

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
MESTRADO EM METEOROLOGIA**

**DISTÚRBIOS DE LESTE: DIAGNÓSTICO E RELAÇÃO COM A
PRECIPITAÇÃO NO ESTADO DA PARAÍBA EM PERÍODOS DE
CONTRASTE**

ARTHUR CHAVES DE PAIVA NETO

CAMPINA GRANDE - PB

Junho de 2003 _____

ARTHUR CHAVES DE PAIVA NETO

**DISTÚRBIOS DE LESTE: DIAGNÓSTICO E RELAÇÃO COM A
PRECIPITAÇÃO NO ESTADO DA PARAÍBA EM PERÍODOS DE
CONTRASTE**

Dissertação apresentada ao Curso de
Mestrado em Meteorologia da
Universidade Federal de Campina
Grande em cumprimento às exigências
para a obtenção do Grau de Mestre em
Meteorologia

**Orientadoras: Maria Regina da Silva Aragão
Magaly de Fatima Correia**

Campina Grande – PB
Junho de 2003



P149d
2003

Paiva Neto, Arthur Chaves de

Distúrbios de Leste: diagnóstico e relação com a precipitação no Estado da Paraíba em períodos de contraste/Arthur Chaves de Paiva Neto._Campina Grande: UFCG, 2003.

107 p. : il.

Dissertação (Mestrado). UFCG/CCT

Inclui bibliografia

1. Distúrbios de Leste 2. Anomalias de TSM 3. Precipitação 4 Paraíba 5 Instabilidade Potencial 6 Divergência do Fluxo de Umidade I. Título

CDU: 551.51

ARTHUR CHAVES DE PAIVA NETO

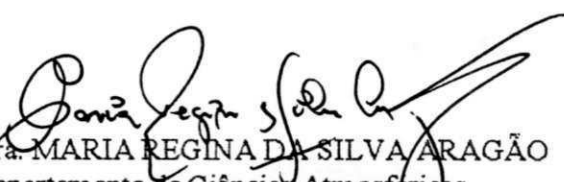
DISTÚRBIOS DE LESTE: DIAGNÓSTICO E RELAÇÃO COM A
PRECIPITAÇÃO NO ESTADO DA PARAÍBA EM PERÍODOS DE
CONTRASTE

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 13/6/2003

BANCA EXAMINADORA



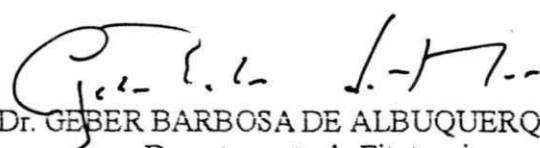
Profa. Dra. MAGALY DE FÁTIMA CORREIA
Departamento de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Profa. Dra. MARIA REGINA DA SILVA ARAGÃO
Departamento de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. JOSÉ IVALDO BARBOSA DE BRITO
Departamento de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. GEBER BARBOSA DE ALBUQUERQUE MOURA
Departamento de Fitotecnia
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Com todo o meu amor dedico este trabalho a
meus pais Heidinaldo (meu papai) Verônica (minha mamãe)
aos meus irmãos Ayanne (naninha) Auberê (Mói)
e ao meu cunhado Joel (el loco) e sobrinho Joel Lucas (Pavarotti)

*ofereço este trabalho com todo meu amor e carinho a minha namorada VÂNIA
ALVES DONATO que sempre me amou e apoiou nos momentos mais difíceis*

AGRADECIMENTOS

Especiais às professoras Dras. Maria Regina da Silva Aragão e Magaly de Fatima Correia pela orientação, incentivo e (imensa) paciência no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Geber Barbosa de Albuquerque Moura e José Ivaldo Barbosa de Brito pelas valiosas sugestões.

A Lincoln Muniz Alves pela ajuda indispensável na obtenção dos dados para a realização desta dissertação.

A todos os professores do Departamento de Ciências Atmosféricas e em especial a Enio Pereira de Souza pelo incentivo.

Ao LMRS-PB nas pessoas de Marli Bandeira, Petrônio Bezerra, Alexandre Magno e Carmem Becker pela grande ajuda no fornecimento de dados.

Aos funcionários do DCA Eyres Ventura e Divanete Rocha pela ajuda, paciência e companheirismo no decorrer do mestrado.

A todos os meus amigos, em especial a Hailton, Paula, Sheila, Luciene, Ranyere, Fábio, Tatiane, Wendell, Joseane, Betânia dentre tantos outros que sempre me apoiaram e ajudaram no decorrer da minha vida.

A CAPES pelo apoio financeiro, e ao Curso de Mestrado em Meteorologia da UFCG pela oportunidade e recursos.

RESUMO

Nesta pesquisa foi analisado o mês de junho dos anos de 1995, 1996, 1997 e 1999, meses contrastantes no campo das anomalias da temperatura da superfície do mar (TSM), dos oceanos Atlântico Tropical e Pacífico Equatorial, com o objetivo de: (a) identificar distúrbios de leste que atingiram o Nordeste do Brasil, (b) caracterizar suas estruturas dinâmica e termodinâmica e (c) avaliar sua contribuição para a precipitação no Estado da Paraíba.

As análises realizadas se basearam em totais diários de chuva da rede pluviométrica do Estado da Paraíba, imagens do satélite meteorológico METEOSAT e dados de variáveis meteorológicas e oceanográficas obtidas das reanálises dos National Centers for Environmental Prediction (NCEP).

Os resultados mostram que: (a) os distúrbios têm período médio de 5 dias e velocidade de propagação média de 9° de longitude por dia; (b) o número de distúrbios é significativamente menor em junho de 1997 (mês considerado seco no leste do Estado da Paraíba), um mês com fortes anomalias positivas de TSM no Pacífico Equatorial e anomalias negativas de TSM no Atlântico Sul; (c) convergência de umidade nos baixos níveis associada ao escoamento médio (alísios) parece explicar os totais pluviométricos acima da média em junho de 1995, mês com anomalias de TSM similares às de junho de 1996 no Pacífico (neutras) e Atlântico (positivas fracas); (d) os distúrbios afetam a estrutura termodinâmica da atmosfera provocando, em geral, aumento na umidade e na espessura da camada convectivamente instável, cuja magnitude depende das condições reinantes no ambiente por ocasião da chegada dos distúrbios.

ABSTRACT

This study analyzes June 1995, 1996, 1997 and 1999, contrasting months in terms of the SST anomaly fields, with the objective of: (a) to identify easterly disturbances that reached Northeast Brazil, (b) to characterize their dynamical and thermodynamical structures and (c) to evaluate their contribution to the rainfall totals in Paraíba State.

The analyses were based on daily rainfall totals collected by the raingauge network of Paraíba State, Meteosat satellite images, sea surface temperature anomalies, and meteorological data from NCEP reanalyses.

Results show that: (a) the disturbances have mean period of 5 days and mean propagation speed of 9° of longitude per day; (b) the number of disturbances is significantly smaller in June 1997 (a dry month in eastern Paraíba State), a month with strong positive SST anomalies in the Equatorial Pacific and negative SST anomalies in the Atlantic; (c) low-level moisture convergence associated with the mean flow (trade winds) seems to explain the above normal rainfall totals in June 1995, a month with SST anomalies similar to the anomalies of June 1996 in the Pacific (neutral) and Atlantic (small positive); (d) the disturbances change the thermodynamic structure of the atmosphere by causing, in general, an increase in the atmospheric moisture content and in the thickness of the convectively unstable layer, whose magnitudes depend on the ambient conditions at the time of the disturbances' arrival.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS E VARIÁVEIS	xviii
LISTA DE ABREVIATURAS	xix
 CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	 01
 CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	 07
 CAPÍTULO 3 – DADOS E METODOLOGIA	 22
3.1 – Dados	22
3.2 – Metodologia	24
3.2.1 – Identificação dos distúrbios de leste	25
3.2.2 – Escolha dos Meses de Estudo	26
3.2.2.1 – Análise dos Meses Selecionados	27
3.2.3 – Estudo de Caso	30

CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DOS MESES SELECIONADOS	31
4.1 – Junho de 1995	31
4.1.1 – Anomalias de Grande Escala	31
4.1.1.1 – Temperatura da superfície do mar	31
4.1.1.2 – Pressão reduzida ao nível médio do mar	32
4.1.2 – Precipitação no Estado da Paraíba	32
4.1.3 – Identificação e Propriedades dos Distúrbios	35
4.1.4 – Evolução Temporal de Variáveis Atmosféricas no Litoral do Estado da Paraíba	38
4.2 – Junho de 1996	45
4.2.1 – Anomalias de Grande Escala	45
4.2.1.1 – Temperatura da superfície do mar	45
4.2.1.2 – Pressão reduzida ao nível médio do mar	45
4.2.2 – Precipitação no Estado da Paraíba	47
4.2.3 – Identificação e Propriedades dos Distúrbios	47
4.2.4 – Evolução Temporal de Variáveis Atmosféricas no Litoral do Estado da Paraíba	52
4.3 – Junho de 1997	59
4.3.1 – Anomalias de Grande Escala	59
4.3.1.1 – Temperatura da superfície do mar	59
4.3.1.2 – Pressão reduzida ao nível médio do mar	59
4.3.2 – Precipitação no Estado da Paraíba	61
4.3.3 – Identificação e Propriedades dos Distúrbios	61
4.3.4 – Evolução Temporal de Variáveis Atmosféricas no Litoral do Estado da Paraíba	65
4.4 – Junho de 1999	71
4.4.1 – Anomalias de Grande Escala	71
4.4.1.1 – Temperatura da superfície do mar	71
4.4.1.2 – Pressão reduzida ao nível médio do mar	71
4.4.2 – Precipitação no Estado da Paraíba	73
4.4.3 – Identificação e Propriedades dos Distúrbios	73
4.4.4 – Evolução Temporal de Variáveis Atmosféricas no Litoral do Estado da Paraíba	76

CAPÍTULO 5 – ESTUDO DE CASO	83
5.1 – O Distúrbio	83
5.2 – Diagnóstico da Atmosfera	84
5.2.1 – Vorticidade Relativa	84
5.2.2 – Linhas de Corrente e Magnitude do Vento	86
5.2.3 – Divergência do Fluxo de Umidade	88
5.2.4 – Nebulosidade	90
5.2.5 – Precipitação	94
5.3 – Considerações Finais	97
 CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES	 98
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 100

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	Pg.
Figura 1.1 – Mapa do relevo da Região Nordeste do Brasil (<i>Fonte: Adaptado de SIMIELLI, 1991</i>)	02
Figura 1.2 – Área aproximada dos domínios morfoclimáticos do Nordeste (a) e Divisão Clássica do Nordeste (b). (<i>Fonte: Arbex Jr. & Olic, 1999</i>)	04
Figura 1.3 – Mesorregiões do Estado da Paraíba (<i>Fonte: IBGE – Divisão Territorial – 1990</i>)	06
Figura 1.4 – Mapa do relevo do Estado da Paraíba	06
Figura 2.1 - Áreas de propagação dos distúrbios leste. (<i>Fonte: Yamazaki & Rao, 1977</i>)	07
Figura 3.1 – Distribuição dos postos da rede pluviométrica do Estado da Paraíba.	23
Figura 4.1 – Anomalias da temperatura da superfície do mar em junho de 1995. O intervalo de análise é de 1°C. As áreas sombreadas mais claras (escuras) assinalam anomalias negativas (positivas). (<i>Fonte dos dados: NCEP/NCAR</i>)	33
Figura 4.2 – Desvios da pressão reduzida ao nível médio do mar em junho de 1995. O intervalo de análise é de 0,5 hPa (<i>Fonte dos dados: NCEP/NCAR</i>)	33
Figura 4.3 – Precipitação acumulada (mm) em junho de 1995 no Estado da Paraíba (<i>Fonte dos dados: LMRS-PB</i>). O intervalo de análise é de 20 mm.	34
Figura 4.4 – Desvios de precipitação com relação à climatologia (%) para junho de 1995 no Estado da Paraíba (<i>Fonte dos dados: LMRS-PB</i>). O intervalo de análise é de 10 (-10) mm. As linhas espessas (finas) representam desvios positivos (negativos).	34
Figura 4.5 – Diagrama tempo-longitude da vorticidade relativa ($10^{-5}s^{-1}$) em 700 hPa e latitude de 7°S em junho de 1995. As áreas sombreadas assinalam vorticidade ciclônica (<i>Fonte dos dados: NCEP/NCAR</i>)	37
Figura 4.6 – Diagrama tempo-longitude do vento meridional (m/s) em 700 hPa e latitude de 7°S em junho de 1995. As áreas sombreadas assinalam vento de sul (<i>Fonte dos dados: NCEP/NCAR</i>)	37
Figura 4.7 – Série temporal da vorticidade relativa ($10^{-5}s^{-1}$) na vertical do ponto de coordenadas (7°S, 35°W) em junho de 1995 (<i>Fonte dos dados: NCEP/NCAR</i>)	39

Figura 4.8 – Série temporal da componente meridional do vento (ms^{-1}) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1995 (<i>Fonte dos dados: NCEP/NCAR</i>)	39
Figura 4.9 – Série temporal da divergência do fluxo de umidade ($10^{-5}\text{gkg}^{-1}\text{s}^{-1}$) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1995 (<i>Fonte dos dados: NCEP/NCAR</i>)	41
Figura 4.10 – Série temporal da razão de mistura (g/kg) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1995 (<i>Fonte dos dados: NCEP/NCAR</i>)	41
Figura 4.11 – Série temporal do movimento vertical (10^{-2}Pas^{-1}) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1995 (<i>Fonte dos dados: NCEP/NCAR</i>)	43
Figura 4.12 – Série temporal da temperatura potencial equivalente (K) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1995 (<i>Fonte dos dados: NCEP/NCAR</i>)	43
Figura 4.13 – Série temporal dos totais pluviométricos diários observados em João Pessoa – PB ($7,08^{\circ}\text{S}$; $34,83^{\circ}\text{W}$) em junho de 1995 (<i>Fonte dos dados: LMRS-PB</i>)	44
Figura 4.14 – Anomalias da temperatura da superfície do mar em junho de 1996. O intervalo de análise é de $0,5^{\circ}\text{C}$. As áreas sombreadas mais claras (escuras) assinalam anomalias negativas (positivas). (<i>Fonte dos dados: NCEP/NCAR</i>)	46
Figura 4.15 – Desvios da pressão reduzida ao nível médio do mar em junho de 1996. O intervalo de análise é de $0,5\text{ hPa}$. (<i>Fonte dos dados: NCEP/NCAR</i>)	46
Figura 4.16 – Precipitação acumulada (mm) em junho de 1996 no Estado da Paraíba (<i>Fonte dos dados: LMRS-PB</i>). O intervalo de análise é de 20 mm .	48
Figura 4.17 – Desvios de precipitação com relação à climatologia (%) para junho de 1996 no Estado da Paraíba (<i>Fonte dos dados: LMRS-PB</i>). O intervalo de análise é de 10 (-10) mm . As linhas espessas (finas) representam desvios positivos (negativos).	48
Figura 4.18 – Diagrama tempo-longitude da vorticidade relativa (10^{-5}s^{-1}) em 700 hPa e latitude de 7°S em junho de 1996. As áreas sombreadas assinalam vorticidade ciclônica (<i>Fonte dos dados: NCEP/NCAR</i>)	49
Figura 4.19 – Diagrama tempo-longitude do vento meridional (m/s) em 700 hPa e latitude de 7°S em junho de 1996. As áreas sombreadas assinalam vento de sul (<i>Fonte dos dados: NCEP/NCAR</i>)	49
Figura 4.20 Série temporal da vorticidade relativa (10^{-5}s^{-1}) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1996 (<i>Fonte dos dados: NCEP/NCAR</i>)	53
Figura 4.21 Série temporal da componente meridional do vento (ms^{-1}) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1996 (<i>Fonte dos dados: NCEP/NCAR</i>)	53

- Figura 4.22 – Série temporal da divergência do fluxo de umidade ($10^{-5} \text{gkg}^{-1} \text{s}^{-1}$) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1996 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*) 55
- Figura 4.23 – Série temporal da razão de mistura (g/kg) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1996 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*) 55
- Figura 4.24 – Série temporal do movimento vertical (10^{-2}Pas^{-1}) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1996 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*) 56
- Figura 4.25 – Série temporal da temperatura potencial equivalente (K) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1996 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*) 56
- Figura 4.26 – Série temporal dos totais pluviométricos diários observados em João Pessoa – PB ($7,08^{\circ}\text{S}$; $34,83^{\circ}\text{W}$) em junho de 1996 (*Fonte dos dados: LMRS-PB*) 58
- Figura 4.27 – Anomalias da temperatura da superfície do mar em junho de 1997. O intervalo de análise é de $0,5^{\circ}\text{C}$. As áreas sombreadas mais claras (escuras) assinalam anomalias negativas (positivas). (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*) 60
- Figura 4.28 – Desvios da pressão reduzida ao nível médio do mar em junho de 1997. O intervalo de análise é de $0,5 \text{ hPa}$. (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*) 60
- Figura 4.29 – Precipitação acumulada (mm) em junho de 1997 no Estado da Paraíba (*Fonte dos dados: LMRS-PB*). O intervalo de análise é de 20 mm . 62
- Figura 4.30 – Desvios de precipitação com relação à climatologia (%) para junho de 1997 no Estado da Paraíba (*Fonte dos dados: LMRS-PB*). O intervalo de análise é de 10 (-10) mm . As linhas espessas (finas) representam desvios positivos (negativos). 62
- Figura 4.31 – Diagrama tempo-longitude da vorticidade relativa (10^{-5}s^{-1}) em 700 hPa e latitude de 7°S em junho de 1997. As áreas sombreadas assinalam vorticidade ciclônica (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*) 64
- Figura 4.32 – Diagrama tempo-longitude do vento meridional (m/s) em 700 hPa e latitude de 7°S em junho de 1997. As áreas sombreadas assinalam vento de sul (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*) 64
- Figura 4.33 Série temporal da vorticidade relativa (10^{-5}s^{-1}) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1997 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*) 66
- Figura 4.34 Série temporal da componente meridional do vento (ms^{-1}) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1997 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*) 66
- Figura 4.35 – Série temporal da divergência do fluxo de umidade ($10^{-5} \text{gkg}^{-1} \text{s}^{-1}$) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1997 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*) 67

- Figura 4.36 – Série temporal da razão de mistura (g/kg) na vertical do ponto de coordenadas (7°S, 35°W) em junho de 1997 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*) 67
- Figura 4.37 – Série temporal do movimento vertical (10^{-2}Pas^{-1}) na vertical do ponto de coordenadas (7°S, 35°W) em junho de 1997 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*) 69
- Figura 4.38 – Série temporal da temperatura potencial equivalente (K) na vertical do ponto de coordenadas (7°S, 35°W) em junho de 1997 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*) 69
- Figura 4.39 – Série temporal dos totais pluviométricos diários observados em João Pessoa – PB (7,08°S; 34,83°W) em junho de 1997 (*Fonte dos dados: LMRS-PB*) 70
- Figura 4.40 – Anomalias da temperatura da superfície do mar em junho de 1999. O intervalo de análise é de 0,5°C. As áreas sombreadas mais claras (escuras) assinalam anomalias negativas (positivas). (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*) 72
- Figura 4.41 – Desvios da pressão reduzida ao nível médio do mar em junho de 1999. O intervalo de análise é de 0,5 hPa. (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*) 72
- Figura 4.42 – Precipitação acumulada (mm) em junho de 1995 no Estado da Paraíba (*Fonte dos dados: LMRS-PB*). O intervalo de análise é de 20 mm. 74
- Figura 4.43 – Desvios de precipitação com relação à climatologia (%) para junho de 1995 no Estado da Paraíba (*Fonte dos dados: LMRS-PB*). O intervalo de análise é de 10 (-10) mm. As linhas espessas (finas) representam desvios positivos (negativos). 74
- Figura 4.44 – Diagrama tempo-longitude da vorticidade relativa (10^{-5}s^{-1}) em 700 hPa e latitude de 7°S em junho de 1999. As áreas sombreadas assinalam vorticidade ciclônica (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*) 75
- Figura 4.45 – Diagrama tempo-longitude do vento meridional (m/s) em 700 hPa e latitude de 7°S em junho de 1999. As áreas sombreadas assinalam vento de sul (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*) 75
- Figura 4.46 Série temporal da vorticidade relativa (10^{-5}s^{-1}) na vertical do ponto de coordenadas (7°S, 35°W) em junho de 1999 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*) 78
- Figura 4.47 Série temporal da componente meridional do vento (ms^{-1}) na vertical do ponto de coordenadas (7°S, 35°W) em junho de 1999 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*) 78
- Figura 4.48 – Série temporal da divergência do fluxo de umidade ($10^{-5}\text{gkg}^{-1}\text{s}^{-1}$) na vertical do ponto de coordenadas (7°S, 35°W) em junho de 1999 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*) 80
- Figura 4.49 – Série temporal da razão de mistura (g/kg) na vertical do ponto de coordenadas (7°S, 35°W) em junho de 1999 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*) 80

- Figura 4.50 – Série temporal do movimento vertical (10^{-2}Pas^{-1}) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1999 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*) 81
- Figura 4.51 – Série temporal da temperatura potencial equivalente (K) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1999 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*) 81
- Figura 4.52 – Série temporal dos totais pluviométricos diários observados em João Pessoa – PB ($7,08^{\circ}\text{S}$; $34,83^{\circ}\text{W}$) em junho de 1999 (*Fonte dos dados: LMRS-PB*) 82
- Figura 5.1 – Análises do campo da vorticidade relativa em 700 hPa às 00 UTC dos seguintes dias de junho de 1995: (a) 01, (b) 02, (c) 03, (d) 04, (e) 05 e (f) 06. O intervalo de análise é de 1×10^{-5} *Fonte: NCEP/NCAR* 85
- Figura 5.2 – Análises do campo do vento (linhas de corrente e magnitude) em 700 hPa às 00 UTC dos seguintes dias de junho de 1995: (a) 01, (b) 02, (c) 03, (d) 04, (e) 05 e (f) 06. As áreas sombreadas claras (escuras) correspondem a intensidades acima de 10 m/s (20 m/s). (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*) 87
- Figura 5.3 – Análises da divergência do fluxo de umidade no nível de 1000 hPa às 00 UTC dos seguintes dias de junho de 1995: (a) 01, (b) 02, (c) 03, (d) 04, (e) 05 e (f) 06. O intervalo de análise é de $10 \times 10^{-5} \text{gkg}^{-1}\text{s}^{-1}$ (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*). 89
- Figura 5.4 – Imagens no canal visível do satélite Meteosat para as 12 UTC dos seguintes dias de junho de 1995: (a) 01, (b) 02, (c) 03, (d) 04, (e) 05 e (f) 06. A flecha assinala a nebulosidade associada ao distúrbio de leste. (*Fonte: EUMETSAT*) 91
- Figura 5.5 – Precipitação observada (mm) no Estado da Paraíba para os seguintes dias de junho de 1995: (a) 01, (b) 02, (c) 03, (d) 04, (e) 05 e (f) 06. O intervalo de análise é de 5 mm. (*Fonte dos dados: LMRS-PB*) 95

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Características dos distúrbios observados no diagrama da vorticidade relativa do mês de junho de 1995	36
Tabela 4.2 – Características dos distúrbios observados no diagrama da componente meridional do vento do mês de junho de 1995	36
Tabela 4.3 – Características dos distúrbios observados no diagrama da vorticidade relativa do mês de junho de 1996	51
Tabela 4.4 – Características dos distúrbios observados no diagrama da componente meridional do vento do mês de junho de 1996	51
Tabela 4.5 – Características dos distúrbios observados no diagrama da componente meridional do vento do mês de junho de 1999	76

LISTA DE SÍMBOLOS E VARIÁVEIS

r	Razão de Mistura
P	Pressão
θ	Temperatura Potencial
e	Pressão do Vapor d'água
T_k	Temperatura em Kelvin
UR	Umidade Relativa
e_s	Pressão do Vapor d'água à Saturação
T	Temperatura em Celsius
θ_e	Temperatura Potencial Equivalente
TL	Temperatura no Nível de Condensação por Levantamento

LISTA DE ABREVIATURAS

ATL	→	Atlântico Tropical Leste
ATN	→	Atlântico Tropical Norte
ATS	→	Atlântico Tropical Sul
CAPE	→	Convective Available Potential Energy
CNRM	→	Centre National de Recherches Météorologiques
DCA	→	Departamento de Ciências Atmosféricas
DJF	→	Dezembro-Janeiro-Fevereiro
ECMWF	→	European Centre for Medium Range and Weather Forecasts
EUMETSAT	→	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
FGGE	→	First GARP Global Experiment
GARP	→	Global Atmospheric Research Program
GATE	→	GARP Atlantic Tropical Experiment
GCM	→	Modelo de Circulação Geral
HN	→	Hemisfério Norte
JJA	→	Junho-Julho-Agosto
LMRS-PB	→	Laboratório de Meteorologia Recursos hídricos e Sensoriamento remoto da Paraíba
MAM	→	Março-Abril-Maio
NCAR	→	National Center for Atmospheric Research
NCEP	→	National Centers for Environmental Prediction
PTO	→	Pacífico Tropical Oeste

PTL	→	Pacífico Tropical Leste
ROL	→	Radiação de Onda Longa
SON	→	Setembro-Outubro-Novembro
SUDENE	→	Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste
UFCG	→	Universidade Federal de Campina Grande
UTC	→	Universal Coordinated Time
VCAS	→	Vórtice Ciclônico de Ar Superior

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O Nordeste ocupa uma área de 1.644.000 km², que corresponde a 18,26% da área total do País; todo este extenso território encontra-se, aproximadamente, entre os meridianos de 34° e 48° oeste e entre os paralelos de 1° e 18° sul (Fig. 1.1).

O Nordeste é, sob o ponto de vista fisiográfico, uma região heterogênea principalmente com relação a sua cobertura vegetal apresentando classes ou tipos tão distintos quanto a floresta tropical (Maranhão) e a caatinga (centro da região). Seu relevo é constituído por vastas planícies (baixadas litorâneas) e por vales baixos (altitudes menores que 500 m) rodeados por elevações que variam de 600 m (Borborema, Araripe, Ipiapaba) a 1200 m (Diamantina) como pode ser visto na Figura 1.1. O Nordeste possui duas bacias hidrográficas principais: a do São Francisco e a do Parnaíba. Há ainda outros rios importantes fora das duas bacias, como o Grajaú e Mearim, Jaguaribe e Paraíba do Norte (Fig. 1.1), etc. Sob o aspecto morfoclimático (aspectos naturais de uma determinada

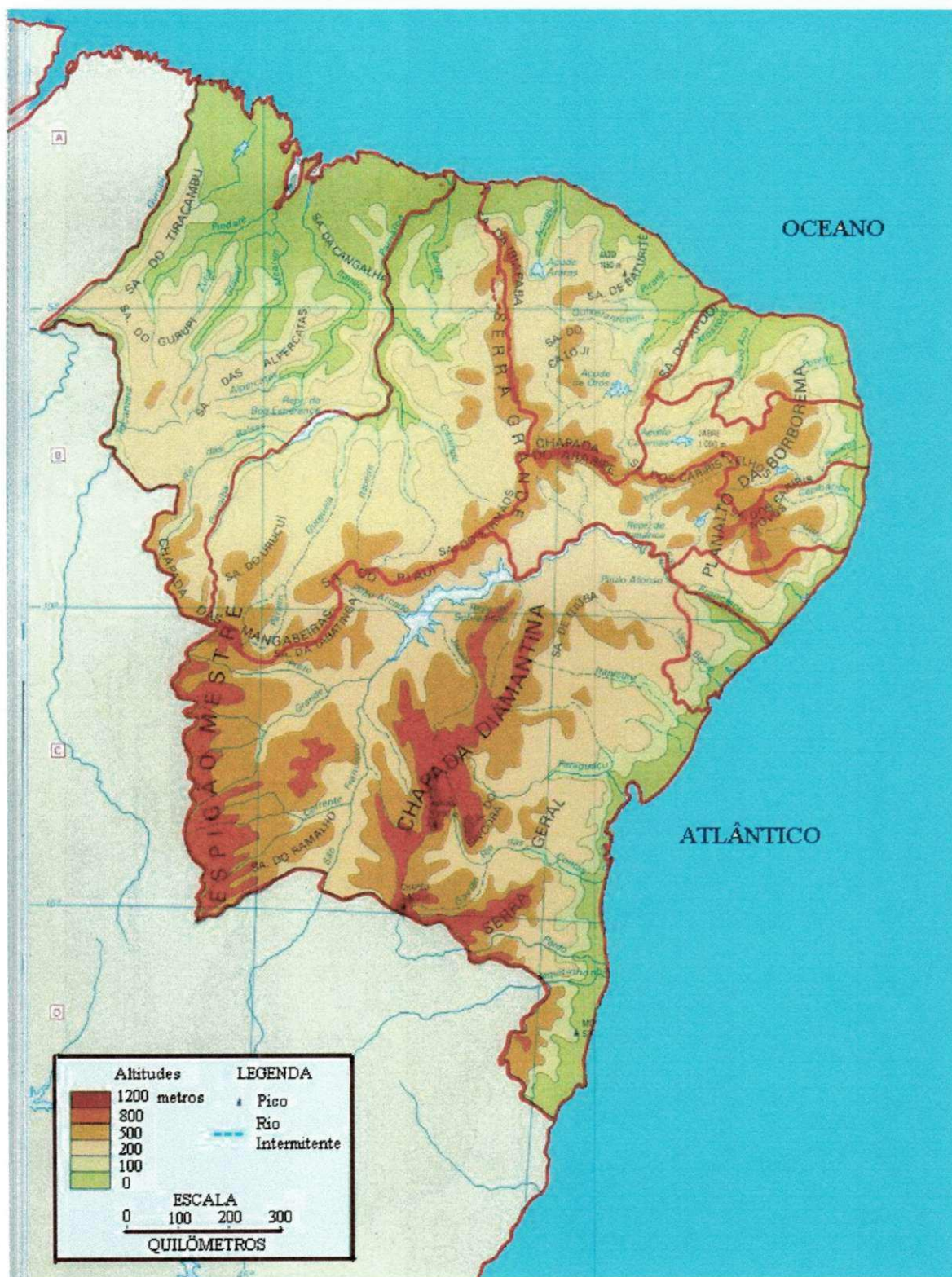


Figura 1.1 – Mapa do relevo da Região Nordeste do Brasil (Fonte: Adaptado de SIMIELLI, 1991)

região) a Região Nordeste é dividida em 4 “domínios principais”: o amazônico (terras baixas e florestas equatoriais), o cerrado, a caatinga (depressões e planaltos semi-áridos) e os mares de morros (Fig. 1.2a). Entretanto, a área nordestina é tradicionalmente dividida em unidades sub-regionais: meio-norte, sertão, agreste e zona da mata (Fig. 1.2b). O meio-norte compreende a faixa de transição entre o sertão semi-árido do Nordeste e a região Amazônica. A vegetação natural dessa área é a mata de cocais. A zona da mata estende-se do estado do Rio Grande do Norte ao sul da Bahia, numa faixa litorânea de até 200 quilômetros de largura. O clima é tropical úmido e o solo é fértil devido à maior incidência de chuvas. A vegetação natural é a Mata Atlântica, praticamente extinta e substituída por lavouras de cana-de-açúcar. O agreste é a área de transição entre a zona da mata, região subúmida e cheia de brejos, e o sertão semi-árido. Já o sertão, uma extensa área de clima semi-árido, chega até o litoral nos estados do Rio Grande do Norte e Ceará. As atividades agrícolas sofrem grande limitação, pois os solos do sertão são pedregosos e, as chuvas, escassas e mal distribuídas. A vegetação típica é a caatinga.

Muitas atividades econômicas do Nordeste (agropecuária, principalmente) são duramente afetadas pela distribuição e irregularidade da precipitação, cujo comportamento é decorrente de um conjunto de fatores. As características fisiográficas discutidas acima constituem um dos fatores determinantes da natureza das chuvas regionais. Fenômenos transientes de caráter puramente dinâmico também são responsáveis pela grande variabilidade temporal e espacial das chuvas no Nordeste do Brasil. Dentre os principais mecanismos de grande escala encontram-se os sistemas frontais (Serra, 1941; Kousky, 1979), a zona de convergência intertropical (Hastenrath & Heller, 1977; Uvo, 1989), os vórtices ciclônicos de ar superior (Aragão, 1975; Virgi, 1981; Kousky & Gan, 1981), e os distúrbios ondulatórios no campo dos alísios (Chan, 1990; Espinoza, 1996).

Sistemas convectivos resultantes de efeitos orográficos e da circulação de brisa marítima e terrestre constituem fenômenos de mesoescala responsáveis por chuvas locais.

