



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CAMPUS II
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PÓS - GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

VÓRTICES CICLÔNICOS DA ALTA TROPOSFERA: DOIS ESTUDOS DE CASO PARA O
NORDESTE DO BRASIL

AUTOR: FERNANDO MOREIRA DA SILVA

PUBLICAÇÃO DCA/CMM TD - nº 04 1991

CAMPINA GRANDE
DEZEMBRO - 1991

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
CURSO DE MESTRADO EM METEOROLOGIA

DISSERTAÇÃO

CAMPINA GRANDE - PB

DEZEMBRO DE 1991

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
CURSO DE MESTRADO EM METEOROLOGIA

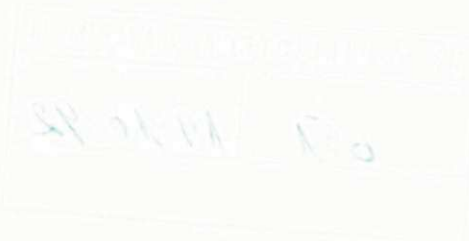
VÓRTICES CICLÔNICOS DA ALTA TROPOSFERA: DOIS ESTUDOS DE CASO
PARA O NORDESTE DO BRASIL

Dissertação elaborada em
cumprimento às exigências
para a obtenção do grau de
Mestre pela Universidade
Federal da Paraíba - UFPb.

FERNANDO MOREIRA DA SILVA
MESTRANDO

MARIA REGINA DA SILVA ARAGÃO
ORIENTADORA

ENILSON PALMEIRA CAVALCANTI
CO-ORIENTADOR






S586v Silva, Fernando Moreira da
Vortices ciclonicos da alta troposfera : dois estudos de
caso para o nordeste do Brasil / Fernando Moreira da Silva.
- Campina Grande, 1991.
127 f.

Dissertacao (Mestrado em Meteorologia) - Universidade
Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e Tecnologia.


1. Troposfera - Brasil - Nordeste 2. Ciclones -
Troposfera 3. Vortice Ciclonico 4. Dissertacao -
Meteorologia I. Aragao, Maria Regina da Silva II.
Cavalcanti, Enilson Palmeira III. Universidade Federal da
Paraiba - Campina Grande (PB)


CDU 551.510.52(043)

VÓRTICES CICLÔNICOS DA ALTA TROPOSFERA: DOIS ESTUDOS DE CASO PARA O NORDESTE DO
BRASIL


FERNANDO MOREIRA DA SILVA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 07/02/92


MARIA REGINA DA SILVA ARAGÃO
Orientadora


ENILSON PALMEIRA CAVALCANTI
Co-Orientador


VALDO DA SILVA MARQUES
Membro


HUKUM SINGH RATHOR
Membro

CAMPINA GRANDE

Dedicação

A Deus,
a Tita,
companheira e alter ego,
a quem tanto devo pelo
incentivo e dedicação em
todos os momentos,

e

aos meus filhos

Raquel, Raoni
e Emanuel.

AGRADECIMENTOS

A Professora Dra. Maria Regina da Silva Aragão pela imprescindível orientação nesta dissertação de mestrado.

Ao Professor Rômulo da Silveira Paz e a Meteorologista Débora de Araújo Paz pelas valiosas sugestões e acima de tudo pelo apoio humano e profissional.

Aos amigos do Departamento Nacional de Meteorologia, na pessoa do Meteorologista Professor Valdir Espinheira do Carmo, pelo apoio e incentivo.

A secretária Divanete Cruz Rocha pelo apoio e compreensão.

Ao Meteorologista Raimundo Mainar de Medeiros pelo incentivo e apoio.

Ao amigo Danilo Correia Gomes pelo apoio e incentivo.

A analista de sistema Janeide Albuquerque Cavalcanti pelo apoio e sugestões no campo da informática.

A Universidade Federal da Paraíba, pela oportunidade de realizar esta trabalho.

Ao Conselho Nacional de Pesquisas, pelo apoio financeiro.

Aos demais colegas que diretamente ou indiretamente contribuíram na troca de informações.

RESUMO

A formação e desenvolvimento de vórtices ciclônicos da alta troposfera no Nordeste do Brasil foram diagnosticados para dois períodos: 15 a 30 de dezembro de 1980 e 09 a 20 de dezembro de 1989. Cartas de linhas de corrente, vorticidade, advecção de vorticidade, advecção de temperatura, divergência de massa e divergência de umidade foram analisadas para os dois períodos. Foi verificado que convecção intensa na área do anticiclone da Bolívia aliada à penetração de um sistema frontal no Nordeste são fundamentais para a formação dos vórtices. A posição e intensidade da corrente de jato sobre a América do Sul também influenciam a formação e manutenção do sistema. Os resultados sugerem que advecção de vorticidade ciclônica e advecção fria na média e alta troposfera sobre o NEB contribuem para a existência dos vórtices. Os campos de divergência de umidade e de massa são convergentes na baixa troposfera sobre a Região durante o tempo de vida dos ciclones. Um modelo sinótico é proposto para o desenvolvimento do vórtice ciclônico da atmosfera superior.

ABSTRACT

The formation and development of upper tropospheric cyclonic vortices occurred on the Northeast of Brazil are studied. Two periods are chosen: 15 to 30 December 1980 and 09 to 20 December 1989. Wind, vorticity, temperature and vorticity advection, mass and moisture divergence are analyzed for both periods. Deep cumulus convection in the region of the Bolivian anticyclone occurring as a cold front (or its remains) enters the Northeast are seen to be essential for the formation of the vortices. The position and intensity of the jet stream over South America are also seen to be important for the formation and maintenance of the vortices. The results suggest that upper and mid-tropospheric cyclonic vorticity advection and cold advection contribute to their formation and maintenance. Mass and moisture convergence are present in the lower troposphere during the lifetime of the vortices. A synoptic model is proposed for the formation and development of the upper tropospheric cyclonic vortices.

LISTA DE FIGURAS

	Página
Fig. 1.1 - Carta média de linhas de corrente e isotacas no nível de 300 hPa, para o mês de dezembro.....	04
Fig. 4.1 - Imagens de satélite para as 12:00 TMG do dia 15 a 18/12/80.....	24
Fig. 4.2 - Linhas de corrente no nível de 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 15/12/80.....	25
Fig. 4.3 - Linhas de corrente no nível de 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 16/12/80.....	26
Fig. 4.4 - Linhas de corrente no nível de 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 18/12/80.....	27
Fig. 4.5 - Imagens de satélite para as 12:00 TMG do dia 19 a 22/12/80.....	29
Fig. 4.6 - Linhas de corrente no nível de 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 19/12/80.....	30
Fig. 4.7 - Imagens de satélite para as 12:00 TMG do dia 23 a 26/12/80.....	31
Fig. 4.8 - Linhas de corrente no nível de 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 25/12/80.....	33
Fig. 4.9 - Linhas de corrente no nível de 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 26/12/80.....	34
Fig. 4.10 - Imagens de satélite para as 12:00 TMG do dia 27 a 30/12/80.....	35
Fig. 4.11 - Linhas de corrente no nível de 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 29/12/80.....	37
Fig. 4.12 - Vorticidade no nível de 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 15/12/80.....	38

Fig. 4.13 - Vorticidade no nível de 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 18/12/80.....	39
Fig. 4.14 - Vorticidade no nível de 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 25/12/80.....	41
Fig. 4.15 - Vorticidade no nível de 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 26/12/80.....	42
Fig. 4.16 - Vorticidade no nível de 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 29/12/80.....	43
Fig. 4.17 - Advecção de vorticidade no nível de 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 17/12/80.....	44
Fig. 4.18 - Advecção de vorticidade no nível de 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 18/12/80.....	46
Fig. 4.19 - Advecção de vorticidade no nível de 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 19/12/80.....	47
Fig. 4.20 - Advecção de vorticidade no nível de 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 25/12/80.....	48
Fig. 4.21 - Advecção de vorticidade no nível de 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 26/12/80.....	49
Fig. 4.22 - Advecção de vorticidade no nível de 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 28/12/80.....	50
Fig. 4.23 - Divergência de umidade no nível de 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 15/12/80.....	51
Fig. 4.24 - Divergência de umidade no nível de 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 18/12/80.....	52
Fig. 4.25 - Divergência de umidade no nível de 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 19/12/80.....	53
Fig. 4.26 - Divergência de umidade no nível de 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 25/12/80.....	55

Fig. 4.27 - Divergência de umidade no nível de 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 26/12/80.....	56
Fig. 4.28 - Divergência de umidade no nível de 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 29/12/80.....	57
Fig. 4.29 - Advecção de temperatura no nível de 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 15/12/80.....	58
Fig. 4.30 - Advecção de temperatura no nível de 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 17/12/80.....	59
Fig. 4.31 - Advecção de temperatura no nível de 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 18/12/80.....	60
Fig. 4.32 - Advecção de temperatura no nível de 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 19/12/80.....	61
Fig. 4.33 - Advecção de temperatura no nível de 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 25/12/80.....	62
Fig. 4.34 - Advecção de temperatura no nível de 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 26/12/80.....	63
Fig. 4.35 - Advecção de temperatura no nível de 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 29/12/80.....	65
Fig. 4.36 - Divergência de massa no nível de 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 15/12/80.....	66
Fig. 4.37 - Divergência de massa no nível de 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 18/12/80.....	67
Fig. 4.38 - Divergência de massa no nível de 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 25/12/80.....	68
Fig. 4.39 - Divergência de massa no nível de 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 26/12/80.....	69
Fig. 4.40 - Divergência de massa no nível de 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 29/12/80.....	70

Fig. 4.41 - Linhas de corrente no nível de 200 hPa para as 12:00 TMG do dia 09/12/89.....	72
Fig. 4.42 - Linhas de corrente no nível de 200 hPa para as 12:00 TMG do dia 12/12/89.....	73
Fig. 4.43 - Imagens de satélite para as 12:00 TMG do dia 09 a 12/12/89.....	74
Fig. 4.44 - Linhas de corrente no nível de 200 hPa para as 12:00 TMG do dia 13/12/89.....	76
Fig. 4.45 - Linhas de corrente no nível de 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 13/12/89.....	77
Fig. 4.46 - Linhas de corrente no nível de 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 13/12/89.....	78
Fig. 4.47 - Linhas de corrente no nível de 200 hPa para as 12:00 TMG do dia 15/12/89.....	79
Fig. 4.48 - Linhas de corrente no nível de 200 hPa para as 12:00 TMG do dia 16/12/89.....	80
Fig. 4.49 - Linhas de corrente no nível de 200 hPa para as 12:00 TMG do dia 18/12/89.....	81
Fig. 4.50 - Imagens de satélite para as 12:00 TMG do dia 13 a 16/12/89.....	83
Fig. 4.51 - Imagens de satélite para as 12:00 TMG do dia 17 a 20/12/89.....	84
Fig. 4.52 - Vorticidade no nível de 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 09/12/89.....	86
Fig. 4.53 - Vorticidade no nível de 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 12/12/89.....	87
Fig. 4.54 - Vorticidade no nível de 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 13/12/89.....	88

Fig. 4.55 - Vorticidade no nível de 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 14/12/89.....	89
Fig. 4.56 - Vorticidade no nível de 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 14/12/89.....	90
Fig. 4.57 - Vorticidade no nível de 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 17/12/89.....	91
Fig. 4.58 - Vorticidade no nível de 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 18/12/89.....	92
Fig. 4.59 - Vorticidade no nível de 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 19/12/89.....	93
Fig. 4.60 - Vorticidade no nível de 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 20/12/89.....	94
Fig. 4.61 - Advecção de vorticidade no nível de 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 09/12/89.....	96
Fig. 4.62 - Advecção de vorticidade no nível de 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 12/12/89.....	97
Fig. 4.63 - Advecção de vorticidade no nível de 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 14/12/89.....	98
Fig. 4.64 - Advecção de vorticidade no nível de 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 15/12/89.....	99
Fig. 4.65 - Advecção de vorticidade no nível de 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 17/12/89.....	100
Fig. 4.66 - Advecção de vorticidade no nível de 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 19/12/89.....	101
Fig. 4.67 - Divergência de umidade no nível de 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 11/12/89.....	102
Fig. 4.68 - Divergência de umidade no nível de 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 18/12/89.....	103

Fig. 4.69 - Divergência de umidade no nível de 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 19/12/89.....	104
Fig. 4.70 - Advecção de temperatura no nível de 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 12/12/89.....	106
Fig. 4.71 - Advecção de temperatura no nível de 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 13/12/89.....	107
Fig. 4.72 - Advecção de temperatura no nível de 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 14/12/89.....	108
Fig. 4.73 - Advecção de temperatura no nível de 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 18/12/89.....	110
Fig. 4.74 - Divergência de massa no nível de 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 11/12/89.....	111
Fig. 4.75 - Divergência de massa no nível de 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 11/12/89.....	112
Fig. 4.76 - Divergência de massa no nível de 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 12/12/89.....	113
Fig. 4.77 - Divergência de massa no nível de 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 13/12/89.....	114
Fig. 4.78 - Divergência de massa no nível de 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 13/12/89.....	115
Fig. 4.79 - Divergência de massa no nível de 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 18/12/89.....	116
Fig. 4.80 - Divergência de massa no nível de 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 18/12/89.....	117
Fig. 5.1 - Representação esquemática das fases de desen- volvimento dos vórtices ciclônicos da alta troposfera que afetam o Nordeste do Brasil: (a) fase I, (b) fase II, (c) fase III, (d) fase IV.	123

SUMÁRIO

1.	Introdução.....	01
2.	Revisão Bibliográfica.....	06
3.	Metodologia.....	16
3.1	Escolha dos Períodos de Estudo.....	16
3.2	Fundamentação Teórica.....	19
4.	Apresentação dos Resultados.....	23
4.1	Caso I: Período de 15 - 30/12/80.....	23
4.1.1	Condições Sinóticas.....	23
4.1.2	Discussão dos campos derivados.....	36
4.1.2.1	Vorticidade no nível de 500 hPa.....	36
4.1.2.2	Advecção de Vorticidade em 700 e 500 hPa.....	40
4.1.2.3	Divergência de Umidade em 700 hPa.....	45
4.1.2.4	Advecção de Temperatura em 500 hPa.....	54
4.1.2.5	Divergência de Massa em 700 hPa.....	64
4.2	Caso II: Período de 9 - 20/12/89.....	71
4.2.1	Condições Sinóticas.....	71
4.2.2	Discussão dos campos derivados.....	82
4.2.2.1	Vorticidade em 700 e 300 hPa.....	85
4.2.2.2	Advecção de Vorticidade em 300 hPa.....	95
4.2.2.3	Divergência de Umidade em 700 hPa.....	95
4.2.2.4	Advecção de Temperatura em 300 hPa.....	105
4.2.2.5	Divergência de Massa em 700 e 300 hPa.....	109
4.3	Considerações Gerais.....	118
4.3.1	Caso I: Período de 15 - 30/12/80.....	118

4.3.2 Caso II: Período de 9 - 20/12/89.....	119
5. Conclusões e Sugestões.....	121
5.1 Conclusões.....	121
5.2 Sugestões.....	124
Referências.....	125

1. INTRODUÇÃO

O estudo de sistemas atmosféricos causadores de precipitação no Nordeste do Brasil (NEB) teve um grande impulso nas duas últimas décadas. Isso foi possível, em grande parte, pela entrada em operação da rede aerológica do Nordeste composta, inicialmente, por dez estações de radiossonda-vento e treze estações de balão-piloto. O acervo de dados coletados durante o período de perfeito funcionamento da rede tem permitido a realização de estudos que visam identificar características típicas da atmosfera em períodos com excesso ou escassez de precipitação. Tais estudos se revestem da maior importância tendo em vista a irregularidade no regime pluviométrico do Nordeste, região bem conhecida por suas enchentes ocasionais e secas prolongadas.

Segundo Strang (1972), devem existir no Nordeste do Brasil três regimes distintos de precipitação, os quais são determinados predominantemente por perturbações sinóticas, pela circulação geral da atmosfera, por efeitos orográficos e outras influências locais. As anomalias na quantidade de precipitação no Nordeste do Brasil tem sido associadas a vários fatores tais como: a posição da Zona de Convergência Intertropical (Serra e Ratisbona, 1946); a localização e intensidade do anticiclone subtropical semi-permanente do Atlântico Sul (Dean, 1971); a localização, deslocamento e intensidade de vórtices ciclônicos da alta troposfera (Aragão,

1975); o deslocamento e intensidade de sistemas frontais ao longo da costa leste do NEB (Kousky, 1979). Assim, vários sistemas de circulação atmosférica tem sido identificados como influenciadores do tempo e clima do Nordeste. Tais sistemas pertencem a uma variada gama de escalas de tempo e espaço englobando desde a pequena escala -exemplificada por nuvens cúmulos-nimbos individuais - até a escala planetária, bem representada pelo fenômeno do El Niño-Oscilação Sul. A escala sinótica, em particular, tem revelado vários tipos de sistemas atuantes no Nordeste. Como exemplo podem ser citadas as ondas de leste (Yamazaki e Rao, 1977, Chan, 1990) que atingem o litoral oriental do NEB nos meses de junho a agosto e os sistemas frontais (Kousky, 1979) que influenciam o regime de precipitação no litoral sul. Outro sistema de grande importância dentro dessa escala são os chamados vórtices ciclônicos da alta troposfera. Também denominados baixas frias, tais sistemas estão entre os mais estudados para o Nordeste tendo em vista os elevados totais de precipitação a eles normalmente associados.

A primeira evidência da atuação de vórtices ciclônicos de ar superior sobre o NEB foi dada por Dean (1971) em cartas médias mensais de vento (linhas de corrente e isotacas) e temperatura do ar para o ano de 1969. Com base em cartas analisadas para os níveis de 850, 700, 500, 300 e 200 hPa, Dean pôde detectar a presença de cavados ou vórtices ciclônicos de núcleo frio nos níveis de 300 e 200 hPa, para os meses de novembro a março. Os resultados de Dean foram ratificados posteriormente em cartas de vento (linhas de corrente e

isotacas), para os níveis de 300 e 200 hPa, elaboradas por Sadler (1975) com base em médias obtidas com cinco anos de dados. Assim, as cartas analisadas por Dean e Sadler indicam que o fluxo médio na alta troposfera é favorável à ocorrência de vórtices ciclônicos individuais no NEB, nos meses de novembro a março. Um exemplo das análises de Sadler aparece na Figura 1.1 que apresenta a configuração média do vento observado no nível de 300 hPa para o mês de dezembro. Além de mostrar o anticiclone da Bolívia bem definido, essa carta também exhibe uma circulação ciclônica fechada, centrada no litoral do NEB que se estende do Rio Grande do Norte a Sergipe. Tais características são comuns a outros mapas: circulação anticiclônica na porção ocidental da Amazônia e ciclônica no NEB se fazem presentes, com maior ou menor intensidade, aos 200 e 300 hPa, nos meses de novembro a março. Além desses trabalhos de natureza climatológica, outros estudos tem focado aspectos sinótico-dinâmicos de ciclones da alta troposfera, tanto para o Hemisfério Norte quanto para o Hemisfério Sul. Essas pesquisas tem sido feitas segundo duas linhas básicas: algumas documentam a evolução sinótico-dinâmica dos vórtices enquanto outras buscam determinar os mecanismos responsáveis por sua origem e manutenção.

O estudo dos ciclones da alta troposfera se reveste da maior importância no caso específico do NEB, onde estão geralmente associados a altos índices de precipitação que chegam, em algumas ocasiões, a causar enchentes na Região. Considerando que aspectos sinótico-dinâmicos de seu comportamento ainda são pouco conhecidos, esta pesquisa busca identificar

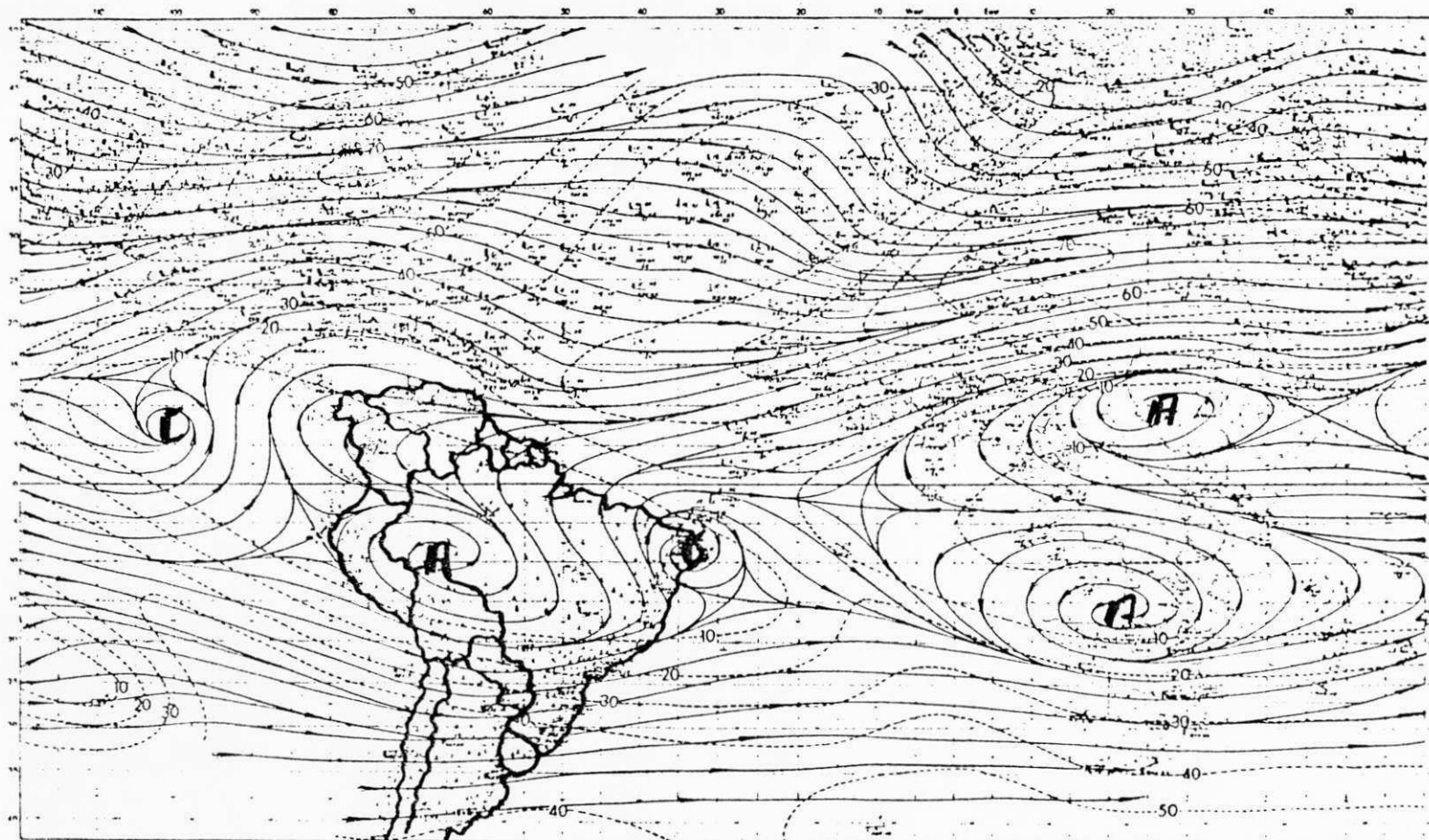


Fig. 1.1 - Carta média de linhas de corrente (linhas contínuas) e isotacas em nós (linhas tracejadas) no nível de 300 hPa, para o mês de dezembro (Fonte: Sadler, 1975).

características típicas de suas várias fases de desenvolvimento com o objetivo de formular um modelo sinótico para auxílio à previsão de tempo de curto e médio prazo no Nordeste do Brasil.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão da literatura existente sobre diferentes aspectos dos vórtices ciclônicos de núcleo frio da alta troposfera mostra um bom número de estudos que tratam de tais sistemas.

Carlson (1968) estudou um vórtice ciclônico de núcleo frio ocorrido na alta troposfera sobre a porção leste do Caribe durante o mês de outubro de 1965. Baseando-se num sistema de coordenadas que se movia com o vórtice Carlson produziu, para um período de 6 dias, campos médios de nuvens e tempo associados além de vento, geopotencial, temperatura, vapor d'água e velocidade vertical nos níveis de 1000, 850, 700, 500 e 250 hPa. Os resultados obtidos mostraram uma circulação ciclônica fechada entre 250 e 700 hPa, presente à superfície sob a forma de um cavado fraco no regime dos ventos de leste. A carta de nebulosidade mostrou que a cobertura principal de nuvens estava à leste do sistema, sendo que apenas uma pequena fração dessa área era ocupada por cúmulos-nimbos. Cúmulos de bom tempo predominavam à oeste do vórtice ciclônico.

Dados convencionais, relatórios de vôo e fotografias de satélite, obtidos para o período de 10 a 19 de agosto de 1964, foram utilizados por Sadler (1967) para rastrear uma série de ciclones da alta troposfera que se moveu ao longo de um cavado superior na porção oeste do Pacífico Norte. Sadler concluiu que quase todas as perturbações nos alísios de leste são causadas por ciclones nos altos níveis e que o movimento das perturbações nos

baixos níveis é controlado por esses sistemas superiores.

Frank (1970) estudou setenta e oito (78) casos de vórtices ciclônicos de ar superior ocorridos no Atlântico Norte no período de junho a outubro de 1958 e trinta e seis (36) casos no verão de 1964, usando dados convencionais e fotografias do satélite TIROS. Frank concluiu que a maioria dos vórtices ciclônicos está confinada à alta troposfera (acima de 500 hPa): cerca de 60% não atingem o nível de 700 hPa e somente em torno de 10% conseguem alcançar a superfície. A região central do vórtice apresenta-se desprovida de nuvens, apresentando máxima nebulosidade na região periférica, o que sugere uma circulação direta (ar frio descendo e ar quente subindo). Tal conversão de energia potencial em energia cinética permitiria aos vórtices ciclônicos de núcleo frio da alta troposfera se auto-sustentar, sem a necessidade de fontes externas de energia.

Erickson (1971) estudou um caso de ciclone frio presente na alta troposfera e baixa estratosfera sobre as Bahamas no período de 9 a 11 de agosto de 1966. O ciclone esteve temporariamente justaposto a uma onda presente nos baixos níveis, ocasião em que houve aumento da nebulosidade e tempo na área de atuação dos sistema. As anomalias de temperatura vistas em secções retas verticais mostram na área do ciclone uma anomalia fria (quente) na alta (baixa) troposfera (estratosfera).

Dean (1971) estudou a estrutura da circulação média sobre o Nordeste do Brasil verificando que a presença de um vórtice ciclônico sobre a Região Nordeste em cartas médias dos

níveis de 300 a 200 hPa está relacionada com a circulação geral média de ambos os hemisférios. Segundo o autor, o surgimento desse vórtice ciclônico se deve à diminuição da intensidade dos ventos de leste da alta troposfera sobre o Atlântico Sul Tropical, causada pela substituição desses por ventos de oeste provenientes do Hemisfério Norte. Essa mudança tem início a partir do mês de outubro e, à medida que os ventos de oeste predominam sobre o NEB e o Atlântico, a depressão ciclônica média reaparece, inicialmente a 200 hPa e depois a 300 hPa.

Aragão (1975) investigou a estrutura de perturbações sinóticas no NEB, relacionando dois períodos chuvosos (19 a 30/01/70 e 18 a 29/04/70) e um período seco (01 a 10/09/70). Foram feitas análises subjetivas de linhas de corrente e isotacas que serviram de base à obtenção de campos derivados de velocidade vertical, vorticidade e divergência. Foram elaboradas ainda cartas de nebulosidade e precipitação e perfis verticais de temperatura potencial e temperatura potencial equivalente para várias estações de altitude do NEB. Aragão concluiu que no período chuvoso o escoamento nos baixos níveis não é muito afetado se comparado com a carta média mensal. Por outro lado, o escoamento na média e alta troposfera muda radicalmente quando a área é invadida por vórtices ciclônicos que atuam entre 300 e 700 hPa. A presença de tais sistemas concorre para o aprofundamento dos ventos de oeste que dominam os altos níveis de toda a região tropical.

Kousky e Gan (1981) estudaram vórtices ciclônicos da alta troposfera no Hemisfério Sul e, em particular, no NEB

através de imagens do satélite geostacionário SMS/GOES (no canal infravermelho e no visível) para um período de cinco anos (1975 a 1979). Eles estudaram somente aqueles casos em que havia nebulosidade bem definida, constatando que nos meses de maio a setembro não houve formação de vórtice ciclônico da alta troposfera. Tais sistemas ocorreram principalmente no verão, sendo janeiro o mês que apresentou o maior número de casos (24, dos quais apenas 6 apresentaram condições de tempo severo). Kousky e Gan concluíram que a época favorável à formação dos vórtices está positivamente correlacionada com o caráter meridional do fluxo médio aos 200 hPa o qual, por sua vez, está ligado à intensidade dos anticiclones continentais presentes no nível de 200 hPa. Para completar seu estudo, fizeram um estudo de caso (25 de fevereiro a 20 de março de 1978) utilizando fotografias de satélite e cartas de linhas de corrente, temperatura, vorticidade e nebulosidade. A análise desse e de outros casos lhes permitiu concluir que a formação de tais vórtices ciclônicos fechados é geralmente precedida pela amplificação de uma crista de ar superior à jusante. A amplificação da crista é explicada, em muitos casos, pela advecção de ar quente associada a um intenso sistema frontal com penetração em latitudes baixas.

Gan e Kousky (1982) realizaram uma extensão do trabalho acima com a finalidade de determinar a climatologia de vórtices ciclônicos da alta troposfera que penetraram no NEB num período de sete anos (1974 a 1981) e os processos dinâmicos de formação desses vórtices. Eles utilizaram imagens de satélites e as

componentes zonal e meridional do vento para os níveis padrões entre 1000 e 200 hPa, além de dados tipo GRID fornecidos pelo National Meteorological Center (NMC). Gan e Kousky determinaram que no período de maio a agosto não ocorreram vórtices ciclônicos úmidos (aqueles que possuem nebulosidade bem definida) sendo que a maior frequência de formação desses sistemas se deu nos meses de verão, especialmente fevereiro (Tabela 2.1). Estes resultados concordam quase que inteiramente com os de Kousky e Gan (1981), a não ser pelo fato de que no estudo de 1981 não foram encontrados vórtices ciclônicos úmidos no mês de setembro. Quanto à gênese desses sistemas, sugeriram estar relacionada com a propagação de energia de onda no sentido sudoeste-nordeste.

Kelley e Mock (1982) estudaram 117 casos de vórtices ciclônicos de ar superior ocorridos na porção oeste do Pacífico Norte durante o verão de 1967, 1969, 1970 e 1971. Eles analisaram campos médios de vorticidade, divergência, temperatura, umidade relativa e movimento vertical. As análises lhes permitiram concluir que tais sistemas apresentam movimento vertical máximo ascendente próximo ao nível de 300 hPa e circulação máxima em 200 hPa.

Davis (1982) documentou a formação de um vórtice ciclônico sobre o NEB em fevereiro de 1979, utilizando imagens do satélite METEOSAT no canal do vapor d'água e do infravermelho, além de ventos calculados a partir do deslocamento de nuvens. As imagens mostram com grande clareza o centro seco e a periferia úmida do sistema. Davis atribui a formação do vórtice ao estabelecimento de um fluxo de noroeste que cruza o equador. É

Mês	Quantidade	No. Dias
Jan.	18	93
Fev.	51	82
Mar.	08	53
Abr.	05	10
Mai.	-	01
Jun.	-	-
Jul.	-	-
Ago.	-	-
Set.	02	05
Out.	01	03
Nov.	11	42
Dez.	10	68
Total	106	357

Tabela 2.1 - Número de baixas frias úmidas por mês, formadas no Oceano Atlântico Sul, e número de dias por mês com nebulosidade dessas baixas frias no período de setembro/74 a agosto/81 (Fonte: Gan e Kousky, 1982).

esse fluxo que constitui a circulação no setor oriental do vórtice ciclônico.

Rao e Bonatti (1986) utilizaram análises dos campos de vento, vorticidade relativa e do termo de troca de energia barotrópica, para o período compreendido entre dezembro de 1977 e fevereiro de 1978, a fim de examinar a importância do mecanismo de instabilidade barotrópica na geração de vórtices ciclônicos de ar superior. Investigaram também o papel do aquecimento por condensação, ligação trópico-médias latitudes e a circulação de larga escala de verão. Os resultados obtidos para a troca de energia barotrópica indicam que, em média, a energia zonal é convertida em energia cinética turbulenta. Isto sugere a ocorrência de instabilidade barotrópica. Por outro lado, a análise do vento zonal para instabilidade barotrópica revelou fraca taxa de crescimento. Rao e Bonatti concluíram que outros mecanismos tais como a influência da alta da Bolívia no verão e a ligação trópico-extratropical devem ser importantes na geração desses vórtices ciclônicos.

Cavalcanti (1986) estudou as características meteorológicas associadas a precipitações intensas no NEB, no período de janeiro a abril de 1985. Observou que vários fatores influenciaram a ocorrência de precipitação em excesso. A zona de convergência intertropical estava mais ao sul em relação a sua posição normal, com forte intensidade, a temperatura da superfície do mar no litoral do Nordeste estava mais alta que a normal e a alta subtropical do Atlântico Norte apresentava-se mais intensa. Consequentemente, os sistemas frontais ficaram

estacionários na costa leste do Brasil, contribuindo para aumentar a convecção no sul do NEB. Foi também observada a atuação de vórtices ciclônicos nos altos níveis e de linhas de cúmulos-nimbos na costa do NEB. Além disso, a circulação anticiclônica na alta troposfera, ou seja, a alta da Bolívia se apresentava deslocada para leste de sua posição normal, contribuindo assim para a ocorrência de convecção na região do NEB.

Silva e Paz (1988) correlacionaram os campos de vorticidade e advecção de vorticidade no nível de 500 hPa, para um caso de vórtice ciclônico da alta troposfera no NEB, ocorrido no período compreendido entre 15 e 25 de dezembro de 1980. Eles concluíram que sua formação estava associada ao escoamento gerado pela atuação da alta da Bolívia. Notaram também a contribuição de um sistema frontal na intensificação do vórtice ciclônico. Porém, a mais importante observação foi a relação entre o sentido do deslocamento do vórtice ciclônico e o núcleo de valores mínimos de advecção de vorticidade ciclônica, ou seja, o vórtice tendeu a se deslocar em direção ao mínimo de advecção de vorticidade ciclônica.

Dando continuidade ao trabalho anterior, Silva et alii (1990) investigaram o papel desempenhado na evolução do sistema pela advecção de temperatura no nível de 700 hPa. Eles concluíram haver uma forte correlação entre o campo de advecção de temperatura e a nebulosidade, com advecção de ar frio coincidindo com a intensificação da nebulosidade.

A análise dos estudos aqui mencionados permite relacionar algumas características básicas dos ciclones da alta troposfera ou baixas frias. No caso específico do NEB, a época mais favorável para sua formação são os meses de novembro a março. As baixas frias se formam na extremidade equatorial dos cavados oceânicos médios, em níveis de pressão inferior a 400 hPa, apresentando circulação ciclônica fechada que, eventualmente, se estende até os baixos níveis (Carlson, 1968, Frank, 1970, Erickson, 1971, Aragão, 1975, Kelley e Mock, 1982). É nessas ocasiões que grandes totais de precipitação são registrados. Um núcleo de valores mínimos localizado em torno de 300 hPa caracteriza o ciclone da alta troposfera no campo de temperatura (Erickson, 1971, Aragão, 1975, Kousky e Gan, 1981, Kelly e Mock, 1982). É típico que imagens de satélite obtidas na banda do vapor d'água mostrem a presença de ar seco no centro do vórtice (Davis, 1982). Evidentemente, essa parte do sistema tem céu claro; a nebulosidade se apresenta usualmente sob a forma de arco que cobre parcialmente a periferia do sistema (Carlson, 1968, Frank, 1970, Kousky e Gan, 1981). Essa distribuição de nebulosidade sugere que tais sistemas são mantidos por conversão direta de energia potencial em energia cinética, com subsidência de ar frio e seco no centro do sistema e ascensão de ar quente e úmido na periferia do mesmo (Frank, 1970, Kousky e Gan 1981, Kelley e Mock, 1982). As baixas frias são sistemas quase-estacionários com tempo de vida longo; não são incomuns os casos com tempo de vida de até duas semanas. Muitas vezes, as baixas frias se mantêm estacionárias por vários dias; quando se deslocam o fazem lentamente, de leste para oeste, em concordância com a

teoria de ondas de Rossby.

É evidente que o conhecimento das características acima é essencial ao trabalho de previsão do tempo. Por outro lado, é de igual importância conhecer os mecanismos responsáveis pela formação, intensificação, manutenção e dissipação dos vórtices ciclônicos da alta troposfera já que tal conhecimento é de aplicação imediata no processo de previsão. Estudos já efetuados lançam alguma luz sobre este ponto. A influência de sistemas de latitudes médias (frentes frias) no processo de formação e/ou intensificação dos vórtices ciclônicos que afetam o NEB (Kousky e Gan, 1981, Silva e Paz, 1988) sugerem investigar o papel que as advecções de vorticidade e temperatura normalmente associadas a tais sistemas desempenham nas várias fases de desenvolvimento dos vórtices. Isso foi feito para o caso de um vórtice ciclônico por Silva e Paz (1988) e Silva et alii (1990), conforme mencionado anteriormente. Os resultados obtidos encorajaram a realização deste trabalho que tem como objetivo explorar o potencial de previsão envolvido em quantidades como as acima mencionadas e elaborar um modelo sinótico que sirva de subsídio à previsão do tempo de curto e médio prazo no Nordeste do Brasil.

3. METODOLOGIA

3.1 Escolha dos Períodos de Estudo

Várias etapas foram vencidas no processo de escolha dos casos a serem estudados. Primeiro foram selecionados períodos nos quais era possível identificar a presença de um vórtice ciclônico da alta troposfera em imagens dos satélites METEOSAT e GOES - E cedidas pelo Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE). A seguir foi verificado, para cada período, se havia disponibilidade tanto de dados de altitude das 12:00 TMG para toda a América do Sul quanto de dados em pontos de grade (doravante denominados GRIDS) do National Meteorological Center (NMC). Esses, espaçados de 5 em 5 graus, eram necessários tendo em vista que estudos já efetuados (Kousky e Gan, 1981; Gan e Kousky, 1982; Rao e Bonatti, 1986) indicam que os vórtices ciclônicos de ar superior que afetam o NEB se formam, em geral, sobre o Atlântico Sul, próximo à costa brasileira.

O objetivo inicial da etapa acima era selecionar apenas aqueles períodos para os quais houvesse GRIDS e nos quais a maioria das estações de radiossonda-vento da rede aerológica do Brasil (Tabela 3.1) e, em particular, do Nordeste houvesse operado em perfeitas condições de funcionamento. Infelizmente não foi possível obter um conjunto completo de dados para qualquer dos períodos selecionados. Uma solução de compromisso permitiu escolher dois entre eles: 15 a 30 de dezembro de 1980 e 9 a 20 de dezembro de 1989. Não foram utilizados GRIDS nos cálculos do

TABELA 3.1

ESTAÇÕES DE ALTITUDE DA AMÉRICA DO SUL

NÚMERO SINÓTICO	NOME DA ESTAÇÃO	PAÍS	ALTITUDE (metros)	LATITUDE (° ')	LONGITUDE (° ')
82191	Belém(SBBE)	Brasil	005	01 27	48 28
82280	São Luiz(SBSL)	Brasil	051	02 32	44 17
82331	Manaus(SBMN)	Brasil	065	03 08	60 01
82397	Fortaleza(SBFZ)	Brasil	026	03 46	38 36
82400	F. de Noronha(SBFN)	Brasil	045	03 51	32 25
82599	Natal(SBNT)	Brasil	49	05 55	35 15
82678	Florianópolis(SBFR)	Brasil	123	06 46	43 01
82765	Carolina(SBCI)	Brasil	193	07 20	47 20
82900	Recife(SBRF)	Brasil	07	08 03	34 55
82983	Petrolina(SBPL)	Brasil	370	09 23	40 29
83229	Salvador(SBSV)	Brasil	51	13 01	38 31
83288	B. J. da Lapa(SBLP)	Brasil	440	13 16	43 25
83378	Brasília(SBBR)	Brasil	1061	15 47	47 56
83498	Caravelas(SBCV)	Brasil	03	17 44	39 15
83611	Campo Grande(SBCG)	Brasil	600	20 27	54 37
83650	Trindade(SBTD)	Brasil	21	20 30	29 10
83746	Galeão(SBGL)	Brasil	014	22 49	43 15
83781	São Paulo(SBSP)	Brasil	795	23 30	46 37
83842	Curitiba(SBCT)	Brasil	930	25 20	49 14
83971	Porto Alegre(SBPA)	Brasil	056	30 01	51 13
81405	Cayenne/Rochambeau	G. Fr.	09	04 50	52 22
80222	Bogotá/Eldorado	Colom.	2548	04 42	74 08
80413	Maracay/B. A. Sucre	Venez.	443	10 15	67 39

TABELA 3.1

(Continuação)

NÚMERO SINÓTICO	NOME DA ESTAÇÃO	PAÍS	ALTITUDE (metros)	LATITUDE (° ')	LONGITUDE (° ')
84648	Lima/Callo Aero.Int.	Peru	013	12 00	77 07
85442	Antofagasta/c. Moreno	Chile	122	23 26	70 28
85543	Quintero	Chile	02	32 47	71 32
85799	Puerto Montt	Chile	110	41 28	72 56
87047	Salta	Arg.	1221	24 51	65 29
87155	Resistência	Arg.	52	27 27	59 03
87344	Cordoba	Arg.	474	31 19	64 13
87576	Ezeiza	Arg.	20	34 49	58 32
87715	Neuquen	Arg.	270	38 57	68 08
87748	Comand. Espora B.A.	Arg.	74	38 44	62 10
87860	Comodoro Rivadavia	Arg.	46	45 47	67 27

primeiro período enquanto que o segundo tem como deficiência a precariedade no funcionamento da rede aerológica do Nordeste.

Os dados de altitude da América do Sul e os GRIDS utilizados foram cedidos pelo Departamento Nacional de Meteorologia (DNMET).

