próximo à região de estudo. A energia deste jato intensifica o sistema frontal. Os ventos que atingem a região de estudo são de direção sul ou sudoeste, o que está de acordo com as análises correspondentes e com resultados anteriores. (e.g., Algarve, 1994).

De uma forma geral, as variáveis estudadas são bem simuladas com 24 horas de antecedência. Nos níveis próximos à superfície para alguns poucos casos a simulação não reproduz bem os valores das análises. Contudo, mesmo nestes casos o padrão destas variáveis (temperatura no nível σ_1 e PNM) são muito similares aos das correspondentes análises.

Ainda para efeitos de avaliação do desempenho do modelo foram calculadas as correlações espaciais entre os campos simulados e das análises às 12 TMG do dia da geada para PNM, temperatura no nível σ_1 , vento zonal, vento meridional e altura geopotencial em 200 hPa. A Figura 3.3 mostra as correlações para cada um dos casos. Todas as correlações são superiores a 0,8, o que significa que os padrões simulados e das análises são muito similares. Isso indica um ótimo desempenho do modelo para as previsões com 24 horas de antecedência. É notável que o modelo tem um desempenho relativamente melhor para o geopotencial em 200 hPa, do que para as demais variáveis.

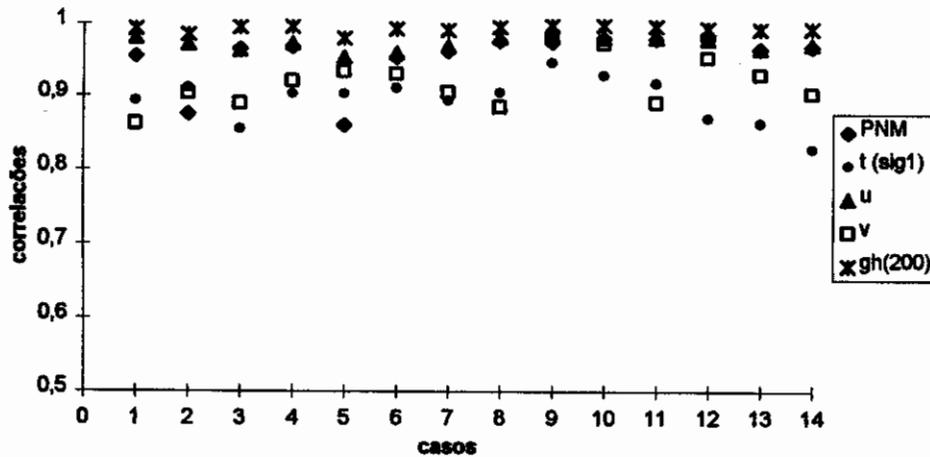


Fig. 3.3 - Correlação entre as previsões de 24 horas e as correspondentes análises. Os símbolos significam: PNM, pressão ao nível do mar; t(sig1), temperatura no nível σ_1 ; u e v, componentes zonal e meridional do vento em 200 hPa; gh(200), altura geopotencial em 200 hPa.

3.1.2 Simulações com 48 horas de antecedência

As simulações com 48 horas de antecedência são aparentemente um pouco piores do que as simulações com 24 horas de antecedência. Isso parece ser principalmente o caso das variáveis próximas à superfície. As temperaturas próximas à superfície (nível σ_1) sobre a Região Sul, para um caso são subestimadas em relação aos valores das análises, e para 8 casos são superestimadas. Como baixa temperatura do ar próximo à superfície é o que determina a ocorrência do fenômeno estudado, o fato do modelo superestimar a temperatura no nível σ_1 em 8 casos indica um pior desempenho do modelo para simulações com 48 horas de

antecedência em relação à simulação com 24 horas de antecedência. Os campos de PNM simulada, mostram valores subestimados para 5 casos.

No entanto, para os altos níveis, os campos simulados com 48 horas de antecedência são muito similares aos simulados com 24 horas de antecedência e nas das correspondentes análises. De fato, os campos previstos de geopotencial em 200 hPa são quase idênticos aos da previsão de 24 horas. No que concerne os campos de vento em 200 hPa, as simulações com 48 horas e 24 horas de antecedência são similares, inclusive as simulações com 48 horas de antecedência reproduzem o jato subtropical. Os ventos que atingem a região de estudo são de direção sul ou sudoeste, o que está de acordo com as análises correspondentes.

Os cálculos das correlações espaciais entre as previsões e as análises do dia da geada foram também efetuados para as simulações com 48 horas de antecedência (Figura 3.4). As correlações se mantêm dentro dos limites de 0,99 e 0,75. A menor correlação, de 0,75, ocorre no caso 5 para a PNM, e no caso 6, para a componente meridional do vento em 200 hPa e para PNM. Conforme Algarve (1994), a entrada de ar frio nestes casos (5 e 6) foi mais de sul e associada à presença de um ciclone de altos níveis extratropical na costa Atlântica, próximo ao litoral do Rio Grande do Sul e Uruguai. Nas simulações deste trabalho é notável que este ciclone está presente também nos baixos níveis. A Figura 3.5 ilustra os campos de PNM prevista e das análises para estes dois casos (5 e 6). No caso 5, a previsão de 48 horas mostra o ciclone bem próximo da costa

e com valores centrais em torno de 990 hPa, enquanto na correspondente análise, o ciclone está deslocado para leste da costa uruguaia e com valores centrais de 1008 hPa. Além disso, o modelo não captou o anticiclone continental mostrado na análise com seu centro sobre o norte da Argentina. Estas diferenças resultaram no baixo valor de correlação.

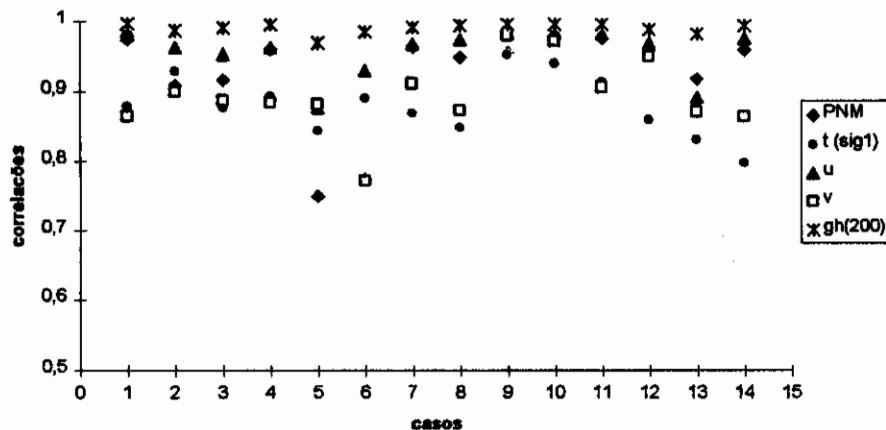


Fig. 3.4 - Correlação entre as previsões de 48 horas e as correspondentes análises. Os símbolos significam: PNM, pressão ao nível do mar; t(sig1), temperatura no nível σ_1 ; u e v, componentes zonal e meridional do vento em 200 hPa; gh(200), altura geopotencial em 200 hPa.

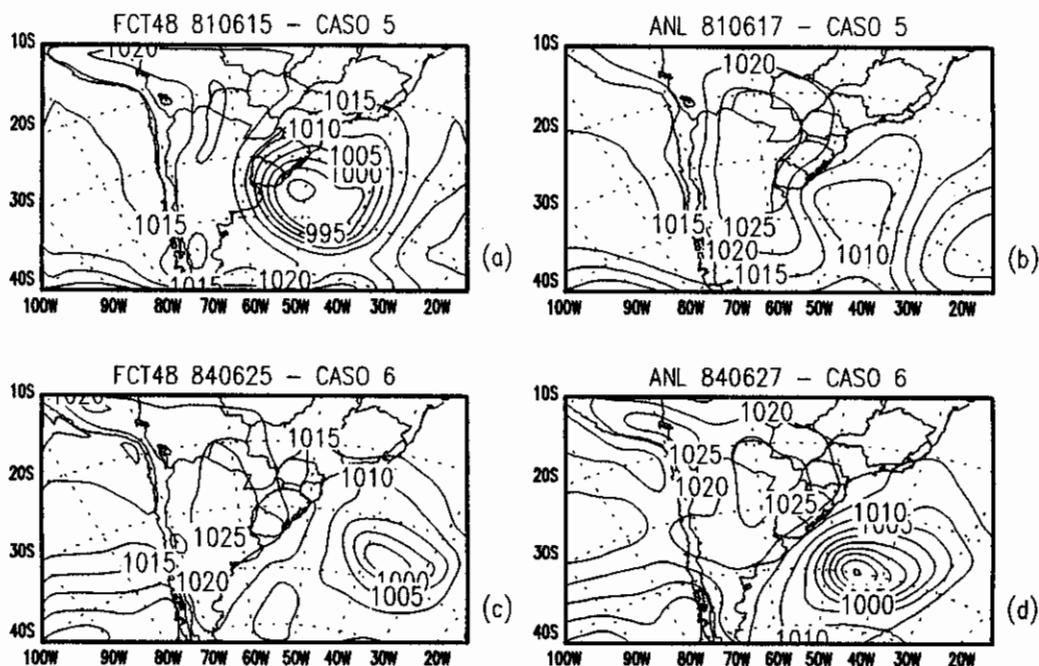


Fig. 3.5 - Campos previstos de PNM com 48 horas de antecedência para: (a) 17 de junho de 1981; (c) 27 de junho de 1984. Análises de PNM para: (b) 17 de junho de 1980; (d) 27 de junho de 1984.

No caso 6, o centro ciclônico é prognosticado no Atlântico, afastado da região costeira e com valores centrais por volta de 1000 hPa. Na análise correspondente, o ciclone está mais próximo da costa e com valores centrais de 800 hPa. A localização e a intensificação do ciclone na simulação podem ser atribuídos ao gradiente termico continente-oceano introduzido pelo próprio modelo. Neste caso, o anticiclone continental foi bem simulado pelo modelo tanto na posição como na sua intensidade. Então, somente o erro na posição e intensidade do ciclone

extra-tropical deve ter contribuído para o baixo valor de correlação.

3.2 Comparações entre Simulações com 24 e 48 horas de Antecedência Versus Resultados de Algarve (1994)

Algarve (1994) agrupou os 15 casos de geadas totais em 4 grupos que reúnem características semelhantes para algumas variáveis meteorológicas, e um grupo unitário com características distintas daqueles 4 grupos. Ela escolheu um caso de cada grupo como representativo, para o qual analisou em detalhes os campos de vento em 850 e 200 hPa, advecção de temperatura em 850 hPa, e as anomalias de geopotencial em 200 hPa.

Neste item os casos simulados foram agrupados da mesma forma feita por Algarve (1994) conforme mostra a Tabela 3.1. Mas ao invés de escolher-se um caso representativo foi calculado para cada grupo o campo médio das variáveis simuladas pelo modelo (24 horas e 48 horas de antecedência) para as 12 TMG do dia da geada e das correspondentes análises do ECMWF e análises interpoladas para a grade do modelo do JMA.

Tendo em vista que nos grupos 3 e 5 o número de casos é menor que 3 serão analisados apenas os grupos 1, 2 e 4. Mesmo para estes três grupos, o fato do número de casos ser razoavelmente baixo (4, 5 e 3 respectivamente), não justificaria calcular as médias. No entanto, é notável

pelo Apêndice B a similaridade dos campos simulados de um mesmo grupo, bem como dos correspondentes campos das análises. Assim estas médias resultam em campos suavizados mas sem alterações substanciais das características dominantes. Estas médias facilitam as comparações com os resultados de Algarve (1994). Além disso, é possível avaliar as diferenças entre as análises do ECMWF e do modelo do JMA.

TABELA 3.1 - AGRUPAMENTO DOS 14 CASOS DE GEADAS TOTAIS
CONFORME ALGARVE (1994)

Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
caso 1 03/06/80	Caso 8 11/07/85	caso 9 23/05/87	caso 5 17/06/81	caso 7 22/07/84
caso 2 26/06/80	Caso 10 13/06/87	caso n/s* 07/07/88	caso 6 27/06/84	
caso 3 15/07/80	Caso 11 23/06/87		caso 14 03/07/89	
caso 4 30/07/80	Caso 12 01/06/88			
	Caso 13 24/07/88			

* n/s - caso não-simulado

Para proceder às comparações com PNM como o ECMWF não fornece esta variável, foi usada a altura geopotencial em 1000 hPa da análise do ECMWF. Por outro lado, as temperaturas no nível σ_1 simulada e da análise do modelo do JMA foram comparadas com a temperatura em 1000 hPa da análise do ECMWF.

Alguns aspectos devem ser levados em conta na comparação entre os campos simulados e das análises. Um

deles é que, os limites da área na projeção estereográfica, que estão em função da região que se deseja estudar, não coincidem com os limites da projeção analisada por Algarve (1994).

Como o vento em 200 hPa é o único campo simulado que coincide com os estudados por Algarve (1994), para este campo será possível avaliar melhor os resultados de simulações deste trabalho em comparação com os apresentados por Algarve (1994). Dentre os padrões característicos da circulação identificados por Algarve (1994), relacionados à ocorrência de geadas no Sul do Brasil, serão levados em conta em particular, a bifurcação nos campos de vento em 200 hPa sobre o Pacífico nas proximidades da costa da América do Sul e a defasagem entre latitudes altas e subtropicais das ondulações no vento em 200 hPa.

3.2.1 Grupo 1

Os campos médios de temperaturas próximas à superfície correspondentes ao Grupo 1 são mostrados na Figura 3.6. Este campo é razoavelmente bem simulado com 24 horas de antecedência. Com 48 horas de antecedência, os valores previstos são superestimados sobre a região de interesse. No entanto, é possível notar nesta simulação temperaturas relativamente baixas na região de interesse, bem como similaridades no padrão simulado e das análises. As temperaturas sobre os Andes, em relação às análises do ECMWF, são consideravelmente subestimadas, conforme pode-

se notar tanto na análise do modelo do JMA como nas previsões.

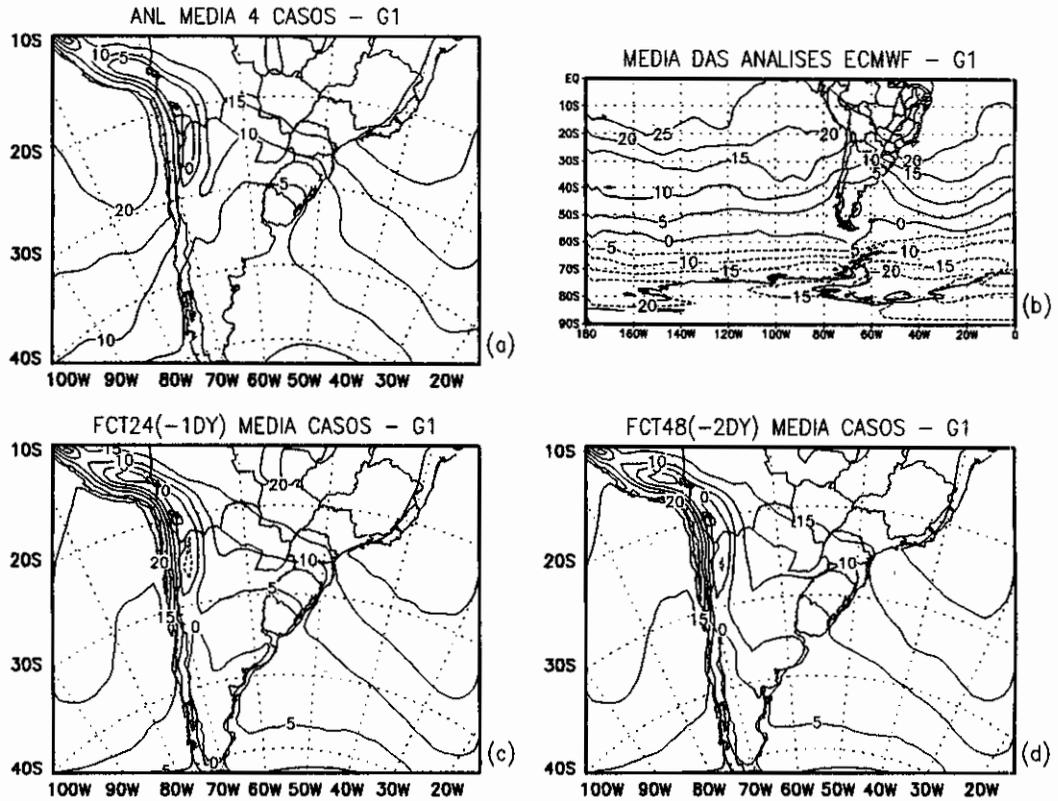


Fig.3.6 - Campos médios de temperatura próxima à superfície ($^{\circ}\text{C}$) para o grupo 1: (a) análise do JMA; (b) análise do ECMWF; (c) previsão de 24 horas do JMA; (d) previsão de 48 horas do JMA.

As PNM médias do grupo 1 previstas em ambas as simulações (24 horas e 48 horas), concordam com as análises de geopotencial em 1000 hPa do ECMWF e com as análises de PNM do modelo do JMA (Figura 3.7). O modelo reproduz em ambas as simulações o centro de alta pressão sobre o sul do continente e o centro de baixa pressão a jusante observados no primeiro dia de ocorrência de geada

na região de estudo. É notável para a simulação de 48 horas de antecedência que a intensidade do centro de alta pressão continental é ligeiramente subestimado em relação à análise do modelo do JMA. Por outro lado, em ambas as simulações, o cavado a jusante é mais acentuado do que a análise do modelo do JMA. A isolinha de 1015 hPa nas simulações estendem-se sobre o Leste do Brasil.

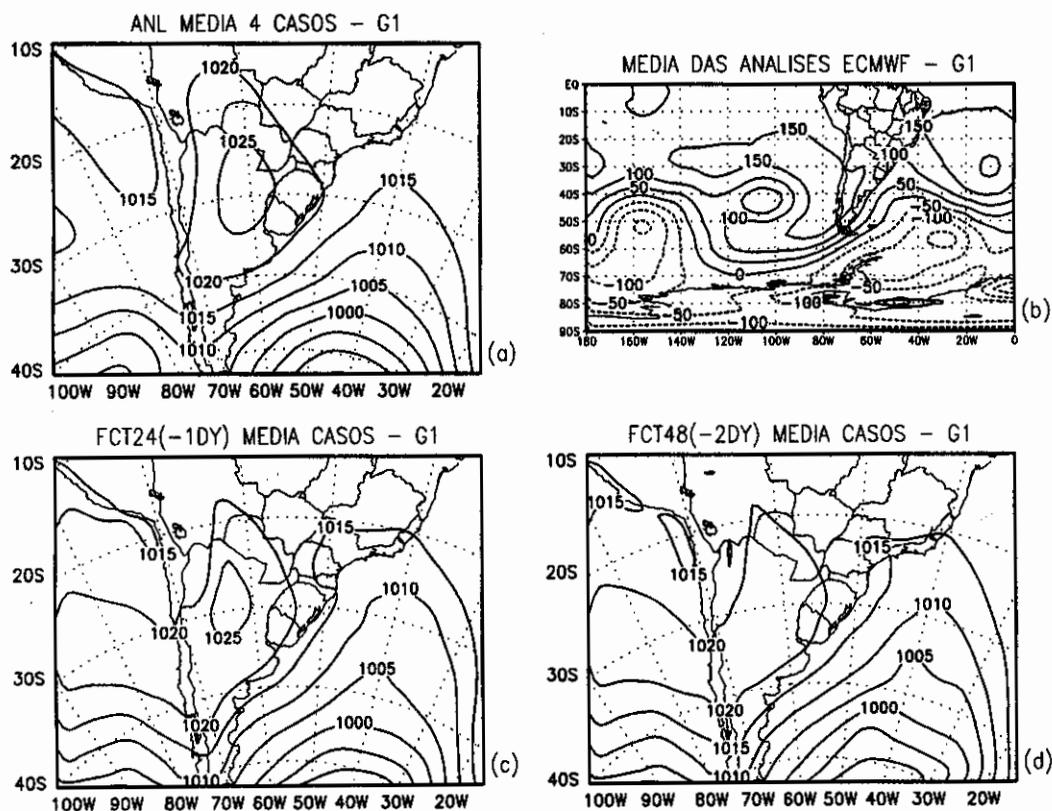


Fig.3.7 - Campos médios para o grupo 1 de: (a) PNM (hPa) da análise do JMA; (b) geopotencial em 1000 hPa (mgs) das análises do ECMWF; (c) previsão de PNM do JMA para 24 horas; (d) previsão de PNM do JMA para 48 horas.

Os campos médios de geopotencial e de ventos em 200 hPa previstos (Figuras 3.8 e 3.9) mostram um intenso cavado relacionado a geadas sobre a Região Sul e no Atlântico Sudoeste adjacente. Este cavado é parte de um padrão de grande escala que contribui na sua amplificação conforme mostram as análises do ECMWF. De fato, no campo médio de geopotencial em 200 hPa das análises do ECMWF observa-se a oposição de fase da onda sobre o Pacífico Sul entre as latitudes 40°S e 60°S e aproximadamente em 100°W, o que é consistente com o campo médio dos ventos em 200 hPa (Figura 3.9), que mostra uma bifurcação nesta área do Pacífico e a confluência a jusante sobre o sul do continente. Embora esta área de confluência não esteja totalmente incluída na área de simulação, o destaque é pelo fato da confluência colaborar na intensificação do cavado a jusante e da zona de confluência coincidir com a entrada do jato subtropical. De fato, as simulações mostram a amplificação do cavado e a entrada do jato na parte sudoeste da área de simulação.