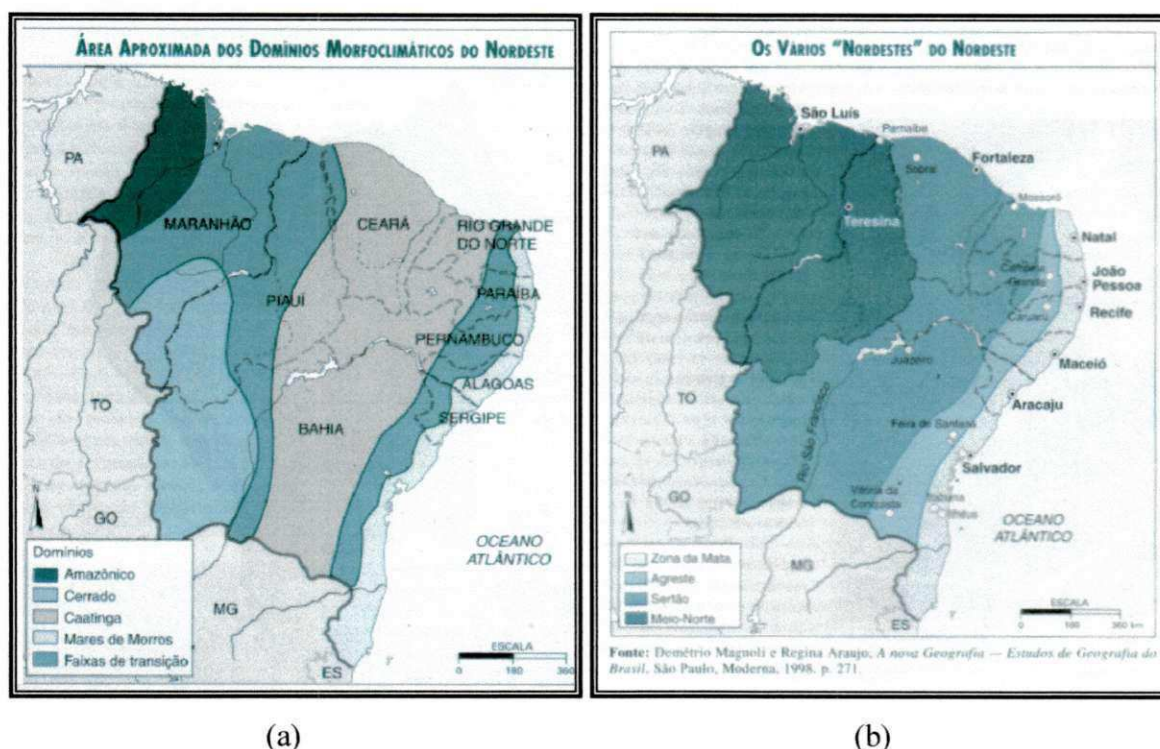


Figura 1.2 – Área aproximada dos domínios morfoclimáticos do Nordeste (a) e Divisão Clássica do Nordeste (b). (Fonte: Arbex Jr. & Olic, 1999)

Como pode-se ver acima o Nordeste está sob influência de uma miríade de fenômenos e escalas que afetam toda a economia da região seja diretamente, como na agricultura, ou indiretamente, como no comércio. Além disso, enchentes e deslizamentos de terra provocados por eventos extremos como o ocorrido em 31 de julho de 2000, em Recife, (Bezerra, 2002) podem resultar em perigo de vida e sérios prejuízos econômicos para os habitantes de grandes centros urbanos desta região.

Dentre os fenômenos atmosféricos que influenciam o Nordeste os distúrbios ondulatórios de leste estão entre os menos estudados devido, possivelmente, a sua natureza

complexa e à ausência dos dados necessários para um estudo adequado. Estes distúrbios são diretamente responsáveis por um percentual considerável da precipitação que ocorre no trimestre chuvoso do leste do Nordeste (maio a julho), influenciando a vida de aproximadamente 16 milhões de pessoas. Levando-se em conta que grande parte do PIB nordestino provém da cultura da cana-de-açúcar e das indústrias instaladas nas grandes cidades da zona da mata e agreste, atividades essas que dependem da disponibilidade de água, pode-se concluir que a atuação dos distúrbios afeta significativamente a economia nordestina.

Neste estudo investigou-se a atuação de distúrbios de leste no Estado da Paraíba (Fig. 1.3) considerando episódios significativos registrados em meses contrastantes sob o ponto de vista climático. O Estado da Paraíba pode ser dividido em quatro mesorregiões (Fig. 1.3) das quais a Borborema coincide com os maiores níveis topográficos (Fig. 1.4); e o leste do Estado apresenta as menores cotas e os maiores totais pluviométricos.

As análises realizadas permitem avaliar mudanças na estrutura termodinâmica e dinâmica da atmosfera resultantes da atuação do sistema e relacionar esses efeitos com a precipitação observada. Considerando esse objetivo, o Capítulo 2 contém uma revisão detalhada dos trabalhos realizados sobre distúrbios ondulatórios de leste. No Capítulo 3 há uma breve discussão sobre os dados e a metodologia aplicada neste trabalho. Nos Capítulos 4 e 5 discute-se os resultados obtidos da análise dos distúrbios que atingiram a Paraíba nos meses selecionados e, finalmente, no Capítulo 6 apresenta-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

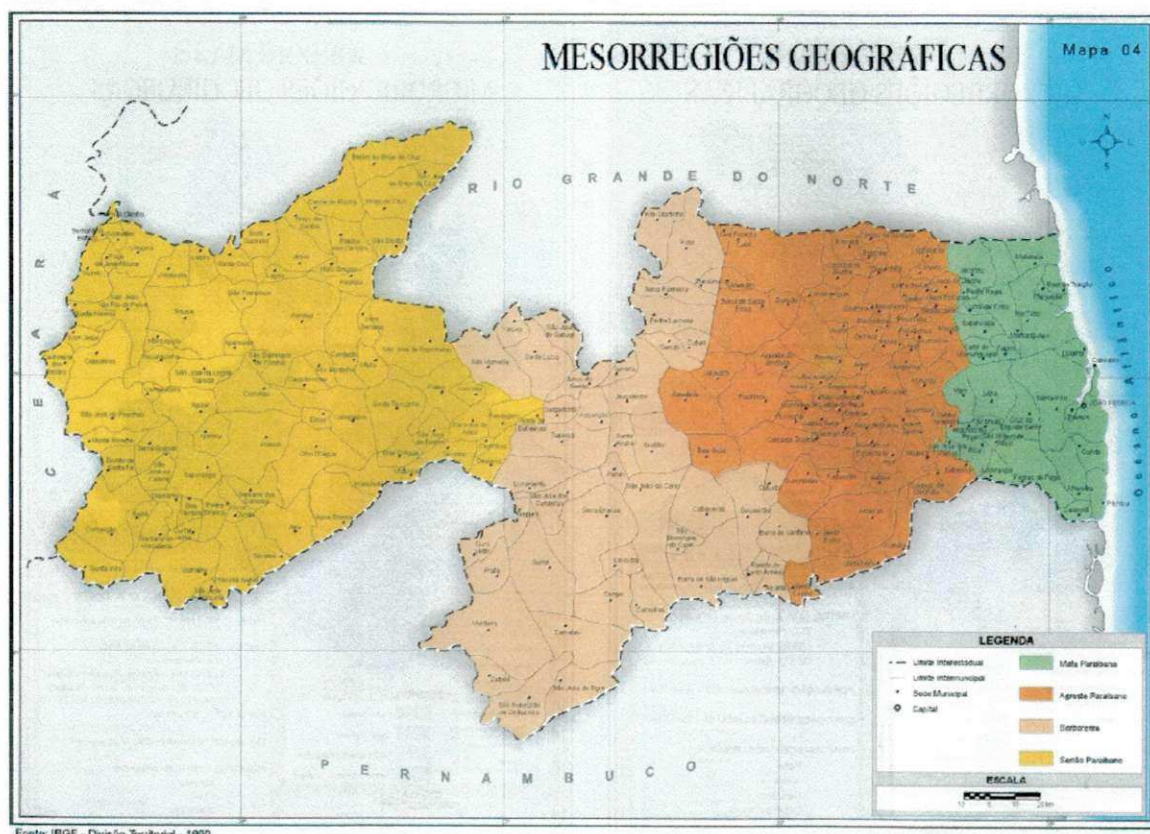


Figura 1.3 – Mesorregiões do Estado da Paraíba (Fonte: IBGE – Divisão Territorial – 1990)

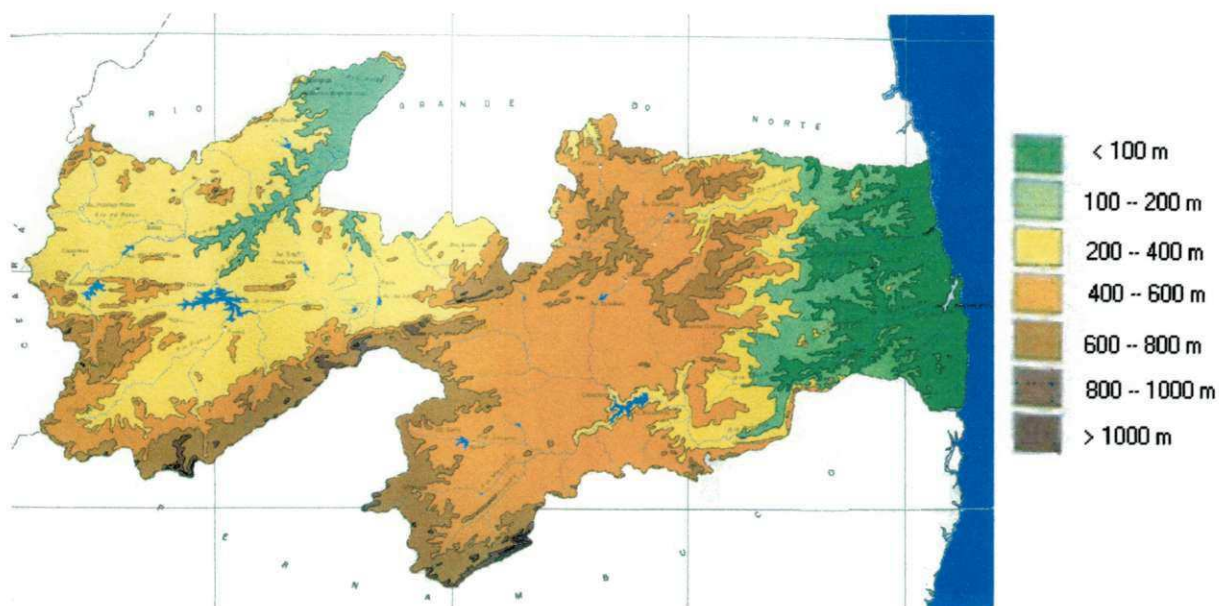


Figura 1.4 – Mapa do relevo do Estado da Paraíba

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os distúrbios ondulatórios de leste ocorrem em algumas regiões tropicais do globo (Fig. 2.1) notadamente no Atlântico Tropical Sul (ATS), no Atlântico Tropical Norte (ATN), Pacífico Tropical Oeste (PTO) e Leste (PTL), e no noroeste da África. A região do ATS na qual se propagam os distúrbios que atingem o Nordeste é a menos estudada.

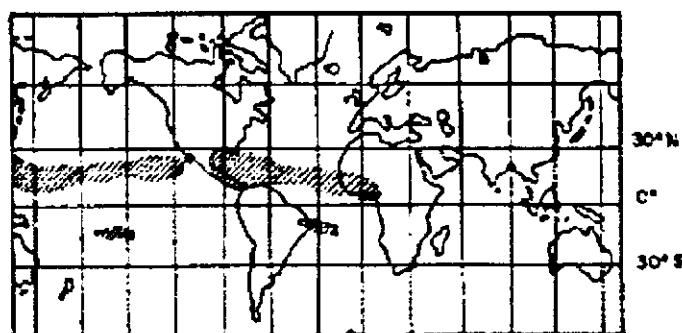


Figura 2.1 – Áreas de propagação dos distúrbios de leste. (Fonte: Yamazaki & Rao, 1977)

É interessante observar que há duas regiões distintas de propagação destes distúrbios no oceano Atlântico: uma no ATN e outra no ATS. Apesar de centrados em latitudes distintas, os distúrbios ocorrem com maior amplitude na mesma época do ano nessas duas regiões, ou seja, junho, julho e agosto. Dentre os trabalhos focados no Atlântico, poucos são aqueles diretamente relacionados com os distúrbios que atingem o Nordeste do Brasil.

Os primeiros autores a diagnosticar distúrbios de leste foram Visser (1925) no Pacífico, Regula (1936) na África e Dunn (1940) na região do Caribe. Desde então, muitas pesquisas foram desenvolvidas sobre tais distúrbios, com várias metodologias aplicadas a diversas regiões. Dentre todas estas metodologias, as que foram usadas com maior frequência foram as de modelagem, análises espectral e de composição além de análises diagnósticas. A maioria das pesquisas concentrou-se em analisar a energia da onda e suas fontes, estudar sua estrutura e verificar a capacidade dos vários modelos existentes de simulá-las adequadamente.

Trabalhos que envolvem a energética das ondas têm como objetivo geral identificar as fontes de energia para sua origem e manutenção e as trocas de energia envolvidas. As conclusões de alguns desses trabalhos são apresentadas a seguir.

A origem das ondas foi estudada por Rennick (1976) que mostrou que elas ocorrem devido à transferência de energia cinética do escoamento médio zonal como momentum de leste. Por outro lado, Mozer & Zender (1996) afirmaram que a produção de vorticidade a sotavento de extensas cadeias de montanhas na África é uma possível fonte instabilizadora do jato de leste e conseqüente geração de ondas.

A manutenção das ondas na área das ilhas Marshall no Pacífico foi enfocada por Nitta (1972). Ele verificou que os termos de energia potencial disponível turbulenta e de conversão de energia potencial disponível turbulenta para energia cinética desempenham o papel mais importante no balanço de energia das ondas. Na mesma linha de raciocínio, mas para o noroeste da África, Rennick (1976) mostrou que, na ausência de transporte horizontal de momentum, o transporte vertical de momentum não consegue manter nenhuma instabilidade. Kwon (1989), enfocando essa mesma região, também mostrou que a maior parte da energia cinética da onda mais instável é gerada por instabilidade barotrópica associada ao cisalhamento horizontal do jato do Saara centrado em 650 mb. Outro pesquisador que estudou a influência das instabilidades barotrópica e/ou baroclínica nas ondas no noroeste da África foi Chang (1993) que concluiu que a instabilidade baroclínica é responsável pela geração de energia cinética da perturbação.

Rennick (1976) verificou ainda que a onda mais instável suportada pelo jato de leste africano tem comprimento de onda de 3000 km, período de 2 - 2,5 dias e maior intensidade no nível de 700 mb, próximo a 14°N. Chang (1993), ao estudar o papel do ambiente desértico africano na origem dos distúrbios de leste, verificou que as condições térmicas no verão do Hemisfério Norte (HN) são mais favoráveis para o desenvolvimento de perturbações com comprimento de onda entre 1500 e 3000 km.

As ondas de leste estão diretamente relacionadas à organização e intensidade da precipitação em algumas regiões do globo, inclusive aquela associada a tempestades severas e furacões. Esse fato tem motivado pesquisadores a verificar se alguns modelos utilizados para simulação desses fenômenos conseguem fazê-lo com qualidade. Um desses pesquisadores foi Krishnamurti (1973), que desenvolveu um modelo de

equações primitivas de vários níveis com o objetivo de melhorar a previsão de ondas de leste sobre o Caribe. Krishnamurti provou com seu modelo que a previsão das variáveis de massa, movimento e umidade é possível para períodos de 2 a 3 dias. Reed et al. (1988) avaliaram a eficiência do modelo do European Centre for Medium Range and Weather Forecasts (ECMWF) na previsão de ondas de leste e de furacões desenvolvidos a partir delas. Eles verificaram que o modelo alcança esse objetivo, apesar de algumas limitações. Finalmente, Céron & Guérémy (1999) analisaram a capacidade do modelo de circulação geral (GCM) do Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) de simular adequadamente a variação espaço-temporal das ondas de leste. Observaram que, apesar de algumas discrepâncias, o modelo consegue simular bem o efeito das ondas no campo da vorticidade.

A grande maioria dos trabalhos sobre distúrbios de leste enfoca suas características estruturais e variação com o tempo, e sua influência nas diversas variáveis meteorológicas. Uma síntese desses trabalhos e seus resultados é dada a seguir.

Merrit (1964), utilizando imagens obtidas pelo satélite meteorológico Tiros N da área do Atlântico Norte entre julho e setembro de 1961 e julho e outubro de 1962, encontrou distúrbios deslocando-se para oeste. Ele sugeriu a substituição do termo onda por perturbação de leste e classificou os distúrbios de leste em 5 categorias (de acordo com a forma e intensidade da nebulosidade), a saber:

- 1 – Distúrbios fracos lineares;
- 2 – Distúrbios moderados com a nebulosidade organizada na forma de um semi-vórtice;

3 – Distúrbios moderadamente intensos com a nebulosidade organizada na forma de vórtice e circulação ciclônica fechada na média troposfera;

4 – Distúrbios intensos com nebulosidade do tipo vórtice e intensa circulação ciclônica na média troposfera;

5 – Distúrbios na alta troposfera.

Lateef (1967) estudou a interação entre um Vórtice Ciclônico de Ar Superior (VCAS) e uma onda de leste sobre o Caribe entre os dias 3 e 5 de agosto de 1963. Verificou que havia concordância entre os sinais de convergência (divergência) e movimento ascendente (descendente) nos baixos níveis, enquanto que o mesmo não ocorria nos altos níveis. Ele também analisou os termos da equação da vorticidade e encontrou que os principais termos são o da mudança local seguido pelos termos da advecção horizontal de vorticidade e da convergência.

Wallace & Chang (1969), utilizando análise espectral cruzada do vento, temperatura, umidade relativa e pressão à superfície para a região do Pacífico Tropical entre julho e dezembro de 1963, encontraram ondas de leste que se propagavam com períodos de 4 a 5 dias e comprimento de onda da ordem de 3000 km. Verificaram também que os distúrbios com mais de 3 dias estavam relacionados com variação de umidade e que o eixo das ondas não apresentava nenhuma inclinação com a altura, ou seja, apresentava uma estrutura barotrópica. Observaram ainda que as flutuações de temperatura eram tão pequenas que o ruído causado por erros instrumentais e por irregularidades nas escalas convectiva e mesoescala era suficientemente grande para mascará-las.

Burpee (1974) realizou um estudo sobre as características das ondas de leste africanas nos verões de 1968 e 1969, comparando os resultados obtidos através de análise espectral e análise de composição. Ele utilizou dados de ar superior e de superfície dos meses de junho a setembro de 1968 e 1969 de estações no norte da África. Apesar dos resultados das duas técnicas diferirem consideravelmente com relação à magnitude, eles concordaram qualitativamente quanto à estrutura, exceto entre 20°N e 25°N . No caso do método espectral foi obtido um período médio de 4,5 dias e comprimento de onda de 3800 km, enquanto que na análise composta resultaram 3,8 dias e 3100 km. Os máximos de amplitude associados às ondas ocorrem por volta de 20°N , próximo à posição média da área de pressão mínima à superfície. Os resultados da composição mostram que as ondas influenciam latitudes entre 5° e 30°N e que tanto a quantidade de chuva quanto a atividade de tempestades são moduladas pela sua passagem que favorece uma quantidade de chuva cerca de 50% maior do que o mínimo correspondente. Observou também que a estrutura vertical das ondas varia com a componente média zonal de tal maneira que, na vertical, o vento meridional inclina-se na direção oposta ao cisalhamento médio zonal.

Burpee (1975) utilizou uma técnica de composição para analisar as componentes do vento das ondas de leste ocorridas na região do GARP Atlantic Tropical Experiment (GATE, oeste da África) no período de 25 de junho a 24 de setembro de 1974. Ele verificou que o padrão de movimento vertical na área da onda estava em concordância com os padrões de nebulosidade observados por satélite. Os resultados também indicaram que a temperatura, o geopotencial e a umidade podem ser avaliados pelo mesmo método.

Reed & Recker (1971) analisaram a estrutura e propriedades de 18 distúrbios que cruzaram o Pacífico equatorial oeste durante a estação chuvosa de julho a setembro de 1967 com o intuito de fazer os balanços de calor e umidade. Eles chegaram às seguintes conclusões:

- as flutuações são mais intensas e estão quase fora de fase em 800 e 175 mb, níveis nos quais ocorrem as maiores variações de vorticidade;
- há desvios de temperatura negativos (alta e baixa troposfera) e positivos (níveis intermediários) na vizinhança do cavado;
- na região do cavado a umidade relativa é alta e há forte movimento ascendente, sendo que a convergência é predominante nos baixos níveis enquanto que uma região de divergência forma-se sobre o cavado em 175 mb;
- há uma variação sistemática na estrutura da onda atribuída à variação com a longitude do cisalhamento da corrente básica. No início da propagação, na parte leste da região de estudo, o eixo vertical tem inclinação para leste, ao atingir a parte central está praticamente na vertical e, finalmente, tem inclinação para oeste na parte oeste da região;
- a precipitação e o máximo de nebulosidade tendem a ocorrer a leste do eixo do cavado nas estações situadas na parte leste da região de estudo e a oeste nas estações situadas na parte oeste da região de estudo.

Krishnamurti & Knamitsu (1973), no trabalho citado anteriormente, estudou as ondas de leste no ATN com seu modelo que incluía interação oceano-atmosfera, convecção úmida rasa e profunda e efeitos radiativos de onda longa. Na validação e inicialização do modelo foram utilizados dados de estações de superfície, de observações de navios e de estações de ar superior entre 108°W e 42°W e entre 6°N e 34°N e dados de radar Doppler. Os dados iniciais foram do dia 13 de agosto de 1961. Krishnamurti

verificou que é possível manter o núcleo frio principalmente por movimentos ascendentes na área perturbada e, em segundo plano, por um fluxo de ar frio proveniente das regiões circunvizinhas, mais frias do que a área perturbada. Observou também que o resfriamento radiativo é um fator importante na restauração da instabilidade condicional em grande escala nos trópicos. Na região perturbada os processos convectivos foram os responsáveis pela estabilização do perfil vertical da energia estática úmida sendo que é na região ao redor do distúrbio que ocorre a maior restauração. Já com relação à energia, a principal fonte para a onda provém dos movimentos de escala cúmulos e não do cisalhamento horizontal do escoamento médio zonal.

Reed et al. (1977) usaram uma técnica de composição para obter a estrutura e propriedades médias de 8 distúrbios ondulatórios observados no oeste da África no período de 23 de agosto a 19 de setembro de 1974. Eles observaram que o comprimento e período médios das ondas eram 2500 km e 3,5 dias, respectivamente. O distúrbio composto era mais intenso em 650 mb, tendo um centro frio abaixo e um quente acima. Além disso, verificaram que os máximos de convergência em baixos níveis e movimento vertical ascendente ocorriam à frente e ligeiramente ao sul do centro do distúrbio. Observaram também que, sobre o oceano, os comprimentos de onda eram menores, a vorticidade era mais intensa em todos os níveis e que o eixo horizontal da onda era mais inclinado nos níveis próximos ao centro da corrente de jato da média troposfera, o que fazia com que o fluxo de momentum para norte e a transformação de energia cinética zonal em energia cinética turbulenta fossem mais fortes. Verificaram que, em média, os distúrbios ondulatórios africanos são centrados em torno de 11°N, mas a perturbação no campo do vento pode atingir 20°N.

Stevens (1979) realizou balanços de vorticidade, momentum e divergência para distúrbios ondulatórios de escala sinótica sobre o Atlântico Tropical Leste (ATL) utilizando uma técnica de composição aplicada a dados do GATE, principalmente de navios. Os resultados sugerem que os distúrbios são governados pela dinâmica linear, são quase não-geostróficos e que o vento térmico é uma boa aproximação do vento médio zonal. Os resultados também sugerem que circulações de escala subsinótica afetam fortemente a dinâmica da onda.

Viltard & De Felice (1979) realizaram um estudo para analisar a estrutura vertical das ondas em cada fase do GATE por meio de análise estatística (incluindo análise espectral) de dados do vento coletados no período de 24 de junho a 20 de setembro de 1974. Eles concluíram que as ondas de leste existem em todos os níveis troposféricos. Observaram também que durante a Fase 3 do GATE – 30 de agosto a 20 setembro de 1974 - a velocidade da onda é praticamente a mesma em todos os níveis.

Shapiro (1986) analisou a estrutura tridimensional dos distúrbios de escala sinótica sobre o Atlântico Tropical com períodos de 3-5 dias. Ele utilizou a técnica de funções ortogonais empíricas para analisar o vento nos baixos níveis e em 200 mb em julho de 1975. Ele diagnosticou que os distúrbios têm inclinação de $\frac{1}{4}$ de ciclo para oeste em 200 mb em relação aos cavados nos baixos níveis. Observou também que, nos baixos níveis, a advecção pelo vento médio desempenha papel mais importante na propagação da vorticidade do que a advecção meridional da vorticidade média, enquanto que em 200 mb ocorre o contrário. Shapiro determinou ainda que a energia cinética nos baixos e altos níveis é praticamente igual e que os sistemas se propagam mais lentamente do que o vento médio zonal, com velocidade de fase que é constante com a altura.

Tai & Ogura (1987) estudaram os distúrbios ocorridos sobre o Pacífico Tropical entre maio e agosto de 1979. As ondas encontradas apresentavam períodos de 4 a 6 dias, comprimento de 3000-3500 km, velocidade de fase de 5-7 m/s, sendo mais intensas entre 100 e 130°W no PTL e entre 130°E e 160°E no PTO, entre as latitudes de 5 e 15°N. No PTL eles observaram uma área de convecção profunda localizada no eixo do cavado da onda ou na sua retaguarda. Observaram também uma variação sazonal na atividade ondulatória, com a estação mais ativa tendo início no verão do HN, entre julho e agosto. Comparando seus resultados com outros para a região do Atlântico, eles perceberam as seguintes diferenças: a taxa de crescimento é menor no PTL e tanto o cisalhamento vertical quanto latitudinal do escoamento de leste são muito mais fracos do que aqueles encontrados no Atlântico Tropical Leste (ATL), o que os levou a concluir que a formação de ondas de leste no PTL não é devida apenas à instabilidade barotrópica seca.

Liebmann & Hendon (1990), utilizando dados em pontos de grade provenientes do ECMWF, estudaram uma grande área (120°W-120°E, 30°N-30°S) para o período de 1980 a 1987 aplicando análise espectral à componente meridional do vento em 850 hPa. Os autores encontraram picos de potência em torno de 4 dias associados às ondas que tinham velocidade de fase para oeste e de grupo para leste em relação ao vento médio. Os maiores comprimentos de onda foram encontrados sobre o Pacífico e os menores em regiões de grande atividade convectiva.

Duvel (1990), utilizando dados do satélite Meteosat e em pontos de grade do ECMWF, examinou as ondas de leste e sua relação com a nebulosidade sobre o oeste da África e ATL no quadrimestre de junho a setembro de 1983 a 1985. A análise espectral mostrou um máximo de amplitude próximo à costa oeste africana em 20°N. Encontrou

também, em torno de $7,5^{\circ}\text{N}$, uma extensa área de atividade convectiva profunda à frente do eixo do cavado da onda em concordância com o máximo de convergência nos baixos níveis e de divergência nos altos níveis. De maneira geral, as análises do ECMWF estão em concordância com a nebulosidade observada por satélite.

De Felice et al. (1993), utilizando análises do vento fornecidas pelo ECMWF para os meses de julho e agosto de 1981, mostraram que ondas com períodos entre 6 e 9 dias e estrutura similar a da onda mista de Rossby-gravidade se propagavam para oeste no Atlântico Tropical com velocidade de cerca de $8,5^{\circ}$ de longitude por dia. Através do espectro de potência do campo do vento médio zonal, observaram uma relação entre as ondas e oscilações no vento observado em estações de radiossondagem.

Taylor & Clark (2001) utilizaram um modelo de circulação geral e análise espectral para estudar a influência da variação diária dos fluxos à superfície sobre as ondas de leste africanas. Eles verificaram que um esquema de superfície mais realista (denominado esperso) para o deserto do Sahel causa variações importantes nas ondas e aumento na sua atividade. Observaram uma realimentação entre as ondas e os fluxos à superfície uma vez que estes são modulados pelas ondas e que esta mudança, por sua vez, afeta o aquecimento e a umidade nos baixos níveis, podendo resultar em uma camada limite mais ou menos profunda ou aquecida o que tem relação direta com a precipitação. Os autores verificaram ainda que os fluxos de umidade e calor à superfície influenciam a CAPE (Convective Available Potential Energy) à frente do cavado da onda, o que os levou a concluir que as propriedades da superfície afetam substancialmente a chuva associada às ondas de leste africanas.

No Brasil, um dos trabalhos pioneiros foi o de Yamazaki & Rao (1977) que, utilizando imagens de satélite para o período de junho a agosto de 1967, observaram aglomerados de nuvens deslocando-se de leste para oeste sobre o ATS. A partir da observação de cerca de 20 linhas de aglomerados ocorridas nos três meses de análise, verificaram que elas apresentavam, em média, velocidade de propagação de 10m/s e comprimento de onda de 4000 km. A partir de então, outras pesquisas foram desenvolvidas com o intuito de fornecer mais informações sobre o regime dos distúrbios de leste que atingem o Nordeste.

Chan (1990), utilizando dados diários em pontos de grade de vento, temperatura do ar e radiação de onda longa (ROL) para o período do First GARP (Global Atmospheric Research Program) Global Experiment (FGGE) (dezembro de 1978 a novembro de 1979), observou no ATS que no trimestre Março-Abril-Maio (MAM) ocorreram distúrbios ondulatórios com comprimento de onda de 3300km que se propagaram com velocidade de aproximadamente 9,5 m/s, enquanto que no trimestre Junho-Julho-Agosto (JJA) os distúrbios apresentaram comprimentos de onda de 5200 km e velocidade de propagação de 15 m/s. Chan observou ainda uma área no litoral norte do Nordeste do Brasil na qual os distúrbios apresentaram períodos de 3 a 5 dias e amplitude mínima.

Mota & Gandu (1996) fizeram um estudo sobre distúrbios ondulatórios de leste no Nordeste do Brasil identificando 6 distúrbios relacionados com fortes chuvas ocorridas em junho de 1994. Eles determinaram que os distúrbios apresentaram as seguintes características médias: período de 4 a 5 dias, velocidade de propagação de 10 m/s e comprimento de onda de 3400 a 4300 km.

Espinoza (1996), utilizando dados diários da componente meridional do vento em pontos de grade para o período de 1 de janeiro de 1980 a 31 de dezembro de 1989 na área do Atlântico, observou que no trimestre DJF (JJA) os distúrbios são mais intensos no hemisfério sul (hemisfério norte). Espinoza observou também que os distúrbios têm intensidade máxima no nível de 850 hPa e que os períodos em que ocorreram amplitudes máximas coincidiram com a ocorrência de El Niño, embora ressalve que no período estudado ocorreram poucos El Niño. Finalmente, chegou às seguintes conclusões (listadas na caixa abaixo) em relação às características básicas dos distúrbios:

Trimestre	Comprimento de Onda (km)	Velocidade de Fase (m/s)	Inclinação horizontal
DJF	6000-7000	10-14	Sudeste-noroeste
MAM	5000-6000	10-13	Sudoeste-nordeste
JJA	3500-4000	10-13	Sudoeste-nordeste
SON	4000-5000	9-15	Sudeste-noroeste

Mota (1997), estudando ondas de leste que atingiram o Nordeste no inverno de 1994, concluiu que naquele ano a amplitude dos distúrbios é maior no equador do que em 10°S e que eles têm as seguintes características médias entre as latitudes de 10°S e 0°: período de 3,5 a 3,8 dias, velocidade de fase de 9,8 a 11,6 m/s e comprimento de onda de 2900 a 3800 km. Mota concluiu ainda que ocorre acoplamento com brisas marítima-terrestre e de vale-montanha (dependendo da hora e local), o que gera convecção e precipitação.

Melo et al. (1998) identificaram 2 distúrbios de leste (um no início de março e outro no início de abril de 1997) que atingiram o leste dos estados do Rio Grande do

Norte e Pernambuco, procurando relacionar tais distúrbios com fenômenos meteorológicos de várias escalas de tempo e espaço (frentes frias e VCAS) que atuaram no período. Os autores concluíram que não foi possível estabelecer uma relação direta entre os fenômenos.

Mota & Gandu (1998) identificaram, no período de junho a agosto de 1994, 13 ondas nas latitudes de 0° e 5°S e 10 ondas na latitude de 10°S. Analisando essas ondas, concluíram que as que ocorrem no equador possuem maior velocidade de fase, maior comprimento de onda e maior período médio do que as que ocorrem em latitudes mais ao sul.

Siqueira & Machado (2000) mostraram que os distúrbios de leste podem ser identificados em imagens de satélite através da utilização de limiares de temperatura de brilho apropriados para os sistemas convectivos e as células convectivas.

Reis et al. (2000), utilizando campos de vento em 200 e 850 hPa, campos de precipitação e imagens do satélite Meteosat-7 para o período de 13 a 16 de fevereiro de 2000, observaram um acoplamento entre um vórtice ciclônico de ar superior (VCAS) e o distúrbio ondulatório de leste que influenciou o Nordeste naquele período. Segundo os autores, o acoplamento causou, no leste do Nordeste, desvios positivos de precipitação em torno de 75% em relação à climatologia, contribuindo em apenas 03 dias com cerca de 50% da precipitação observada naquele mês de fevereiro no estado de Alagoas.

O mesmo evento citado acima foi estudado por Paiva Neto et al. (2002) utilizando dados em pontos de grade dos National Centers for Environmental Prediction (NCEP) e de radiossondagem. Eles verificaram que a interação entre o VCAS e o distúrbio

de leste deu origem a uma linha de instabilidade sobre o oceano que se deslocou para oeste e provocou precipitação até o sul da Bahia.

Este trabalho tem por objetivo compreender melhor o comportamento dos distúrbios de leste que atingem o Nordeste do Brasil enfocando, em particular, as mudanças que provocam no Estado da Paraíba.

CAPÍTULO 3

DADOS E METODOLOGIA

3.1 – DADOS

Os dados disponíveis para a realização desta pesquisa foram:

- a) reanálises dos National Centers for Environmental Prediction (NCEP) nos níveis isobáricos padrões, com espaçamento de grade horizontal de 2,5° por 2,5°, para o horário das 00 UTC nos meses de maio a agosto de 1995 a 2002, sendo usadas as seguintes variáveis básicas: temperatura do ar, temperatura da superfície do mar (TSM), umidade específica e relativa, vento zonal e meridional. Detalhes sobre os dados de reanálise podem ser obtidos em Kalnay et al. (1996).
- b) médias mensais de longo prazo (1979-1998) da pressão ao nível médio do mar;

- c) anomalias da temperatura da superfície do mar;
- d) imagens do satélite meteorológico METEOSAT nos canais do infravermelho térmico e visível;
- e) dados de precipitação da rede pluviométrica do Estado da Paraíba cedidos pela Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) e pelo Laboratório de Meteorologia Recursos Hídricos e Sensoriamento Remoto da Paraíba (LMRS-PB) ao Departamento de Ciências Atmosféricas (DCA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Esses dados constam de totais pluviométricos observados diariamente às 10 UTC. Dessa forma, os valores refletem a precipitação ocorrida desde as 10 UTC do dia anterior, ou seja, o total de 24 horas. A localização dos postos utilizados neste estudo encontra-se na Figura 3.1.