3.2 Fundamentação Teórica

Até o presente os mecanismos que governam a evolução dos ciclones da alta troposfera ainda não são satisfatoriamente compreendidos. Visando contribuir para preencher tal lacuna foi utilizado, de forma qualitativa, o "modelo diagnóstico de previsão do tempo" de Silva Dias e Silva Dias (1984) para analisar os dois períodos escolhidos. O modelo está estruturado com base na teoria de desenvolvimento de Sutcliffe (1947) cuja expressão básica (Petterssen, 1956, p.324) é

$$\frac{\partial Q_0}{\partial t} = A_Q - \frac{R}{f} \nabla^2 \left(\frac{g}{R} A_T + H + S \right)$$

onde Q_0 é a vorticidade absoluta no nível de 1000 hPa, A_Q é advecção de vorticidade absoluta no nível de 500 hPa, A_T é a advecção de temperatura na camada 1000-500 hPa, S e H são as contribuições adiabática e diabática, respectivamente, ∇^2 é o operador laplaciano horizontal, R é a constante dos gases para o ar seco, " f " é o parâmetro de Coriolis e " g " é a aceleração da gravidade.

Desenvolvido para sistemas atmosféricos de latitudes médias, o modelo de Sutcliffe trabalha com quantidades de caráter geostrofico ou seja, as advecções são advecções pelo vento geostrofico. É evidente que a aplicação de tal modelo a sistemas de latitudes tropicais exige modificações já que a geostrofia não é uma boa aproximação nessas regiões. Assim, o modelo de Silva Dias e Silva Dias calcula os três primeiros termos do lado direito da equação anterior utilizando o vento observado como parâmetro básico em lugar do geopotencial. Ele é usado tanto no cálculo das advecções quanto no da divergência de umidade, um dos possíveis componentes da contribuição diabática, contribuição essa que deve ser importante em situações que envolvam considerável nebulosidade.

O "modelo diagnóstico de previsão de tempo" utiliza técnicas de análise objetiva na obtenção de campos meteorológicos em ar superior, tanto para variáveis básicas quanto para variáveis derivadas. Dessa forma, o modelo obtém para vários níveis da atmosfera os campos de, por exemplo: temperatura, geopotencial, divergência de umidade, advecção de temperatura e vorticidade.

Como valores obtidos em qualquer ponto de grade através de análise objetiva se baseiam nas regiões com dados é evidente que, quanto mais afastado estiver o ponto (da região com dados), menor será a representatividade física do valor obtido. Assim, visando dar maior consistência às interpolações e extrapolações por análise objetiva, Silva Dias e Silva Dias (1986) introduziram dados tipo GRID em conjunto com dados convencionais

principalmente em regiões escassas em observações como é o caso dos oceanos. Nessa versão do modelo os cálculos são feitos para uma grade espaçada de 5 em 5 graus, limitada pelas latitudes de 10N-60S e longitudes de 90W-25W. Ela foi usada para estudar o período de 9 a 20 de dezembro de 1989. Vale salientar que esse modelo vem sendo rotineiramente utilizado pelo Departamento Nacional de Meteorologia (DNMET) para auxílio no diagnóstico e previsão do tempo.

Visando tornar o modelo mais representativo em áreas menores, Cavalcanti e Medeiros (1988) propuseram uma versão para o NEB. Para tanto alteraram principalmente a grade e o parâmetro de filtragem para uma malha e filtro adequados à Região (filtro passa baixa). Nessa versão a grade utilizada tem espaçamento de 2 graus e é limitada pelas latitudes de 4N-24S e longitudes de 50W-30W. Ela foi usada nos cálculos do período de 15 a 30 de dezembro de 1980. Silva e Paz (1988) também a utilizaram para prognosticar o deslocamento de um vórtice ciclônico de núcleo frio.

Neste trabalho são apresentadas análises do campo do vento (linhas de corrente) e de quantidades consideradas mais relevantes dentre aquelas obtidas no "modelo diagnóstico de previsão do tempo". São mostrados os seguintes campos derivados:

(a) componente vertical da vorticidade absoluta

$$Q = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f$$

(b) advecção horizontal da componente vertical da vorticidade absoluta

$$A_Q = - (\tilde{\nabla}_p \cdot \nabla_p Q) = - u \frac{\partial Q}{\partial x} - v \frac{\partial Q}{\partial y} - v \frac{df}{dy}$$

(c) Divergência horizontal de umidade

$$D_q = (\tilde{\nabla}_p \cdot q\tilde{\mathbf{V}}) = \frac{\partial}{\partial x}(qu) + \frac{\partial}{\partial y}(qv)$$

(d) divergência horizontal de massa

$$D = \tilde{\nabla}_p \cdot \tilde{\mathbf{V}} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$$

(e) advecção horizontal de temperatura

$$A_T = - (\tilde{\nabla}_p \cdot \nabla_p T) = - u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y}$$

Onde, x é a direção ao longo dos paralelos, y é a direção ao longo dos meridianos, $\tilde{\nabla}_p = \tilde{i} \frac{\partial}{\partial x} + \tilde{j} \frac{\partial}{\partial y}$ é o vetor nabla numa superfície isobárica, u e v são as componentes zonal e meridional do vento, respectivamente, $\tilde{\mathbf{V}} = \tilde{i} u + \tilde{j} v$ é o vetor velocidade horizontal, f é o parâmetro de Coriolis, T é a temperatura e q é a umidade específica.

É evidente que quantidades tais como a advecção de vorticidade e a divergência de umidade são importantes no caso de sistemas de regiões tropicais. É discutível, entretanto, a importância da advecção de temperatura devido aos fracos gradientes térmicos da atmosfera tropical. Por outro lado, estudos já efetuados justificam investigar sua possível influência na formação e/ou evolução dos ciclones da alta troposfera que afetam o Nordeste do Brasil tendo em vista que os mesmos estão frequentemente associados à penetração de sistemas frontais na Região.

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 Caso I: Período de 15 - 30/12/80

4.1.1 Condições Sinóticas

A descrição das condições sinóticas existentes no primeiro caso é feita com base em imagens de satélite e cartas de linhas de corrente. O período de 15 a 30 de dezembro de 1980 é estudado utilizando análises para o nível de 500 hPa embora, como o próprio nome sugere, os ciclones da alta troposfera sejam usualmente melhor identificados nos altos níveis. Isso foi motivado pelo fato de que foram obtidos poucos dados para os altos níveis.

Precedendo a formação do vórtice ciclônico sobre a parte sudoeste do NEB no dia 18, havia do dia 15 ao dia 17 forte nebulosidade associada ao anticiclone da Bolívia com nuvens cumuliformes predominando sobre a porção centro-oeste e sul da Amazônia (Figs. 4.1a - c). Essa nebulosidade formava uma faixa contínua com a de um sistema frontal cujo centro se localizava sobre o Atlântico Sul. Dois cavados, um situado sobre o centro-leste do NEB e outro próximo à costa da Região Sudeste, podiam ser vistos no nível de 500 hPa no dia 15 (Fig. 4.2) enquanto que apenas um cavado era visível no dia 16 (Fig.4.3).

O vórtice ciclônico fêz-se presente em 500 hPa sobre o NEB a partir do dia 18 (Fig. 4.4). Nesse dia, a nebulosidade

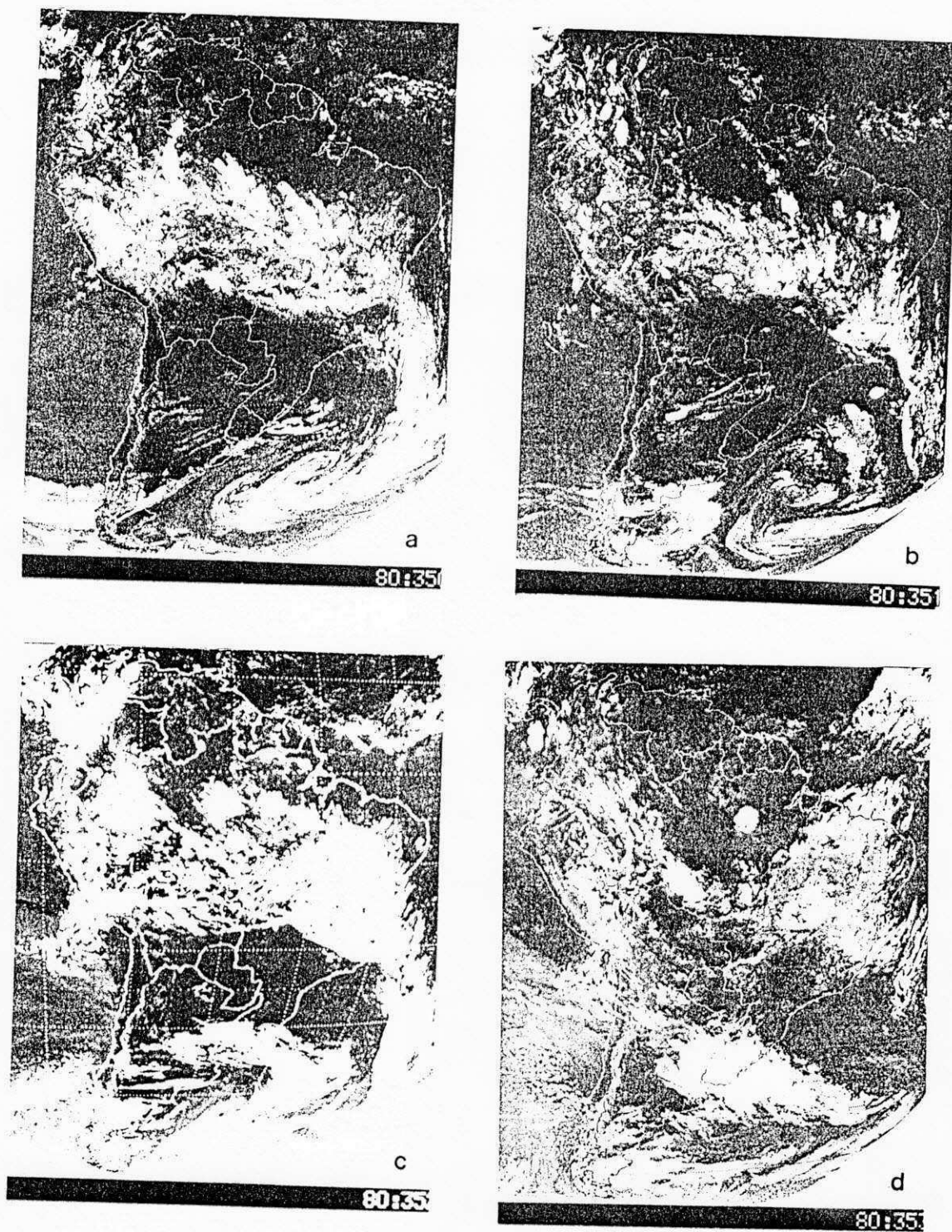


Fig. 4.1 - Imagem de satélite para as 12:00 TMC do dia: (a) 15/12/80, (b) 16/12/80, (c) 17/12/80 e (d) 18/12/80.

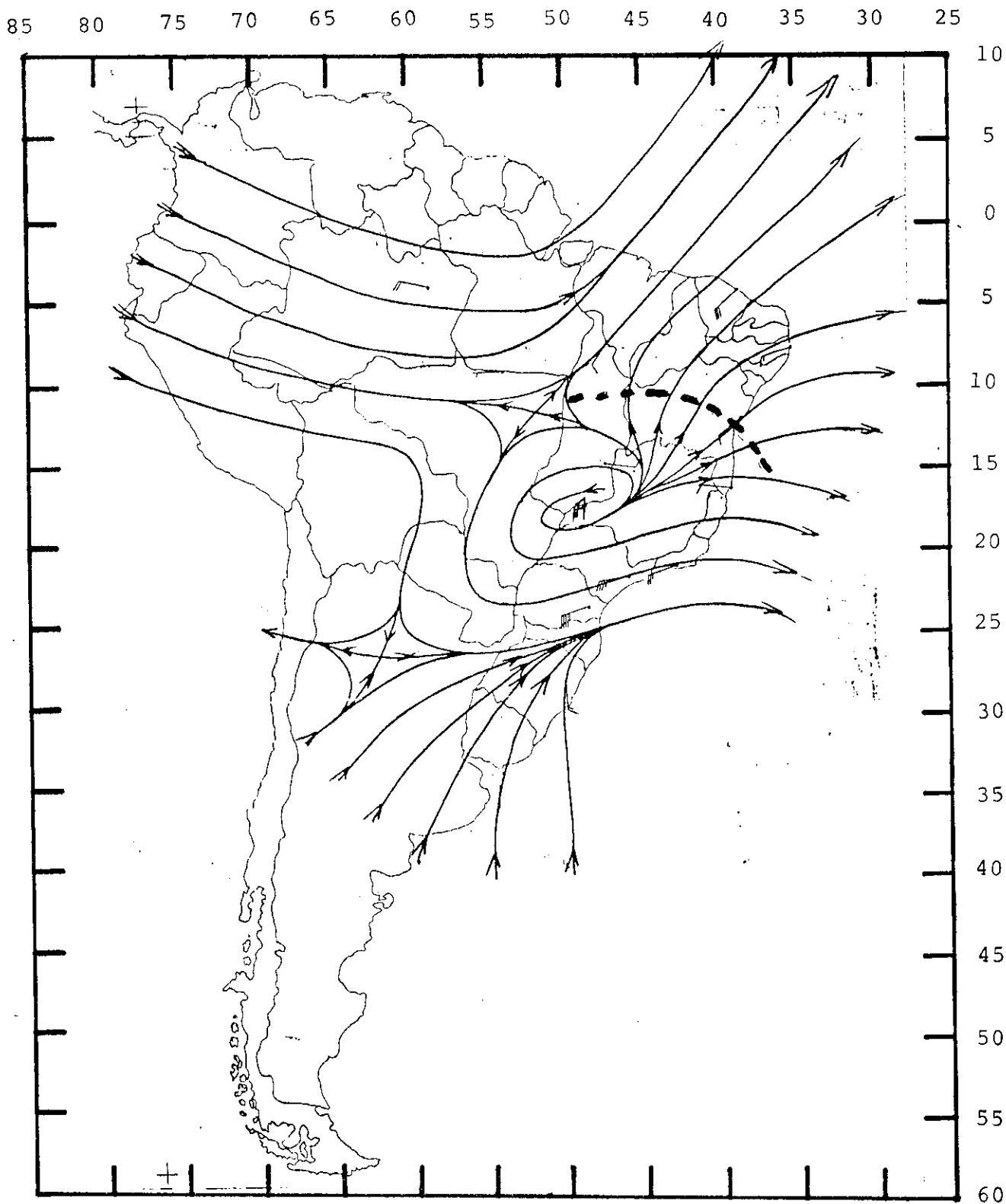


Fig. 4.2 - Linhas de corrente no nível de 500 hPa para as 12:00 TMO do dia 15/12/80.

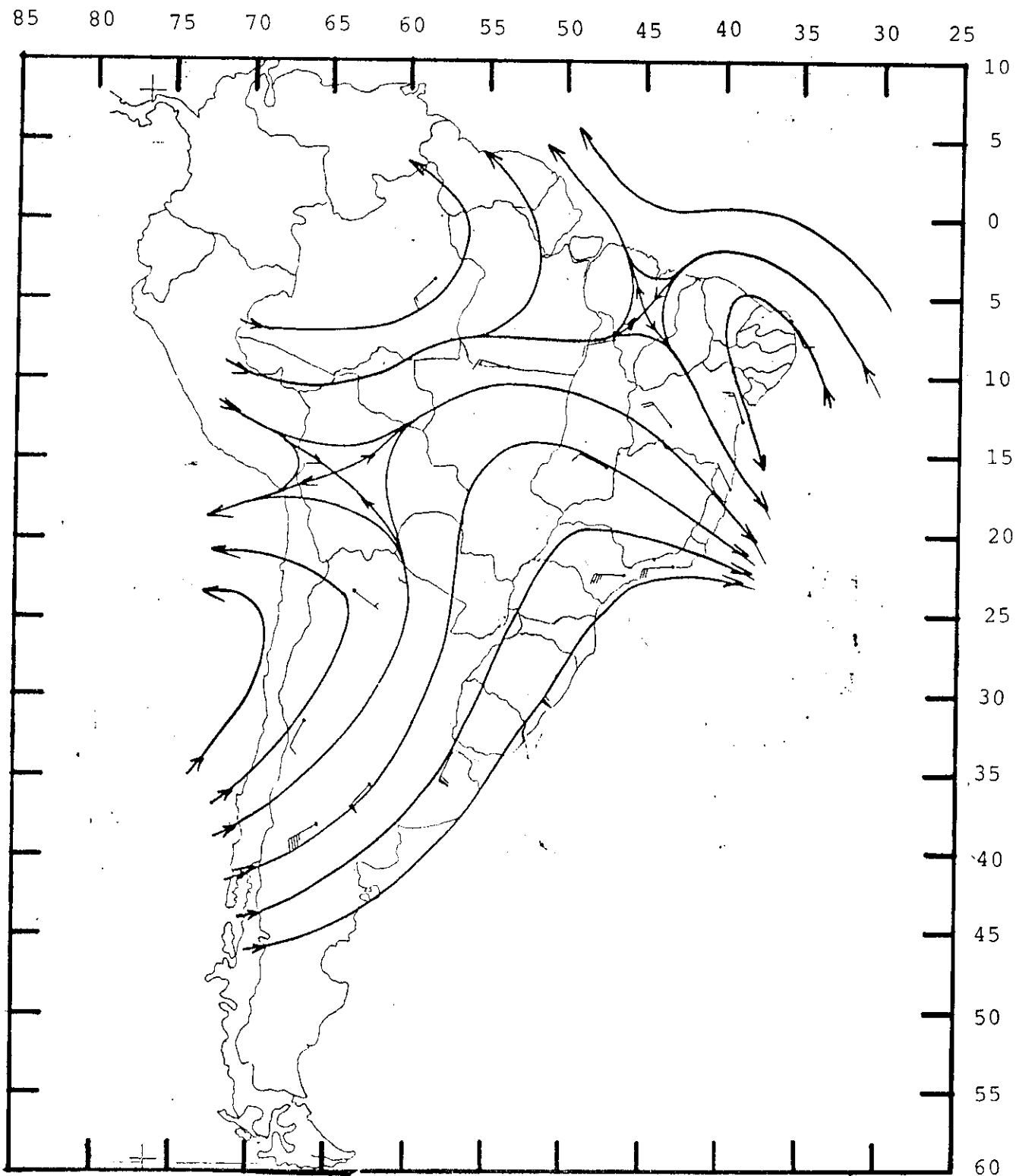


Fig. 4.3 - Linhas de corrente no nível de 500 hPa para as 12:00 TMO do dia 16/12/80.

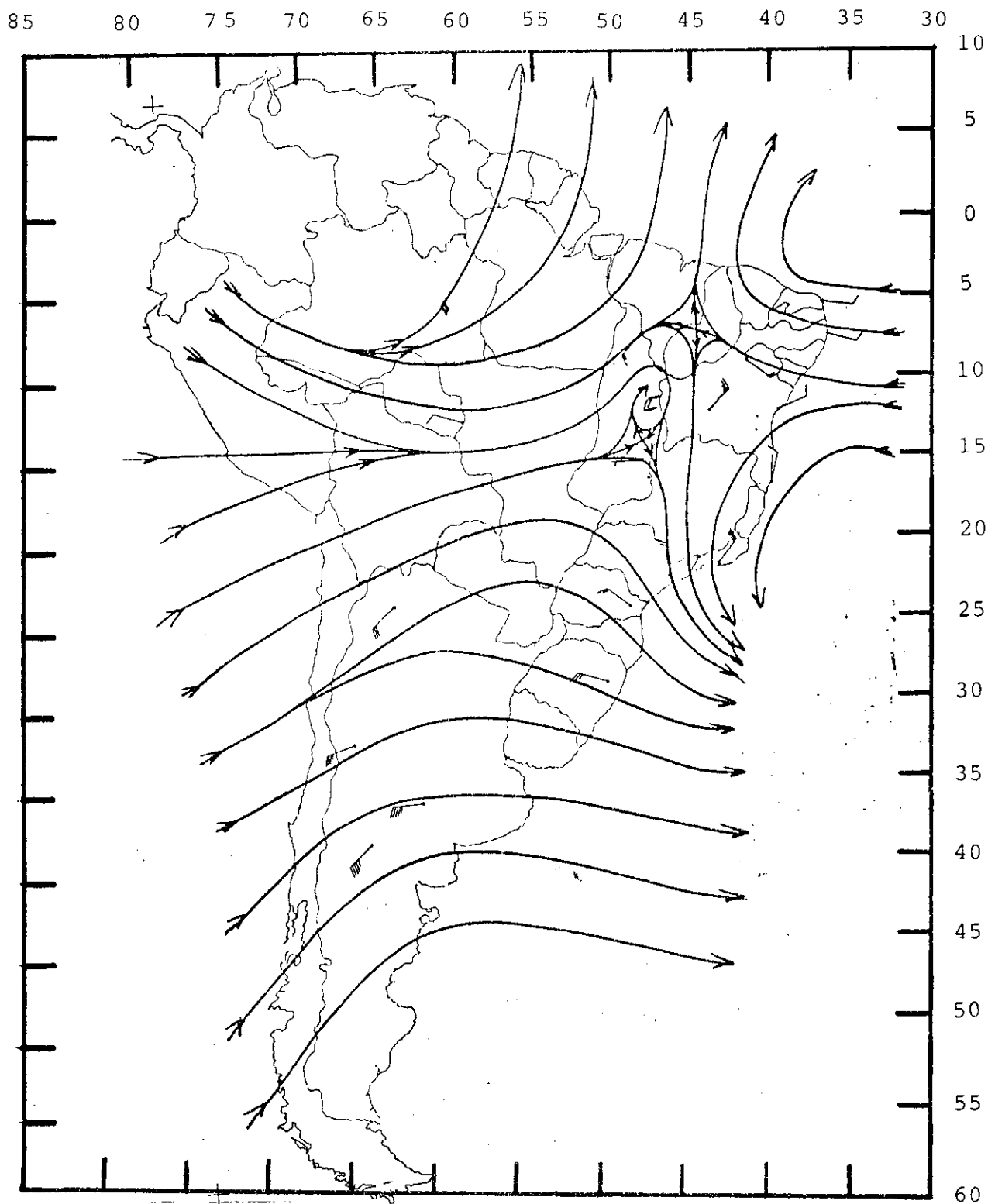


Fig. 4.4 - Linhas de corrente no nível de 500 hPa para as 12:00 TMO do dia 19/12/80.

associada ao anticiclone da Bolívia estava menos forte, o sistema frontal havia se dissipado e uma outra frente fria se organizava no Rio Grande do Sul e Uruguai, à frente de um cavado orientado segundo a direção sudoeste - nordeste. À exceção do litoral leste, todo o NEB estava encoberto por nebulosidade média e baixa (Fig. 4.1d).

No dia 19 o anticiclone da Bolívia apresentava bastante nebulosidade em seu flanco oriental, o sistema frontal anteriormente localizado sobre o Uruguai e Rio Grande do Sul estava melhor organizado e se encontrava sobre o Paraguai e os estados do Paraná e Santa Catarina (Fig. 4.5a). Uma faixa de nebulosidade parecia conectar o sistema frontal com o vórtice ciclônico. A carta de linhas de corrente no nível de 500 hPa (Fig. 4.6) mostra que o vórtice ciclônico deslocou-se para o sul da Bahia - norte de Minas Gerais, enquanto no Uruguai e sul do Brasil havia uma circulação ciclônica fechada. As condições sinóticas descritas persistiram até o dia 24. Nesses dias a nebulosidade associada ao vórtice ciclônico e sistema frontal se assemelhava à configuração em "S" descrita por Kousky e Gan (1981) (Figs. 4.5a - d e 4.7a - b).

A imagem das 12:00 TMG do dia 25 (Fig. 4.7c) mostra na área de atuação do anticiclone da Bolívia intensa atividade convectiva sobre toda a parte central do Amazonas, Roraima, Mato Grosso e norte da Bolívia. O sistema frontal anteriormente localizado sobre o Paraná e Santa Catarina aparece nesta imagem sobre o Estado do Rio de Janeiro. Nove horas após, esse mesmo sistema frontal já atingia o Espírito Santo e centro de Minas

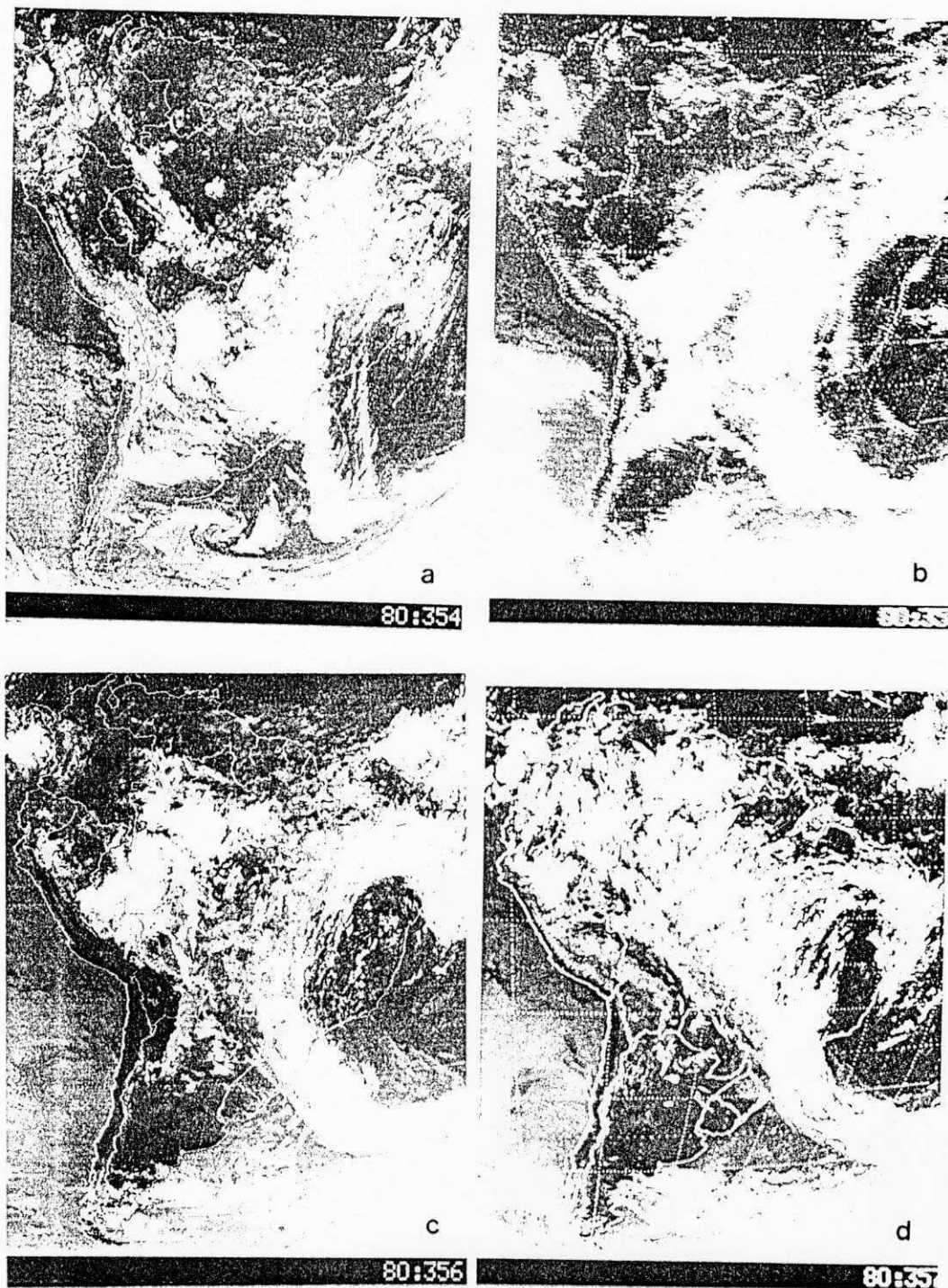


Fig. 4.5 - Imagem de satélite para as 12:00 TMC do dia: (a) 19/12/80, (b) 20/12/80, (c) 21/12/80 e (d) 22/12/80.

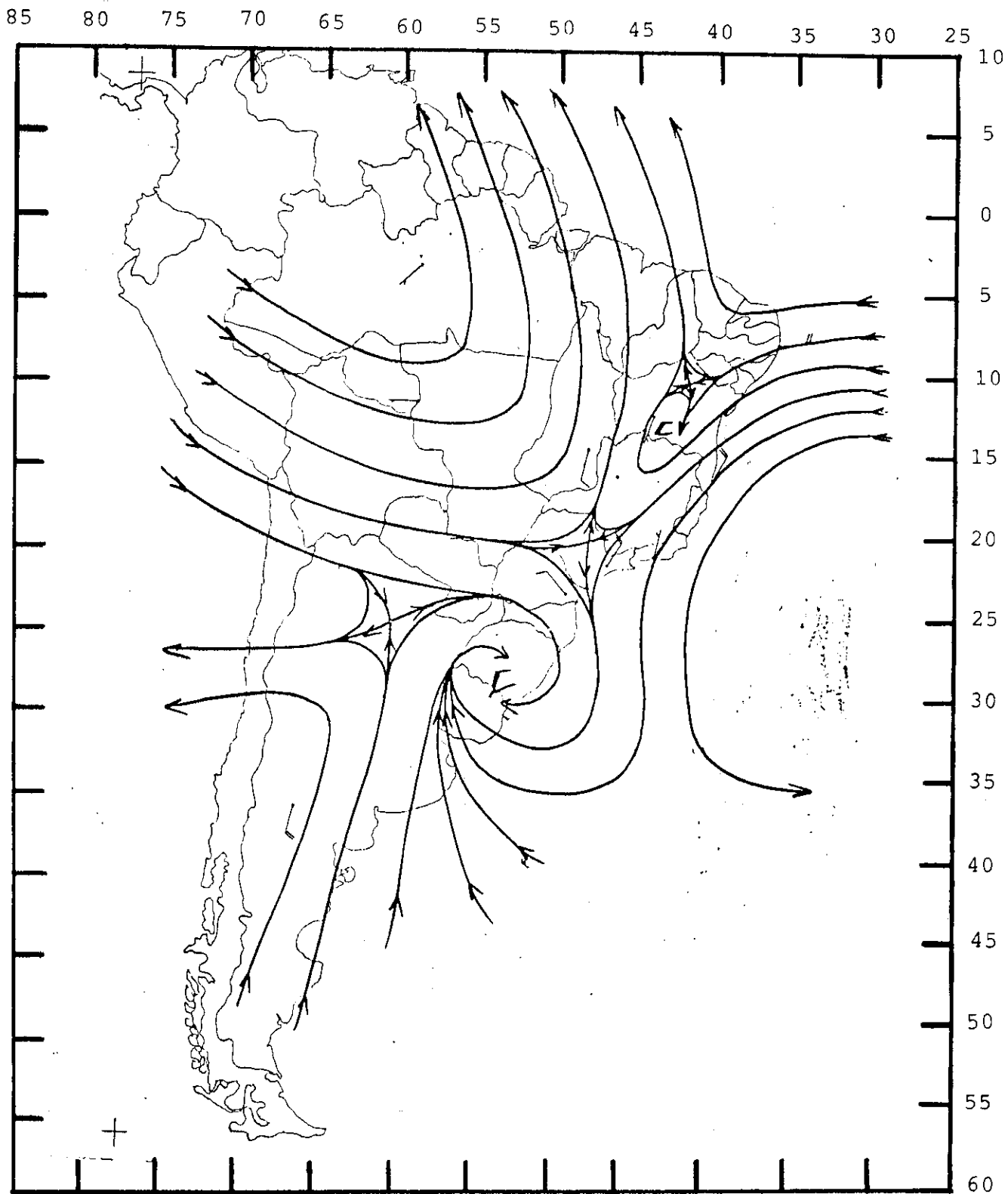


Fig. 4.6 - Linhas de corrente no nível de 500 hPa para as 12:00 TMO do dia 19/12/80.

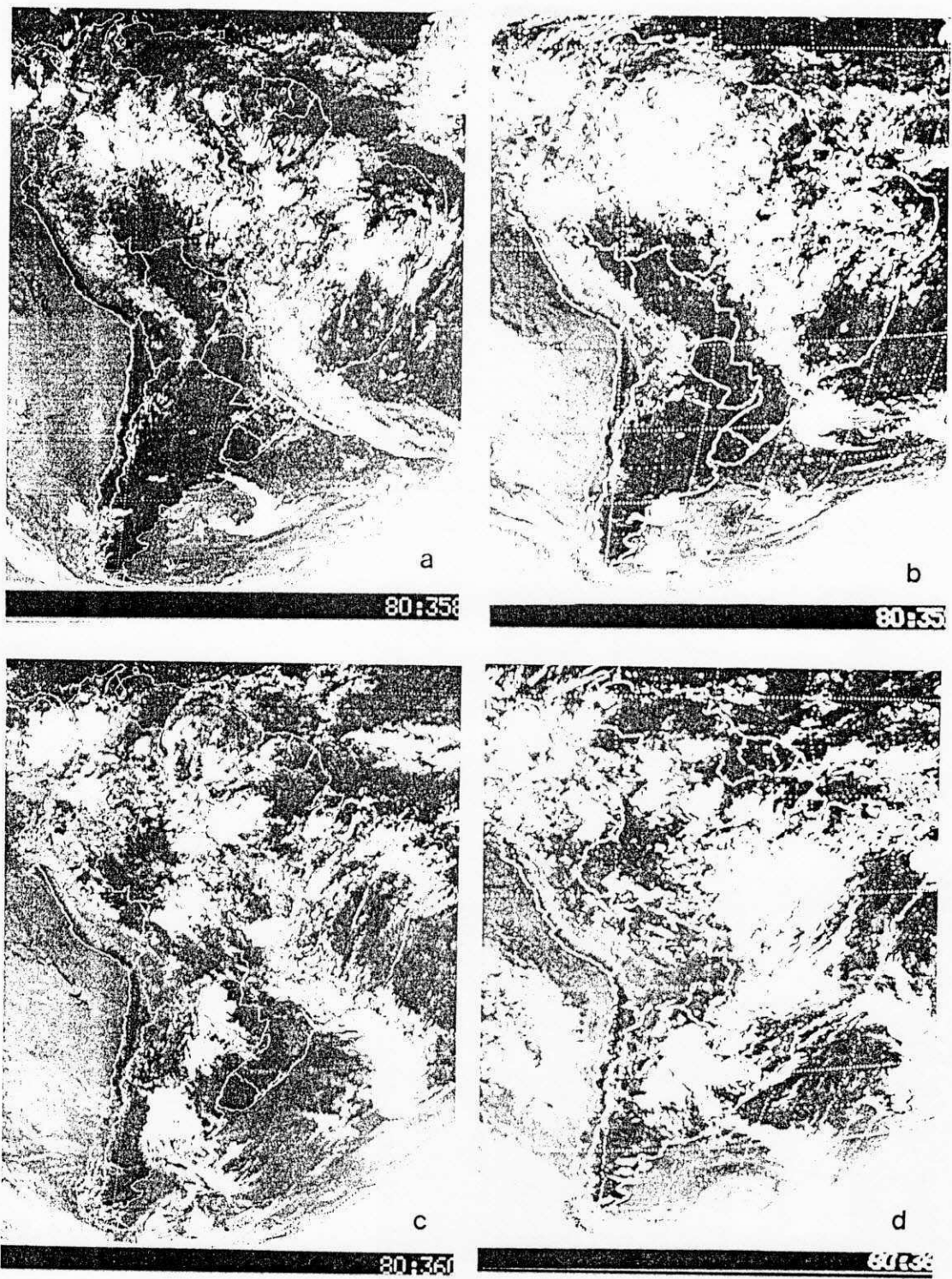


Fig. 4.7 - Imagem de satélite para as 12:00 TMC do dia: (a) 23/12/80, (b) 24/12/80, (c) 25/12/80 e (d) 26/12/80.

Gerais. A imagem das 12:00 TMG também sugere o início de um processo frontogenético sobre o Paraguai e norte da Argentina. Isso é corroborado pelo campo de linhas de corrente (não mostrado) nos baixos níveis da troposfera. Enquanto isso, o vórtice ciclônico persistia em 500 hPa sobre o NEB, agora com centro localizado sobre o sul do Piauí e norte da Bahia (Fig. 4.8). Outra característica importante desse mapa é a presença de um cavado de onda curta sobre o centro - leste da Argentina.

Nos dias 26 e 27 grande parte do território brasileiro se encontrava sob intensa atividade convectiva, o que pode ser visto claramente na imagem do dia 26 (Fig. 4.7d). O sistema frontal localizado sobre Minas Gerais e Espírito Santo entrava em dissipação enquanto prosseguia a formação do novo sistema frontal sobre o Paraguai e norte da Argentina. A formação desse novo sistema frontal estava sendo favorecida pela amplificação do cavado de onda curta visto na Figura 4.8. As cartas de linhas de corrente para o nível de 500 hPa evidenciam que o vórtice persistiu até o dia 26 (Fig. 4.9) já que não havia no dia 27 uma circulação ciclônica fechada na área em que o mesmo se localizava anteriormente.

Nos dias 28 e 29 a maior parte da nebulosidade convectiva existente no Brasil se encontrava na área do anticiclone da Bolívia (Figs. 4.10b - c). A nebulosidade existente sobre o NEB estava desorganizada. O sistema que se formava sobre o Paraguai e norte da Argentina se encontrava sobre São Paulo no dia 28. No dia seguinte, dia 29, ele atingia os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo. Outro

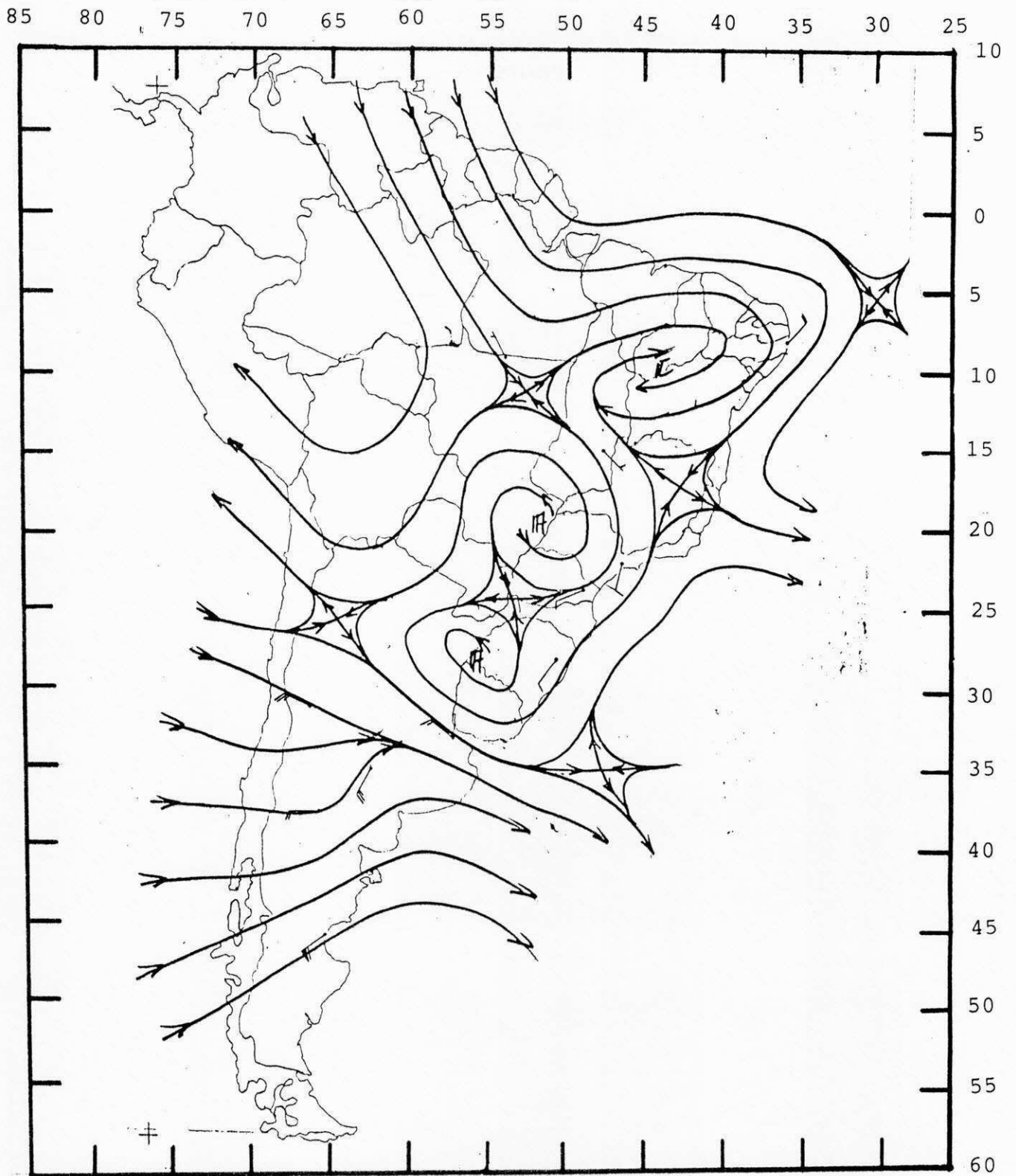


Fig. 4.8 - Linhas de corrente no nível de 500 hPa para as 12:00 TMO do dia 25/12/80.