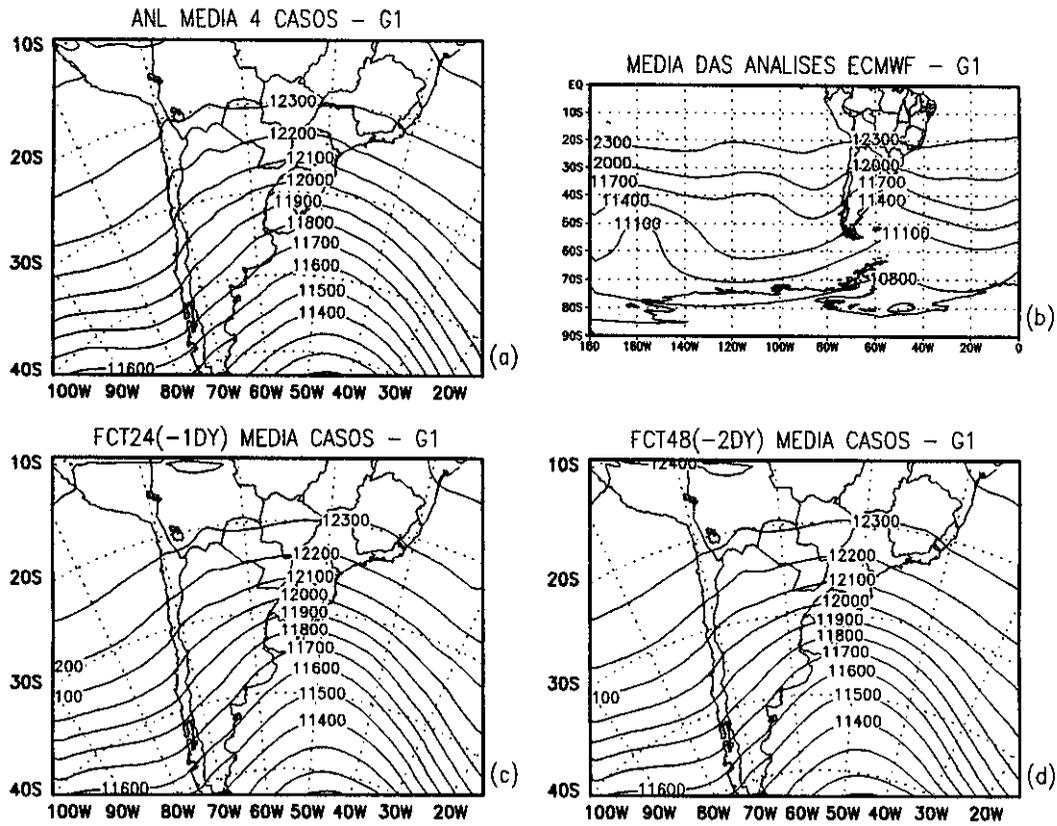


Fig.3.8 - Campos médios de geopotencial em 200 hPa para o grupo 1: (a) análise do JMA; (b) análise do ECMWF; (c) previsão de 24 horas do JMA; (d) previsão de 48 horas do JMA.

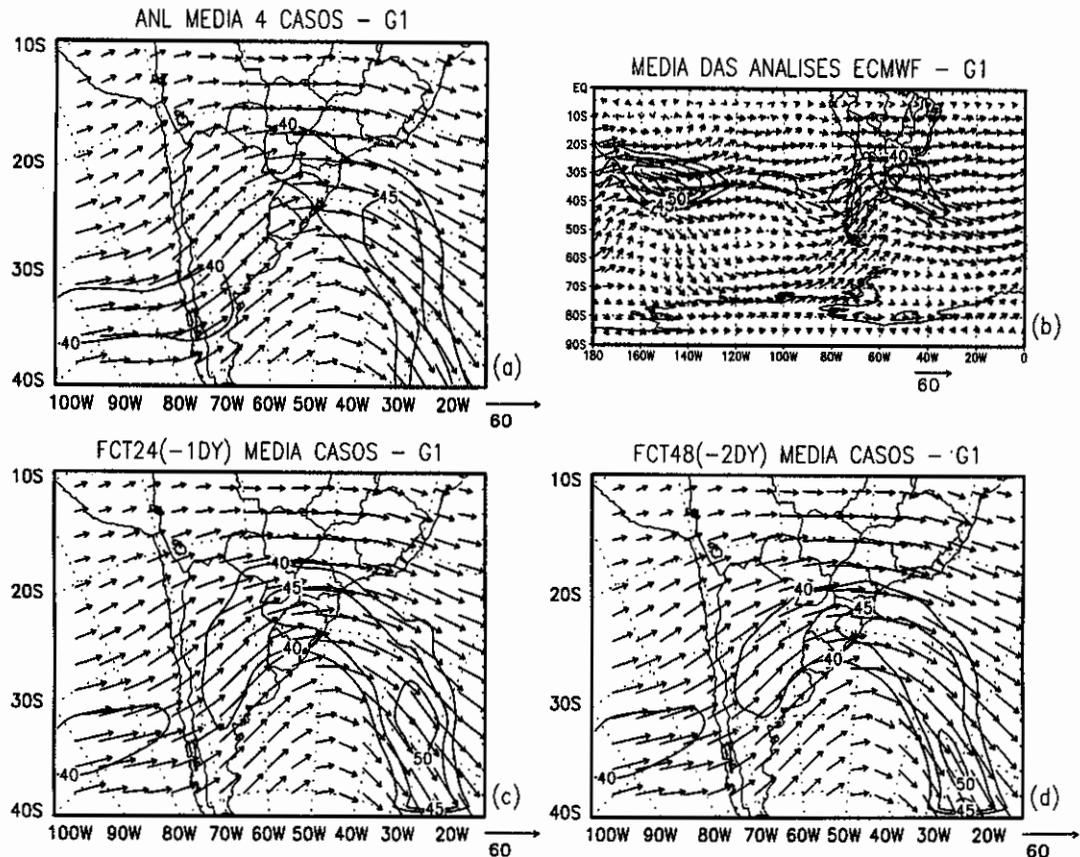


Fig.3.9 - Campos médios do vento em 200 hPa para o grupo 1: (a) análise do JMA; (b) análise do ECMWF; (c) previsão de 24 horas do JMA; (d) previsão de 48 horas do JMA.

3.2.2 Grupo 2

Nos campos médios de temperaturas previstos e das análises do Grupo 2, os valores baixos das isothermas evidenciam a entrada de uma massa de ar frio sobre a Região Sul do Brasil. Neste grupo, como no anterior, a previsão de 48 horas apresenta valores de temperatura maiores do que os das análises sobre a região de estudo (Figura 3.10), ,

enquanto a previsão de 24 horas reproduz bem os valores e a área de entrada do ar frio.

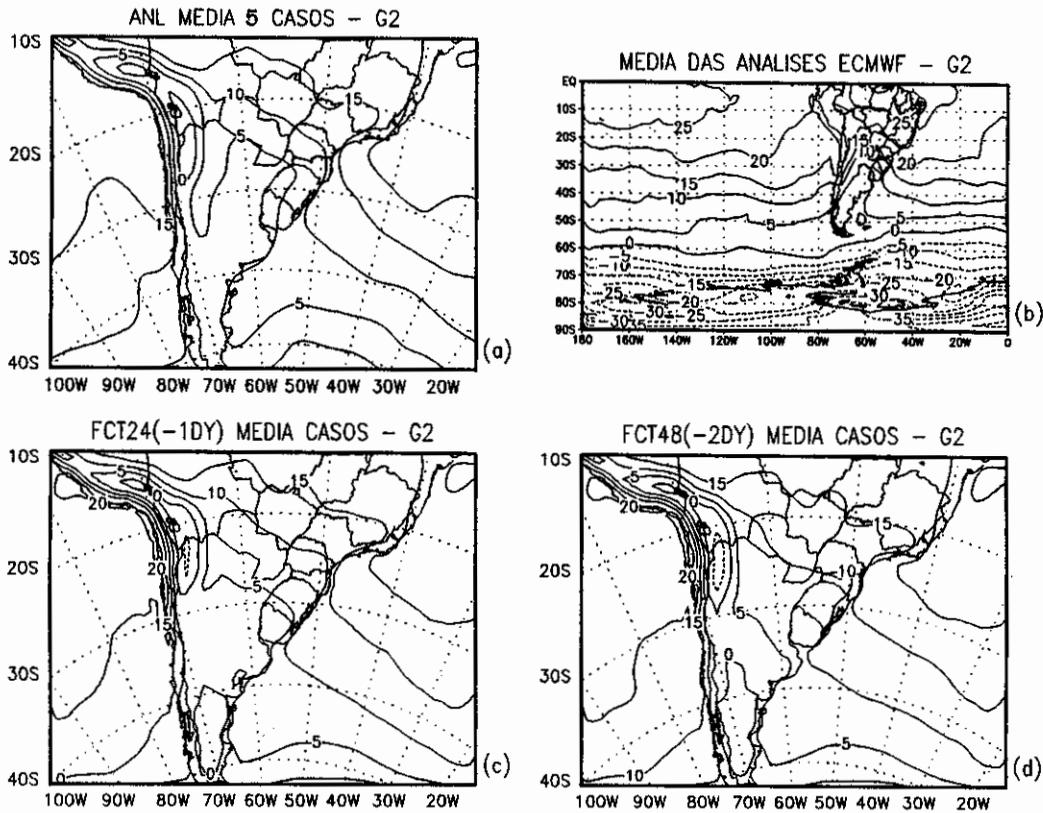


Fig.3.10 - Campos médios de temperatura próxima à superfície ($^{\circ}\text{C}$) para o grupo 2: (a) análise do JMA; (b) análise do ECMWF; (c) previsão de 24 horas do JMA; (d) previsão de 48 horas do JMA.

Os campos médios de PNM e de geopotencial em 1000 hPa do grupo 2 (Figura 3.11) mostram um sistema de alta pressão no centro leste da Argentina e um sistema de alta pressão a jusante sobre o Atlântico Sudoeste. É notável a similaridade da análise do modelo do JMA e a previsão de PNM com 24 horas de antecedência. No caso da

simulação de 48 horas de antecedência, o cavado sobre o Atlântico Sudoeste está ligeiramente mais acentuado, com a isobara de 1017 hPa estendendo-se até próximo ao Rio de Janeiro.

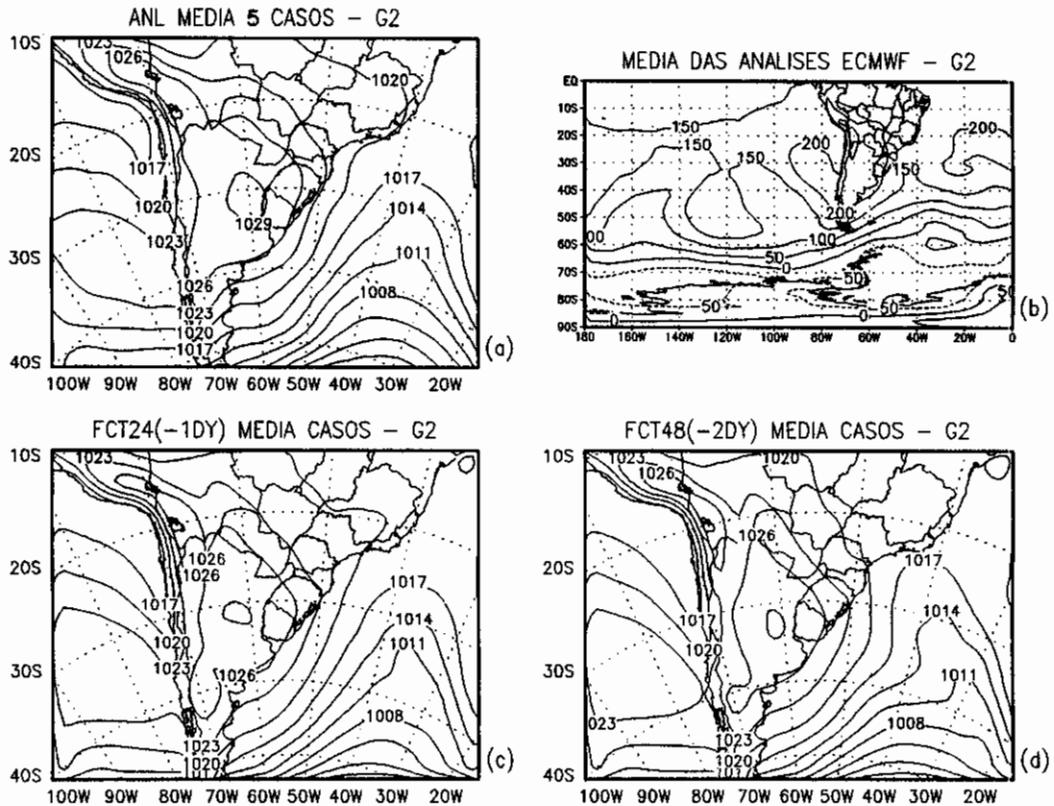


Fig.3.11 - Campos médios para o grupo 2 de: (a) PNM (hPa) da análise do JMA; (b) geopotencial em 1000 hPa (mghp) das análises do ECMWF; (c) previsão de PNM do JMA para 24 horas; (d) previsão de PNM do JMA para 48 horas.

Como no grupo 1, os campos médios de geopotencial e de ventos em 200 hPa do grupo 2 (Figuras 3.12 e 3.13) também mostram a amplificação do cavado sobre o Atlântico, próximo ao continente tanto nos campos

previstos como nos das análises. A média da análise do ECMWF para o campo de ventos em 200 hPa (Figura 3.13) mostra uma zona de confluência sobre o Pacífico nas coordenadas 50°S e 90°W, ligeiramente a oeste da posição de confluência observada no grupo 1 (Figura 3.9b). Sobre o continente a zona de confluência do grupo 2 é mais notável sobre o Sul do Brasil e Uruguai. Os campos médios do vento em 200 hPa simulados (Figuras 3.13c e d) reproduzem bem a confluência em altos níveis sobre o continente assim como o intenso jato em 200 hPa citado na descrição feita por Algarve (1994).

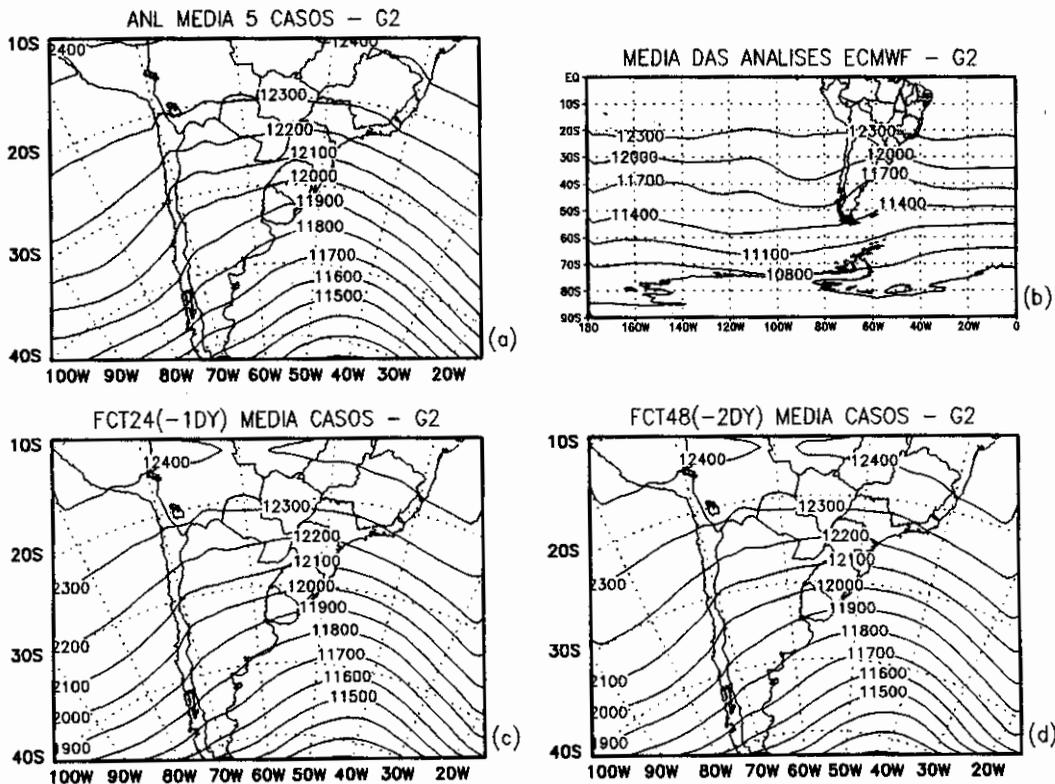


Fig.3.12 - Campos médios de geopotencial em 200 hPa para o grupo 2: (a) análise do JMA; (b) análise do ECMWF; (c) previsão de 24 horas do JMA; (d) previsão de 48 horas do JMA.

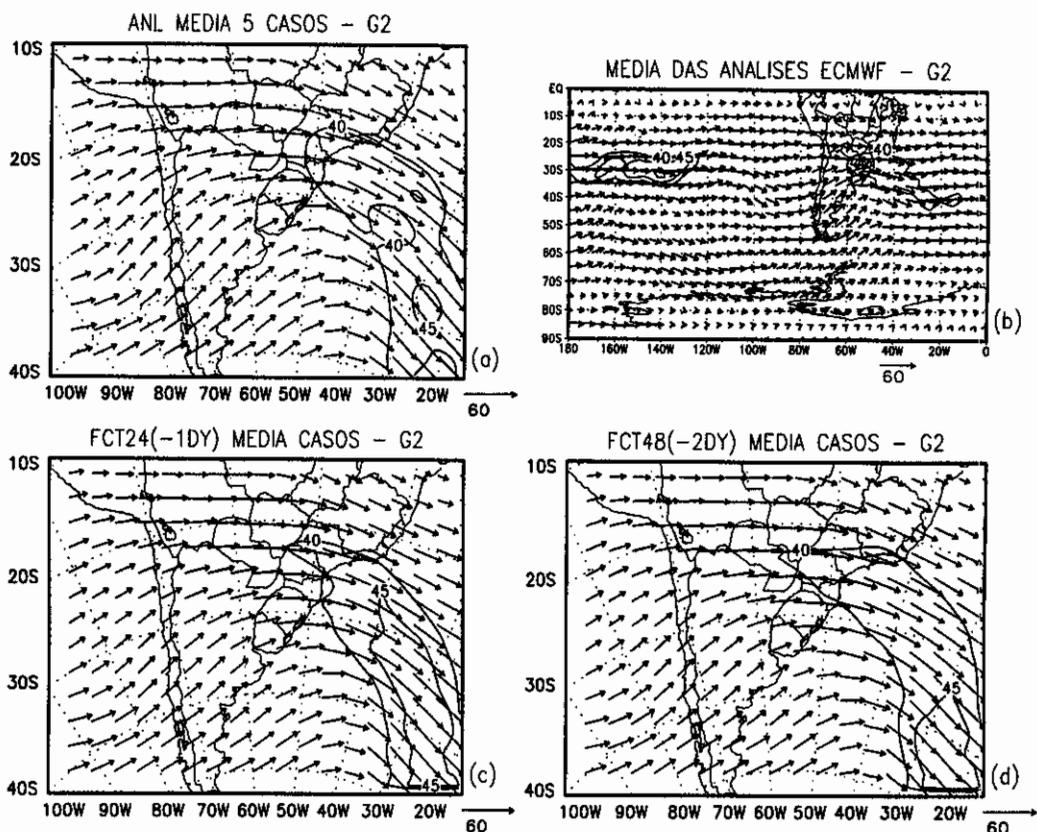


Fig.3.13 - Campos médios do vento (m/s) em 200 hPa para o grupo 2: (a) análise do JMA; (b) análise do ECMWF; (c) previsão de 24 horas do JMA; (d) previsão de 48 horas do JMA.

3.2.3 Grupo 4

A particularidade dos casos do Grupo 4 é que as geadas estiveram associadas à incursão de ar frio sobre o extremo sudeste do continente devido à presença de um ciclone extratropical de altos níveis no Atlântico Sudoeste (Algarve, 1994). Os campos médios de temperatura simulados mostram, como para os dois grupos anteriores, que a

previsão de 48 horas embora reproduza o padrão da análise, superestima os valores de temperatura sobre a região de interesse (Figura 3.14d). Por outro lado, a simulação com 24 horas de antecedência (Figura 3.14c) apresenta valores mais próximos aos das análises sobre a região Sul (Figura 3.14a e b).

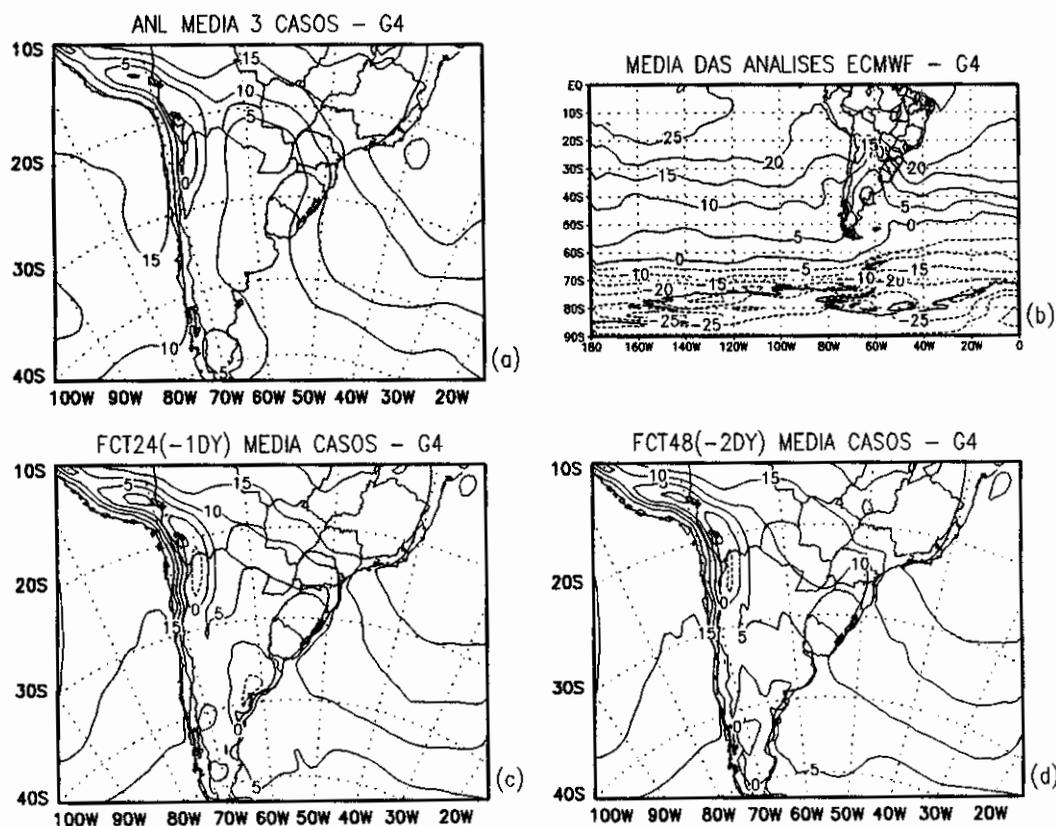


Fig.3.14 - Campos médios da temperatura próxima à superfície (°C) para o grupo 4: (a) análise do JMA; (b) análise do ECMWF; (c) previsão de 24 horas do JMA; (d) previsão de 48 horas do JMA.