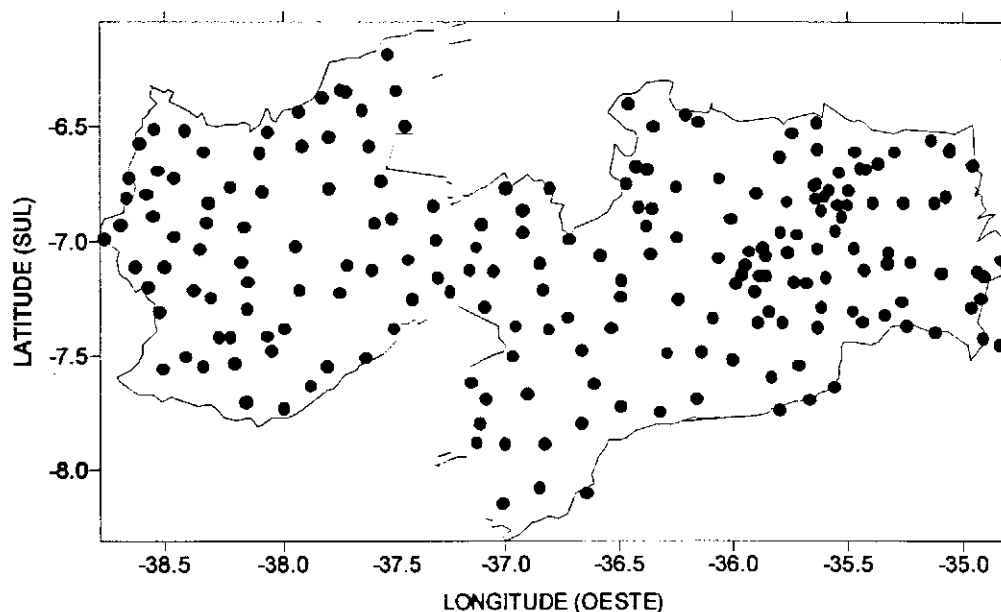


Figura 3.1 – Distribuição dos postos da rede pluviométrica do Estado da Paraíba.

3.2 – METODOLOGIA

A seleção dos meses para estudo baseou-se na frequência de ocorrência e intensidade dos distúrbios. Selecionados os meses e considerando que a TSM tem influência decisiva na precipitação do Nordeste do Brasil (Harzallah et al., 1996; Silva, 1996; Silva et al., 1996; Rao et al., 1993; Ropelewski & Halpert, 1987, 1989), analisou-se o campo das anomalias de TSM para cada mês selecionado, no Pacífico e Atlântico. No Atlântico, em particular, as TSM's podem influenciar diretamente o desenvolvimento dos distúrbios, já que anomalias de TSM positivas, aliadas a outros fatores, podem propiciar maior evaporação e, conseqüentemente, áreas de nebulosidade mais extensas e com nuvens mais profundas. Nesse contexto Lucena (2001) mostrou através de simulações numéricas que um aumento da TSM em uma área adjacente ao leste do Nordeste causa, em geral, um impacto positivo na precipitação do leste do Nordeste.

Analizou-se também o campo dos desvios, em relação à média de longo prazo, da pressão média ao nível médio do mar para cada mês selecionado, já que vários estudos mostram uma relação entre a circulação atmosférica à superfície e a precipitação no Nordeste do Brasil (Rao et al., 1993; Ropelewski & Halpert, 1987, 1989; Hastenrath & Heller, 1977).

O objetivo da análise dos campos das anomalias de TSM e dos desvios da pressão foi o de identificar, para os meses analisados, uma possível relação entre o comportamento dos distúrbios, a TSM e a circulação atmosférica à superfície.

3.2.1 – Identificação dos distúrbios de leste

Os distúrbios ondulatórios de leste foram identificados em diagramas tempo $\times$ longitude da vorticidade relativa e do vento meridional ao longo da latitude de 7°S visualizados através do aplicativo Grid Analysis and Display System (GrADS). O critério utilizado foi a presença de áreas inclinadas positivas (vorticidade anticiclônica/vento meridional de sul) e negativas (vorticidade ciclônica/vento meridional de norte) que se alternavam no decorrer do tempo ao longo de 35°W, longitude próxima da cidade de João Pessoa, situada no litoral do Estado da Paraíba.

Utilizou-se a longitude de 35°W como referência para identificar o dia da chegada de cada distúrbio no litoral nordestino, na latitude de 7°S. Identificou-se o dia da chegada de cada distúrbio nos dois diagramas, quando possível. No diagrama tempo $\times$ longitude da vorticidade relativa ele é o dia a partir do qual essa variável se torna negativa, ou seja, ciclônica. No diagrama tempo $\times$ longitude da componente meridional do vento é o dia a partir do qual a componente se torna positiva, ou seja, de sul. Esse dia (data) é incluído numa tabela na qual também aparece o dia do final, ou seja, o último dia em que o distúrbio é identificado na longitude de 35°W. A diferença entre esses dois dias representa o número de dias em que a vorticidade relativa (componente meridional do vento) se mantém negativa (positiva) na longitude de 35°W.

Calculou-se a velocidade de fase (aproximada) de cada distúrbio com base no intervalo de tempo necessário para que ele atingisse a longitude de 35°W a partir do dia em que foi detectado, enquanto que o período dos distúrbios é o número de dias entre a chegada de duas áreas consecutivas de mesmo sinal na longitude de 35°W.

Observou-se em casos analisados que as mudanças (critérios) utilizadas para detectar a chegada dos distúrbios também podem ser parcialmente provocadas por outras alterações na circulação de grande escala além da chegada de um distúrbio de leste.

Além dos diagramas da vorticidade relativa e vento meridional utilizou-se imagens de satélite para corroborar a presença dos distúrbios.

3.2.2 – Escolha dos Meses de Estudo

A análise de diagramas tempo $\times$ longitude da vorticidade relativa e do vento meridional permitiu selecionar o mês de junho dos anos de 1995, 1996, 1997 e 1999 seguindo o procedimento descrito a seguir.

Selecionou-se inicialmente os meses nos quais ocorreu maior número de distúrbios ondulatórios e, dentre estes, aqueles nos quais os distúrbios eram mais evidentes: junho de 1995 e 1996. A seguir, escolheu-se um mês que fosse exatamente o oposto dos supracitados, ou seja, que tivesse a menor quantidade de ondas e que estas não apresentassem propagação bem definida: junho de 1997. No caso dos meses de junho de 1995 e 1996 constatou-se que as anomalias de TSM no Pacífico Equatorial eram pequenas caracterizando uma situação neutra, enquanto que havia condições de El Niño em junho de 1997 (NOAA, 2002). Esse fato motivou a escolha, para comparação, de um mês de junho adicional que apresentasse condições de La Niña: junho de 1999 (NOAA, 2002).

3.2.2.1 – Análise dos Meses Seleccionados

Seleccionados os meses para estudo com base nos diagramas tempo×longitude da vorticidade relativa e do vento meridional, obteve-se gráficos para ilustrar a variação temporal e vertical de diversas variáveis atmosféricas no ponto de coordenadas (7°S, 35°W), localizado próximo à cidade de João Pessoa – PB.

O objetivo dessa análise foi identificar alterações na estrutura vertical da atmosfera provocadas pela passagem dos distúrbios de leste. Comparou-se os resultados dessa análise com séries temporais dos totais pluviométricos diários observados no posto de João Pessoa (7,08°S; 34,83°W). Além disso, elaborou-se mapas dos totais pluviométricos mensais observados no Estado da Paraíba e de seus desvios em relação à média climatológica de junho.

As variáveis analisadas nesta etapa são discutidas a seguir.

a) Vento

A análise da variação temporal da componente meridional do vento e da vorticidade relativa na vertical do ponto de coordenadas (7°S, 35°W) complementa os diagramas tempo×longitude já que permite diagnosticar as variações ao longo da vertical provocadas pelos distúrbios.

b) Umidade

Analizou-se a umidade através da razão de mistura com o objetivo de determinar a quantidade de umidade disponível para precipitação. Analisou-se também o campo da divergência do fluxo de umidade já que ele é indicativo da existência de condições dinâmicas favoráveis à formação de nuvens e precipitação.

c) Temperatura

Analizou-se a temperatura através da temperatura potencial equivalente já que ela permite avaliar a estabilidade da atmosfera e determinar a quantidade de energia potencialmente disponível para a convecção.

Calculou-se a temperatura potencial equivalente segundo o método proposto por Betts (1973) e modificado por Bolton (1980) que resulta em valores mais adequados para a atmosfera tropical. As equações utilizadas são dadas a seguir.

A temperatura potencial (θ) é dada por:

$$\theta = T_k \left(\frac{1000}{P} \right)^{0,2854(1-0,28 \times 10^{-3} r)}$$

na qual: T_k é a temperatura em Kelvin,

P é a pressão em hPa,

r é a razão de mistura em kg/kg dada por:

$$r = \frac{622 \times e}{P - e}$$

na qual e é a pressão exercida pelo vapor d'água em hPa dada por:

$$e = \frac{UR \times e_s}{100}$$

na qual UR é a umidade relativa em %;

e_s é a pressão exercida pelo vapor d'água à saturação em hPa dada por:

$$e_s = 6,11 \times \exp \left[\frac{(17,62T)}{T + 243,5} \right]$$

T é a temperatura em °C

A temperatura potencial equivalente é dada por:

$$\theta_e = \theta \exp \left[\left(\frac{3,376}{T_L} - 0,00254 \right) \times r (1 + 0,81 \times 10^{-3} r) \right]$$

na qual T_L é a temperatura no nível de condensação por levantamento em graus Kelvin dada por:

$$T_L = \frac{1}{\frac{1}{T_K} - \frac{\ln(UR/100)}{2840}}$$

d) Temperatura da Superfície do Mar

Analisou-se as TSMs dos oceanos Pacífico e Atlântico por meio das suas anomalias com o objetivo de identificar fenômenos como El Niño/La Niña/Oscilação do Sul e Dipolo do Atlântico.

e) Precipitação

Na análise dos dados de precipitação utilizou-se o aplicativo Surface Mapping System (Surfer) versão 6.01 para visualizar a distribuição espacial dos totais mensais de precipitação bem como de seus desvios em relação à média. É importante ressaltar que nem todas as estações representadas na Figura 3.1 foram utilizadas em todos os meses selecionados; algumas foram utilizadas em 1 mês apenas, outras nos quatro meses. Por outro lado, no cálculo das anomalias só foram utilizadas aquelas com 30 ou mais anos de dados. Na Figura 3.1 estão representadas todas as estações utilizadas.

Utilizou-se também gráficos dos totais diários de precipitação observados na estação de João Pessoa (7,08°S; 34,83°W), estação mais próxima do ponto de referência (7°S, 35°W), com o objetivo de investigar uma possível relação entre a variação temporal da precipitação e das outras variáveis analisadas.

3.2.3 – Estudo de Caso

Escolheu-se um distúrbio de leste ocorrido num dos meses selecionados (junho de 1995) para realizar um estudo de caso. O episódio estudado se caracteriza por apresentar propagação bem definida nos diagramas tempo×longitude, nebulosidade identificada nas imagens de satélite e precipitação.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DOS MESES SELECIONADOS

4.1 – JUNHO DE 1995

4.1.1 – Anomalias de Grande Escala

4.1.1.1 – Temperatura da superfície do mar

O mês de junho de 1995 é considerado mês neutro com relação ao fenômeno El Niño/La Niña (NOAA, 2002), já que o oceano Pacífico equatorial apresenta anomalias de TSM positivas e negativas (estas mais concentradas na região do Niño 1+2) de pequena intensidade (Fig. 4.1). No Atlântico há predominância de anomalias positivas de TSM com os maiores valores presentes no Atlântico Tropical Norte (ATN) e próximo ao litoral do Rio Grande do Sul. No Atlântico Tropical Sul (ATS) observa-se um núcleo de anomalias positivas centrado em (10°S, 0°W), aproximadamente.

4.1.1.2 – Pressão ao nível médio do mar

Analisando-se o campo dos desvios da pressão ao nível médio do mar (Fig. 4.2) vê-se que a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) encontra-se mais intensa do que a média climatológica conforme indica o núcleo positivo centrado em torno de (27,5°S, 15°W). Essa característica implica em alísios mais intensos e, provavelmente, maior transporte de umidade para o Nordeste. Outras características relevantes desse campo são a presença: do núcleo negativo sobre o ATN (Alta Subtropical do Atlântico Norte (ASAN) menos intensa), de núcleos intensos em latitudes médias e a predominância de desvios negativos no Pacífico Tropical. No Nordeste há anomalias positivas.

O fato da ASAS estar mais intensa do que a média aliado a anomalias de TSM positivas pode ter contribuído, juntamente com outros fatores dinâmicos, para a precipitação acima da média discutida a seguir.

4.1.2 – Precipitação no Estado da Paraíba

Na Figura 4.3 pode-se observar que em junho de 1995 a precipitação concentrou-se no leste da Paraíba (agreste e litoral), decrescendo do litoral para o interior, um comportamento que só é alterado pelos dois máximos secundários situados em torno de 36°W, na Serra da Borborema. Observa-se ainda alguns núcleos no oeste do Estado. Diversos fatores devem ser responsáveis por esse padrão de precipitação: distúrbios de leste, convergência entre os alísios e circulações de brisa, ascensão forçada do ar na encosta leste da Serra da Borborema, etc. A precipitação no agreste e litoral paraibano

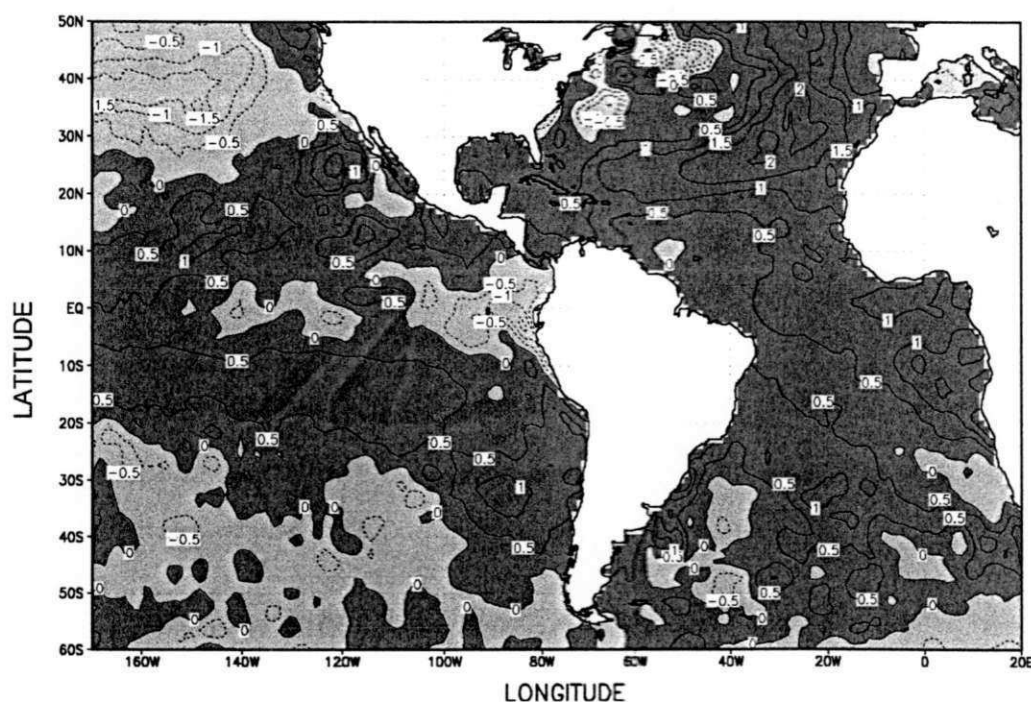


Figura 4.1 – Anomalias da temperatura da superfície do mar em junho de 1995. O intervalo de análise é de $0,5^{\circ}\text{C}$. As áreas sombreadas mais claras (escuras) assinalam anomalias negativas (positivas). (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

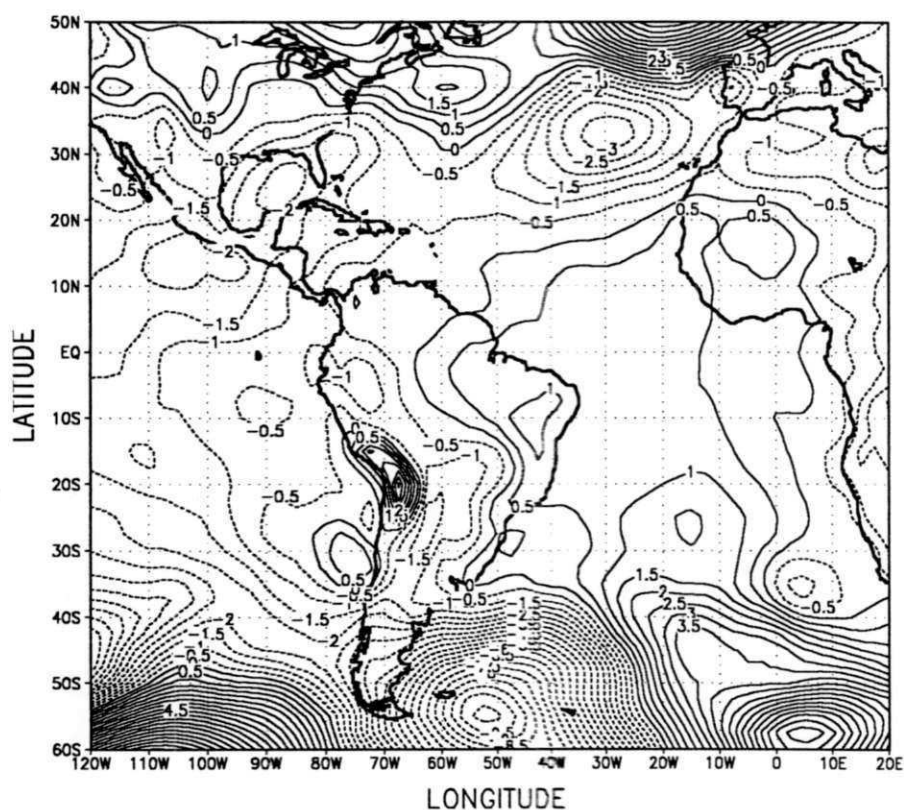


Figura 4.2 – Desvios da pressão ao nível médio do mar em junho de 1995. O intervalo de análise é de $0,5\text{ hPa}$ (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

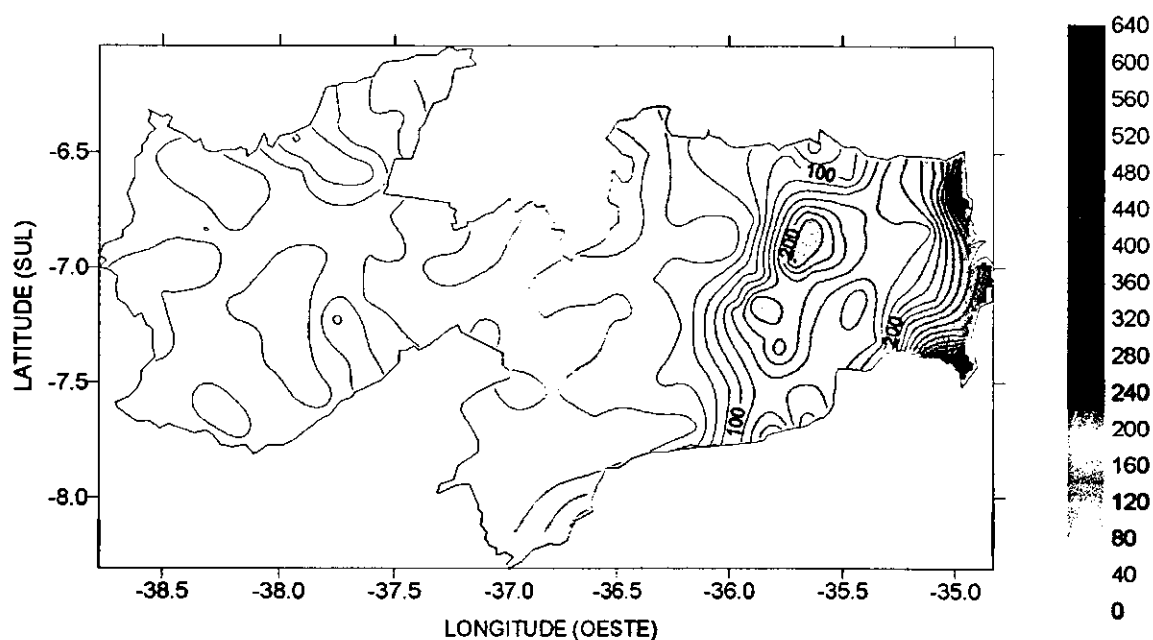


Figura 4.3 – Precipitação acumulada (mm) em junho de 1995 no Estado da Paraíba (*Fonte dos dados: LMRS-PB*). O intervalo de análise é de 20 mm.

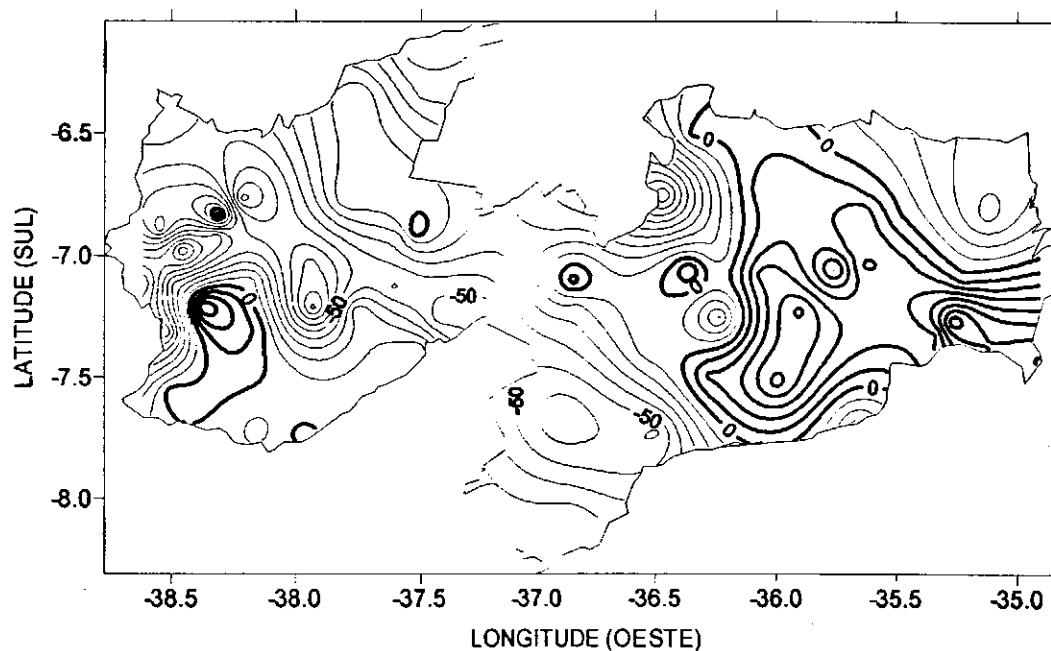


Figura 4.4 – Desvios de precipitação com relação à climatologia (%) para junho de 1995 no Estado da Paraíba (*Fonte dos dados: LMRS-PB*). O intervalo de análise é de 10 (-10) mm. As linhas espessas (finas) representam desvios positivos (negativos).

oscilou entre -40% e 60% da média climatológica (Figura 4.4) com os maiores desvios positivos no sudeste do Estado.

4.1.3 – Identificação e Propriedades dos Distúrbios

A análise do diagrama tempo-longitude da vorticidade relativa no nível de 700 hPa e latitude de 7°S evidencia a presença de 5 distúrbios com propagação para oeste, dos quais 4 atingem o Estado da Paraíba (Fig. 4.5). A Tabela 4.1 apresenta as principais propriedades de cada distúrbio determinadas de acordo com a metodologia descrita no capítulo anterior.

Os resultados da análise do diagrama tempo-longitude do vento meridional (Fig. 4.6) são sintetizados na Tabela 4.2 que mostra os mesmos distúrbios detectados na Figura 4.5, com exceção do distúrbio 2 da Tabela 4.1. As diferenças entre as duas tabelas ocorrem principalmente em relação ao dia em que cada onda atinge o litoral paraibano. Uma das diferenças mais evidentes entre as duas tabelas está relacionada com o distúrbio 4 que não atinge 35°W conforme mostram a Figura 4.5 e Tabela 4.1, enquanto que ocorre o oposto na Figura 4.6 e Tabela 4.2.

Observa-se que quase todos os distúrbios alcançam longitudes a oeste do Estado da Paraíba. Os distúrbios têm período médio de 5 dias e velocidades de fase que variam de 3° a 13,75° de longitude por dia. Os distúrbios identificados no diagrama da componente meridional do vento (Tab. 4.2) apresentam velocidades maiores e período médio maior do que os obtidos por Mota (1997), em 5°S, para o ano de 1994.

Tabela 4.1 – Características dos distúrbios observados no diagrama da vorticidade relativa do mês de junho de 1995

Distúrbio	1	2	3	4	5
Data de início	28/05	04/06	08/06	15/06	21/06
Longitude de início	2,5°W	17,5°W	5,0°W	Leste de 0°	7,5°W
Longitude do final	+ de 55°W	44°W	42°W	33°W	+ de 55°W
Velocidade (°long./dia)	5,40	3,00	6,00	5,00	13,75
Data ao atingir 35°W	03/06	10/06	13/06	-----	23/06
Último dia em 35°W	08/06	12/06	14/06	-----	28/06
Intensidade em 35°W	+ intenso	=	- intenso	-----	=

Tabela 4.2 – Características dos distúrbios observados no diagrama da componente meridional do vento do mês de junho de 1995

Distúrbio	1	3	4	5
Data de início	27/05	09/06	14/06	20/06
Longitude de início	2,5°W	0°	Leste de 2,5°E	Leste de 2,5°E
Longitude do final	52°W	52°W	+60°W	+60°W
Velocidade (°long./dia)	4,64	7,50	9,38	12,5
Data ao atingir 35°W	03/06	11/06	18/06	22/06
Último dia em 35°W	07/06	13/06	21/06	28/06
Intensidade em 35°W	- intenso	=	- intenso	=

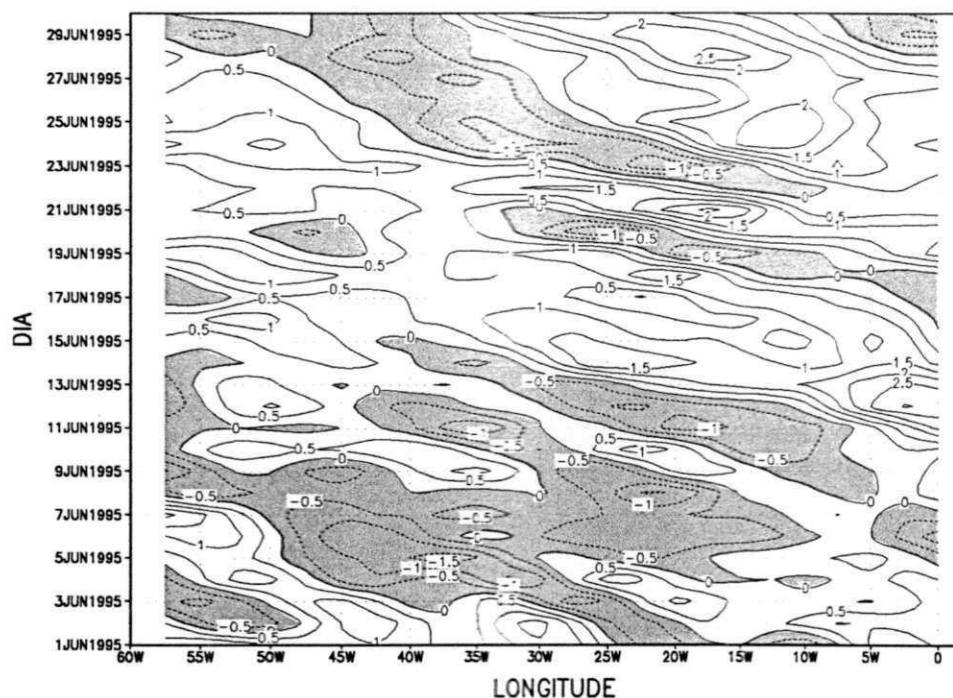


Figura 4.5 – Diagrama tempo-longitude da vorticidade relativa (10^{-5}s^{-1}) em 700 hPa e latitude de 7°S em junho de 1995. As áreas sombreadas assinalam vorticidade ciclônica (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

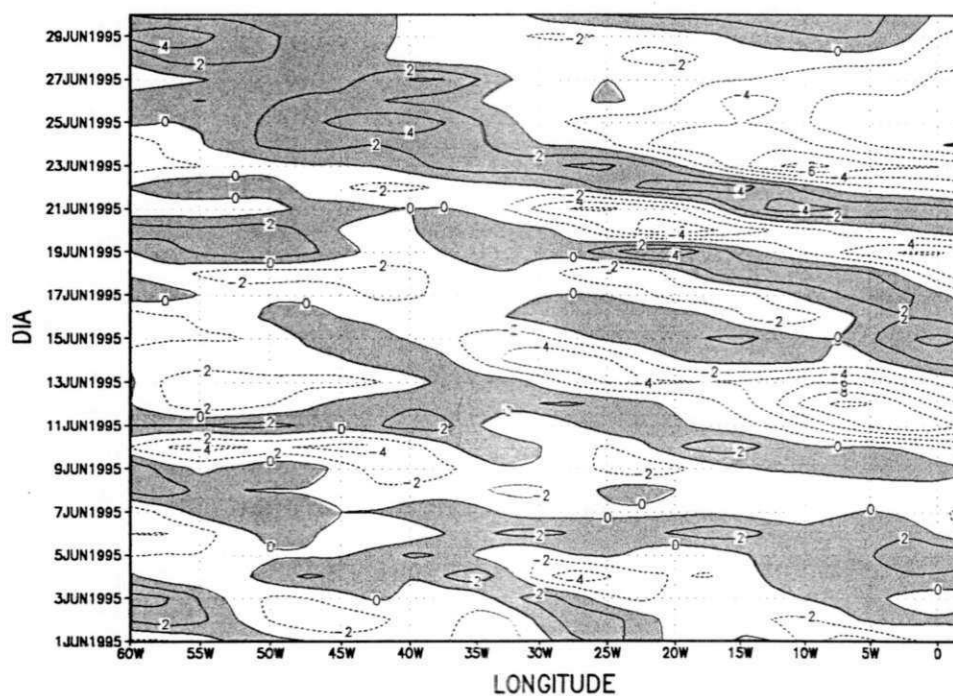


Figura 4.6 – Diagrama tempo-longitude do vento meridional (m/s) em 700 hPa e latitude de 7°S em junho de 1995. As áreas sombreadas assinalam vento de sul (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

Detectou-se a nebulosidade associada aos distúrbios (não mostrada) já próximo à costa, através do deslocamento para oeste de aglomerados de nuvens. O distúrbio 3 (Tabela 4.1) foi o que apresentou propagação mais evidente. Também houve propagação de aglomerados para oeste fora dos períodos relacionados aos distúrbios sendo o caso mais evidente o do dia 27, que atinge a costa no dia 30.

4.1.4 – Evolução Temporal de Variáveis Atmosféricas no Litoral do Estado da Paraíba

A análise da evolução temporal da vorticidade relativa na vertical do ponto de coordenadas (7°S, 35°W) (Fig. 4.7) revela predominância de vorticidade anticiclônica acima de 500 hPa enquanto que abaixo desse nível há alternância de sinal, particularmente no nível de 700 hPa, onde foram identificados 4 distúrbios que atingem 35°W, e na camada 1000-950 hPa.

O campo da componente meridional do vento (Fig. 4.8) mostra predominância de componente de sul abaixo de 700 hPa, nível no qual observa-se 4 distúrbios pela alternância entre componente de sul (positiva) e de norte (negativa). Observa-se ainda que nos dias selecionados como de chegada da onda na Figura 4.6 (3, 11, 18, 22), a componente meridional assume valores mínimos. Por outro lado, nem todos os mínimos correspondem a distúrbios como, por exemplo, o de 25 de junho. Observa-se valores máximos da componente meridional cerca de um dia após a ocorrência de cada mínimo, ou seja, 24 horas após a chegada da onda.

