



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS - CTRN  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS – DCA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA



*Descargas atmosféricas e falhas no sistema de transmissão da  
CHESF em episódios de El Niño e La Niña: uma aplicação da  
análise de componentes principais.*

**WENDELL RONDINELLI GOMES FARIAS**

Campina Grande – PB

Novembro de 2005.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

F224d Farias, Wendell Rondinelli Gomes  
2005 Descargas atmosféricas e falhas no sistema de transmissão da CHESF em episódios de El Nino e La Nina: uma aplicação da análise de componentes principais / Wendell Rondinelli Gomes Farias. — Campina Grande, 2005. 135f. il.

Referências.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.  
Orientadora: Magaly de Fátima Correia.

1— Análises e Componentes Principais. 2— El Nino. 3— La Nina. 4— Vórtice Ciclônico de Altos Níveis. I— Título

CDU 551.509.313.43

WENDELL RONDINELLI GOMES FARIAS.

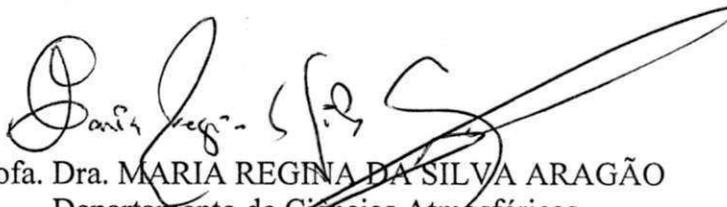
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E FALHAS NO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DA CHESF  
EM EPISÓDIOS DE EL NIÑO E LA NIÑA: UMA APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE  
COMPONENTES PRINCIPAIS

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 29/11/2005

BANCA EXAMINADORA



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



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



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

## SUMÁRIO

	Pág.
RESUMO	
ABSTRACT	
I. LISTA DE FIGURAS	i
II. LISTA DE TABELAS	ix
III. LISTA DE ABREVIATURAS	x
IV. LISTA DE SÍMBOLOS	xii
1 INTRODUÇÃO	01
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	06
2.1 Conceito e Efeito de Descargas Atmosféricas na Transmissão de Energia Elétrica	06
2.1.1 Descargas Atmosféricas	06
2.1.2 Efeito de Descargas Atmosféricas em sistemas de Potência	09
2.1.3 Propagação de Surtos	10
2.1.4 Incidência de Descargas nas Linhas e Subestações	11
2.1.5 Queda Direta	12
2.1.6 Queda Indireta	13
2.2 Condições Atmosféricas que Influenciam a Formação e Desenvolvimento de Sistemas Convectivos e Ocorrência de Descargas Atmosféricas no Nordeste	14
2.2.1 Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)	15
2.2.2 Distúrbios de Leste	16
2.2.3 Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN)	19
2.2.4 Frentes Frias	21
2.2.5 Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM)	22
2.2.6 El Niño e La Niña	24
2.2.6.1 Índice de Oscilação Sul (IOS)	24
2.2.6.2 El Niño	24
2.2.6.3 Condição Normal ou de Neutralidade	25
2.2.6.4 La Niña	28

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	30
3.1 Proteção e Segurança em Linhas de Transmissão	31
3.2 Condições Ambientais e Transmissão de Energia Elétrica	32
4 MATERIAL E MÉTODOS	37
4.1 Dados	37
4.2 Base de Dados	39
4.3 Análises Estatísticas	41
4.3.1 Análise de Componentes Principais	41
4.3.2 Descrição do Método	44
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1 Análise Observacional	47
5.2 Análises Estatísticas	75
6. SUMÁRIO, CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.	109
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114

## I - LISTA DE FIGURAS

	Pág.	
Figura 1.1	Mapa do sistema de transmissão de Energia da CHESF.	3
Figura 2.1.1	Estrutura típica de uma nuvem de tempestade e diferentes tipos de relâmpagos: nuvem-solo negativos (NS-) e positivos (NS+), solo-nuvem (SN), intra-nuvem (IN) e descargas para o ar (DA).	7
Figura 2.1.2	Aspecto de descargas atmosféricas entre nuvens.	7
Figura 2.1.3	Aspecto de descargas atmosféricas nuvem-solo	8
Figura 2.1.4	Aspecto de descargas atmosféricas solo-nuvem	8
Figura 2.1.5	Incidência do raio em uma linha de transmissão.	11
Figura 2.1.6	Ilustração de incidência de descarga atmosférica em LT's	12
Figura 2.2.1	Distribuição espacial do mês no qual a precipitação média mensal atinge o máximo e histogramas da distribuição anual de precipitação (eixo vertical em mm) para 5 estações representando diferentes regimes pluviométricos do Nordeste. Os dados utilizados são para o período de 1931-60. A localização das estações está indicada pelas letras Q (Quixeramobim), O (Olinda), S (Salvador), C (Caetité) e R (Remanso). (Fonte: adaptado de Kouky, 1979).	14
Figura 2.2.2	Posição da ZCIT para anos secos e chuvosos.	16
Figura 2.2.3	Estrutura vertical dos distúrbios de leste	17
Figura 2.2.4	Diagrama esquemático da estrutura em baixos níveis dos distúrbios de leste no Hemisfério Sul. As setas duplas indicam movimento vertical e as negras o escoamento horizontal.	18
Figura 2.2.5	Diagrama esquemático da estrutura vertical dos distúrbios de leste no Atlântico Tropical Sul.	18
Figura 2.2.6	Seqüência esquemática da formação de um vórtice ciclônico em 200mb no Atlântico Sul.	20
Figura 2.2.7	Ilustração esquemática da nebulosidade média e alta para a	21

	situação correspondente a figura 2.2.6c.	
Figura 2.2.8	Imagem do satélite GOES, no canal 04 em 04/02/02.	22
Figura 2.2.9	Padrão de circulação durante a condição de Neutralidade	26
Figura 2.2.10	Padrão de circulação durante o El Niño.	27
Figura 2.2.11	Esquema da circulação de Walker: (a) condições neutras, (b) condições de El Niño.	27
Figura 2.2.12	Padrão de circulação durante a La Niña.	28
Figura 5.1.1	Distribuição anual (a) e mensal (b) das ocorrências de falhas por descargas atmosféricas entre 1988 e 2002, no sistema de transmissão da CHESF.	48
Figura 5.1.2	Distribuição mensal das ocorrências de falhas por descargas atmosféricas para o ano de 1997.	48
Figura 5.1.3	Desvios da média climatológica para a precipitação durante o mês de dezembro de 1997 sobre o Nordeste brasileiro.	50
Figura 5.1.4	Distribuição espacial do número de ocorrências de interrupções no fornecimento de energia na área da CHESF e total diário de precipitação em dezembro de 1997	51
Figura 5.1.5	Distribuição espacial das falhas ocorridas para o mês de dezembro de 1997 (a) e para os dias 20 e 21 de dezembro de 1997 (b).	51
Figura 5.1.6	Imagens do satélite geostacionário GOES – 8 no canal IR (InfraRed) para os dias 20 nos horários, 03:00Z (a); 12:00Z (b); 15:00Z (c); 21:00Z (d) e 21 no horários, 12:00Z (e); 15:00Z (f); 18:00Z (g) e 21:00Z (h).	52
Figura 5.1.7	Histograma comparativo entre o total mensal de precipitação em 1997 e a média climatológica em Campina Grande PB.	54
Figura 5.1.8	Precipitação diária em dezembro de 1997 para os municípios de Campina Grande, Queimadas e Massaranduba.	55
Figura 5.1.9	Precipitação diária em dezembro de 1997 para os municípios próximos, ao longo do trecho Campina Grande – Santa Cruz.	55

Figura 5.1.10	Frequência da ocorrência de falhas transitórias por descarga atmosférica durante o mês de janeiro de 2000.	56
Figura 5.1.11	Distribuição da precipitação ocorrida (a) e da anomalia em relação à média climatológica (b) durante o mês de janeiro de 2000.	57
Figura 5.1.12	Distribuição espacial das falhas transitórias registradas no mês de jan/2000.	58
Figura 5.1.13	Imagens do satélite geostacionário GOES – 8 no canal IR (InfraRed) para os dias 01 nos horários, 06:00Z (a) e 12:00Z (b); dia 05 às 18:00Z (c); dia 13 às 18:00Z (d); dia 15 às 18:00Z (e); dia 20 às 15:00Z (f) e 18:00Z (g); dia 21 às 15:00Z (h) e 18:00Z (i); e dia 24 às 15:00Z (j). Fonte: INPE/DSA.	59
Figura 5.1.14	Distribuição da precipitação para Recife no mês de janeiro de 2000.	62
Figura 5.1.15	Distribuição da precipitação para as localidades Rio Largo e Messias no mês de janeiro de 2000.	62
Figura 5.1.16	Distribuição da precipitação para a localidade de Santa Cruz de Cabraláia (município próximo a Eunápolis) no mês de janeiro de 2000.	63
Figura 5.1.17	Frequência da ocorrência de falhas transitórias por descarga atmosférica durante o mês de dezembro de 2001.	64
Figura 5.1.18	Frequência da ocorrência de falhas transitórias por descarga atmosférica durante o mês de janeiro de 2002.	64
Figura 5.1.19	Distribuição espacial da falhas transitórias por descarga atmosférica para os meses de dez/2001 (a) e jan/2002 (b).	65
Figura 5.1.20	Precipitação total em mm (a) e desvios de precipitação em mm em relação à média climatológica (1961-1990) (b) para dezembro de 2001.	66
Figura 5.1.21	Precipitação total em mm (a) e desvios de precipitação em mm em relação à média climatológica (1961-1990) (b) para janeiro	67