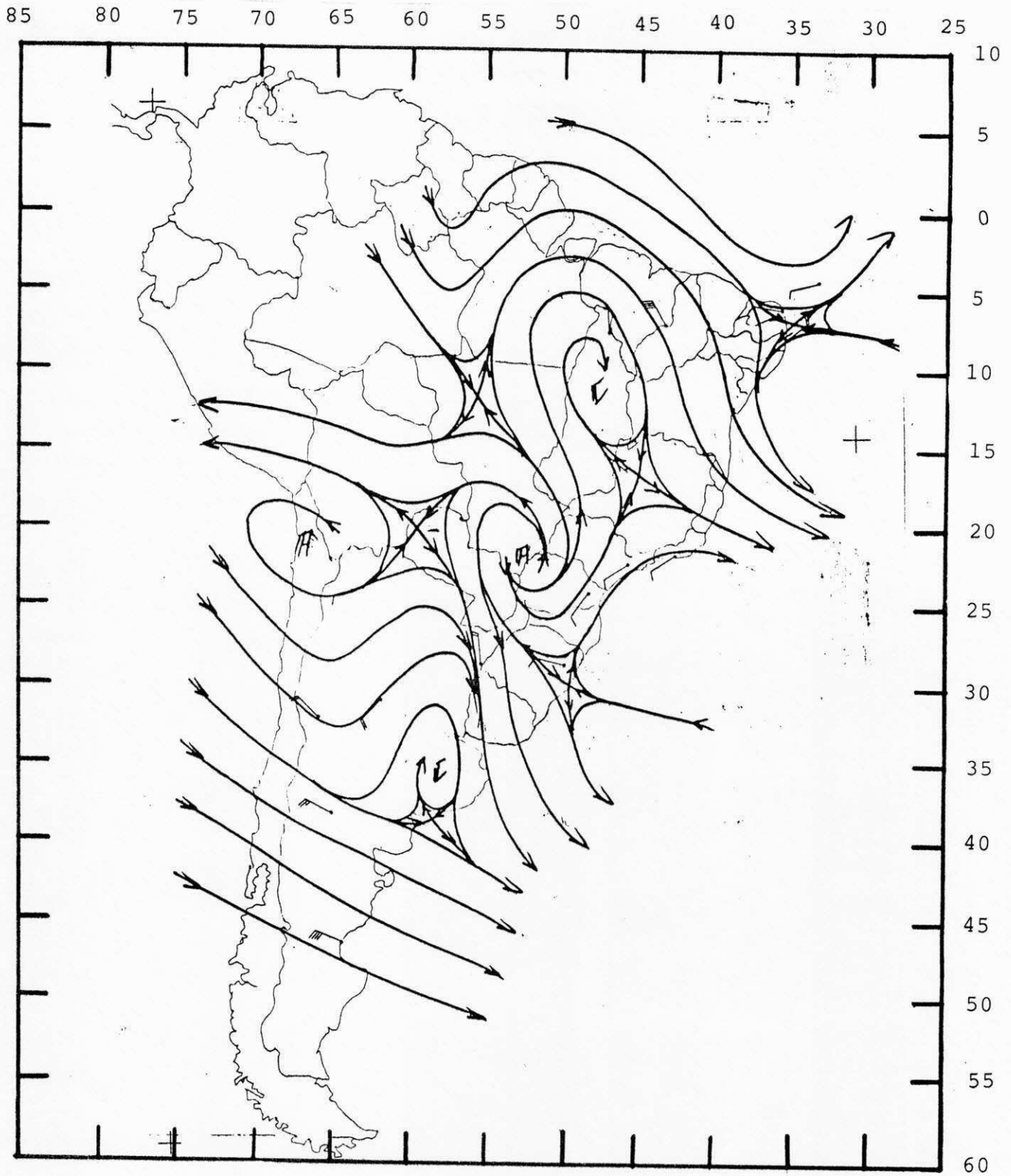


Fig. 4.9 - Linhas de corrente no nível de 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 26/12/80.

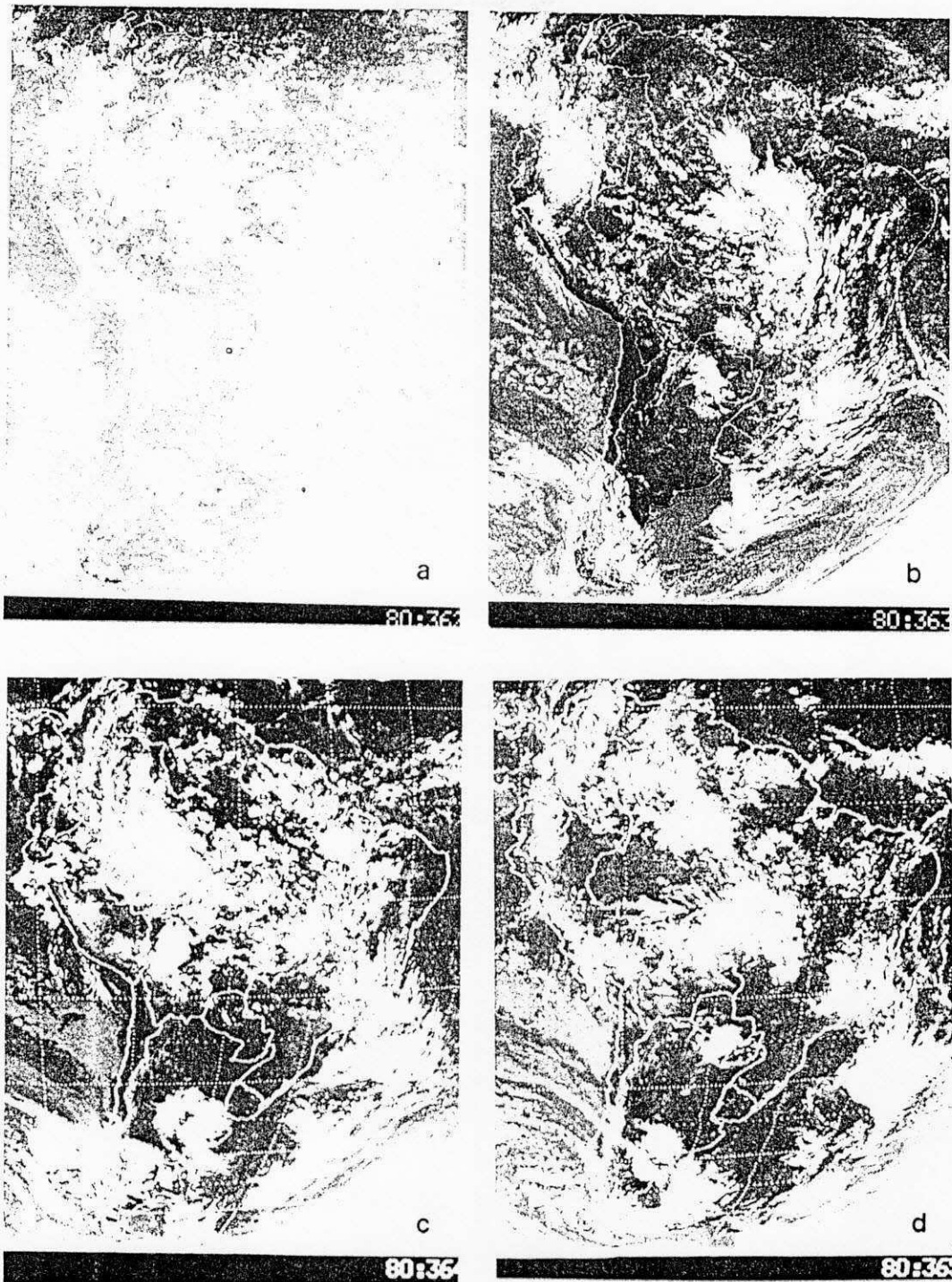


Fig. 4.10 - Imagem de satélite para as 12:00 TMG do dia: (a) 27/12/80, (b) 28/12/80, (c) 29/12/80 e (d) 30/12/80

aspecto interessante dessas imagens é a presença de complexos convectivos de mesoescala na região do Chaco. As linhas de corrente se apresentavam predominantemente zonais sobre o continente em 500 hPa (Fig. 4.11).

No dia 30, a nebulosidade associada ao anticiclone da Bolívia estava pouco organizada enquanto que a nebulosidade frontal se mostrava mais intensa sobre o oceano (Fig. 4.10d). Também se destaca nesta imagem a presença de um complexo convectivo de mesoescala sobre o Paraguai.

4.1.2 Discussão dos Campos Derivados

Nesta subsecção são apresentados os campos de vorticidade, advecção de vorticidade, divergência de umidade, advecção de temperatura e divergência de massa para níveis de pressão selecionados. Conforme já foi dito anteriormente, os resultados do Caso I foram obtidos na área limitada pelas latitudes de 4N e 24S e longitudes de 50W e 30W.

4.1.2.1 Vorticidade no nível de 500 hPa

Nos três dias que precederam a formação do vórtice ciclônico no NEB, dia 18, o campo da vorticidade apresentava valores negativos na Região o que é exemplificado pela análise do dia 15 (Fig. 4.12).

No dia 18, com o vórtice já formado (Fig.4.4), a vorticidade permanecia negativa em todo o NEB no nível de 500 hPa (Fig. 4.13) o mesmo não ocorrendo nos níveis mais baixos (não mostrados), o que indica que o vórtice não se estendia até a

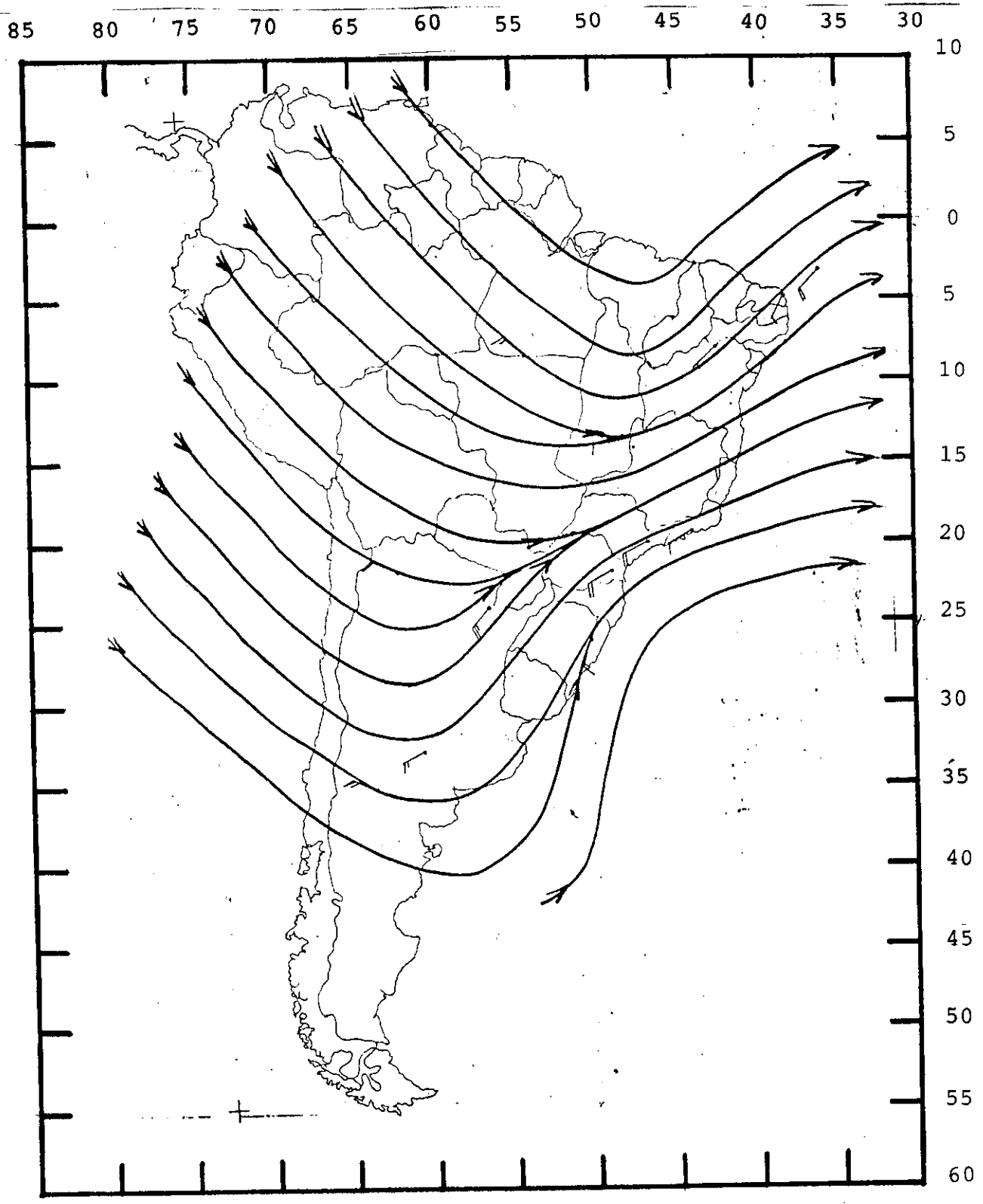


Fig. 4.11 - Linhas de corrente no nível de 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 29/12/80.

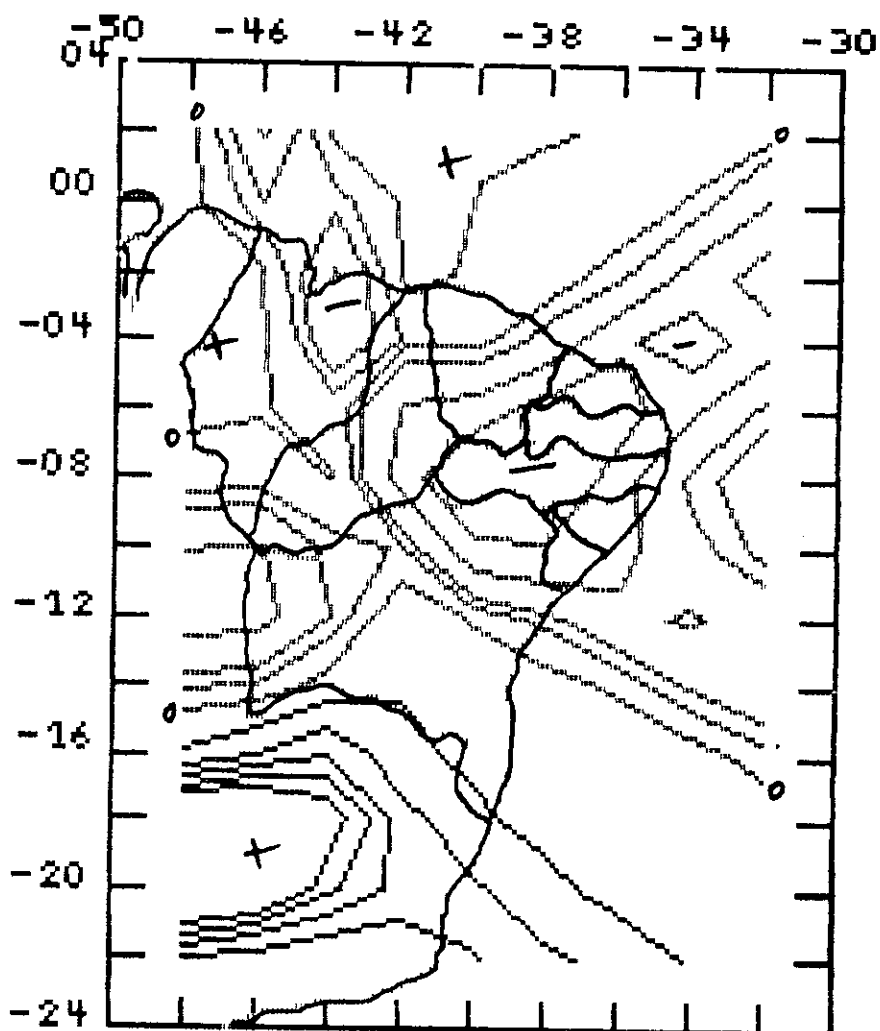


Fig. 4.12 - Vorticidade ($\times 10^{10} \text{ s}^{-1}$) em 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 15/12/80.

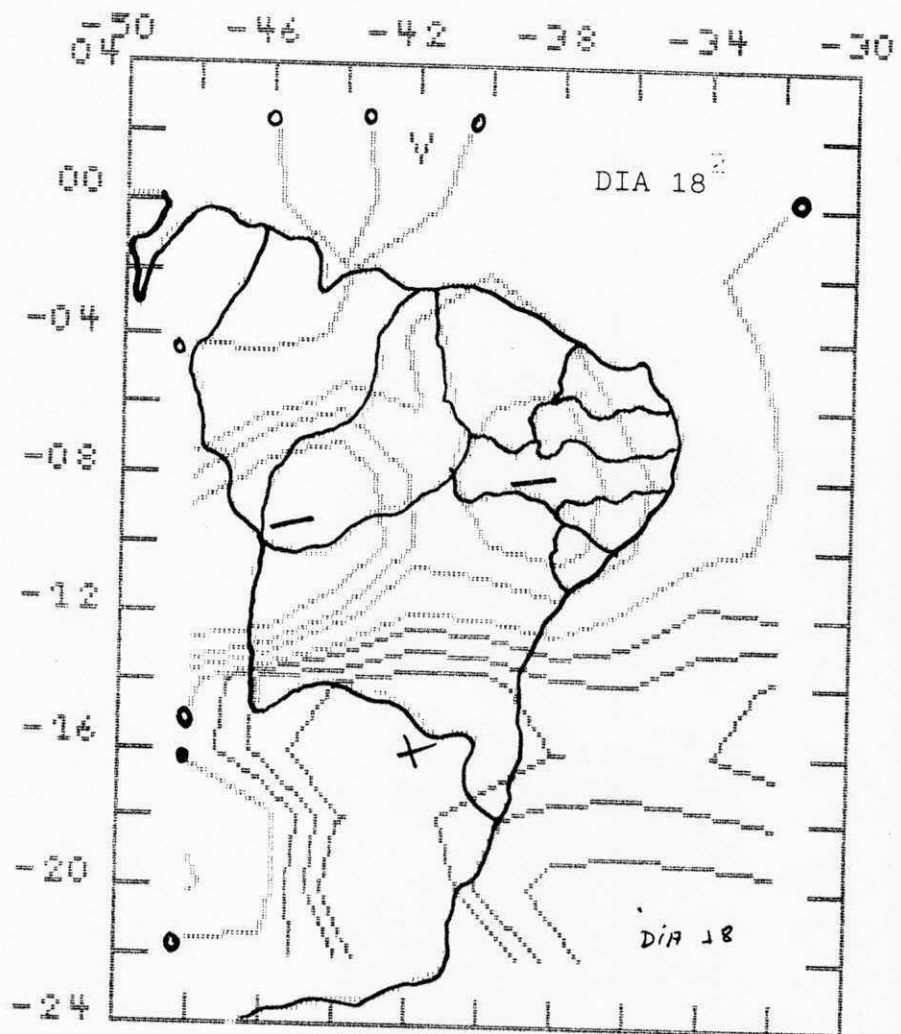


Fig. 4.13 - Vorticidade ($\times 10^{-7}$ /s) em 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 18/12/80.

baixa troposfera.

A presença do vórtice no período de 19 a 25 (Figs. 4.6 e 4.8) era responsável por valores negativos no campo de vorticidade sobre quase todo o NEB, com destaque para o núcleo localizado sobre a Bahia no dia 25 (Fig. 4.14).

Do dia 26 ao dia 29 a vorticidade em 500 hPa diminuiu gradativamente (em valor absoluto). No dia 26 havia valores negativos em todo o NEB com exceção do Ceará (Fig. 4.15) enquanto que no dia 29 havia valores negativos apenas sobre o nordeste do NEB (Fig. 4.16). Essa evolução do campo de vorticidade é coerente com o enfraquecimento gradual do escoamento ciclônico sobre a Região sugerido pelas Figuras 4.8, 4.9 e 4.11.

4.1.2.2 Advecção de Vorticidade em 700 e 500 hPa

A inclusão do nível de 700 hPa nesta subseção foi feita com base em experiência adquirida em centros de previsão do DNMET. Nesses centros o campo de advecção de vorticidade em 700 hPa é normalmente utilizado para verificar se há condições favoráveis ao aprofundamento do sistema na vertical.

No dia 17, dia que antecedeu a formação do vórtice, o campo de advecção de vorticidade em 500 hPa (Fig. 4.17) apresentava valores negativos em praticamente todo o NEB, destacando-se o núcleo negativo localizado sobre o centro-sul da Bahia. Nessa mesma área havia valores positivos no nível de 700 hPa.

Com a formação do sistema, dia 18, a advecção de

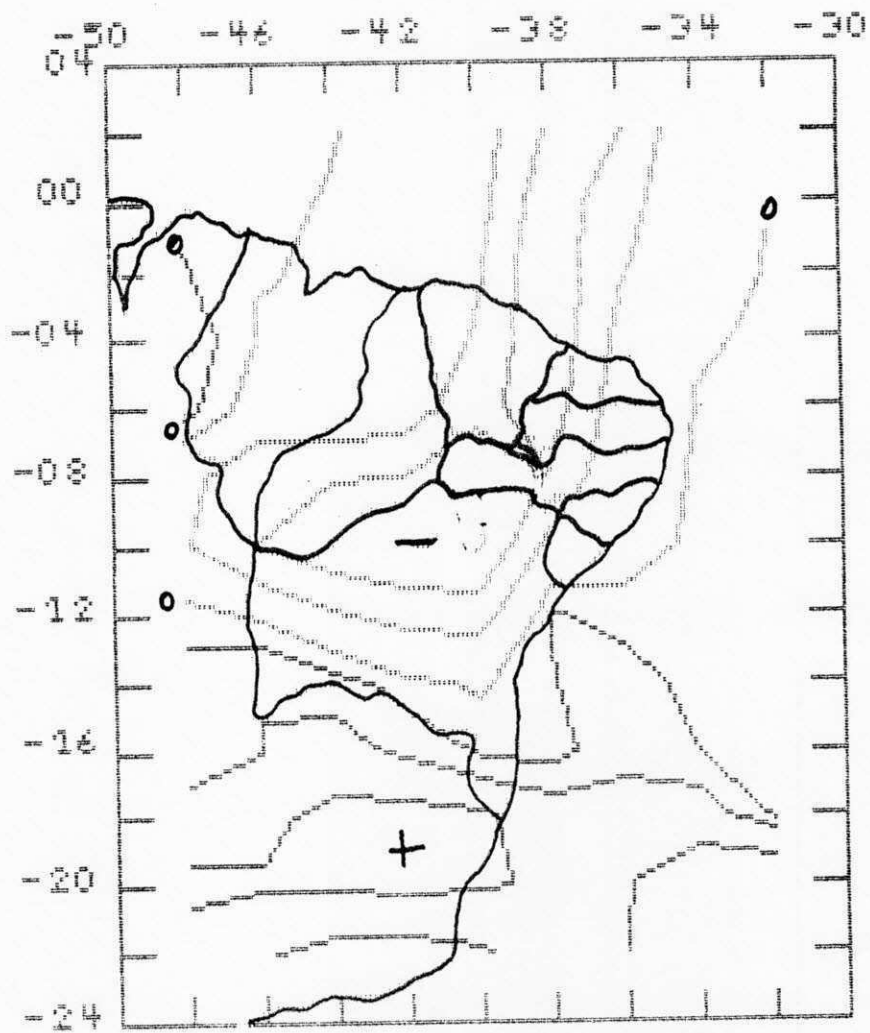


Fig. 4.14 - Vorticidade $(\times 10^{-7} / s)$ em 500 hPa para as 12:00 TMO do dia 25/12/80.

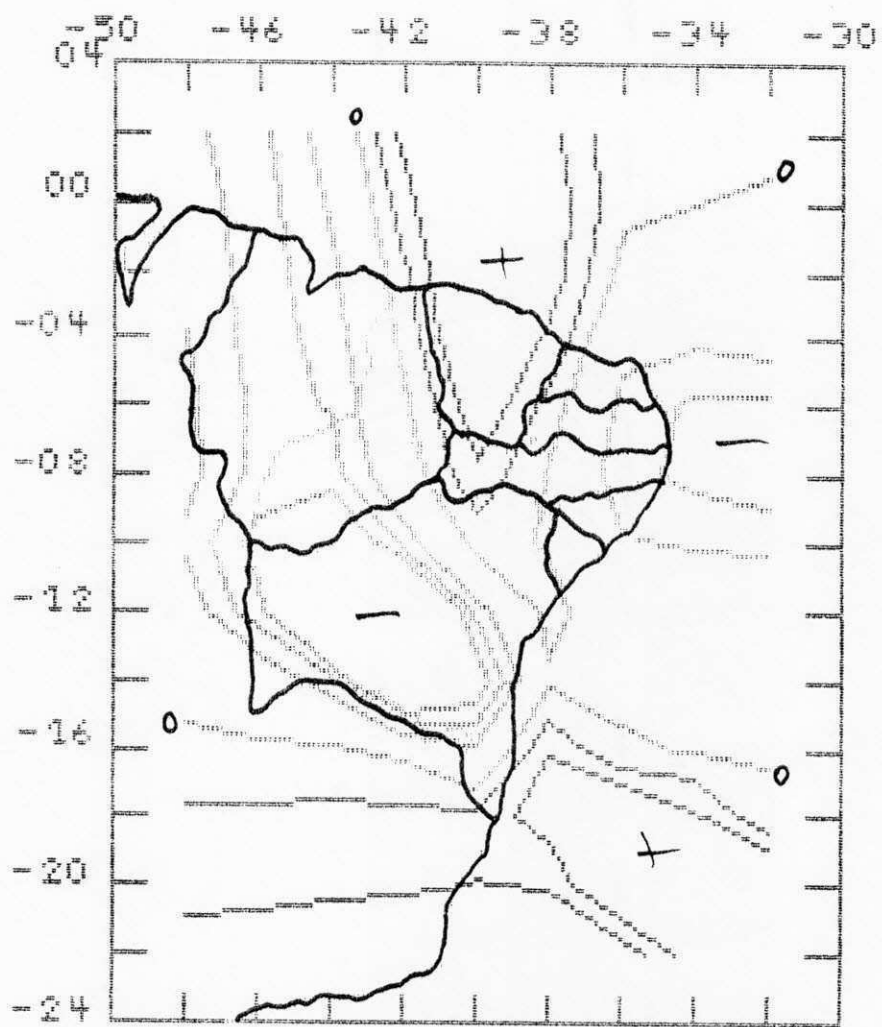


Fig. 4.15 - Vorticidade ($\times 10^{-7}$ /s) em 500 hPa para as 12:00 TMO do dia 26/12/80.

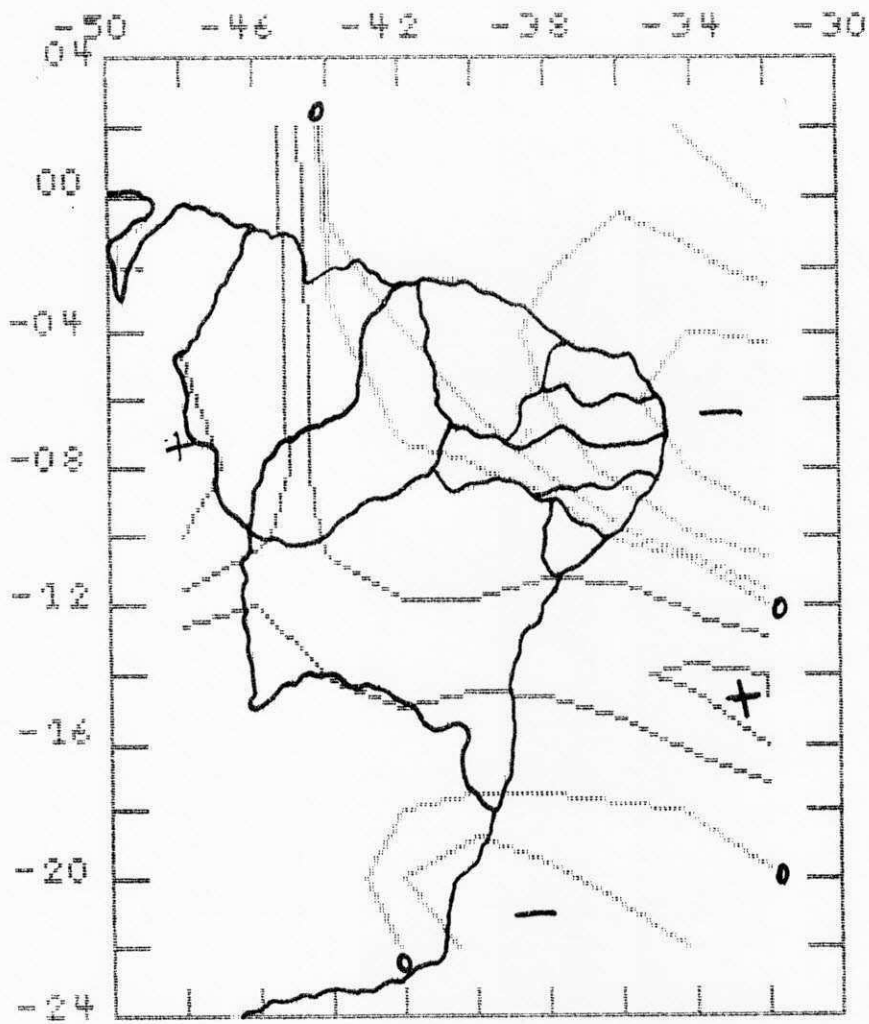


Fig. 4.16 - Vorticidade ($\times 10^{*7}$ /s) em 500 hPa para as 12:00 TMO do dia 29/12/80.

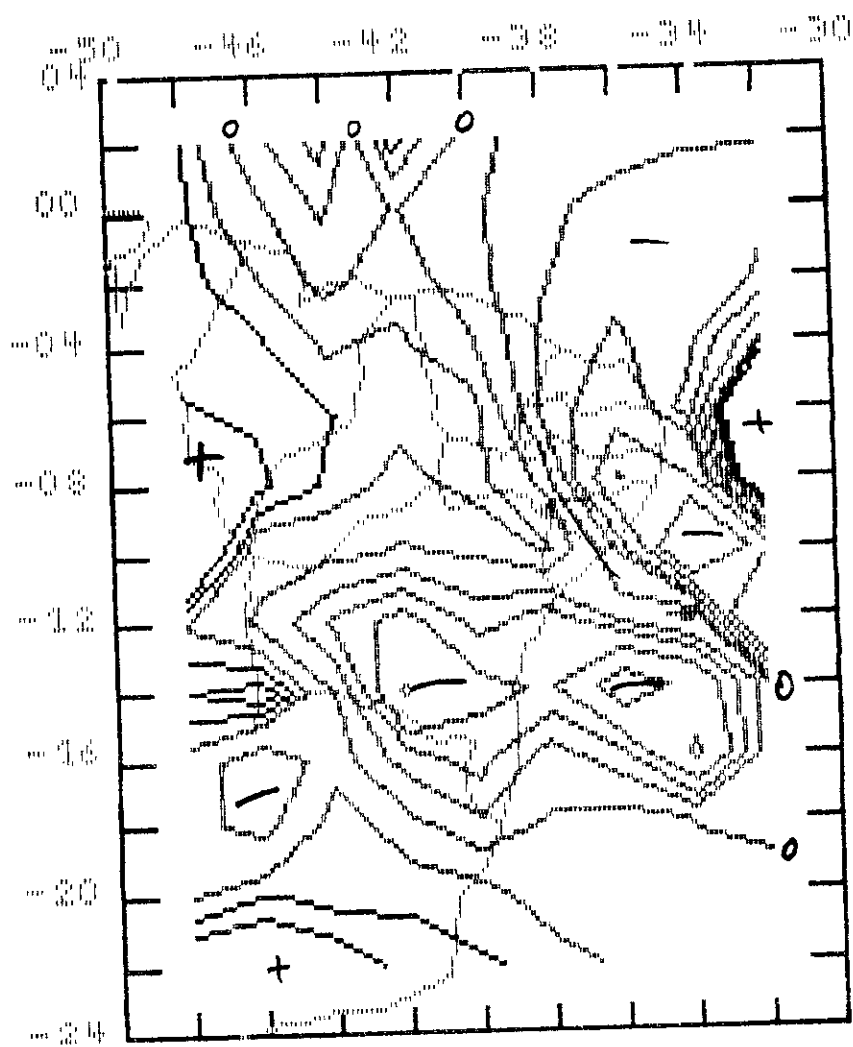


Fig. 4.17 - Adveccão de vorticidade ($\times 10^{-12} \text{ s}^{-2}$) em 500 hPa para as 12:00 TMC do dia 17/12/80.

vorticidade em 500 hPa permanecia negativa em todo o NEB com exceção do oeste da Bahia. Vale assinalar que no dia posterior (dia 19) o vórtice estava numa posição (Fig. 4.6) mais próxima do núcleo negativo localizado sobre Salvador neste dia (Fig. 4.18).

No dia 19 a advecção de vorticidade em 700 hPa era negativa em toda a Região com exceção de seu litoral leste, oeste do Piauí e leste do Maranhão (Fig. 4.19). Contribuindo para a manutenção do vórtice, valores negativos no campo da advecção persistiram sobre a região central do NEB do dia 20 ao dia 25 (Fig. 4.20), mas nos dias 26 e 27 havia valores positivos sobre o Maranhão, oeste do Piauí, oeste e sul da Bahia (Fig. 4.21).

Nos dias 28 e 29 a advecção de vorticidade no nível de 700 hPa era negativa sobre as porções leste e centro-sul do NEB (Fig. 4.22).

4.1.2.3 Divergência de Umidade em 700 hPa

Nos três dias que precederam a formação do vórtice havia convergência de umidade nas extremidades leste e oeste do NEB conforme pode ser comprovado pelo campo do dia 15 (Fig. 4.23). No dia 18 havia convergência de umidade sobre todo o NEB à exceção de grande parte da Bahia (Fig. 4.24).

No dia 19 havia dois núcleos de convergência sobre a Região: um localizado a oeste e outro a leste do Piauí (Fig. 4.25). Esses núcleos eram separados por uma área de divergência que se estendia até a Bahia. O campo apresentava ainda um núcleo negativo ao sul desse estado. Começando no dia 20 e prolongando-

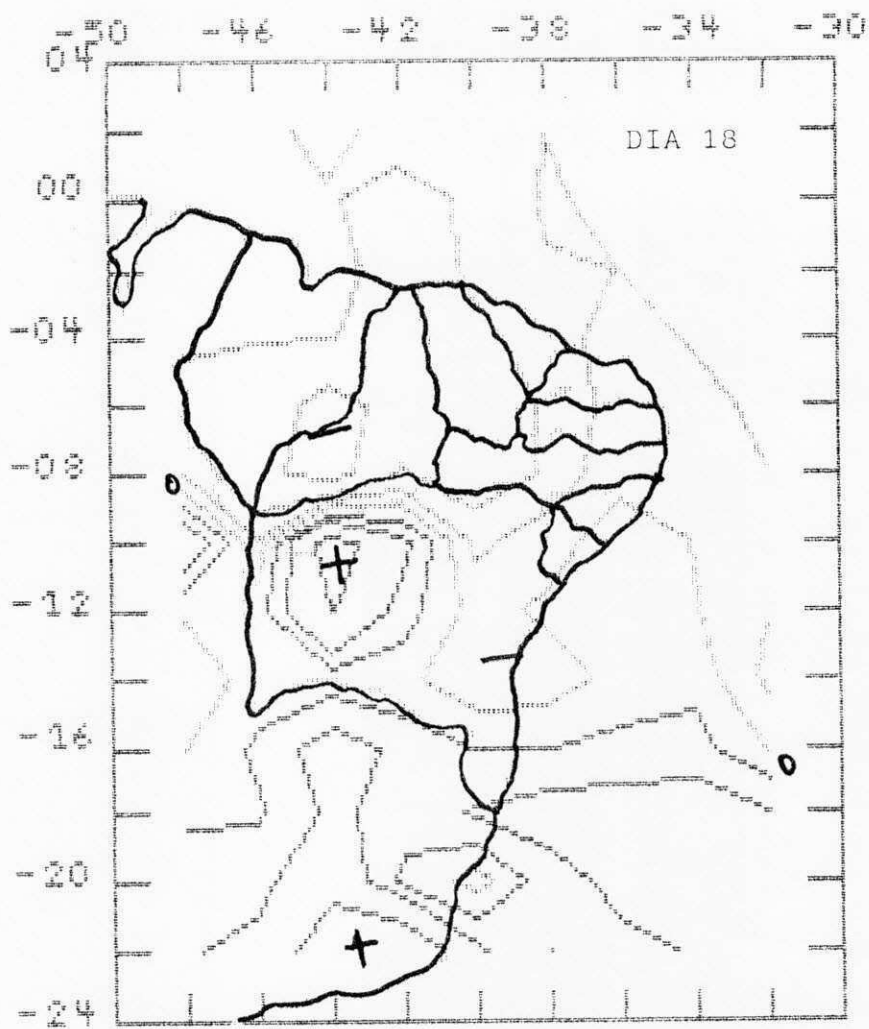


Fig. 4.18 - Adveccão de vorticidade ($\times 10^{-12} \text{ s}^{-2}$) em 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 18/12/80.

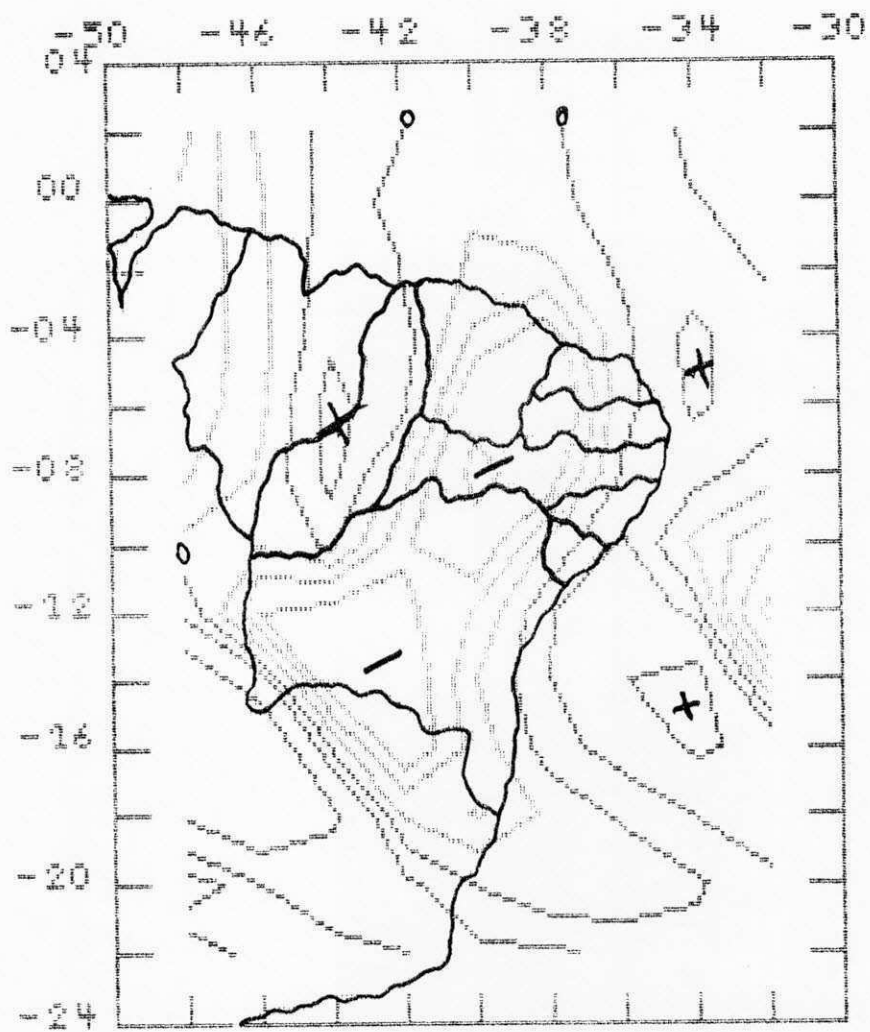


Fig. 4.19 - Adveccão de vorticidade ($\times 10^{12} \text{ s}^{-2}$) em 700 hPa para as 12:00 TMC do dia 19/12/80.

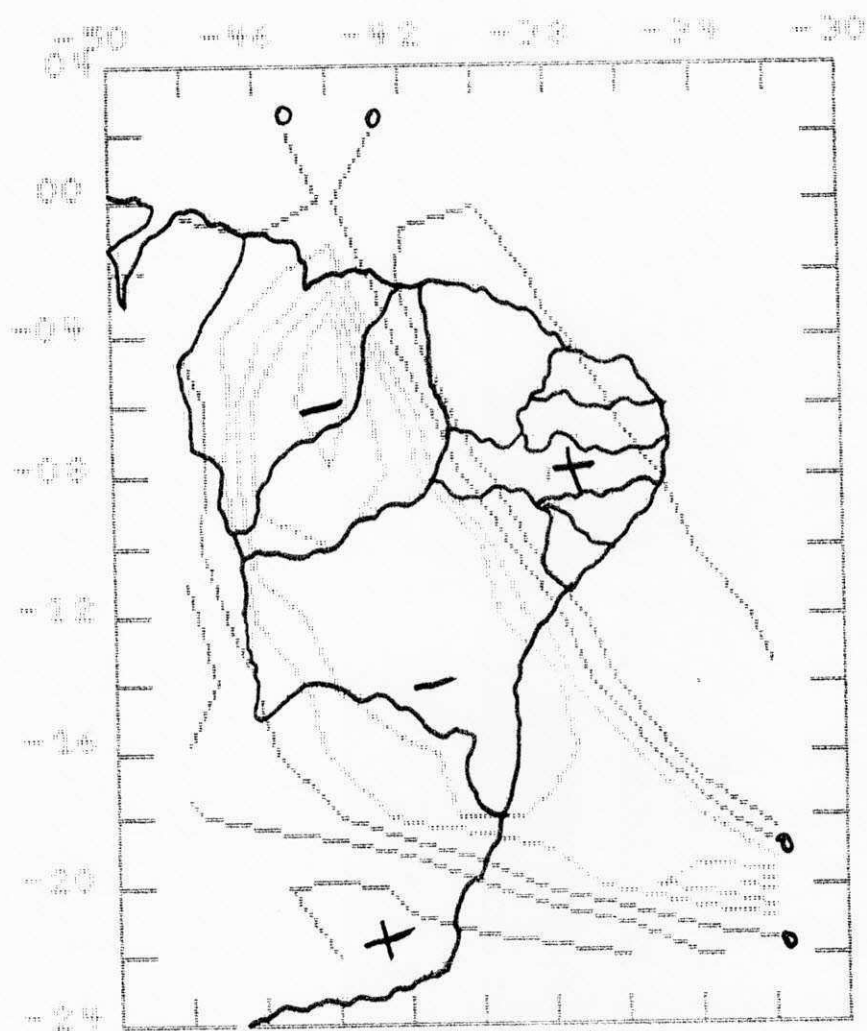


Fig. 4.20 - Adveccão de vorticidade ($\times 10^{-12} \text{ s}^{-2}$) em 700 hPa para as 12:00 TMC do dia 25/12/80.