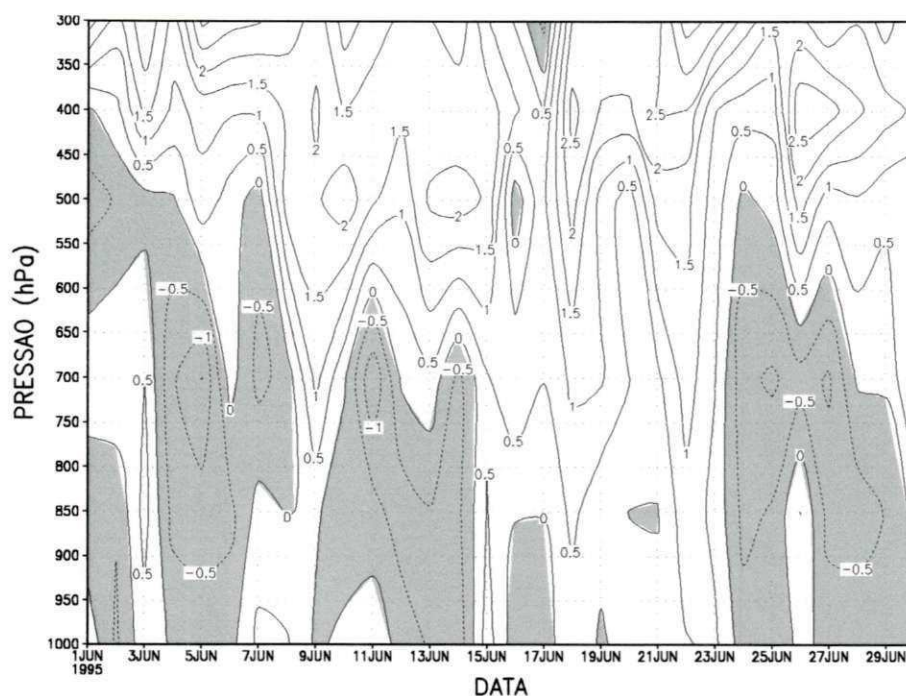


Figura 4.7 – Série temporal da vorticidade relativa (10^{-5}s^{-1}) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1995 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*)

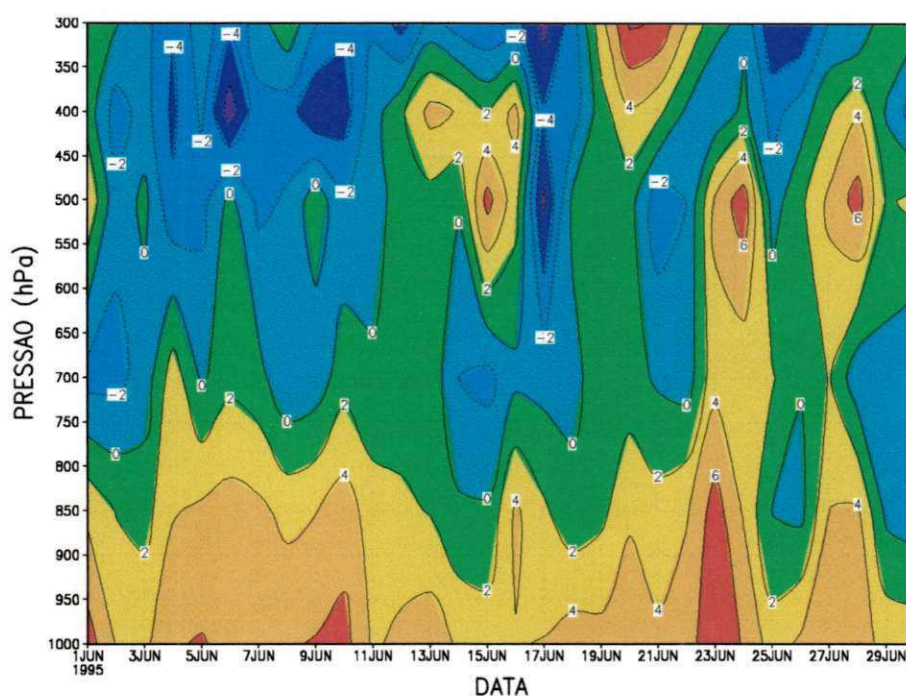


Figura 4.8 – Série temporal da componente meridional do vento (ms^{-1}) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1995 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*)

O campo da divergência do fluxo de umidade mostra alternância de convergência e divergência fracas em 700 hPa (Fig. 4.9), nível utilizado na identificação dos distúrbios. Há convergência na camada 1000-950 hPa em todo o mês, com exceção dos dias 7 e 19, enquanto que há vários máximos de divergência centrados em torno de 850 hPa. Conseqüentemente, esse mês apresenta, em média, convergência (divergência) de umidade na camada 1000-950 hPa (950-700 hPa). Considerando os dias de chegada dos distúrbios identificados no diagrama da componente meridional do vento (3, 11, 18, 22), é evidente a diminuição da convergência no dia subsequente, com exceção do distúrbio do dia 3. Por outro lado, essa figura mostra outros dias em que a convergência enfraquece ou é substituída por divergência como é o caso, por exemplo, do dia 7. Esse resultado indica que o campo da divergência do fluxo de umidade mostra o sinal de outros fatores que o influenciaram em junho de 1995. Um desses fatores pode ser a ocorrência de flutuações na circulação da ASAS (alísios).

O campo da razão de mistura tem comportamento análogo ao do campo discutido anteriormente, já que mostra valores menores no dia subsequente ao da chegada de cada distúrbio (Fig. 4.10), o que indica diminuição no teor de umidade da atmosfera. Este campo mostra outros episódios com as mesmas características mas que não podem ser atribuídos a distúrbios em 700 hPa, a exemplo do que ocorre no campo da divergência do fluxo de umidade.

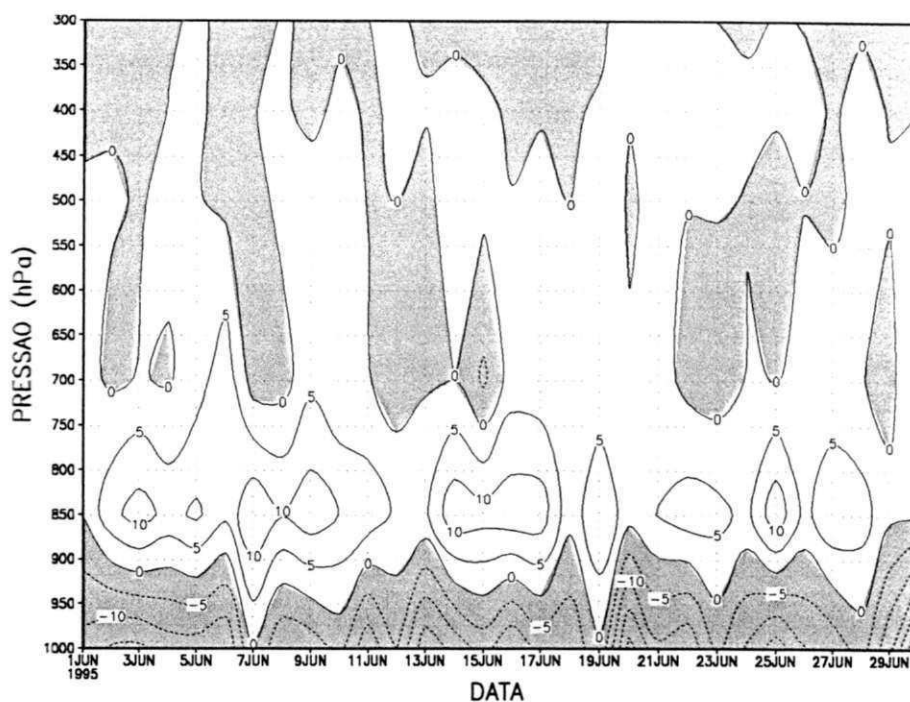


Figura 4.9 – Série temporal da divergência do fluxo de umidade ($10^{-5} \text{gkg}^{-1} \text{s}^{-1}$) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1995 (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

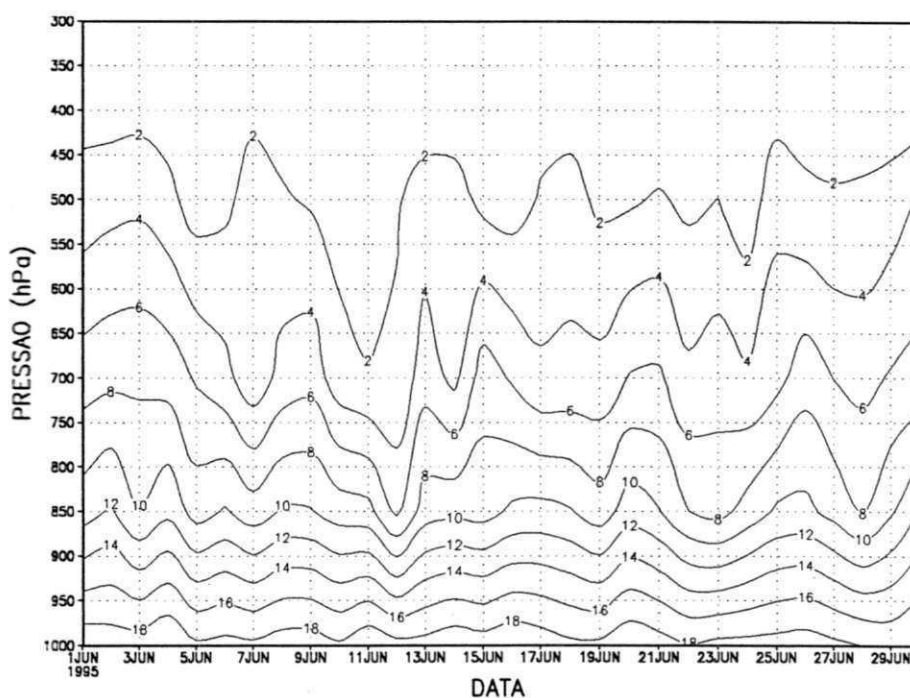


Figura 4.10 – Série temporal da razão de mistura (g/kg) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1995 (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

O campo do movimento vertical (Fig. 4.11) evidencia predominância de movimento ascendente desde a baixa até a alta troposfera, não mostrando sinal particular da atuação dos distúrbios.

No campo da temperatura potencial equivalente (Fig. 4.12) as informações significativas são observadas na baixa e média troposfera. Valores substancialmente mais altos próximos à superfície caracterizam uma atmosfera mais quente e úmida. A queda nos valores de θ_e com a altura representa uma medida da instabilidade potencial ou convectiva da atmosfera. Esse comportamento é observado em todo o mês nos níveis abaixo de 850 hPa. Entretanto, os dias 7, 12, 19, e 23 se destacam por apresentar queda nos valores de θ_e numa camada mais profunda. Esse fato reflete uma possível relação entre a ocorrência de condições favoráveis ao desenvolvimento de convecção profunda e a atuação de distúrbios de leste.

A discussão acima permite concluir que em junho de 1995 as condições neutras no Pacífico Equatorial, as anomalias de TSM positivas no ATS, o ASAS mais intenso do que a média, o teor de umidade elevado e a convergência de umidade próximo à superfície, aliados ao aumento da instabilidade na presença dos distúrbios, favoreceram a ocorrência de precipitação acima da média no leste do Estado da Paraíba.

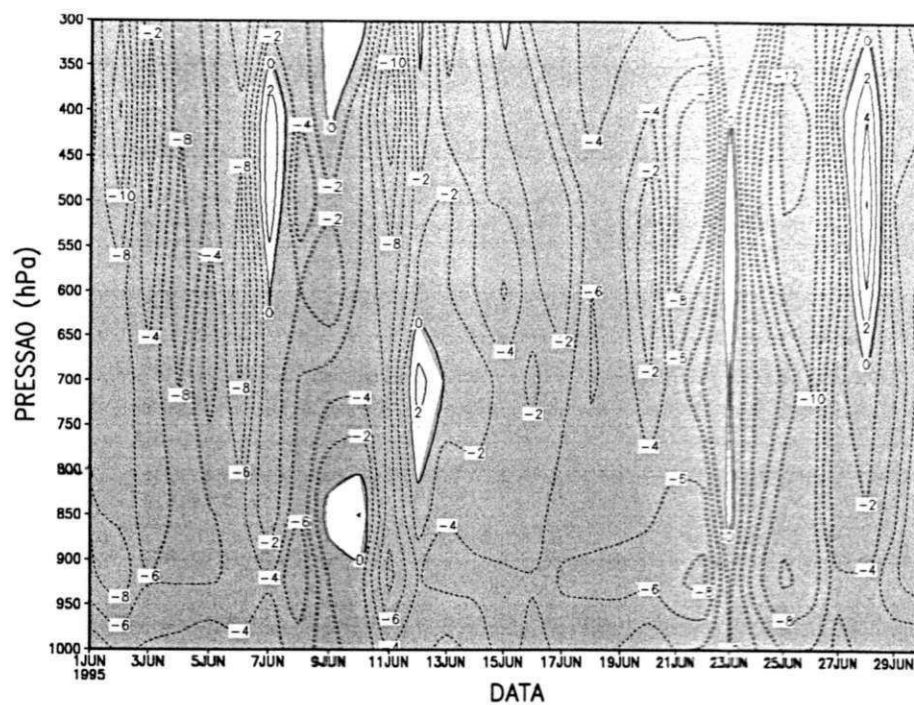


Figura 4.11 – Série temporal do movimento vertical (10^{-2}Pas^{-1}) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1995 (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

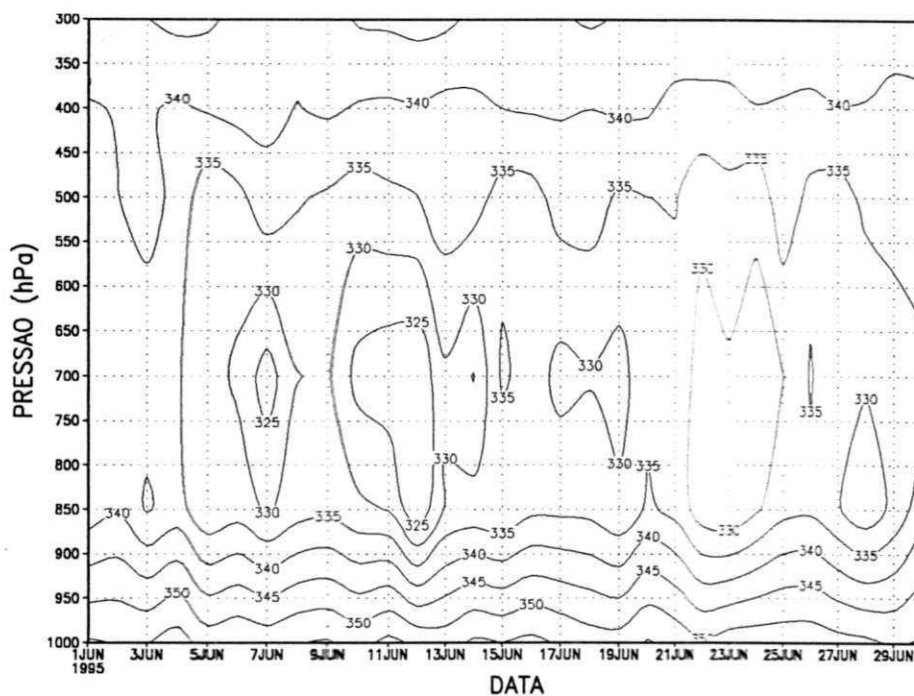


Figura 4.12 – Série temporal da temperatura potencial equivalente (K) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1995 (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

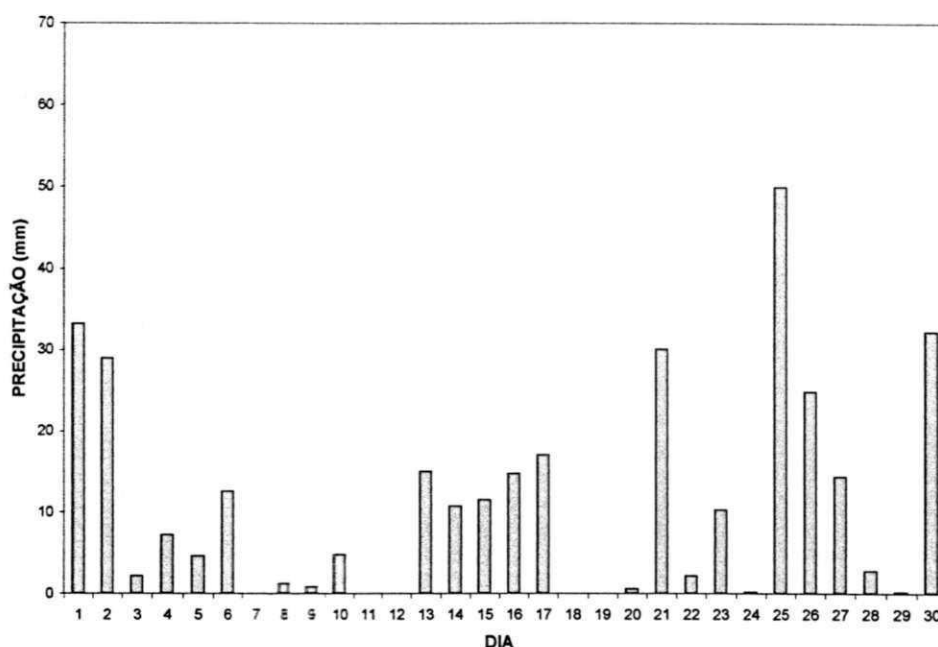


Figura 4.13 – Série temporal dos totais pluviométricos diários observados em João Pessoa – PB (7,08°S; 34,83°W) em junho de 1995 (*Fonte dos dados: LMRS-PB*)

A série temporal dos totais pluviométricos diários observados em junho de 1995 na estação de João Pessoa – PB (7,03°S; 34,83°W), estação mais próxima do ponto de referência utilizado neste estudo (7°S, 35°W), é ilustrada na Figura 4.13. Esse gráfico mostra ocorrência de precipitação na maior parte dos dias do mês, evidenciando assim que, além dos distúrbios de leste, outros fatores contribuíram para a precipitação nessa estação. Note que, apesar do dia 7 ser o dia no qual a instabilidade potencial atinge níveis mais altos, a divergência do fluxo de umidade e menor razão de mistura nos baixos níveis não favoreceram a ocorrência de precipitação.

4.2 – JUNHO DE 1996

4.2.1 – Anomalias de Grande Escala

4.2.1.1 – Temperatura da superfície do mar

Apesar de junho de 1996 apresentar desvios negativos de TSM nas áreas do Niño 1+2 e 3 (Fig. 4.14), inclusive com valores mais negativos do que em 1995 na costa peruana, ele também é considerado um mês neutro com relação ao fenômeno El Niño/La Niña. No Atlântico pode-se constatar a presença de anomalias de TSM positivas entre 15°N e 15°S com núcleos intensos centrados no equador. No restante do Atlântico há núcleos positivos e negativos sendo que nas costas africana e sul-americana predominam desvios positivos.

4.2.1.2 – Pressão ao nível médio do mar

Analisando-se o campo dos desvios da pressão ao nível médio do mar para junho de 1996 (Fig. 4.15) pode-se deduzir que o ASAS, ao contrário de junho de 1995, apresenta valores abaixo da média climatológica, o que implica em menor intensidade dos alísios e possível diminuição do transporte de umidade para o Nordeste. Por outro lado, a ASAN apresenta-se mais intensa do que a média conforme evidenciam os desvios positivos que cobrem quase todo o Atlântico Norte, uma característica oposta àquela observada em junho de 1995. Há anomalias negativas na maior parte do Pacífico Tropical. Nas latitudes médias do hemisfério sul, um núcleo negativo intenso se estende

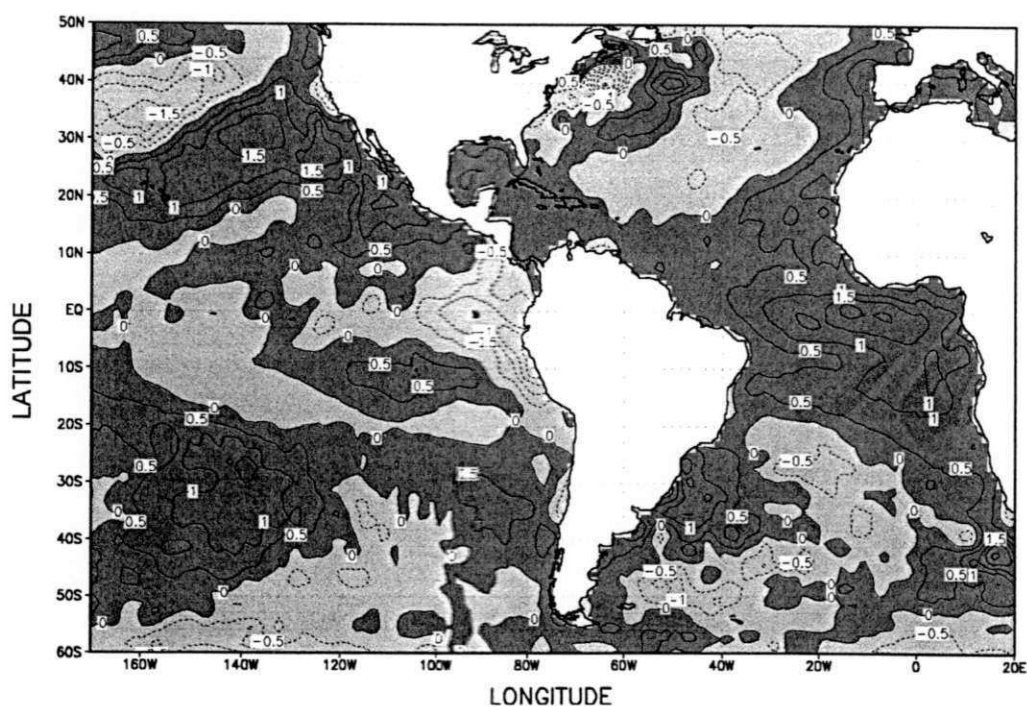
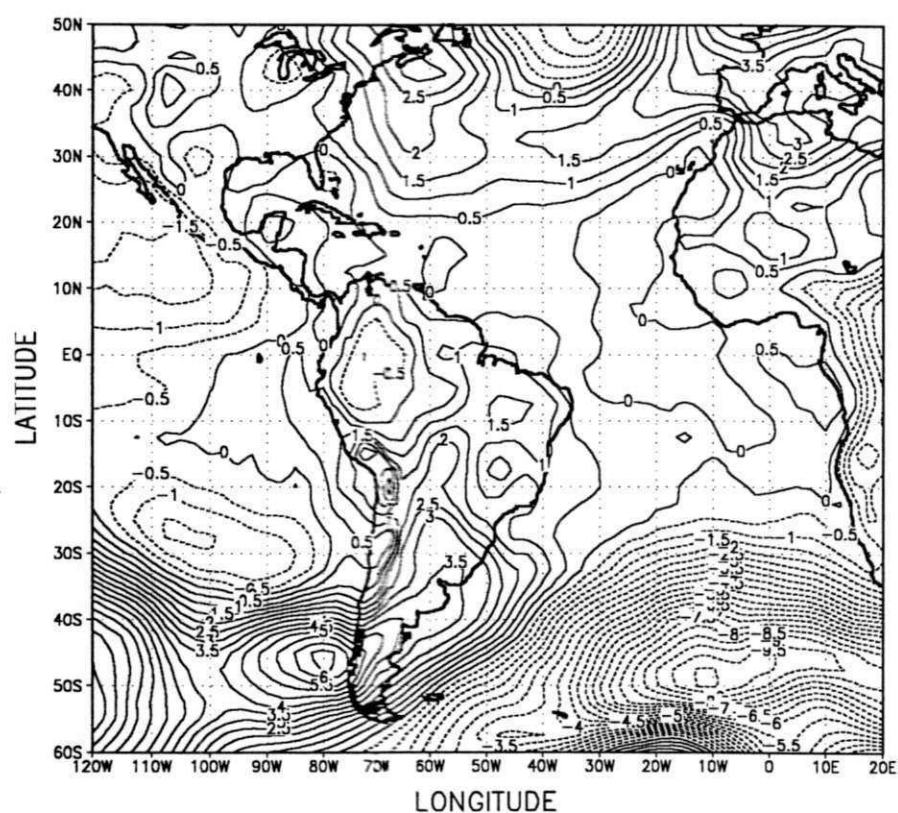


Figura 4.14 – Anomalias da temperatura da superfície do mar em junho de 1996. O intervalo de análise é de $0,5^{\circ}\text{C}$. As áreas sombreadas mais claras (escuras) assinalam anomalias negativas (positivas). (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)



sobre quase todo o Atlântico, enquanto que núcleos de sinal oposto dominam o Pacífico e América do Sul.

4.2.2 – Precipitação no Estado da Paraíba

No campo da precipitação (Fig. 4.16) observou-se que, como seria esperado para este mês, os maiores totais pluviométricos ocorreram no leste da Paraíba, mais notadamente no litoral norte, com outras áreas observadas no sertão mas com totais bem abaixo dos registrados no litoral. Observa-se no mapa dos desvios de precipitação (Fig. 4.17) dois aspectos interessantes: no oeste do Estado ocorrem os maiores desvios positivos e negativos, em áreas relativamente próximas, enquanto que no leste do Estado há predominância de desvios negativos, sendo que os maiores encontram-se no litoral norte e adjacências, uma configuração semelhante àquela observada em junho de 1995.

4.2.3 – Identificação e Propriedades dos Distúrbios

A análise do diagrama tempo-longitude da vorticidade relativa no nível de 700 hPa e latitude de 7°S evidencia a presença de 4 distúrbios com propagação para oeste que atingem o litoral do Estado da Paraíba nos dias 3, 8, 13 e 19 (Fig. 4.18). Suas principais características constam da Tabela 4.3.

A análise do diagrama tempo-longitude do vento meridional (Fig. 4.19) mostra 5 distúrbios que atingem o litoral paraibano, nos dias 3, 8, 12, 17 e 22 um a mais do que os evidenciados no campo da vorticidade. Observa-se que não é possível determinar nesse diagrama a data de início de alguns dos distúrbios devido à faixa longitudinal

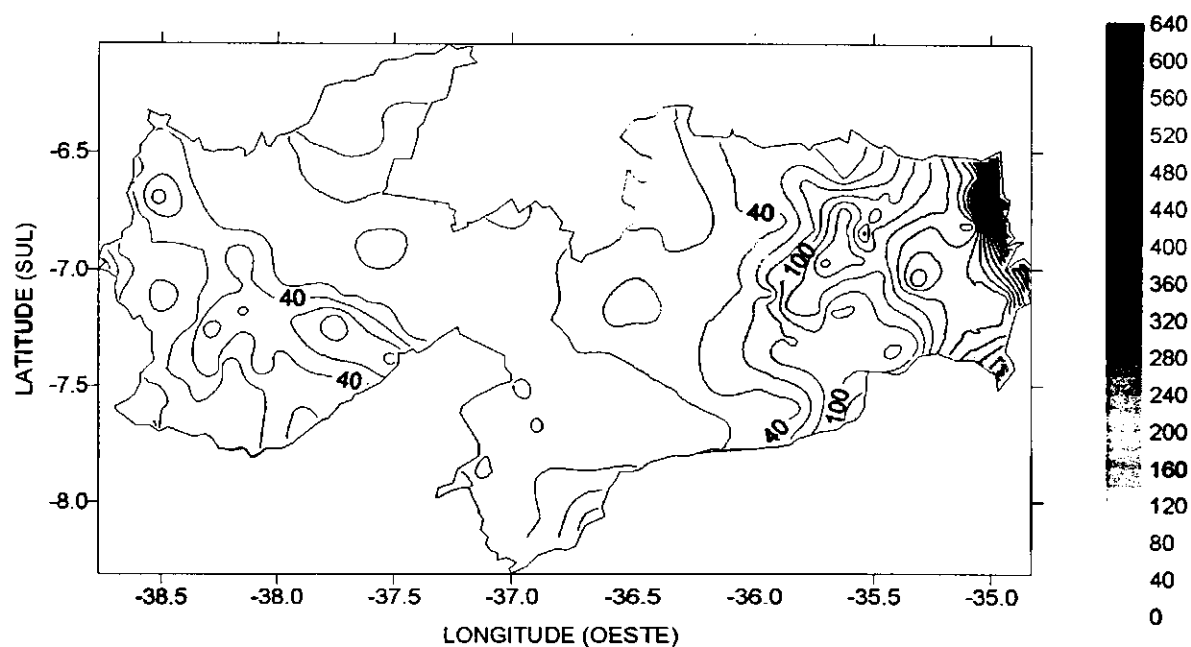


Figura 4.16 – Precipitação acumulada (mm) em junho de 1996 no Estado da Paraíba (Fonte dos dados: LMRS-PB). O intervalo de análise é de 20 mm.

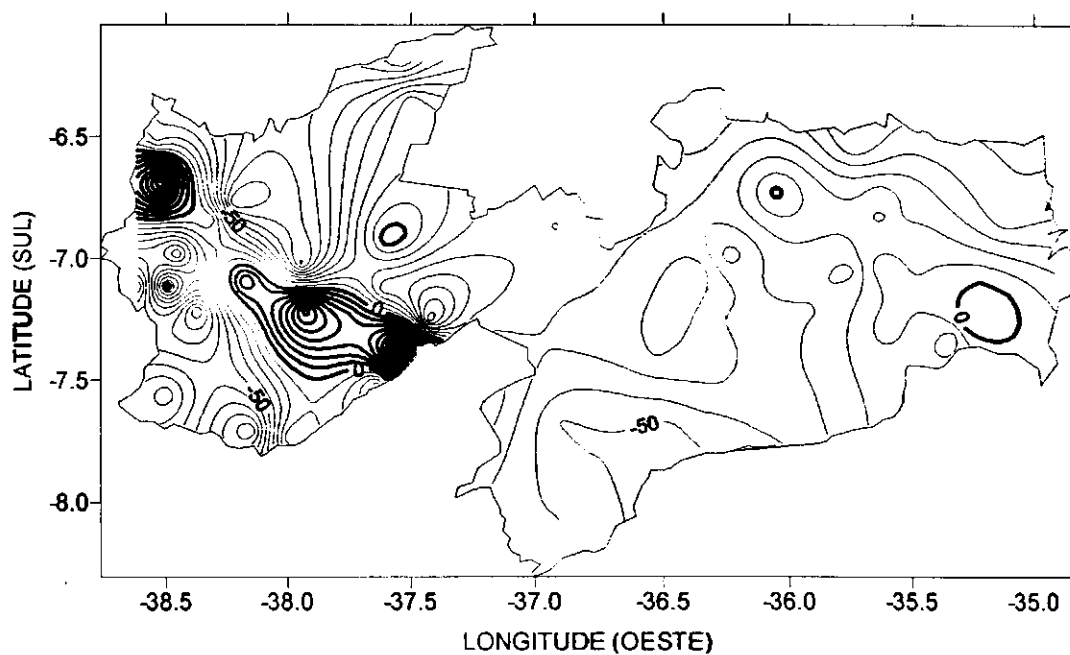


Figura 4.17 – Desvios de precipitação com relação à climatologia (%) para junho de 1996 no Estado da Paraíba (Fonte dos dados: LMRS-PB). O intervalo de análise é de 10 (-10) mm. As linhas espessas (finas) representam desvios positivos (negativos).

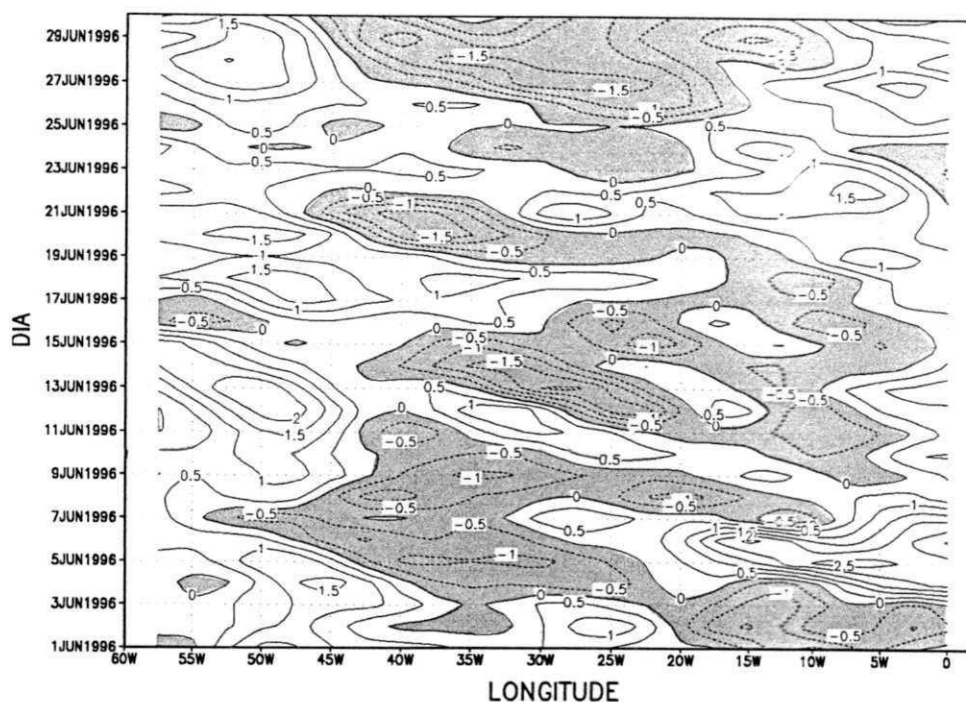


Figura 4.18 – Diagrama tempo-longitude da vorticidade relativa (10^{-5} s^{-1}) em 700 hPa e latitude de 7°S em junho de 1996. As áreas sombreadas assinalam vorticidade ciclônica (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

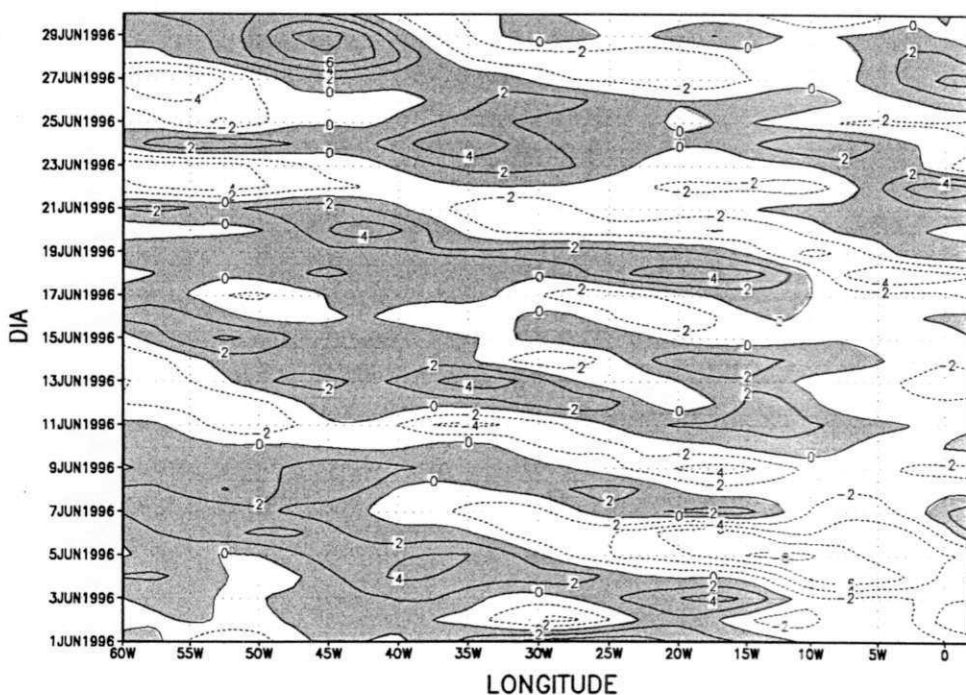


Figura 4.19 – Diagrama tempo-longitude do vento meridional (m/s) em 700 hPa e latitude de 7°S em junho de 1996. As áreas sombreadas assinalam vento de sul (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

utilizada. As características dos distúrbios observados nesse campo estão na Tabela 4.4.

Os distúrbios observados nesse mês têm período médio igual ao de junho de 1995 e suas velocidades variam entre 5° e 19° de longitude por dia.

A nebulosidade associada aos distúrbios (não mostrada) não está tão evidente quanto em 1995. A única área de nebulosidade com deslocamento evidente é aquela associada ao distúrbio que atinge o litoral paraibano no dia 03/06. Observa-se nuvens convectivas profundas sobre o litoral no dia 04.