O ciclone extratropical sobre o Atlântico Sudoeste (aproximadamente em 40°S; 45°W), assim como a alta

continental com centro sobre o nordeste da Argentina, Uruguai, Paraguai e sul/oeste do Brasil notados nos campos das análises de PNM e de geopotencial em 1000 hPa (Figuras 3.15a e b), são muito bem simulados pelo modelo do JMA (Figura 3.15c e d).

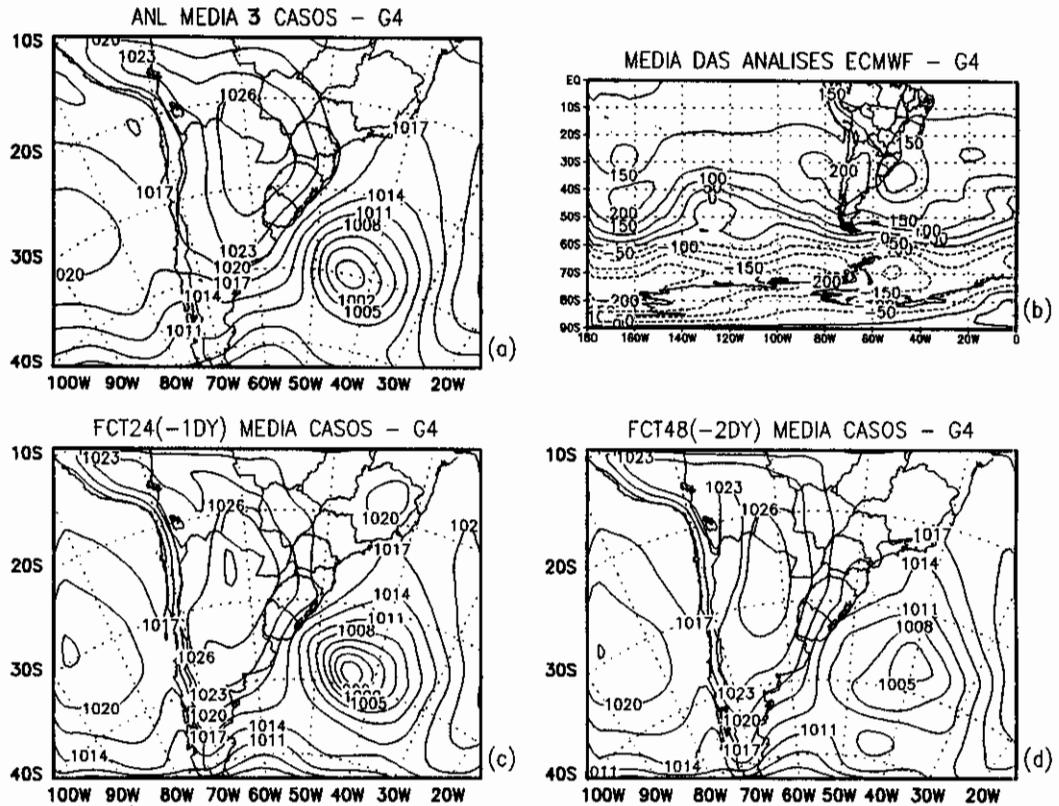


Fig.3.15 - Campos médios para o grupo 4 de: (a) PNM (hPa) da análise do JMA; (b) geopotencial em 1000 hPa (m) das análises do ECMWF; (c) previsão de PNM do JMA para 24 horas; (d) previsão de PNM do JMA para 48 horas.

O campo médio de geopotencial em 200 hPa do ECMWF mostra um cavado intenso com seu eixo no sul do

Brasil inclinado para sudeste sobre o Atlântico Sudoeste, e uma crista no Pacífico com eixo quase meridional nas proximidades de 80°W (Figura 3.16). Os campos simulados reproduzem bem o cavado mostrado na análise do ECMWF, que por sua vez é também observado na análise do modelo do JMA.

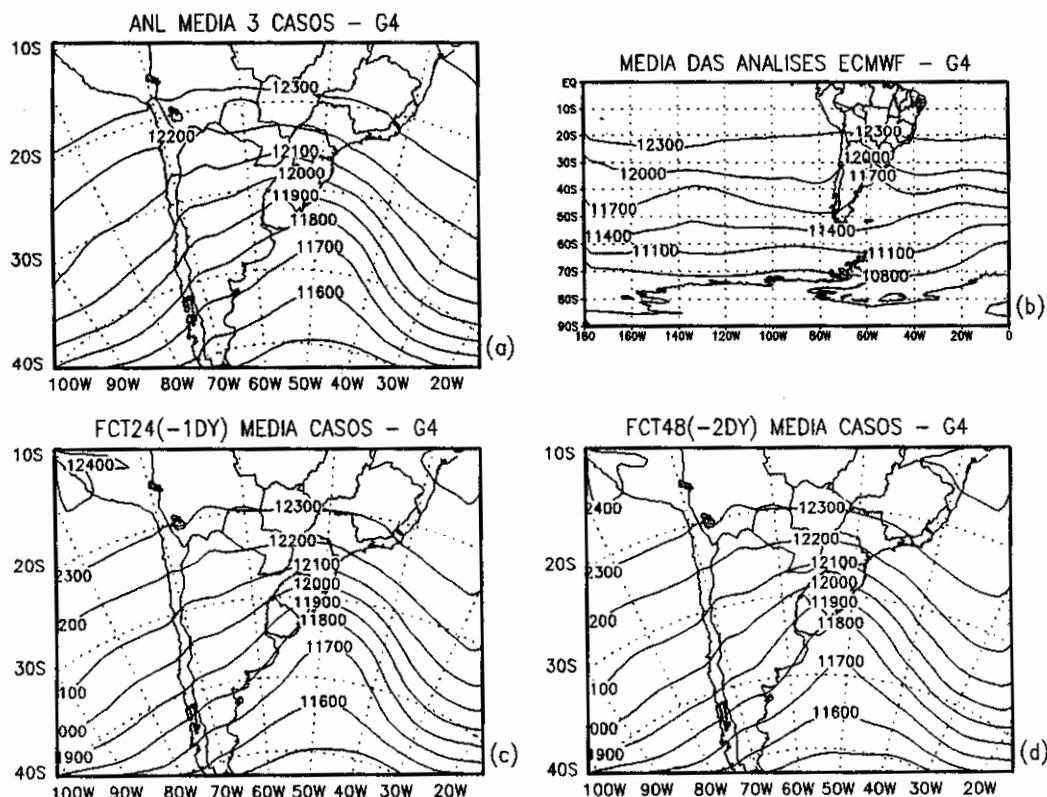


Fig.3.16 - Campos médios de geopotencial em 200 hPa para o grupo 4: (a) análise do JMA; (b) análise do ECMWF; (c) previsão de 24 horas do JMA; (d) previsão de 48 horas do JMA.

A Figura 3.17 mostra os campos médios do vento em 200 hPa do grupo 4. A confluência do escoamento é observada sobre o leste do continente e coincide com a entrada do jato subtropical, conforme as análises do ECMWF.

O jato está dentro da área de simulação e é evidente que os campos de vento em 200 hPa está bem simulado.

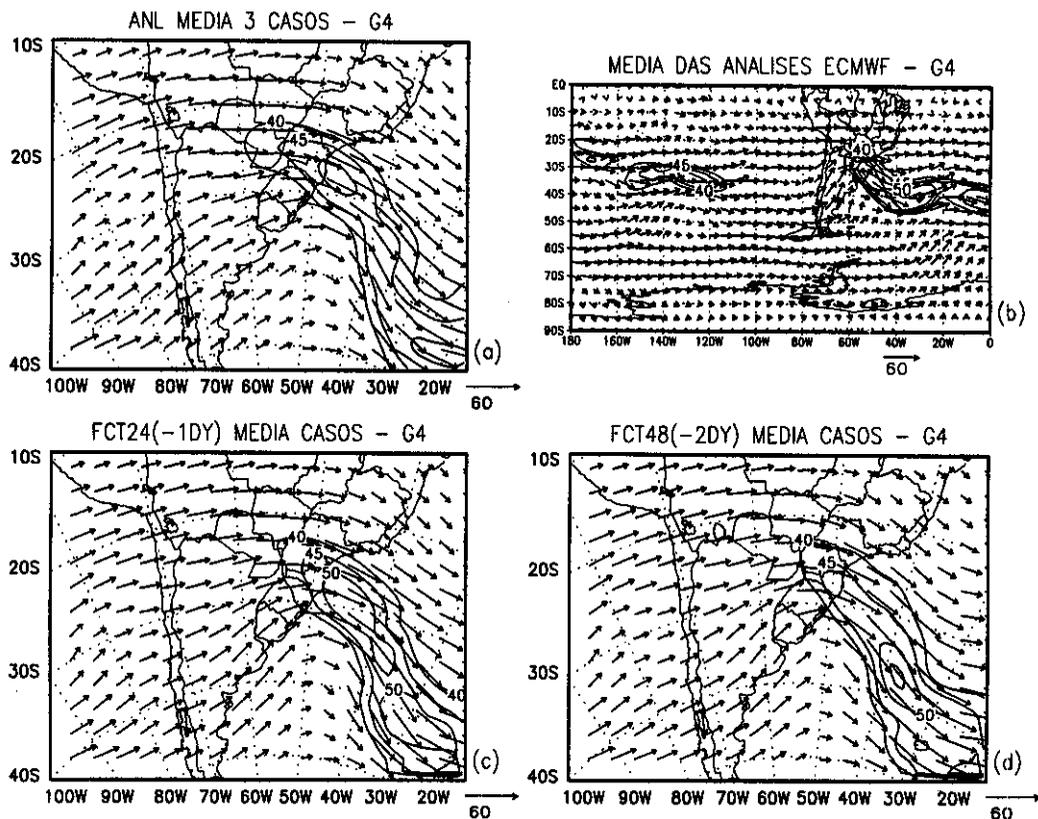


Fig.3.17 - Campos médios do vento em 200 hPa para o grupo 4: (a) análise do JMA; (b) análise do ECMWF; (c) previsão de 24 horas do JMA; (d) previsão de 48 horas do JMA.

3.3 Análise dos Grupos para o Dia Anterior à Ocorrência da Geada

Como o objetivo deste trabalho é testar o modelo do JMA como ferramenta na previsão operacional, considerou-se interessante analisar os campos médios do dia que antecede o primeiro dia de ocorrência de geadas da

Região Sul do Brasil em cada um dos grupos já citados. Com isso, pretende-se identificar alguns aspectos característicos da circulação, que poderão ser levados em conta no uso das previsões do modelo regional.

3.3.1 Grupo 1

No Grupo 1 os campos de temperatura das análises do ECMWF e do modelo do JMA para um dia antes do primeiro dia de geada mostram uma massa de ar frio com valores entre 10°C e 15°C sobre o sul do Rio Grande do Sul, que é bem simulada com 24 horas de antecedência (Figura 3.18). No campo médio de geopotencial em 1000 hPa do ECMWF notam-se um sistema de alta pressão no Pacífico Sul, próximo à costa sul Americana e um centro de baixa pressão a jusante no litoral Atlântico associado à passagem de um sistema frontal. Estas características estão presentes tanto na análise do modelo do JMA como na simulação, e são indícios precursores de uma possível geada no sul do Brasil. A geada ocorre quando a crista associada a um sistema de alta pressão desloca-se sobre o continente, e se intensifica.

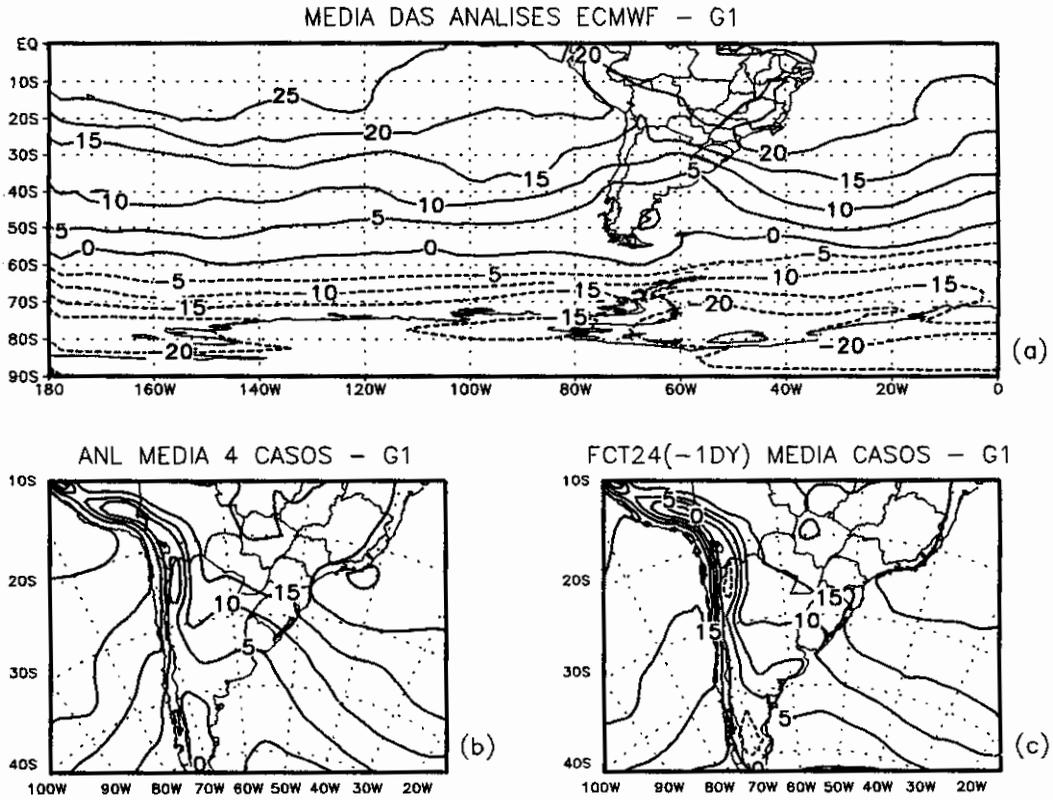


Fig.3.18 - Campos médios de temperatura próxima à superfície ($^{\circ}\text{C}$) para o dia anterior às datas do grupo 1: (a) análise do ECMWF; (b) análise do JMA; (c) previsão de 24 horas do JMA.

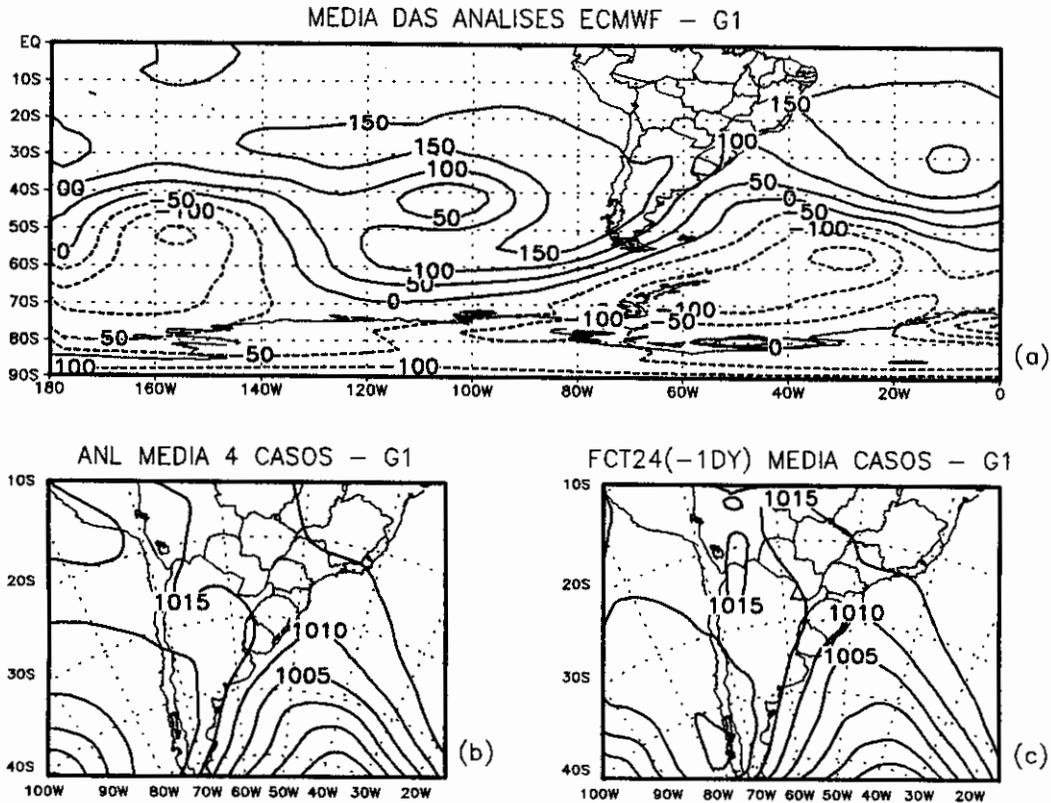


Fig.3.19 - (a) Campo médio do geopotencial em 1000 hPa (m) das análises do ECMWF para o dia anterior às datas do grupo 1; campos médios de PNM (hPa) para o grupo 1; (b) análise do JMA; (c) previsão de 24 horas do JMA.

Nos campos médios de geopotencial e de ventos em 200 hPa, simulados e das análises, notam-se o aprofundamento da crista próxima à costa do Chile e a amplificação do cavado a jusante sobre o continente (Figuras 3.20 e 3.21). As análises do ECMWF para estas variáveis também mostram a presença de uma bifurcação entre 30°S e 70°S e entre as coordenadas 130°W e 100°W. Como consequência, a confluência mais ao leste canaliza ar frio de sudoeste para nordeste.

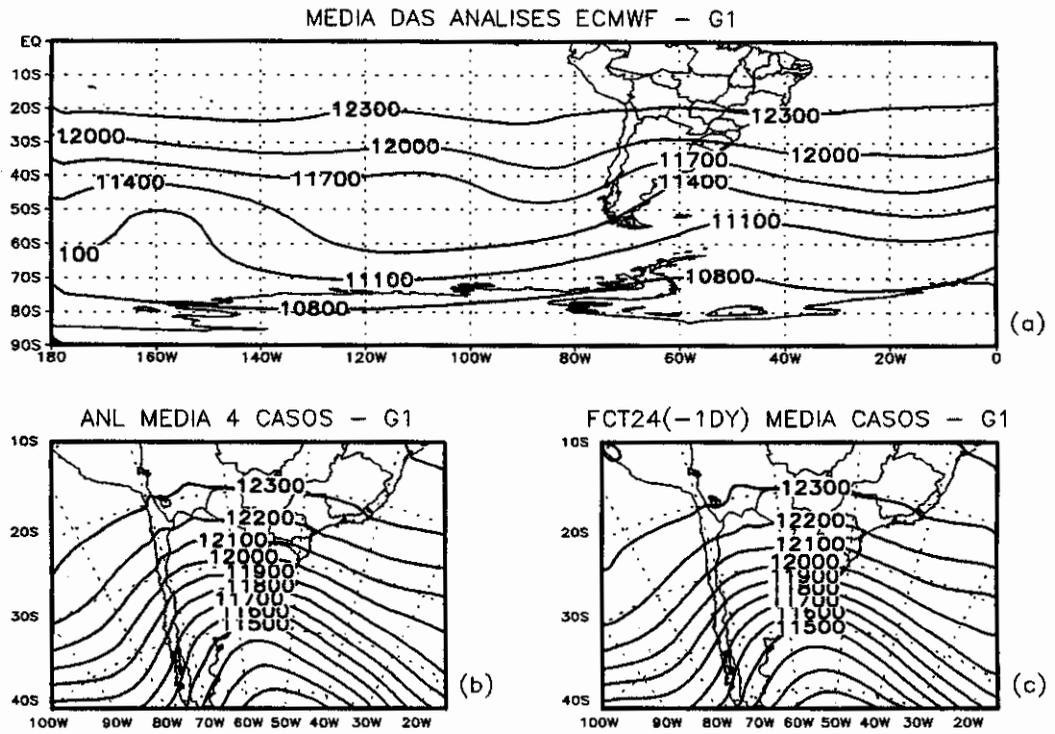


Fig.3.20 - Campos médios de geopotencial em 200 hPa para o dia anterior às datas do grupo 1: (a) análise do ECMWF; (b) análise do JMA; (c) previsão de 24 horas do JMA.

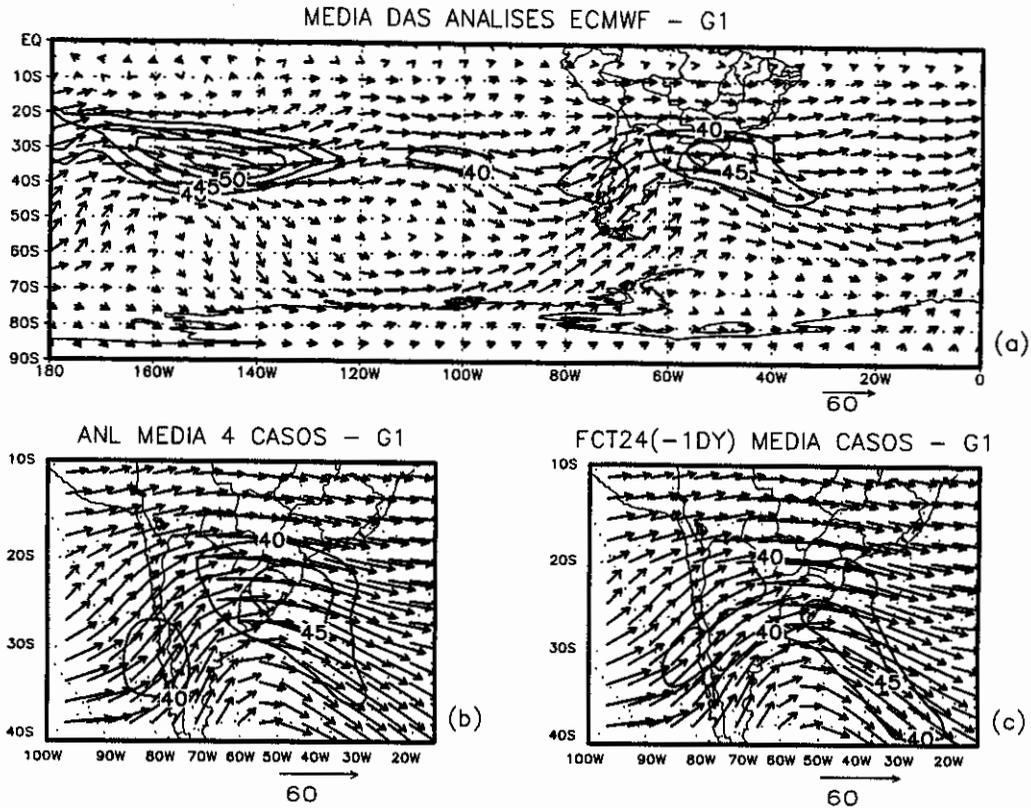


Fig.3.21 - Campos médios do vento em 200 hPa para o dia anterior às datas do grupo 1: (a) análise do ECMWF; (b) análise do JMA; (c) previsão de 24 horas do JMA.