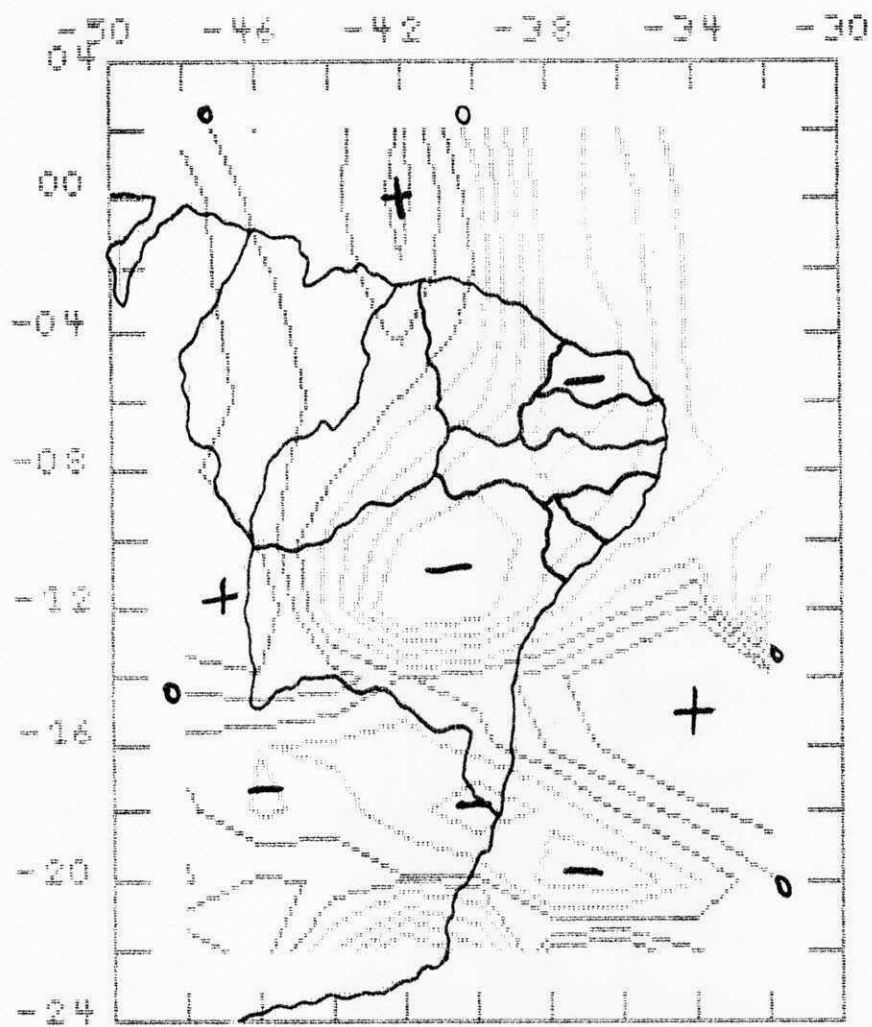


Fig. 4.21 - Adveccão de vorticidade ($\times 10^{12} \text{ s}^{-2}$) em 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 26/12/80.

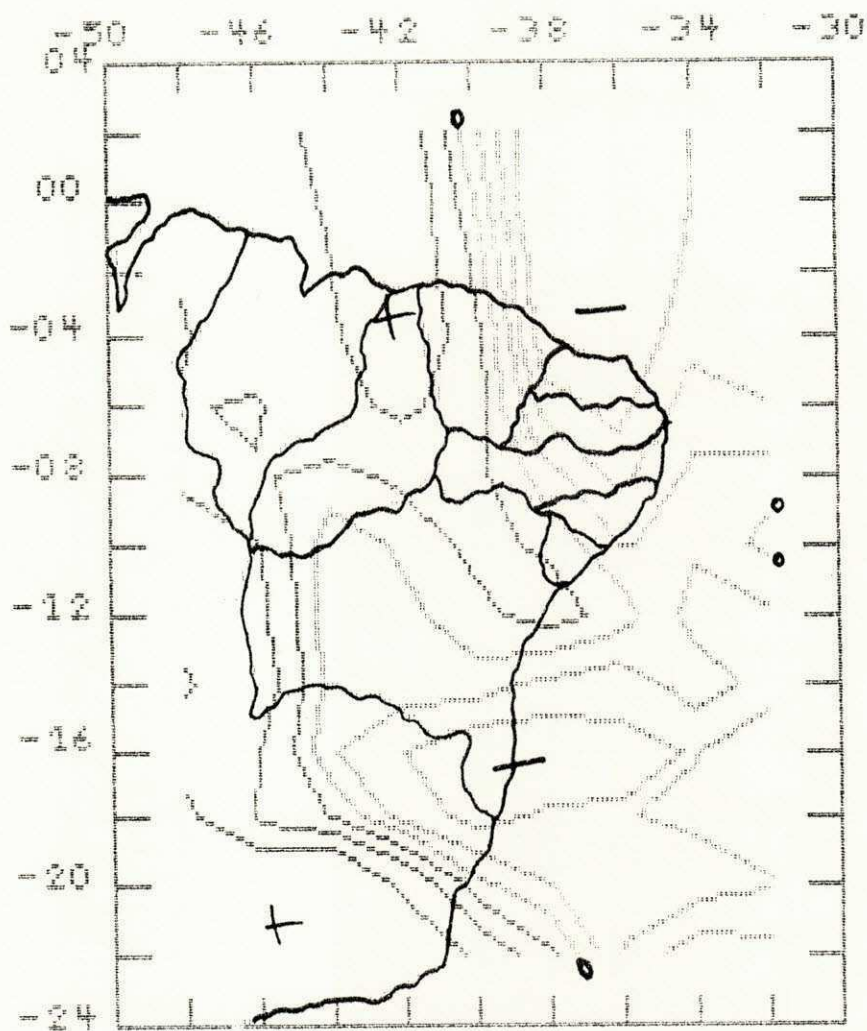


Fig. 4.22 - Adveccão de vorticidade ($\times 10^{-12} \text{ s}^{-2}$) em 700 hPa para as 12:00 TMC do dia 28/12/80.

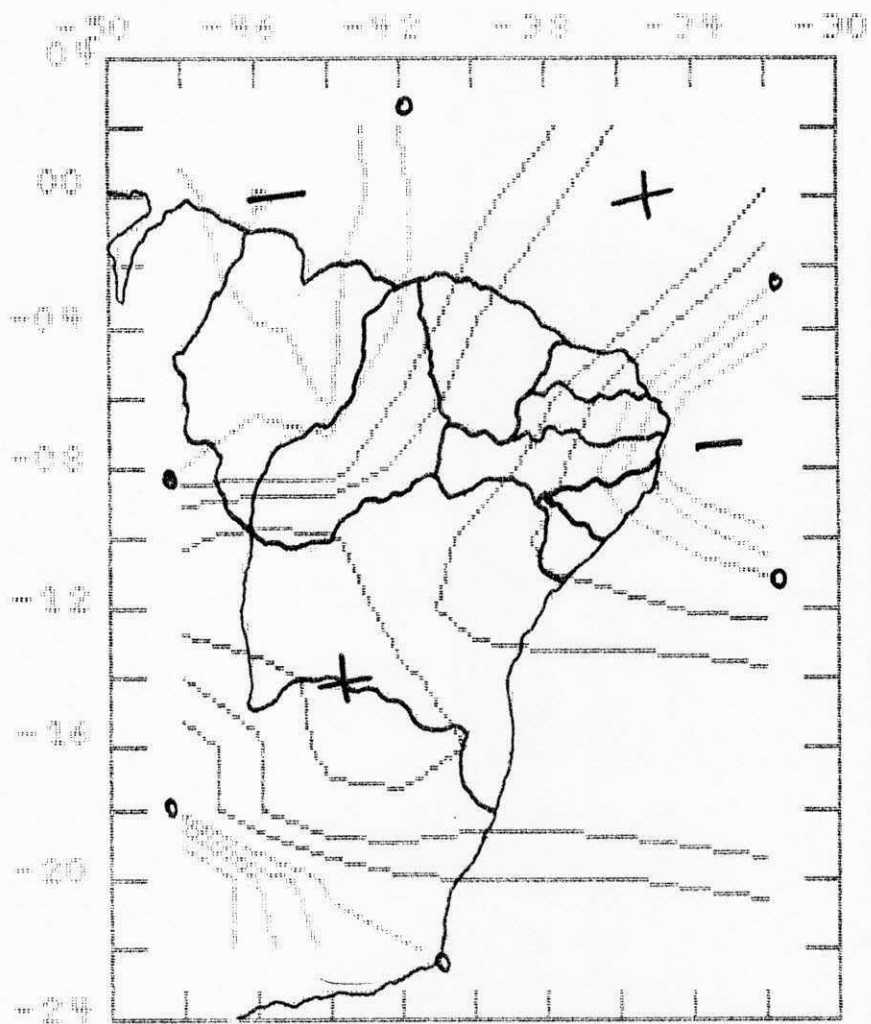


Fig. 4.23 - Divergência de unidade ($\times 10^{10}$ g/s) em 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 15/12/80.

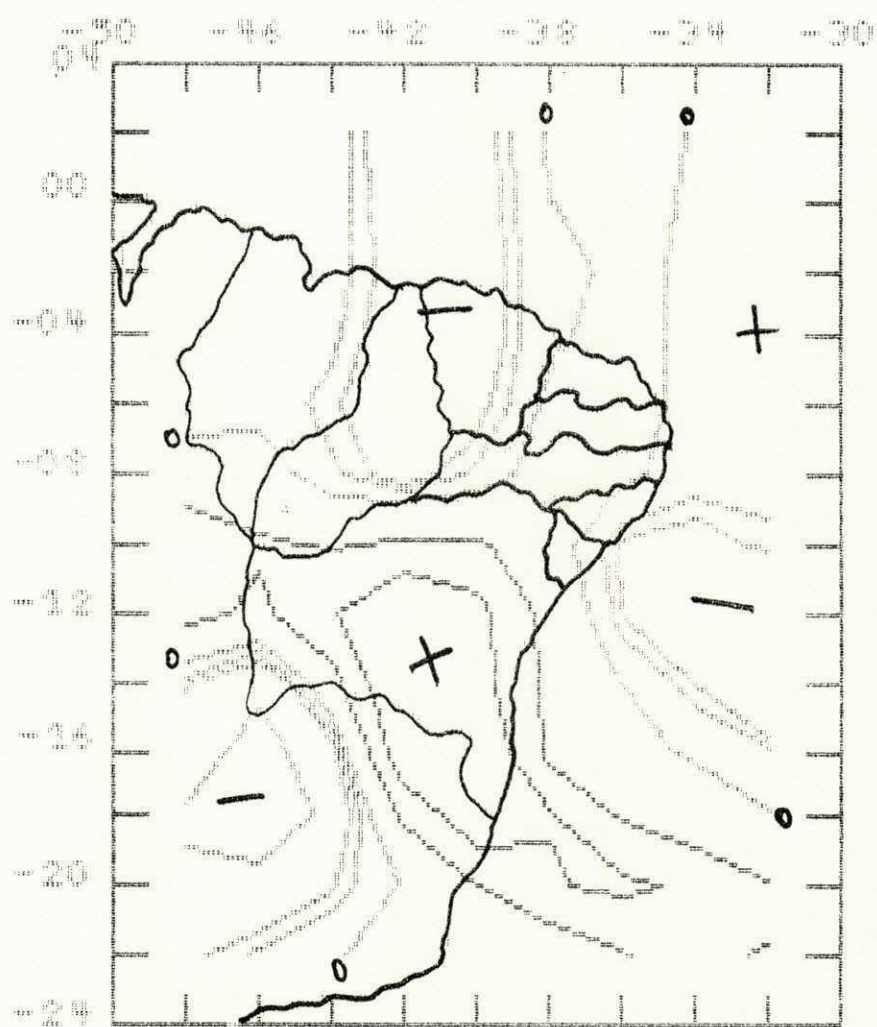


Fig. 4.24 - Divergência de umidade ($\times 10^{10}$ g/s) em 700 hPa para as 12:00 TMC do dia 18/12/80.

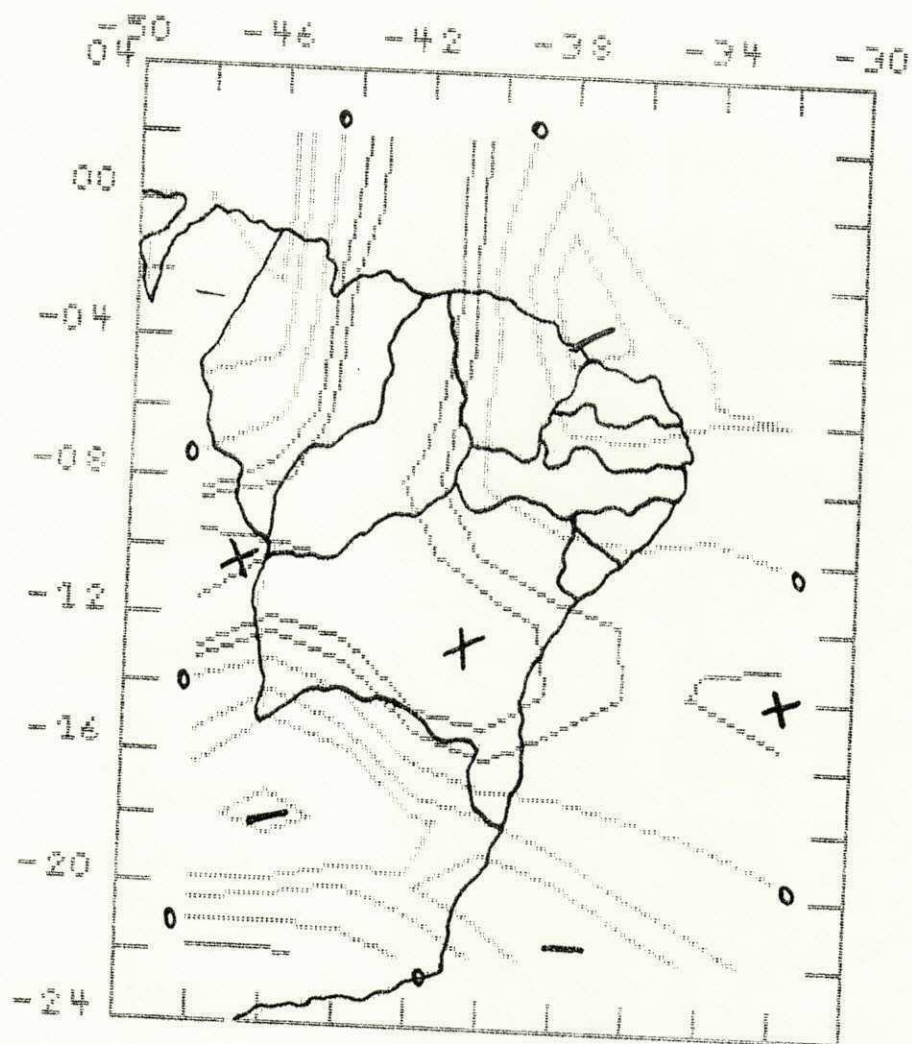


Fig. 4.25 - Divergência de umidade ($\times 10^{10}$ g/s) em 700 hPa para as 12:00 TMO do dia 19/12/80.

se até o dia 25 havia convergência de umidade em todo o NEB conforme exemplificado pelo campo do dia 25 (Fig. 4.26) enquanto que no dia 26 (e também 27) um núcleo divergente podia ser visto sobre a Bahia (Fig. 4.27). Nos dias 28 e 29 havia forte divergência de umidade sobre o oeste da Bahia enquanto que a divergência era fraca sobre o restante do NEB, excetuando-se o litoral leste onde havia fraca convergência de umidade conforme pode ser visto na Figura 4.28.

4.1.2.4 Advecção de Temperatura em 500 hPa

Nos três dias que precederam a formação do vórtice ciclônico havia advecção fria em quase todo o NEB destacando-se o núcleo centrado no Maranhão e Piauí, na região de formação do vórtice e na região desprovida de nebulosidade no dia 17 (Figs. 4.29 e 4.30). Excetuando-se o Maranhão, havia advecção fria em todo o NEB no dia 18, destacando-se o núcleo localizado sobre a Bahia (Fig. 4.31). Embora mais fraca, persistia a advecção fria em todo o NEB no dia 19, com exceção de uma área de advecção quente no sul da Bahia (Fig. 4.32). O campo de advecção de temperatura do dia 25 (Fig. 4.33) é representativo dos dias 20 a 25. Nesses dias havia um núcleo negativo sobre a porção nordeste do NEB e um bipolo sobre a Bahia-norte de Minas Gerais. Esse bipolo estava associado ao sistema frontal que parecia formar uma só entidade com o vórtice ciclônico localizado sobre o NEB (Figs. 4.5a-d e 4.6a-c).

Nos dias 26 (Fig. 4.34) e 27 a Região era afetada por dois núcleos positivos, um centrado no Maranhão e outro no Oceano Atlântico separados por uma área de forte advecção fria que

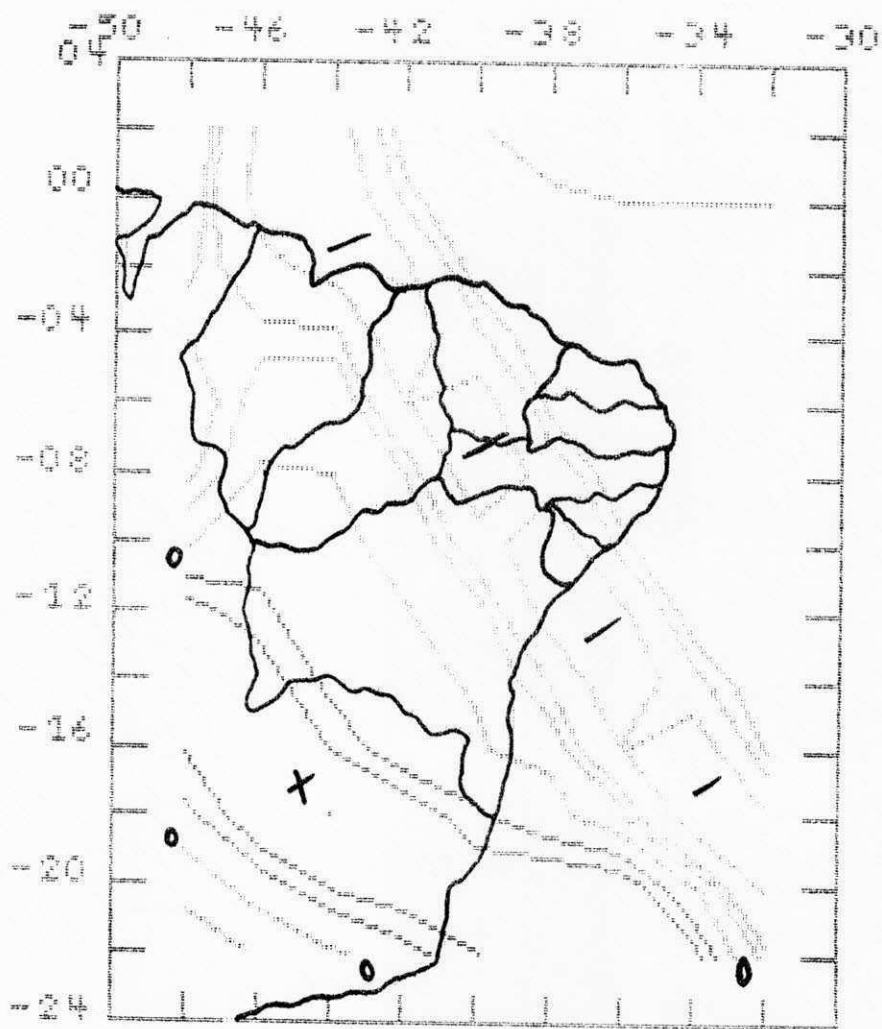


Fig. 4.26 - Divergência de umidade ($\times 10^{-9}$ g/s) em 700 hPa para as 12:00 TMO do dia 25/12/80.

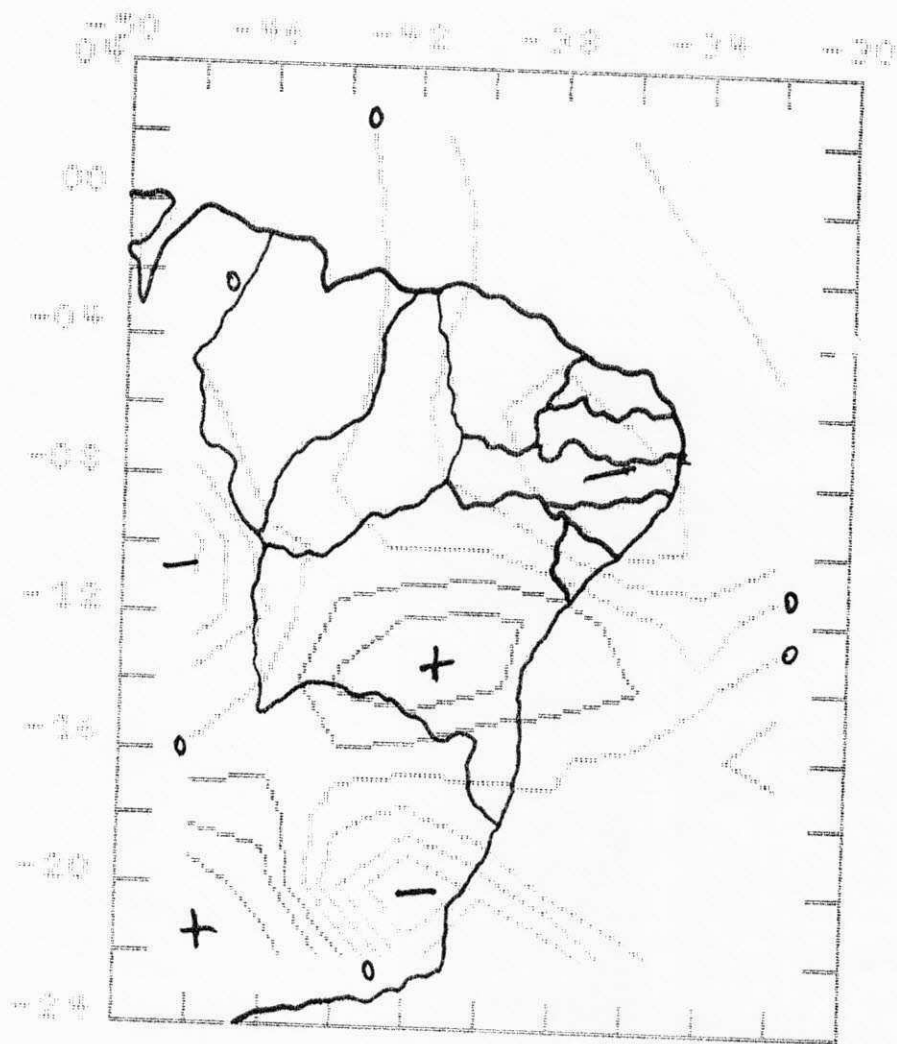


Fig. 4.27 - Divergência de umidade ($\times 10^{10}$ g/s) em 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 26/12/80.

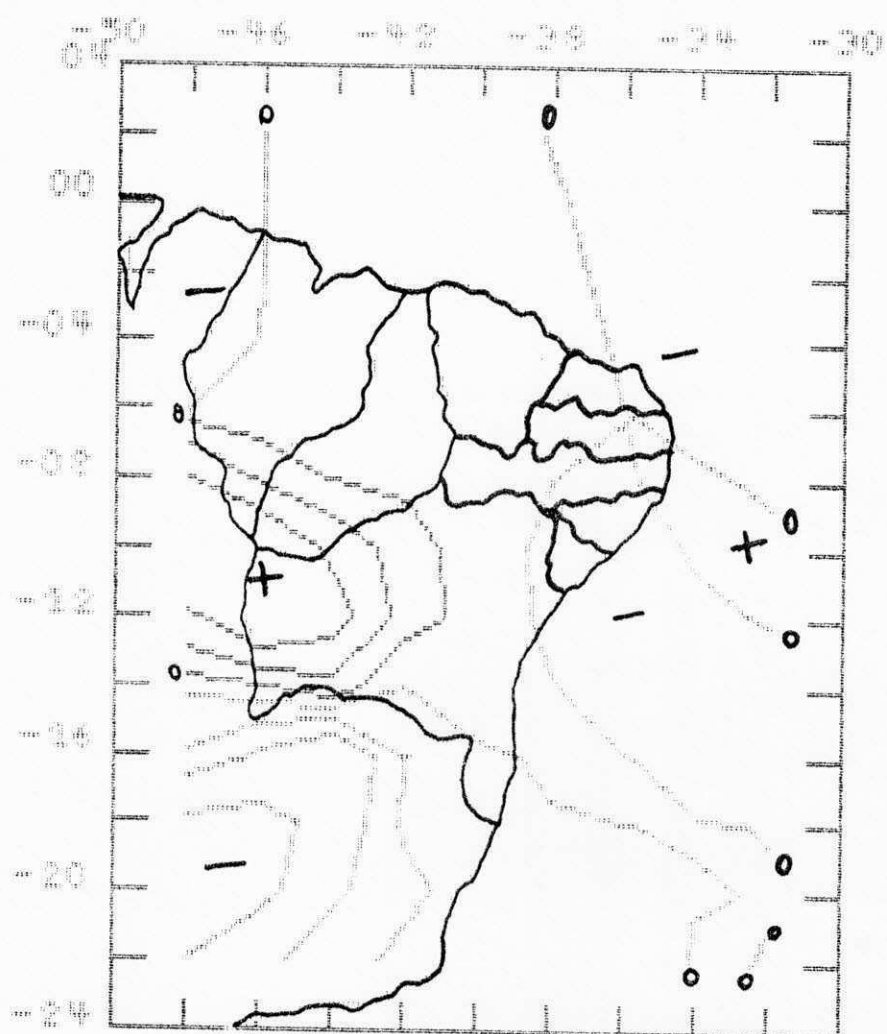


Fig. 4.28 - Divergência de umidade ($\times 10^{10}$ g/s) em 700 hPa para as 12:00 TMO do dia 29/12/80.

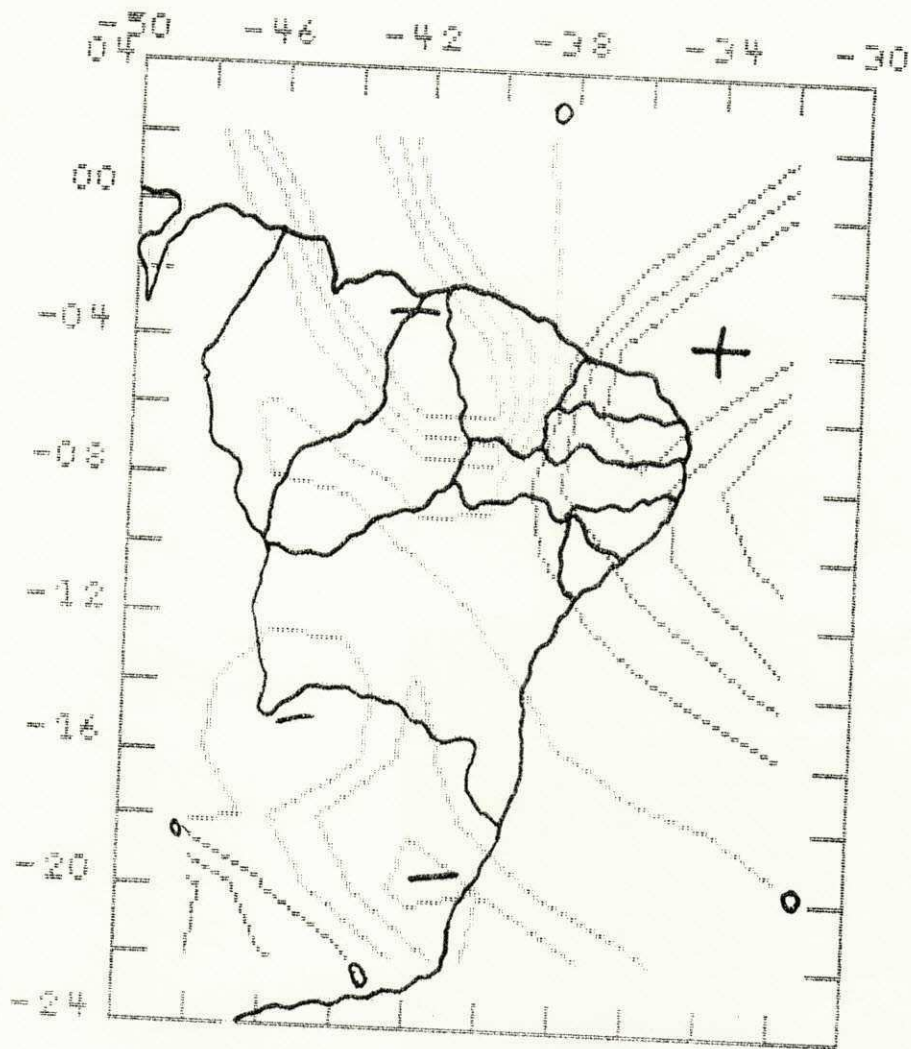


Fig. 4.29 - Adveccão de temperatura ($\times 10^{-7}$ $^\circ\text{C/s}$) em 500 hPa para as 12:00 TMC do dia 15/12/80.

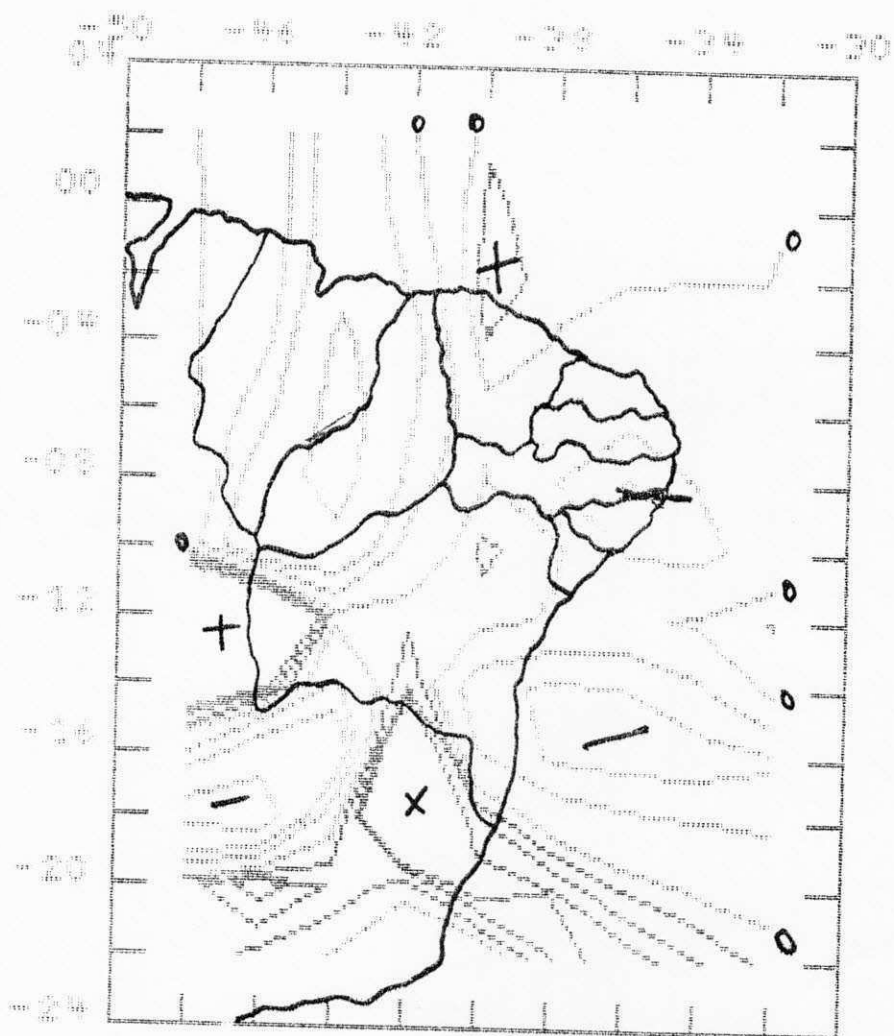


Fig. 4.30 - Adveccão de temperatura ($\times 10^{**} -7$ $^{\circ}\text{C/s}$) em 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 17/12/80.

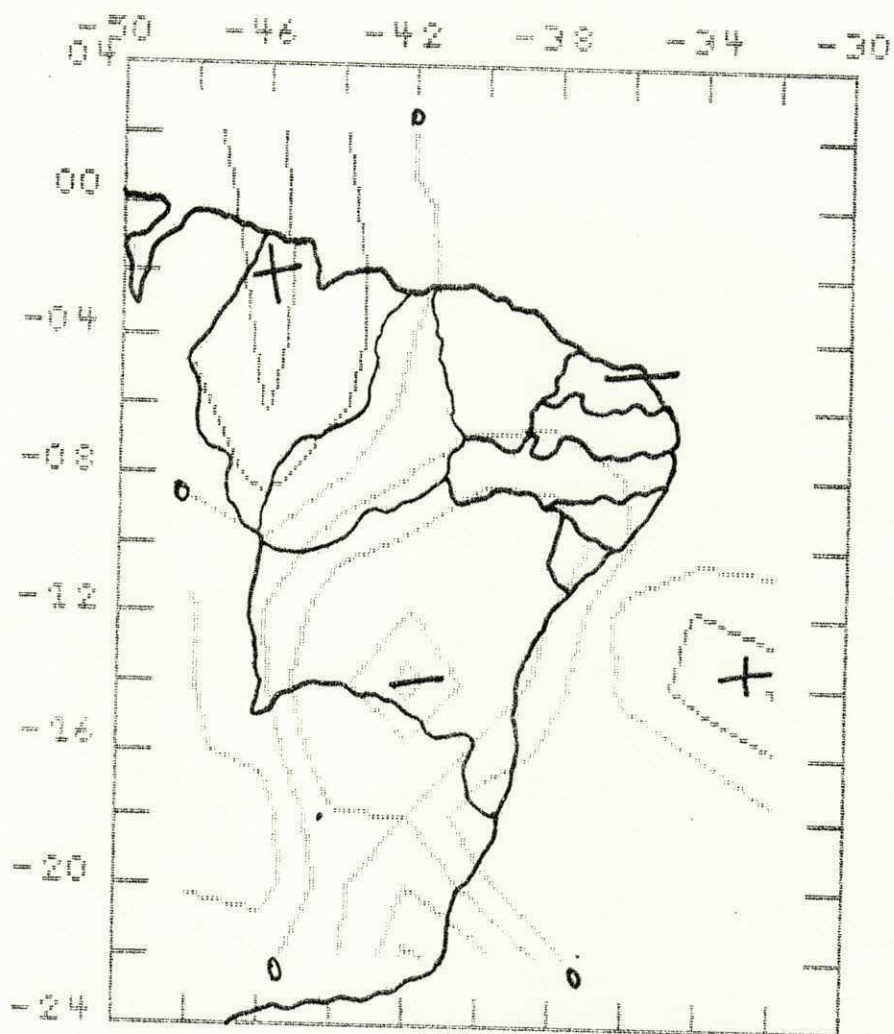


Fig. 4.31 - Adveccão de temperatura (*10** -7 9C/s) em 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 18/12/80.

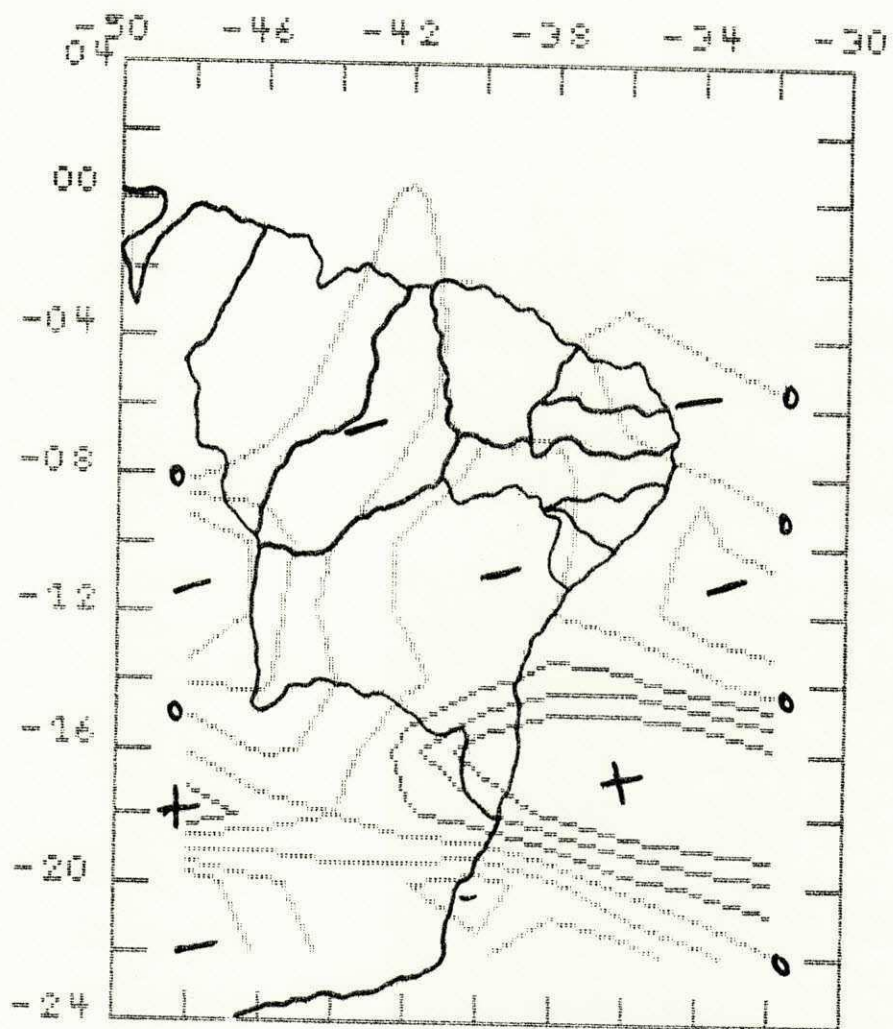


Fig. 4.32 - Adveccão de temperatura ($\times 10^{**} -7$ $^{\circ}\text{C/s}$) em 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 19/12/80.

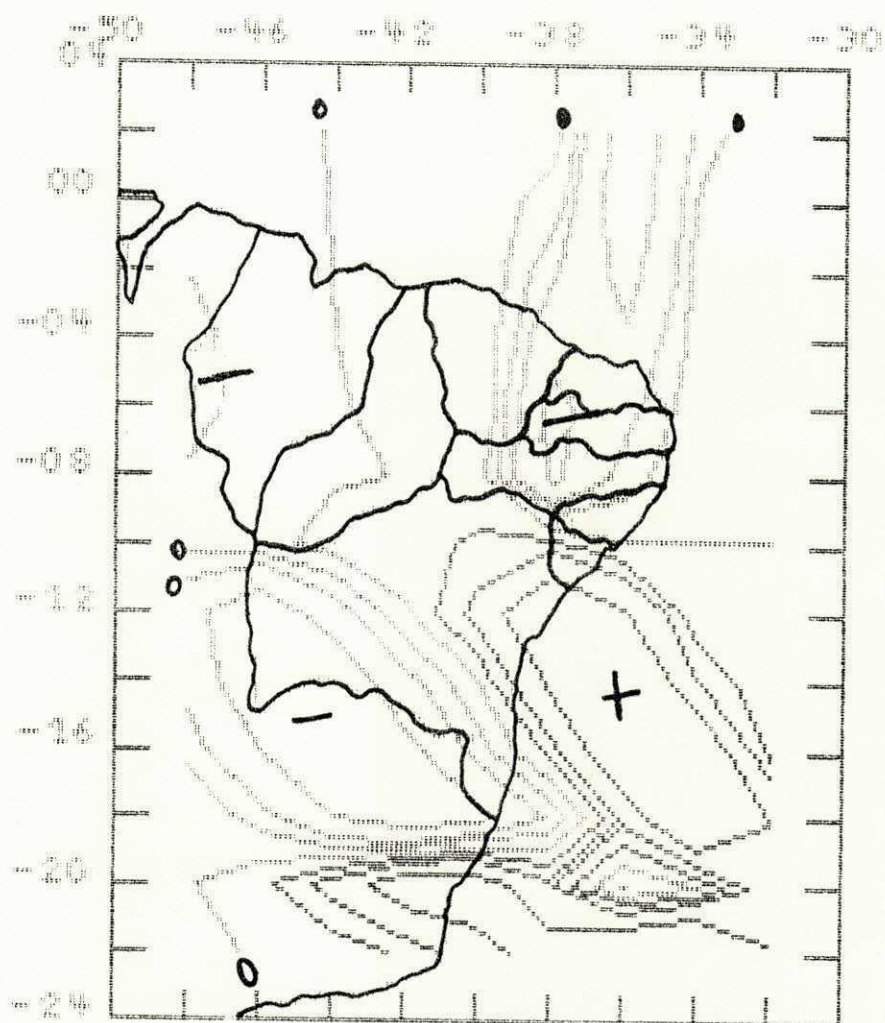


Fig. 4.33 - Adveccão de temperatura ($\times 10^{**} -7$ $^{\circ}\text{C/s}$) em 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 25/12/80.

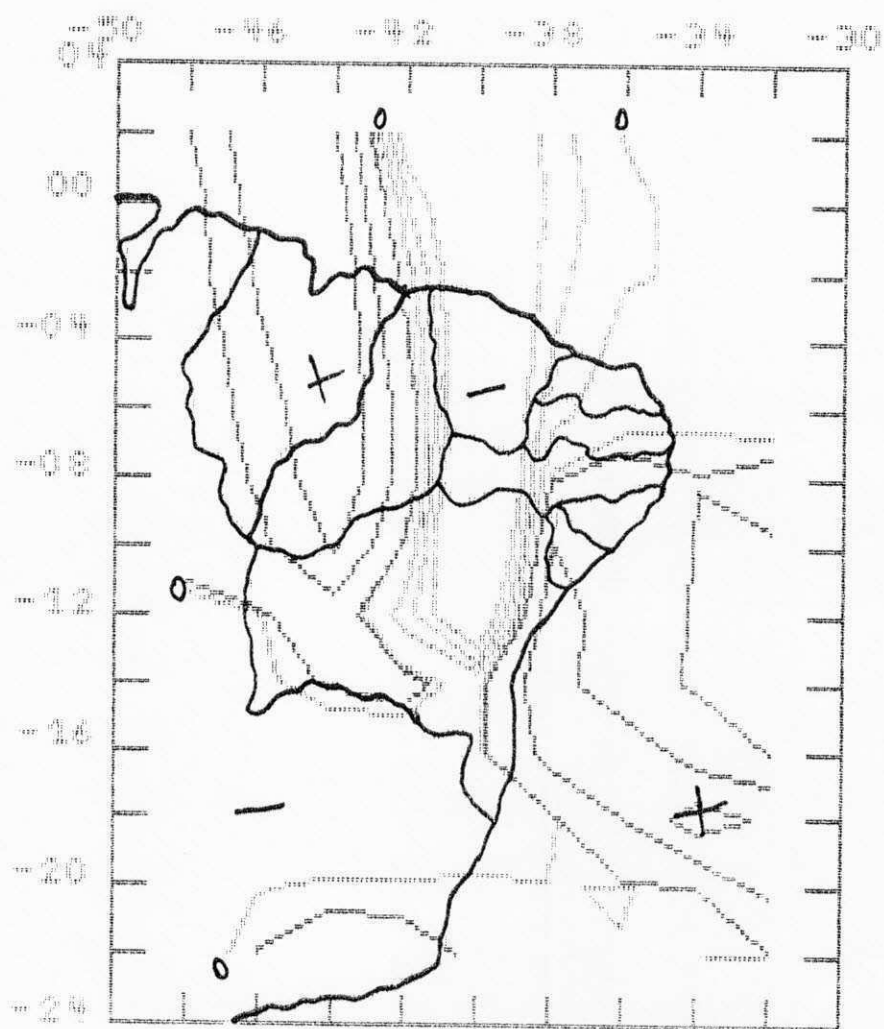


Fig. 4.34 - Adveção de temperatura ($\times 10^{-7}$ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$) em 500 hPa para as 12:00 TMC do dia 26/12/80.

abrangia o centro-leste da Bahia, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e oeste de Pernambuco. Nos dias 28 e 29 (Fig. 4.35) a advecção de temperatura era fria em todo o NEB, exceto no centro-oeste e sudeste da Bahia.