	de 2002.	
Figura 5.1.22	Imagens do satélite geostacionário GOES – 8 no canal IR (InfraRed) para os dias 01 nos horários, 09:10Z (a); 09:39Z (b); 10:09Z (c); 23:39Z (d); dia 02 às 00:11Z (e); 01:09Z (f); 17:39Z (g); 18:09Z (h) e dia 27 às 15:09Z (i). Fonte: INPE/DSA.	68
Figura 5.1.23	Imagens do satélite geostacionário GOES – 8 no canal IR (InfraRed) para os dias 02 nos horários, 18:09Z (a); dia 04 às 14:39Z (b); 15:10Z (c); 15:39Z (d); dia 07 às 19:39Z (e); 20:09Z (f); dia 14 às 01:09Z (g); 01:39Z (h); 20:09Z (i); 20:39 (j); dia 15 às 13:09Z (l); 13:39Z (m); dia 17 às 19:39Z (n); 23:39Z (o); dia 24 às 19:39Z (p); 20:09Z (q) e dia 29 às 18:09Z (r) e 21:09Z (s). Fonte: INPE/DSA.	72
Figura 5.1.24	Distribuição da precipitação diária para Alagoinhas em dezembro de 2001.	73
Figura 5.1.25	Distribuição da precipitação diária para Alagoinhas em janeiro de 2002.	74
Figura 5.1.26	Distribuição da precipitação diária para Angelim e Recife em janeiro de 2002.	74
Figura 5.2.1	Correlação temporal das componentes principais para as CZV e CMV em 200hPa incluindo as três categorias EL (El Nino), LN (La Nina) e N (Neutro).	78
Figura 5.2.2	Correlação temporal das componentes principais para as CZV e CMV em 500hPa nos períodos de El Niño, La Niña e Neutro.	79
Figura 5.2.3	Correlação temporal das componentes principais para as CZV e CMV em 925hPa nos períodos de El Niño, La Niña e Neutro.	79
Figura 5.2.4	Correlação temporal das componentes principais para umidade específica em 925hPa nos períodos de El Niño, La Niña e Neutro.	80
Figura 5.2.5	Correlação temporal das componentes principais para temperatura do ar em 925hPa nos períodos de El Niño, La Niña	81

e Neutro.

Figura 5.2.6	Correlação temporal das componentes principais para o vento em 200hPa no período de El Niño.	83
Figura 5.2.7	Correlação temporal das componentes principais para o vento em 500hPa no período de El Niño.	84
Figura 5.2.8	Correlação temporal das componentes principais para o vento em 925hPa no período de El Niño.	84
Figura 5.2.9	Correlação temporal das componentes principais para a temperatura do ar em 925 hPa para o período de El Niño.	85
Figura 5.2.10	Correlação temporal das componentes principais para a umidade específica em 925 hPa para o período de El Niño.	86
Figura 5.2.11	Agrupamento de variáveis segundo a ACP para os eventos de falhas no período El Nino (EL): (a) CP1, (b) CP2 e (c) CP3.	87
Figura 5.2.12	Configuração espacial da umidade específica em 925 hPa no período El Nino (EL): (a) campo médio (CM) e (b) CP1.	88
Figura 5.2.13	Configuração espacial da componente meridional do vento em 925 hPa no período El Nino (EL): (a) campo real para o evento 20 e (b) CP1.	89
Figura 5.2.14	Configuração espacial da CP1 do vento zonal em 200 hPa (a) e 500 hPa (b) para o evento 20.	90
Figura 5.2.15	Configuração espacial da temperatura do ar em 925 hPa no período El Nino (EL): (a) campo real para o evento 20 e (b) CP2.	91
Figura 5.2.16	Correlação temporal das componentes principais para o vento em 200hPa no período de La Niña.	93
Figura 5.2.17	Correlação temporal das componentes principais para o vento em 500hPa no período de La Niña.	93
Figura 5.2.18	Correlação temporal das componentes principais para o vento em 925hPa no período de La Niña.	94
Figura 5.2.19	Correlação temporal das componentes principais para a	95

	temperatura do ar em 925 hPa no período de La Niña.	
Figura 5.2.20	Correlação temporal das componentes principais para a umidade específica em 925 hPa no período de La Niña.	95
Figura 5.2.21	Agrupamento de variáveis segundo a ACP para os eventos de falhas no período La Nina (LN): (a) CP1, (b) CP2 e (c) CP3.	96
Figura 5.2.22	Configuração espacial da umidade específica e da temperatura do ar em 925 hPa no período La Nina (LN): (a) CP1 da umidade específica para o evento 20; (b) CP1 da umidade específica para o evento 21; (c) CP1 da temperatura do ar para o evento 20; (d) CP1 da temperatura do ar para o evento 21.	97
Figura 5.2.23	Configuração espacial do vento zonal em 200 hPa e 500 hPa no período La Nina (LN): (a) CP1 do vento zonal para o evento 20 em 200 hPa; (b) CP1 do vento zonal para o evento 21 em 200 hPa; (c) CP1 do vento zonal para o evento 20 em 500 hPa; (d) CP1 do vento zonal para o evento 21 em 500 hPa.	98
Figura 5.2.24	Configuração espacial do vento zonal em 925 hPa no período La Nina (LN): (a) CP1 do vento zonal para o evento 20; (b) CP1 do vento zonal para o evento 21.	99
Figura 5.2.25	Configuração espacial do vento meridional em 925 hPa no período La Nina (LN): (a) CP2 do vento meridional para o evento 20; (b) CP2 do vento meridional para o evento 21.	100
Figura 5.2.26	Correlação temporal das componentes principais para o vento em 200hPa no período Neutro.	102
Figura 5.2.27	Correlação temporal das componentes principais para o vento em 500hPa no período Neutro.	103
Figura 5.2.28	Correlação temporal das componentes principais para o vento em 925 hPa no período Neutro.	103
Figura 5.2.29	Correlação temporal das componentes principais para a temperatura do ar em 925 hPa no período Neutro.	104
Figura 5.2.30	Correlação temporal das componentes principais para a umidade	105

específica em 925 hPa no período Neutro.

- Figura 5.2.31 Agrupamento de variáveis segundo a ACP para os eventos de falhas no período Neutro (N): (a) CP1, (b) CP2 e (c) CP3. 105
- Figura 5.2.32 Configuração espacial da CP1 do vento zonal em 200 para o evento do dia 07. 107
- Figura 5.2.33 Configuração espacial da CP2 temperatura do ar (a) e da umidade específica em 925 hPa (b) para o evento do dia 07. 107

## II - LISTA DE TABELAS

	Pág.	
Tabela 4.1	Eventos de falhas por descarga atmosférica durante o período de análise.	39
Tabela 4.2	Distribuição quantitativa dos eventos de falhas por descarga atmosférica nas referidas linhas de tensão de operação no período de estudo.	41
Tabela 5.2.1	Variância explicada (%) e variância acumulada (%) para as primeiras três componentes principais (CP1, CP2 e CP3).	77
Tabela 5.2.2	Variância explicada (%) e variância acumulada (%) para as primeiras três componentes principais (CP1, CP2 e CP3).	82
Tabela 5.2.3	Variância explicada (%) e variância acumulada (%) para as primeiras três componentes principais (CP1, CP2 e CP3). Período La Nina (LN).	92
Tabela 5.2.4	Variância explicada (%) e variância acumulada (%) para as primeiras três componentes principais (CP1, CP2 e CP3). Período Neutro (N).	101

### **III - LISTA DE ABREVIATURAS**

ACP	Análise de Componentes Principais
Cb	Cumulonimbus
CG	Campina Grande
CGD	Campina Grande Dois
CELESC	Companhia de Energia Elétrica de Santa Catarina
CEMIG	Companhia Elétrica de Minas Gerais
CHESF	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
CLA	Camada Limite Atmosférica
CM	Campo Médio
CMV	Componente Meridional do Vento
CP	Componente Principal
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Clima
CZV	Componente Zonal do Vento
DA	Descarga para o Ar
DJF	Dezembro, Janeiro e Fevereiro
DSA	
EL	El Niño
ENOS	El Niño Oscilação Sul
GOES	
HN	Hemisfério Norte
IN	Intra-nuvem
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IOS	Índice de Oscilação Sul
LI	Linha de Instabilidade
IR	Infra-Red
LN	La Niña
LT	Linha de Transmissão

N	Neutro
NCEP	National Center for Environmental Prediction
NE	Nordeste
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NS-	Nuvem-solo negativo
NS+	Nuvem-solo positivo
PNMM	Pressão ao Nível Médio do Mar
RINDAT	Rede Integrada de Detecção de Descargas Atmosféricas
SC	Sistema Convectivo
SCM	Sistemas Convectivos de Mesoescala
SIMEPAR	Sistema Meteorológico do Estado do Paraná
SN	Solo-nuvem
STD	Santana dos Matos Dois
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
VCAN	Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
ZCA	Zona de Convergência dos Alísios
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

#### IV - LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	frentes, linhas de instabilidade
A	matriz de mudança de base
$A^{-1}$	matriz inversa
$A^t$	matriz transposta
$a_{ij}$	coeficiente da i-ésima linha na j-ésima coluna dos autovalores
$\beta$	linhas de convecção, tempestades locais
C	Coulomb
cm	centímetro
D	matriz diagonal
g	grama
hPa	hector Pascal
I	Corrente elétrica incidente
k	número de variáveis de um determinado campo
kA	quilo ampère
km <sup>2</sup>	quilômetro quadrado
kg	Quilo grama
kV	quilo volt
i	corrente elétrica
$\lambda$	autovalores
mm	milímetro
m/s	Metro por segundo
n	número de observações
N	direção norte
R	matriz de correlação
S	direção sul
V	tensão elétrica
Y	matriz de determinado campo

[Z]	matriz dos dados originais
Z	hora zulu
Z	Impedância
Z <sub>i</sub>	matriz das componentes principais
%	porcentagem
°	grau
q <sub>925</sub>	Umidade específica em 925 hPa
T <sub>925</sub>	Temperatura do ar em 925 hPa
U <sub>200</sub>	Componente zonal em 200 hPa
U <sub>500</sub>	Componente zonal em 500 hPa
U <sub>925</sub>	Componente zonal em 925 hPa
V <sub>200</sub>	Componente meridional em 200 hPa
V <sub>925</sub>	Componente meridional em 925 hPa

## RESUMO

O objetivo deste estudo é estabelecer relações entre variáveis meteorológicas que permitam equacionar a influência de condições ambientais na intensificação de atividade convectiva responsável por interrupções no fornecimento de energia elétrica por descargas atmosféricas em episódios de El Niño (EL), La Niña (LN) e condições Neutras (N). A análise é restrita à área de atuação da CHESF (Companhia Hidroelétrica do São Francisco) que tem grande parte de suas Linhas de Transmissão de energia instalada no semi-árido do Nordeste do Brasil. A análise fatorial por componentes principais (ACP) foi aplicada às componentes do vento nos níveis de 200, 500 e 925 hPa, e à umidade específica e temperatura do ar no nível de 925 hPa, considerando eventos de interrupção de energia por descarga atmosférica.