3.3.2 Grupo 2

Nos campos médios de temperatura próximo à superfície do grupo 2, as isothermas sobre a região de estudo variam de 10°C a 15°C, mas o gradiente térmico na área de interesse é maior nas análises do que na simulação com 24 horas de antecedência (Figura 3.22). Os campos médios de geopotencial em 1000 hPa da análise do ECMWF e PNM previstos e da análise do modelo JMA mostram um sistema de alta pressão sobre o oeste do continente e um

sistema de alta pressão sobre o oeste do continente e um centro de baixa pressão sobre o Atlântico Sudoeste. Os ventos de baixos níveis de sul associados ao sistema de alta pressão sobre o sul do Brasil facilita a entrada de ar frio (Figura 3.23).

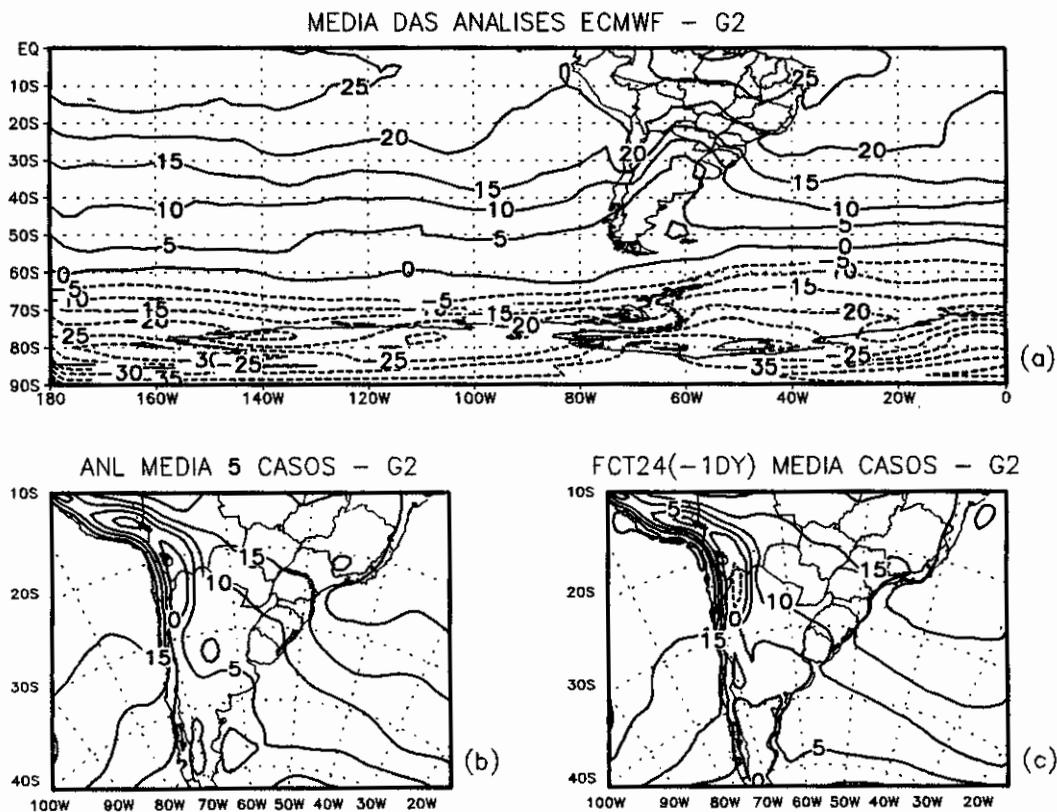


Fig.3.22 - Campos médios de temperatura próxima à superfície ($^{\circ}\text{C}$) para o dia anterior às datas do grupo 2: (a) análise do JMA; (b) análise do ECMWF; (c) previsão de 24 horas do JMA.

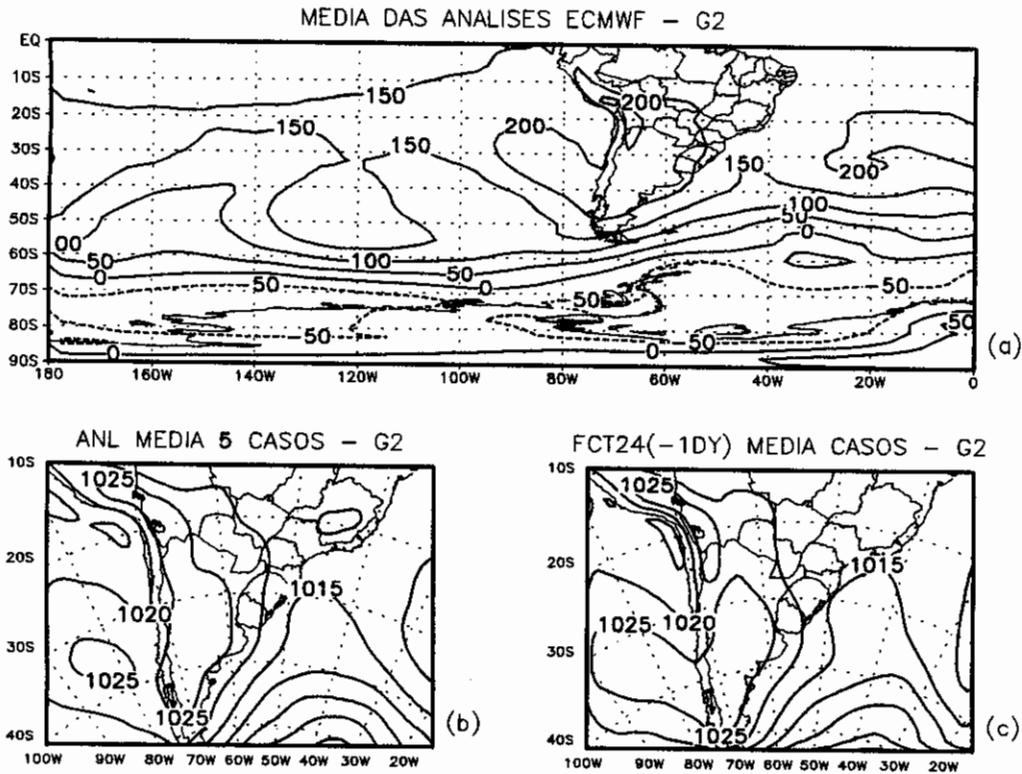


Fig.3.23 - (a) Campo médio do geopotencial em 1000 hPa (m_{gp}) das análises do ECMWF para o dia anterior às datas do grupo 2; campos médios de PNM (hPa) para o grupo 2: (b) análise do JMA; (c) previsão de 24 horas do JMA.

Em altos níveis, os campos médios de geopotencial da análise do ECMWF mostram as ondas fora de fase entre as latitudes baixas e médias no Pacífico, e em fase próximo à costa chilena, uma crista no Pacífico leste e a jusante um cavado amplificado cujo eixo está sobre a Região Sul do Brasil (Figura 3.24). Os campos simulado e da análise do modelo do JMA tem configurações consistentes entre si e com o campo da análise do ECMWF. Os campos de vento em 200 hPa das análises do ECMWF ilustram a defasagem entre as ondas de latitudes médias e altas no Pacífico e a

confluência próximo às coordenadas 60°S e 70°W e corrente abaixo próximo a 20°S e 60°W coincidindo com a entrada do jato subtropical. Configurações consistentes são notadas na simulação e análise regional (Figuras 3.25a, b e c).

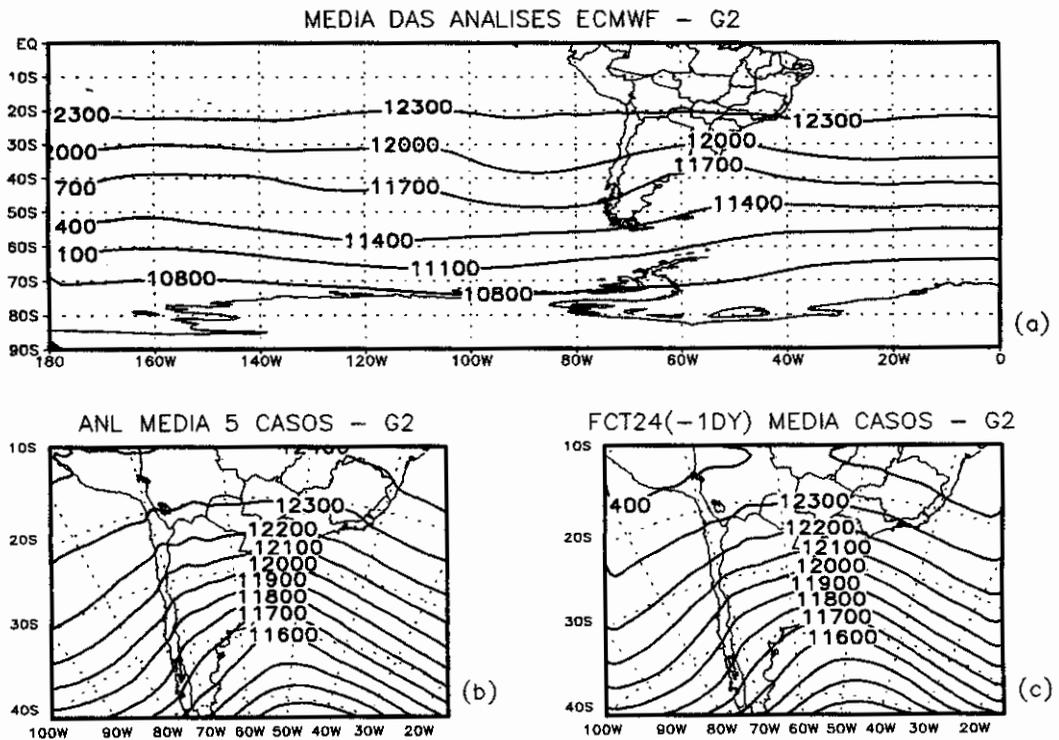


Fig.3.24 - Campos médios de geopotencial em 200 hPa para o dia anterior às datas do grupo 2: (a) análise do ECMWF; (b) análise do JMA; (c) previsão de 24 horas do JMA.

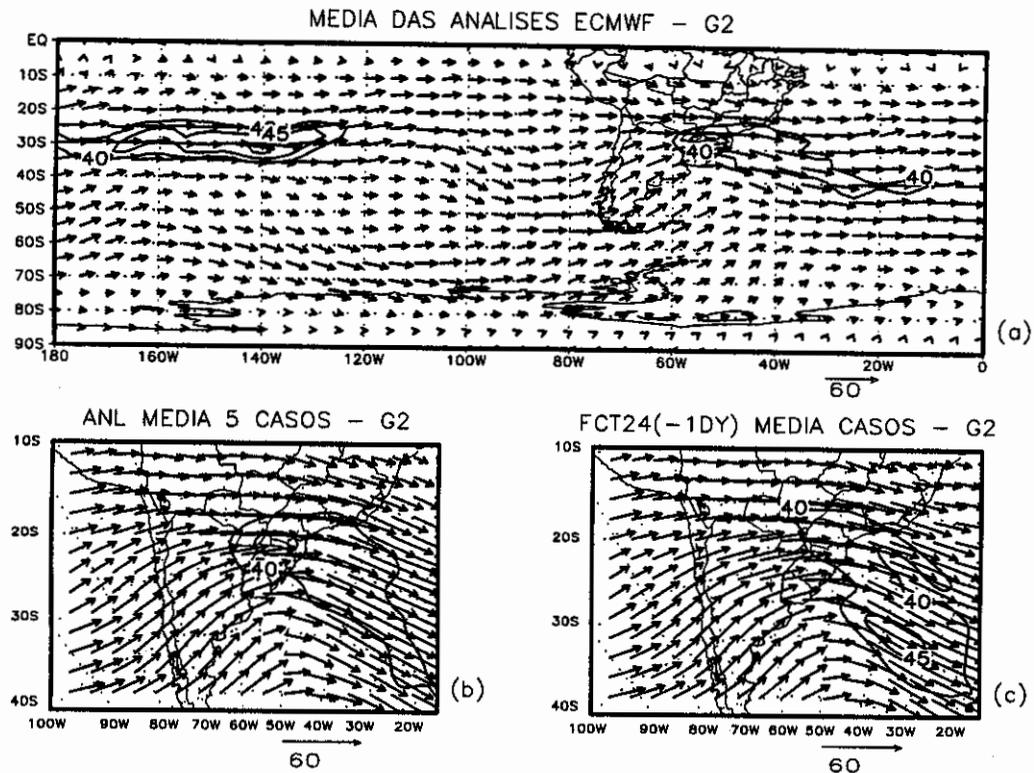


Fig.3.25 - Campos médios da variável do vento em 200 hPa para o dia anterior às datas do grupo 2: (a) análise do ECMWF; (b) análise do JMA; (c) previsão de 24 horas do JMA.

3.3.3 Grupo 4

O campo médio de temperatura próxima à superfície sobre a Região Sul do Brasil para o grupo 4 é semelhante aos dos grupos 1 e 2. No grupo 4, como nos demais, o modelo simula bem os valores de temperatura sobre a região de interesse (Figura 3.26). A particularidade deste grupo é que a entrada de ar frio foi condicionada à presença de ciclones extratropicais (Algarve 1994). Os campos médios de PNM simulados e os analisados mostram que o ciclone extratropical na costa Atlântica, assim como um

intenso anticiclone continental aparecem bem definidos no dia que antecede o registro de geada (Figura 3.27c). Estas configurações favorecem a entrada de ar frio de sul na região de estudo.

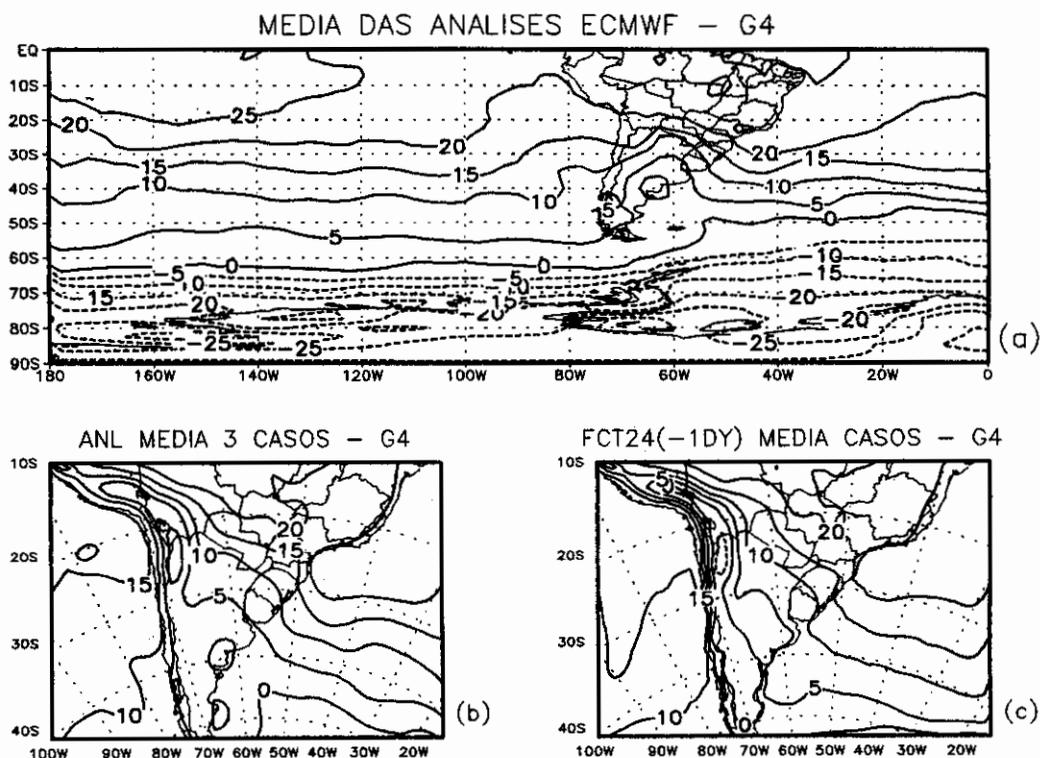


Fig.3.26 - Campos médios de temperatura próxima à superfície ($^{\circ}\text{C}$) para o dia anterior às datas do grupo 4: (a) análise do ECMWF; (b) análise do JMA; (c) previsão de 24 horas do JMA.

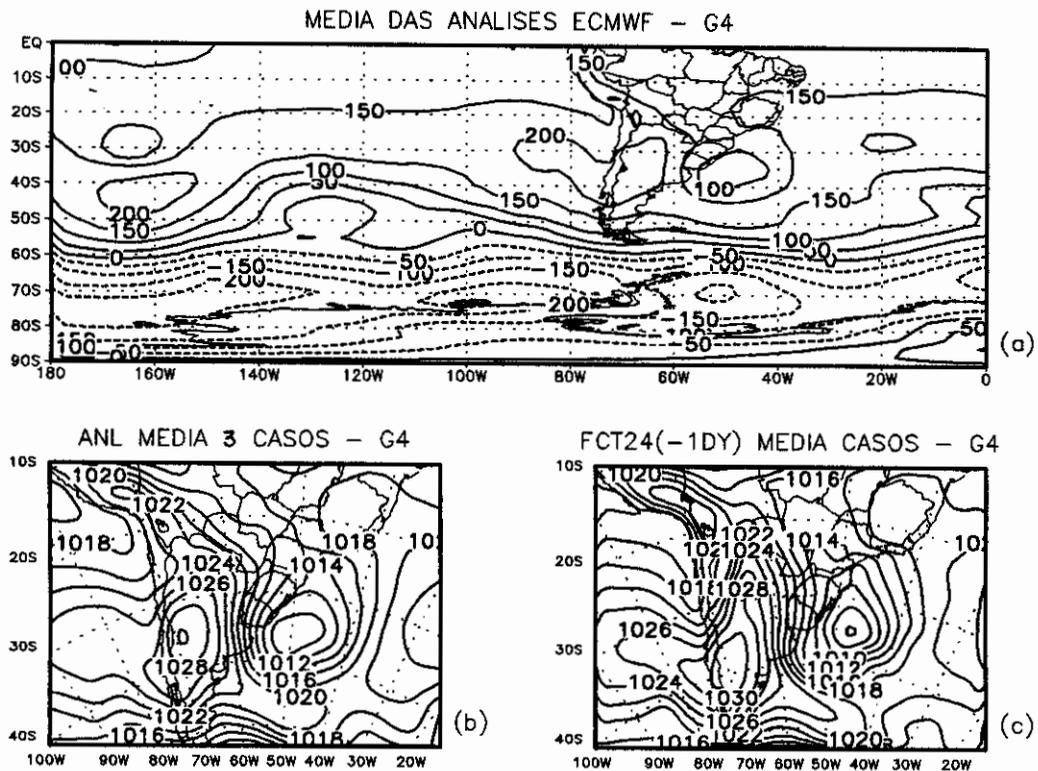


Fig.3.27 - (a) Campo médio do geopotencial em 1000 hPa (mgs) das análises do ECMWF para o dia anterior às datas do grupo 4; campos médios de PNM (hPa) para o grupo 4: (b) análise do JMA; (c) previsão de 24 horas do JMA.

Os campos médios de geopotencial em 200 hPa do grupo 4 simulados e das análises do modelo do JMA mostram que o cavado com eixo sobre o continente e inclinado de sudeste para noroeste é mais acentuado (Figuras 3.28a e 3.28c) do que os dos outros grupos. Como nos casos anteriores os campos de vento em 200 hPa simulados e das análises mostram-se consistentes (Figura 3.29).

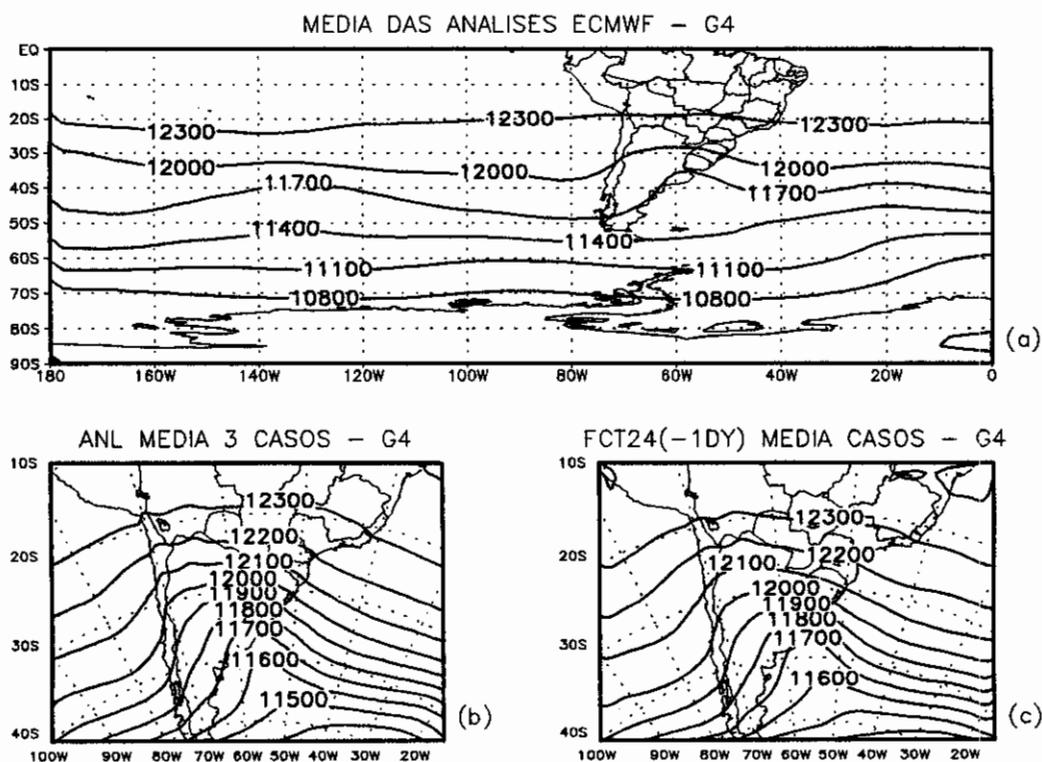


Fig.3.28 - Campos médios de geopotencial em 200 hPa para o dia anterior às datas do grupo 4: (a) análise do ECMWF; (b) análise do JMA; (c) previsão de 24 horas do JMA.