4.1.2.5 Divergência de Massa em 700 hPa

Esses campos são, de maneira geral, semelhantes aos de divergência de umidade o que aponta para a importante contribuição da divergência de massa para a convergência/divergência de umidade.

Precedendo a formação do vórtice ciclônico sobre a parte central do NEB no dia 18, do dia 15 ao dia 17 havia divergência de massa sobre toda a parte central da Região, desde o litoral norte até o norte de Minas Gerais (Fig. 4.36). Nos dias 18 e 19 convergência de massa em todo o NEB, exceto no centro-sul da Bahia (Fig. 4.37). A partir do dia 20 e até o dia 25, convergência de massa estava presente na baixa troposfera em todo o NEB (Fig. 4.38) enquanto que entre os dias 26 e 29 havia divergência de massa sobre a Bahia (Figs. 4.39 e 4.40).

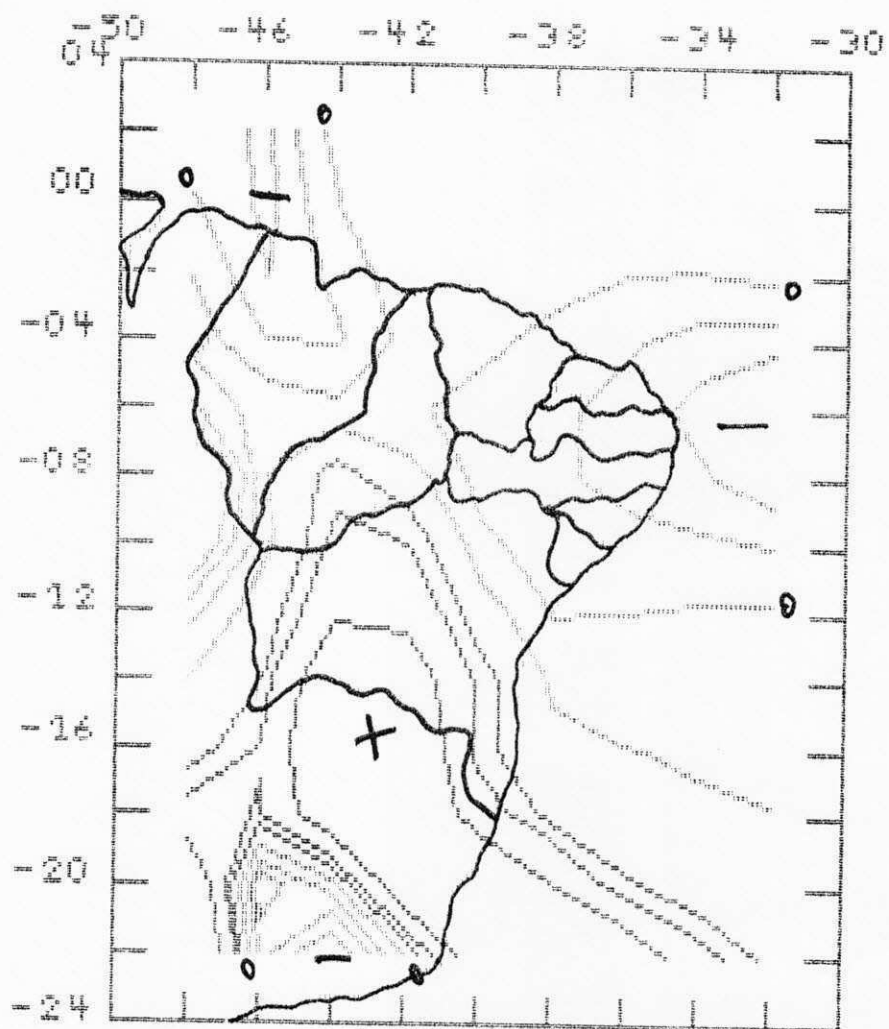


Fig. 4.35 - Adveccão de temperatura ($\times 10^{-7}$ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$) em 500 hPa para as 12:00 TMG do dia 29/12/80.

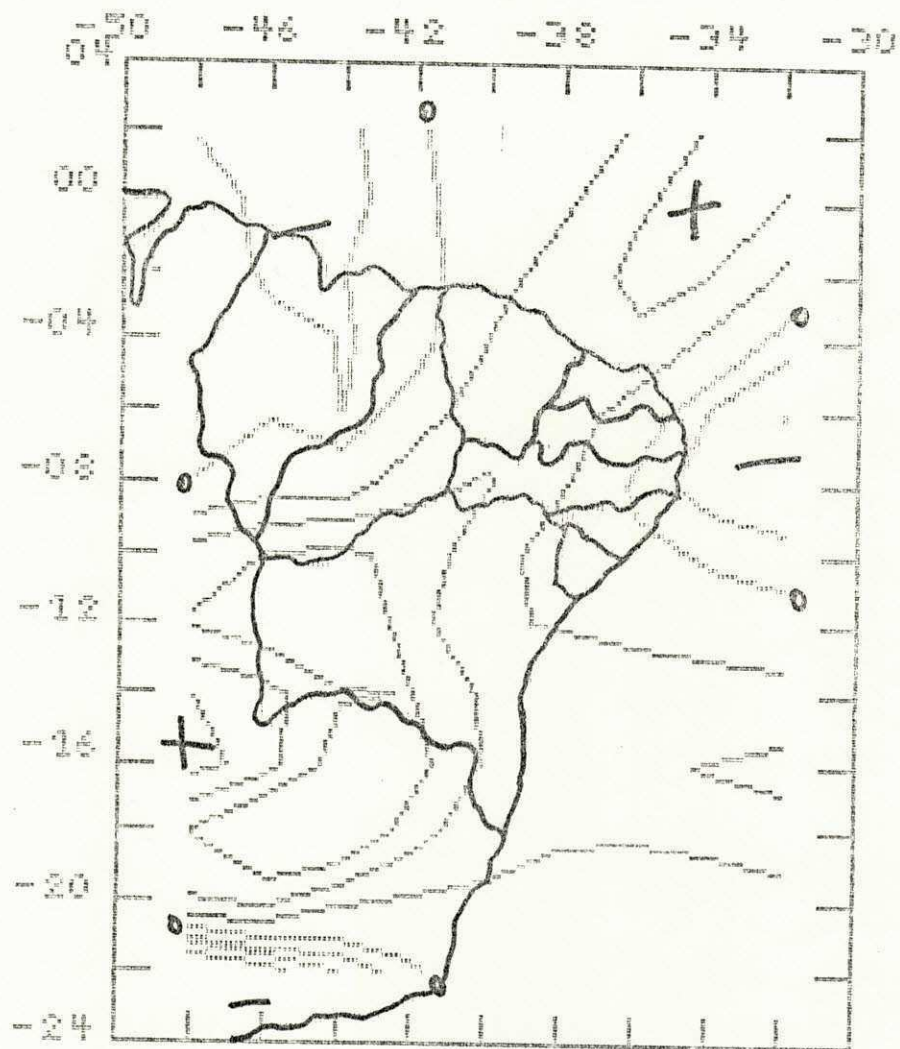


Fig. 4.36 - Divergência de massa ($\times 10^{-7}$ /s) em 700 hPa para as 12:00 TMO do dia 15/12/80.

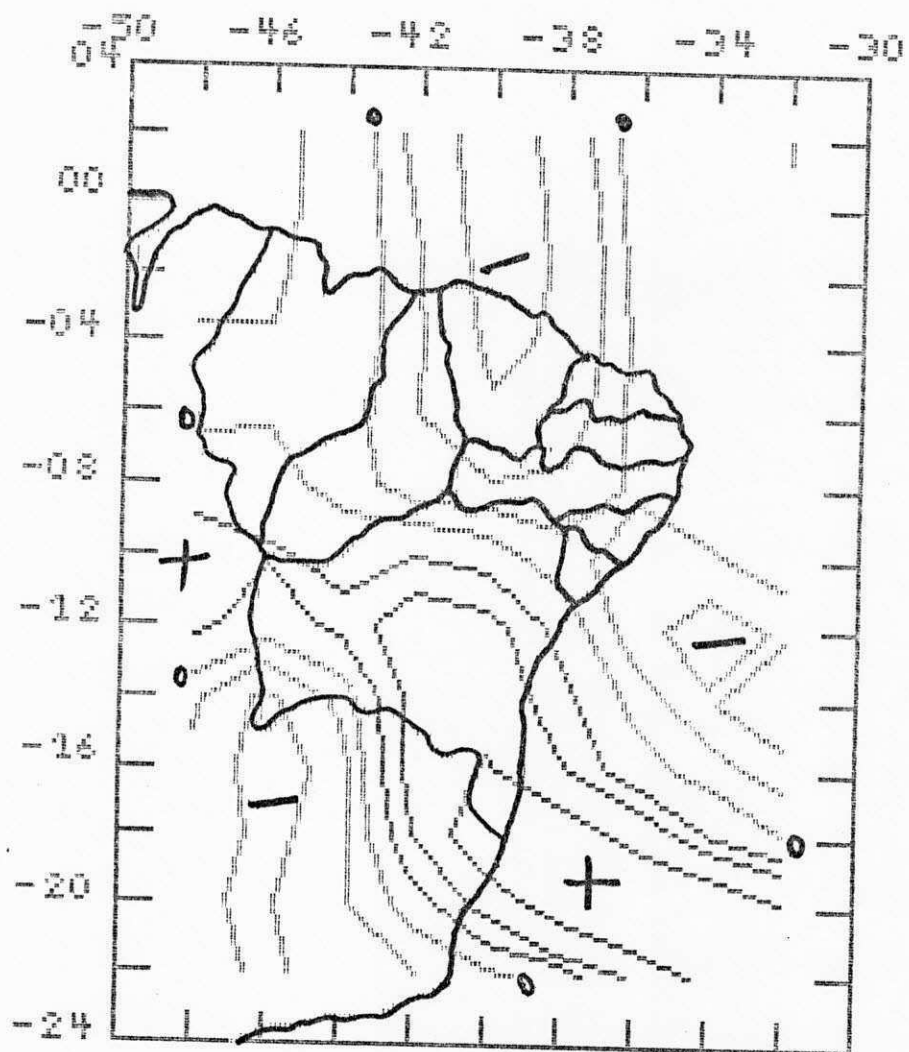


Fig. 4.37 - Divergência de massa ($\times 10^{-7}$ /s) em 700 hPa para as 12:00 TMO do dia 18/12/80.

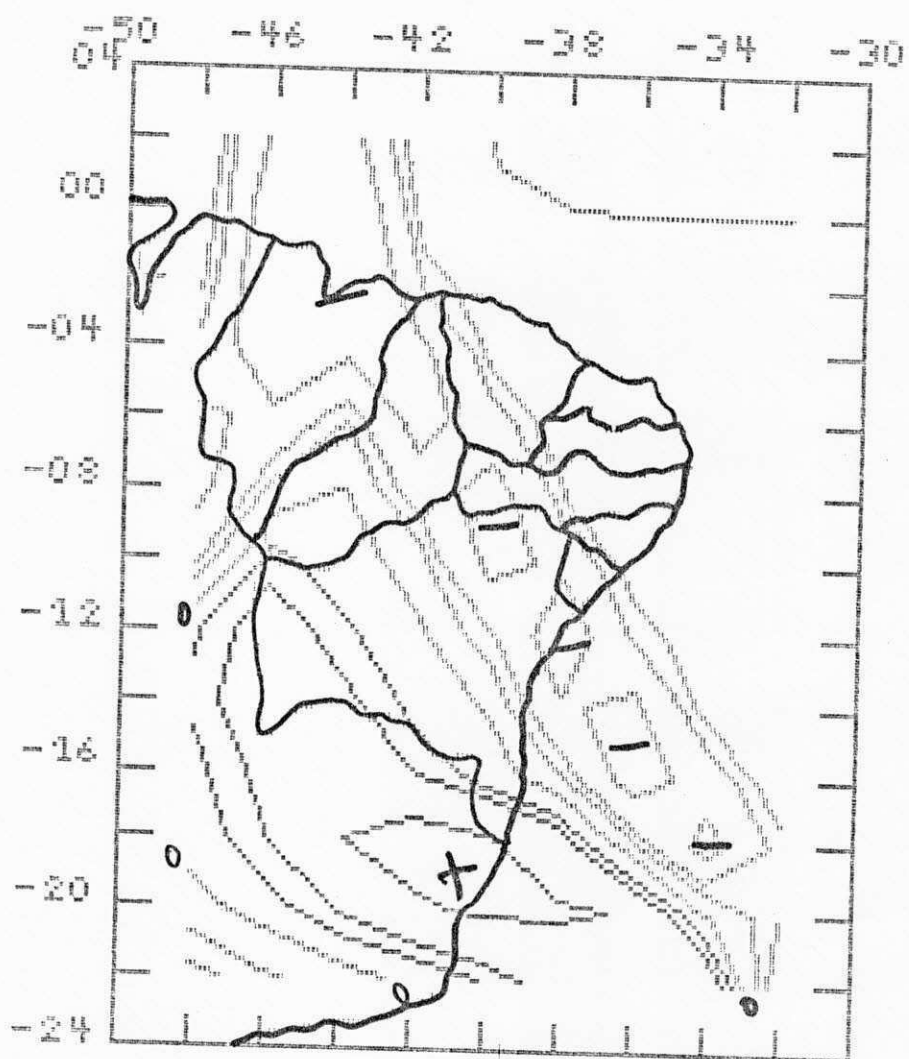


Fig. 4.38 - Divergência de massa ($\times 10^{-7}$ /s) em 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 25/12/80.

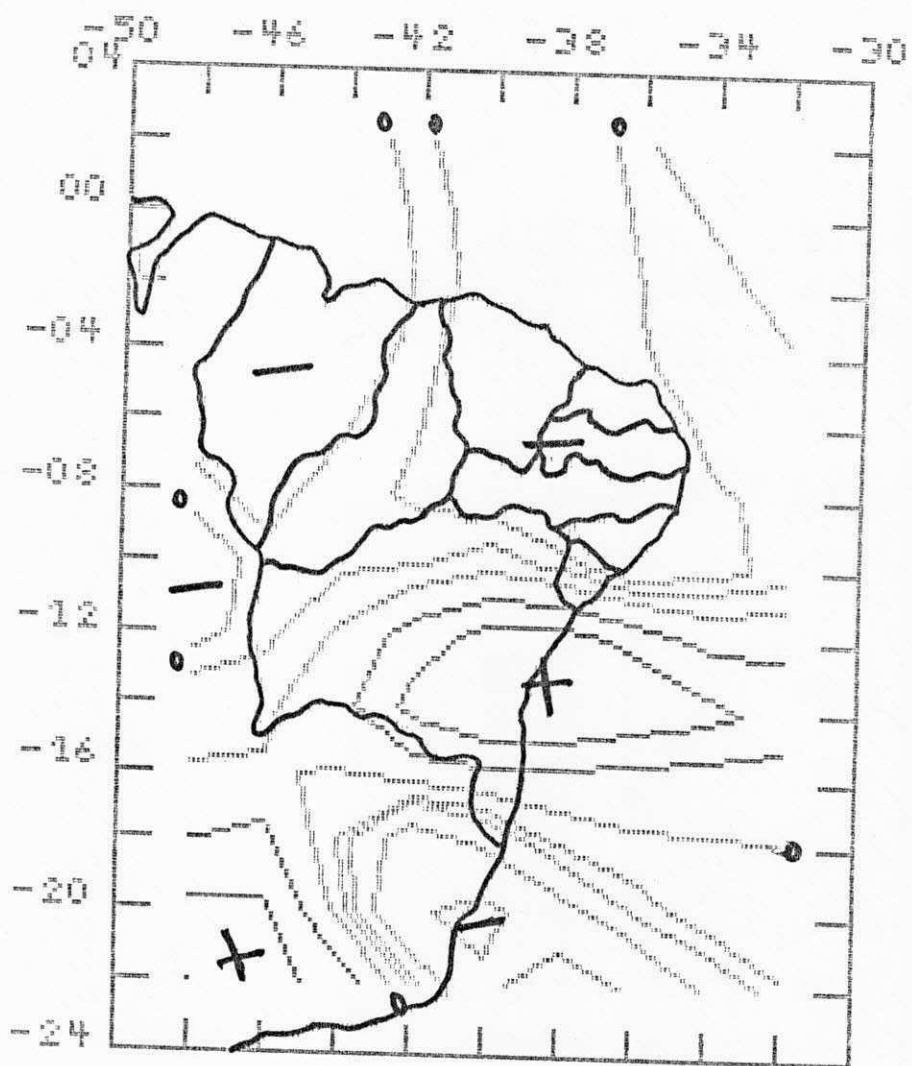


Fig. 4.39 - Divergência de massa ($\times 10^{-7}$ /s) em 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 26/12/80.

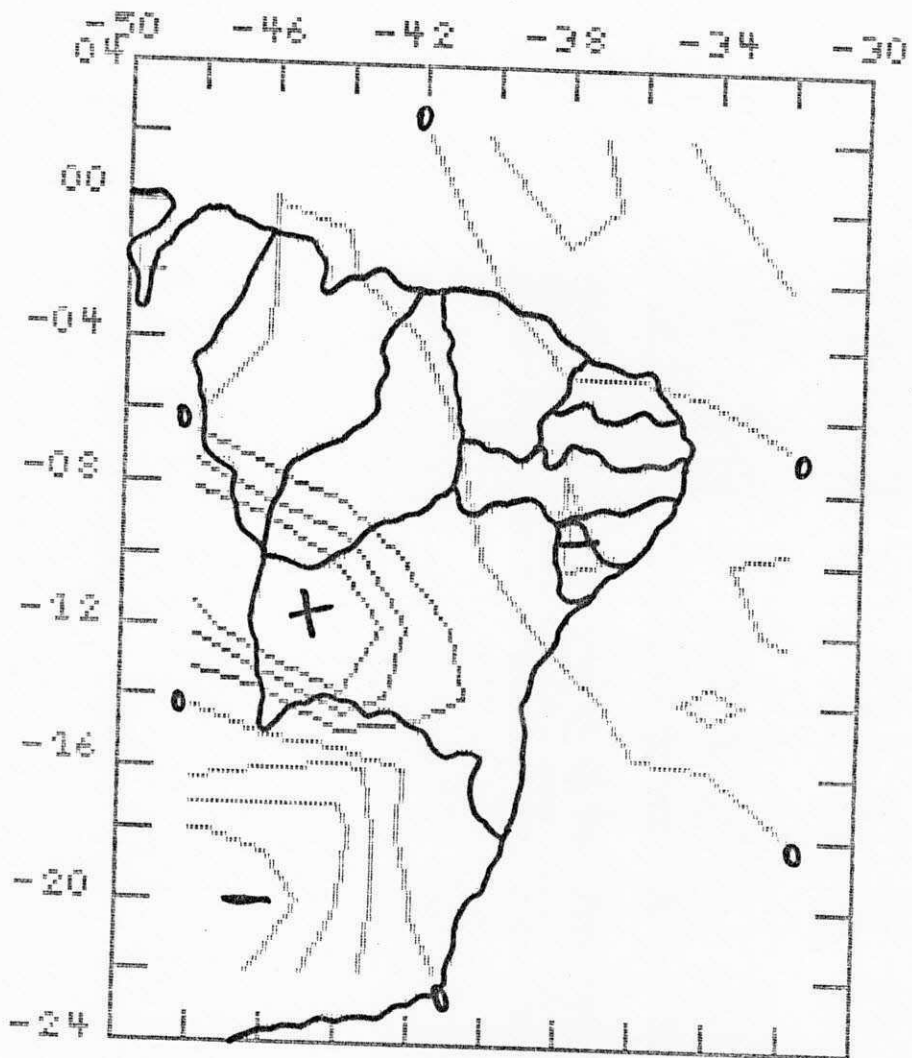


Fig. 4.40 - Divergência de massa ($\times 10^{-7}$ /s) em 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 29/12/80.

4.2 Caso II: período de 09-20/12/89

4.2.1 Condições Sinóticas

A descrição das condições sinóticas no segundo caso é feita também com base em imagens de satélite e cartas de linhas de corrente. O período de 09 a 19 de dezembro de 1989 é estudado utilizando análises para os níveis de 300 e 200 hPa motivado pelo fato de que foram obtidos dados tipo GRID oriundos do NMC, conforme foi dito anteriormente.

O campo de linhas de corrente nos altos níveis da troposfera nos quatro dias que precederam a formação do vórtice ciclônico dia 13 era semelhante à média de Sadler (1975). Isso é demonstrado pelas Figuras 4.41 e 4.42 onde as configurações predominantes são o anticiclone da Bolívia e o cavado orientado de noroeste - sudeste próximo às costas norte e nordeste do Brasil. Por outro lado, a corrente de jato alcançava no dia 12 (Fig. 4.42) a velocidade máxima de 135 Kt (aproximadamente 243 Km/h) em Cordoba (87344) onde a média é 51 kt enquanto o vento no Galeão (83746) era de sudoeste com 60 Kt, para uma média de 28 Kt. Nesses quatro dias o vento em Antofagasta (85442) teve seu valor máximo no dia 9 (Fig. 4.41): 70 Kt de noroeste quando a média é 28 Kt. A sequência de imagens de satélite para esses dias (Fig. 4.43) mostra uma intensa nebulosidade inicialmente localizada sobre a Região Centro-Oeste que aumentava gradativamente até atingir o NEB. Um sistema frontal que atuava sobre a Região Sul avançava até o norte de Minas Gerais e sul da

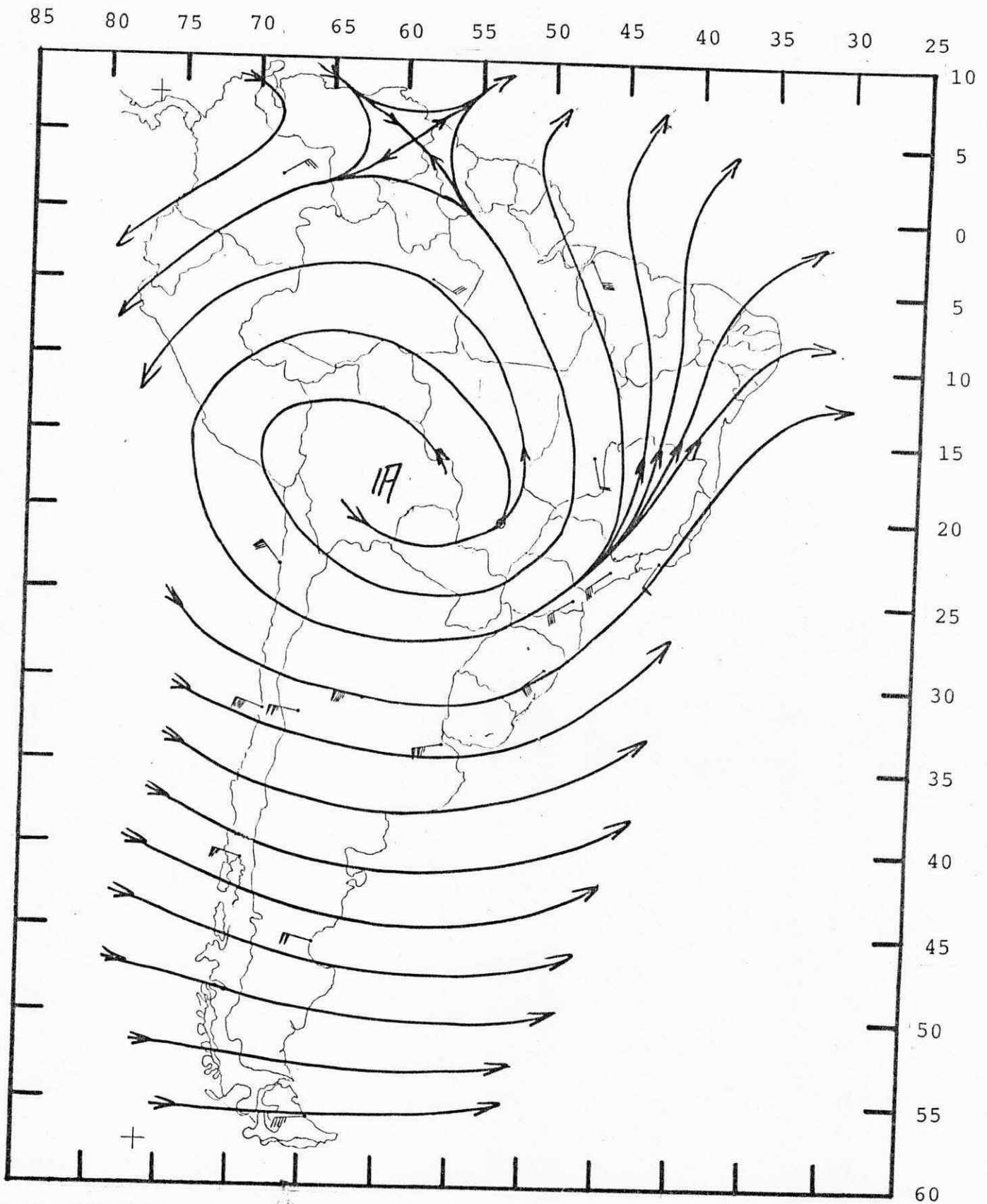


Fig. 4.41 - Linhas de corrente no nível de 200 hPa para as 12:00 TMG do dia 09/12/89.

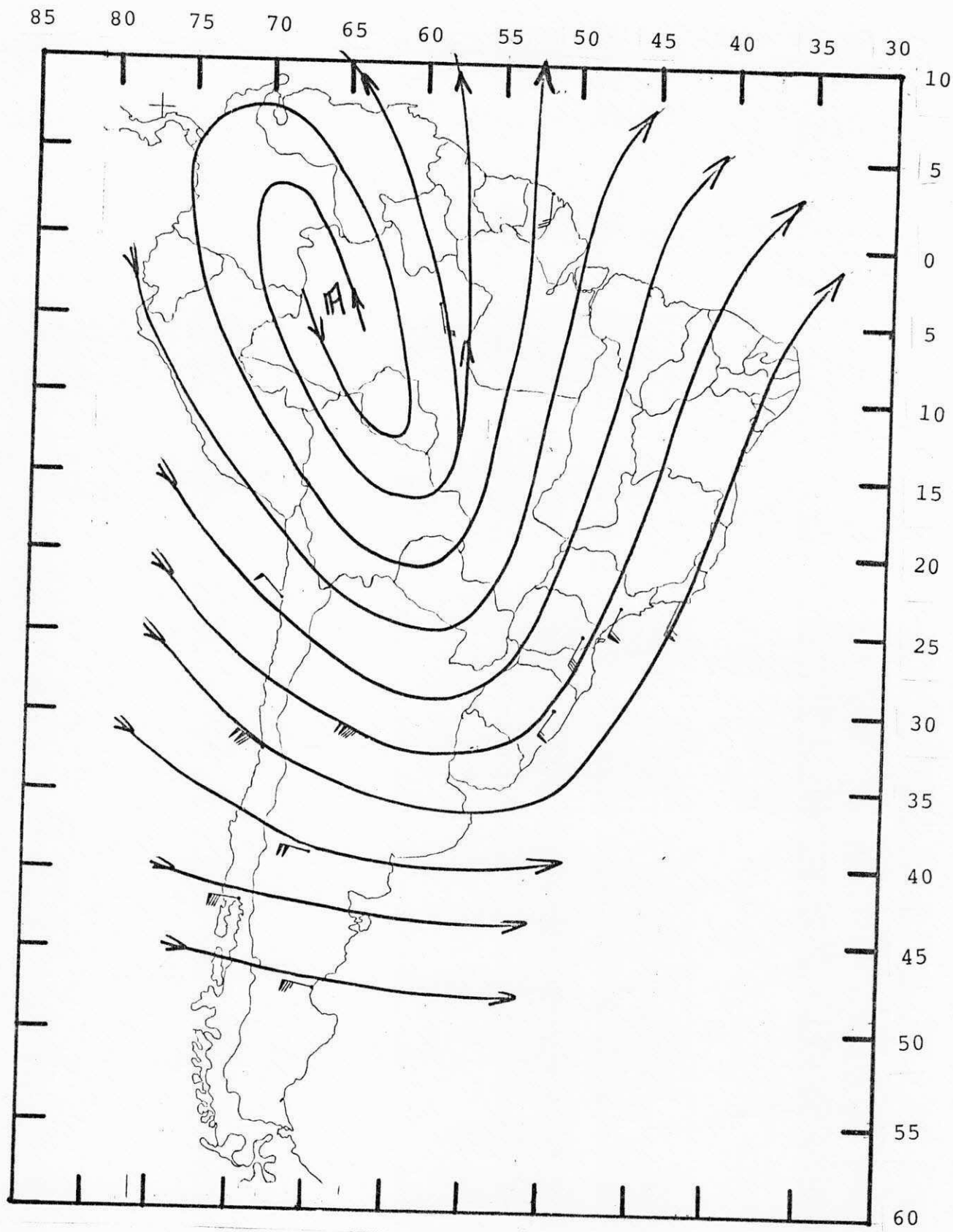


Fig. 4.42 - Linhas de corrente no nível de 200 hPa para as 12:00 TMG do dia 12/12/89.



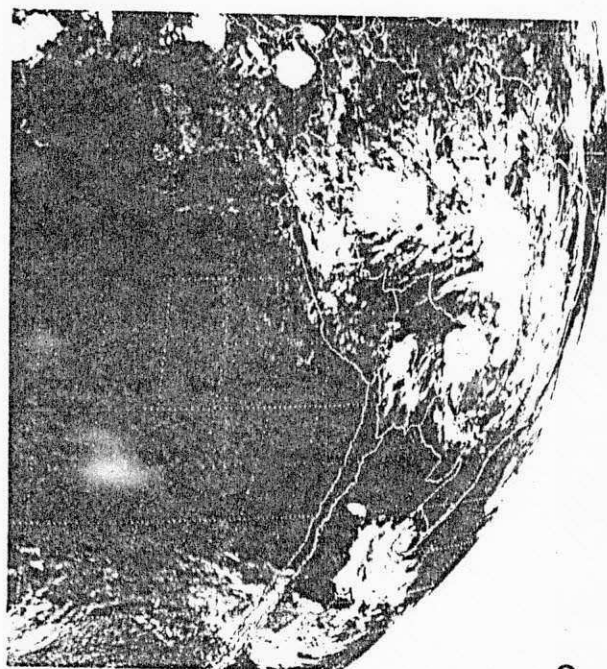
-CP GOES-7 89-343 12:00

a



-CP GOES-7 89-344 12:00

b



-CP GOES-7 89-345 12:00

c



-CP GOES-7 89-346 12:00

d

Fig. 4.43 - Imagem de satélite para as 12:00 TMG do dia (a) 09/12/89, (b) 10/12/89, (c) 11/12/89 e (d) 12/12/89

Bahia, contribuindo também para o aumento de nebulosidade sobre o NEB. É interessante observar também que a circulação associada ao anticiclone da Bolívia podia ser facilmente visualizada nos dias 11 e 12 por meio das nuvens cirros advectadas do topo dos cúmulos-nimbos (Fig. 4.43c-d). Além disso, as imagens parecem documentar a evolução de um complexo convectivo de mesoescala que alcançava intensidade máxima sobre a Bolívia no dia 12.

No dia 13 o vórtice ciclônico estava presente sobre o NEB em 200 e 300 hPa (Figs. 4.44 e 4.45) enquanto que no nível de 500 hPa havia um cavado fraco na porção centro-oriental da Região (Fig. 4.46). No dia 15 o vórtice ciclônico se localizava próximo à costa norte-ocidental do NEB (Fig. 4.47). Por outro lado, os poucos dados de vento obtidos para o dia 16 (Fig. 4.48) sugerem que o vórtice não mais se encontrava sobre a Região. A comparação entre as cartas dos dias 16 e 18 (Fig. 4.49) permite concluir que houve giro do vento nas estações do Galeão (83746), Curitiba (83840) e Porto Alegre (83971). Como resultado, os dados do dia 18 indicam a presença de um vórtice ciclônico com centro na região oceânica próxima à costa da Bahia. A corrente de jato atingia intensidade máxima no dia 15 com ventos de 150 Kt (aproximadamente 270 Km/h) em Mendoza (87420). Nesse dia o vento no Galeão era de sudoeste com intensidade de 70 Kt enquanto que era de noroeste com 25 Kt em Antofagasta (85442). A partir do dia 16 a corrente de jato passava a enfraquecer e a se deslocar para sul sendo que no dia 18 a intensidade máxima era de 90 Kt com um giro no vento de Antofagasta (85442) que nesse dia era quase que de oeste com 25 Kt.

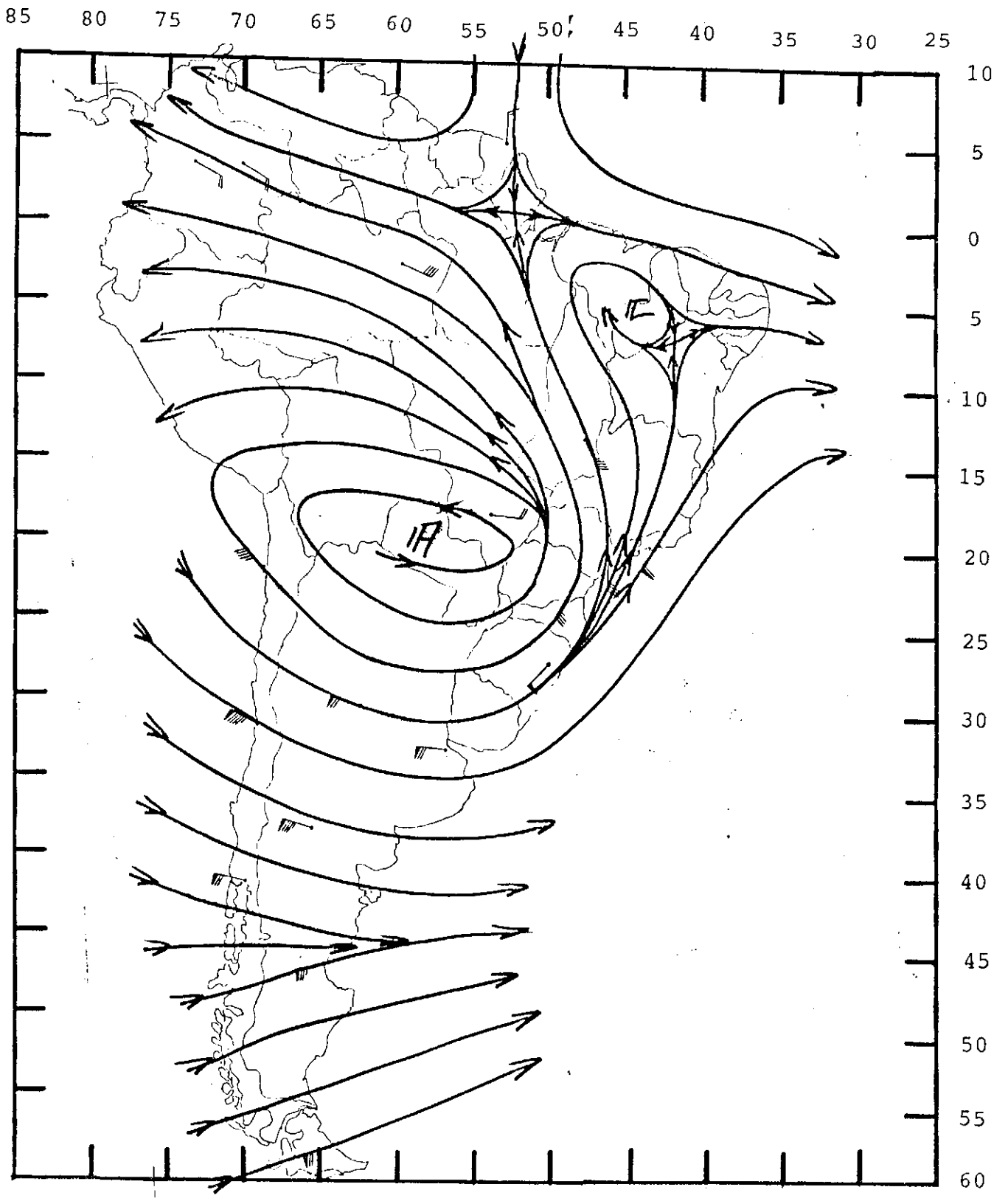


Fig. 4.44 - Linhas de corrente no nível de 200 hPa para as 12:00 TMC do dia 13/12/89.

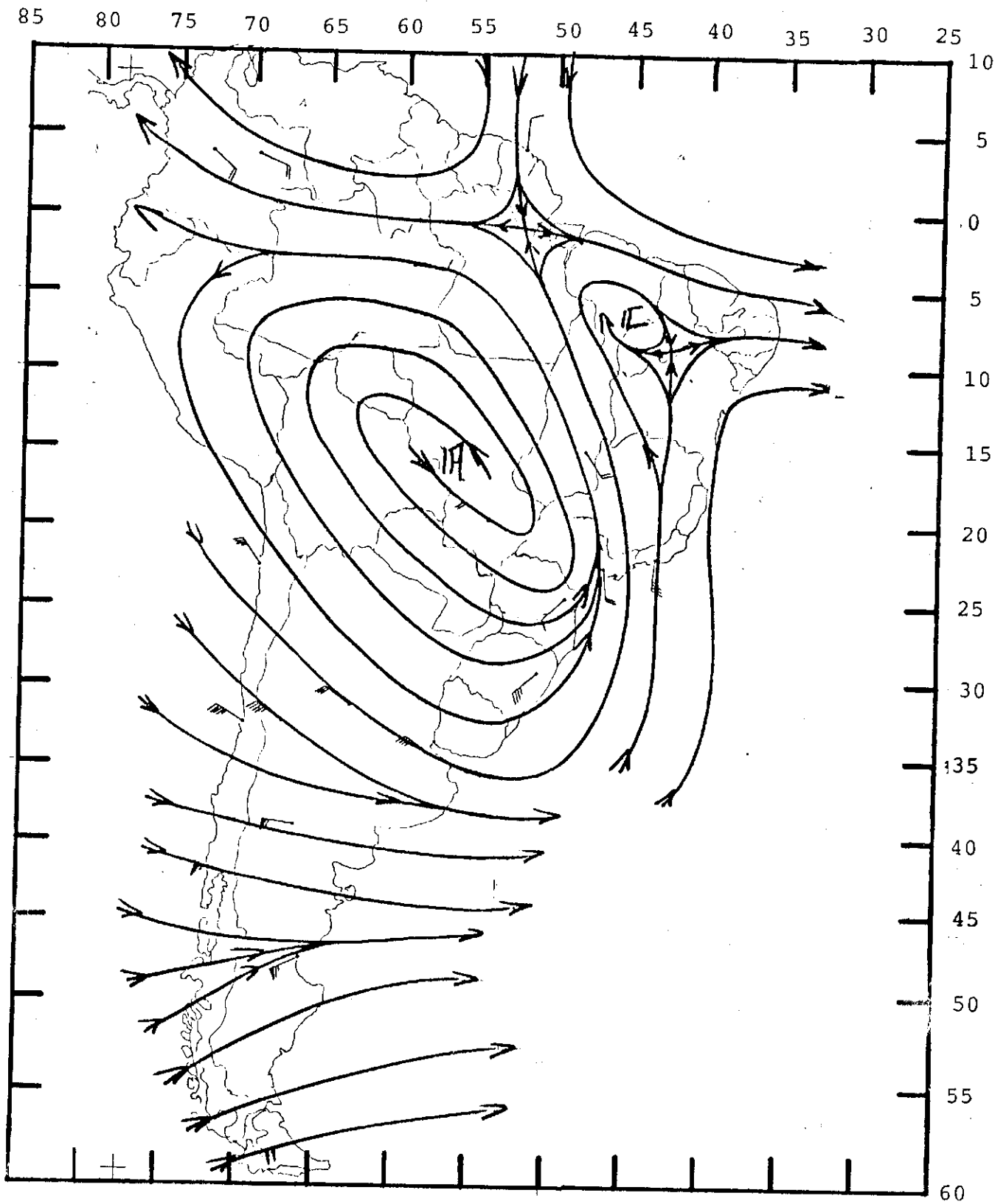


Fig. 4.45 - Linhas de corrente no nível de 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 13/12/89.

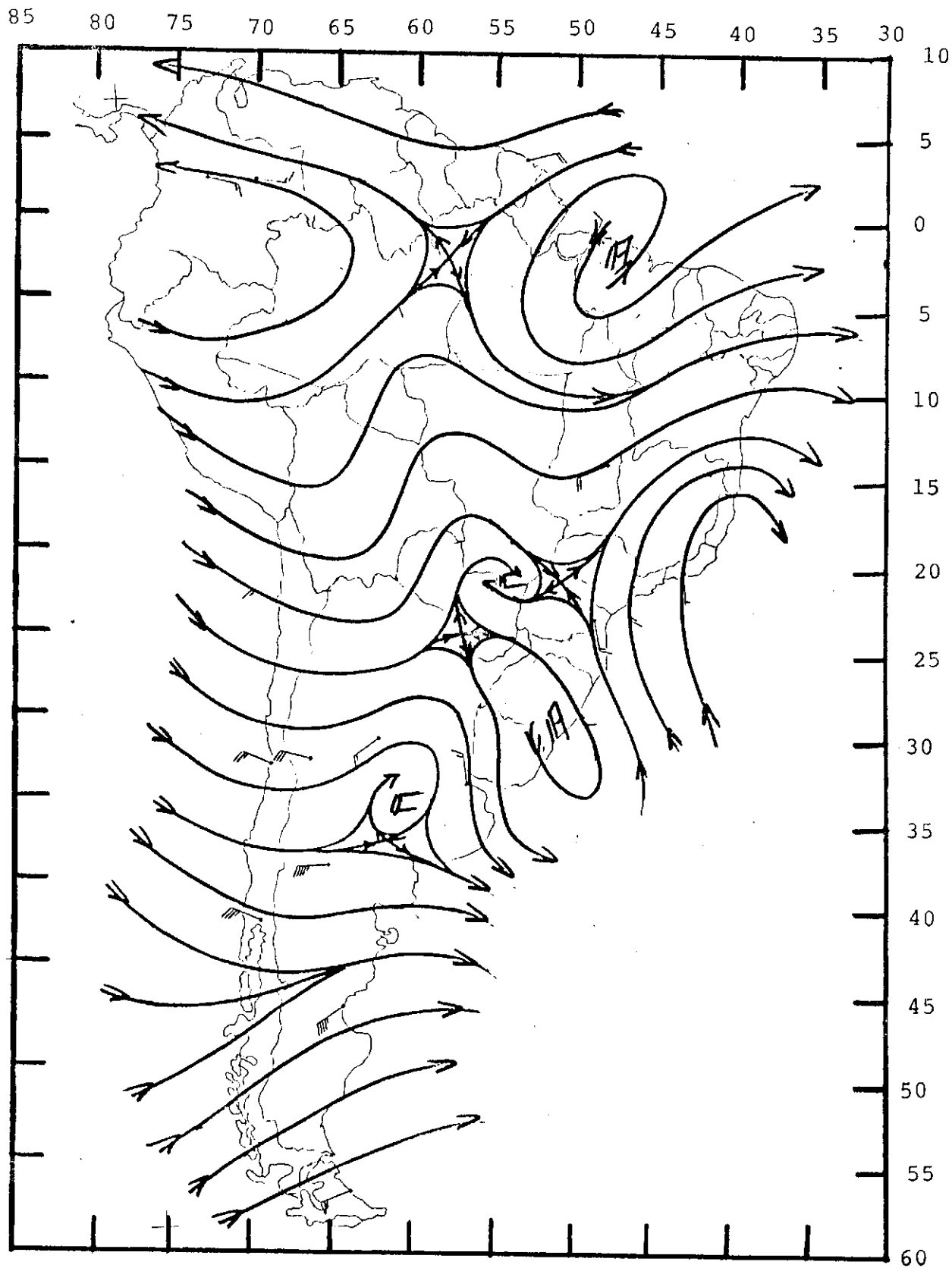


Fig. 4.46 - Linhas de corrente no nível de 500 hPa para as 12:00 TMC do dia 13/12/89.