Nos episódios sob condições de EL, as três primeiras componentes (CPs) explicam 81,1%, 72,4% e 73,9% da variabilidade do vento em 200, 500 e 925 hPa, respectivamente, enquanto que para a umidade específica (temperatura) a variância acumulada explica 89,6% (94,2%) da variabilidade total.

Nos eventos sob condição de LN, as três primeiras CPs explicam 73,8% 58,7% e 70,9% da variabilidade do vento em 200, 500 e 925 hPa, respectivamente. A variância acumulada explica 92,8% (94,8%) da variabilidade total no caso da umidade específica (temperatura).

A ACP também foi usada para investigar a associação entre as variáveis atmosféricas. Verificou-se que para todos os eventos sob condições de EL os grupos caracterizados pela CP1 mostram forte associação entre as variáveis  $U_{200}$ ,  $U_{500}$  e  $U_{925}$  (vento zonal em 200, 500 e 925 hPa). Nos eventos sob condições de LN e N, os grupos caracterizados pela CP1 mostram maior associação entre as variáveis  $U_{200}$ ,  $U_{500}$  e  $V_{925}$  (vento zonal em 200 e 500 hPa e vento meridional em 925 hPa).

A técnica foi bastante eficiente na determinação de configurações espaciais associadas com anomalias de vento, temperatura e umidade em eventos intensos de precipitação. A análise dos padrões associados com chuva forte e corte no fornecimento de energia elétrica mostra que esses eventos estão associados, principalmente, com intensificação dos ventos de oeste em altos níveis. Esta característica está presente em todos os casos analisados nas três situações (EL, LN e N). Nos baixos níveis, em condições de LN e N, predomina a intensificação do escoamento zonal, enquanto que em EL a predominância é de escoamento meridional mais intenso que a média.

## **1. INTRODUÇÃO**

Descargas atmosféricas constituem a principal causa de interrupção e desligamento de redes de energia elétrica registradas no país (F. Visacro et al., 2002; J. Soares et al., 2001 e Silva et al., 2003). Os efeitos destrutivos de sobretenções causados por este fenômeno frequentemente se estendem não só a equipamentos, mas também a consumidores residenciais, comerciais e industriais, acarretando perdas no faturamento para as empresas do setor elétrico e usuários (Rodrigues e Portela, 2001; Rocha, 2001; F. Visacro, 2002).

A identificação de fenômenos climáticos e o conhecimento de como influenciam na demanda de eletricidade é de fundamental importância para o aperfeiçoamento de atividades relacionadas ao planejamento, elaboração de projetos e operação de manutenção do sistema elétrico.

A CHESF é responsável pela eletrificação de 90% do Nordeste e representa o principal gestor dos recursos hídricos da região, regularizando a vazão e controlando cheias. Com um dos maiores sistemas de transmissão em alta tensão no país, possui mais de 18.000 quilômetros em 500, 230, 138 e 69 kV de linhas instaladas (Figura 1.1) com uma área de

atendimento em mais de 1 milhão de km<sup>2</sup>, cerca de 15% do Brasil. Portanto, a adequação de

projetos de Linhas de Transmissão (LT's) à realidade climática regional é fundamental, na busca de sistemas mais econômicos e mais seguros.

O Nordeste brasileiro (NE) situado aproximadamente entre as latitudes de 1° e 18°S e longitudes de 34° e 48°W, possui uma grande diversidade climática. Pode-se observar desde o clima semi-árido com chuvas anuais abaixo de 500 mm no interior da região até o clima chuvoso encontrado na costa leste com totais anuais acima de 1500 mm. Entre os principais sistemas atmosféricos de grande escala causadores de chuva na região, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) destaca-se por ter influência direta na durabilidade da estação chuvosa principalmente no setor norte do nordeste. Entretanto, outros sistemas meteorológicos afetam de forma significativa à intensidade e distribuição das chuvas no Nordeste. Sistemas Frontais podem ser responsáveis por chuvas que ocorrem no centro sul da região entre os meses de novembro e janeiro. Distúrbios de Leste são frequentemente relacionados com precipitações na região leste do Nordeste entre maio e agosto e os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis que atuam entre setembro e abril estão associados com volumes de chuva significativos registrados principalmente em janeiro caracterizado como o mês de maior ocorrência destes sistemas. (Strang, 1992; Kousky, 1979; Uvo, 1989; Mello et al, 1996).

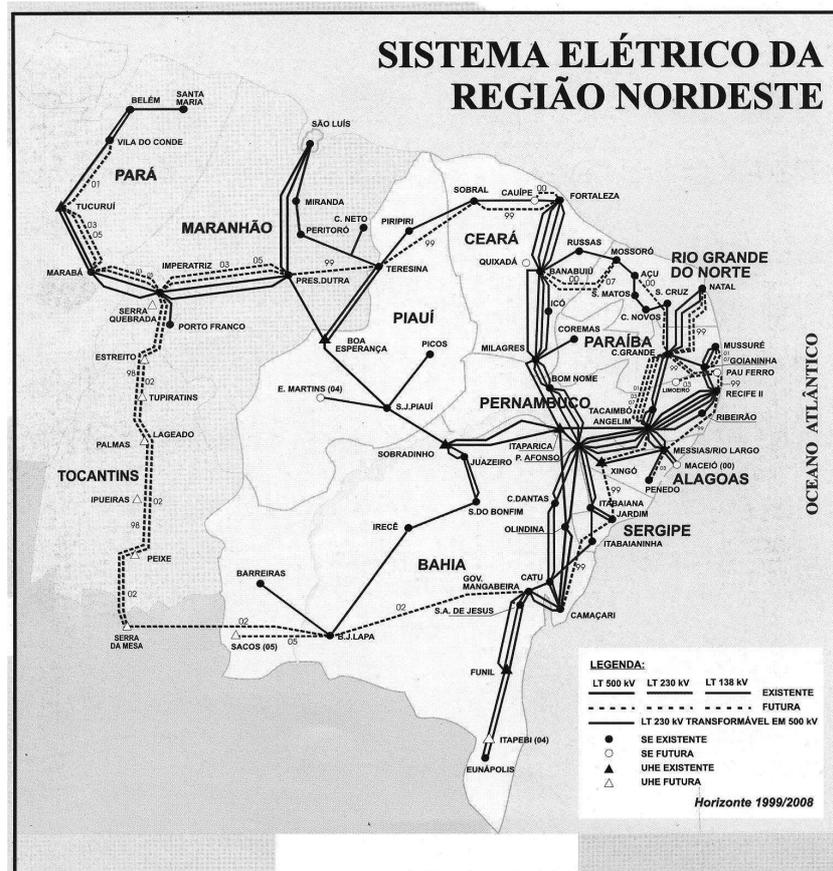


Figura 1.1 - Sistema de transmissão da CHESF.

Episódios de La Niña favorecem a precipitação acima da média climatológica em boa parte do Nordeste principalmente no setor leste com o avanço das frentes frias até o litoral da Bahia, Sergipe e Alagoas, e chuvas acima da média no semi-árido nordestino, a nebulosidade é favorecida pela presença do ramo ascendente da célula de Walker sobre o Nordeste.

Em geral, eventos de El Niño estão relacionados com secas na Amazônia e Nordeste do Brasil e com chuvas em excesso nas regiões Sul e Sudeste. Entretanto, é importante ressaltar que mesmo em anos de El Niño com chuvas abaixo da média no período chuvoso do NE, é possível a ocorrência de precipitações intensas e totais pluviométricos acima da média

em localidades isoladas. Estes eventos podem representar causas importantes de interrupção de energia elétrica.

Nos últimos anos, com o avanço da tecnologia no País, têm-se observado uma maior concentração de esforços envolvendo diversas instituições operacionais, de ensino e pesquisa no sentido de compreender melhor os sistemas de circulação atmosférica.

O Brasil dispõe de muitas fontes de dados que podem ser usadas no planejamento e gestão de recursos energéticos. Diversas instituições e empresas possuem informações importantes sobre tecnologias e sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica nas diferentes regiões e setores de atividade. Entretanto, o processo de acompanhamento das mudanças climáticas representa um desafio constante e progressivo no tempo, de forma que nenhum banco de dados pode ser considerado completo.

Em diversos fóruns de discussões técnicas do setor elétrico, é evidente o grande interesse em minimizar os efeitos causados por descargas atmosféricas associadas a tempestades severas. Entretanto, apenas na última década foi possível obter informações mais exatas sobre descargas atmosféricas com organização da Rede Integrada de Detecção das Descargas Atmosféricas (RINDAT) englobando 22 pontos com sensores de detecção de raios operados pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), Furnas Centrais Elétricas (FURNAS) e pelo Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) (Pinto Jr., 2000).