Tabela 4.3 – Características dos distúrbios observados no diagrama da vorticidade relativa do mês de junho de 1996

Distúrbio	1	2	3	4
Data de início	27/05	07/06	09/06	14/06
Longitude de início	0°	8°W	7,5°W	2,5°W
Longitude do final	55°W	43°W	43°W	47°W
Velocidade (°long./dia)	5,0	17,0	7,0	6,5
Data ao atingir 35°W	03/06	08/06	13/06	19/06
Último dia em 35°W	08/06	11/06	16/06	22/06
Intensidade em 35°W	=	+ intensa	+ intensa	+ intensa

Tabela 4.4 – Características dos distúrbios observados no diagrama da componente meridional do vento do mês de junho de 1996

Distúrbio	1	2	3	4	5
Data de início	02/06	07/06	09/06	16/06	20/06
Longitude de início	16-23°W	25°W	10°W	11°W	2,5°E
Longitude do final	+60°W	+60°W	+60°W	33°W	+60°W
Velocidade (°long./dia)	14	10	8,3	5,7	18,75
Data ao atingir 35°W	03/06	08/06	12/06	17/06	22/06
Último dia em 35°W	06/06	10/06	15/06	20/06	28/06
Intensidade em 35°W	- intenso	- intenso	+ intenso	- intenso	=

4.2.4 – Evolução Temporal de Variáveis Atmosféricas no Litoral do Estado da Paraíba

A análise da evolução temporal da vorticidade relativa na vertical do ponto de coordenadas (7°S, 35°W) (Fig. 4.20) sugere a existência de um padrão oscilatório em praticamente toda a atmosfera mas principalmente entre 450 e 750 hPa devido a sucessão alternada de áreas de vorticidade positiva e negativa ao longo do mês.

A análise do campo da componente meridional do vento (Fig. 4.21) também evidencia a presença de um padrão oscilatório na camada 700-300 hPa através da alternância de sinal dessa componente. Na camada 1000-700 hPa esse padrão se traduz na presença sucessiva de máximos e mínimos da componente de sul que domina essa camada. Observa-se que os máximos ocorrem de um a dois dias após a chegada de um distúrbio em 35°W, sugerindo uma interação positiva entre os alísios e a circulação à frente do eixo do cavado do distúrbio.

A análise da evolução temporal da divergência do fluxo de umidade na vertical do ponto de coordenadas (7°S, 35°W) mostra que na camada 1000-950 hPa há convergência de umidade apenas entre os dias 1 e 8 e entre 11 e 13 (Fig. 4.22), um resultado que contrasta com o domínio da convergência do fluxo de umidade nessa camada em junho de 1995. Por outro lado, junho de 1996 também mostra vários máximos de divergência centrados em torno de 850 hPa. Considerando os dias da chegada dos distúrbios identificados no diagrama da componente meridional do vento (3, 8, 12, 17, 22) observa-se que em três deles (8, 17, 22) há divergência do fluxo de umidade, condição essa que permanece nos dois dias subseqüentes. Por outro lado, o dia 3 apresenta intensa

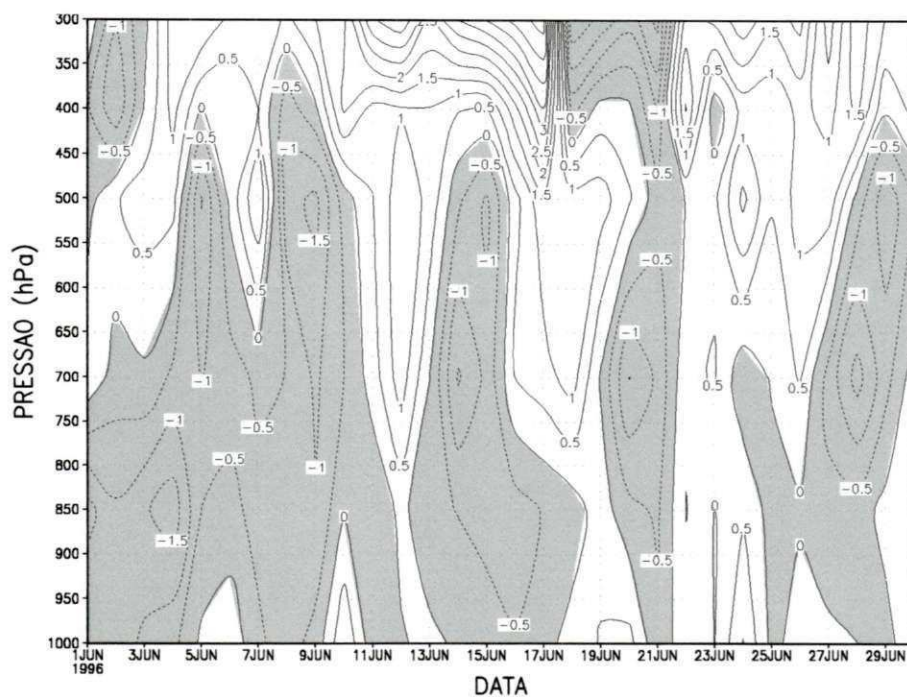


Figura 4.20 Série temporal da vorticidade relativa (10^{-5}s^{-1}) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1996 (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

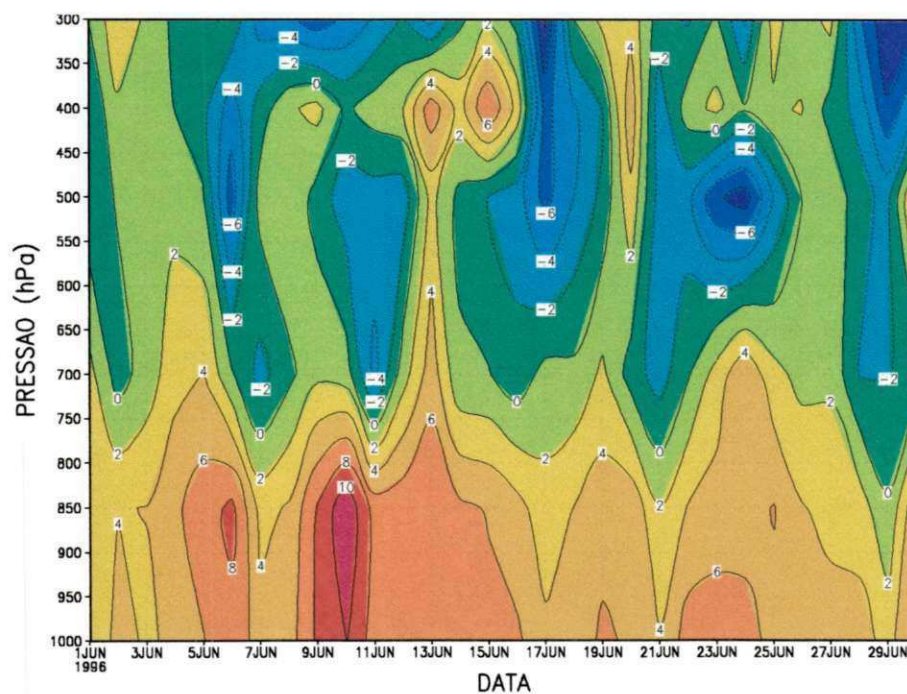


Figura 4.21 Série temporal da componente meridional do vento (ms^{-1}) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1996 (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

convergência que atinge seu máximo no dia 4, quando há convecção profunda na faixa litorânea conforme identificado nas imagens de satélite (não mostradas). O dia 12 também apresenta convergência, embora fraca.

O campo da razão de mistura (Fig. 4.23) mostra coerência com o campo da divergência do fluxo de umidade nos dias 8, 17 e 12, já que os dois primeiros mostram valores de razão de mistura praticamente inalterados e divergência do fluxo de umidade, enquanto que o dia 12 apresenta valores maiores de razão de mistura e convergência de umidade. No caso dos dias 3 e 22 os dois campos parecem estar defasados de 1 dia. Esse mês foi, em geral, mais seco do que junho de 1995, provavelmente em virtude do menor número de dias com convergência de umidade.

Relacionando os dias da chegada de distúrbio identificados no diagrama da componente meridional do vento (3, 8, 12, 17, 22) e o campo do movimento vertical (Fig. 4.24) observa-se uma boa concordância com o campo da razão de mistura no dia 12, já que núcleos de movimento ascendente coincidem com valores mais altos da razão de mistura. Independentemente da chegada de distúrbio, outro dia que mostra boa concordância entre os dois campos é o dia 20 (21) já que um núcleo de movimento descendente (ascendente) coincide com valores mais baixos (altos) de umidade. Esse resultado indica que o transporte vertical de umidade deve ser o principal responsável pelas mudanças nos valores da razão de mistura, particularmente nos dias 20 e 21, embora ele também contribua no dia 12.

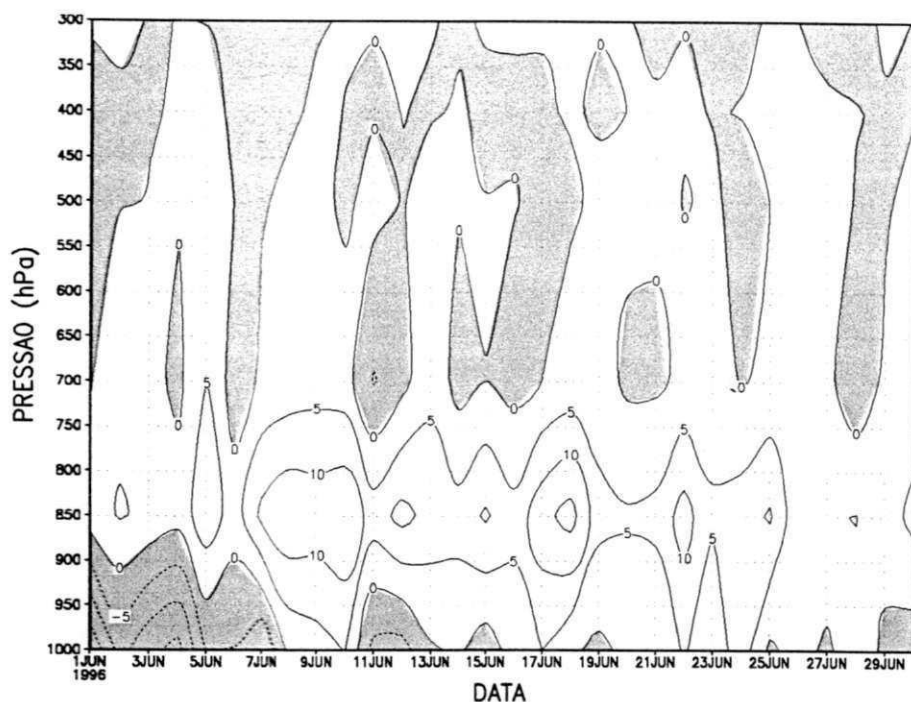


Figura 4.22 – Série temporal da divergência do fluxo de umidade ($10^{-5} \text{gkg}^{-1} \text{s}^{-1}$) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1996 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*)

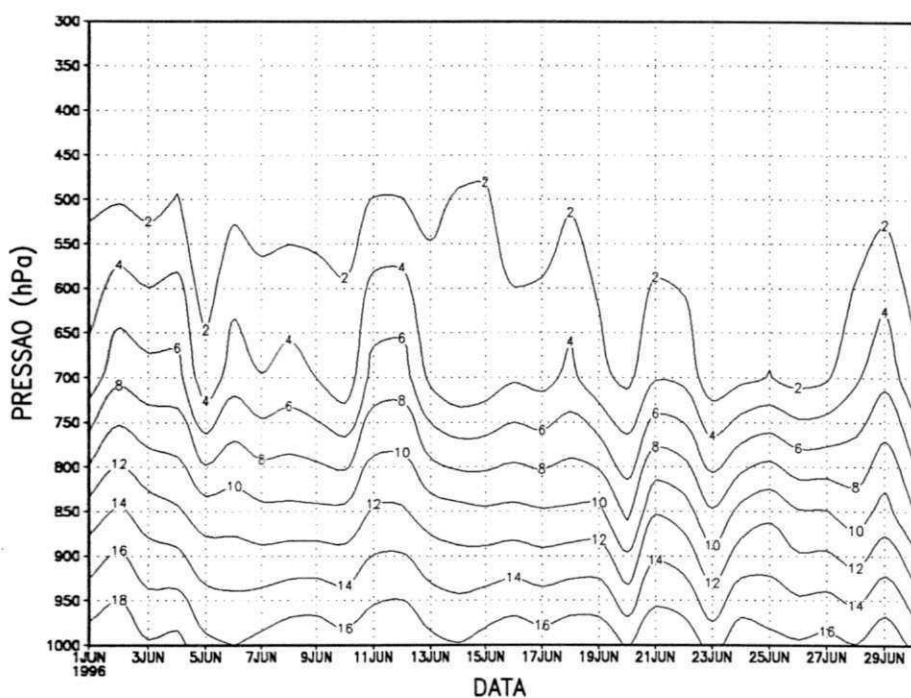


Figura 4.23 – Série temporal da razão de mistura (g/kg) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1996 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*)

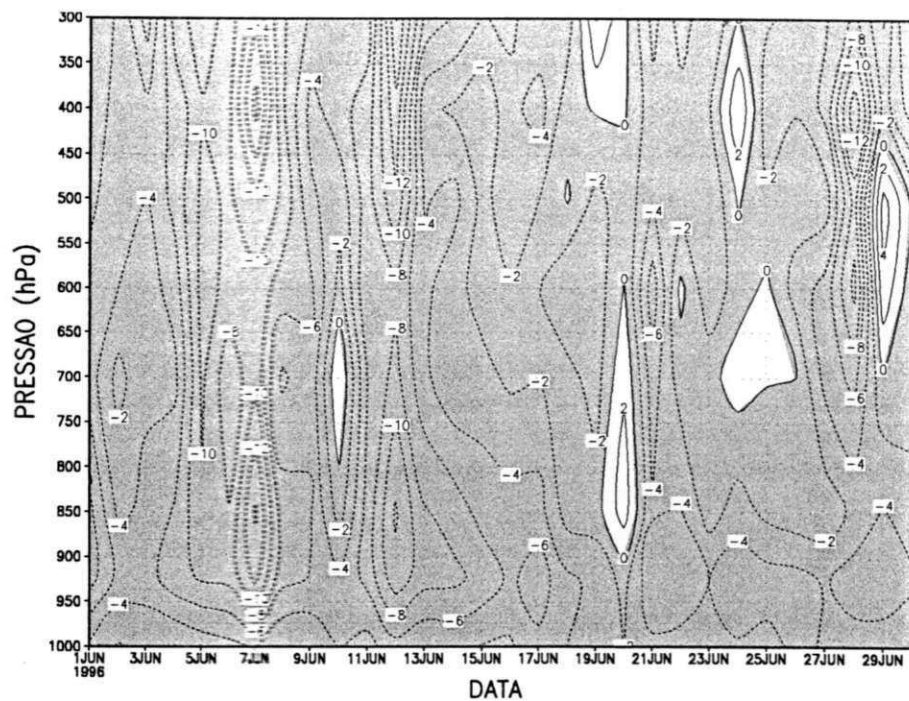


Figura 4.24 – Série temporal do movimento vertical (10^{-2}Pas^{-1}) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1996 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*)

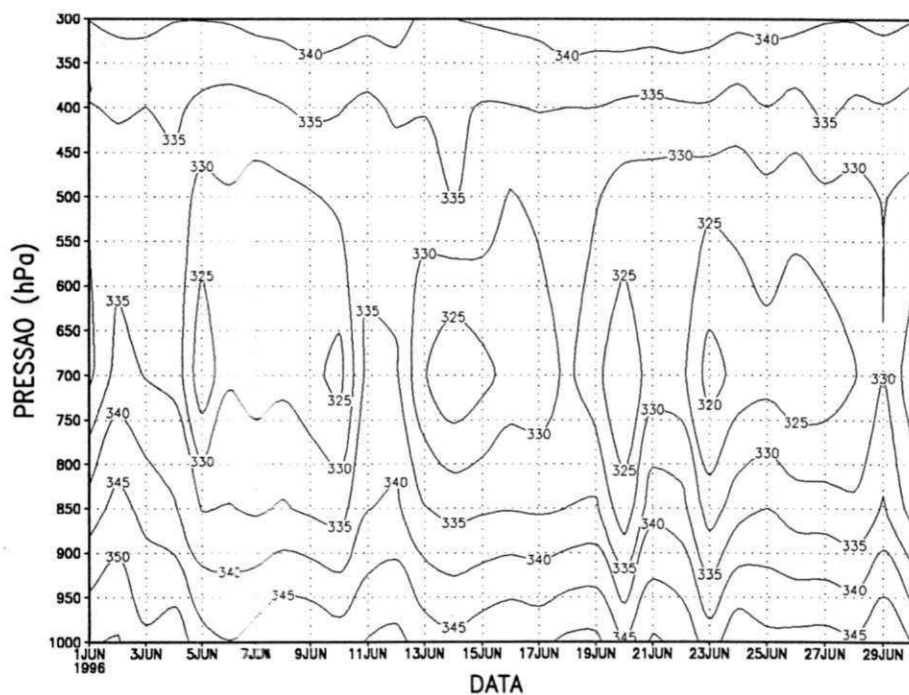


Figura 4.25 – Série temporal da temperatura potencial equivalente (K) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1996 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*)

O campo da temperatura potencial equivalente (Fig. 4.25) apresenta aspectos bem distintos em comparação com junho de 1995, mostrando-se mais perturbado pela presença dos distúrbios. Destaca-se no mês em discussão que: (a) os valores de θ_e são menores na baixa troposfera; (b) o módulo do gradiente vertical de θ_e na camada 1000-850 hPa é menor, o que implica em instabilidade potencial ou convectiva menor; (c) a camada potencialmente instável é mais profunda, sendo que a queda em θ_e é maior nos dias 5, 10, 14, 20 e 23; (d) há coincidência entre a queda acentuada nos valores de θ_e nos dias 10, 20 e 23 e a presença de núcleos ascendentes fracos ou mesmo subsidentes ilustrados na Figura 4.24.

A variação temporal dos totais pluviométricos diários observados em junho de 1996 na estação de João Pessoa (Fig. 4.26) mostra a precipitação concentrada na primeira quinzena, com o maior total diário no dia 04, muito embora parte dessa precipitação possa ter ocorrido no dia 03. Há ainda totais elevados (acima de 30 mm) nos dias 01 e 10. Vale salientar que os totais dos dias 4 e 10 devem estar relacionados com os distúrbios 1 e 2 deste mês. Na segunda quinzena há apenas um valor acima de 10 mm, no dia 21.

A chegada dos distúrbios provocou, em geral, um aprofundamento da camada de instabilidade potencial ou convectiva e um aumento da intensidade dos ventos de sul, principalmente em baixos níveis. O fato da ASAS estar abaixo da média parece contribuir para que este mês seja mais seco que o anterior, provavelmente devido a um transporte de umidade menor. Por outro lado, núcleos de movimento ascendente contribuem para o aumento da umidade na atmosfera, sendo que alguns deles parecem estar relacionados com os distúrbios. Finalmente, o impacto dos distúrbios na precipitação

foi positivo, mas não o suficiente para impedir que este mês ficasse abaixo da média quanto à precipitação.

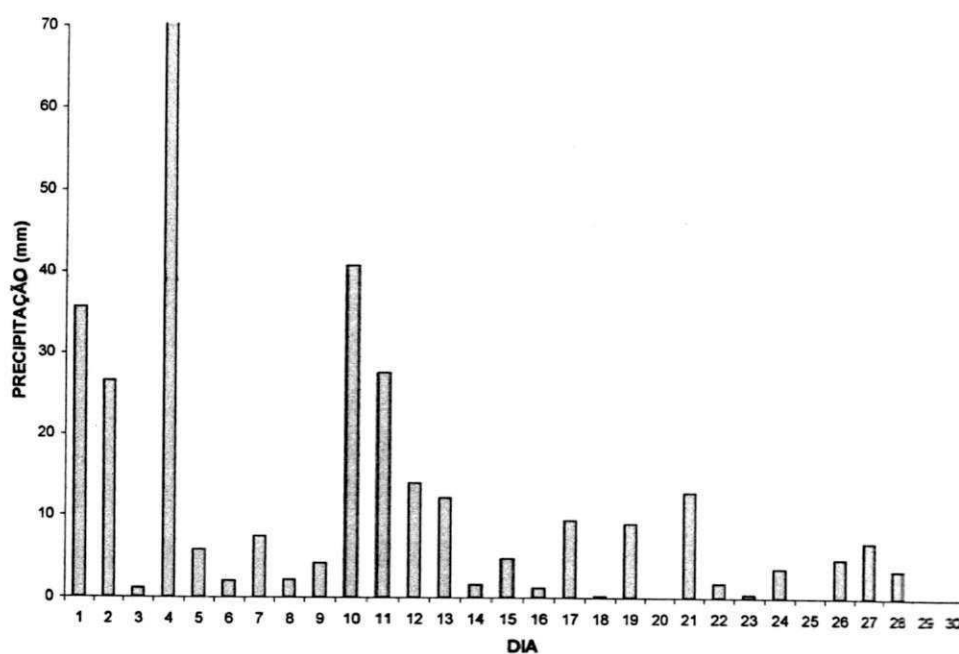


Figura 4.26 – Série temporal dos totais pluviométricos diários observados em João Pessoa – PB (7,08°S; 34,83°W) em junho de 1996 (*Fonte dos dados: LMRS-PB*)

4.3 – JUNHO DE 1997

4.3.1 – Anomalias de Grande Escala

4.3.1.1 – Temperatura da superfície do mar

O campo de anomalias de TSM (Fig. 4.27) mostra claramente o intenso fenômeno El Niño ocorrido em 97-98 através das anomalias positivas superiores a 1°C que se estendem ao longo de todo o Pacífico Equatorial e costa oeste da América do Sul onde estão os núcleos mais intensos (acima de 4°C). Observa-se também anomalias positivas a oeste da América do Norte. No Pacífico Sul há duas áreas de anomalias de TSM negativas, uma no PTO e outra ao sul de 30°S . Contrariamente ao observado em junho de 1995 e 1996, este mês apresenta anomalias negativas em quase todo o ATS com núcleos mais intensos localizados próximo ao continente africano, enquanto que no ATN há anomalias negativas (oeste) e positivas (leste). Há ainda anomalias positivas no Atlântico, ao sul de 30°S .

4.3.1.2 – Pressão ao nível médio do mar

No campo dos desvios da pressão ao nível médio do mar (Fig. 4.28) os núcleos negativos indicam pressão abaixo da média na área da ASAS e ASAN (altas subtropicais menos intensas) enquanto que o núcleo positivo sugere que o cavado equatorial está mais fraco. No Pacífico Sul a alta subtropical também mostra intensidade abaixo da média, uma característica típica de eventos de El Niño. Nas latitudes ao sul de 50°S , os valores positivos indicam que o gradiente de pressão nessa área está mais fraco.

Assim, esse campo de desvios expressa o enfraquecimento geral da circulação atmosférica à superfície na área analisada.

4.3.2 – Precipitação no Estado da Paraíba

As Figuras 4.29 e 4.30 evidenciam que em junho de 1997 a precipitação concentrou-se no leste da Paraíba como acontece normalmente nesta época do ano, apesar dos totais bem abaixo da média. Os maiores desvios negativos ocorreram no litoral norte e adjacências, exatamente onde estão alguns dos maiores totais registrados. Outro núcleo importante está no extremo oeste do agreste, sobre a serra da Borborema, onde também foram registrados alguns dos totais mais elevados e desvios igualmente altos. A configuração geral desse campo de desvios é coerente com os resultados de Silva (1996) e Silva et al. (1996) que mostraram haver diminuição da precipitação sobre todo o Estado em cinco anos de episódios intensos do El Niño – Oscilação do Sul.

4.3.3 – Identificação e Propriedades dos Distúrbios

A análise do diagrama tempo-longitude da vorticidade relativa (Fig. 4.31) em 700 hPa e latitude de 7°S para junho de 1997 mostra apenas um núcleo ciclônico fraco, com atuação no meio do mês, cuja inclinação no diagrama indica propagação para oeste a partir do Oceano Atlântico. Esse núcleo tem início no dia 11 na longitude de 10°W e atinge 35°W no dia 17. Os valores permanecem negativos nessa longitude até o dia 20. O núcleo ciclônico que ocorre posteriormente sugere propagação para oeste somente a partir da longitude de 35°W, razão pela qual não é considerado.

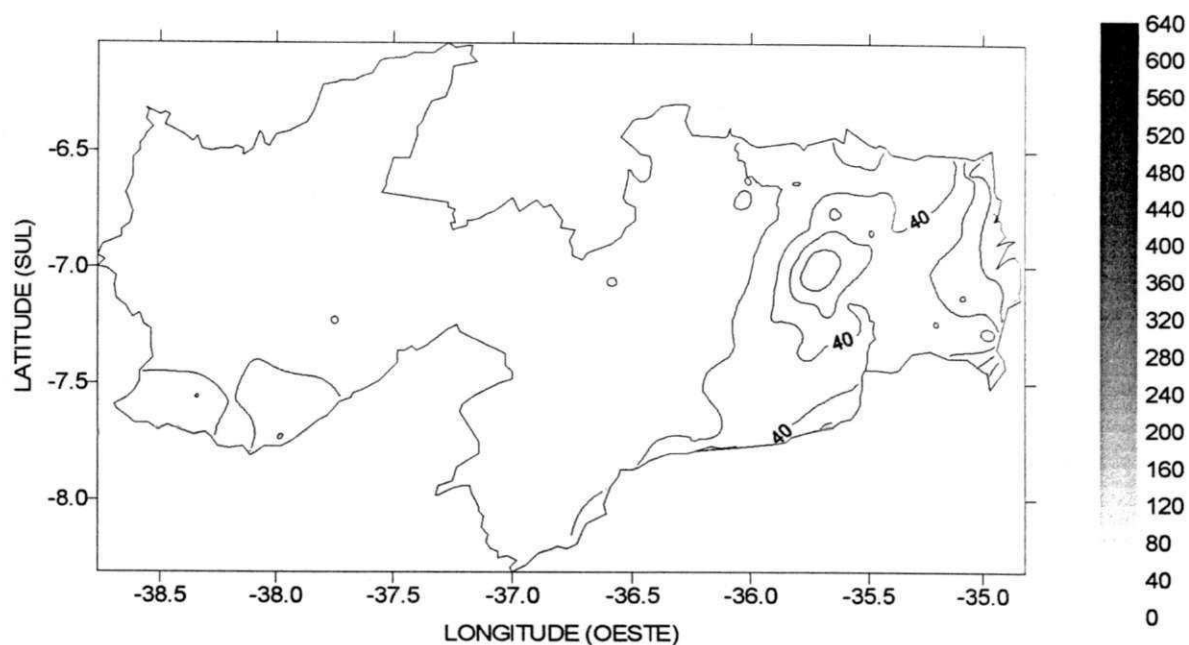


Figura 4.29 – Precipitação acumulada (mm) em junho de 1997 no Estado da Paraíba (Fonte dos dados: LMRS-PB). O intervalo de análise é de 20 mm.

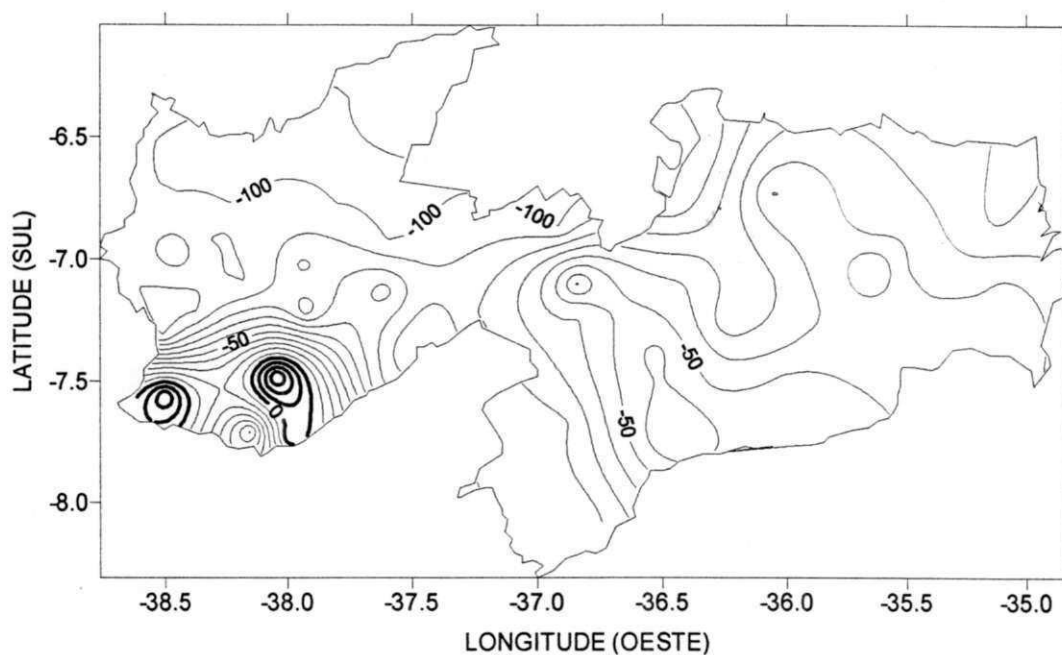


Figura 4.30 – Desvios de precipitação com relação à climatologia (%) para junho de 1997 no Estado da Paraíba (Fonte dos dados: LMRS-PB). O intervalo de análise é de 10 (-10) mm. As linhas espessas (finas) representam desvios positivos (negativos).

O diagrama tempo-longitude da componente meridional do vento (Fig. 4.32) apresenta várias áreas, isoladas ou interligadas, com componente meridional de sul. Uma delas, que cobre toda a faixa longitudinal de 0° - 48° W no dia 11, parece corresponder a três áreas negativas isoladas vistas na Figura 4.31. Essa área não foi considerada, apesar de interceptar a longitude de 35° W, já que não apresenta inclinação que permita caracterizá-la como um distúrbio que se propaga. A mesma observação pode ser feita em relação à área negativa que ocorre no início do mês. Assim, considerou-se que apenas um núcleo apresenta inclinação indicativa de propagação para oeste: aquele que tem início no dia 5 na longitude de $2,5^{\circ}$ W e atinge 35° W no dia 14. Após sua chegada o litoral paraibano permanece com componente de sul até o dia 18. Esse núcleo, que alcança longitudes a oeste de 60° W, tem velocidade de propagação de $3,6^{\circ}$ de longitude por dia.

Foi a ausência quase total nos diagramas de áreas ciclônicas/áreas com ventos de sul com inclinação que indicasse propagação para oeste que motivou a escolha de junho de 1997 como um mês de contraste em relação a junho de 1995 e 1996.

O distúrbio detectado nos diagramas tem nebulosidade associada que atinge o litoral no dia 15 onde se mantém relativamente organizada até o dia 18.

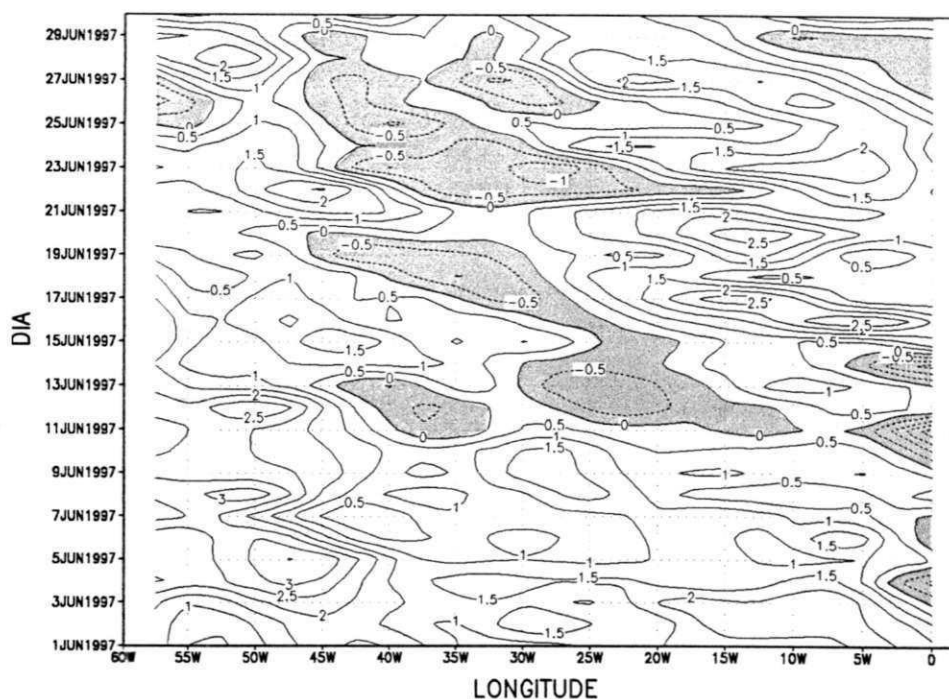


Figura 4.31 – Diagrama tempo-longitude da vorticidade relativa (10^{-5}s^{-1}) em 700 hPa e latitude de 7°S em junho de 1997. As áreas sombreadas assinalam vorticidade ciclônica (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

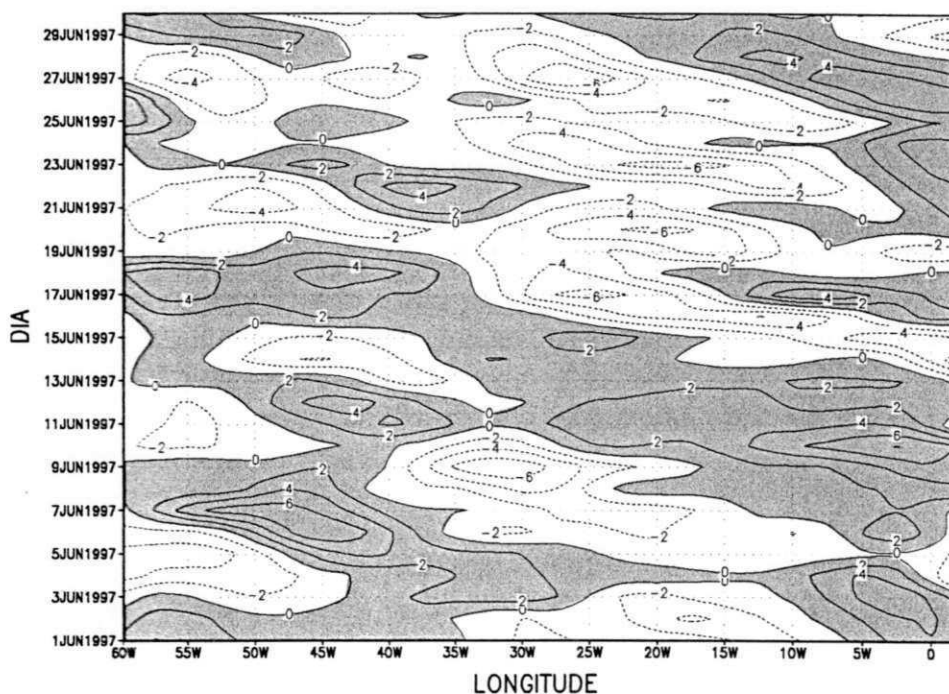


Figura 4.32 – Diagrama tempo-longitude do vento meridional (m/s) em 700 hPa e latitude de 7°S em junho de 1997. As áreas sombreadas assinalam vento de sul (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

4.3.4 – Evolução Temporal de Variáveis Atmosféricas no Litoral do Estado da Paraíba

A análise da evolução temporal da vorticidade relativa (Fig. 4.33) revela predomínio de áreas anticiclônicas, mais do que em qualquer outro mês estudado. Nota-se valores significativos de vorticidade ciclônica somente a partir do dia 15. Há um padrão aparentemente ondulatório na camada 900-650 hPa entre os dias 11 e 23 associado aos núcleos negativos vistos na Figura 4.31.