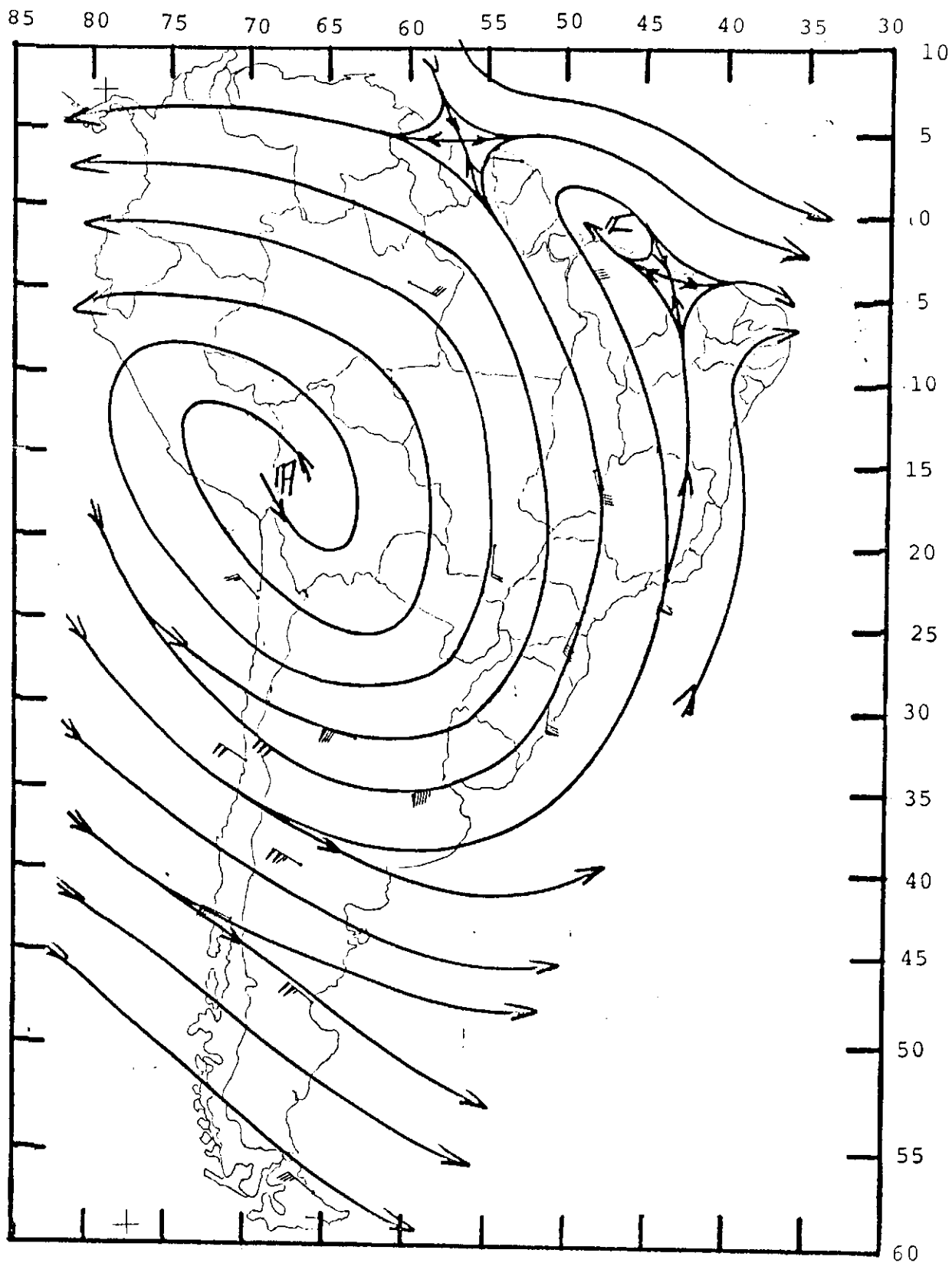


Fig. 4.47 - Linhas de corrente no nível de 200 hPa para as 12:00 TMG do dia 15/12/89.

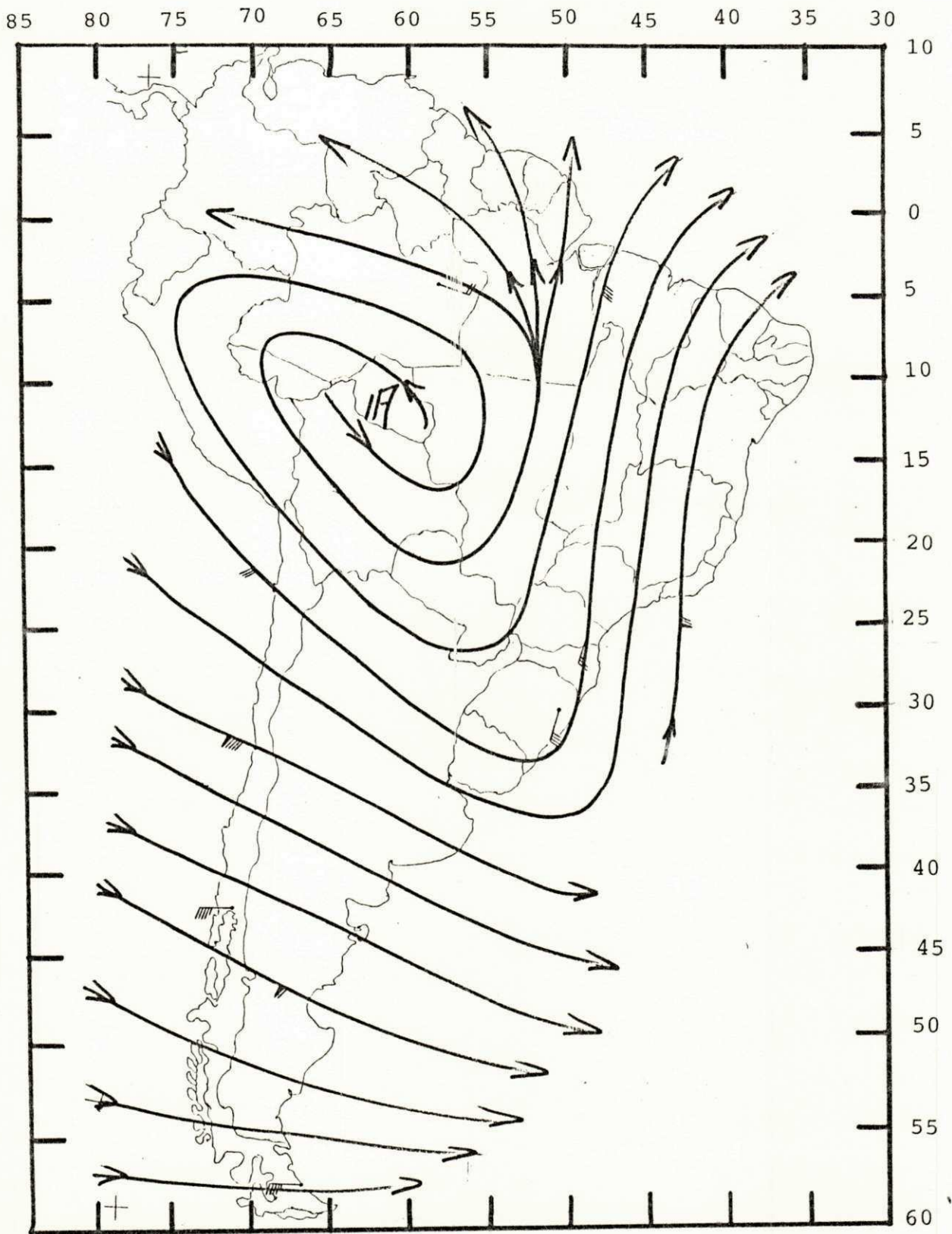


Fig. 4.48 - Linhas de corrente no nível de 200 hPa para as 12:00 TMG do dia 16/12/89.

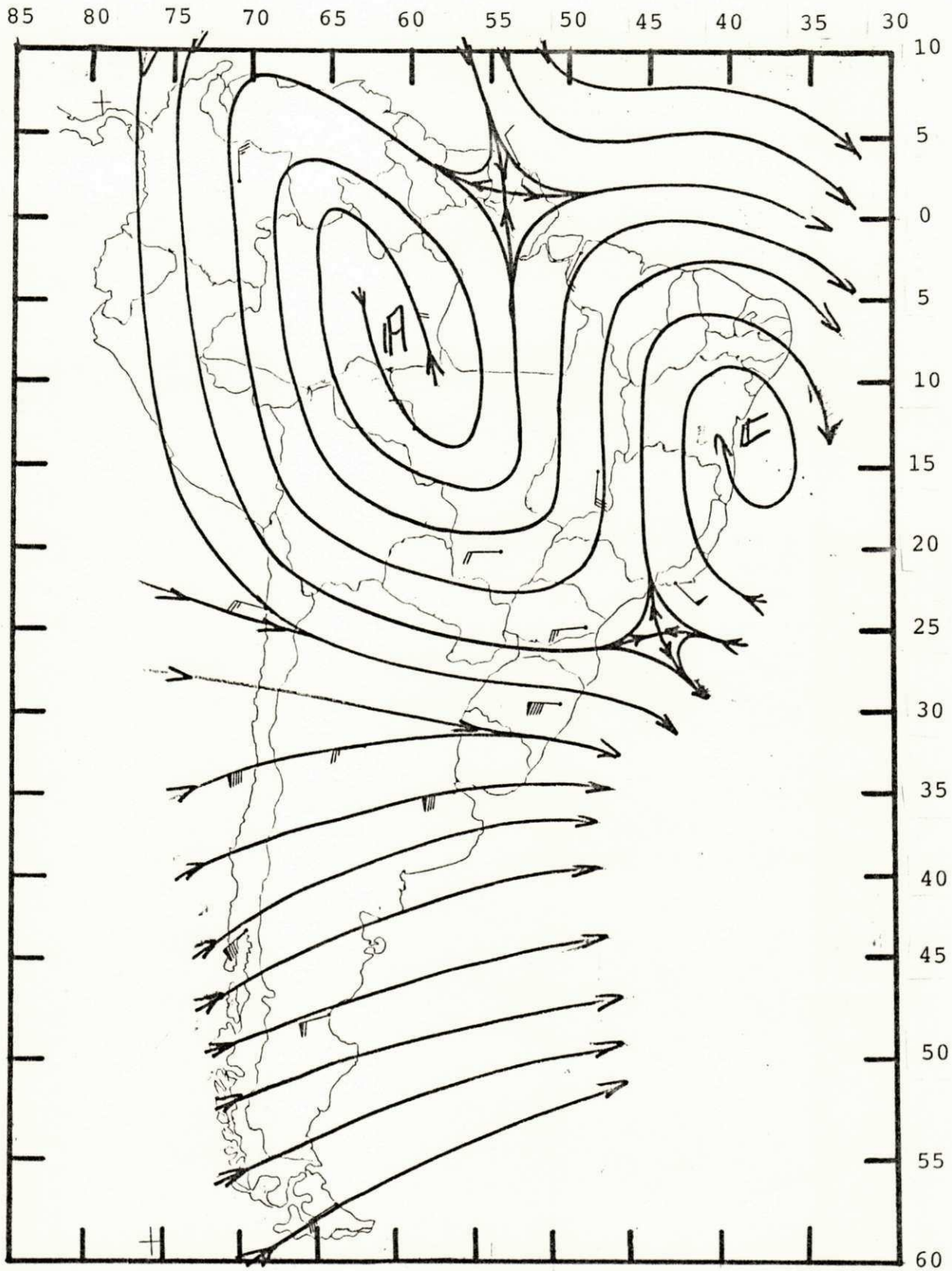


Fig. 4.49 - Linhas de corrente no nível de 200 hPa para as 12:00 TMG do dia 18/12/89.

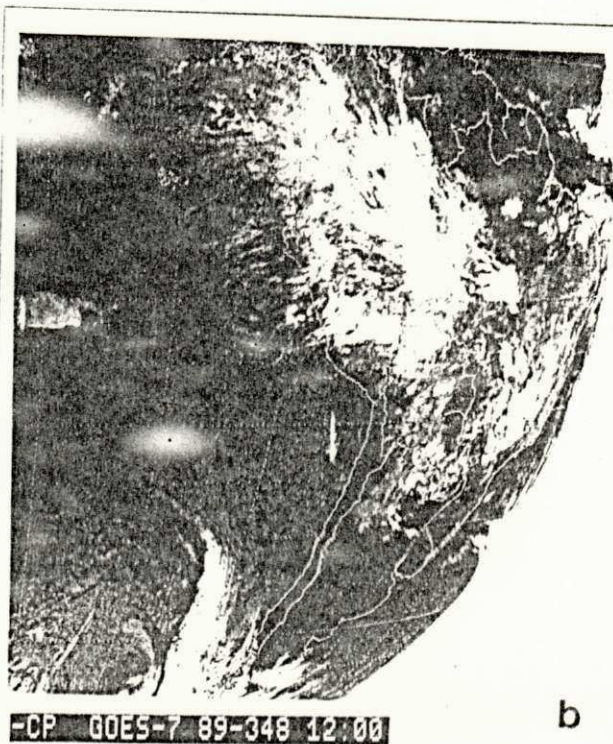
É interessante observar que o vento em Antofagasta permaneceu de noroeste até o dia 16 enquanto sua intensidade diminuía de 70 Kt no dia 9 para 30 Kt no dia 16. O vento no Galeão esteve de sudoeste-sul aumentando de intensidade de 50 Kt no dia 9 para 70 Kt no dia 16. Duas características marcantes das cartas de 200 hPa para os dias 12 a 16 são a intensidade do jato subtropical e o caráter meridional do fluxo sobre a Região Sudeste. A sequência de imagens dos dias 13 a 20 (Figs. 4.50 e 4.51) mostra intensa atividade convectiva sobre a porção ocidental da Amazônia nos dias 13 e 14 (Fig. 4.50a-b). Também nesses dias é possível inferir a presença de ventos fortes em altitude devido à presença de plumas de nuvens cirros advectadas das áreas de convecção. Essa atividade diminuía a partir do dia 15 (Fig. 4.50c), sendo que nos dias 16 e 17 (Figs. 4.50d e 4.51a) a convecção não se apresentava muito organizada e ocupava apenas uma pequena área da Amazônia. A entrada de uma frente fria na Região Sudeste no dia 18 (Fig. 4.51b) coincidia com um sensível aumento da nebulosidade sobre o centro - oeste do Brasil e a Amazônia. Essa frente fria penetrou no sul do continente no dia 14 (Fig. 4.50b) e se deslocou rapidamente até atingir a Região Sudeste no dia 18. Já no dia 19 havia uma maior cobertura de nuvens sobre o NEB (Fig. 4.51c) enquanto que no dia 20 havia menos atividade convectiva sobre a Amazônia (Fig. 4.51d).

1.2.2 Discussão dos campos derivados

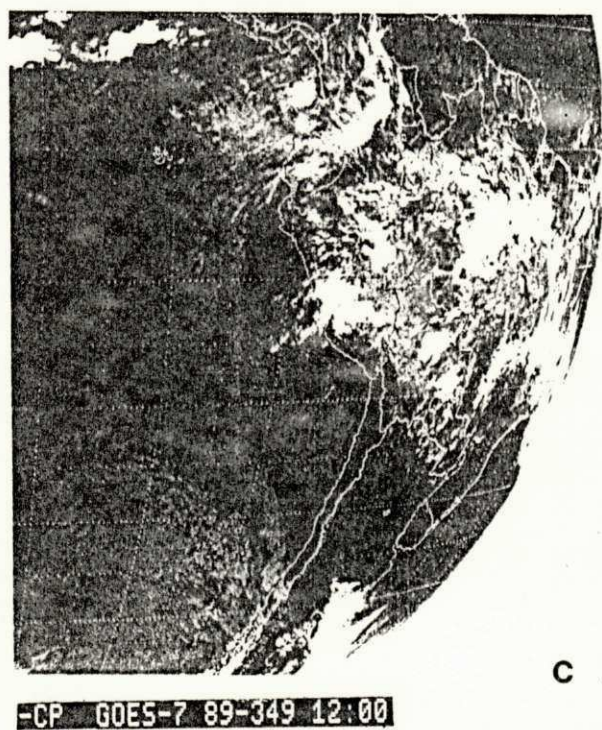
Nesta subsecção são apresentados os campos de vorticidade, advecção de vorticidade, divergência de umidade, advecção de temperatura e divergência de massa para níveis de



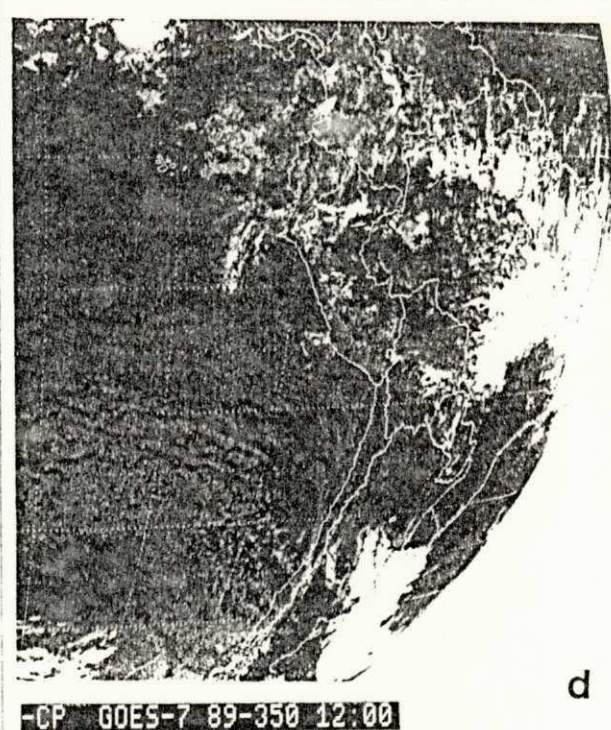
a



b



c



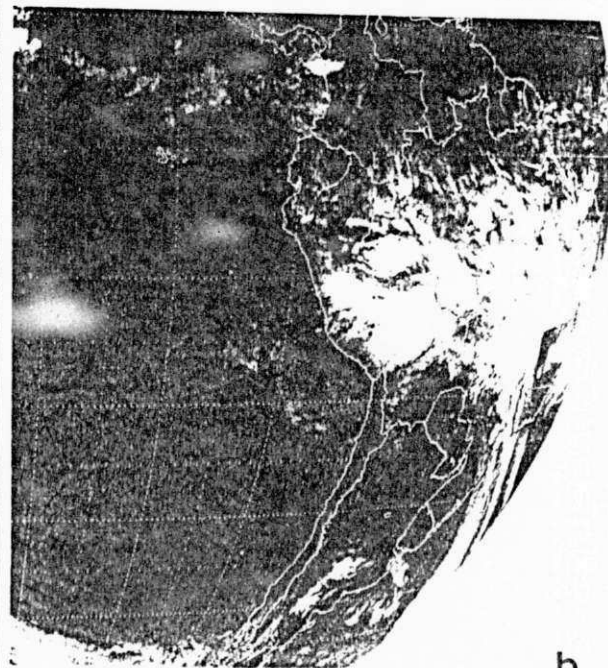
d

Fig. 4.50 - Imagem de satélite para as 12:00 TMG do dia (a) 13/12/89, (b) 14/12/89, (c) 15/12/89 e (d) 16/12/89



-CP GOES-7 89-351 12:00

a



-CP GOES-7 89-352 12:00

b



-CP GOES-7 89-353 09:00

c



-CP GOES-7 89-354 12:00

d

Fig. 4.51 - Imagem de satélite para as 12:00 TMG do dia (a) 17/12/89, (b) 18/12/89, (c) 19/12/89 e (d) 20/12/89

latitudes de 10N - 60S e longitudes de 80W - 25W.

4.2.2.1 Vorticidade em 700 e 300 hPa

O campo de vorticidade na alta troposfera sobre o NEB apresentava valores positivos entre os dias 9 (Fig. 4.52) e 11. No dia 12, véspera da formação do vórtice, valores negativos cobriam uma extensa área meridionalmente orientada à leste do NEB (Fig. 4.53). Essa área estava presente também no dia 13 (Fig. 4.54). Houve intensificação e aprofundamento desse núcleo ciclônico do dia 13 ao dia 17 enquanto o mesmo invadia o continente. Como consequência, já no dia 14 a vorticidade apresentava valores negativos sobre o NEB desde o nível de 300 hPa (Fig. 4.55) até o nível de 700 hPa (Fig. 4.56). Esse comportamento do núcleo ciclônico teve início com a penetração de um sistema frontal no sudeste do Brasil (Fig. 4.43). É interessante observar ainda que até o dia 17 havia valores positivos na alta troposfera sobre a região do Chaco (Fig. 4.57). Após esse dia, o deslocamento para norte da circulação do anticiclone da Bolívia evidenciado nas análises de 200 hPa (Figs. 4.47 a 4.49) contribuiu para o estabelecimento de valores negativos nessa região. Vale assinalar que o deslocamento do anticiclone ocorreu associado à penetração de um sistema frontal vindo de sul-sudoeste (Figs. 4.50 e 4.51).

Nos dias 18 e 19 o nível de 300 hPa (Figs. 4.58 e 4.59) mostrava vorticidade negativa apenas sobre parte da Região (porção leste e norte) enquanto que no dia 20 a mesma área era dominada por vorticidade anticiclônica (Fig. 4.60).

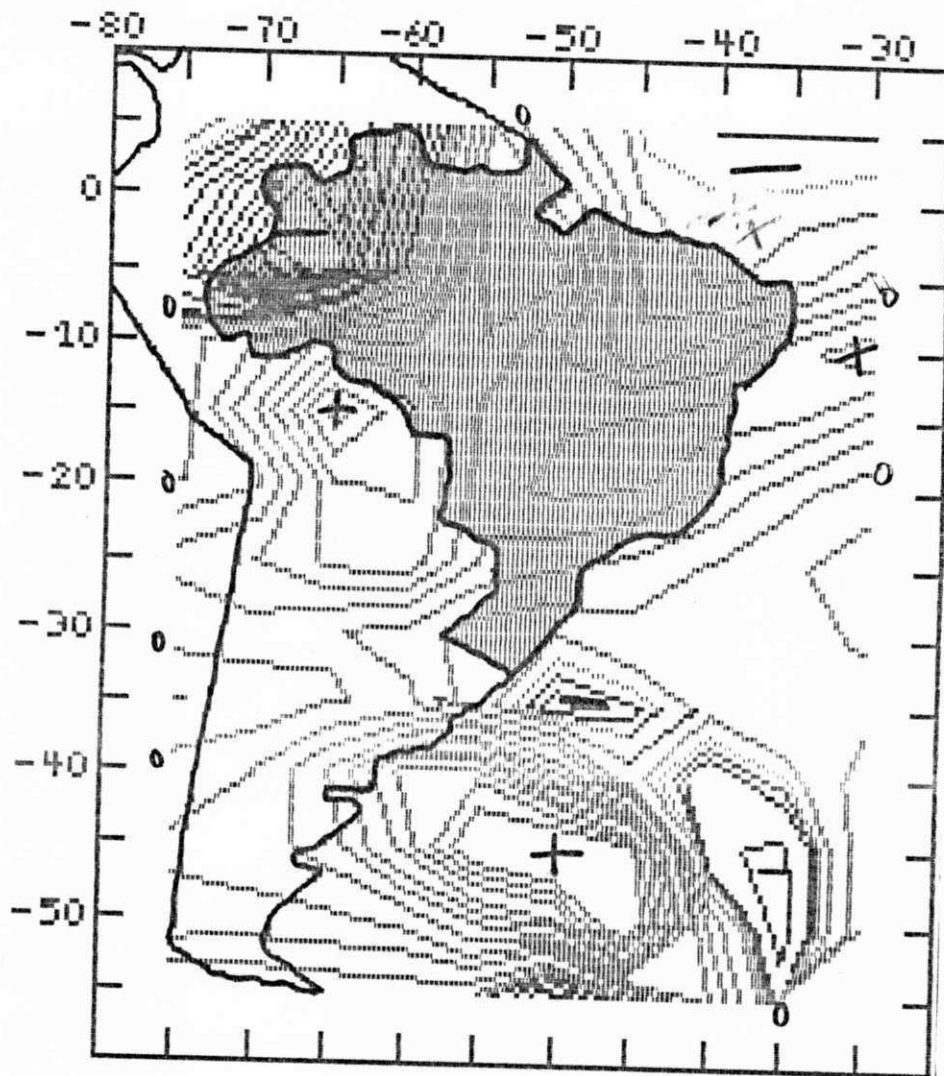


Fig. 4.52 - Vorticidade ($\times 10^{-7}$ /s) em 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 09/12/89.



Fig. 4.53 - Vorticidade ($\times 10^{-7}$ /s) em 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 12/12/89.

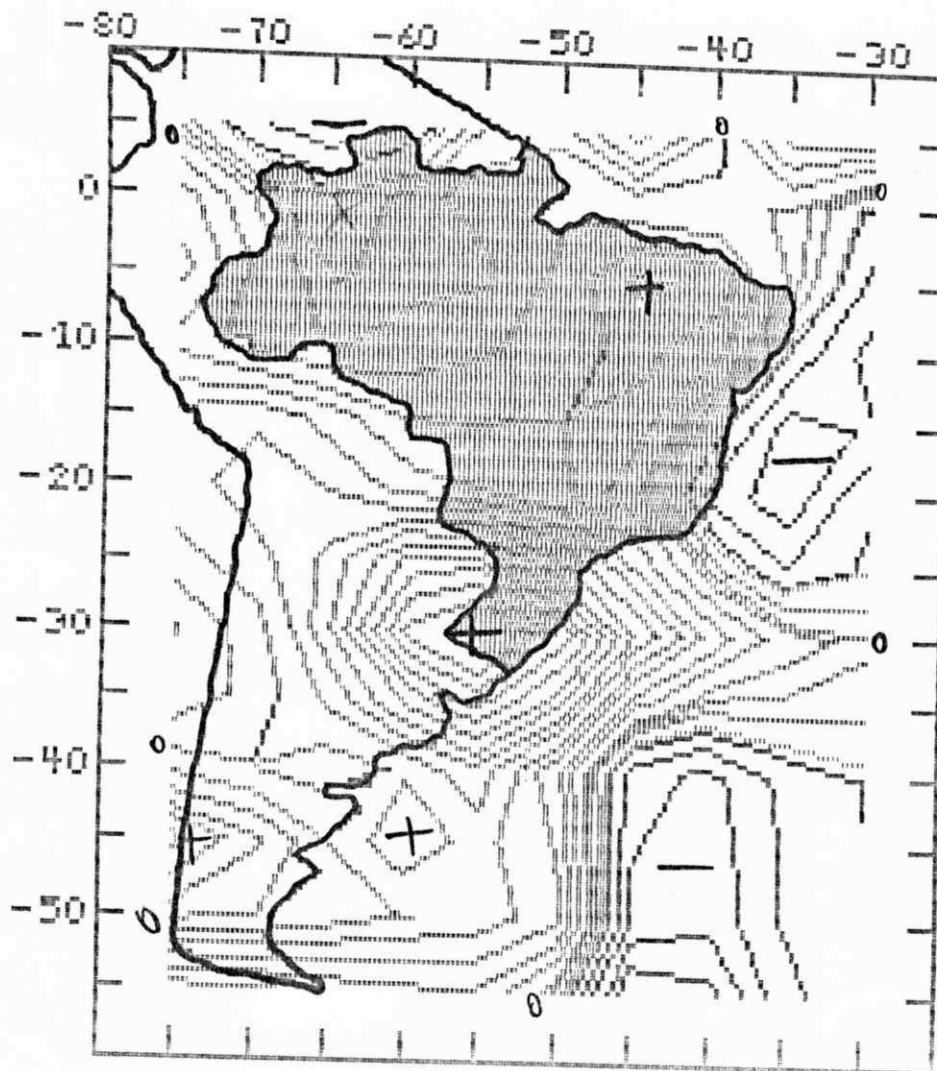


Fig. 4.54 - Vorticidade ($\times 10^{-7}$ /s) em 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 13/12/89.

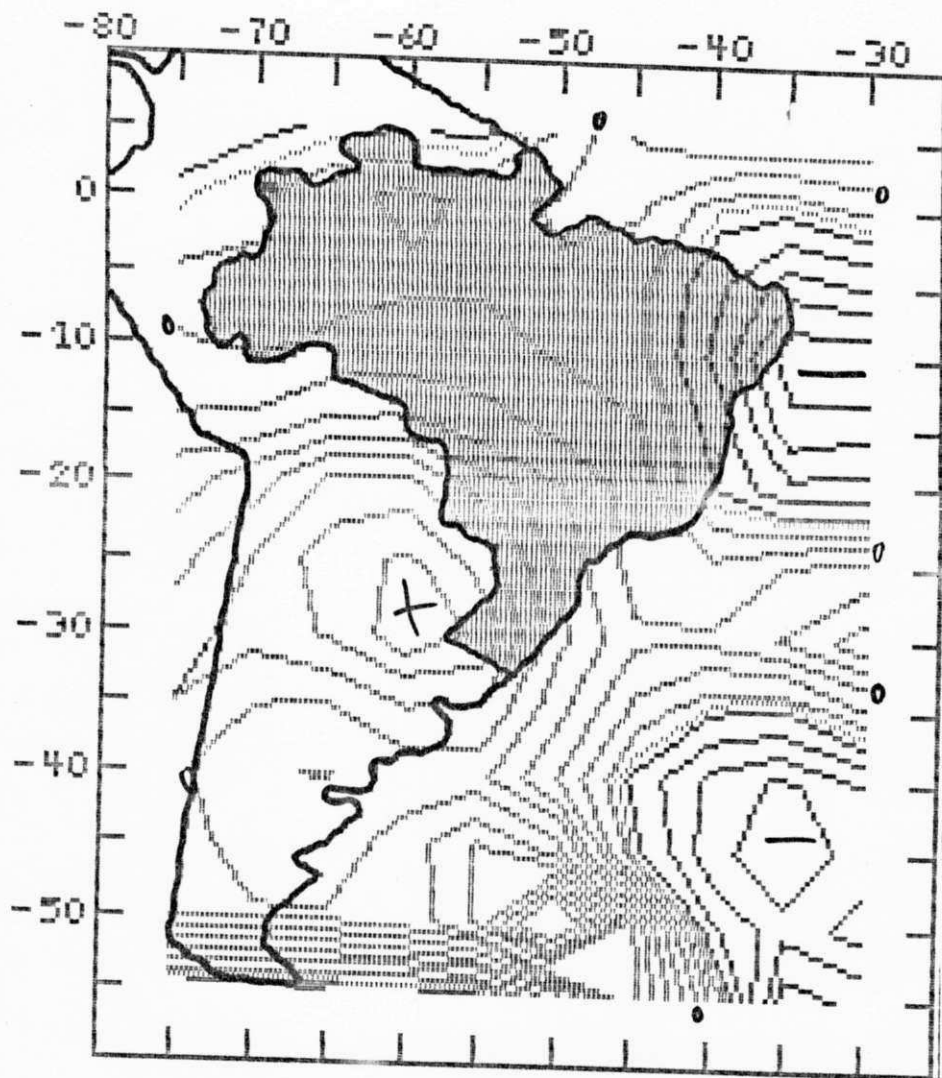


Fig. 4.55 - Vorticidade ($\times 10^{10}$ s^{-1}) em 300 hPa para as 12:00 TMO do dia 14/12/89.

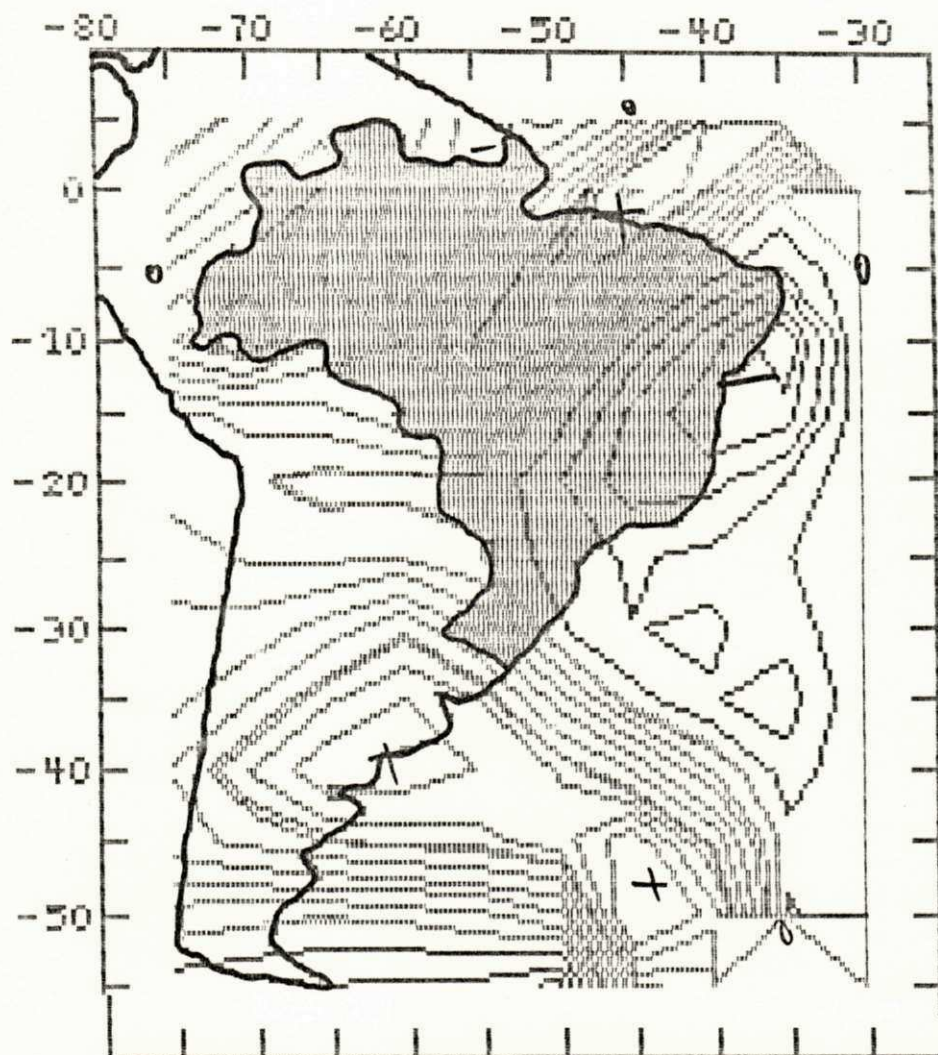


Fig. 4.56 - Vorticidade ($\times 10^{-7}$ /s) em 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 14/12/89.

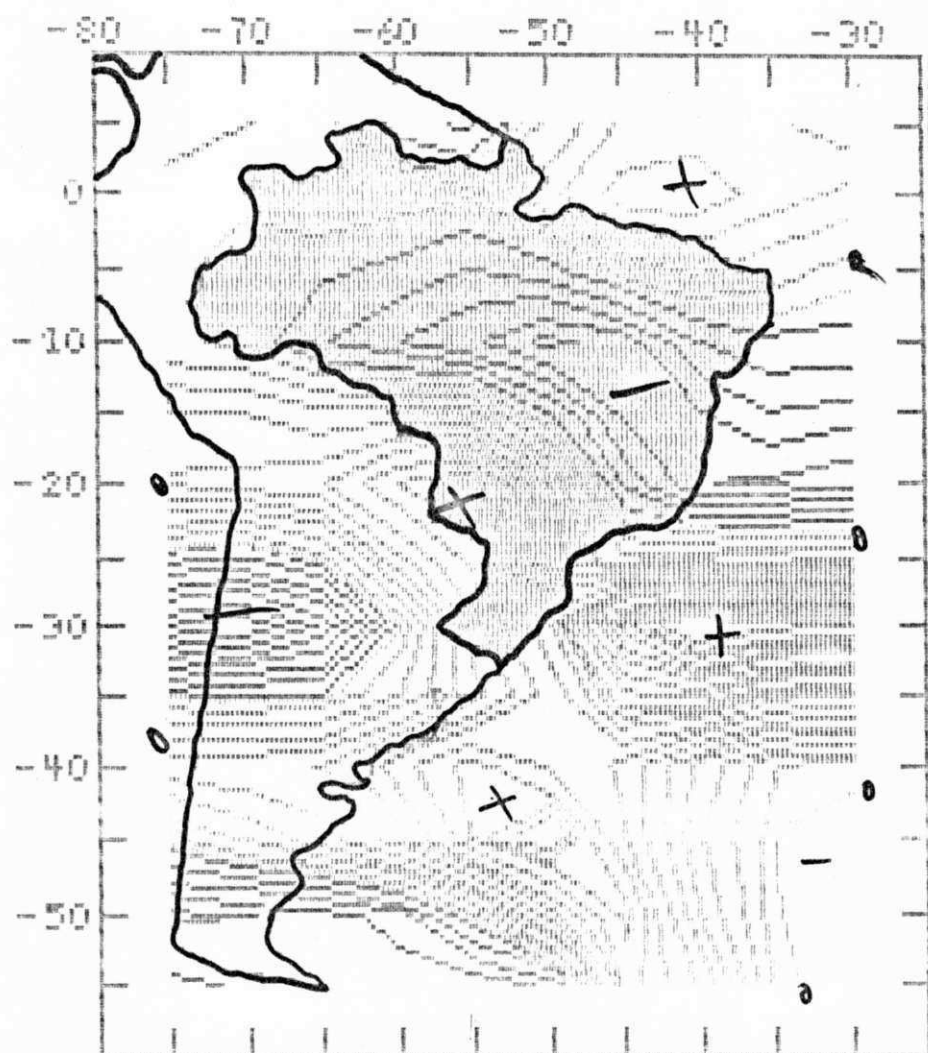


Fig. 4.57 - Vorticidade ($\times 10^{-7}$ /s) em 300 hPa para as 12:00 TMO do dia 17/12/89.

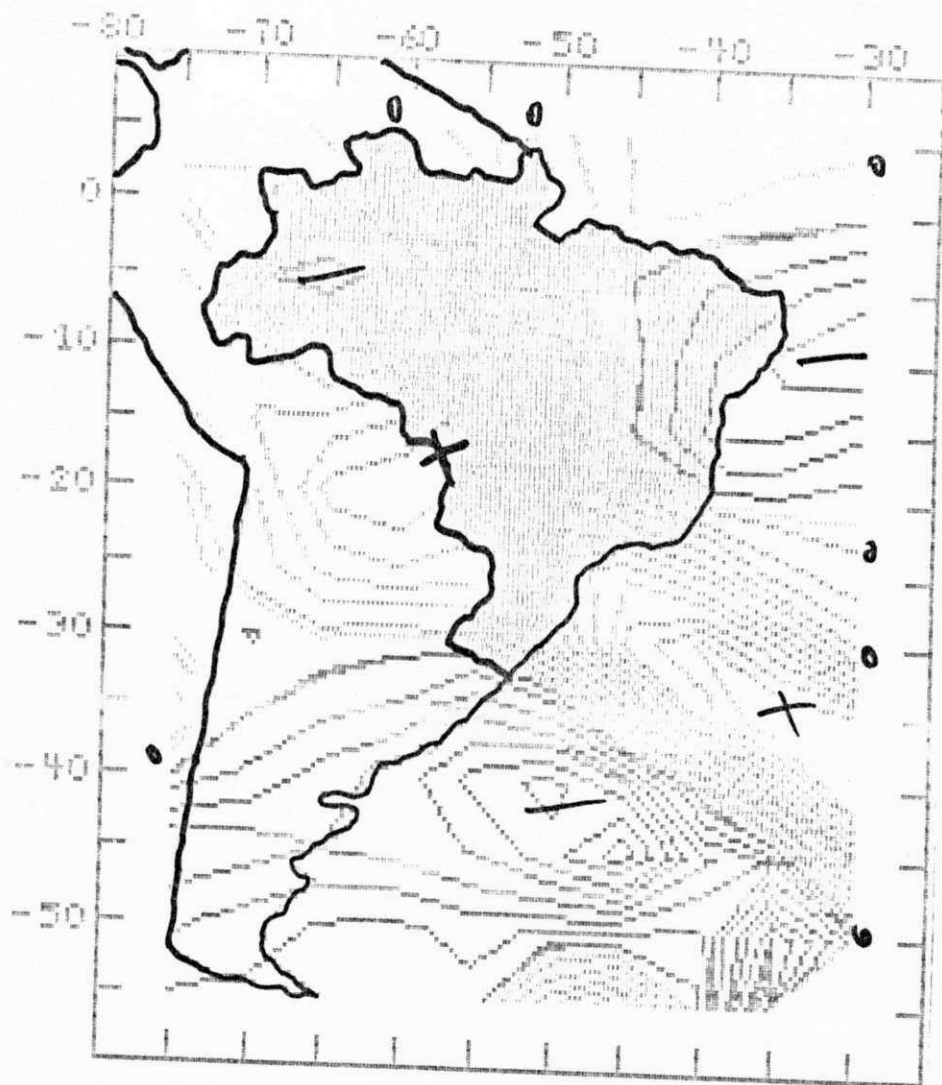


Fig. 4.58 - Vorticidade ($\times 10^{10}$ s^{-1}) em 300 hPa para as 12:00 TMC do dia 18/12/89.