Embora o NE não disponha de sensores de detecção de raios ou ainda de radares meteorológicos capazes de monitorar sistemas precipitantes intensos na área de estudo, um banco de dados contendo informações recentes sobre causas de falhas no sistema de

transmissão da CHESF permite a realização de pesquisas com resultados inéditos e importantes para o setor ambiental e de energia.

O objetivo do nosso trabalho é estabelecer relações entre variáveis meteorológicas que permitam equacionar a influência de condições climáticas em interrupções no fornecimento de energia elétrica decorrentes de descargas atmosféricas com base em eventos de atividade convectiva intensa em diferentes fases do El Nino – Oscilação do Sul. As análises foram concentradas na área de atuação da CHESF. O método de componentes principais foi escolhido como ferramenta de análise.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 CONCEITO E EFEITO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NA TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

#### **2.1.1 Descargas Atmosféricas**

As descargas elétricas na atmosfera também são conhecidas como relâmpagos. Tem extensão de alguns km e o pico de corrente acima de 1 kA podendo chegar a centenas de kA. A descarga atmosférica é decorrente do excesso de cargas elétricas em regiões da atmosfera eletricamente carregadas com polaridades diferentes, provocando o rompimento da rigidez dielétrica do ar. Esse fenômeno pode ocorrer dentro da nuvem ou próximo ao solo. Segundo D'Ajuz et al., 1987, a suportabilidade da atmosfera é da ordem de 30 kV/cm para o ar seco em condições atmosféricas padrão, podendo ser menor devido à redução da pressão atmosférica, em função da altura da nuvem, como também a presença de gotas d'água na nuvem. Geralmente as descargas atmosféricas ocorrem em tempestades associadas a nuvens do tipo Cumulonimbus. A Figura 2.1 ilustra a estrutura e o tipo de relâmpago, de acordo com o local onde ele se origina ou termina. Os relâmpagos podem ocorrer da nuvem para o solo, do solo para a nuvem, da nuvem para um ponto qualquer da atmosfera, entre nuvens ou descargas no ar (Gin, 1997; Pinto Jr, 2005).

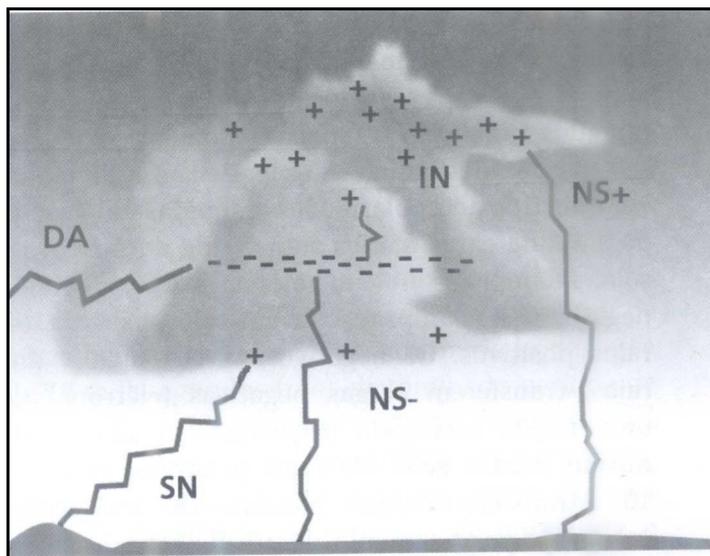


Figura 2.1 – Estrutura típica de uma nuvem de tempestade e diferentes tipos de relâmpagos: nuvem-solo negativos (NS-) e positivos (NS+), solo-nuvem (SN), intra-nuvem (IN) e descargas para o ar (DA). (FONTE: Pinto Jr., 2005).

Os tipos de descargas atmosféricas mais frequentes são os intra-nuvem, devido a diminuição da capacidade isolante do ar com a altura em função da diminuição da densidade do ar, e também porque em algumas regiões dentro da nuvem, as cargas de polaridades opostas estão mais próximas que em outros tipos de relâmpagos (Figura 2.1.2).



Figura 2.2 - Aspecto de descargas atmosféricas entre nuvens

Os relâmpagos nuvem-solo ou raios são os mais estudados devido aos prejuízos e desastres que causam. Dependendo da polaridade podem ser negativos, quando transferem cargas negativas de uma região carregada negativamente para outra de menor potencial dentro da nuvem ou para o solo (Figura 2.3) sendo responsáveis por cerca de 90% dos casos, ou positivos, quando transferem cargas positivas pelo processo mencionado acima. Entretanto, é importante ressaltar que na realidade, os elétrons é que são transportados do solo para a nuvem (Figura 2.4). Raios dessa natureza constituem um conjunto intermitente de descargas, com intervalos de tempo de aproximadamente 40 ms e grande luminosidade (Uman, 1987).



Figura 2.3 - Aspecto de descargas atmosféricas nuvem-solo.

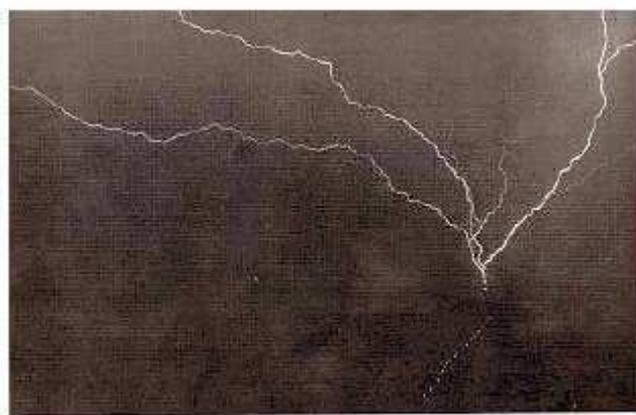


Figura 2.4 - Aspecto de descargas atmosféricas solo-nuvem. FONTE: Iribarne e Cho (1980, p. 141).

Após uma sucessão de descargas parciais fracas dentro da nuvem, um canal é criado para o relâmpago, avançando rapidamente para a terra (Max, 1973). Após atingir a terra, a descarga piloto ou líder escalonado (fraca descarga luminosa, geralmente não visível, que aparece ao final da quebra da rigidez dielétrica do ar) da origem a uma corrente de retorno com picos médios de intensidade de 30 kA, podendo atingir em casos mais raros picos de até 250 kA (D'Ajuz et al., 1987; Pinto Jr., 2005).

Em média um relâmpago possui até três descargas de retorno, denominada de multiplicidade, podendo variar de alguns kA até centenas de kA. Em geral descargas atmosféricas podem transferir até centenas de Coulombs (C) da nuvem para o solo. No entanto, o valor médio de transferência é da ordem de 20 C (Uman, 1987; Volland, 1982).

### **2.1.2 Efeito de Descargas Atmosféricas em Sistemas de Potência**

Uma das causas de sobretensões em equipamentos de sistemas de potência são as descargas atmosféricas, que podem ocorrer de forma direta (quando atingem diretamente as subestações), ou indireta (sobre as linhas de transmissão do sistema). Quando isso acontece, surtos de tensão se propagam ao longo da linha, atingindo os equipamentos nas subestações.

Tensões elevadas originadas por descargas atmosféricas são em sua grande maioria, suficientes para provocar falhas nos isolamentos das linhas e equipamentos de subestações e desta forma impedir a continuidade do fornecimento de energia elétrica.

A probabilidade de incidência de descargas diretamente sobre subestações é pequena, devido ao baixo número de áreas de subestações expostas a esse tipo de fenômeno. Bem

como, os sistemas de proteção como pára-raios e mastros de blindagem contribuem para diminuir os riscos de danos aos equipamentos no interior das subestações. Dessa forma, a maior incidência é decorrente de descargas atmosféricas que atingem as linhas de transmissão.

O estudo do comportamento e desempenho de linhas de transmissão na presença de descargas atmosféricas tem importância decisiva no planejamento de projetos e execução de medidas que visam diminuir falha dessa natureza em sistemas de transmissão. De acordo com D'Ajuz et al. 1987, ao serem atingidos por uma descarga atmosférica os equipamentos e os isolamentos das linhas de um sistema de potência são percorridos por uma sobretensão elevada. Caso essa sobretensão exceda os níveis de suportabilidade de isolamento, ocorrerá uma descarga. O efeito dessa descarga é o aparecimento de um arco de potência, que será mantido pela tensão do sistema. Em situações dessa natureza, torna-se necessária a utilização dos dispositivos de proteção que resultem no desaparecimento do curto-circuito. Por outro lado, em geradores, transformadores ou motores aonde são usados materiais isolantes sólidos, os danos causados por uma descarga são permanentes.

### **2.1.3. Propagação de Surtos**

De forma simplificada, quando uma descarga atinge uma linha de transmissão, provoca o aparecimento de ondas que trafegam pelo sistema. A descarga inicia a propagação de ondas de tensão e de corrente, que trafegam aproximadamente com a velocidade da luz em ambas as direções a partir do ponto de impacto (Figura 2.5). Ao serem propagados através da linha estes surtos são atenuados e distorcidos devido aos seus parâmetros longitudinais possuírem dependência com a frequência (D'Ajuz et al. 1987; Aquino et al., 2001).

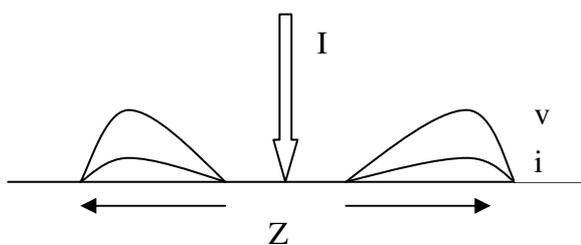


Figura 2.5 – Incidência do raio em uma linha de transmissão. (FONTE: Adaptada de D’Ajuz et al. 1987, p.62).