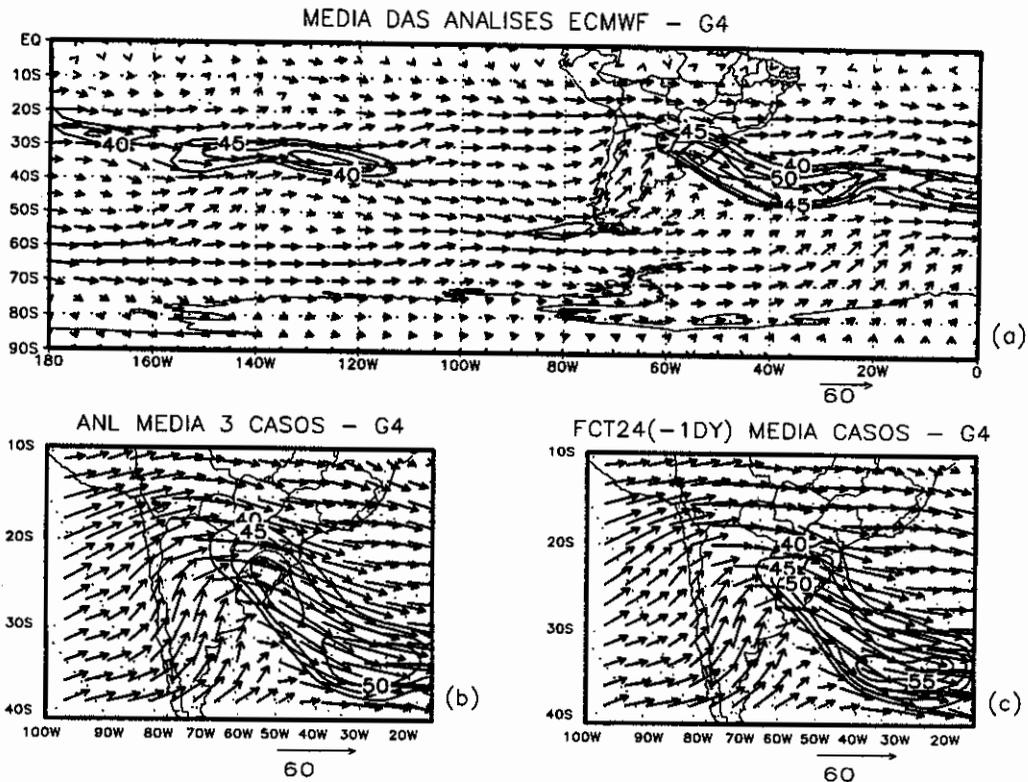


Fig.3.29 - Campos médios da variável do vento em 200 hPa para o dia anterior às datas do grupo 4: (a) análise do ECMWF; (b) análise do JMA; (c) previsão de 24 horas do JMA.

3.4 EOF da Variável Temperatura no Nível σ_1

Das variáveis simuladas e analisadas neste estudo a mais importante é a temperatura próxima à superfície, pois é seu valor, em última instância, o fator importante para o congelamento do vapor de água disponível no ar junto à superfície. A temperatura foi a primeira variável estudada por Algarve (1994) para selecionar os possíveis casos de geadas.

Assim, para a temperatura no nível σ_1 foi feito o cálculo da EOF's para determinar o padrão dominante

sobre o Sul do Brasil. A área estende-se de 100°W até 20°W e de 10°S até 40°S . Nestes cálculos foram consideradas todas as saídas do modelo para simulações com 24 horas de antecedência ao primeiro dia de ocorrência de geada. Conforme mencionado anteriormente a cada caso correspondem 17 saídas com intervalos de 3 horas desde as 12 TMG do dia anterior ao primeiro dia da geada até as 12 TMG do dia seguinte.

O primeiro modo que de acordo com o método contem informações físicas, explica 25% da variância total dos 14 casos. O modo 1 representa o padrão que melhor caracteriza o comportamento da temperatura sobre a Região Sul. A Figura 3.30 mostra para amplitudes negativas, valores negativos de temperatura centrados sobre o Estado do Paraná. Esta posição resulta do deslocamento numa trajetória continental da massa de ar frio no período de dois dias para cada caso.

No gráfico da componente principal correspondente ao modo 1 é notável que a amplitude para cada caso apresenta uma tendência negativa do início ao final da integração (Figura 3.31). Em todos os casos simulados houve ocorrência de geadas nos 3 dias, e em alguns casos até 7 dias, seguintes ao primeiro dia. Isso explica a tendência negativa das amplitudes. As amplitudes captam bem a oscilação diurna que ocorre no meio do período para cada caso. Nesta análise é também possível observar a intensidade relativa dos eventos, por exemplo a geada do caso 12 foi significativamente mais intensa do que as demais. A possível explicação é que no período que

antecedeu este caso ocorreram casos de geadas locais e parciais com curtíssimos intervalos de tempo, na região, mantendo e acentuando o processo de resfriamento na área de estudo (Algarve, 1994). Assim, para amplitudes negativas os "loadings" negativos de temperatura dominam toda a Região Sul e parte do Sudeste do Brasil, indicando portanto temperaturas mais baixas.

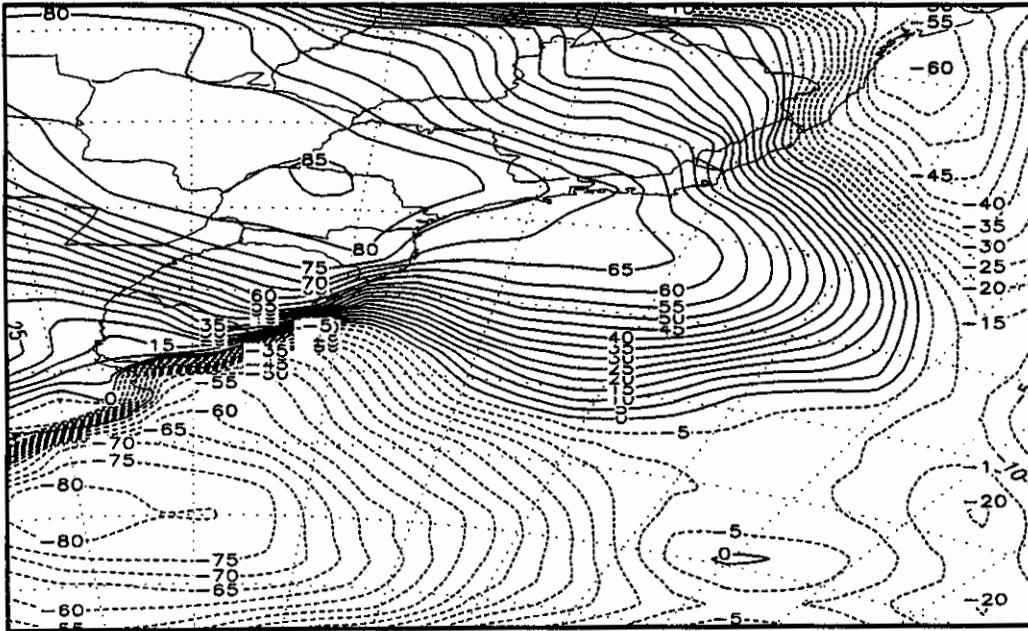


Fig.3.30 - Padrão espacial correspondente ao modo 1 da variável temperatura próxima à superfície.

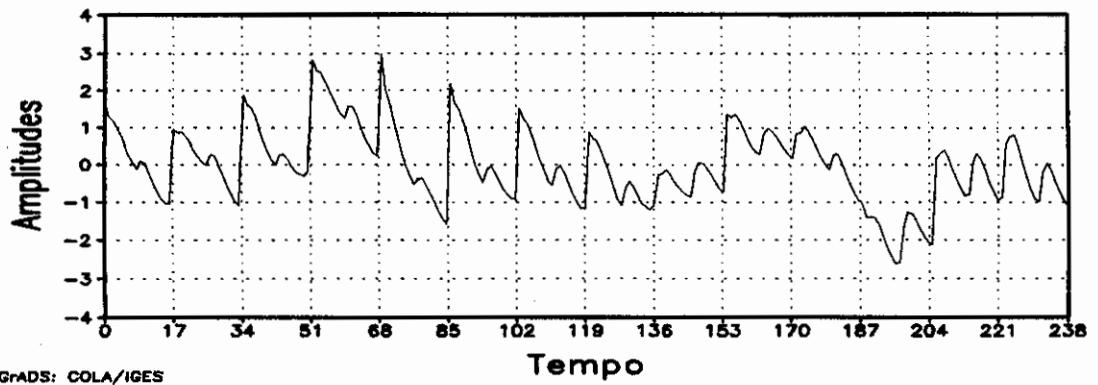


Fig.3.31 - Gráfico da componente principal correspondente ao modo 1 da variável temperatura próxima à superfície, os intervalos do eixo x correspondem aos casos simulados.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve o objetivo de avaliar o modelo JMA para a simulação de geadas intensas na Região Sul do Brasil. Para isso foram feitas simulações usando este modelo com 24 horas e 48 horas de antecedência ao primeiro dia de geada para 14 casos de geadas intensas. O desempenho do modelo foi avaliado considerando quatro variáveis (temperatura próxima à superfície, PNM, ventos e geopotencial em 200 hPa) e comparando os campos simulados com os campos das análises do próprio modelo, bem como com os campos correspondentes nas análises do ECMWF.

Comparando-se as simulações com as análises do próprio modelo do JMA, em geral, o modelo simula bem tanto o padrão como os valores das quatro variáveis, principalmente no que concerne às simulações com 24 horas de antecedência. No caso das simulações com 48 horas de antecedência, embora os padrões simulados e os das correspondentes análises sejam similares, os valores das variáveis em baixos níveis em apenas dois casos não foram bem simulados, ou seja, a temperatura próxima à superfície foi superestimada e a PNM foi subestimada. Isso não é desejável, em particular para o fenômeno estudado pois as condições de ocorrência do mesmo implicam em baixas temperaturas próximas à superfície e dominância de PNM altas na região de interesse.

De acordo com as correlações espaciais entre os campos simulados com 48 horas de antecedência e os campos correspondentes das análises, o modelo teve um pior desempenho para a PNM em dois casos (casos 5 e 6). Para estes casos a correlação foi de 0,75 que foi relativamente menor do que para as demais variáveis. No entanto, considerando a variável em si e tendo em vista que a grade tem 73 longitudes e 55 latitudes, correlações absolutas superiores a 0,27 são estatisticamente significantes ao nível de 95%, conforme um teste t de Student de hipótese de correlação nula (Panofsky e Brier, 1968). Neste caso considera-se o número de graus de liberdade como sendo o menor entre o número de latitudes e longitudes e aplica a regra que correlações significantes ao nível de 95% devem exceder $2/\sqrt{n}$, com n sendo graus de liberdade. Portanto, o campo simulado de PNM, mesmo para estes dois casos, que são os relativamente piores, é razoável para ser usado nos trabalhos rotineiros do previsor de tempo.

Comparações mais minuciosas foram feitas entre os campos médios simulados (com 24 e 48 horas de antecedência) e os correspondentes campos médios das análises considerando as geadas anteriormente classificadas pôr Algarve (1994) em três grupos distintos. E outras palavras, as comparações foram feitas para cada grupo e as médias referem-se aos casos de geadas incluídos em cada grupo. Nestas comparações foram também usadas as análises do ECMWF para as variáveis correspondentes e para toda a área da metade oeste do hemisfério Sul. Isso permitiu avaliar se a análise do modelo do JMA reproduz a análise do

ECMWF, bem como avaliar como o padrão da circulação de grande escala no Pacífico afeta o padrão regional.

Para todos os grupos a simulação com 48 horas se antecedência, não reproduz muito bem principalmente os valores das variáveis dos baixos níveis (temperatura próxima à superfície e PNM). No entanto a simulação com 24 horas de antecedência produz campos muito similares aos das análises, tanto na intensidade como na posição dos sistemas.

É importante salientar que comparando os campos médios das análises do dia anterior e os campos médios previstos (por exemplo Figura 3.20b e 3.8c) concluiu-se que o modelo do JMA tem um ótimo desempenho para simular as características da circulação nos altos níveis.

Nas simulações com 24 horas e 48 horas de antecedência a circulação nos altos níveis para todos os grupos mostra um intenso cavado sobre o Sul do Brasil, com ventos fortes no seu setor leste. Este padrão é muito similar ao padrão mostrado pelas análises do ECMWF, mostrando que o padrão regional faz parte do padrão de grande escala no Pacífico.

É interessante ressaltar que a temperatura próxima à superfície tanto para as análises como para as simulações de 24 horas de antecedência mostram valores em torno de 5°C na Região Sul. Isso sugere este valor ser o limite para indicar geada no caso do uso do modelo de JMA.

Este trabalho mostra que é possível utilizar o modelo do JMA para prever as geadas, em particular com 24 horas de antecedência. No entanto, para uso operacional do modelo, propõe-se alguns testes adicionais.

Algumas sugestões para estender o presente trabalho são:

1) fazer as mesmas simulações feitas neste trabalho utilizando os dados reanalisados do ECMWF e do National Centers for Environmental Prediction (NCEP).

2) comparar o desempenho do modelo em função de dados de inicialização, aplicando as mesmas técnicas de utilizadas neste trabalho.

3) estudar a sensibilidade do modelo do JMA para os casos de geadas parciais e locais, fazendo as simulações das mesmas utilizando como dados de entrada as reanálise do NCEP e do ECMWF.

4) utilizar o modelo do JMA de forma experimental durante o período de geadas, ou durante alguns meses, por exemplo de junho a julho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Algarve, V. R. **Características da circulação atmosférica associada à ocorrência de geadas no Sul do Brasil.** São José dos Campos, 200 p. Dissertação (mestrado em meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1994.
- Avila, A. M. H.; Ferreira, N. J.; Rao, V. B.; Oyamburo, N. Influência da circulação subantártica na ocorrência de um episódio frio na Região Sul do Brasil. **Ciências Espaciais e da Atmosfera na Antártica.** Transtec Editorial, 1995.
- Businger, J. A.; Wyngaard, J. C.; Izumi, Y.; Bradley, E. F. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *Journal of the Atmospheric Sciences.* 28(1):181-189, Mar. 1971.
- Camargo, A. P. de. Geadas de radiação e possibilidade de previsão e prevenção para a cafeicultura brasileira. São José dos Campos (SP). Palestra realizada no INPE em 9 de Maio de 1984.
- Cavalcanti, I. F. A. Alguns aspectos da circulação da atmosfera próxima à América do Sul e interações com a região Antártica. São José dos Campos: INPE, 1984. 87 p. (INPE-3308-PRE/618).

- Davies, H. C. A lateral boundary formulation for multi-level prediction models. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*. 102(432):405-418. 1976.
- Fortune, M. A.; Kousky, V. E. Two severe freezes in Brasil: precursors and synoptic evolution. *Monthly Weather Review*. 111(01):181-196, Jan. 1983.
- Fortune, M. A.; Kousky, V. E.; Ferreira, N. J. Duas geadas críticas no Brasil: precursores no oceano pacífico e evolução na América do Sul. São José dos Campos: INPE, 1982. (INPE-2587-PRE/235).
- Geleyn, F. J. On a simple, parameter-free partition between moistening and precipitation in the Kuo scheme. *Monthly Weather Review*. 113(3):405-407, Mar. 1985.
- Hamilton, M.G.; Tarifa, J.R. Synoptic aspects of a polar outbreak leading to frost in tropical Brazil, July 1972. *Monthly Weather Review*. 106(11):1545-1556, Nov. 1978.
- Innocentini, V.; Caetano, E. S. A case study of the 9 August 1988 South Atlantic storm: numerical simulations of the wave activity. *Weather and Forecasting*. 11(1):78-88, Mar. 1996.
- Kousky, V. E.; Kayano, M. T. Principal modes of outgoing lonwave radiation and 250 mb circulation for the South American sector. *Journal of Climate*. 7(7):1131-1143, July 1994.

- Kurihara, K.; Ueno, M. Evaporation of raindrops. Physical processes in numerical predictions models. Numerical Prediction Division Rep., Japan Meteorological Agency, (34):97-103, 1988. (in japanese).
- Kutzbach, J. E. Empirical eigenvectors of sea-level pressure, surface temperature, and precipitation complexes over North America. *Journal of Applied Meteorology*. 6(5):791-802, Oct. 1967.
- Lorenz, E. N. Empirical orthogonal functions and estatistical weather prediction. *Science Report 1. Statistical forecasting Project. Depto of Meteor., Mass, Institute of Technology*. 1956.
- Mellor, G. L.; Yamada, T. A hierarchy of turbulence-closure models for planetary boundary layer. *Journal of Atmospheric Sciences*. 31(7):1791-1806, Oct. 1974.
- Nagata, M.; Ogura, Y. A modeling case study of interaction between heavy precipitation and low-level jet over Japan in the baiu season. *Monthly Weather Review*. 119(6):1309-1336, June 1991.
- Nery, J. T.; Seluchi, M.; Brynsztein, S. Modelo de previsão estatística de geadas para a região de Maringá. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. 3:97-101, 1995.
- Nimer, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1979. 422 p.

- Ometto, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agromômica Cerer. 1981. 425p.
- Panofsky, H.; Brier, G. W. **Some applications of Statistics to Meteorology**. Pennsylvania: Pennsylvania University Park, 1968. Cap.6, 126-161.
- Seluchi, M. E.; Nery, J. T. Condições meteorológicas associadas a la ocorrência de heladas en la región de Maringá. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 7(1):523-534, 1992.
- Storch, H. V.; Roeckner, E. Verification of general circulation models applied to the Hamburg University GCM. Part I: test of individual climate states. *Monthly Weather Review*. 111(10):1965-1976, Oct. 1983.
- Tarifa, J. R.; Pinto, H. S.; Alfonsi, R. R.; Pedro Jr, M. J. 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*. 29(12):1363-1374, dez. 1977.
- Tatsumi, Y. An economical explicit time integrationscheme for primitive model. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. 61(2):269-288, Apr. 1983.
- Tubelis, A.; Nascimento, F. J. L. do. **Meteorologia descritiva, fundamentos e aplicações brasileiras**. São Paulo: Nobel, 1984. 374 p.

Yamagishi, Y. Simulation of the air mass transformation process using a numerical model with the detailed boundary layer parametrization. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. 58(5):357-377, Oct. 1980.

APÊNDICE A

MODELO DE ÁREA LIMITADA (JMA)

O modelo atmosférico utilizado, doravante MAL, é de área limitada e foi desenvolvido por pesquisadores da Divisão de Previsão Numérica do Japan Meteorological Agency (Yamagishi, 1980; Tatsumi, 1983) e modificado por Nagata e Ogura (1991).

A.1 Características Gerais

O MAL utiliza as equações do movimento com aproximação hidrostática, da termodinâmica, de conservação do vapor da água e equação da continuidade de massa, e incorpora processos atmosféricos diabáticos, tais como convecção cumulus, condensação de grande escala, e processos turbulentos na camada limite planetária.

As variáveis prognósticas são as componentes zonal e meridional do vento (u e v , respectivamente), a temperatura potencial (θ), diferença entre a pressão no topo do modelo ($P_T = \text{constante}$) e a pressão na superfície P_0 ($\pi = P_0 - P_T$) e a umidade específica (q). As variáveis diagnósticas são altura geopotencial (ϕ) e velocidade vertical em coordenadas de pressão (ω).

A.2 Projeção

A projeção escolhida para este trabalho foi a estereográfica polar, com uma grade horizontal de

aproximadamente 100 km e centrada em 60°S e 55°W. A área de integração se estende de 100°W a 10°W e de 40°S a 10°S, com 73 pontos na direção zonal e 55 pontos na direção meridional (Figura A.1).

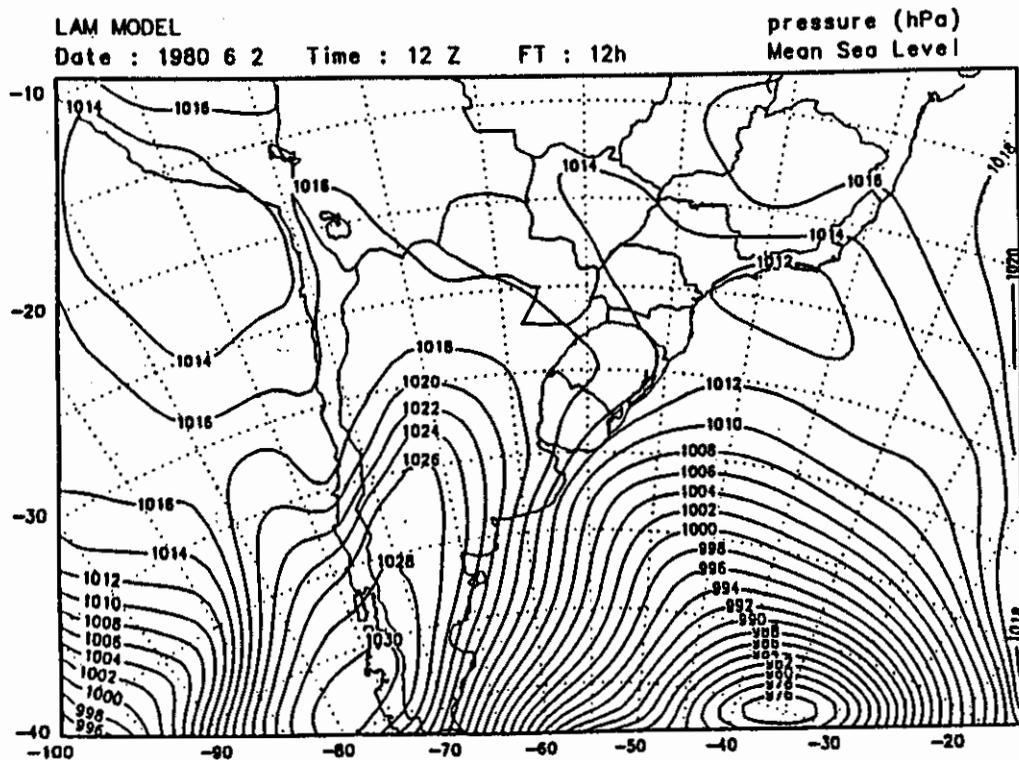


Fig.A.1 - Área de integração do modelo utilizada neste trabalho.