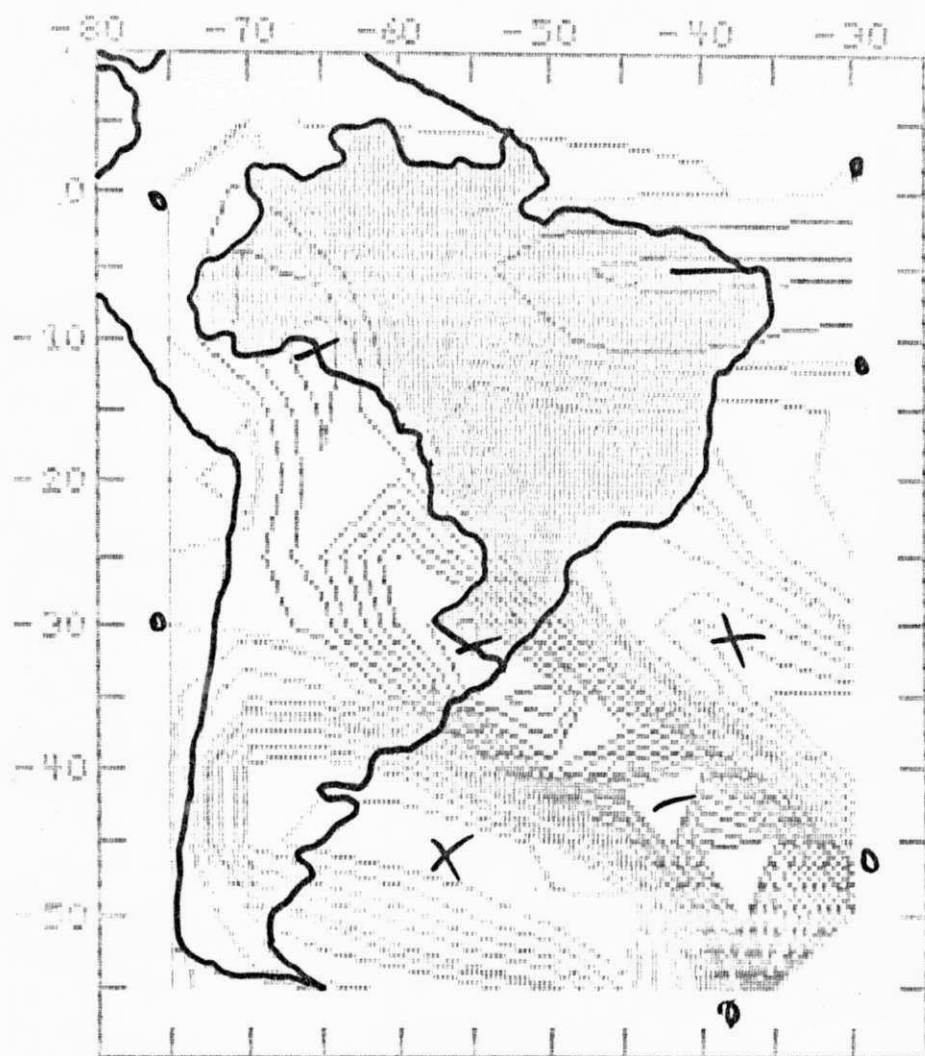


Fig. 4.59 - Vorticidade ($\times 10^{10}$ s^{-1}) em 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 19/12/89.

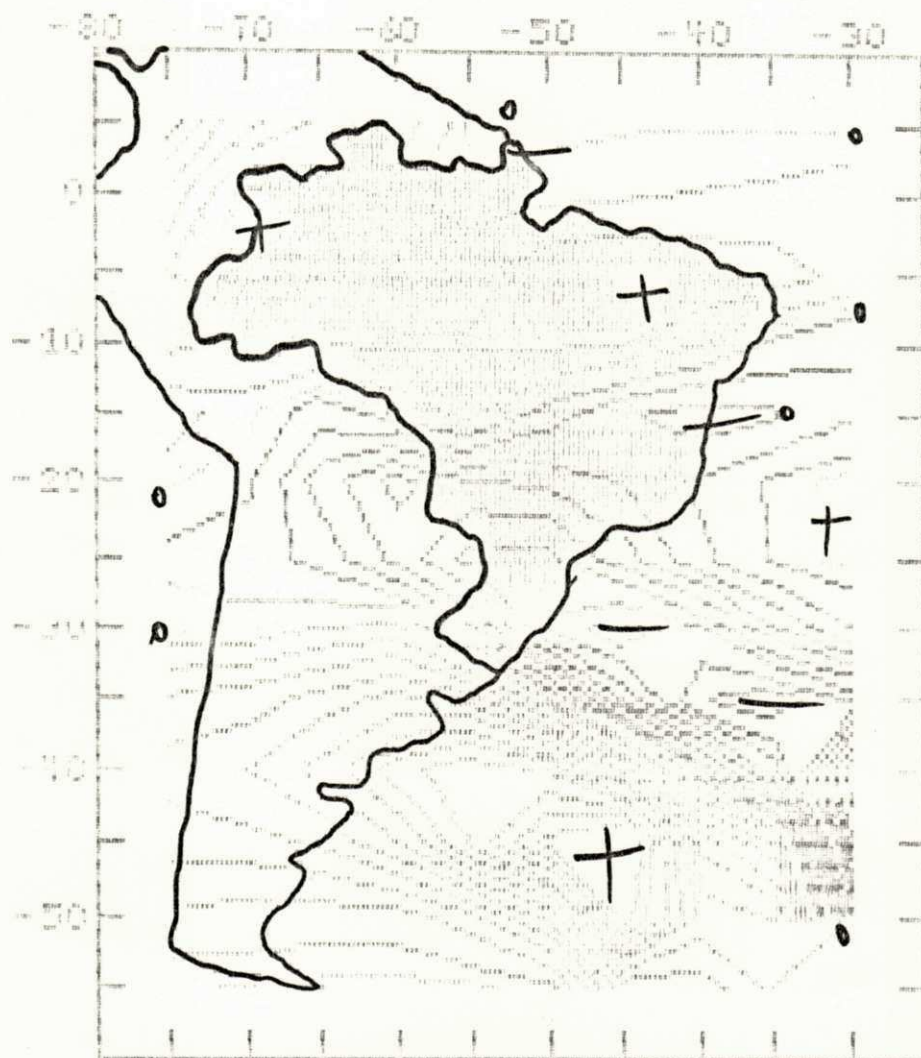


Fig. 4.60 - Vorticidade ($\times 10^{10} \text{ s}^{-2}$) em 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 20/12/89.

4.2.2.2 Advecção de Vorticidade em 300 hPa

No período de 9 a 15 (Figs. 4.61 a 4.64) a advecção de vorticidade era positiva no NEB, passando a negativa no dia 17 (Fig. 4.65), para se tornar novamente positiva nos dois dias seguintes (Fig. 4.66). No dia 12, em particular, havia um pequeno núcleo negativo a oeste da Região (Fig. 4.62). Por outro lado, a região do Chaco apresentava, na maior parte do período, uma alternância de valores positivos e negativos, o que também acontecia no sul do Brasil como, por exemplo, nas Figuras 4.63 e 4.64.

Vale salientar que os resultados obtidos para a área do NEB indicam que não foi advecção horizontal de vorticidade o mecanismo responsável pela presença de vorticidade ciclônica em grande parte da Região (Figs. 4.55 a 4.58).

4.2.2.3 Divergência de Umidade em 700 hPa

No dia 11 o campo de divergência de umidade na baixa troposfera apresentava valores positivos em todo o NEB, o que contrastava com o núcleo negativo localizado sobre a Amazônia (Fig. 4.67). Situação oposta ocorre no período de 12 a 18: divergência na Amazônia e convergência no NEB (Fig. 4.68). No dia 19 havia fraca divergência de umidade em quase todo o NEB (Fig. 4.69).

As modificações sofridas por este campo no decorrer do período foram, de maneira geral, compatíveis com a evolução da cobertura de nuvens. Assim, no início do período grande parte da Amazônia (área de convergência) se encontrava encoberta enquanto o NEB (área de divergência) tinha pouca ou nenhuma nebulosidade

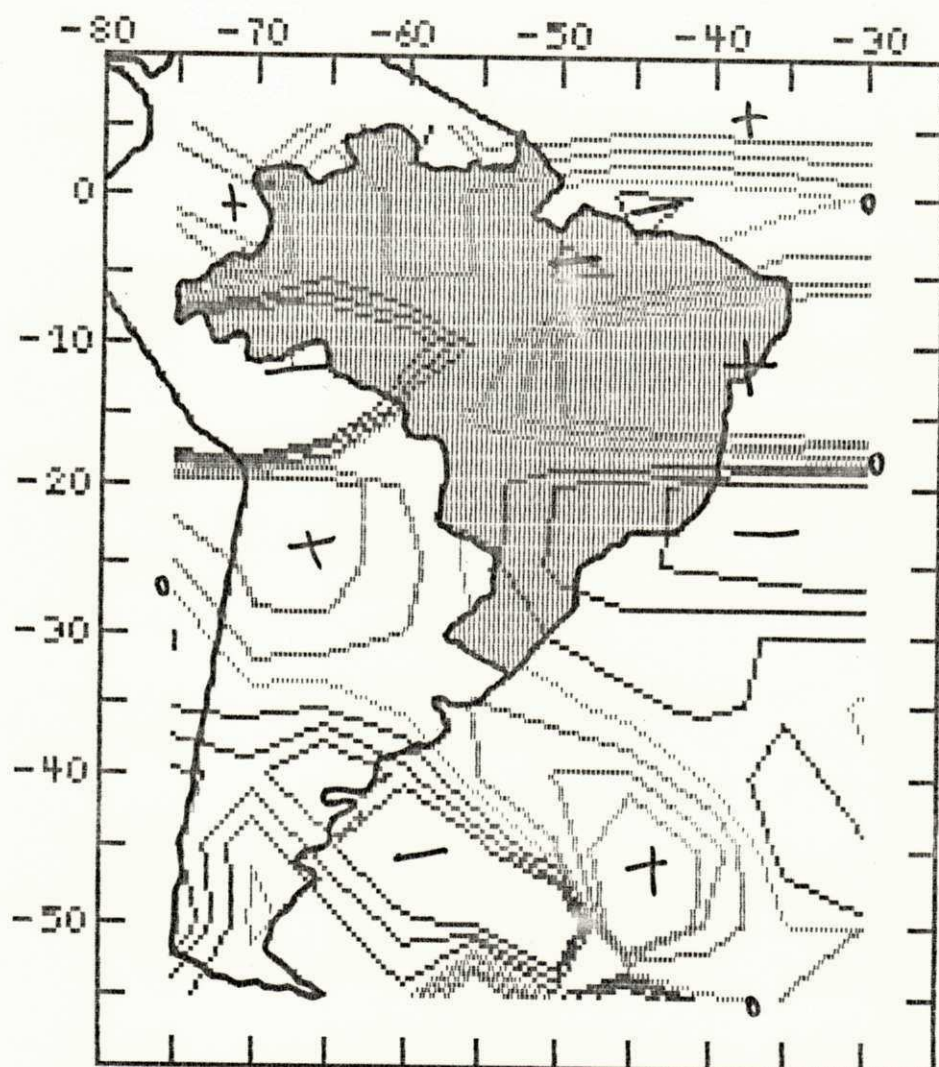


Fig. 4.61 - Adveccão de vorticidade ($\times 10^{10} \text{ s}^{-2}$) em 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 09/12/89.

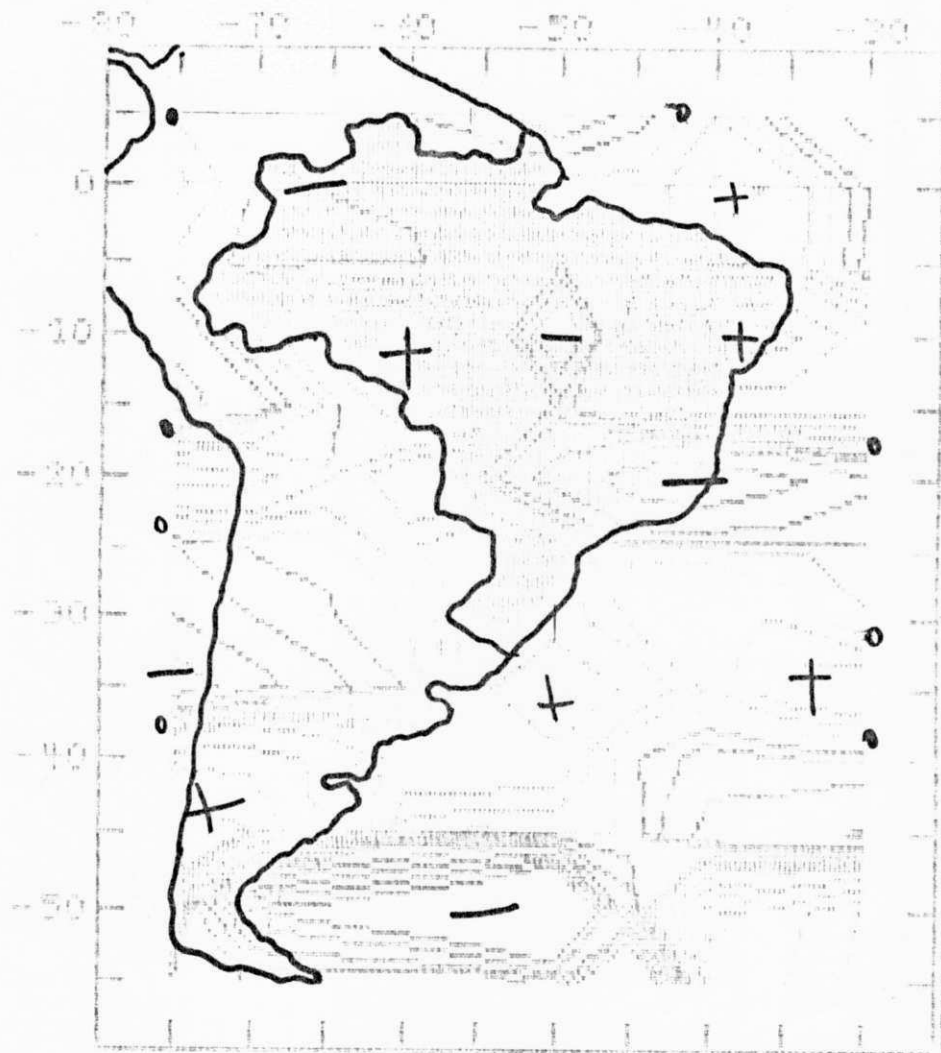


Fig. 4.62 - Adveccão de vorticidade ($\times 10^{10} \text{ s}^{-2}$) em 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 12/12/89.

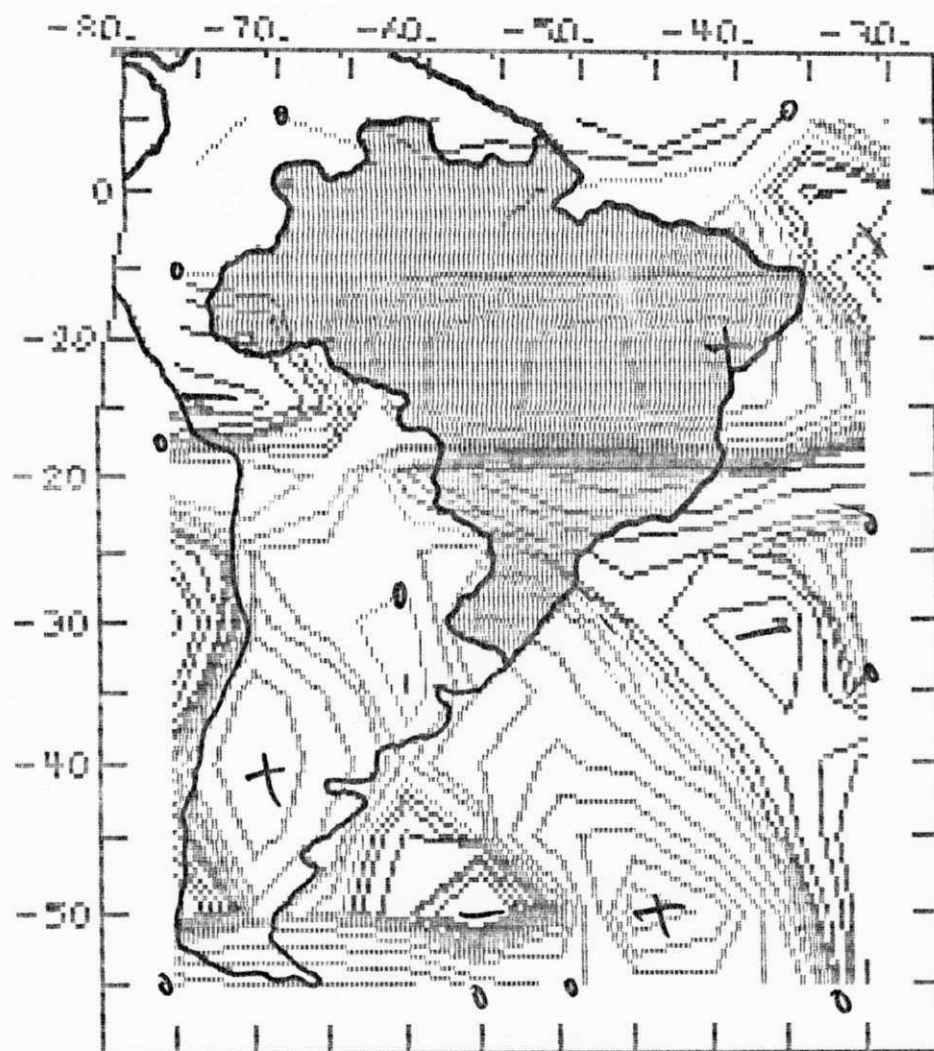


Fig. 4.63 - Adveccão de vorticidade ($\times 10^{10} \text{ s}^{-2}$) em 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 14/12/89.

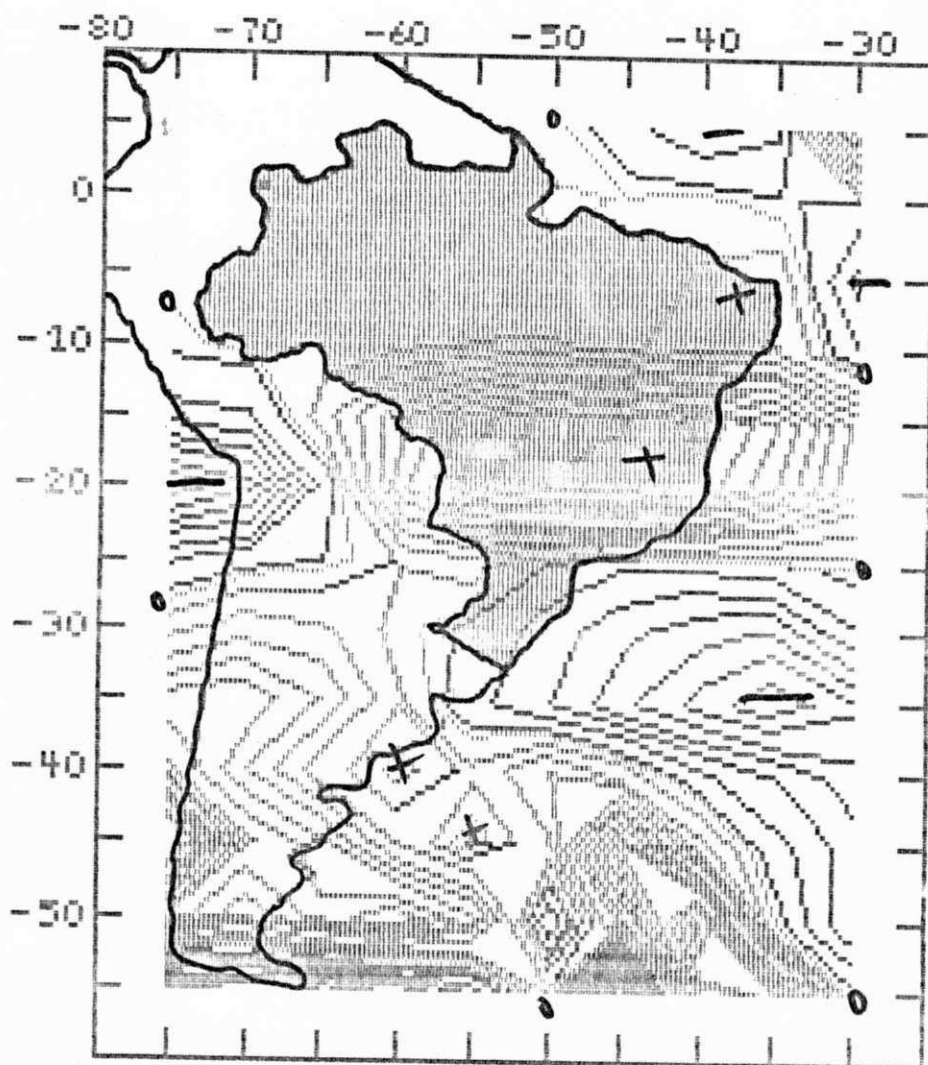


Fig. 4.64 - Adveccão de vorticidade ($\times 10^{12} \text{ s}^{-2}$) em 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 15/12/89.

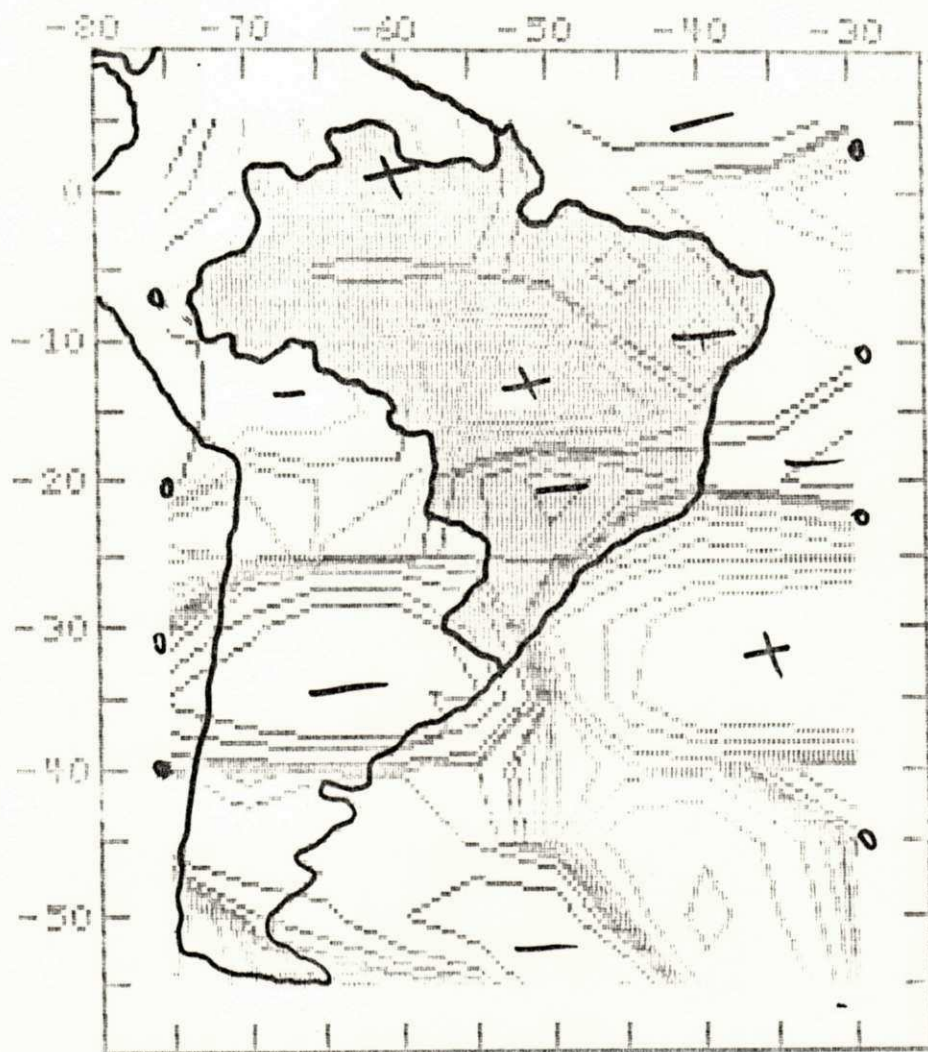


Fig. 4.65 - Adveccão de vorticidade ($\times 10^{-12} \text{ s}^{-2}$) em 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 17/12/89.

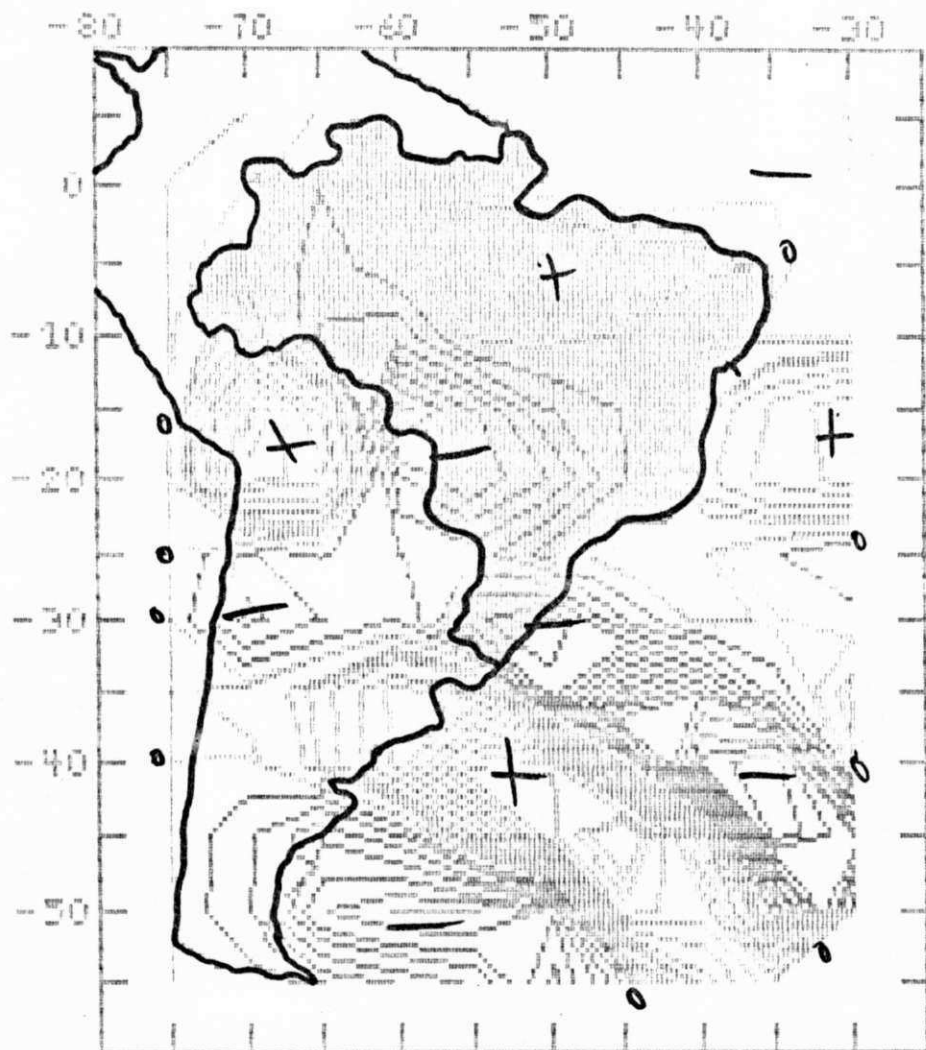


Fig. 4.66 - Adveccão de vorticidade ($\times 10^{10} \text{ s}^{-2}$) em 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 19/12/89.

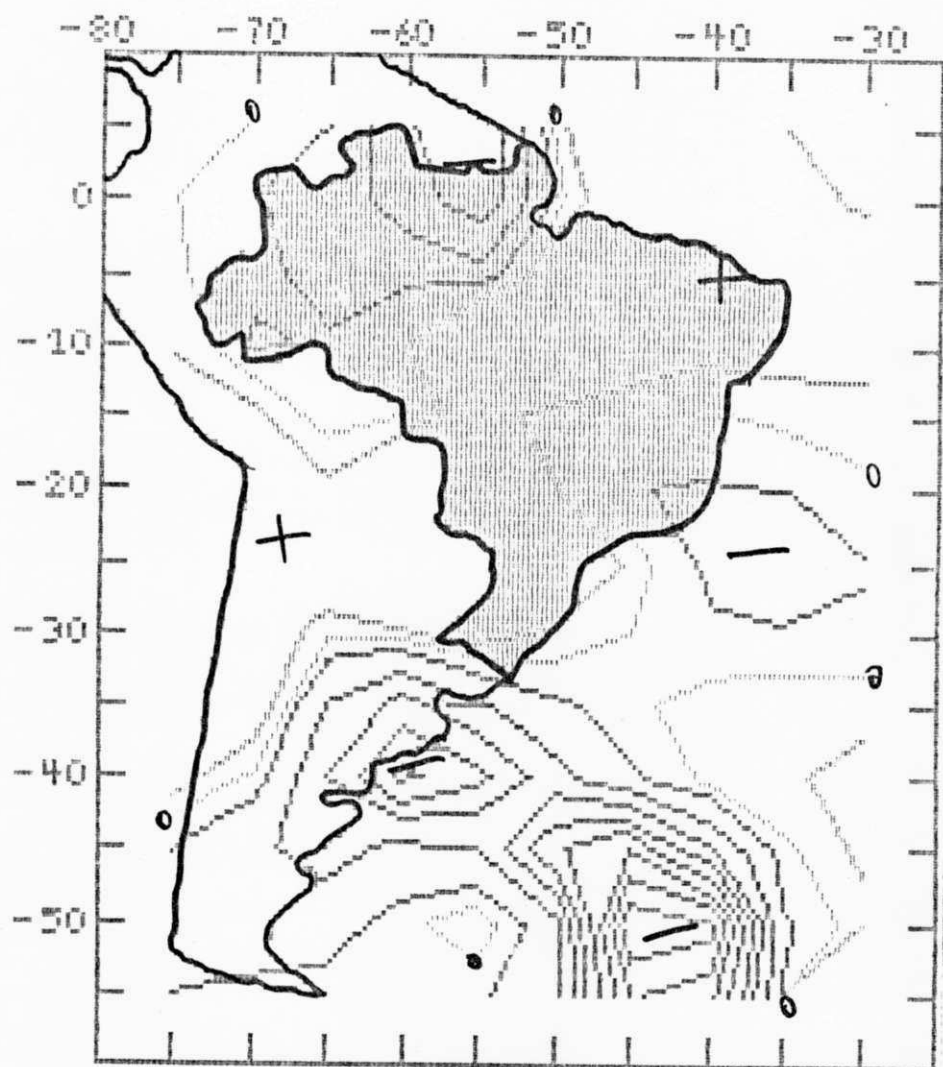


Fig. 4.67 - Divergência de umidade ($\times 10^9$ g/s) em 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 11/12/89.

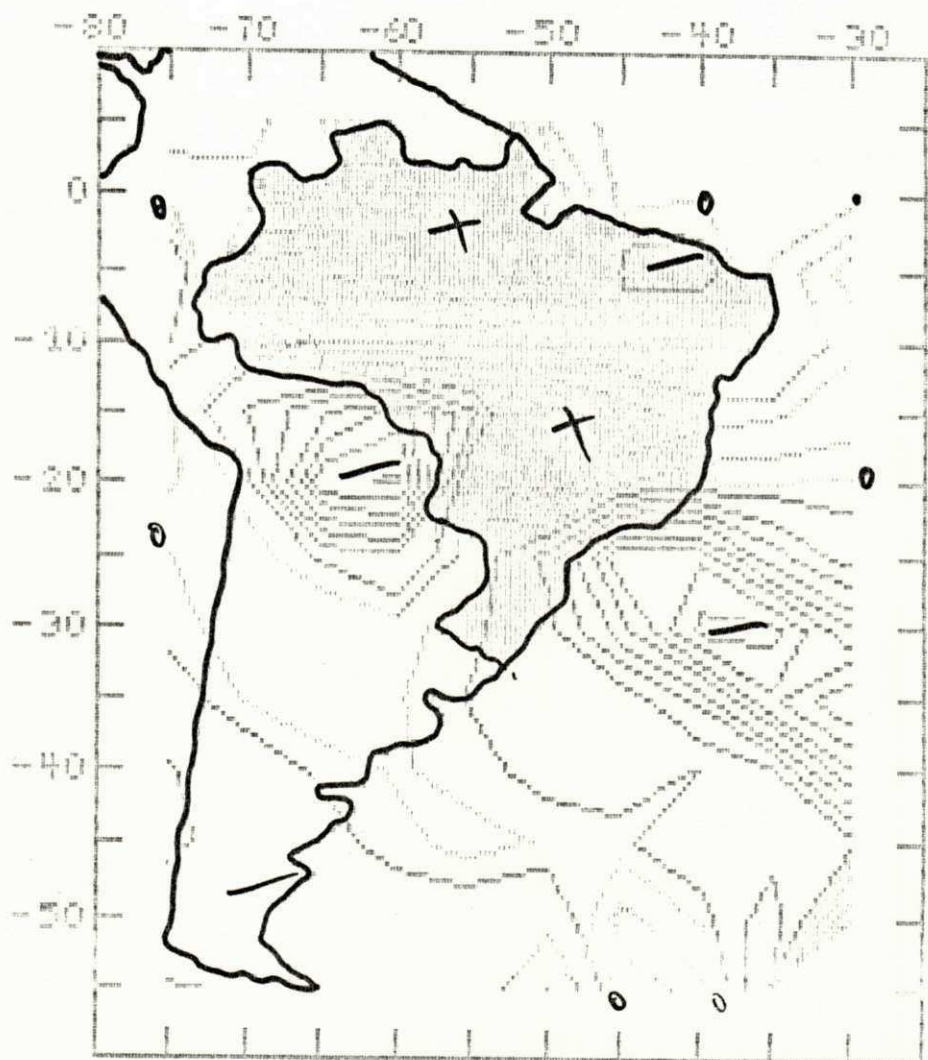


Fig. 4.68 - Divergência de umidade ($\times 10^{10}$ g/s) em 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 18/12/89.



Fig. 4.69 - Divergência de umidade ($\times 10^{10}$ g/s) em 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 19/12/89.

(Fig. 4.43a-c). Essa situação se inverte gradualmente, sendo as Figuras 4.50d e 4.51a representativas do estágio final dessa mudança. A situação se altera no dia 18 (Fig. 4.51b) com grande aumento da nebulosidade sobre a Amazônia ocorrida em associação com a entrada de uma frente fria no sudeste do Brasil. A área de convergência de umidade devida a essa frente é claramente vista na Figura 4.68 orientada segundo a direção noroeste-sudeste. Vale assinalar que as análises do campo de divergência de umidade guardam grande semelhança com as do campo de divergência de massa a serem discutidas logo a seguir.

4.2.2.4 Advecção de Temperatura em 300 hPa

No dia anterior ao da formação do vórtice havia fraca advecção fria no norte da América do Sul (Fig. 4.70). O restante do continente era quase todo dominado por um núcleo de advecção fria flanqueado por núcleos positivos a leste e a oeste. É interessante observar que o dipolo localizado sobre o centro-leste do continente estava associado ao sistema frontal que atuava no sudeste do Brasil (Fig. 4.43d). A situação era muito semelhante no dia 13 (Fig. 4.71), dia de formação do vórtice, a não ser pela posição mais a leste dos núcleos localizados no centro-sul do continente.

No dia 14 o norte do continente era dominado por advecção fria e quente em suas porções leste e oeste, respectivamente (Fig. 4.72). No restante da América do Sul o campo era semelhante ao do dia anterior, embora a posição do dipolo sugerisse um deslocamento do sistema frontal para leste. Esse sistema é eventualmente substituído por aquele responsável

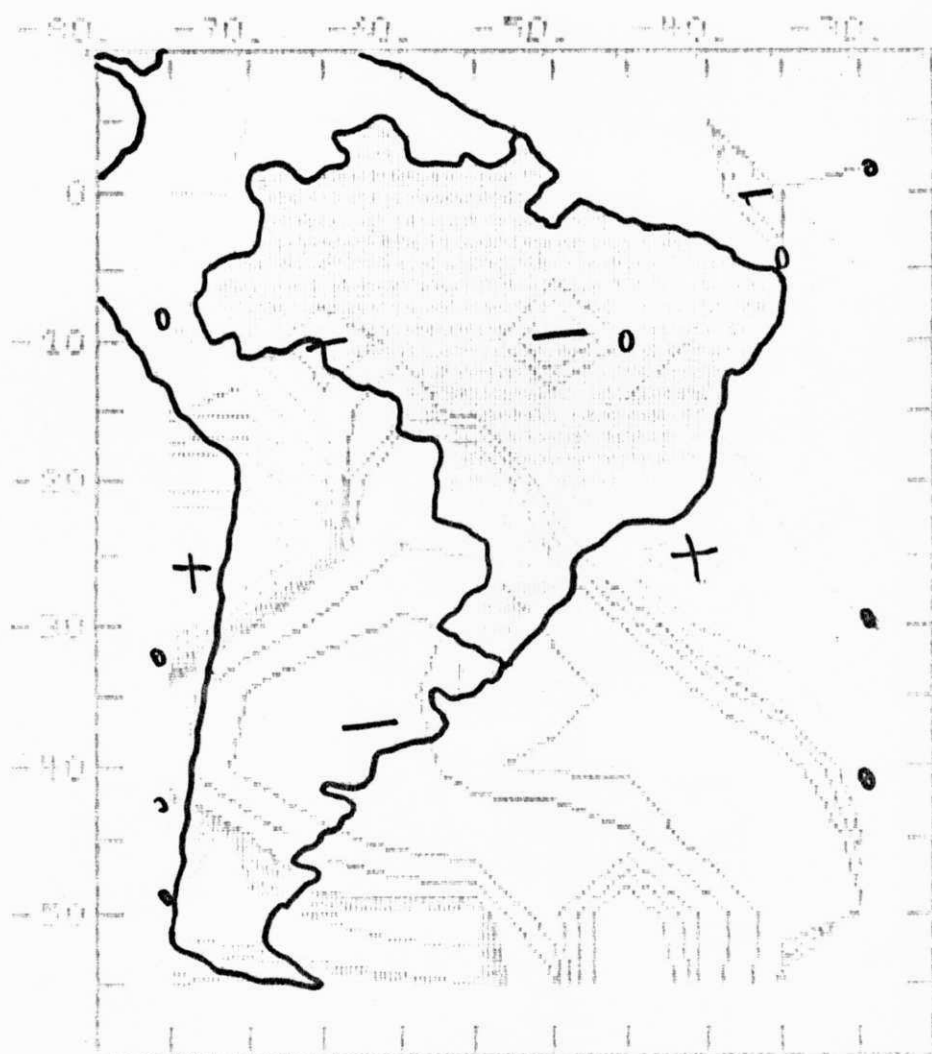


Fig. 4.70 - Adveccao de temperatura ($\times 10^{-7}$ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$) em 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 12/12/89.

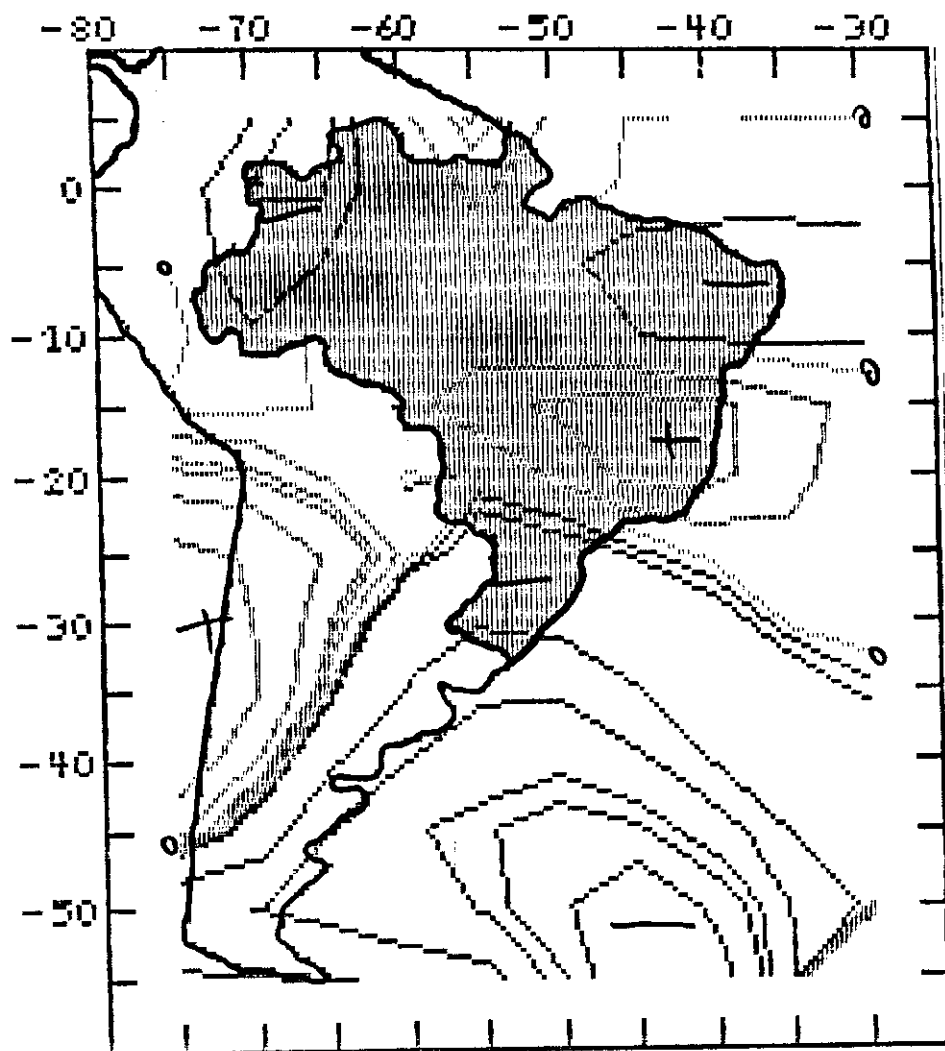


Fig. 4.71 - Adveccao de temperatura ($\times 10^{-7}$ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$) em 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 13/12/89.