Esse tipo de onda continua a se propagar pela linha de transmissão até que encontre uma descontinuidade. Essas ondas de tensão e corrente são refletidas de volta à linha enquanto outras são transmitidas através do ponto de descontinuidade. Tais pontos de descontinuidade podem ser disjuntores abertos, transformadores, outras linhas ou o rompimento do isolamento da linha.

#### **2.1.4 Incidência de Descargas nas Linhas e Subestações**

Segundo D’Ajuz et al. 1987, a incidência de descargas atmosféricas em sistemas elétricos e em linhas de transmissão deve ser analisada sob três aspectos principais:

- Estudo de queda do raio no condutor. Nesse caso é analisada a incidência da descarga diretamente sobre o cabo condutor. Esse tipo de falha da isolação dependerá principalmente da intensidade da corrente de raio, da impedância de surto nos condutores, do isolamento do sistema e do valor da tensão nos instantes da descarga;
- Estudo de incidência de raios nas torres, mastros de blindagem ou cabos pára-raios (queda indireta);

- Estudo da incidência de raios nas proximidades da linha. Para linhas de tensão acima de 69 kV, a probabilidade de ocorrência de falhas por descargas atmosféricas nas proximidades da linha é baixa.

Deve-se considerar também uma série de fatores, tais como, a densidade de descargas na área em que a linha é atravessada, suas dimensões físicas, com especial destaque para a altura e a existência de outras linhas dentro do mesmo corredor (Rocha et al., 2001).

#### **2.1.4.1 Queda Direta**

Descargas atmosféricas ao incidirem diretamente sobre o condutor de fase das linhas de transmissão, provocam uma sobretensão elevada nas direções da linha, de forma a provocar descarga disruptiva da(s) cadeia(s) de isoladores, seguida pela passagem de curto-circuito no sistema, o que muito possivelmente levará à isolação da linha (Rocha et al., 2001). Exemplos da incidência de descargas atmosféricas em LT's é mostrado na Figura 2.6.



Figuras 2.6– Ilustração de incidência de descarga atmosférica em LT's.

Estudos mostram que aproximadamente 50% das descargas atmosféricas apresentam correntes maiores que 30 kA (valor médio). De forma geral a corrente de descarga varia entre 10 kA e 200 kA.

Em tensões dessa ordem, linhas e equipamentos poderão não suportar o excesso de tensão. A alternativa é limitar as sobretensões a valores muito menores. Esse processo pode ser feito através de mastros de blindagem e cabos de pára-raios, que são conectados eletricamente em paralelo com as cadeias de isoladores com o objetivo de melhorar o desempenho das linhas de transmissão. Essas medidas diminuem as ocorrências de desligamento das linhas, mas não as extingue em sua totalidade (Zanetta Jr. et al., 2001).

#### **2.1.4.2 Queda Indireta**

Em situações de tempestades ou de intensa precipitação ocasionadas por sistemas convectivos intensos, a queda indireta pode ocorrer através da incidência de uma descarga atmosférica nas torres ou nos pára-raios da linha de transmissão que irá aumentar a tensão nos pontos de incidência, provocando o desligamento da linha. Ao contrário da queda direta, a ocorrência desses desligamentos dificilmente é eliminada. No entanto, seus efeitos podem ser minimizados através de um projeto otimizado de aterramento das estruturas e um ajuste dos elementos de projeto de cabeça da torre (D'Ajuz et al., 1987).

## **2.2 CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS QUE INFLUENCIAM A FORMAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS CONVECTIVOS E OCORRÊNCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NO NORDESTE**

Entre os principais sistemas atmosféricos que influenciam o clima do NE destacam-se a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), os Distúrbios de Leste, as Frentes Frias e os Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM). Variações inter-anuais de chuvas no leste do NE também podem estar relacionadas à ocorrência do El Niño e La Niña no Pacífico Equatorial.

A diversidade de regimes pluviométricos resultantes dos vários mecanismos dinâmicos atuantes na região é mostrada na Figura 2.2.1 No setor norte da região as chuvas atingem o máximo mensal durante os meses de março e abril. Os setores sul e sudeste recebem o maior volume de chuvas nos meses de novembro e dezembro enquanto que no litoral leste o máximo de chuvas ocorre entre maio e junho (Kousky, 1979).

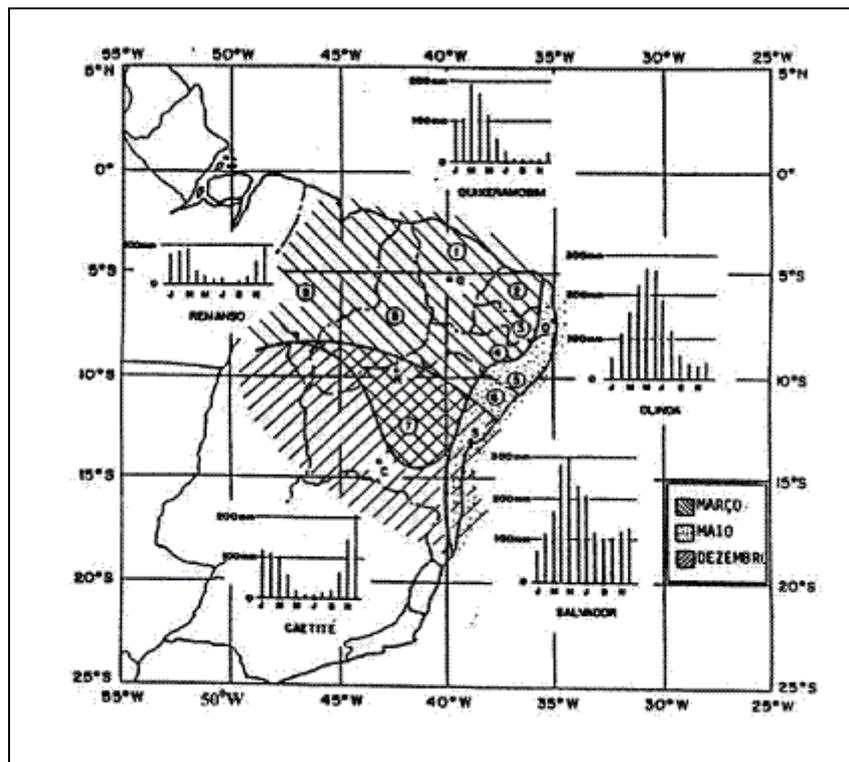


Figura 2.1 – Distribuição espacial do mês no qual a precipitação média mensal atinge o máximo e histogramas da distribuição anual de precipitação (eixo vertical em mm) para 5 estações representando diferentes regimes pluviométricos do Nordeste. Os dados utilizados são para o período de 1931-60. A localização das estações está indicada pelas letras Q (Quixeramobim), O (Olinda), S (Salvador), C (Caetité) e R (Remanso). (Fonte: adaptado de Kousky, 1979).

### **2.2.1. Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)**

Na região da ZCIT há a interação de vários sistemas como a zona de confluência dos alísios de SE e NE (ZCA), o cavado equatorial, a zona de máxima temperatura da superfície do mar (TSM) e a banda de cobertura de nuvens convectivas. Todos esses sistemas interagem sobre a faixa equatorial dos oceanos (Uvo, 1989).

Autores como Moura e Shukla, 1981 e Uvo, 1989, estudaram a relação entre a posição da ZCIT e a qualidade da estação chuvosa no NE. Os resultados mostram que essa influência ocorre nas escalas de tempo sazonal (anual) e intra-sazonal (dias e meses). Em relação à escala sazonal eles observaram que quanto mais tempo a ZCIT permanecer em suas posições mais ao sul, melhor é a qualidade da estação chuvosa no NE. Pode-se observar na Figura 2.2 que em anos chuvosos a ZCIT esteve mais ao sul (próximo a dois graus sul), enquanto nos anos secos a posição latitudinal esteve mais ao norte, próximo ao equador. A posição latitudinal mais ao norte da ZCIT acontece em aproximadamente 14°N entre os meses de agosto e setembro (verão no HN) e em aproximadamente 2°S entre os meses de março e abril (período em que acontece a migração da ZCIT mais ao sul do equador), podendo chegar até 4 e 6°S.

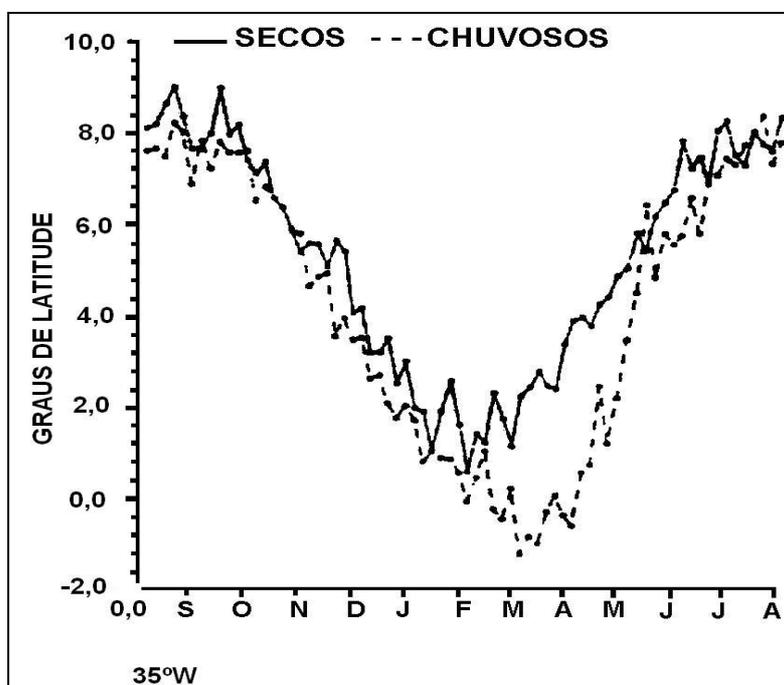


Figura. 2.2 - Posição da ZCIT para anos secos e chuvosos. (Fonte: Uvo, 1989).