A.3 Distribuição Vertical das Variáveis

Verticalmente as camadas do modelo distribuem-se de forma variável, estendendo-se de $p=p_0$ até $p=p_T$, sendo $p_T=50\text{hPa}$. Próximo à superfície, a resolução vertical é mais fina do que acima (Figura A.2) de forma a totalizar 16 níveis verticais no sistema de coordenadas sigma (σ), com seu topo em 50 hPa. Os níveis σ são definidos por:

$$\sigma = \frac{P - P_T}{P_S - P_T} \quad , \quad (A.1)$$

para as pressões (P) correspondentes a 1000, 990, 970, 940, 900, 850, 790, 720, 640, 550, 450, 350, 250, 150, 100 e 50 hPa, e P_S de 1000 hPa.

	níveis de σ	níveis de u, v, θ e q	espessura
	0		
k=16	----- 50	25	50
k=15	----- 100	75	50
k=14	----- 150	125	50
k=13	----- 250	200	100
k=12	----- 350	300	100
k=11	----- 450	400	100
k=10	----- 550	500	100
k= 9	----- 640	595	90
k= 8	----- 720	680	90
k= 7	----- 790	755	60
k= 6	----- 850	820	60
k= 5	----- 900	875	50
k= 4	----- 940	920	40
k=,3	----- 970	955	30
k= 2	----- 990	980	20
k= 1	----- 1000	995	10

Fig. A.2 - Distribuição vertical dos níveis σ . Os níveis σ e as espessuras das camadas estão em hPa, sendo pressão na superfície (p_0) de 1000 hPa.

Todas as variáveis prognósticas ($\pi = P_S - P_T$, u, v, θ , q) são definidas no centro de cada camada. A velocidade vertical sigma (σ) é definida nas interfaces, e as condições de fronteira na base e no topo são:

$$\dot{\sigma} = \frac{d\sigma}{dt} = 0 \quad \text{em} \begin{cases} \sigma = 0 \\ \sigma = 1 \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

A.4 Distribuição Horizontal das Variáveis

Todas as variáveis prognósticas ($\pi = P_S - P_T$, u , v , θ , q), assim como as diagnósticas (ϕ , ω), são arranjadas na grade de Arakawa tipo B na horizontal segundo a Figura A.3.

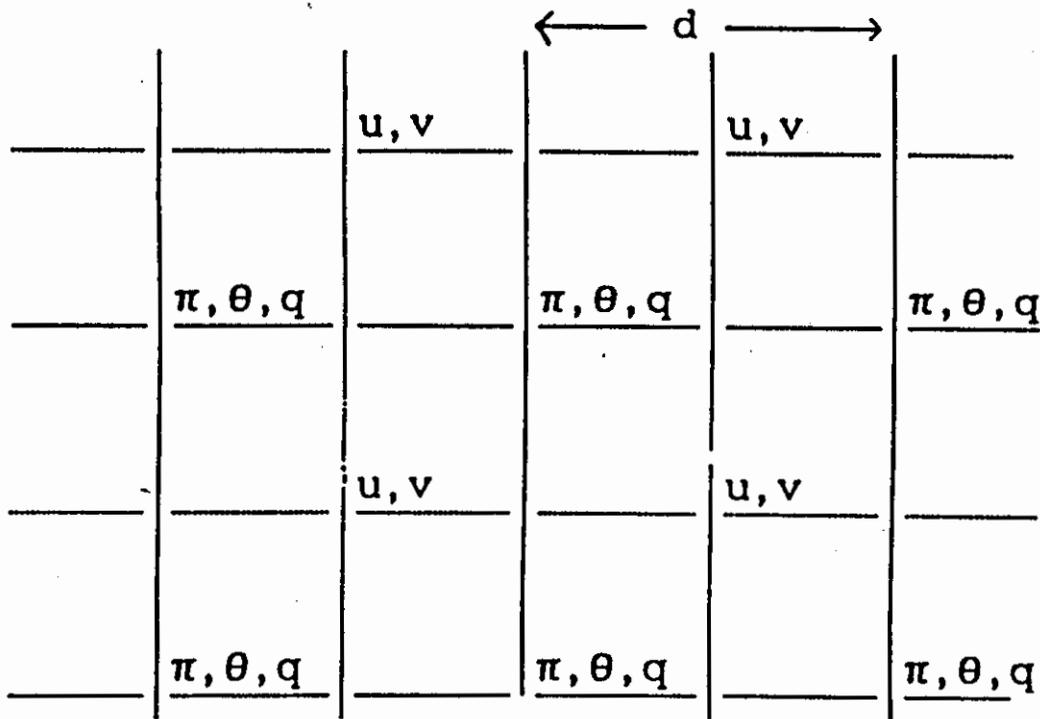


Fig. A.3 - Grade horizontal Arakawa tipo B. Os componentes do vetor velocidade (u, v) estão deslocados em relação às outras variáveis (π, θ e q).

A.5 Equações do Modelo

O modelo é hidrostático e emprega as equações discretizadas em forma de fluxo. As equações do modelo escritas em forma de fluxo são:

A.5.1 Equações de Movimento

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\pi}{m^2} u \right) = -\frac{\partial}{\partial x} (u \cdot u) - \frac{\partial}{\partial y} (v \cdot u) - \frac{\partial}{\partial \sigma} (\dot{\sigma} \cdot u) + \pi v \left\{ \frac{f}{m^2} + v \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{m} \right) - u \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{m} \right) \right\}$$

$$-\frac{\pi}{m} \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial x} + C_p \theta \frac{\partial}{\partial x} (P^k) \right\} + \frac{\pi}{m^2} F_u - \frac{g}{m^2} \left(\frac{\partial \vec{\tau}}{\partial \sigma} \right)_x$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\pi}{m^2} v \right) = -\frac{\partial}{\partial x} (u \cdot v) - \frac{\partial}{\partial y} (v \cdot v) - \frac{\partial}{\partial \sigma} (\dot{\sigma} \cdot v) + \pi u \left\{ \frac{f}{m^2} + v \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{m} \right) - u \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{m} \right) \right\}$$

$$-\frac{\pi}{m} \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial y} + C_p \theta \frac{\partial}{\partial y} (P^k) \right\} + \frac{\pi}{m^2} F_v - \frac{g}{m^2} \left(\frac{\partial \vec{\tau}}{\partial \sigma} \right)_y \quad (\text{A.3})$$

onde: F_u e F_v representam a difusão horizontal para u e v , $P^k = P^{R/C_p}$, $u^* = \pi u$, $v^* = \pi v$, e $\vec{\tau}$ é o cisalhamento vertical devido aos turbilhões, o vetor fluxo de massa é dado por $(\pi u, \pi v, \pi \dot{\sigma}) / m^{**}$, onde $\pi = P_{\text{sup}} - P_{\text{topo}}$, e m é o fator mapa da projeção. Os demais símbolos tem seu significado usual (u, θ, v).

A.5.2 Equação da Termodinâmica

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\pi}{m^2} \theta \right) = -\frac{\partial}{\partial x} (u^* \theta) - \frac{\partial}{\partial y} (v^* \theta) - \frac{\partial}{\partial \sigma} (\dot{\sigma}^* \theta) + \frac{\pi}{m^2} F_\theta + \frac{\pi}{m^2} Q + \frac{g}{C_p} \frac{1}{m^2 p^k} \frac{\partial H}{\partial \sigma} \quad (\text{A.4})$$

onde F_θ representa a difusão horizontal de calor, Q é o aquecimento diabático por unidade de massa e H o fluxo vertical turbulento aquecimento.

A.5.3 Equação para o Vapor de Água

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\pi}{m^2} q \right) = -\frac{\partial}{\partial x} (u^* q) - \frac{\partial}{\partial y} (v^* q) - \frac{\partial}{\partial \sigma} (\dot{\sigma}^* q) + \frac{\pi}{m^2} F_q + \frac{\pi}{m^2} M + \frac{g}{m^2} \frac{\partial E^*}{\partial \sigma} \quad (\text{A.5})$$

onde q é a umidade específica, F_q é a difusão horizontal de vapor de água, M é a taxa de variação de vapor de água devido à condensação (ou evaporação) e E é o fluxo vertical turbulento do vapor de água.

A.5.4 Equações da Continuidade de Massa

$$\frac{\partial \pi}{\partial t m^2} = -\frac{\partial u^*}{\partial x} - \frac{\partial v^*}{\partial y} - \frac{\partial \dot{\sigma}^*}{\partial \sigma} \quad (\text{A.6})$$

A.5.5 Equação Hidrostática

$$\frac{\partial \phi}{\partial \sigma} = -C_p \theta \frac{\partial P^k}{\partial \sigma} \quad (\text{A.7})$$

onde ϕ é o geopotencial.

A.6 Processos Físicos

Na parametrização dos fluxos turbulentos foi empregado o modelo de fechamento nível 2 (Mellor e Yamada,

1974). Os fluxos de calor e momentum na superfície são calculados segundo a teoria da similaridade (Businger et al., 1971). A temperatura do nível do mar é obtida por interpolação dos dados climáticos mensais para os pontos de grade e é fixada durante a integração, enquanto a temperatura da superfície do solo é prognosticada pelo método força restauradora Brumalker. A integração temporal é feita usando o esquema explícito econômico de Tatsumi (1983). O passo de tempo a ser usado é determinado pelo próprio modelo podendo chegar a ser de até 900 segundos em função do espaçamento da grade e da máxima velocidade detectada.

Para simular os processos de precipitação o modelo consiste de dois esquemas, chamados de escala de grade e de parametrização de convecção cúmulos. Uma versão de parametrização de esquema tipo Kuo modificada por Geleyn (1985) é usada para convecção cúmulos ao invés do esquema de ajustamento convectivo do modelo original.

O efeito de evaporação de chuva precipitando produzida pelo processo condensação, para a escala de grade, está incorporada no modelo de forma similar a Kurihara e Ueno (1988).

O modelo é integrado de 48 a 72 horas e inicializado com os dados da análise global do ECMWF interpolados para a grade do modelo. As análises usadas estão disponíveis nos níveis de 1000, 850, 700, 500, 300, 200, e 100 hPa e as variáveis são interpoladas para os níveis σ utilizando interpolação cúbica.

A cada passo de tempo as variáveis prognósticas do modelo são modificadas ao longo de uma faixa de cinco pontos de grade mais externos, junto às fronteiras do domínio usado, através de uma interpolação entre os valores das variáveis do modelo e da análise do ECMWF como em Davies (1976).

APENDICE B

SIMULAÇÕES COM 24 HORAS DE ANTECEDÊNCIA E ANÁLISES DO
MODELO JMA

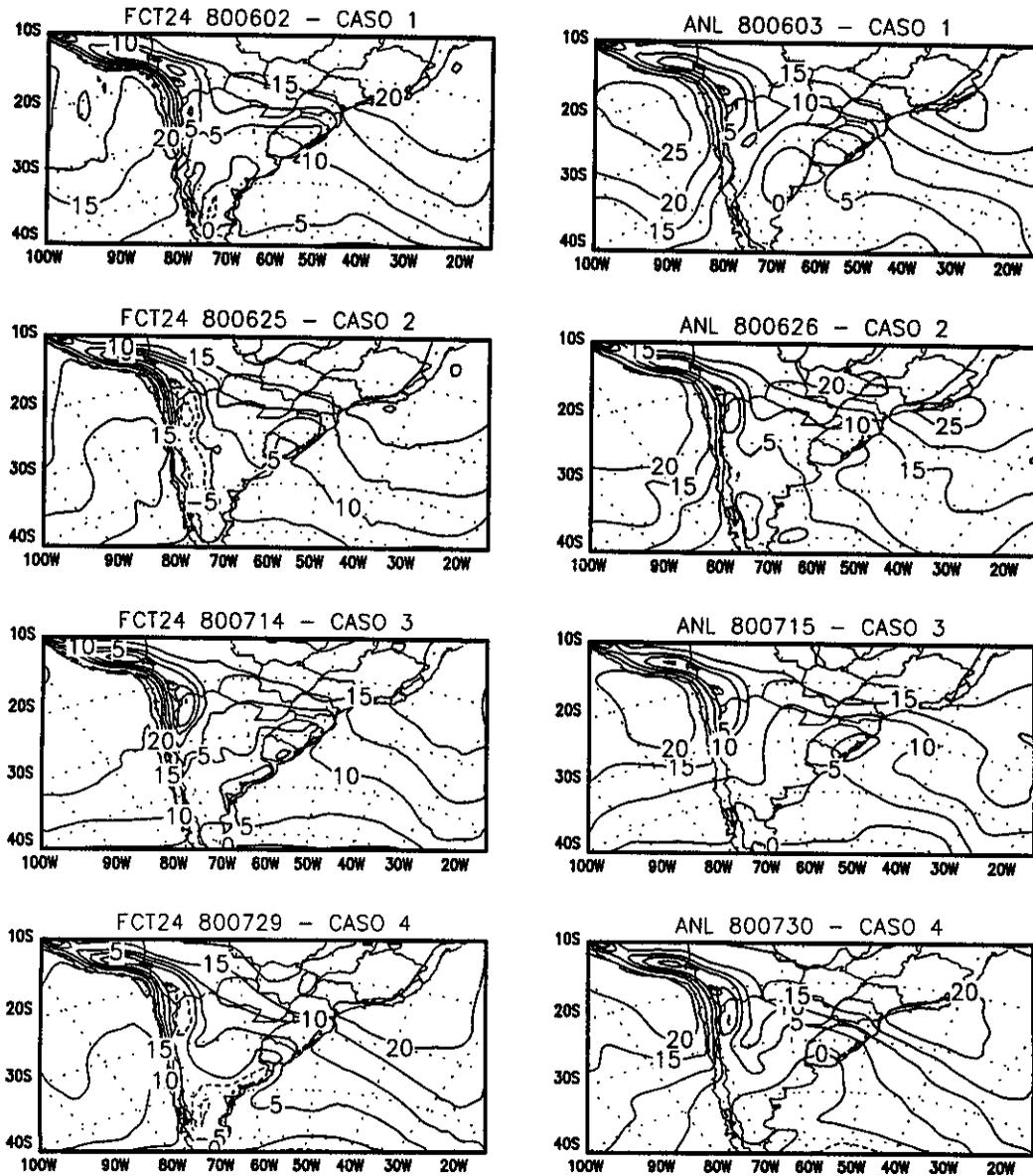


Fig. B.1 - Simulações do modelo JMA para a variável
temperatura no nível σ_1 ($^{\circ}\text{C}$).

(continua)

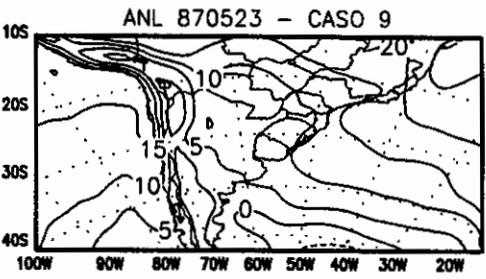
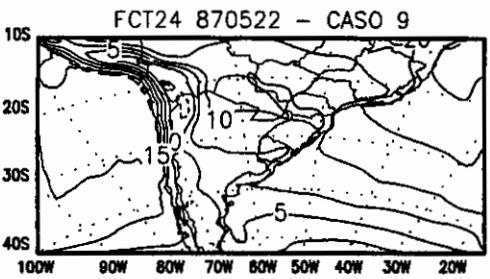
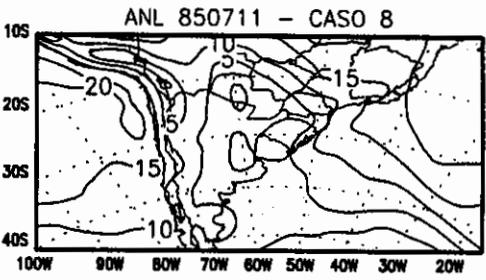
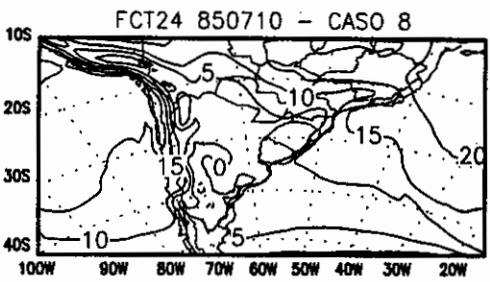
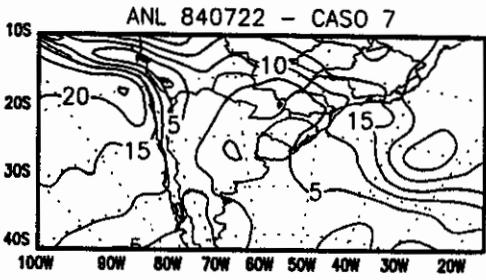
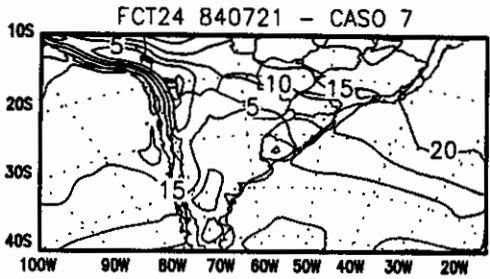
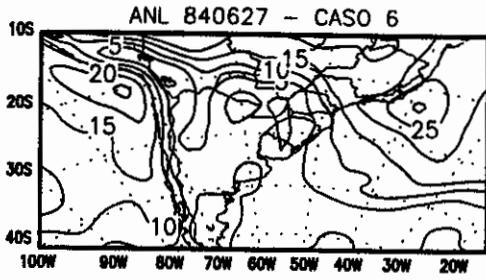
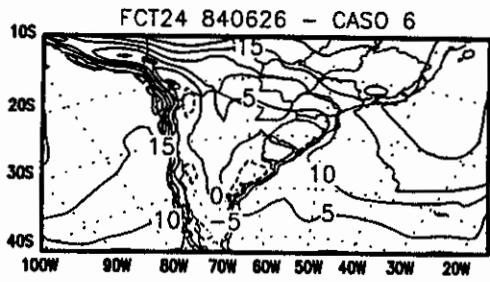
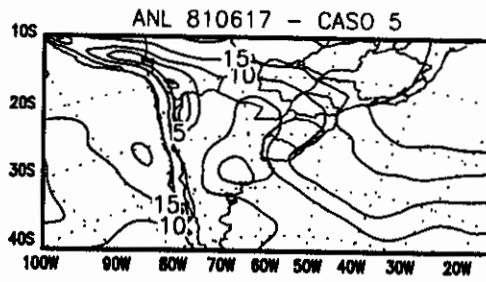
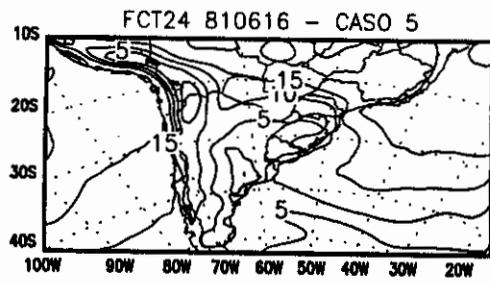


Fig. B.1 - Continuação.

(continua)

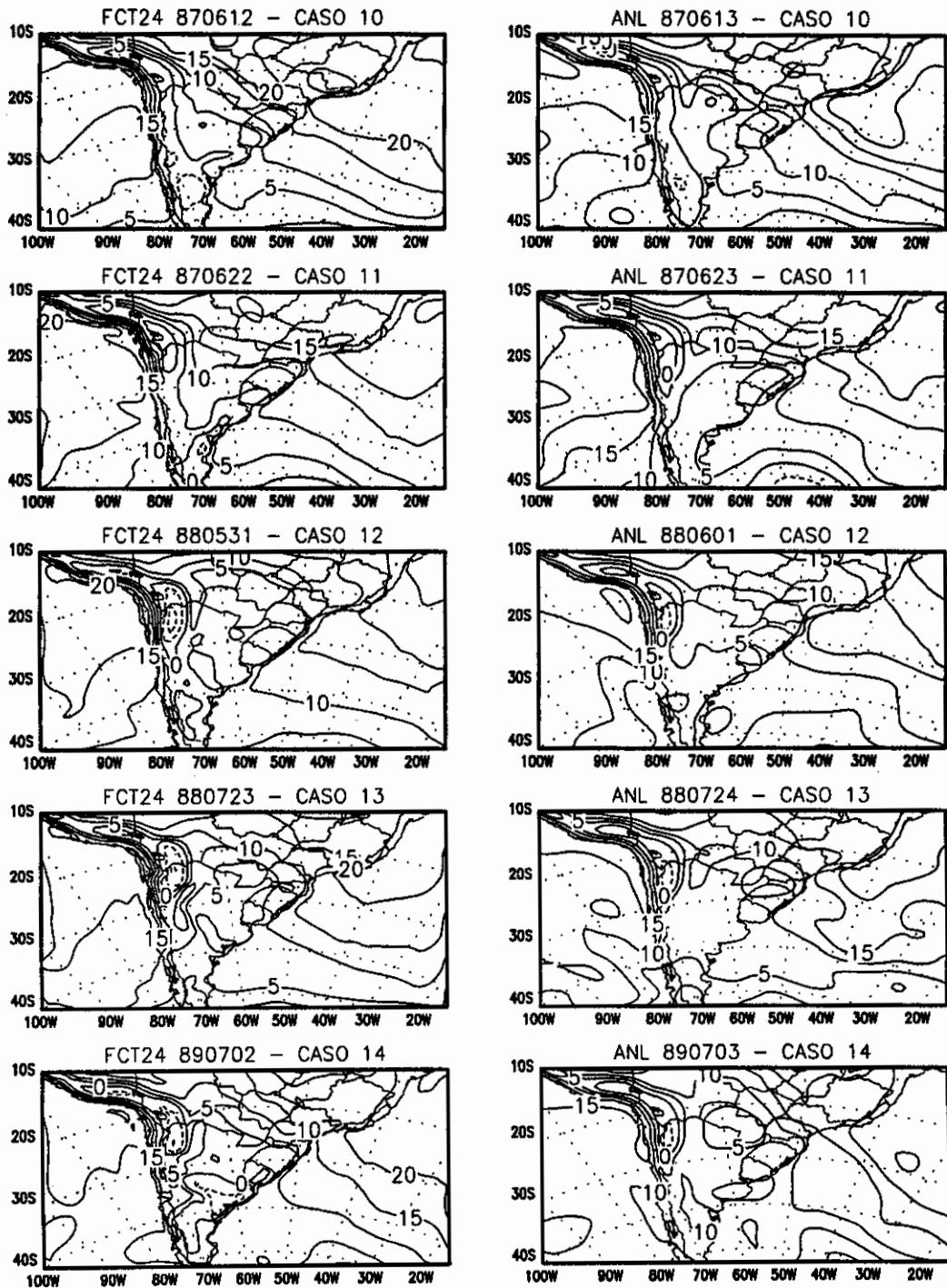


Fig. B.1 - Conclusão.