O campo da componente meridional do vento (Fig. 4.34) revela alternância de sinal ao longo de todo o mês, principalmente acima de 750 hPa. Na camada 1000-750 hPa há predominância de ventos de sul que se estendem ao longo de toda a troposfera em alguns períodos. Um deles, de 13 a 15, está relacionado com o distúrbio detectado no diagrama da componente meridional do vento (Fig. 4.32).

O campo da divergência do fluxo de umidade (Fig. 4.35) mostra núcleos fracos, em geral. O núcleo de convergência (fraca) melhor definido na camada 1000-925 hPa ocorre no início do mês, enquanto que há divergência forte entre os dias 5 e 10. Contrariamente ao observado em junho de 1995 e 1996, nota-se a ausência quase total de núcleos bem definidos de divergência acima de 925 hPa. Não há sinal do distúrbio neste campo.

A análise do campo da razão de mistura (Fig. 4.36) evidencia uma atmosfera menos úmida do que em 1995 e 1996. Esse campo mostra dias com queda acentuada de umidade: 6, 14 e 18 nos níveis abaixo de 550 hPa, 12 e 14 abaixo de 750 hPa.

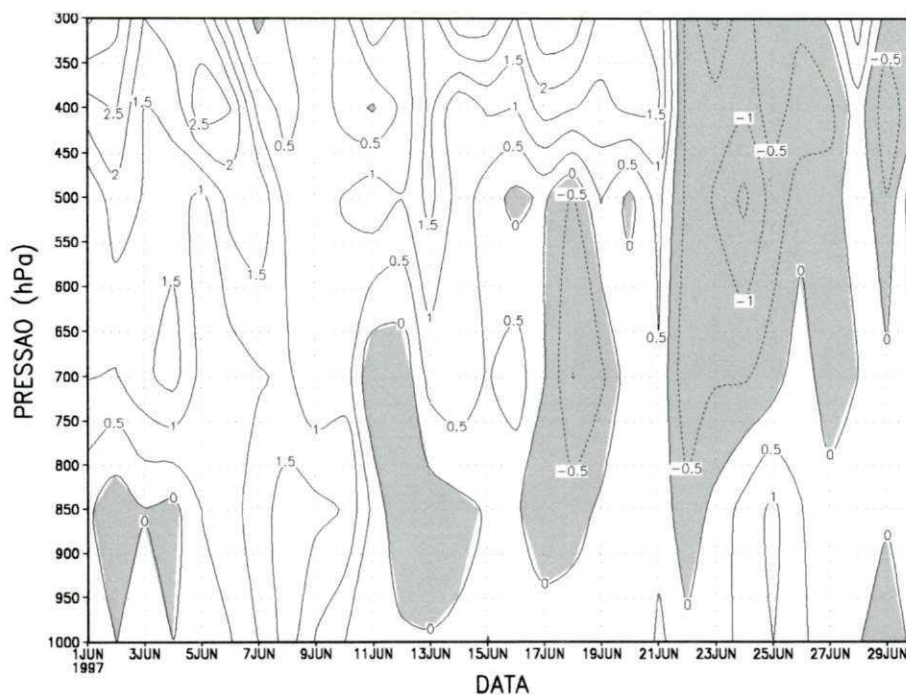


Figura 4.33 Série temporal da vorticidade relativa (10^{-5}s^{-1}) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1997 (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

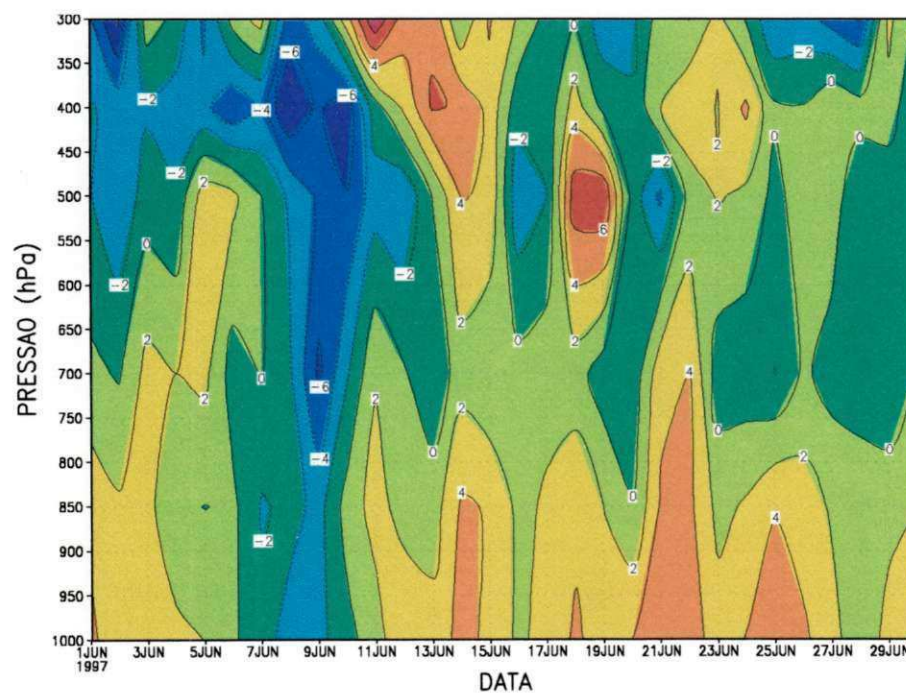


Figura 4.34 Série temporal da componente meridional do vento (ms^{-1}) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1997 (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

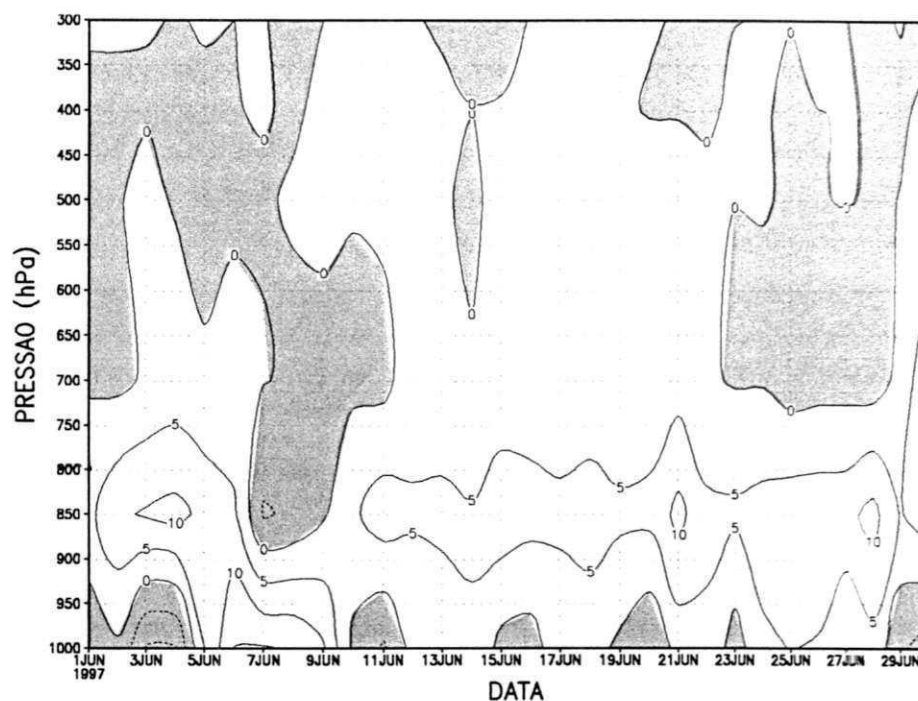


Figura 4.35 – Série temporal da divergência do fluxo de umidade ($10^{-5} \text{gkg}^{-1} \text{s}^{-1}$) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1997 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*)

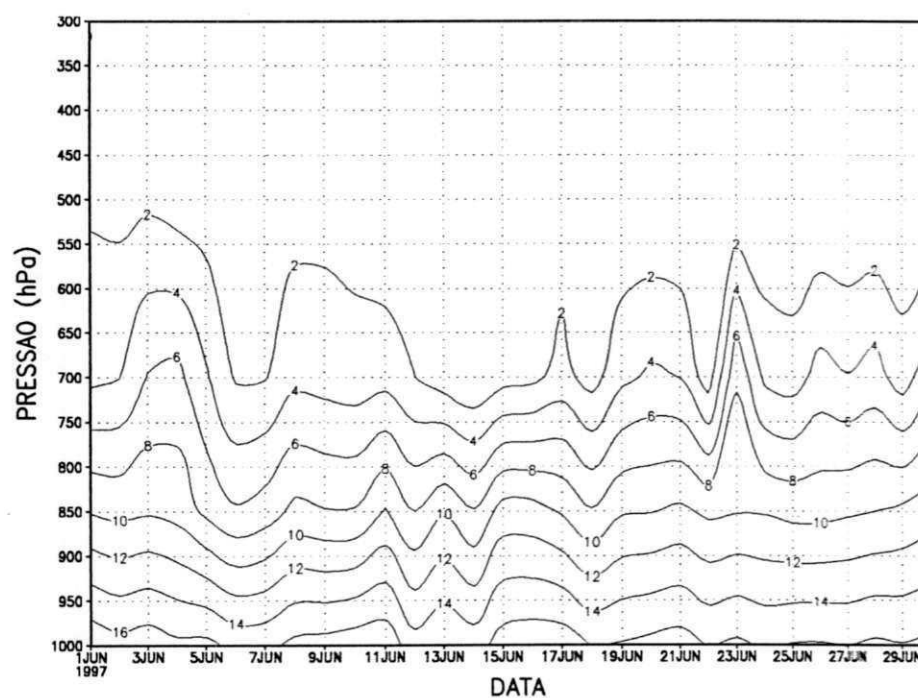


Figura 4.36 – Série temporal da razão de mistura (g/kg) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1997 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*)

Os dias com umedecimento evidente são 11, 13 e 16. Essas mudanças na razão de mistura não são provocadas por divergência do fluxo de umidade mas sim pelo movimento vertical (Fig. 4.37) já que há, de maneira geral, diminuição (aumento) da umidade em áreas de movimento descendente (ascendente).

Neste mês o campo da temperatura potencial equivalente (Fig. 4.38) também apresenta dias que se destacam por apresentar queda nos valores de θ_e numa camada mais profunda (12, 14, 18 e 22). De maneira geral, eles coincidem com dias que apresentam movimento descendente na Figura 4.37. O dia 14 corresponde ao da chegada do distúrbio em 35°W detectada no diagrama da componente meridional do vento (Fig. 4.32) enquanto que 18 é o dia posterior ao da chegada do distúrbio identificado no diagrama da vorticidade relativa. Os valores de θ_e são ligeiramente menores neste mês em comparação com junho de 1996, enquanto que a intensidade do gradiente vertical de θ_e se situa entre as de 1995 e 1996. Outra característica marcante é o fato de que a atmosfera se apresenta visivelmente mais quente e mais úmida na primeira quinzena do mês.

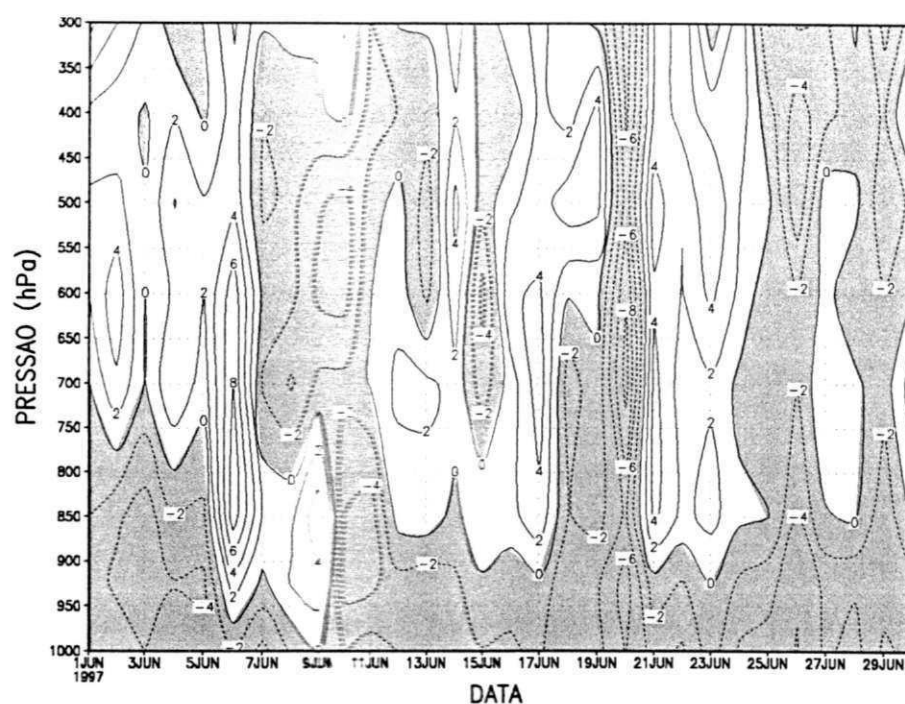


Figura 4.37 – Série temporal do movimento vertical (10^{-2}Pas^{-1}) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1997 (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

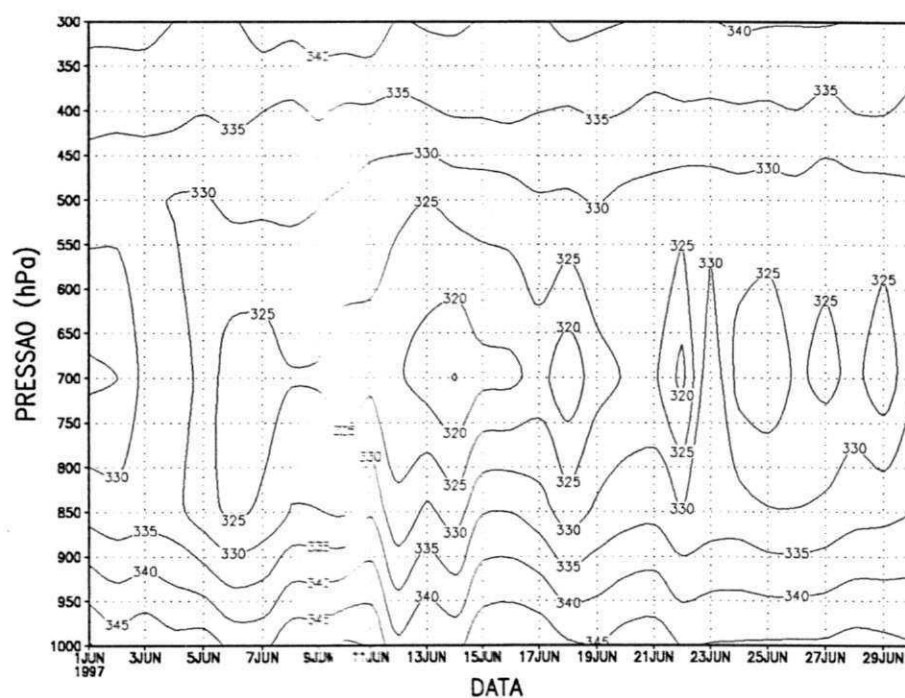


Figura 4.38 – Série temporal da temperatura potencial equivalente (K) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1997 (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

A Figura 4.39 evidencia que os totais pluviométricos diários na estação de João Pessoa estiveram acima de 10 mm apenas nos dias 8 e 23, o que contrasta com os totais ilustrados nas Figuras 4.13 e 4.26.

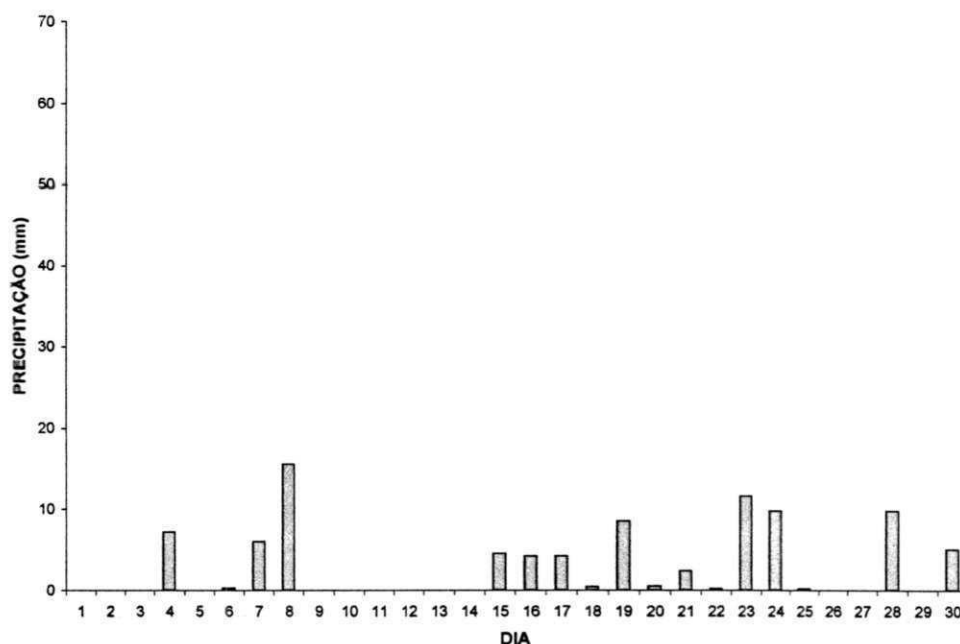


Figura 4.39 – Série temporal dos totais pluviométricos diários observados em João Pessoa – PB (7,08°S; 34,83°W) em junho de 1997 (*Fonte dos dados: LMRS-PB*)

Os resultados apresentados permitem concluir que diversos aspectos foram desfavoráveis à ocorrência de precipitação no Estado da Paraíba em junho de 1997: o número menor de distúrbios, as condições de El Niño intenso no Pacífico Equatorial, as anomalias de TSM negativas no ATS, o ASAS menos intenso do que a média e a ausência quase total de convergência de umidade nos baixos níveis.

4.4 – JUNHO DE 1999

4.4.1 – Anomalias de Grande Escala

4.4.1.1 – Temperatura da superfície do mar

O campo das anomalias de TSM (Fig. 4.40) evidencia a presença do fenômeno La Niña através dos valores negativos em quase todo o Pacífico Equatorial e área costeira do Peru e Equador. Observa-se que as anomalias têm magnitudes consideravelmente menores do que as do El Niño ocorrido em 1997 (Fig. 4.27), uma diferença que é típica desses fenômenos. Há predominância de anomalias negativas (positivas) no restante do Pacífico Norte (Sul). No ATS, o padrão de anomalias positivas é praticamente o oposto daquele observado em junho de 1997, sendo que os núcleos têm magnitudes comparáveis àquelas observadas em junho de 1995 e 1996 (Figs. 4.1 e 4.14). Um núcleo negativo se estende desde o trecho central da costa leste sul-americana, em latitudes médias do hemisfério sul. Observa-se anomalias positivas em quase todo o Atlântico Norte.

4.4.1.2 – Pressão ao nível médio do mar

O campo dos desvios da pressão ao nível médio do mar (Fig. 4.41) para junho de 1999 é, em linhas gerais, semelhante ao de junho de 1996 (Fig. 4.15) quando a ASAS (ASAN) apresenta intensidade abaixo (acima) da média. Um núcleo negativo centrado em latitudes médias domina a área central e leste do Atlântico Sul, ao norte de 50°S, enquanto que a área oeste apresenta anomalias positivas (pequenas na faixa latitudi-

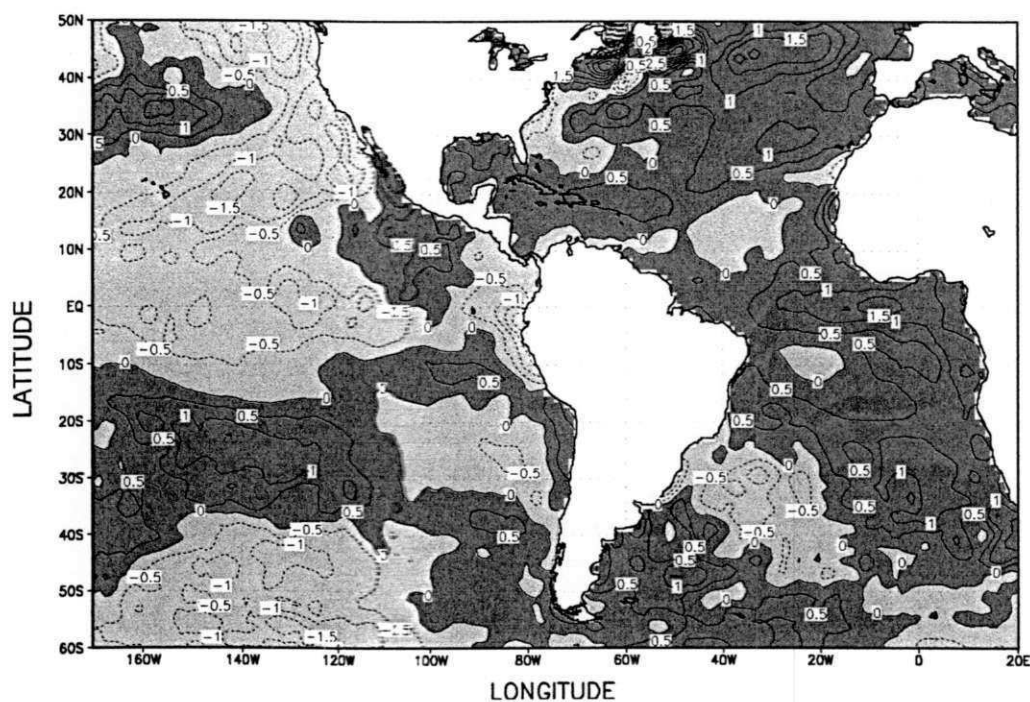


Figura 4.40 – Anomalias da temperatura da superfície do mar em junho de 1999. O intervalo de análise é de 0,5°C. As áreas sombreadas mais claras (escuras) assinalam anomalias negativas (positivas). (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

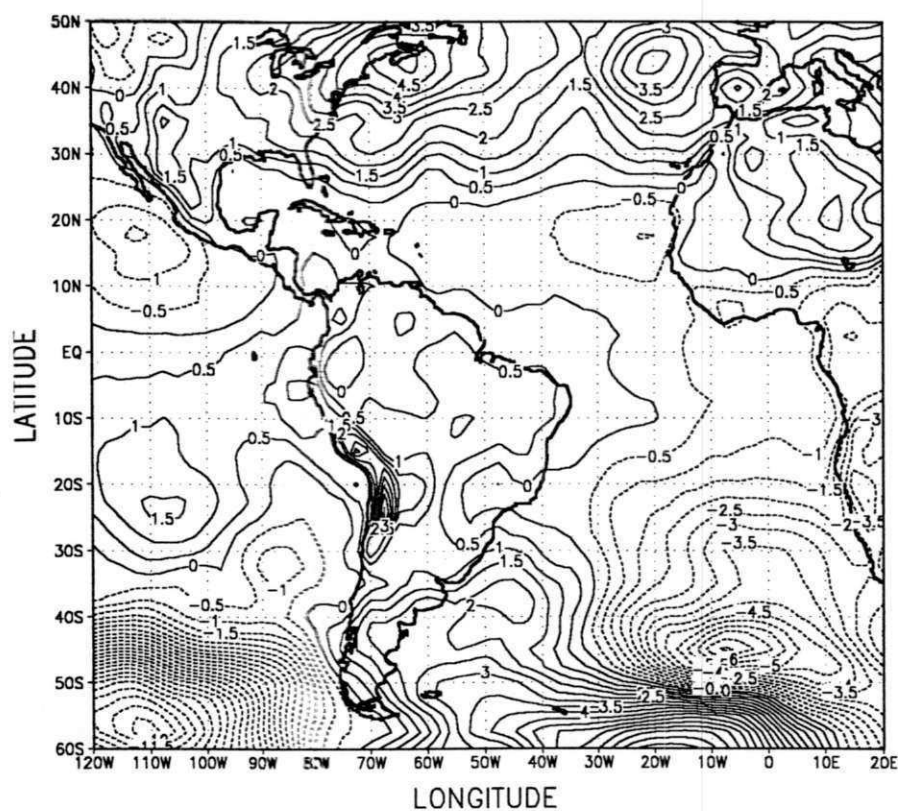


Figura 4.41 – Desvios da pressão ao nível médio do mar em junho de 1999. O intervalo de análise é de 0,5 hPa. (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

nal do Nordeste). Há anomalias positivas em torno do equador e na maior parte do Pacífico Tropical Sul, o que sugere que a alta subtropical está mais intensa do que a média, uma característica típica de anos de La Niña.

4.4.2 – Precipitação no Estado da Paraíba

Diferentemente dos meses discutidos anteriormente, junho de 1999 não apresentou totais pluviométricos significativos no sertão paraibano (Fig. 4.42), o que ocasionou os desvios mais negativos do Estado (Fig. 4.43). Semelhante aos meses anteriores, os maiores totais ocorreram no litoral e agreste, sobretudo no litoral, apesar de estarem muito abaixo da média climatológica conforme comprova o campo dos desvios. Observa-se que os totais mais próximos da média ocorreram no sul do Estado, em torno da longitude de $36,5^{\circ}\text{W}$ (Fig. 4.43).

4.4.3 – Identificação e Propriedades dos Distúrbios

No diagrama tempo-longitude da vorticidade relativa no nível de 700 hPa e latitude de 7°S (Fig. 4.44) não há propagação evidente de distúrbios. A longitude de referência (35°W) apresenta vorticidade ciclônica durante quase toda a primeira quinzena, enquanto que áreas ciclônicas (sem propagação) e anticiclônicas se alternam nessa longitude no decorrer da segunda quinzena do mês.

No diagrama tempo-longitude da componente meridional do vento (Fig. 4.45) identifica-se 3 distúrbios com propagação evidente que atingem a costa paraibana nos dias 3, 7 e 21. É possível observar que todos os distúrbios apresentam intensificação à

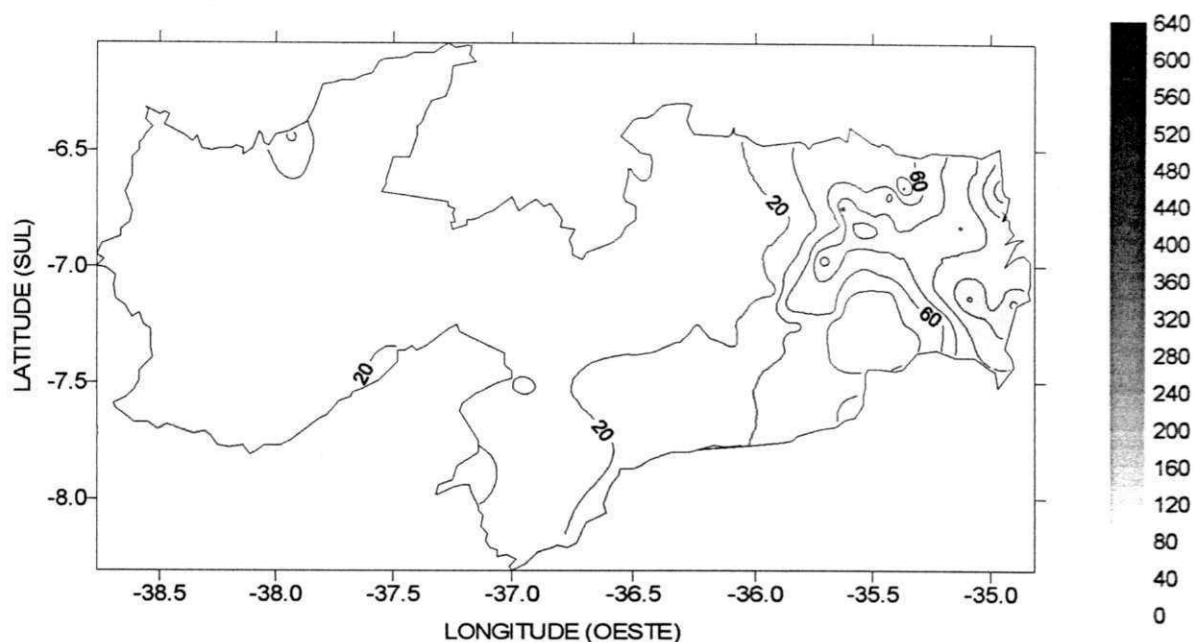


Figura 4.42 – Precipitação acumulada (mm) em junho de 1999 no Estado da Paraíba (Fonte dos dados: LMRS-PB). O intervalo de análise é de 20 mm.

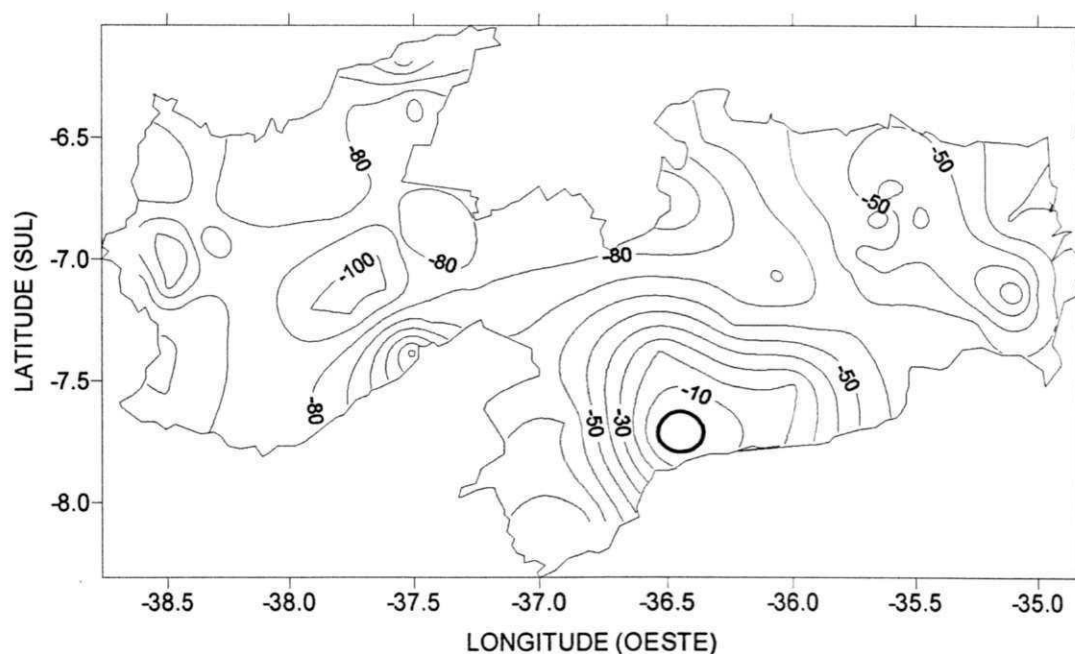


Figura 4.43 – Desvios de precipitação com relação à climatologia (%) para junho de 1999 no Estado da Paraíba (Fonte dos dados: LMRS-PB). O intervalo de análise é de 10 (-10) mm. As linhas espessas (finas) representam desvios positivos (negativos).