### 2.2.2 DISTÚRBIOS DE LESTE

As Ondas de leste foram definidas, por Berry et al., 1945, como sendo distúrbios que se propagam com os alísios para oeste, apresentando configurações ondulatórias nos campos de vento e pressão.

Assim como a ZCIT, os distúrbios de leste são sistemas de grande escala produtores de chuvas no Nordeste. São mais freqüentes no lado equatorial do cinturão subtropical e menos freqüentes no HS. Normalmente são mais intensos na média troposfera e atingem o litoral e zona da mata do NE no final do verão, onde surgem como uma circulação ciclônica fraca (Hastenrath, 1988).

As condições de tempo associadas com estes distúrbios são geralmente caracterizada por atividades convectiva intensa, muita nebulosidade e chuvas fortes. Observam-se também, alterações significativas no vento e na pressão em superfície (Tarakanov, 1966).

O esquema apresentado na Figura 2.3 ilustra o efeito de um distúrbio de leste na estrutura da CLA (Camada Limite Atmosférica). Os movimentos subsidentes na dianteira do sistema são responsáveis por uma camada de mistura rasa e pouca nebulosidade. Entretanto, na retaguarda do sistema tem-se freqüentemente muita atividade convectiva, nuvens profundas e precipitação intensa.

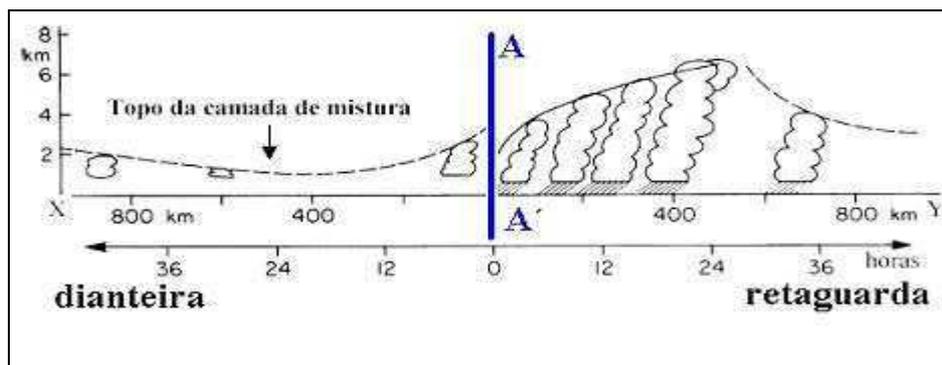


Figura 2.3 – Estrutura vertical dos distúrbios de leste. (Fonte: modificado de Nieuwolt, 1978).

Os distúrbios de leste são mais comumente observados no hemisfério norte (HN), de acordo com estudos realizados por Yamazaki e Rao, 1977, foi possível detectar linhas de nebulosidade com inclinação de leste para oeste no Atlântico Sul somente durante o inverno do HS (junho, julho, agosto) na faixa de 20N até 20S. Essas linhas de nebulosidade estão associadas a nuvens de convecção profunda causadoras de fortes tempestades. As Figuras 2.4 e 2.5 ilustram a estrutura em baixos níveis e na vertical dos distúrbios de leste na região da África Centra no HS.

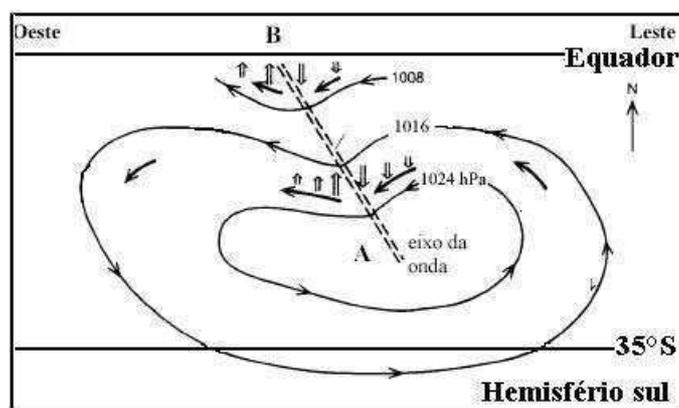


Figura 2.4 – Diagrama esquemático da estrutura em baixos níveis dos distúrbios de leste no Hemisfério Sul. As setas duplas indicam movimento vertical e as negras o escoamento horizontal. (Fonte: Hall, 1989).

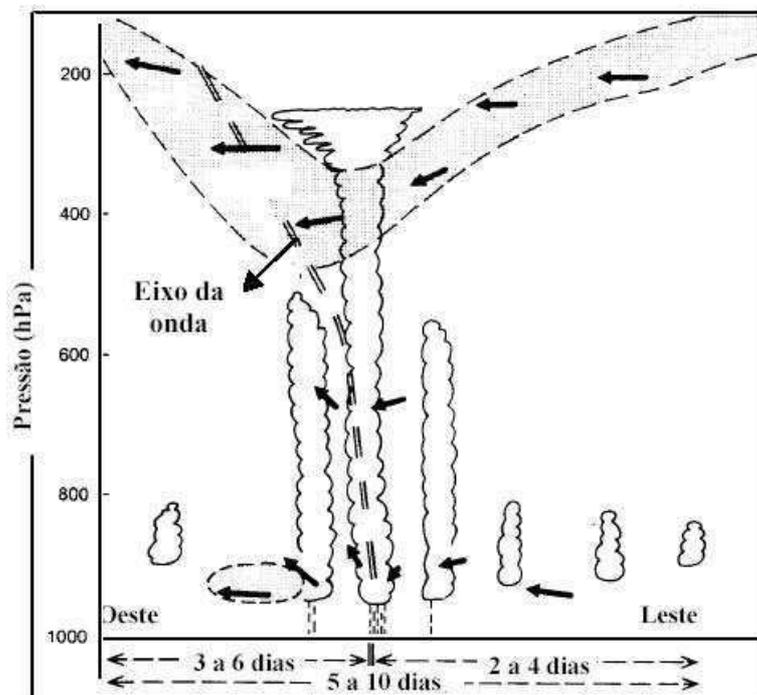


Figura 2.5 – Diagrama esquemático da estrutura vertical dos distúrbios de leste no Atlântico Tropical Sul, (fonte: Hall, 1989).

Nota-se que a atividade convectiva e conseqüentemente a concentração de nuvens profundas é maior próximo ao eixo da onda.

### 2.2.3 Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN)

Sendo um dos principais sistemas de grande escala precipitantes no Nordeste, os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis consistem em sistemas de baixa pressão que se formam na alta troposfera e cuja circulação ciclônica fechada possui o centro mais frio que sua periferia (Gan, 1982). Originam-se sobre o Oceano Atlântico entre a faixa de 20°W -45°W e 0° -28°S e ao penetrarem no Brasil produzem tempo bom na região sul e central do Nordeste, devido a movimentos subsidentes que inibem a formação de nebulosidade. Em contra partida,

os VCANs são causadores de chuvas nos setores norte e nordeste do NE, onde há instabilidade, convergência de massa e movimentos ascendentes do ar, formando assim aglomerados de cumulonimbos (Cb) na costa do Nordeste (Gan e Kousky, 1982).

A maioria dos vórtices ciclônicos observados na vizinhança do Nordeste do Brasil, tem origem devido à intensificação simultânea da crista associada à Alta da Bolívia e o cavado corrente abaixo sobre o Oceano Atlântico (Kousky e Gan, 1981). Os VCAN têm movimento irregular, podendo se deslocar tanto de leste para oeste, como no sentido oposto. Podem ainda permanecer quase estacionários ou se deslocar mais de 8° por dia. Frank, 1970, observou que o tempo de vida dos ciclones tropicais frios varia consideravelmente, de algumas semanas a algumas horas. No entanto, os vórtices que penetram na região Nordeste são em sua maioria persistentes. Os vórtices que atuam no NE são observados na primavera, verão e outono, sendo que a máxima frequência ocorre no mês de janeiro.

De acordo com Carvalho, 1989 e Figueroa et al., 1995, a formação desses sistemas acontece na mesma época do ano em que o escoamento em 200 hPa apresenta-se meridional (de sul para norte) sobre o Brasil a leste do meridiano de 50° W.

Segundo Frank, 1966, a maioria dos vórtices ciclônicos da alta troposfera que atuam sobre o Nordeste do Brasil encontram-se nos altos níveis (acima de 5000m de altura). Cerca de 60% deles não atingem o nível de 700 hPa e em torno de 10% atingem a superfície. Dependendo de sua intensidade e duração, os VCAN podem causar sérios problemas regionais e locais. Empresas do setor elétrico são particularmente afetadas dependendo da intensidade da atividade convectiva e evolução dos sistemas precipitantes e ocorrência de descargas atmosféricas. As Figuras 2.6 e 2.7 mostram a seqüência de formação de um VCAN em 200mb no Atlântico Sul e a nebulosidade associada.