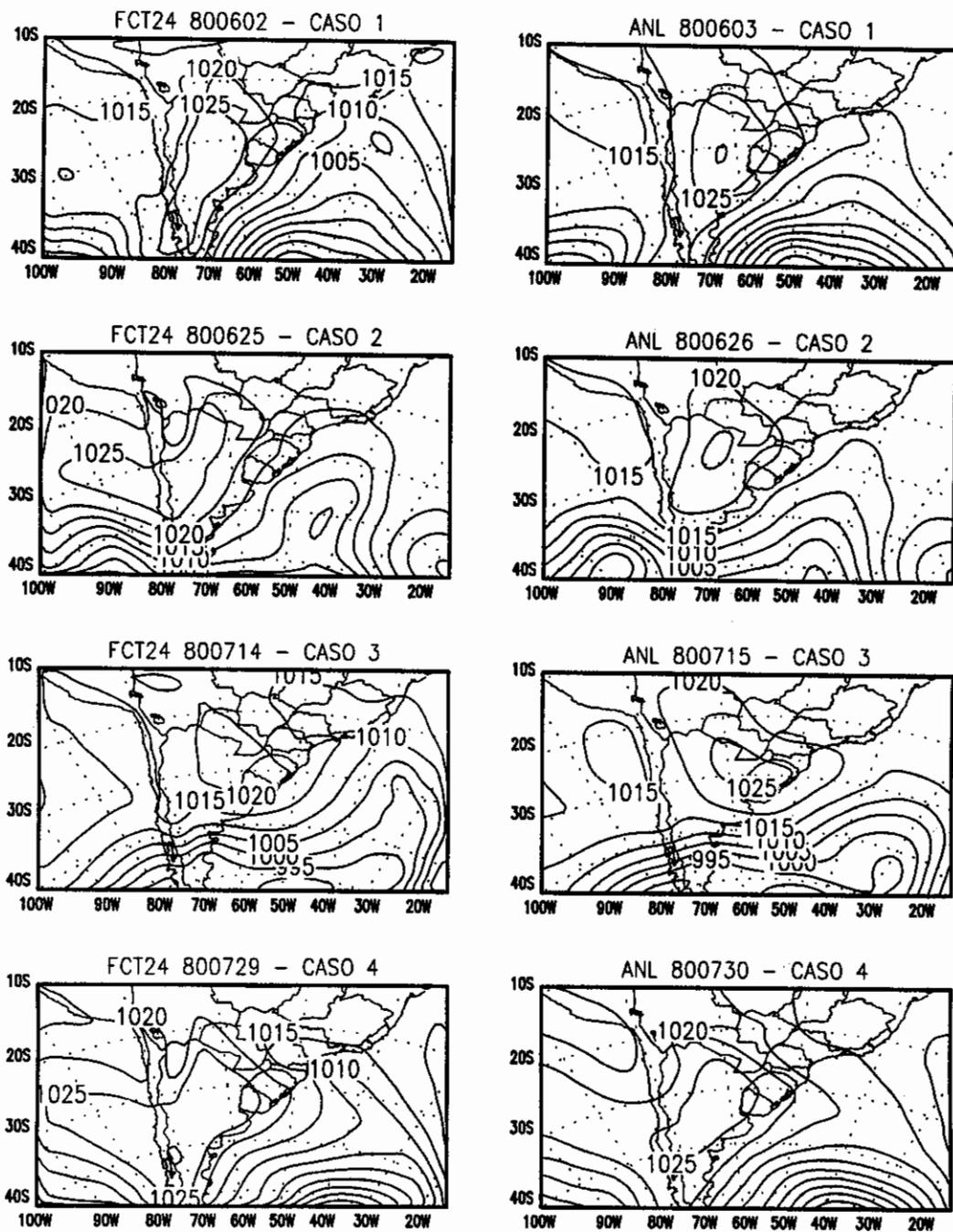


Fig. B.2 - Simulações do modelo JMA para a variável PMN (hPa) .

(continua)

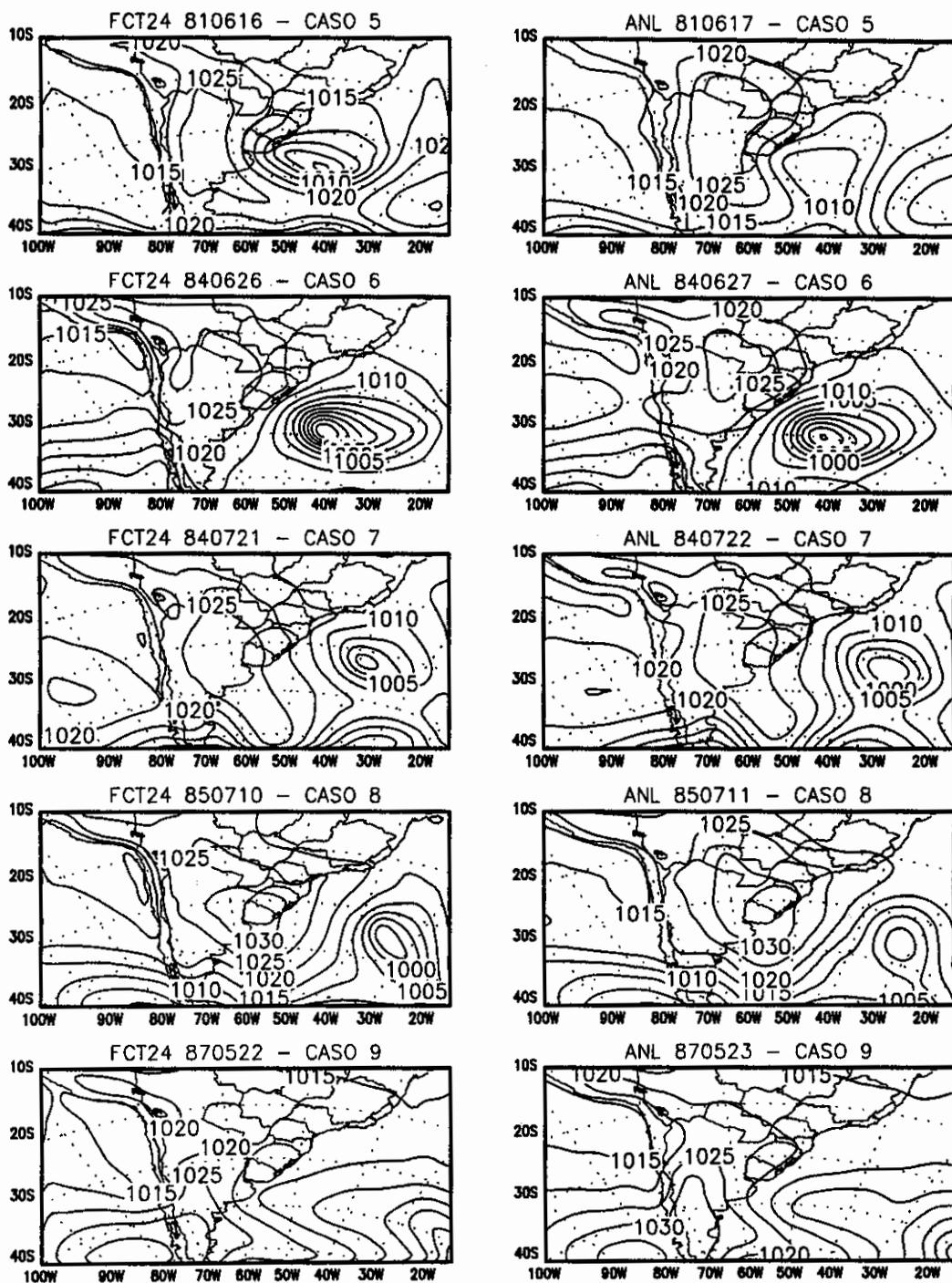


Fig. B.2 - Continuação.

(continua)

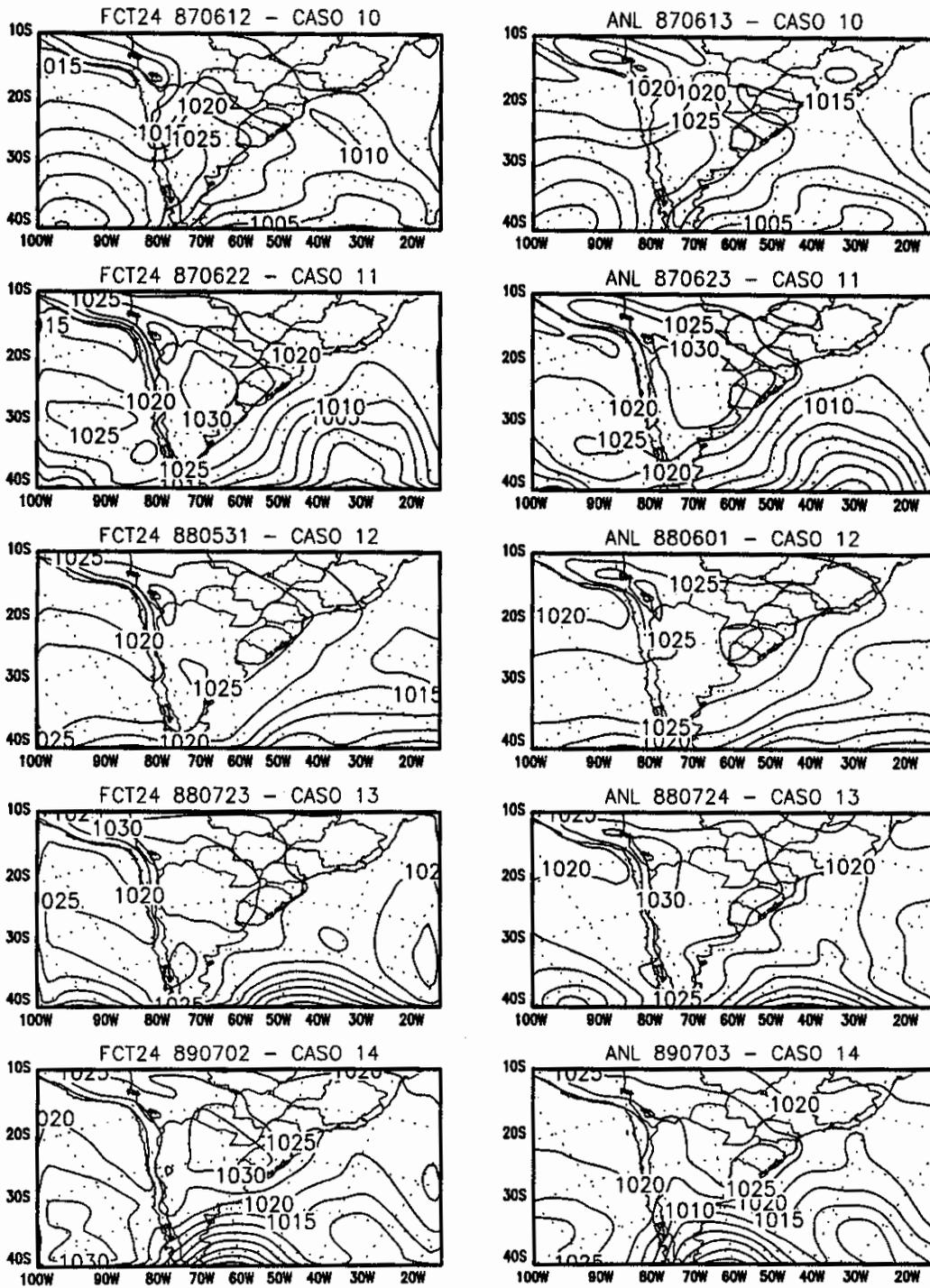


Fig. B.2 - Conclusão.

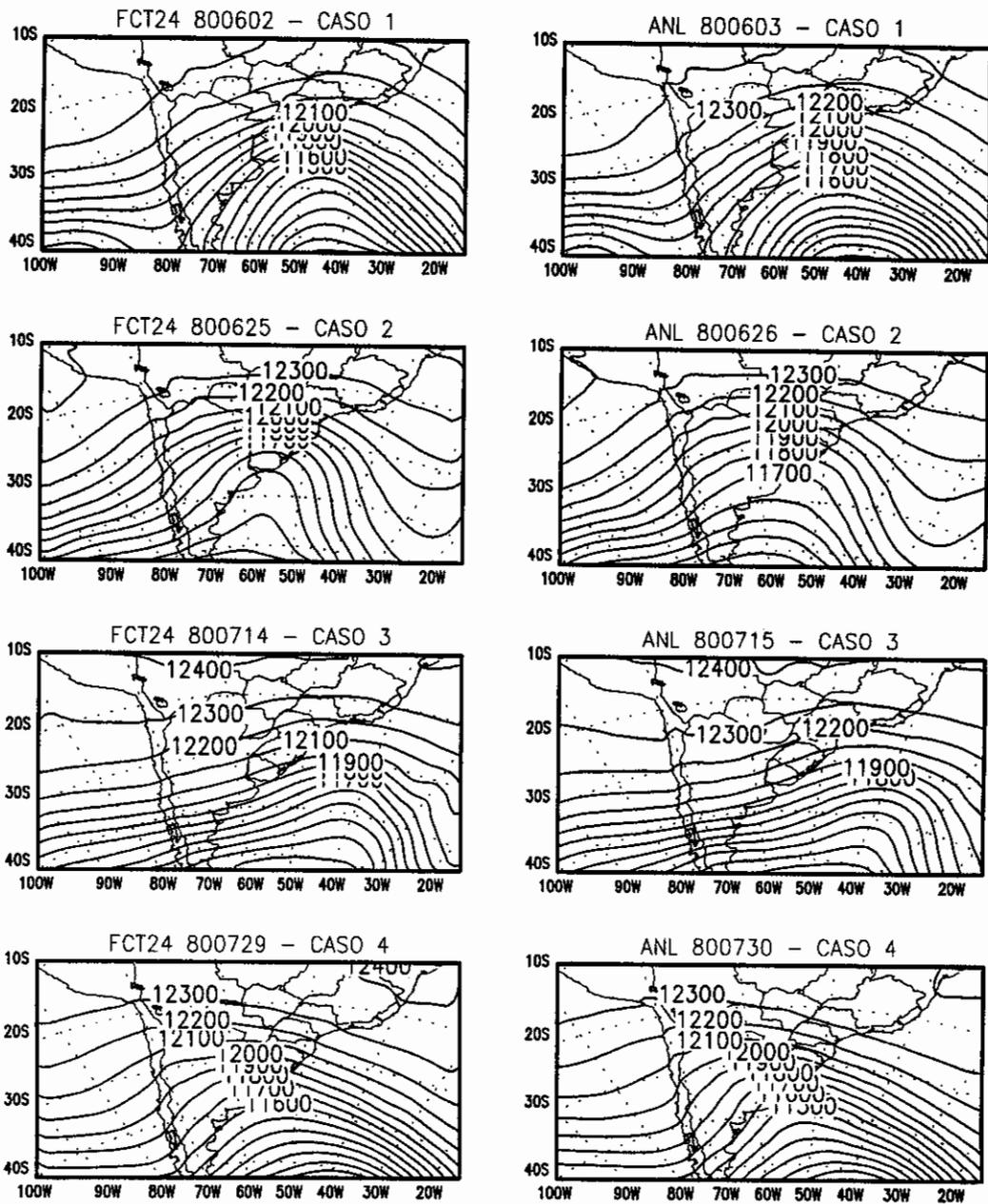


Fig. B.3 - Simulações do modelo JMA para a variável geopotencial no nível de 200 hPa.

(continua)

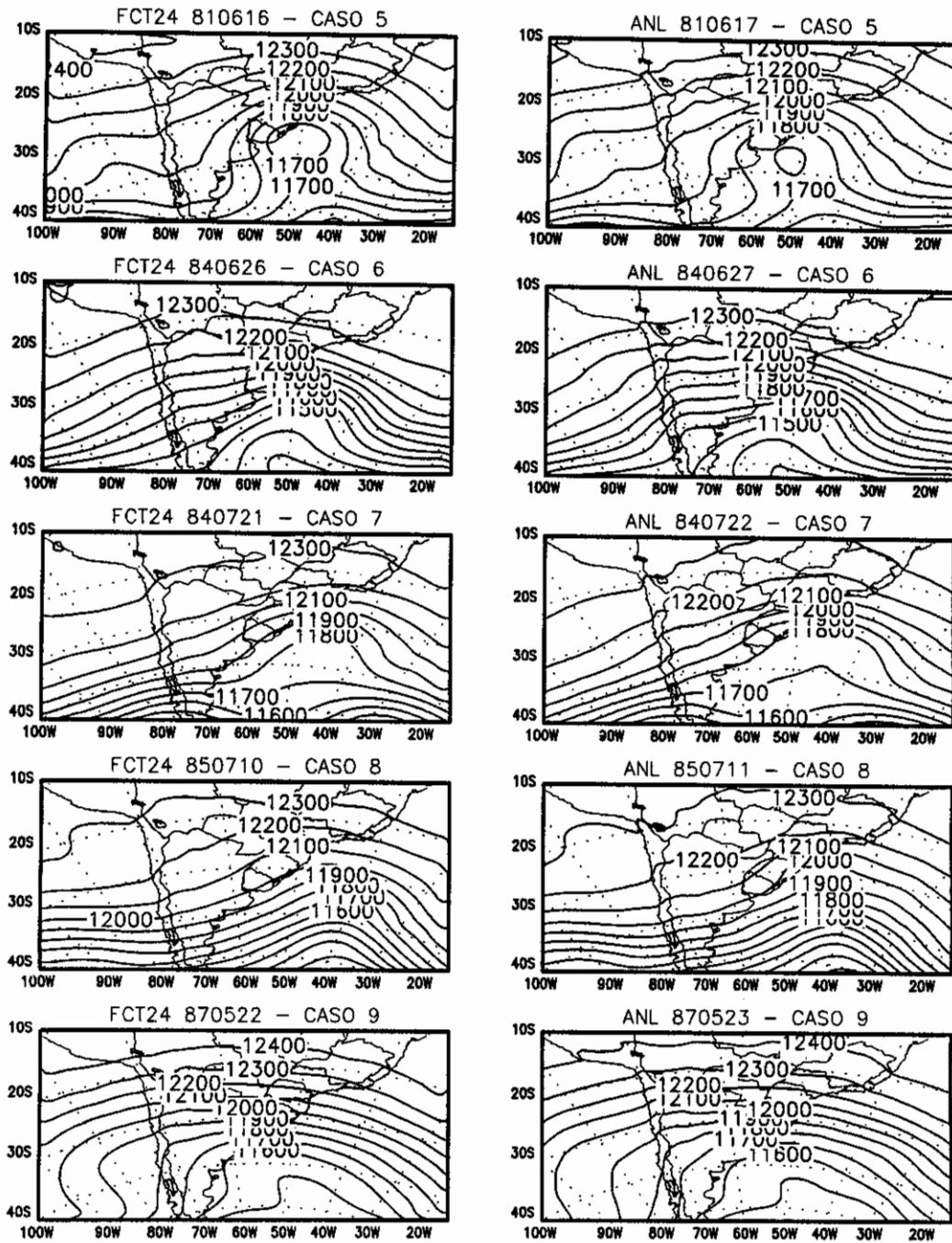


Fig. B.3 - Continuação.