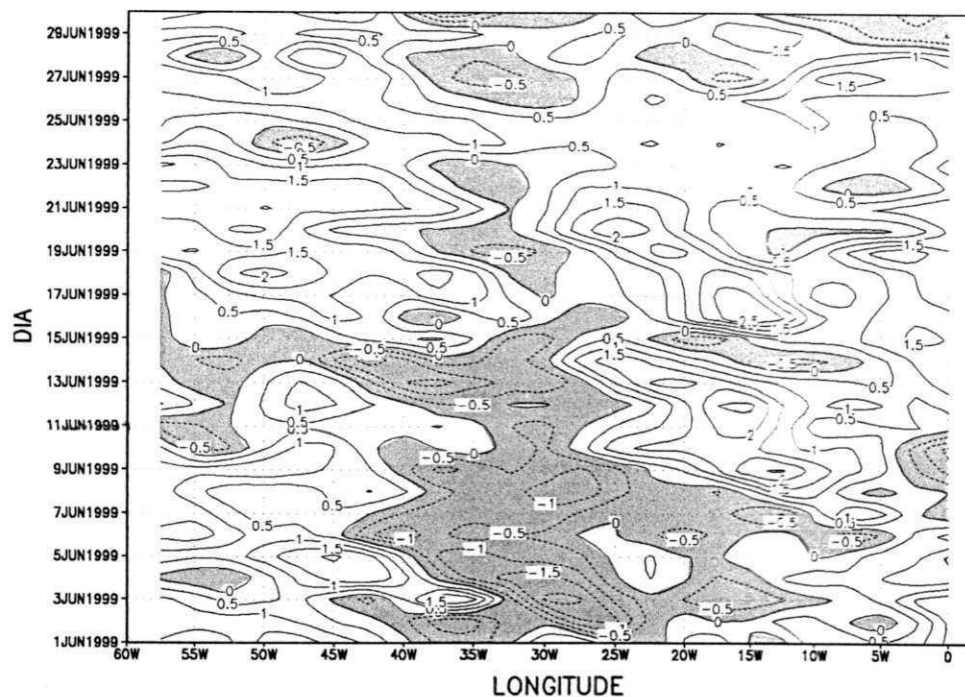


Figura 4.44 – Diagrama tempo-longitude da vorticidade relativa (10^{-5}s^{-1}) em 700 hPa e latitude de 7°S em junho de 1999. As áreas sombreadas assinalam vorticidade ciclônica (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

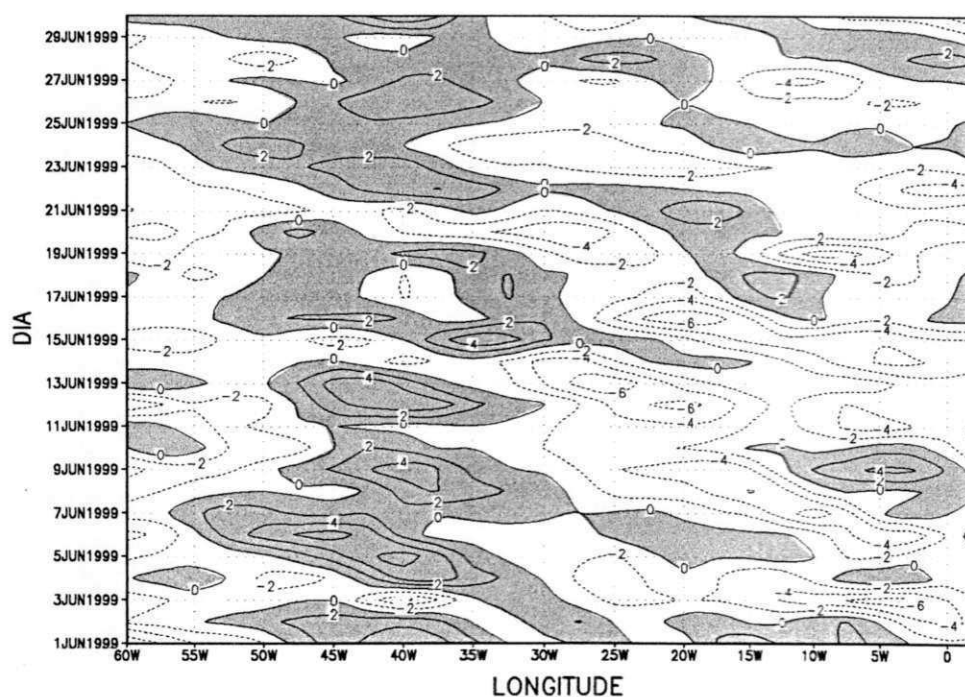


Figura 4.45 – Diagrama tempo-longitude do vento meridional (m/s) em 700 hPa e latitude de 7°S em junho de 1999. As áreas sombreadas assinalam vento de sul (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

medida que aproximavam-se do continente. Suas características constam da Tabela 4.5. Eles têm período médio de 9 dias e velocidades que variam entre 5° e 8° de longitude por dia.

Tabela 4.5 – Características dos distúrbios observados no diagrama da componente meridional do vento do mês de junho de 1999

Distúrbio	1	2	3
Data de início	01/06	05/06	16/06
Longitude de início	24°W	20°W	8°W
Longitude do final	57°W	49°W	60°W
Velocidade (°long./dia)	5,5°	7,5°	5,4°
Data ao atingir 35°W	03/06	07/06	21/06
Último dia em 35°W	06/06	10/06	23/06
Intensidade em 35°W	+ intenso	+ intenso	+ intenso

O primeiro distúrbio é o único que apresenta área de nebulosidade associada com evidente propagação para oeste. No distúrbio 3 a nebulosidade é pouco evidente enquanto que o distúrbio 2 não pode ser identificado nas imagens de satélite.

4.4.4 – Evolução Temporal de Variáveis Atmosféricas no Litoral do Estado da Paraíba

A análise da evolução temporal da vorticidade relativa na vertical do ponto de coordenadas (7°S, 35°W) (Fig. 4.46) revela claramente uma alternância de sinal abaixo de 500 hPa que evidencia um padrão ondulatório, embora não esteja associado a

propagação para oeste no diagrama da vorticidade relativa (Fig. 4.44). Observa-se ainda que nos dias que marcam a chegada dos distúrbios 1 e 3 (03 e 21) há núcleos de vorticidade anticiclônica em 700 hPa enquanto que há vorticidade ciclônica nos dias que marcam a mudança de sinal desses distúrbios (06 e 23).

No campo da componente meridional do vento (Fig. 4.47) observa-se que os distúrbios têm sinal evidente também acima e abaixo de 700 hPa: acima há mudança de sinal enquanto que abaixo ocorre a formação de máximos de componente de sul.

O campo da divergência do fluxo de umidade (Fig. 4.48) mostra que há valores significativos de convergência de umidade na camada 1000-900 hPa no dia 3 e nos períodos 9-12 e 15-17, um número de dias que é comparável ao ocorrido em junho de 1996 (Fig. 4.22). O mês em discussão também apresenta máximos de divergência, mas que diferem em relação aos de 1996 por se estenderem até o nível de 1000 hPa. Considerando os dias da chegada dos distúrbios identificados no diagrama da componente meridional do vento (3, 7, 21) observa-se que em dois deles (7 e 21) há divergência do fluxo de umidade, que enfraquece nos dias subseqüentes.

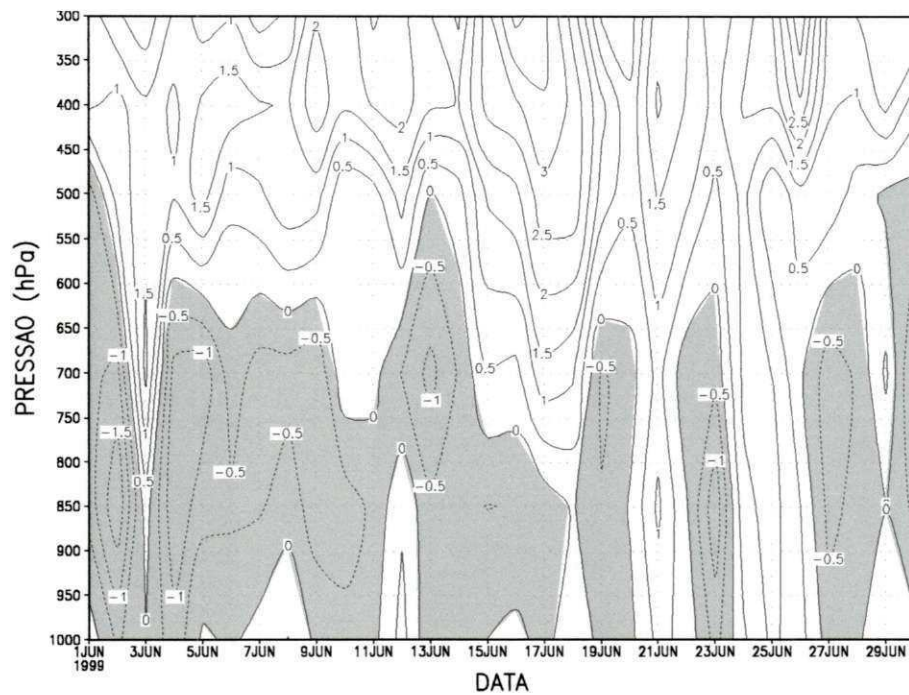


Figura 4.46 Série temporal da vorticidade relativa (10^{-5}s^{-1}) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1999 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*)

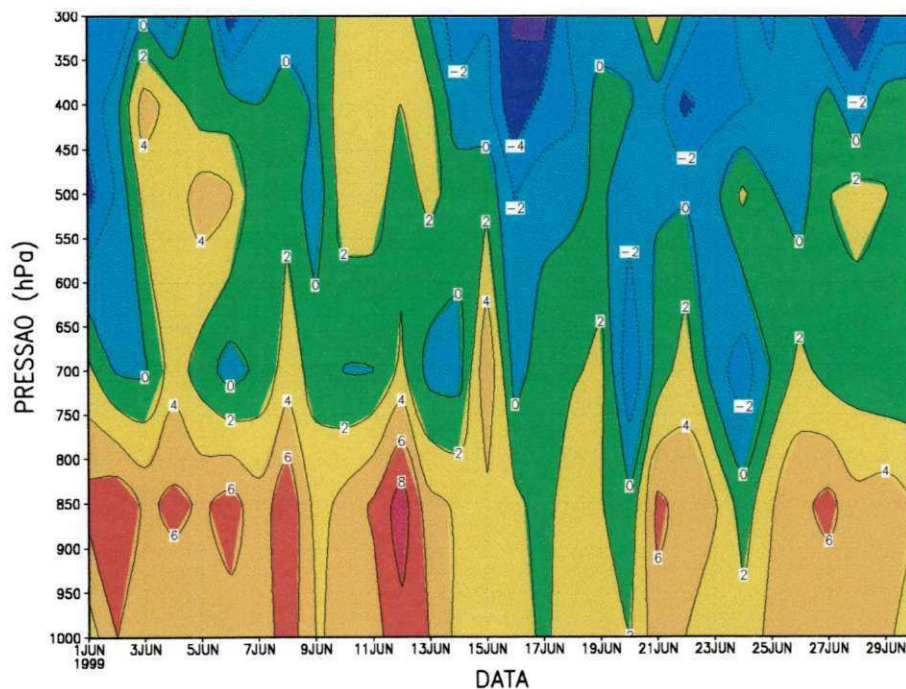


Figura 4.47 Série temporal da componente meridional do vento (ms^{-1}) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1999 (*Fonte dos dados: NCEP/NCAR*)

O campo da razão de mistura (Fig. 4.49) mostra que junho de 1999 é o mês mais seco dentre os quatro estudados. Ele mostra coerência com o da divergência do fluxo de umidade já que os dias com valores maiores de razão de mistura (3, 10, 15-16, 25, 27-28) correspondem àqueles com convergência de umidade enquanto que os dias com valores menores (7, 13-14, 21, 26) mostram divergência de umidade. É interessante observar que ocorre a chegada de distúrbio nos dias 3, 7 e 21.

O campo do movimento vertical (Fig. 4.50) também mostra correspondência com o campo da razão de mistura já que, de maneira geral, há movimento ascendente (descendente) nos dias com umedecimento (secagem).

A análise do campo da temperatura potencial equivalente (Fig. 4.51) evidencia que: (a) os valores de θ_e e do módulo do seu gradiente vertical são os menores dentre os quatro meses analisados; (b) a profundidade da camada potencialmente instável é comparável a de 1996; a queda em θ_e é maior nos dias 2, 7, 13 e 21.

A série temporal da precipitação ocorrida na estação de João Pessoa (Fig. 4.52) evidencia que dos três dias com maiores totais pluviométricos (4, 11 e 28) apenas o dia 28, justamente o que apresentou o maior total, não estava relacionado diretamente com um distúrbio.

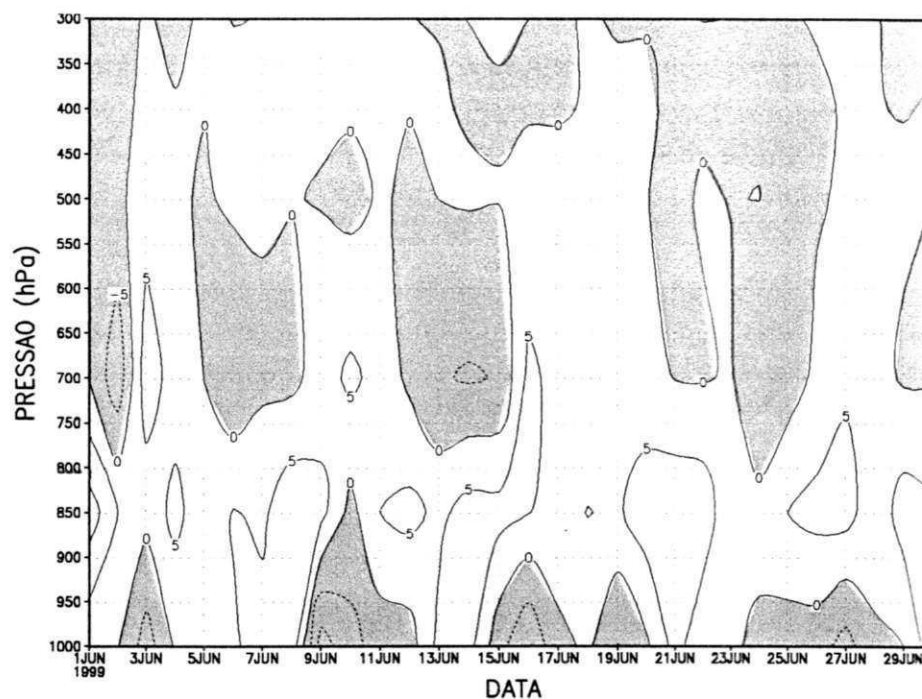


Figura 4.48 – Série temporal da divergência do fluxo de umidade ($10^{-5} \text{gkg}^{-1} \text{s}^{-1}$) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1999 (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

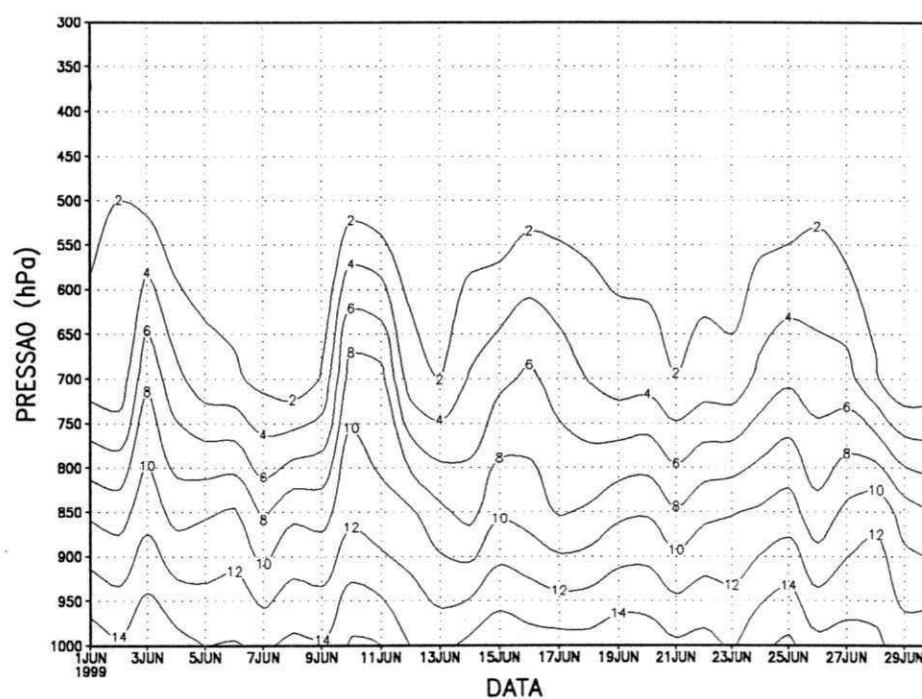


Figura 4.49 – Série temporal da razão de mistura (g/kg) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1999 (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

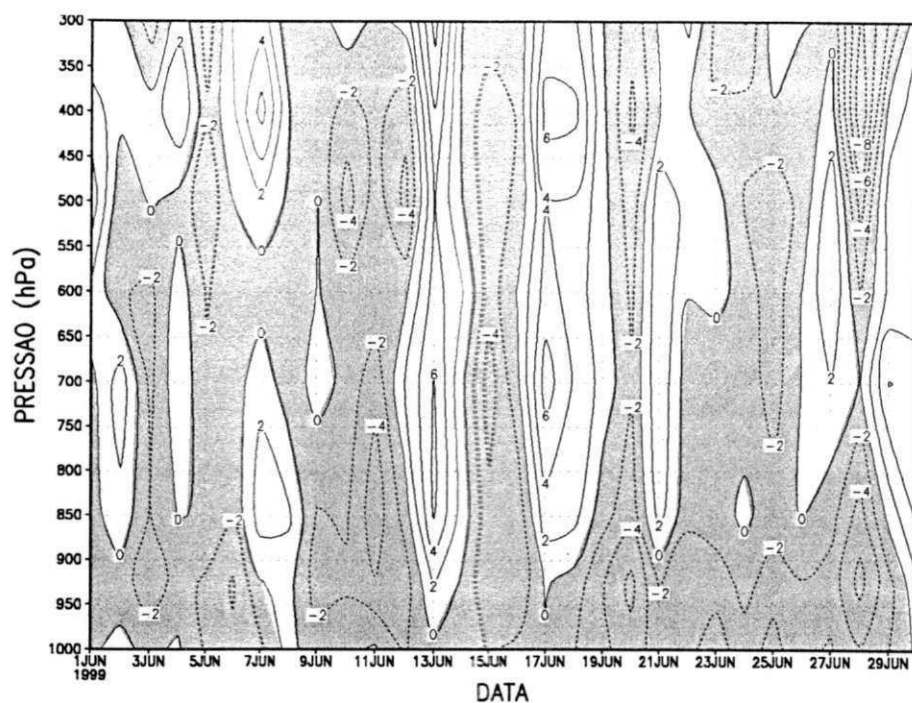


Figura 4.50 – Série temporal do movimento vertical (10^{-2}Pas^{-1}) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1999 (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

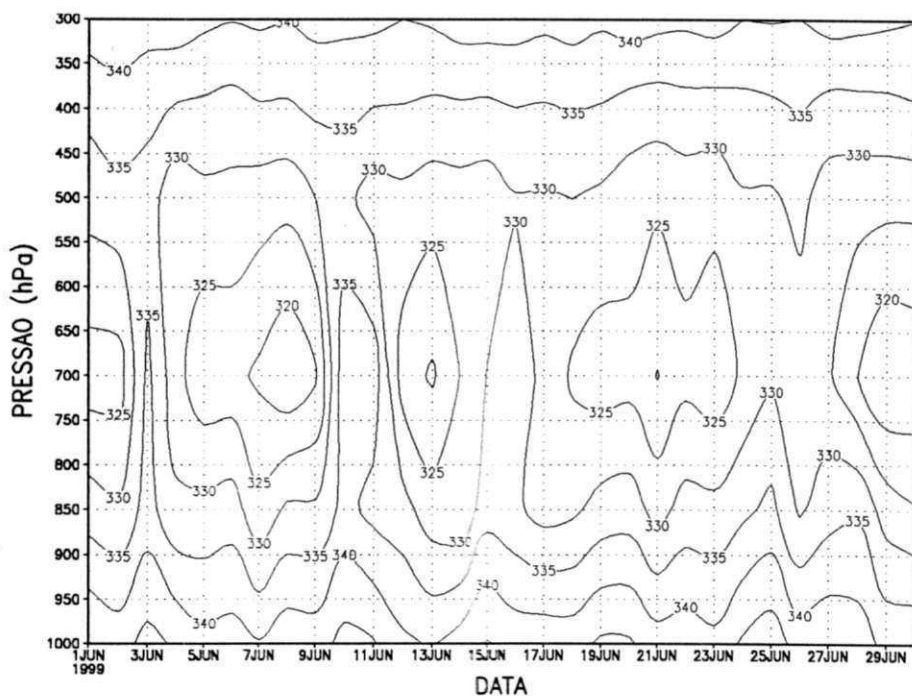


Figura 4.51 – Série temporal da temperatura potencial equivalente (K) na vertical do ponto de coordenadas (7°S , 35°W) em junho de 1999 (Fonte dos dados: NCEP/NCAR)

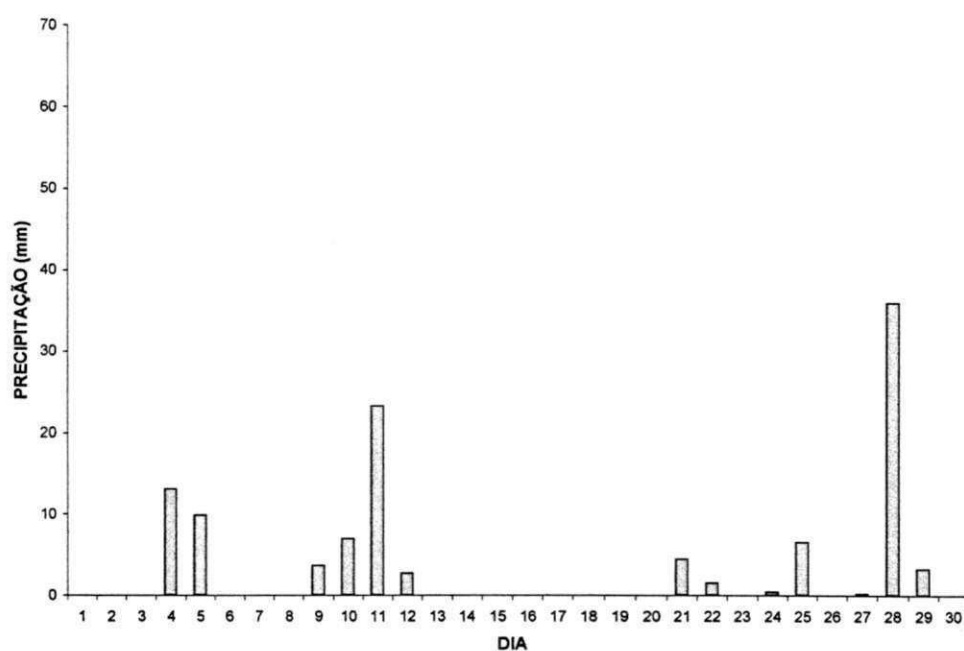


Figura 4.52 – Série temporal dos totais pluviométricos diários observados em João Pessoa – PB (7,08°S; 34,83°W) em junho de 1999 (*Fonte dos dados: LMRS-PB*)

É interessante que os quatro dias com núcleos de convergência de umidade em 700 hPa (2, 6, 14 e 24) apresentaram pouca ou nenhuma precipitação. A precipitação registrada nos dias 21 e 22 parece estar relacionada com o distúrbio 3 apesar da atmosfera estar relativamente seca.

CAPÍTULO 5

ESTUDO DE CASO

5.1 – O DISTÚRBIO

O distúrbio escolhido é o 1, detectado no diagrama da vorticidade relativa (Fig. 4.5), que atinge o Nordeste entre os dias 03 e 04 de junho de 1995. O núcleo negativo deste distúrbio perdura até o dia 08 mas apresenta um pequeno núcleo de vorticidade positiva no dia 06 que parece influenciar a precipitação deste dia como será visto nas seções seguintes. Este distúrbio apresenta velocidade de $5,4^{\circ}\text{long.}/\text{dia}$, aproximadamente.

5.2 – DIAGNÓSTICO DA ATMOSFERA

5.2.1 – Vorticidade Relativa

A análise do campo da vorticidade relativa em 01 de junho de 1995 no nível de 700 hPa (Fig. 5.1a) mostra uma área de vorticidade ciclônica com núcleo próximo a (10°S, 20°W) que se aprofunda até o nível de 850 hPa (não mostrado). O dia 02 (Fig. 5.1b) indica que houve propagação para oeste desse núcleo e que o mesmo ocorreu no nível de 850 hPa. Já no dia 03 (Fig. 5.1c) o núcleo se apresenta deslocado para oeste apenas no nível de 700 hPa enquanto que em 850 hPa a vorticidade ciclônica perde intensidade. Nesse dia uma pequena faixa do litoral nordestino já é atingida pelo distúrbio. No dia 04 (Fig. 5.1d) o núcleo atinge a costa paraibana tanto em 700 quanto em 850 hPa, sendo menos intenso neste último. No dia 05 (Fig. 5.1e) permanece a configuração do dia anterior, com exceção de que o núcleo presente em 700 hPa se encontra deslocado para oeste. No dia 06 (Fig. 5.1f), no nível de 700 hPa, a área de vorticidade ciclônica está ainda mais deslocada para oeste deixando o litoral sob vorticidade anticiclônica. No nível de 850 hPa o litoral encontra-se ainda com vorticidade ciclônica.

É interessante observar o deslocamento para leste, em 700 hPa, de áreas de vorticidade ciclônica e anticiclônica ao sul de 20°S e para oeste de uma área de vorticidade ciclônica ao longo do equador.

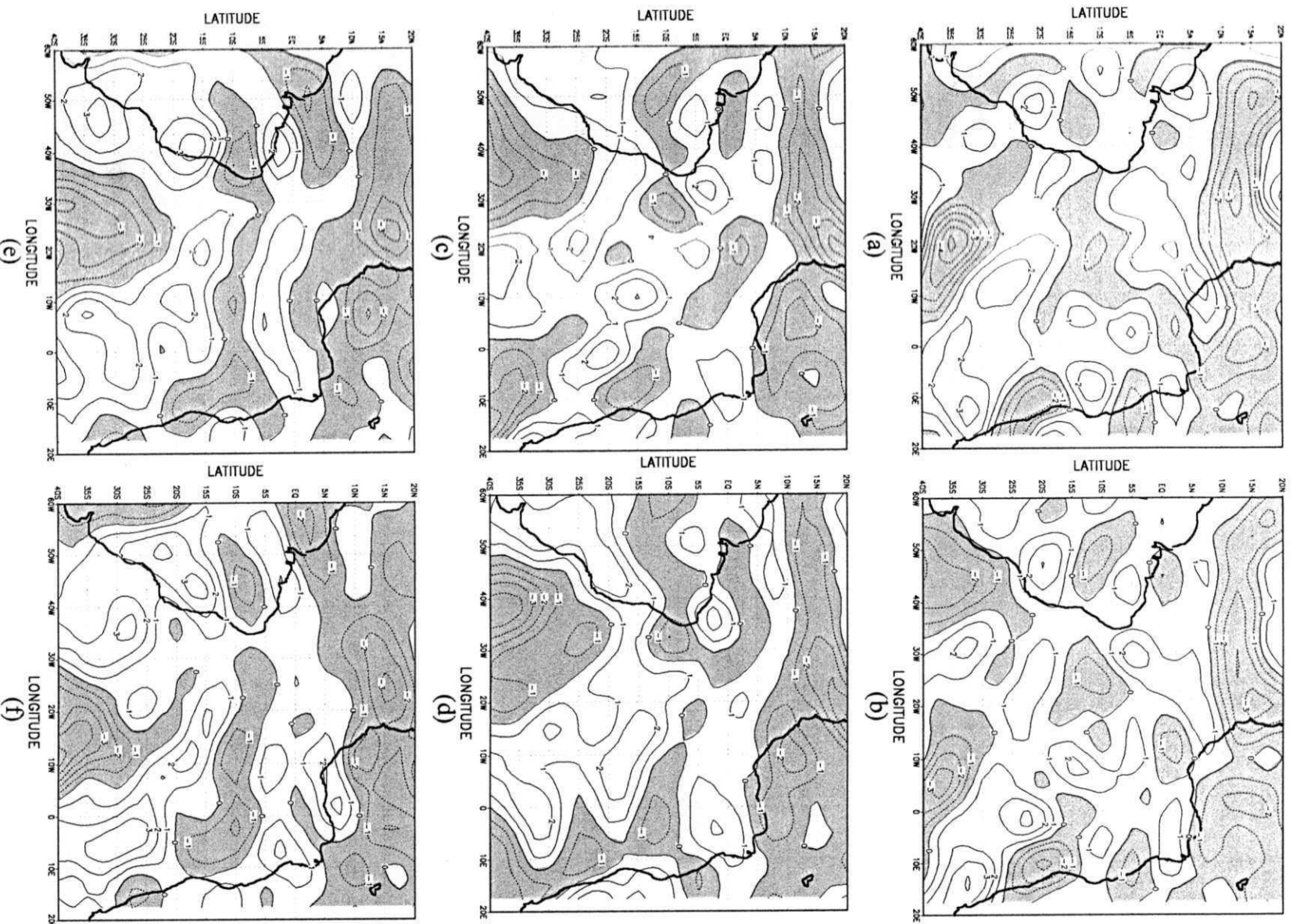


Figura 5.1 – Análises do campo da vorticidade relativa em 700 hPa às 00 UTC dos seguintes dias de junho de 1995: (a) 01, (b) 02, (c) 03, (d) 04, (e) 05 e (f) 06. O intervalo de análise é de 1×10^{-5} *Fonte: NCEP/NCAR*

5.2.2 – Linhas de Corrente e Magnitude do Vento

Na análise das linhas de corrente para o dia 01 (Fig. 5.2a) pode-se observar a presença de um cavado em 700 hPa próximo a (10°S, 20°W), mesmo local do núcleo de vorticidade ciclônica (Fig. 5.1a), que se aprofunda até o nível de 850 hPa (não mostrado). Sobre o litoral leste do Nordeste há predominância de ventos de norte associados a um núcleo anticiclônico centrado próximo ao litoral. O dia 02 (Fig 5.2b) evidencia aumento da área do cavado que se apresenta ligeiramente deslocado para oeste enquanto que permanece o núcleo de circulação anticiclônica. Tal comportamento também se reflete em 850 hPa. No dia 03 (Fig. 5.2c) o cavado está visivelmente deslocado para oeste interferindo na área de circulação anticiclônica, de modo que há agora uma configuração de onda com crista e cavado bem definidos. No nível de 850 hPa tal configuração tem amplitude menor. No dia 04 (Fig. 5.2d) o cavado atinge o litoral nordestino fazendo com que o vento que era predominantemente de norte se torne de sul. É interessante o fato de que em 850 hPa o cavado se mantém na mesma posição do dia anterior, a leste do litoral. No dia 05 (Fig. 5.2e) o cavado tem amplitude menor e seu eixo encontra-se quase que totalmente alinhado com o litoral. Não há indícios do cavado em 850 hPa. No dia 06 (Fig. 5.2f) não há sinal evidente do distúrbio em qualquer nível.

É evidente nestes campos o deslocamento para leste, ao sul de 20°S, de um cavado de latitudes médias cuja vorticidade associada pode ser vista na Figura 5.1.

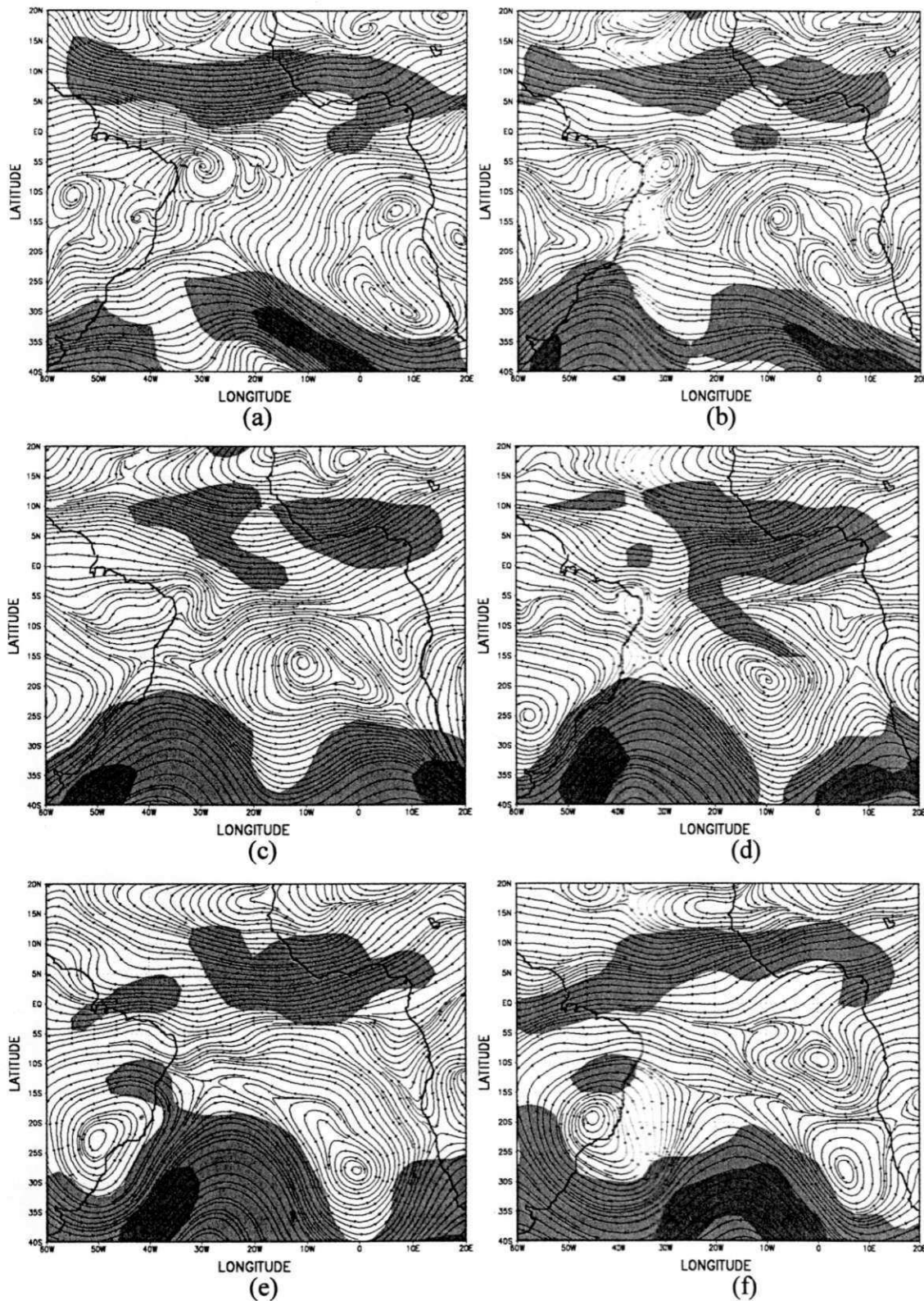


Figura 5.2 – Análises do campo de linhas de corrente e magnitude do vento às 00 UTC em 700 hPa nas quais as áreas sombreadas mais claras correspondem a intensidades acima de 10 m/s enquanto que as mais escuras correspondem a intensidades acima de 20 m/s para junho de 1995 nos dias: (a) 01, (b) 02, (c) 03, (d) 04, (e) 05 e (f) 06. *Fonte: NCEP/NCAR*

5.2.3 – Divergência do Fluxo de Umidade

A análise do campo da divergência do fluxo de umidade (Fig. 5.3) no nível de 1000 hPa para o dia 01 (Fig. 5.3a) mostra o Nordeste com convergência de umidade nas suas áreas norte e oeste e divergência nas sua área sul. Tal situação permanece praticamente inalterada no dia 02 (Fig. 5.3b), a não ser por um prolongamento para sul, ao longo do litoral, da área de convergência. Isso ocorre também no dia 03 (Fig. 5.3c), de modo que todo o Nordeste, com exceção de sua parte central, encontra-se com convergência neste dia. No dia 04 (Fig. 5.3d) a área de convergência está um pouco menos extensa no litoral leste. Assim, ainda há convergência na maior parte do Nordeste. No dia 05 (Fig. 5.3e) a configuração é praticamente a mesma do dia anterior, apesar da convergência mais intensa em parte do litoral leste. No dia 06 (Fig. 5.3f) a área de convergência mais forte se estende ao longo da faixa litorânea leste, até próximo de 15°S. No nível de 850 hPa (não mostrado) há divergência de umidade em todo o leste do Nordeste, em quase todos os dias analisados.