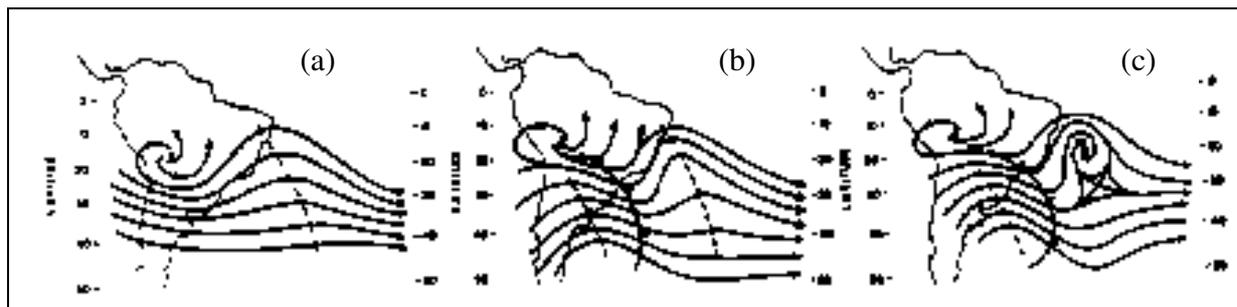


Figura 2.6 – Seqüência esquemática da formação de um vórtice ciclônico em 200mb no Atlântico Sul. (Fonte: Kousky e Gan, 1981, Gan, 1983).

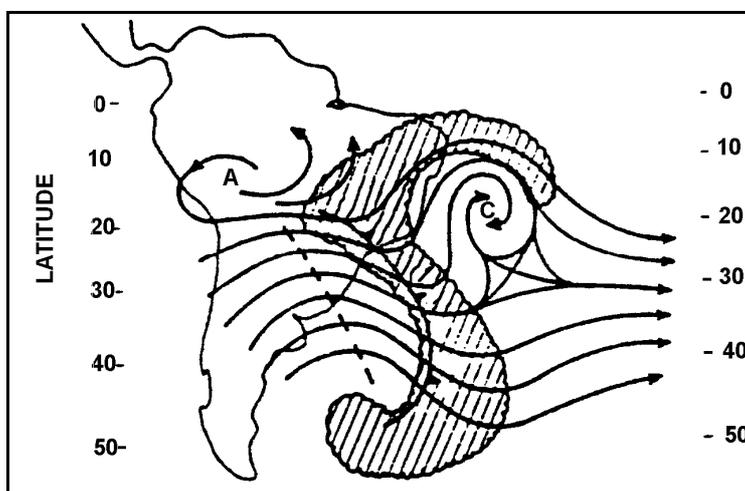


Figura 2.7 – Ilustração esquemática da nebulosidade média e alta para a situação correspondente a figura 2.2.6c. (Fonte: Kousky e Gan, 1981, Gan, 1983).

#### **2.2.4 Frentes Frias**

Classificados na categoria de escala sinótica por sua grande extensão horizontal, os sistemas frontais estão entre as perturbações atmosféricas mais importantes, responsáveis por precipitação e mudanças na temperatura em quase todo o país. No Brasil os sistemas frontais atuam durante todo o ano, sendo mais freqüentes nas médias e altas latitudes. (Oliveira, 1986).

A propagação típica das frentes frias é de sudoeste para nordeste ao longo da América do Sul, podendo atingir latitudes tropicais. As regiões do Nordeste atingidas por estes sistemas são preferencialmente, o sul e litoral da Bahia e o litoral dos Estados de Sergipe e Alagoas. A interação com a convecção tropical (exceto no inverno), provoca a intensificação da nebulosidade e convecção profunda. Ao interagir com vórtices ciclônicos de altos níveis na região Nordeste, freqüentemente as frentes frias se tornam semi-estacionárias no litoral. A Figura 2.8 mostra o avanço de uma frente fria em direção ao Nordeste.

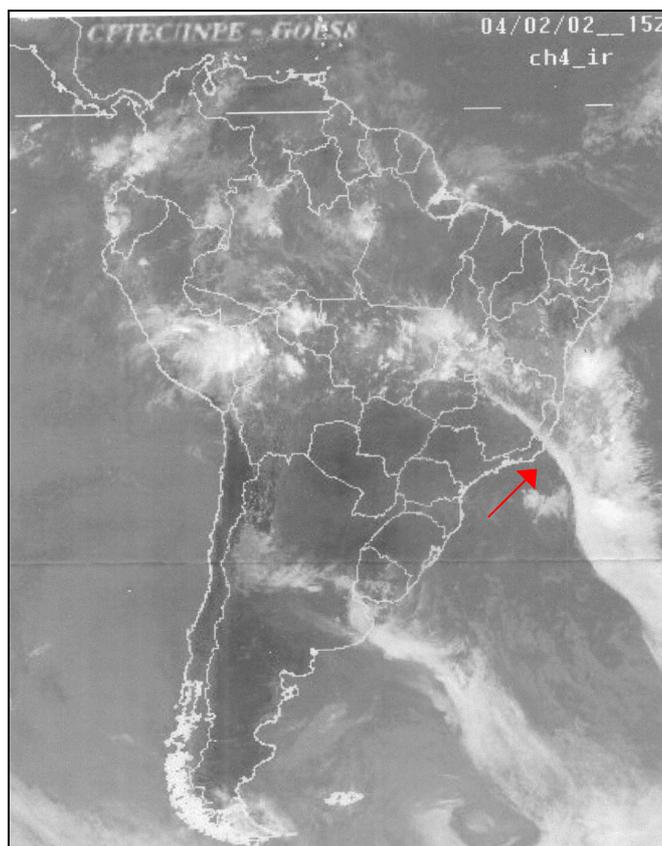


Figura 2.8 – Imagem do satélite GOES, em 04/02/02. (CPTEC/INPE).

### **2.2.5 Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM)**

A evolução dos SCM é freqüentemente associada à convecção profunda, cujo desenvolvimento ocorre normalmente devido a aquecimento nos baixos níveis da atmosfera, umedecimento na CLA e movimentos ascendentes em grande escala. Estes sistemas podem estar vinculados a distúrbios no escoamento de leste, geralmente originários de perturbações ao sul da ZCIT (Gomes Filho et al., 1996), os quais sofrem intensificação na interação com a topografia.

Resultados de pesquisas sobre a natureza, distribuição e organização da precipitação na região semi-árida do Nordeste, usando dados do radar de Petrolina - PE mostram que dependendo do período e do sistema de circulação atuante, as células convectivas se organizam em linhas, faixas ou bandas (Correia, 1989; Araújo, 1994; Silva Aragão et al., 2000).

Nuvens convectivas organizadas em linhas são comumente observadas na costa nortenordeste da América do Sul e podem se propagar para o interior do continente como Linhas de Instabilidade (LI) ou dissipar-se próximo à costa. Este tipo de sistema está associado com a penetração da brisa marítima (Cohen et al., 1989).

A precipitação observada na passagem de SCM em anos secos é acompanhada de rajada de ventos fortes e trovoadas, com curta duração, porém, de grande intensidade e são de origem local (Silva et al., 1994).

Resultados obtidos por Vitorino et al., 1997 ao estudar SCMs observados na região norte do Nordeste durante o período chuvoso de 1993 e 1994, mostraram que a formação destes sistemas ocorreu com maior freqüência no início da madrugada e no período da tarde.

A alta frequência no período da tarde foi associada com o máximo da convecção diurna sobre o continente e a grande ocorrência no início da madrugada tem relação com a circulação de vale-montanha.

### **2.2.6 El Niño – Oscilação do Sul (ENOS).**

O ENOS pode ser entendido como uma perturbação interanual do sistema clima, oceano e atmosfera com consequências intensas sobre os ecossistemas de todo o mundo.

O IOS (Índice da Oscilação do Sul). Ele é definido pela diferença entre os desvios em relação à média da pressão ao nível médio do mar (PNMM) no Tahiti (17°S, 150W) e em Darwin (12°S, 130W).

O IOS é positivo quando a pressão no Tahiti é maior que a média climatológica e, simultaneamente menor em Darwin. Nessas condições, a temperatura da superfície do mar (TSM) tem valores menores que a média climatológica (águas mais frias) no Pacífico central e leste, conhecida como fase fria. O IOS negativo ocorre na situação inversa, ou seja, quando a pressão em Darwin é menor que a média climatológica e simultaneamente maior no Tahiti. (Varejão-Silva, 2001).

#### **2.2.6.1. Fase Neutra do ENOS**

Em condições atmosféricas neutras, a convergência dos alísios de nordeste, no hemisfério Norte, e de sudeste no hemisfério Sul, sobre área equatorial do oceano Pacífico, faz com que a termoclina fique mais rasa junto à costa oeste da América do Sul e mais profunda no Pacífico Ocidental expondo as águas mais frias, essa configuração gera condições favoráveis ao transporte de água superficial em volumes consideráveis, até o ocidente aumentando o desnível da superfície do mar entre o Pacífico equatorial ocidental (mais alto) e o oriental (mais baixo) (Figura 2.9).

A forte radiação solar que atinge a superfície forma uma “piscina” englobando uma área que se estende desde o sudeste da Ásia e Indonésia até o nordeste da Austrália. Nela, comumente se observam temperaturas superficiais acima dos 28,5°C, responsáveis por altas taxas de evaporação e grandes aglomerados de nuvens fazendo com que o sudeste da Ásia e Indonésia seja bastante chuvoso. Ao contrário, na região oriental ao longo do Pacífico americano são observadas condições de seca e pouca precipitação.

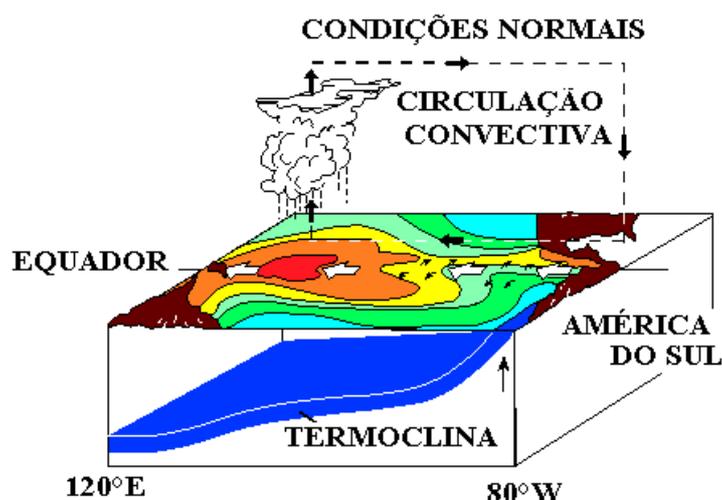


Figura 2.9 – Padrão de circulação durante a condição de Neutralidade. (Fonte: Oliveira, 2001).