(continua)

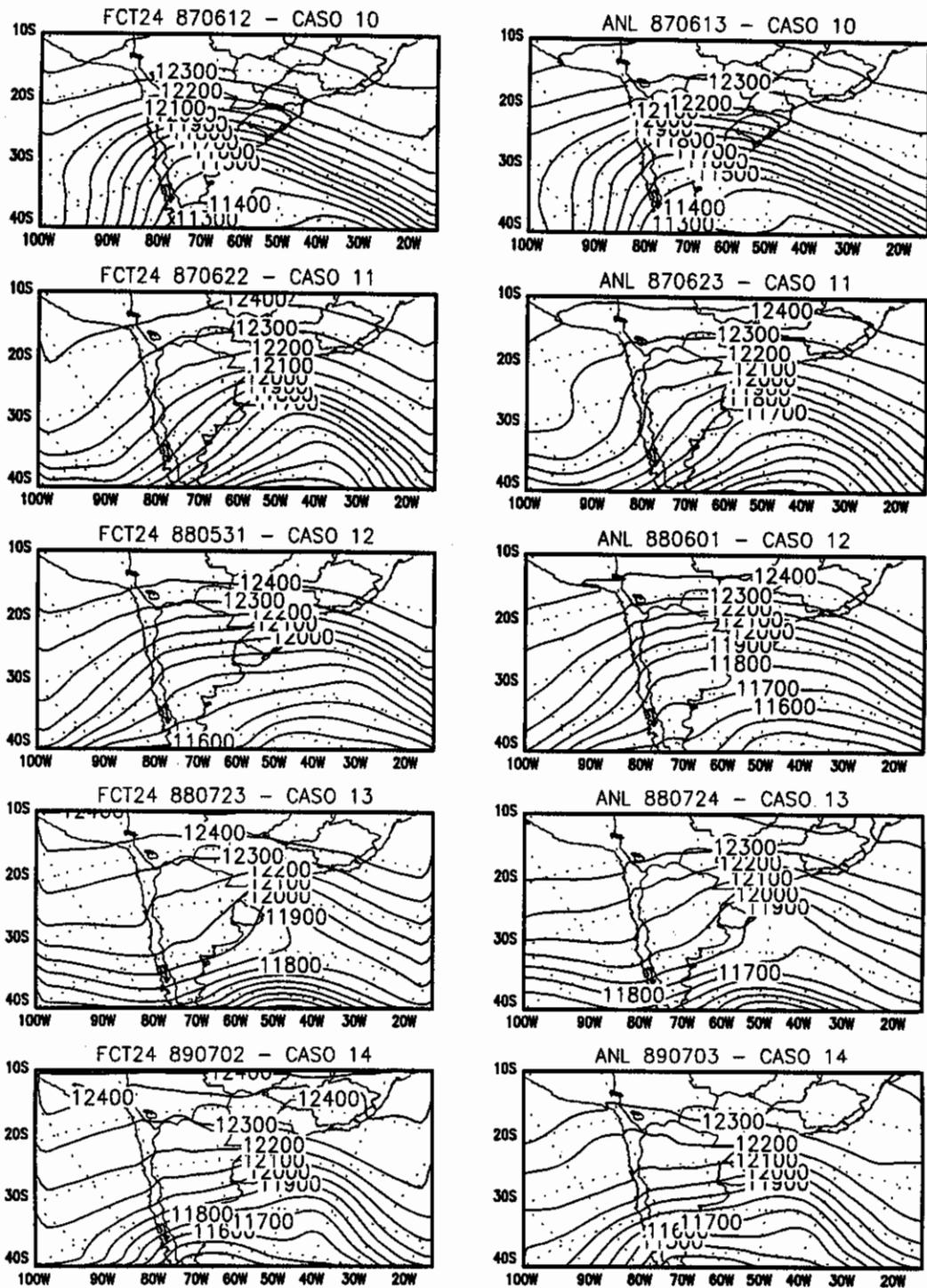


Fig. B.3 - Conclusão.

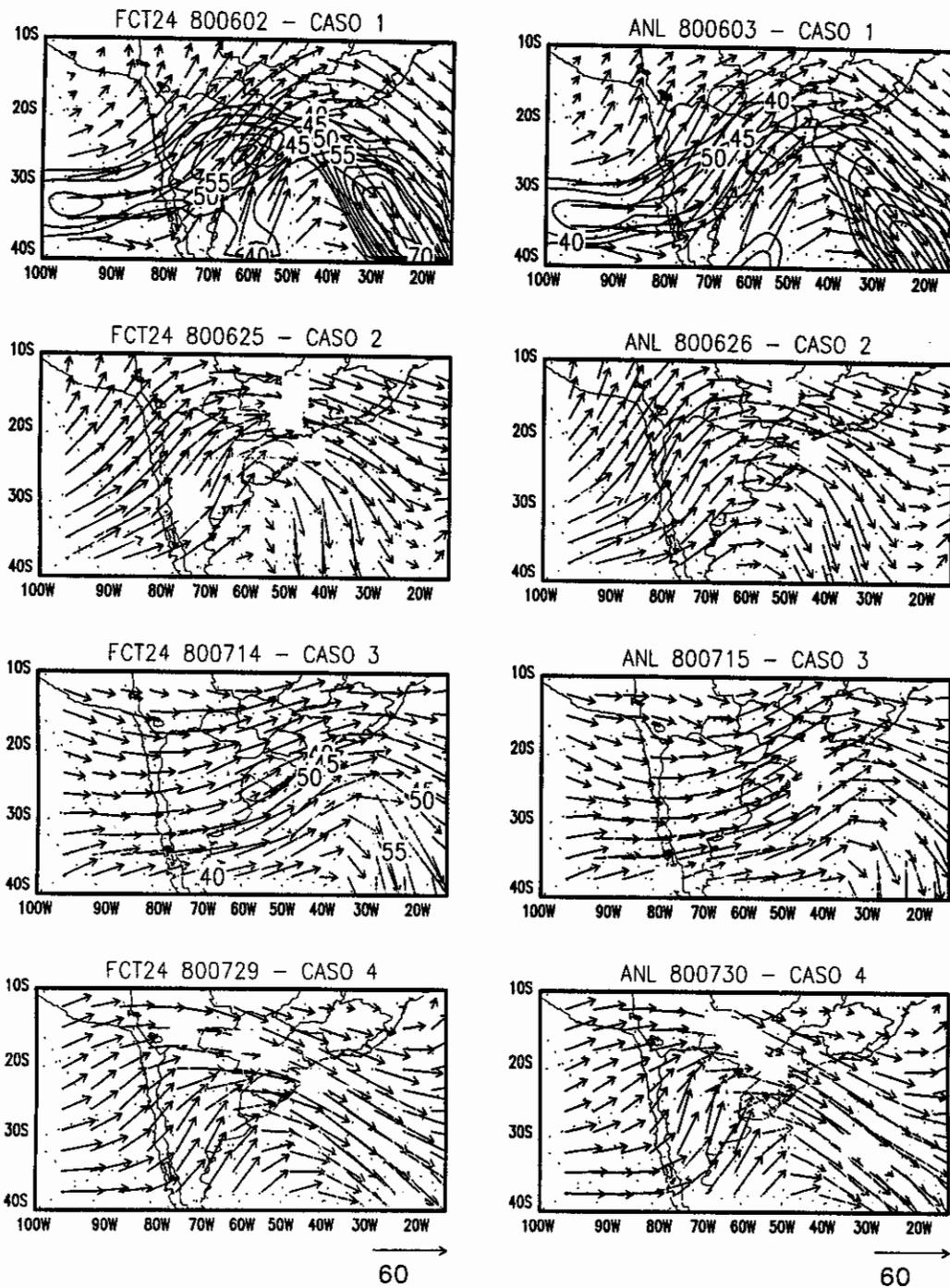


Fig.B.4 - Simulação do modelo JMA para a variável vento no nível de 200 hPa (m/s).

(continua)

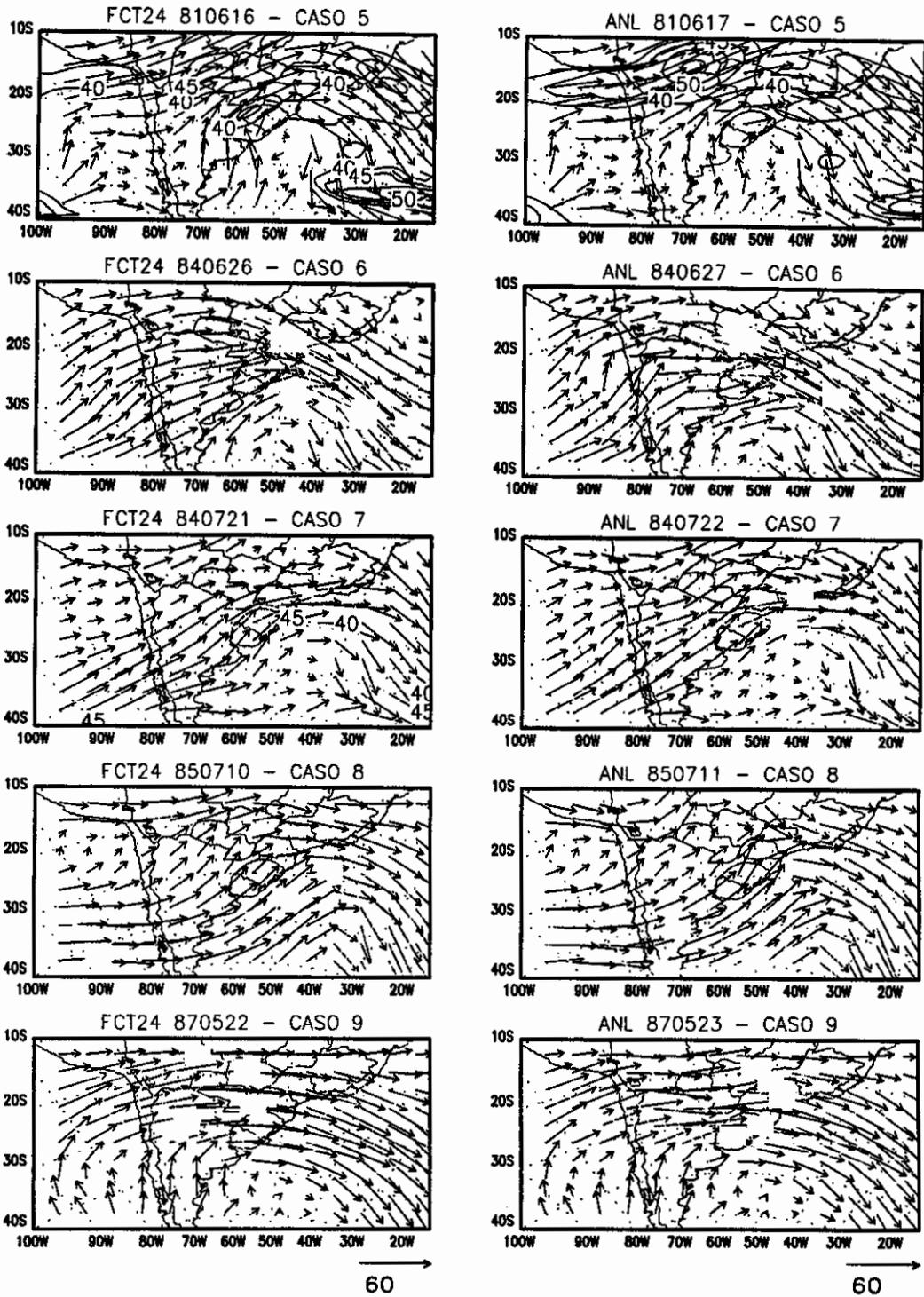


Fig. B.4 - Continuação.

(continua)

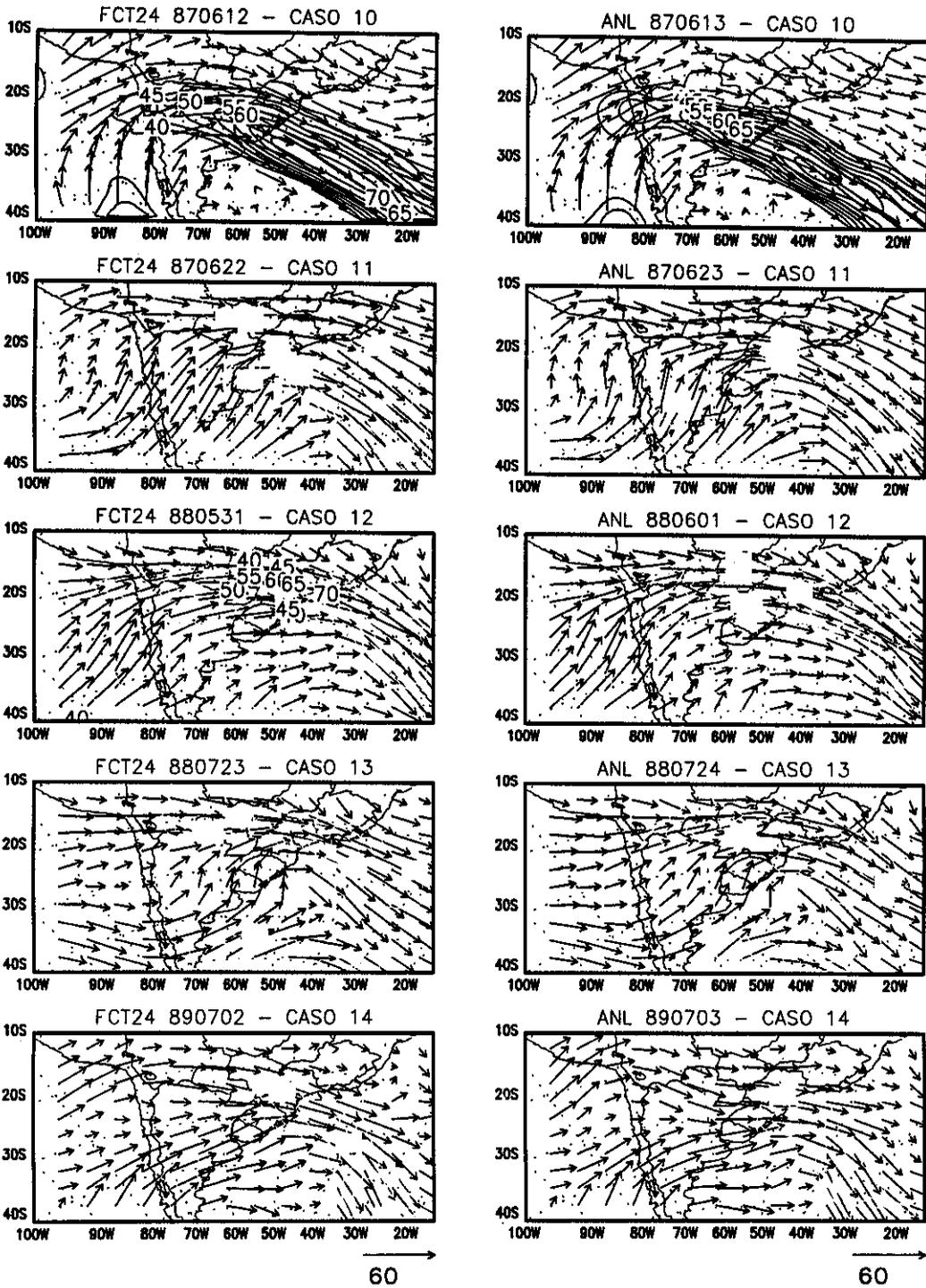


Fig. B.4 - Conclusão.

APÊNDICE C

FUNÇÕES ORTOGONAIS EMPÍRICAS (EOF's)

Esta técnica foi introduzida por Lorenz (1956) em aplicações na Meteorologia e Oceanografia e se tornou um procedimento bastante usado nas análises de dados e séries de observações. A princípio o método de EOF foi usado como uma técnica de redução de dados (Lorenz, 1956; Kutzbach, 1967), para representar compactamente os dados climatológicos e como um meio de se interpretar fisicamente os campos meteorológicos (Cavalcanti, 1984; Kousky e Kayano, 1994) bem como para comparar simulações de modelos climáticos de circulação geral (Storch e Roeckner, 1983).

A decomposição em EOF é uma técnica estatística multivariada usada tanto para se conhecer as dependências existentes entre um conjunto de dados como também para estruturar tal conjunto com o objetivo de reduzir o número de variáveis inter-relacionadas para um conjunto menor de componentes, que são combinações lineares das variáveis originais, hipoteticamente não correlacionadas.

O uso de EOF tem se tornado popular em Meteorologia porque: a descrição de um campo pode ser feita por um número relativamente pequeno de funções e coeficientes temporais associados, que explicam uma fração maior da variância total do que qualquer outra transformação; através de um número finito de realizações independentes do estado instantâneo de um campo é possível

investigar processos geofísicos complexos; e pode utilizar qualquer variável em pontos de grade ou não.

Num conjunto de dados dois casos devem ser considerados: se as observações são do mesmo tipo e com um fenômeno comum a elas, como por exemplo, a ocorrência de temperaturas igual ou inferior a 0°C em determinada região no momento da passagem de um sistema frontal; ou se as observações são de tipos diferentes embora variem sob o mesmo efeito na mesma estação. Em ambos casos uma causa comum para tal variação é a fonte de uma correlação diferente de zero entre as variáveis. Procura-se obter combinações lineares de variáveis estatisticamente independentes que expressem as oscilações comuns das variáveis originais. Assim, uma série de funções temporais independentes são derivadas, que são combinações lineares dos dados originais. Surge então um problema de autovalores-autofunções.

Seja um campo geofísico qualquer, \mathbf{F} , definido em M posições e N observações, sendo cada vetor linha da matriz \mathbf{F} definido como:

$$f_n = (f_{1n}, f_{2n}, \dots, f_{Mn}), \quad (\text{C.1})$$

com $n=1, 2, 3, \dots, N$

ou seja, para um tempo n fixo as variáveis são definidas nos M pontos em espaço.

Enquanto cada vetor coluna de \mathbf{F} é definido por:

$$f_m = \begin{bmatrix} f_{m1} \\ f_{m2} \\ \cdot \\ \cdot \\ f_{mN} \end{bmatrix} \quad (\text{C.2})$$

com $m = 1, 2, 3, \dots, M$

ou seja, para cada ponto fixo m no espaço as variáveis são definidas em todos os tempos.

Como o problema envolve variâncias e covariâncias ao invés de se usar a matriz de dados usa a matriz na qual cada coluna tem média zero e variância 1.

Sendo \mathbf{F} a matriz dos dados originais procura-se uma transformada \mathbf{E} de \mathbf{F} que retenha a variância máxima de todas as combinações lineares, ou seja

$$\text{var} (\mathbf{FE}) = \text{máx} \quad (\text{C.3})$$

Obtém-se então, outro sistema de variáveis, isto é:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{FE} \quad (\text{C.4})$$

onde (C.4) é identificada como um sistema de componentes principais e sua determinação é o objeto de interesse.

Assim,

$$\text{var}(\mathbf{Z}) = \frac{1}{N-1} \mathbf{Z}^T \mathbf{Z} = \frac{1}{N-1} (\mathbf{F} \mathbf{E})^T (\mathbf{F} \mathbf{E}) = \frac{1}{N-1} \mathbf{E}^T \mathbf{F}^T \mathbf{F} \mathbf{E} \quad (\text{C.5})$$

onde o sobrescrito T indica a matriz transposta.

Como $\frac{1}{N-1} \mathbf{F}^T \mathbf{F}$ é a própria matriz de covariância \mathbf{R} , a equação (C.5) fica:

$$\text{var}(\mathbf{Z}) = \mathbf{E}^T \mathbf{R} \mathbf{E} = \text{máx} \quad (\text{C.6})$$

De (C.6) têm-se que a matriz de variância de \mathbf{Z} , reduz-se a matriz diagonal \mathbf{L} com $\lambda_{ij} = 0$ para $i \neq j$ e $\lambda_{ii} \geq 0$. Então:

$$\text{var}(\mathbf{Z}) = (\mathbf{Z}^T \mathbf{Z}) = \mathbf{E}^T \mathbf{R} \mathbf{E} = \mathbf{L} \quad (\text{C.7})$$

A variância total dos elementos de \mathbf{F} é dada pelo traço de \mathbf{R} . A variância total será preservada pela transformação \mathbf{E} , uma vez que é assumido que $\mathbf{E}^T \mathbf{E} = \mathbf{1}$, ou seja os autovetores são mutuamente ortogonais,

$$(\mathbf{e}_i \mathbf{e}_j) = \mathbf{e}_i^T \cdot \mathbf{e}_j = \begin{cases} 1 & \text{se } i=j \\ 0 & \text{se } i \neq j \end{cases} \quad (\text{C.8})$$

A maximização de (C.6) sujeita as condições (C.8) constitui-se em um problema de valor característico, ou seja, multiplicando-se (C.6) por \mathbf{E} tem-se:

$$\mathbf{E} \mathbf{E}^T \mathbf{R} \mathbf{E} = \mathbf{R} \mathbf{E} = \mathbf{L} \mathbf{E}$$

então,

$$\mathbf{R}\mathbf{E} = \mathbf{L}\mathbf{E} \quad (\text{C.9})$$

ou seja:

$$(\mathbf{R} - \mathbf{L}\mathbf{I})\mathbf{E} = 0 \quad (\text{C.10})$$

onde \mathbf{I} é a matriz identidade. Para (C.10) ser satisfeita o determinante de $\mathbf{R}-\mathbf{L}\mathbf{I}$ deve ser nulo, então:

$$|\mathbf{R} - \mathbf{L}\mathbf{I}| = 0 \quad (\text{C.11})$$

Isso conduz a uma equação de grau M , conhecida como equação característica de \mathbf{R} . As M soluções são reais e positivas porque \mathbf{R} (matriz de covariância) é simétrica e positivamente definida. Sendo \mathbf{R} simétrica tem-se:

$$\sum_{i=1}^M r_{ii} = \sum_{i=1}^M \lambda_i$$

onde cada autovalor λ_i explica uma fração da variância total, ou seja:

$$\lambda_i / \sum_{n=1}^M \lambda_n \quad (\text{C.12})$$

Para cada autovalor λ_i ($i=1, \dots, M$) têm-se um vetor \mathbf{e}_i que é o autovetor associado. Os autovalores da matriz \mathbf{L} são rearranjados em ordem decrescente de magnitude

$\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_m$ e os autovetores ficam rearranjados da mesma forma. Em consequência da ortogonalidade imposta em (C.8) a variância das diversas componentes é aditiva. Como a variância é maximizada, um pequeno número das componentes explica a maior parte da variância do conjunto de dados original. Também é possível ter-se uma boa estimativa dos principais padrões de variabilidade usando-se um pequeno número de componentes (modos).

E é a matriz de autovetores, que dá os padrões espaciais (mapas), ou seja cada coluna de E representa um modo.

A matriz das séries temporais, pode ser obtida de:

$$C = E^T F^T \quad (C.13)$$

A matriz C é composta pelas componentes principais (uma em cada linha de C) que são as séries temporais associadas aos autovetores. Cada componente principal é uma série temporal explicando uma porção da variância dada por (C.12). Note-se que as componentes principais são também mutuamente ortogonais, ou seja, $C_i^T C_j = 0$, quando $i \neq j$.

A análise por EOF oferece três tipos de resultados: componentes principais (PC) que são as séries temporais e descrevem a evolução temporal da variabilidade analisada; autovalores que são as porções de variância explicada por cada componente principal; autovetores, que

são os padrões espaciais associados com cada PC e mostram a configuração espacial associada a cada modo.