Neste campo é possível acompanhar também a propagação para leste, ao sul de 20°S, de áreas de convergência associadas a sistemas de latitudes médias.

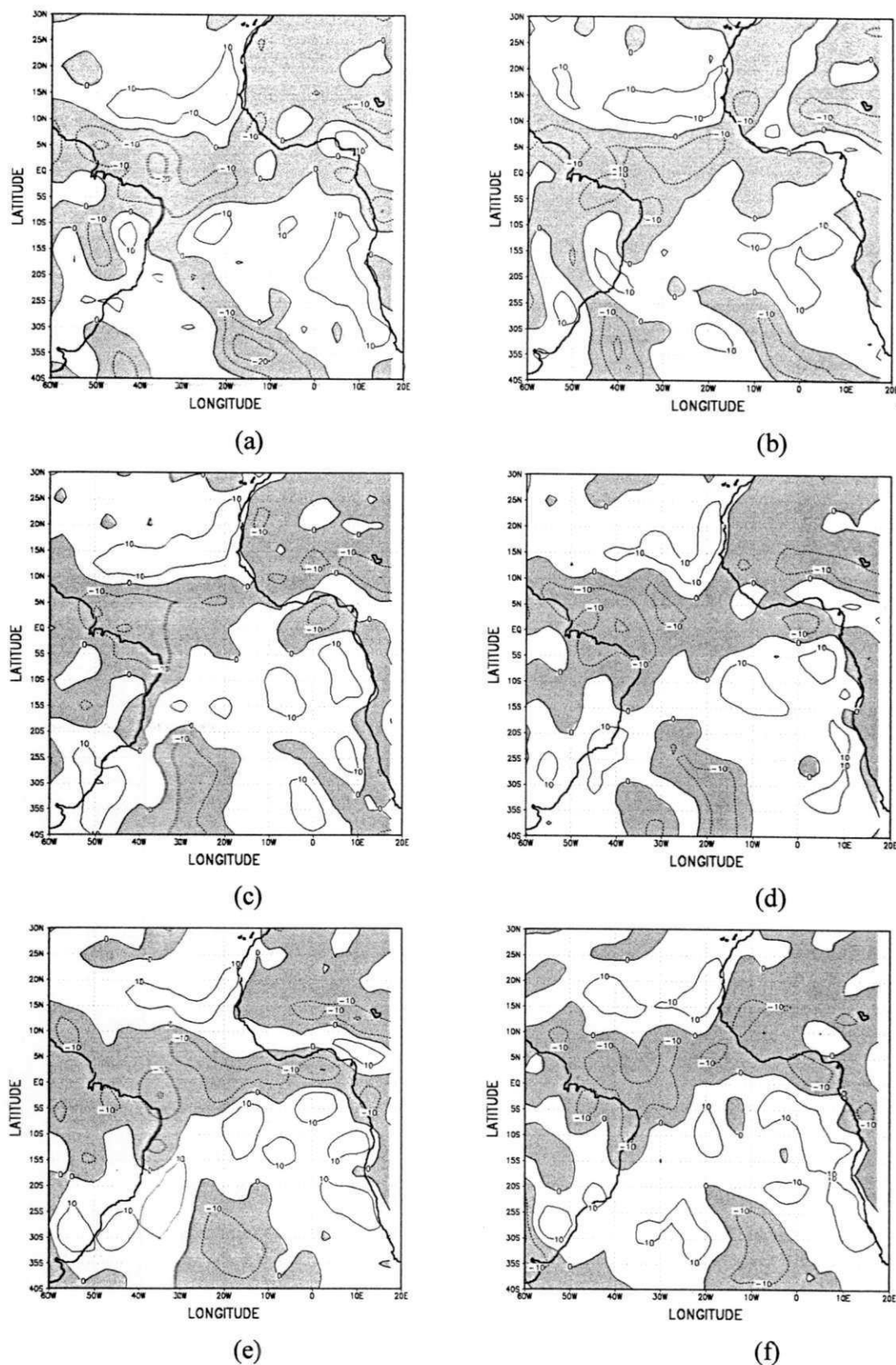
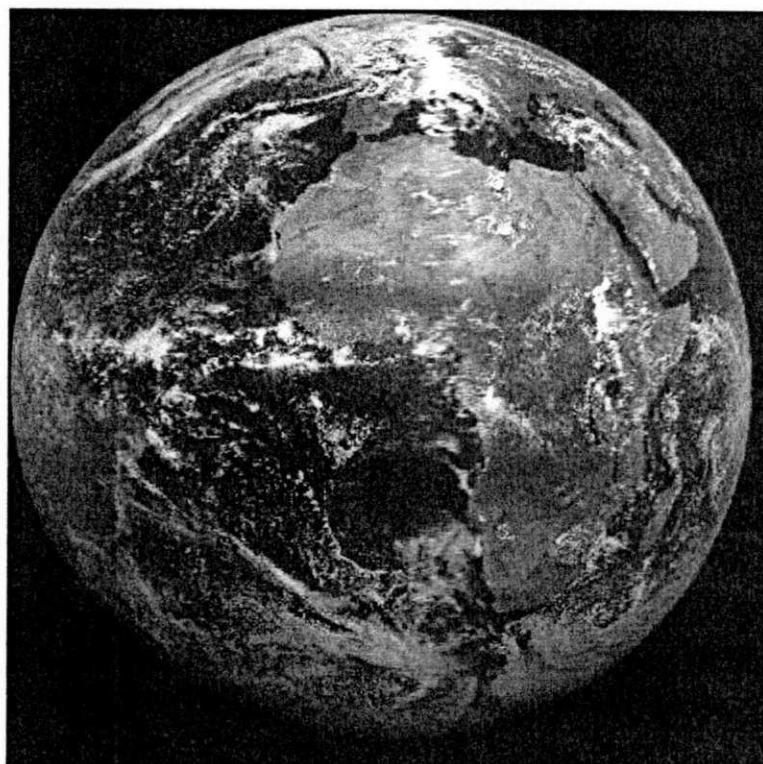


Figura 5.3 – Análises da divergência do fluxo de umidade no nível de 1000 hPa às 00 UTC dos seguintes dias de junho de 1995: (a) 01, (b) 02, (c) 03, (d) 04, (e) 05 e (f) 06. O intervalo de análise é de $10 \times 10^{-5} \text{ g kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (Fonte dos dados: NCEP/NCAR).

5.2.4 – Nebulosidade

Analisando-se imagens do Meteosat no canal do visível observa-se no dia 01 (Fig. 5.4a) que o litoral leste do Nordeste encontra-se coberto por nuvens e que há uma faixa de nebulosidade com convecção profunda organizada na direção sudeste/noroeste que atinge o litoral paraibano. Observa-se também próximo ao núcleo de vortacidade ciclônica detectado no dia 01 (Fig. 5.1a) um agrupamento de nuvens indicado por uma seta na imagem. No dia 02 (Fig. 5.4b) o Nordeste apresenta uma área maior com cobertura de nuvens, principalmente na sua parte leste, enquanto que o agrupamento de nuvens detectado no dia anterior apresenta-se deslocado para oeste. A imagem do dia 03 (Fig. 5.4c) sugere intensificação da convecção sobre o Nordeste enquanto que o agrupamento de nuvens associado ao distúrbio mostra-se deslocado para oeste. No dia 04 (Fig. 5.4d) ele atinge o Nordeste, havendo o desenvolvimento de convecção profunda. A imagem do dia 05 (Fig. 5.4e) mostra ausência de convecção profunda e uma área de nebulosidade consideravelmente menor no leste do Nordeste. No dia 06 (Fig. 5.4f) a situação é semelhante a do dia anterior.

É interessante também observar que parte da nebulosidade observada nos dias 05 e 06 sobre o leste do Nordeste aparenta estar relacionada com um sistema frontal centrado sobre o Atlântico Sul, ao sul do Nordeste.

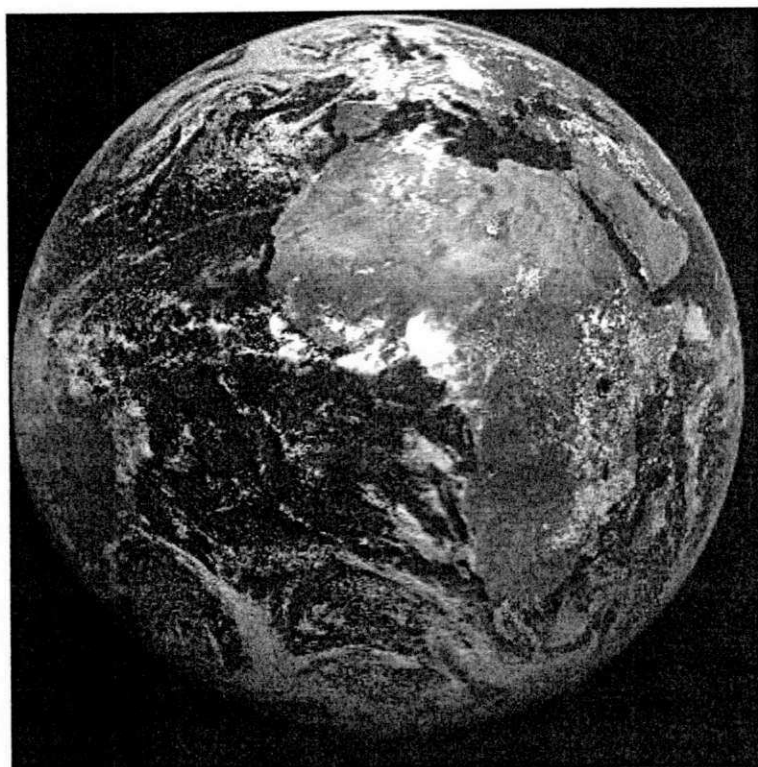


(a)



(b)

Figura 5.4 – Imagens no canal visível do satélite Meteosat para as 12 UTC dos seguintes dias de junho de 1995: (a) 01, (b) 02, (c) 03, (d) 04, (e) 05 e (f) 06. A flecha assinala a nebulosidade associada ao distúrbio de leste. (*Fonte: EUMETSAT*)



(c)



(d)

Figura 5.4 – continuação



(e)



(f)

Figura 5.4 – conclusão

5.2.5 – Precipitação

A análise da precipitação observada no Estado da Paraíba nos dias que antecedem a chegada do distúrbio mostra nos dias 01 e 02 (Figs. 5.5a e 5.5b) a precipitação concentrada em parte da zona da mata, apesar do núcleo secundário localizado próximo ao centro do Estado no dia 02. A precipitação do dia 01 está provavelmente ligada à faixa de nebulosidade com orientação sudeste/noroeste (Fig. 5.4a), cuja presença é favorecida pela convergência de umidade em baixos níveis nesse dia. No dia 03 (Fig. 5.5c) o campo da precipitação apresenta núcleos na zona da mata, agreste e sertão cujos valores são menores do que aqueles vistos nos dias anteriores. Tal configuração parece estar de acordo com a imagem de satélite deste dia (Fig. 5.4c) e do dia anterior (Fig. 5.4b) que sugerem a presença de nebulosidade em todo o Estado. No dia 04 (Fig. 5.5d) houve precipitação em uma área mais extensa do que no dia anterior e com totais mais elevados. Apesar de não ter sido o dia em que foram registradas as maiores precipitações, este foi o dia que apresentou a área de convecção profunda mais extensa. O dia 05 (Fig. 5.5e) se destaca por apresentar a maior área de precipitação; ela cobre parte da zona da mata e Borborema e quase todo o agreste. Tudo indica que grande parte dessa precipitação está associada ao distúrbio de leste que atinge o Estado no dia 04. O dia 06 (Fig. 5.5f) é o que apresenta a menor área de precipitação dentre todos os dias estudados.

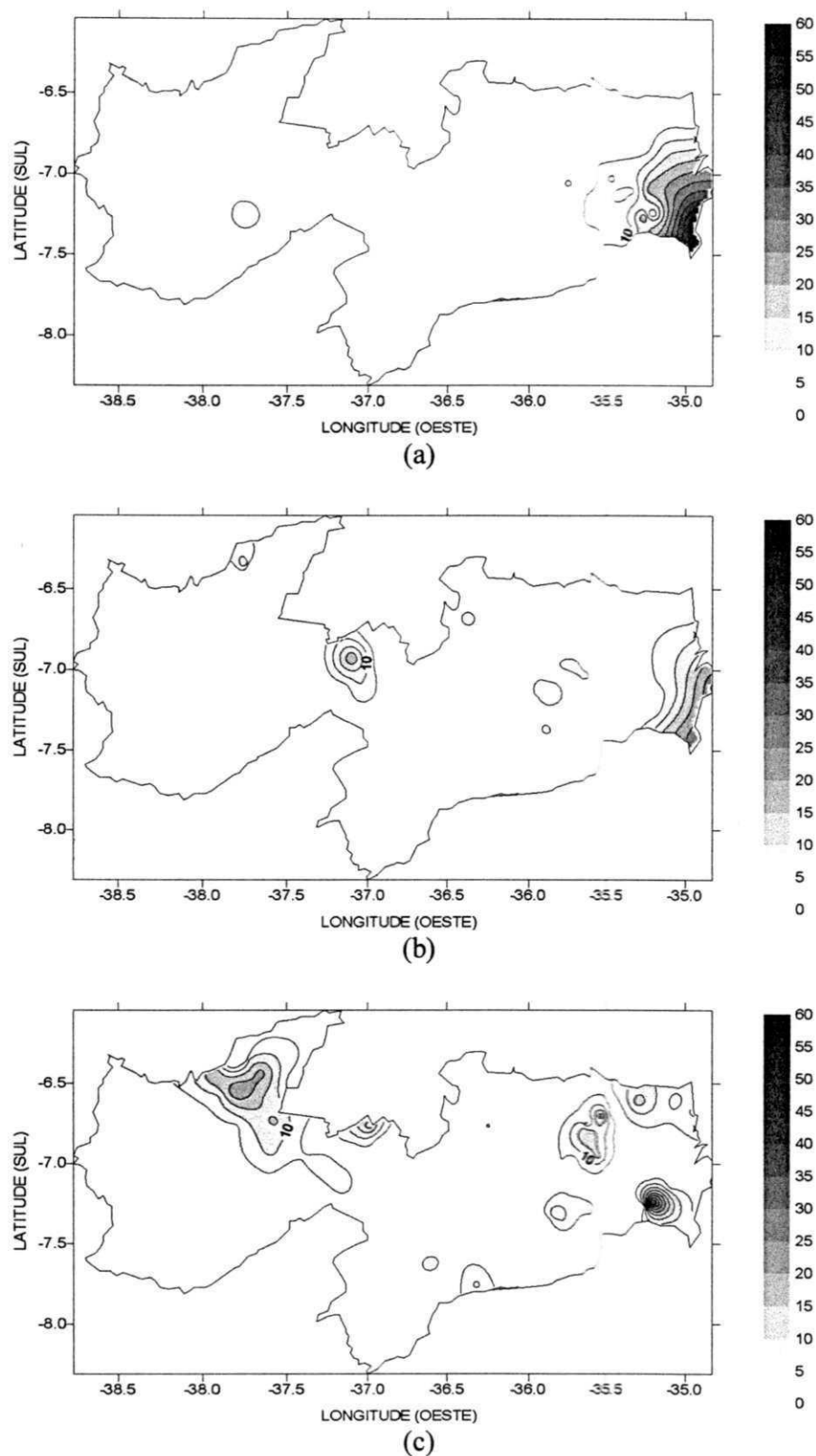


Figura 5.5 – Precipitação observada (mm) no Estado da Paraíba para os seguintes dias de junho de 1995: (a) 01, (b) 02, (c) 03, (d) 04, (e) 05 e (f) 06. O intervalo de análise é de 5 mm. (Fonte dos dados: LMRS-PB)

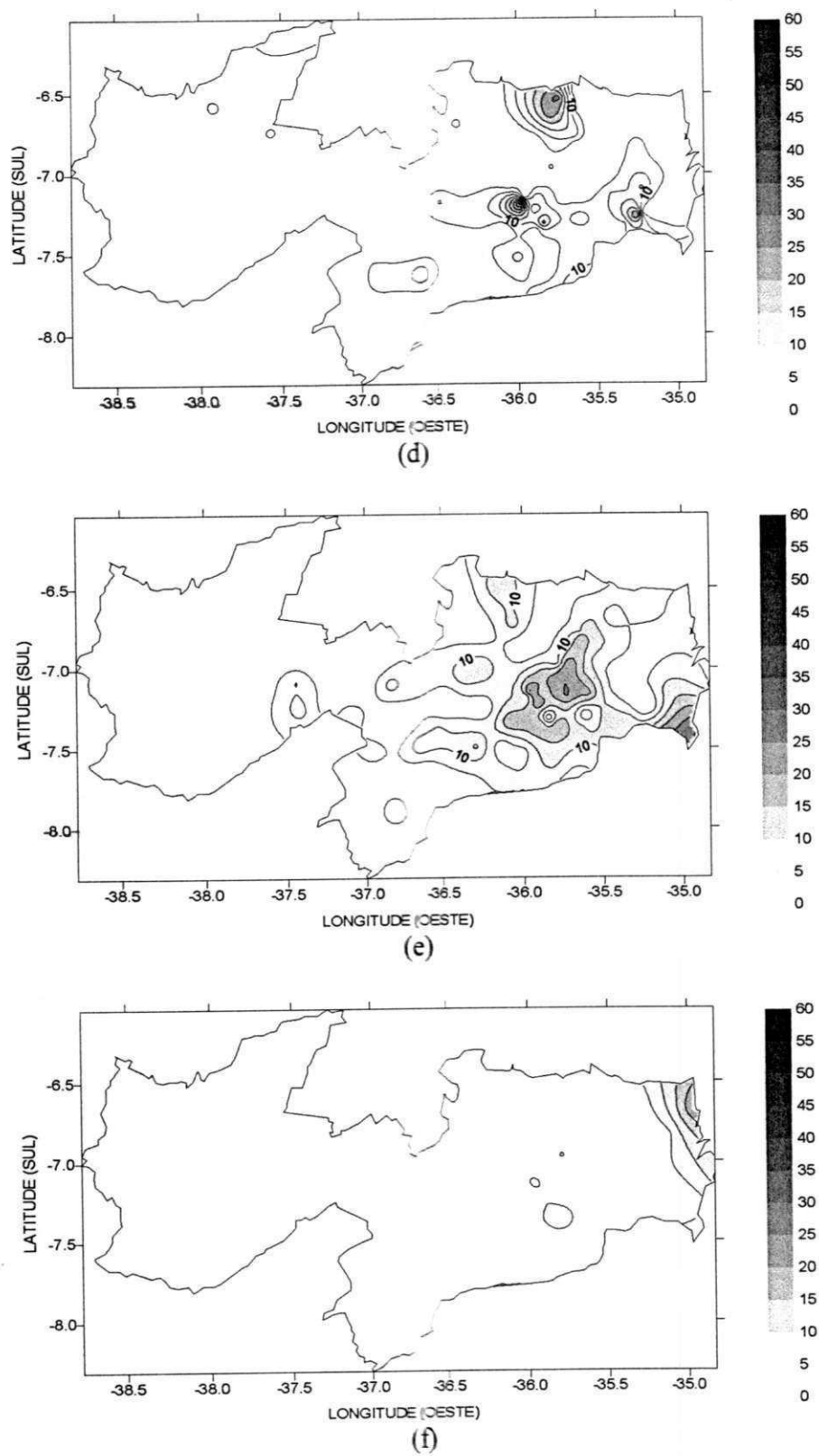


Figura 5.5 – conclusão

5.3 – Considerações Finais

O primeiro fato que chama a atenção neste episódio é que a análise do diagrama tempo×longitude da vorticidade relativa (Fig. 4.18) sugere que o distúrbio atinge o continente próximo do dia 03 enquanto que os campos da vorticidade relativa (Fig. 5.1) e do vento (Fig. 5.2) indicam que isso ocorre no dia 04.

Ao atingir a costa o distúrbio faz com que a direção do vento mude de norte para sul (Fig. 5.2). Essa mudança não causa variações perceptíveis no suprimento de umidade da região atingida conforme indica o campo da divergência do fluxo de umidade (Fig. 5.3). Por outro lado, parece contribuir para a instabilização da região uma vez que os dias 04 e 05 registram as maiores áreas cobertas por chuva na Paraíba no início de junho de 1995.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste estudo foi analisado o mês de junho de 1995, 1996, 1997 e 1999, meses contrastantes no campo das anomalias da temperatura da superfície do mar, com o objetivo de: (a) identificar distúrbios de leste que atingiram o Nordeste do Brasil, (b) diagnosticar as variações na estrutura dinâmica e termodinâmica da atmosfera provocadas por sua chegada na área litorânea do Estado da Paraíba e (c) avaliar sua contribuição para a precipitação no Estado.

Houve propagação de distúrbios de leste nos quatro meses estudados. Por outro lado, o número de distúrbios foi significativamente menor em junho de 1997 (mês seco no leste do Estado da Paraíba), ano no qual estava em curso o El Niño mais intenso do século 20. Os distúrbios identificados têm período médio de 5 dias e velocidade de propagação média de 9° de longitude por dia.

A existência de condições similares no campo das anomalias de TSM no Pacífico (neutras) e Atlântico (positivas pequenas), nos meses de junho de 1995 (chuvoso) e 1996, sugere a importância de outros fatores (posição e intensidade da alta subtropical do Atlântico Sul, oscilação de Madden-Julian, etc.) na determinação dos totais pluviométricos do leste do Estado da Paraíba.

Os distúrbios afetam a estrutura termodinâmica da atmosfera provocando, em geral, um aumento na umidade e na espessura da camada convectivamente instável. Por outro lado, a magnitude desse aumento depende das condições reinantes no ambiente por ocasião da chegada dos distúrbios.

A existência de convergência de umidade nos baixos níveis associada ao escoamento médio (alísios) parece ser um fator decisivo para a ocorrência de totais pluviométricos acima da média no leste do Estado da Paraíba.

Como sugestão para trabalhos futuros estão: (a) avaliar, através de simulações numéricas, o impacto da TSM do Atlântico e da intensidade da alta subtropical do Atlântico Sul sobre a intensidade, propagação e precipitação associada aos distúrbios de leste; (b) utilizar um conjunto de dados maior para avaliar o comportamento climatológico dos distúrbios de leste, inclusive as variações que sofrem ao interagirem com outros sistemas das várias escalas e (c) avaliar o impacto dos distúrbios de leste na reserva hídrica da Paraíba.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAGÃO, J. O. R. **Um Estudo da Estrutura das Perturbações Sinóticas no Nordeste do Brasil**. Dissertação de Mestrado. São José dos Campos, INPE, 1975.
- ARBEX JR., J., OLIC, N. B. **O Brasil em Regiões: Nordeste**. São Paulo, Ed. Moderna, 1999.
- BEZERRA, P. C. **Efeito da Resolução Horizontal na Simulação de um Evento Chuvoso Extremo**. Dissertação de Mestrado. Campina Grande, UFPB, 2002.
- BETTS, A. K. A Composite Mesoscale Cumulonimbus Budget. **Journal of the Atmospheric Sciences** 30: 597-610, 1973.
- BOLTON, D. The Computation of Equivalent Potential Temperature. **Monthly Weather Review** 108: 1046-1053, 1980.
- BURPEE, R. W. Characteristics of North African Easterly Waves During the Summers of 1968 and 1969. **Journal of the Atmospheric Sciences** 31: 1556-1570, 1974.
- BURPEE, R. W. Some Features of Synoptic-Scale Waves Based on Compositing Analysis of GATE Data. **Monthly Weather Review** 103: 921-925, 1975.

- CÉRON, J. P. e GUÉRÉMY, J. F. Validation of the Space-Time Variability of African Easterly Waves Simulated by the CNRM GCM. **Journal of Climate** 12: 2831-2855, 1999.
- CHAN, C.S. **Análise de Distúrbios Ondulatórios de Leste Sobre o Oceano Atlântico Equatorial Sul**. Dissertação de Mestrado. São José dos Campos, INPE, 1990.
- CHANG, C. B. Impact of Desert Environment on the Genesis of African Wave Disturbances. **Journal of the Atmospheric Sciences** 50: 2137-2145, 1993.
- DE FELICE, P.; VILTARD, A.; OUBUIH, J. A Synoptic-Scale Wave of 6-9-Day Period in the Atlantic Tropical Troposphere during Summer 1981. **Monthly Weather Review** 121: 1291-1298, 1993.
- DUNN, G.E. Cyclogenesis in the Tropical Atlantic. **Bulletin of the American Meteorological Society** 21: 215-229, 1940.
- DUVEL, J. F. Convection Over Tropical Africa and the Atlantic Ocean During Northern Summer. Part II: Modulation by Easterly Waves. **Monthly Weather Review** 118: 1855-1868, 1990.
- ESPINOZA, E. S. **Distúrbios nos Ventos de Leste no Atlântico Tropical**. Dissertação de Mestrado. São José dos Campos, INPE, 1996.
- HARZALLAH, A; ARAGÃO, J. O. R; SADOURNY, R. Interannual Rainfall Variability in North-east Brazil: Observation and Model Simulation. **International Journal of Climatology** 16: 816-176, 1996.
- HASTENRATH, S., HELLER, L. Dynamics of Climatic Hazards in Northeast Brazil. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 103: 77-92. 1977.
- KALNAY, E., KANAMITSU, M., KISTLER, R., COLLINS, W., DEAVEN, D., GANDIN, L., IREDELL, M., SAHA, S., WHITE, G., WOOLLEN, J., ZHU, Y., CHELLIAH, M., EBISUZAKI, W., HIGGINS, W., JANOWIAK, J., MO, K. C.,

- ROPELEWSKI, C., WANG, J., LEETMAA, A., REYNOLDS, R., JENNE, R., JOSEPH, D. The NCEP/NCAR 40 Years Reanalysis Project. **Bulletin of the American Meteorological Society** 77: 437-471, 1996.
- IBGE. Divisão Territorial, 1990.
- KOUSKY, V.E. Frontal Influences on Northeast Brazil. **Monthly Weather Review** 107: 1140-1153, 1979.
- KOUSKY, V. E., GAN, M. A. Upper Tropospheric Cyclonic Vortices in the Tropical South Atlantic. **Tellus** 33: 538-551, 1981.
- KRISHNAMURTI, T. N. e KNAMITSU, M. A Study of a Coasting Easterly Wave. **Tellus** 25: 569-585, 1973.
- KWON, H.J. A Reexamination of the Genesis of African Waves. **Journal of the Atmospheric Sciences** 46: 3621-3631, 1989.
- LATEEF, M. A. e SMITH, C. L. A Synoptic Study of Two Tropical Disturbances in the Caribbean. **ESSA Technical Memorandum IERTM-NHRL** 78, 1967.
- LIEBMANN, B., HENDON, H. Synoptic-Scale Disturbances Near the Equator. **Journal of the Atmospheric Sciences** 47: 1463-1479, 1990.
- LUCENA, D. B. *Influência da Temperatura da Superfície do Mar Próximo à Costa Leste na Precipitação do Nordeste do Brasil*. Dissertação de Mestrado. Campina Grande, UFPB, 2001.
- MELO, M. L.; DINIZ, F. A., SILVA, V. B. S. Estudo de Caso: Distúrbio de Leste no Estado do Rio Grande do Norte. **Anais do X Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Brasília, 1998. 1 CD.
- MERRITT, E. S. Easterly Waves and Perturbations: a Reappraisal. **Journal of Applied Meteorology** 3:367-382, 1964.

- MOTA, G. V. **Estudo Observacional de Distúrbios Ondulatórios de Leste no Nordeste Brasileiro**. Dissertação de Mestrado. São Paulo, USP, 1997.
- MOTA, G. V.; GANDU, A. W. Análise de Distúrbios Ondulatórios de Leste que Afetam o Nordeste Brasileiro: um Estudo de Caso. **Anais do IX Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Campos do Jordão, 1996.
- MOTA, G. V.; GANDU, A. W. Análise dos Padrões Ondulatórios de Leste no Nordeste Brasileiro Durante o Inverno de 1994. **Anais do X Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Brasília, 1998. 1 CD.
- MOZER, J. B., ZEHNDER, J. A. Lee Vorticity Production by Large-Scale Tropical Mountain Ranges. 2. A Mechanism for the Production of African Waves. **Journal of the Atmospheric Sciences** 53: 539-549, 1996.
- NITTA, T. Energy Budget of Wave Disturbances over the Marshall Islands During the Years of 1956 and 1958. **Journal of the Meteorological Society of Japan** 50: 71-84, 1972.
- NOAA. ENSO Impacts on the U_S_ Previous Events – Cold & Warm Episodes by Season. **Home Page of NOAA**, 2002.
- PAIVA NETO, A. C., ARAGÃO, M. R. S., CORREIA, M. F. Distúrbio de Leste no Nordeste do Brasil: o Caso de Fevereiro de 2000. **Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Foz do Iguaçu, Brasil, 2002. 1 CD.
- RAO, V. B., DE LIMA, M. C., FRANCHITO, S. H. Seasonal and Interannual Variations of Rainfall over Eastern Northeast Brazil. **Journal of Climate** 6: 1754-1763, 1993.
- REED, R. J., RECKER, E. E. Structure and Properties of Synoptic-Scale Wave Disturbances in the Equatorial Western Pacific. **Journal of the Atmospheric Science** 28: 1117-1133, 1971.

- REED, R.J., NORQUIST, D., RECKER, E. E. The Structure and Properties of African Wave Disturbances as Observed During Phase III of GATE. **Monthly Weather Review** 105: 317-333, 1977.
- REED, R.J.; HOLLINGSWORTH, A., HECKLEY, W. A., DELSOL, F. An Evaluation of the Performance of the ECMWF Operational System in Analyzing and Forecasting Easterly Wave Disturbances Over Africa and the Tropical Atlantic. **Monthly Weather Review** 116: 824-865, 1988.
- REGULA, H. Barometrische Schwankungen und Tornados an de West Kuest Von Afrika. **Annalen der Hydrographic** VLXIV: 107-111, 1936.
- REIS, A.S., PONTES, E.G.S., ARAÚJO, E.J.R., ABREU, R.A. Ocorrência de um Vórtice Ciclônico Acoplado a uma Onda de Leste Sobre o Leste do NEB no Período de 13 à 16 de Fevereiro de 2000. **Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Rio de Janeiro, 2000. 1 CD.
- RENNICK, M.A. Oringin of African Waves. **Bulletin of the American Meteorology Society** 56: 333-333, 1976.
- ROPELEWSKI, C. F., HALPERT, M. S. Global and Regional Scale Precipitation Patterns Associated with the El Niño/Southern Oscillation. **Monthly Weather Review** 115: 1606-1626, 1987.
- ROPELEWSKI, C. F., HALPERT, M. S. Precipitation Patterns Associated with the High Index Phase of the Southern Oscillation. **Journal of Climate** 2: 268-284, 1989.
- SERRA, A. B. The General Circulation Over South America. **Bulletin of the American Meteorological Society** 22: 173-179, 1941.
- SHAPIRO, L. J. The Three-Dimensional Structure of Synoptic-Scale Disturbances Over the Tropical Atlantic. **Monthly Weather Review** 114: 1876-1891, 1986.

- SILVA, S. T. A. **Influência do El Niño-Oscilação Sul na Distribuição Espacial da Precipitação no Estado da Paraíba**. Dissertação de Mestrado. Campina Grande-PB, UFPB, 1996.
- SILVA, S. T. A., BRAGA, C. C., ARAGÃO, M. R. S. Influência do El Niño-Oscilação Sul na Distribuição Espacial e Temporal da Precipitação no Estado da Paraíba. **Anais do IX Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 1996, Campos do Jordão-SP, 1996, V. 1, p 236-240.
- SIMIELLI, M. E. **Geoatlas**. São Paulo, Ed. Ática, 1991.
- SIQUEIRA, J. R., MACHADO, L. A. T. Variações Interanuais das Trajetórias de Perturbações Sinóticas na América do Sul e em Áreas Oceânicas Adjacentes. **Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Rio de Janeiro, 2000. 1 CD.
- STEVENS, D. E. Vorticity, Momentum and Divergence Budgets of Synoptic-Scale Wave Disturbances in the Tropical Eastern Atlantic. **Monthly Weather Review** 107: 535-550, 1979.
- TAI, K. S.; OGURA, Y. An Observational Study of Easterly Waves Over the Eastern Pacific in the Northern Summer Using FGGE Data. **Journal of the Atmospheric Sciences** 44: 339-361, Jan. 1987.
- TAYLOR, C., CLARK, D. B. The Diurnal Cycle and African Easterly Waves: A Land Surface Perspective. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society** 127: 845-867, 2001.
- UVO, C. R. B. **A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e Sua Relação com a Precipitação na Região Norte do Nordeste Brasileiro**. Dissertação de Mestrado. INPE, São José dos Campos, 1989.
- VILTARD, A., de FELICE, P. Statistical Analysis of Wind Velocity in an Easterly Wave Over West Africa. **Monthly Weather Review** 107: 1320-1327, 1979.

- VIRGI, H. A Preliminary Study of Summer Time Tropospheric Circulation Patterns Over South America Estimated from Cloud Winds. **Monthly Weather Review** 109: 599-610, 1981.
- VISHER, S. S., Tropical Cyclones of the Pacific. Honolulu, **Bernice T. Bissop Museum**, Bulletin N° 20, 163p., 1925.
- WALLACE, J. M.; CHANG, C.P. Spectrum Analysis of Large Scale Wave Disturbances in the Tropical Lower Troposphere. **Journal of the Atmospheric Sciences** 26: 1010-1025, Sep. 1969.
- YAMAZAKI, Y.; RAO, V.B. Tropical Cloudiness Over South Atlantic Ocean. **Journal of the Meteorological Society of Japan** 55: 205-207, 1977.