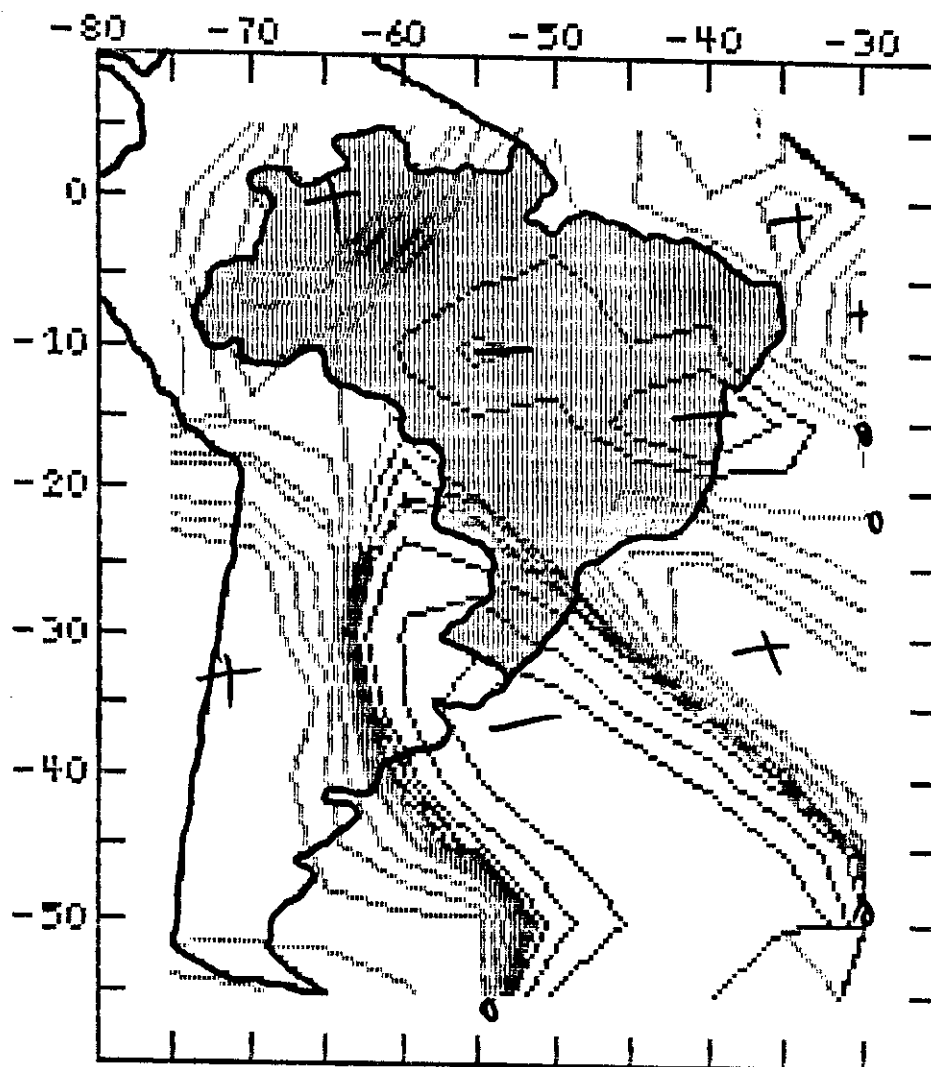


Fig. 4.72 - Adveccao de temperatura ($\times 10^{-7}$ °C/s) em 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 14/12/89.

pelo núcleo positivo situado no sudoeste do continente neste dia. Enquanto isso, a situação no norte da América do Sul permanecia quase que inalterada até o dia 17 já que no dia 18 essa região era dominada por advecção positiva (Fig. 4.73).

4.2.2.5 Divergência de Massa em 700 e 300 hPa

Dois dias antes da formação do vórtice ciclônico, havia convergência sobre o Maranhão e Piauí no nível de 300 hPa enquanto que na baixa troposfera o campo era positivo em todo o NEB (Figs. 4.74 e 4.75). No dia 12, véspera da formação do vórtice, havia convergência na alta (Fig. 4.76) e baixa troposfera sobre a Região. Convergência (divergência) nos altos (baixos) níveis persistiu sobre o NEB do dia 13 (Figs. 4.77 e 4.78) ao dia 17 já que no dia 18 havia convergência em ambos os níveis (Figs. 4.79 e 4.80).



Fig. 4.73 - Adveccao de temperatura ($\times 10^{-7}$ oC/s) em 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 18/12/89.

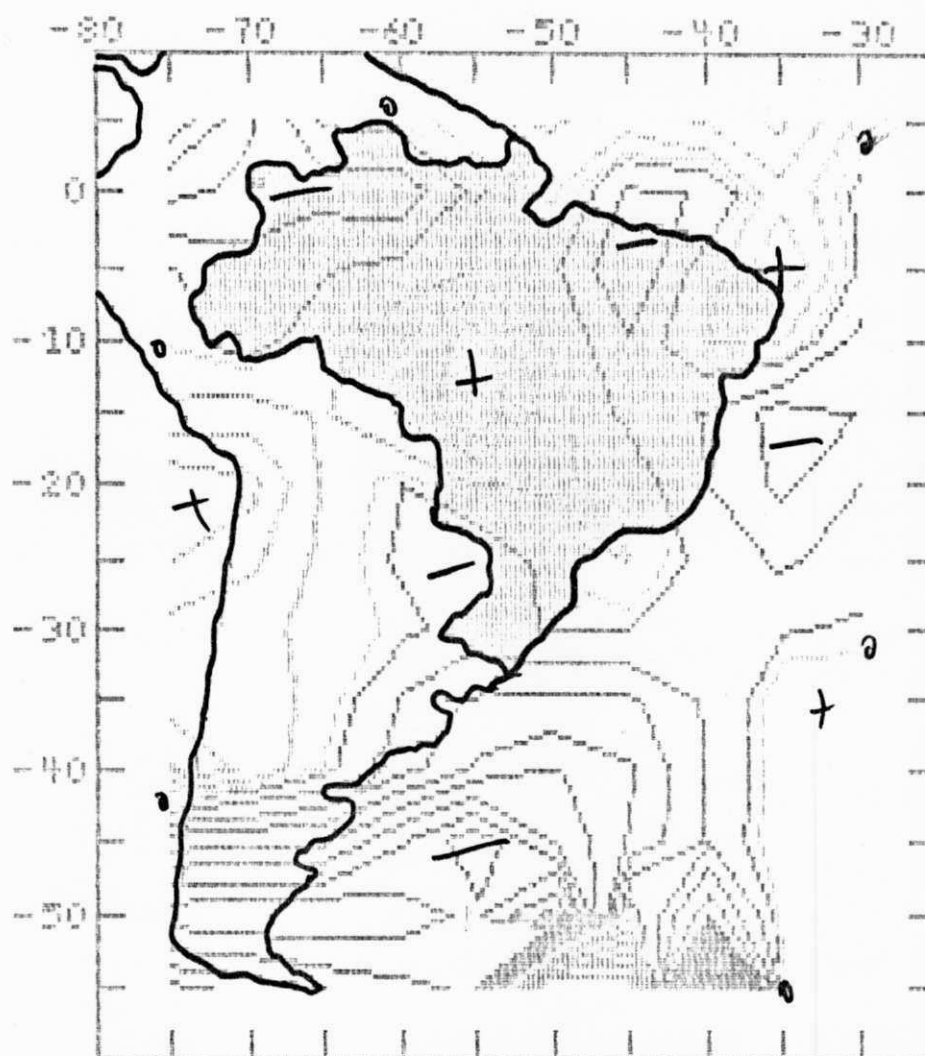


Fig. 4.74 - Divergencia de massa ($\times 10^{-7}$ /s) em 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 11/12/89.

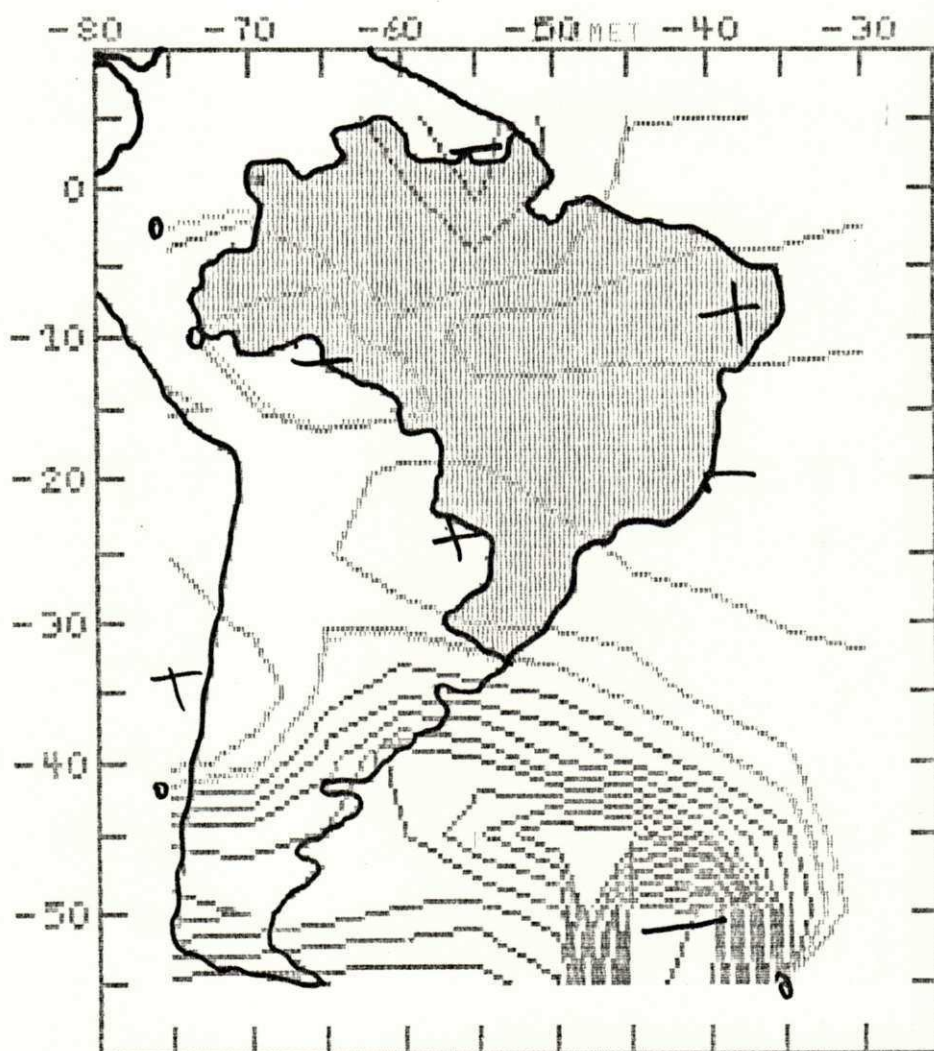


Fig. 4.75 - Divergência de massa ($\times 10^{10} \text{ s}^{-1}$) em 700 hPa para as 12:00 TMC do dia 11/12/89.

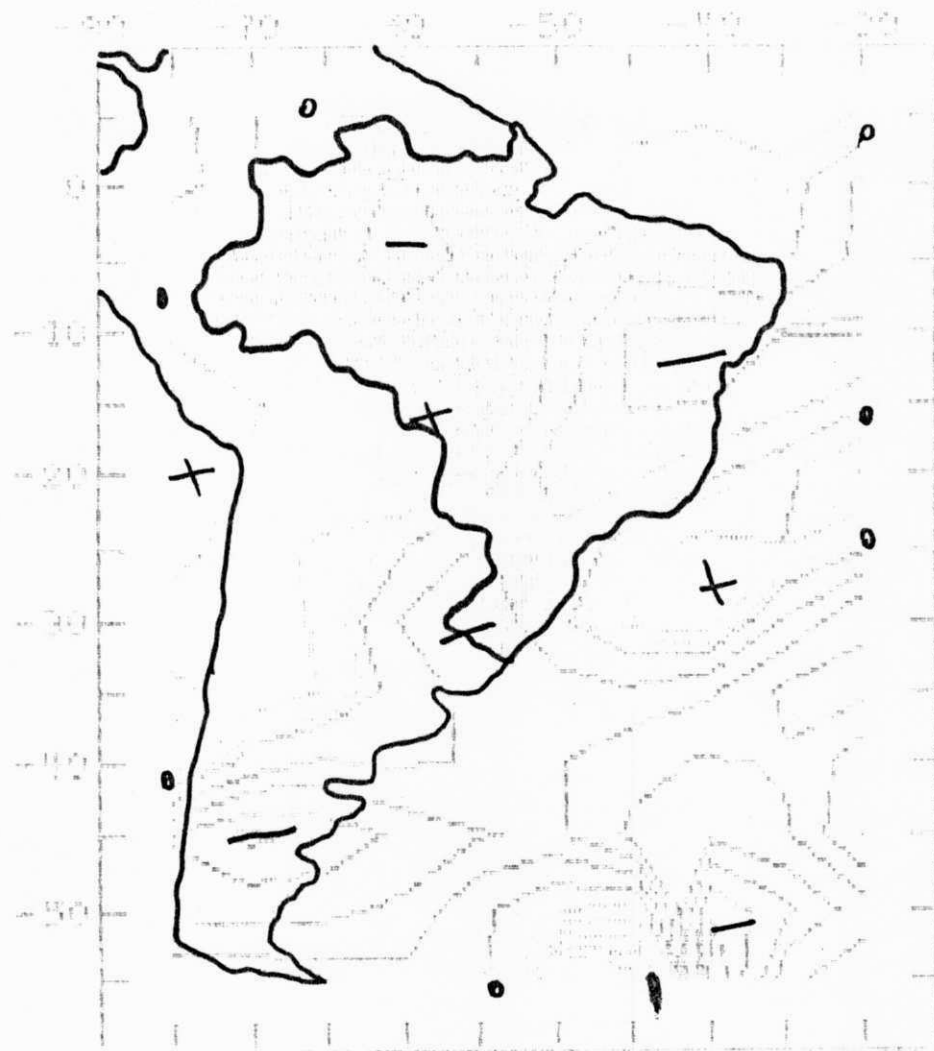


Fig. 4.76 - Divergência de massa ($\times 10^{-7}$ /s) em 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 12/12/89.

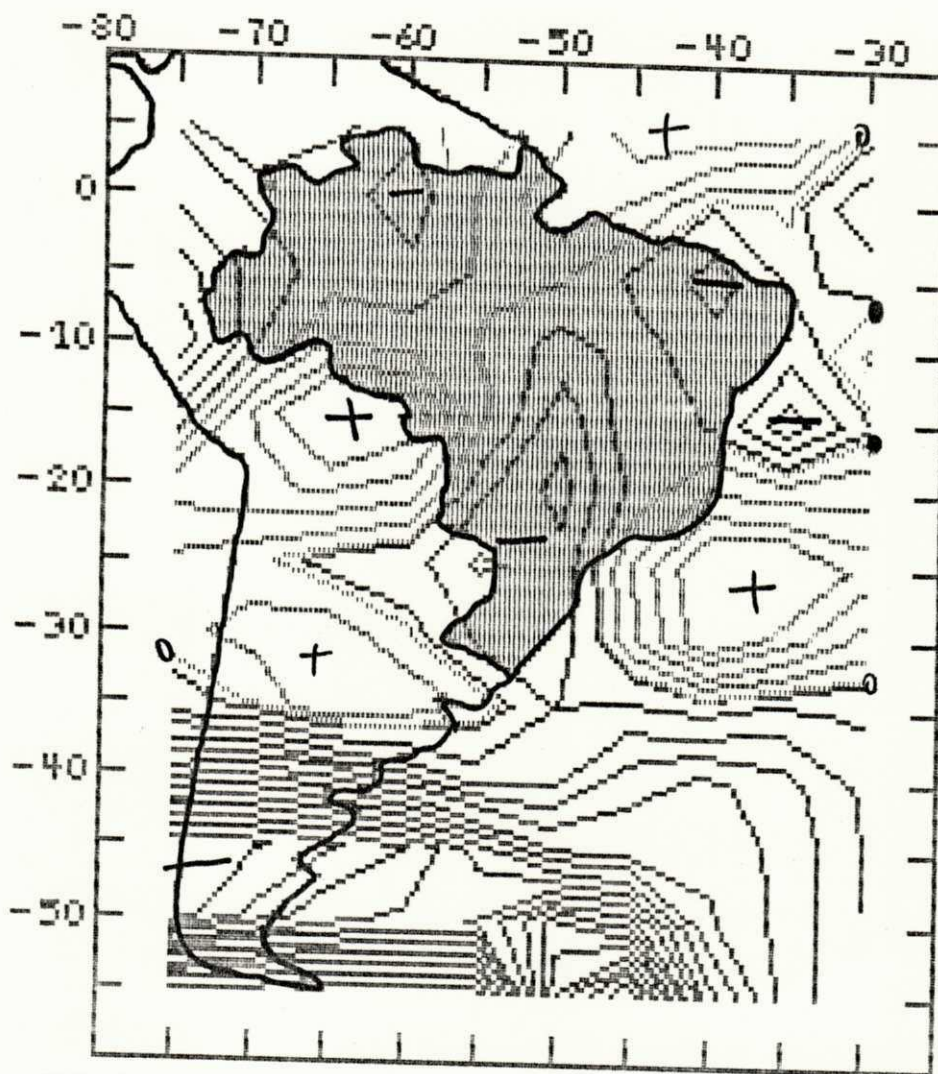


Fig. 4.77 - Divergência de massa ($\times 10^{-7}$ /s) em 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 13/12/89.

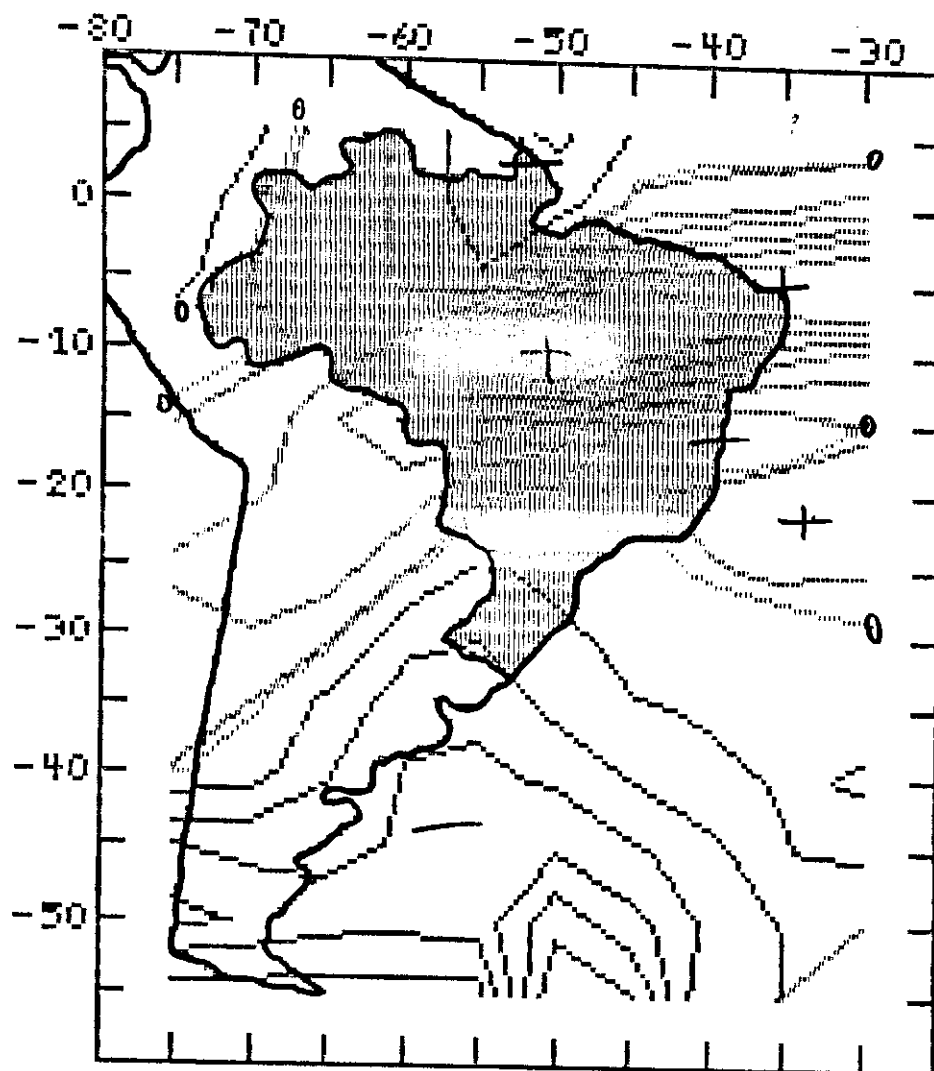


Fig. 4.78 - Divergência de massa ($\times 10^{-7}$ /s) em 700 hPa para as 12:00 TMG do dia 13/12/89.

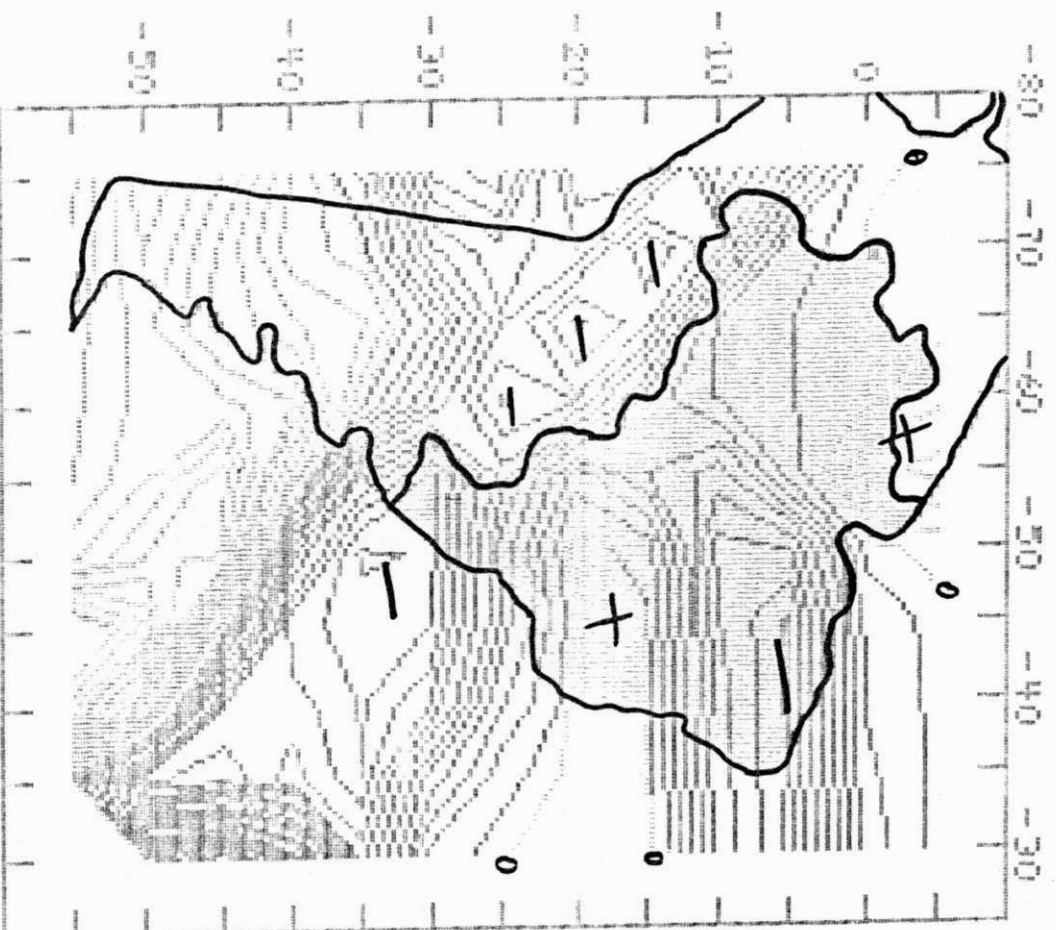


Fig. 4.79 - Divergência de massa ($\times 10^{10} \text{ s}^{-1}$) em 300 hPa para as 12:00 TMG do dia 18/12/89.

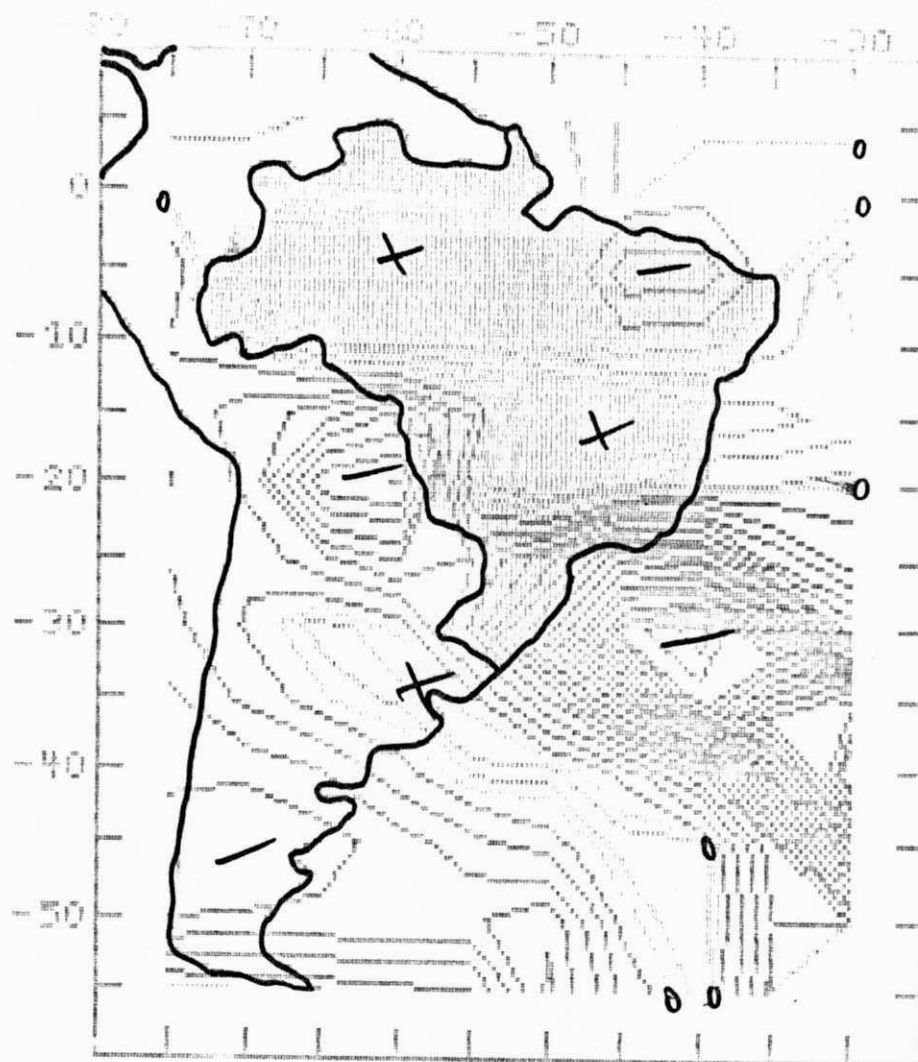


Fig. 4.80 - Divergência de massa ($\times 10^{-7}$ /s) em 700 hPa para as 12:00 TNG do dia 18/12/89.

4.3 Considerações Gerais

4.3.1 Caso I: período de 15 - 30/12/80

O vórtice deste caso, identificado do dia 18 ao dia 26 nas cartas de linhas de corrente, é um exemplo de sistema que se estendeu até a média troposfera.

A análise dos campos derivados para as várias etapas do ciclo de vida do vórtice permite escrever que, de maneira geral, existe sobre o NEB:

(a) antes do primeiro dia do vórtice (dia 18)

- na média troposfera: vorticidade ciclônica, advecção de vorticidade ciclônica, advecção fria;
- na baixa troposfera: convergência de umidade nas suas porções leste e oeste, divergência de massa;

(b) entre o primeiro e o último dia do vórtice

- na média troposfera: vorticidade ciclônica, advecção de vorticidade ciclônica sobre sua parte central, advecção fria;
- na baixa troposfera: convergência de umidade e de massa;

(c) após o último dia do vórtice (dia 26)

- na média troposfera: diminuição gradativa (em valor absoluto) dos valores de vorticidade ciclônica, advecção de vorticidade anticiclônica e advecção quente sobre parte da Região;
- na baixa troposfera: fraca divergência de umidade, divergência de massa sobre a Bahia.

A cobertura de dados obtida para este caso impediu que

se diagnosticasse a circulação do anticiclone da Bolívia e jato subtropical. Por outro lado, as imagens de satélite evidenciam que a formação do vórtice foi precedida por intensa atividade convectiva na região do anticiclone, aliada à penetração de um sistema frontal em latitudes baixas. As áreas encobertas associadas ao sistema frontal e ao ciclone de ar superior pareciam formar uma só entidade até a dissipação do vórtice.

4.3.2 Caso II: período de 09 - 20/12/89

As cartas de linhas de corrente mostram que o vórtice ciclônico pôde ser identificado do dia 13 ao dia 18 na alta e média troposfera.

De maneira geral, os campos derivados para as diversas fases do ciclo de vida do vórtice ciclônico apresentaram-se da seguinte forma:

- (a) quatro dias que precederam a formação do vórtice (dia 13)
 - na alta troposfera sobre o NEB: vorticidade ciclônica, adveccão de vorticidade anticiclônica, adveccão fria;
 - na alta troposfera sobre o Chaco: vorticidade anticiclônica, adveccão de vorticidade anticiclônica;
 - na baixa troposfera sobre o NEB: convergência de umidade, divergência de massa;
- (b) entre o primeiro e o penúltimo dia do vórtice (dia 17)
 - na alta troposfera sobre o NEB: vorticidade ciclônica, adveccão de vorticidade anticiclônica, adveccão fria, convergência de massa;
 - na alta troposfera sobre o Chaco: vorticidade anticiclônica, adveccão de vorticidade anticiclônica;

- na baixa troposfera sobre o NEB: convergência de umidade;
- (c) após o último dia do vórtice (dia 18)
- na alta troposfera sobre o NEB: vorticidade ciclônica, porém diminuindo (em valor absoluto) gradativamente, advecção de vorticidade anticiclônica, advecção quente, convergência de massa;
 - na alta troposfera sobre o Chaco: vorticidade anticiclônica, porém diminuindo de intensidade gradativamente, advecção de vorticidade ciclônica a oeste da América do Sul;
 - na baixa troposfera sobre o NEB: divergência de umidade, divergência de massa;

Neste caso foi possível diagnosticar a circulação do anticiclone da Bolívia, bem como a de um sistema frontal que penetrou na Bahia. Além disso, as imagens mostram claramente que precedendo a formação do vórtice houve intensificação na nebulosidade sobre a região Amazônica, resultado da interação com o sistema frontal que penetrou no NEB.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

Os resultados obtidos nesta pesquisa aliados à prática de 11 anos de trabalho em centros de previsão do tempo do DNMET permitem apresentar as seguintes conclusões:

- 1 - a presença de convecção intensa na área do anticiclone da Bolívia bem como a penetração de um sistema frontal no NEB são fundamentais para a formação do sistema;
- 2 - a posição e a intensidade (estabilidade) da corrente de jato subtropical sobre a América do Sul influenciam a formação e manutenção do sistema; em particular, sua formação ocorre associada a episódios de bifurcação do jato;
- 3 - em geral, as cartas de vorticidade e advecção de vorticidade na alta e média troposfera, quando superpostas, dão o sentido do deslocamento do vórtice ciclônico;
- 4 - advecção de vorticidade ciclônica e advecção fria na média e alta troposfera aliadas à convergência de umidade e de massa na baixa troposfera estão presentes durante o tempo de vida dos ciclones.

Os resultados acima permitem propor o seguinte modelo sinótico para a formação e desenvolvimento do vórtice ciclônico de ar superior sobre o NEB:

Fase I

Precedendo a formação do vórtice, o anticiclone da Bolívia, com intensa atividade convectiva, interage com a corrente de jato (e o sistema frontal), dando origem a formação

de um cavado em 200 hPa. Sobre a região do cavado o campo de advecção de vorticidade e advecção de temperatura é negativo em 200 hPa e o campo de divergência de umidade é negativo em 700 hPa (Fig. 5.1a).

Fase II

A convecção na área do anticiclone da Bolívia persista intenso e a corrente de jato se bifurca dando origem a formação do vórtice. Os campos de advecção de vorticidade e temperatura em 200 hPa, bem como o campo de divergência de umidade em 700 hPa mantém os mesmos sinais da fase anterior, com um aumento de intensidade no campo de advecção de temperatura (Fig. 5.1b).

Fase III

Nesta fase o anticiclone da Bolívia diminui de intensidade, a corrente de jato se desloca para sul, mas o vórtice ciclônico continua formado. Sobre a região de atuação do vórtice ciclônico os campos de advecção de vorticidade em 200 hPa e divergência de umidade em 700 hPa trocam de sinal, enquanto a advecção de temperatura em 200 hPa é fraca (Fig. 5.1c).

Fase IV

Finalmente, o escoamento passa a ser zonal, a corrente de jato está mais ao sul e sobre a região onde atuava o vórtice, os campos de vorticidade, advecção de vorticidade e advecção de temperatura em 200 hPa, bem como o campo de divergência de umidade em 700 hPa são positivos (Fig. 5.1d).

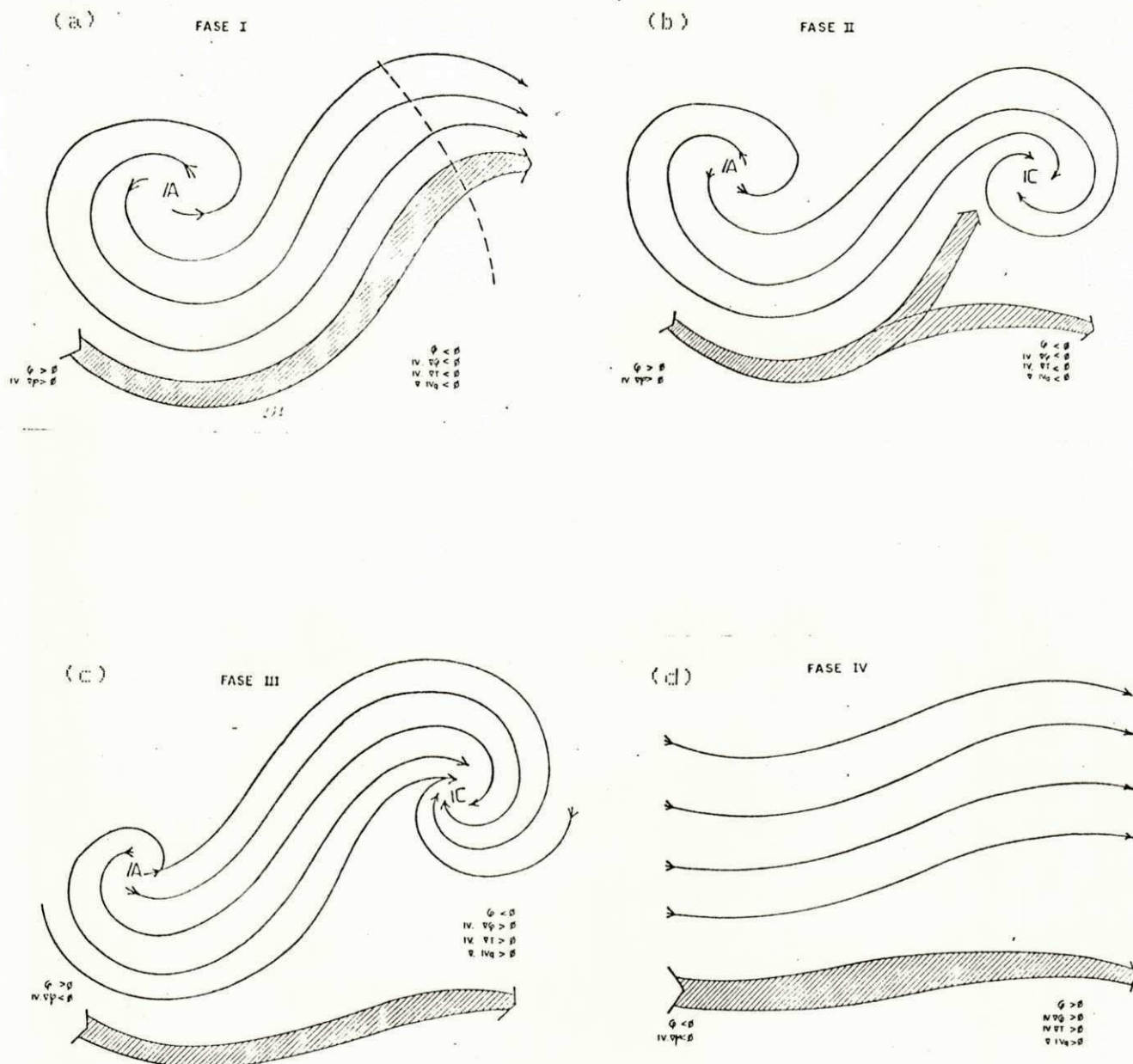


Fig. 5.1 - Representação esquemática das fases de desenvolvimento dos vórtices ciclônicos da alta troposfera que afetam o Nordeste do Brasil: (a) fase I, (b) fase II, (c) fase III e (d) fase IV.

5.2 Sugestões

Com base nos resultados deste trabalho são sugeridas as seguintes pesquisas:

- (a) diagnosticar um maior número de casos de ciclones da alta troposfera visando formar uma climatologia da estrutura desses sistemas, com ênfase na interrelação entre o anticiclone da Bolívia e o jato subtropical, em particular para episódios com bifurcação do jato;
- (b) realizar estudos de composição ("composites") a fim de identificar características típicas médias para vários estágios de desenvolvimento dos ciclones da alta troposfera;
- (c) aplicar a equação do balanço de vorticidade ao maior número possível de casos de vórtices ciclônicos da alta troposfera;
- (d) análise da temperatura potencial equivalente;
- (e) investigar a possível interrelação entre sistemas de circulação da troposfera superior no Atlântico Norte e os ciclones da alta troposfera no Nordeste do Brasil.

REFERÊNCIAS

- Aragão, J.O.R., 1975: Um estudo da estrutura das perturbações sinóticas no Nordeste do Brasil. Dissertação de mestrado, Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 51pp.
- Carlson, T.N., 1968: Structure of a steady-state cold low. *Mon. Wea. Rev.*, 96, 763-777.
- Cavalcanti, E.P. e Medeiros, R. M., 1988: Método objetivo para diagnóstico do tempo sobre o Nordeste do Brasil. Anais V Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro, Vol.2, pp.IX-26-30.
- Cavalcanti, I.F.A., 1986: Características meteorológicas associadas ao excesso de precipitação no Nordeste do Brasil em 1985. Anais I Congresso Interamericano de Meteorologia e IV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Brasília, Vol.2, pp.103.
- Chan, C.S., 1990: Análise de distúrbios ondulatórios de leste sobre o Oceano Atlântico Equatorial Sul. Dissertação de mestrado, Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 134 pp, Publ. INPE - 5222 - TDL/437.
- Davis, N.E., 1982: Meteosat water vapor channel and a low-latitude vortex. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 63, 747-750.
- Dean, G.A., 1971: The three-dimensional wind structure over South America and associated rainfall over Brazil. Department of Meteorology, Florida State University, Rep. LAFE-164.
- Erickson, C.O., 1971: Diagnostic study of a tropical disturbance. *Mon. Wea. Rev.*, 99, 67 - 78.

- Frank, N.L., 1970: On the nature of upper tropospheric cold core cyclones over the tropical Atlantic. Ph.D. dissertation, Florida State University, Tallahassee, 241pp.
- Gan, M.A. e Kousky, V.E., 1982: Um estudo observacional sobre as baixas da alta troposfera nas latitudes subtropicais do Atlântico Sul e leste do Brasil. Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Publ. INPE-2577-PRE/227.
- Kelley, W.E. e Mock, D.R., 1982: A diagnostic study of upper tropospheric cold lows over the western North Pacific. Mon. Wea. Rev., 110, 471-480.
- Kousky, V.E., 1979: Frontal Influencies over Northeast Brazil. Monthly Weather Review, 107, 1140 - 1153.
- Kousky, V.E. e Gan, M.A., 1981: Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. Tellus, 3, 538-551.
- Petterssen, S., 1956: Weather Analysis and Forecasting. McGraw-Hill, 2ª edição, 428 pp.
- Rao, V.B. e Bonatti, J.P., 1986: On the origin of upper tropospheric cyclonic vortices in the South Atlantic ocean and adjoining Brazil during the summer. Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Publ. INPE-4010-PRE/1002.
- Sadler, J.C., 1967 : The tropical upper tropospheric trough as a secondary source of typhoons and a primary source of tradewind disturbances. Rep. Nº 67-12, Hawaii Institute of Geophysics, University of Hawaii, Honolulu, 44pp.
- , 1975: The upper tropospheric circulation over the global tropics. Department of Meteorology, University of Hawaii, UHMET-75-05, 35pp.
- Serra, A., 1946: Meteorologia do Nordeste Brasileiro. IV

- Assembléia Geral do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE - Rio de Janeiro, 120p.
- Silva Dias, P.L. e Silva Dias, M.A.F., 1984: Um modelo diagnóstico de previsão de tempo para microcomputadores. Anais III Congresso Brasileiro de Meteorologia, Belo Horizonte, Vol.2, pp.153-158.
- , 1986: Uso de mensagens GRID em conjunto com dados convencionais para fins de análise objetiva e implicações na análise diagnóstica. Anais I Congresso Interamericano de Meteorologia e IV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Brasília, Vol.2, pp. 153-158.
- Silva, F.M. e Paz, R.S., 1988: Vórtice ciclônico da alta troposfera: Um caso no Nordeste do Brasil. Anais V Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro, Vol.2, pp. IX-11-15.
- Silva, F.M., Paz, D.A. e Paz, R.S., 1990: Vórtice ciclônico da alta troposfera: Um caso no Nordeste do Brasil. Fase II. Anais VI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Salvador, Vol. 2, pp. 554 - 559.
- Strang, D.M.G., 1972: Análise climatológica das normais pluviométricas do Nordeste Brasileiro. Centro Técnico Aeroespacial. Relatório Técnico IAE M-02/72,70p.
- , 1986: A brief upper air climatic atlas for South America. São José dos Campos. CTA/IAE,260p.
- Sutcliffe, R.C., 1947: A contribution to the problem of development. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 73, 370-383.
- Yamazaki, Y. e Rao, V.B., 1977: Tropical cloudiness over the South Atlantic Ocean. J. Meteor. Soc. Japan, 55, 205-207.