### 2.2.6.2. Fase Quente do ENOS: El Niño

No oceano o El Niño se caracteriza por um aquecimento das águas superficiais e sub-superficiais (0-300m) no Pacífico central e oriental nas proximidades da costa do Peru e Equador (Cane, 1983).

Na atmosfera essa caracterização ocorre por um deslocamento em relação a posição normal dos grandes sistemas formadores de nuvens e o enfraquecimento dos ventos alísios (que sopram de leste para oeste) na região do Pacífico equatorial. Em virtude do aquecimento no oceano e enfraquecimento dos ventos, ocorrem mudanças na circulação da atmosfera nos níveis baixos e altos, alterando os padrões de transporte de umidade, e, portanto, a distribuição das chuvas em regiões tropicais e de latitudes médias e altas.

O esquema apresentado na Figura 2.10 ilustra o padrão de circulação que é observado em anos de El Niño na região equatorial do Oceano Pacífico. Pode ser observado águas quentes em praticamente toda a sua extensão. A termoclina fica mais aprofundada junto à costa oeste da América do Sul principalmente devido ao enfraquecimento dos ventos alísios podendo inclusive inverter o sentido. A superfície oceânica tende a nivelar-se e gerar ondas que se propagam da região de águas quentes até o continente americano. O nível da água do mar varia. A altura se reduz na região asiática e aumenta na região americana. Este fenômeno ocorre simultaneamente no oceano e na atmosfera e gera trocas de propriedades em torno do mundo (Philander, 1993; Trenberth, 1997). Com a mudança na direção os alísios o sistema de nuvens é advectado para leste e, portanto, o transporte líquido de calor, energia e umidade se deslocam do oceano Pacífico asiático para o pacífico oriental.

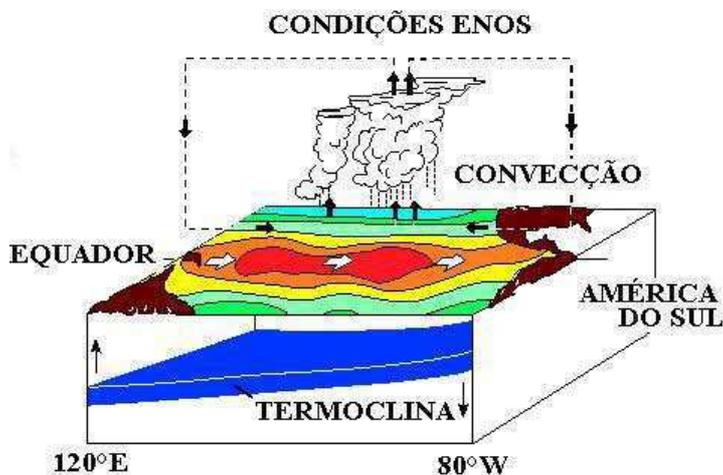


Figura 2.10 – Padrão de circulação durante o El Niño. (Fonte: Oliveira, 2001).

No Brasil, em anos de El Niño, a precipitação é reduzida na Amazônia e no Nordeste devido ao deslocamento da célula de Walker (Figura 2.2.11). Esta circulação é gerada em função da redução da força de Coriolis próximo ao Equador. A distribuição da pressão atmosférica nos trópicos, necessária para circulação de Walker, depende essencialmente das temperaturas das águas das zonas tropicais. Ao contrário, no sudeste e sul do Brasil, as chuvas são abundantes.

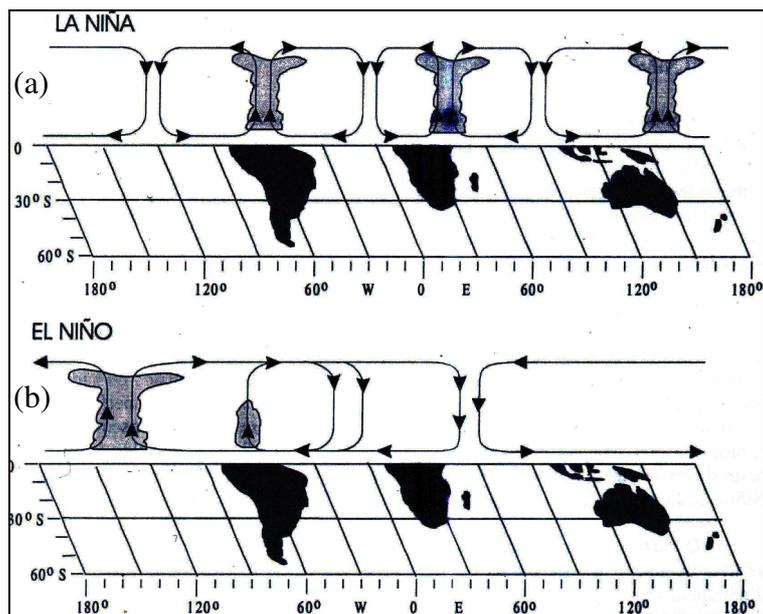


Figura 2.11 – Esquema da circulação de Walker: (a) condições de La Niña, (b) condições de El Niño. (Fonte: Arntz e Fahrbach, 1991).

### 2.2.6.3. Fase Fria do ENOS: La Niña

A fase fria do ENOS, La Niña, é caracterizada pelo declínio da TSM no Pacífico Equatorial Leste e intensificação dos ventos alísios, favorecendo a convecção, a nebulosidade e a precipitação na parte tropical oeste do Pacífico.

O esquema apresentado na Figura 2.12 ilustra o padrão de circulação que é observado em anos de La Niña na região do Pacífico Equatorial. Os ventos alísios se intensificam acima da normal climatológica (setas brancas), e percebe-se a inclinação da termocline na região Equatorial Leste (aprofundamento da termocline nessa região), aumentando a ressurgência de águas mais frias na costa oeste da América do Sul. Com a intensificação dos alísios a água mais quente é deslocada para o setor oeste do Pacífico e provoca o aumento da nebulosidade e precipitação (Oliveira, 2001).

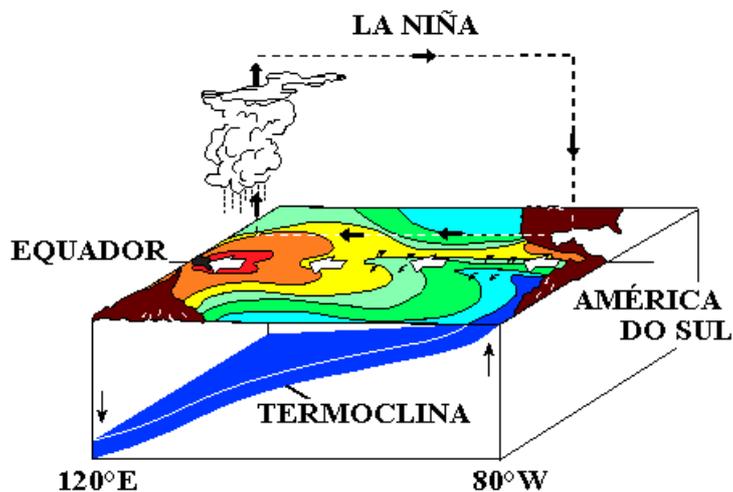


Figura 2.12 – Padrão de circulação durante a La Niña. Fonte: Oliveira, 2001.

Ao contrário do que ocorre em anos de El Niño, a atuação da La Niña favorece o aumento da precipitação no Nordeste, devido à presença do ramo ascendente da célula de Walker, e diminuição das chuvas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Os estudos sobre descargas atmosféricas e seus efeitos em sistemas de potência e distribuição de energia aumentaram consideravelmente na década de 80, depois das primeiras aplicações de pára-raios no melhoramento do desempenho em linhas de transmissão no Japão em 1980. A primeira aplicação nos Estados Unidos foi registrada em 1982, sendo que sua difusão teve início apenas no final dos anos 80 (Cigré, 1999; Rocha et al., 2001).

Na mesma época, no Brasil, as primeiras pesquisas sobre descargas elétricas na atmosfera (relâmpagos), foram realizadas através de medidas de campo elétrico, feitas a partir de sensores a bordo de balões estratosféricos e também no solo, com a utilização de contadores de descarga e de um sistema de relâmpagos (Gin, 1992; Gin et al., 1994; Pinto et al., 1992; Araújo et al., 1990; Gin, 1997; Gin et al., 1996; Pinto Jr. et al., 1996).

A influência das descargas atmosféricas em sistemas de transmissão ocorre por meio de transitórios que podem ser entendidos como perturbações em grande extensão da linha provocadas por flutuações dinâmicas de estado. Essas perturbações representam mudanças abruptas na tensão e corrente da linha. Isso significa dizer que, ao atingir uma linha, a descarga atmosférica provoca o aparecimento de ondas eletromagnéticas trafegantes pelo

sistema com reflexões e refrações nos pontos onde há mudança de impedância característica, ou seja, nos terminais da linha (Elgerd, 1977; D'Ajuz et al., 1987 e Ramos e Dias, 1982).

Essas ondas de corrente e tensão em altíssima frequência são chamadas de surtos atmosféricos. No caso de descargas próximas a linha, uma tensão é induzida, aonde esse valor não excede 500 kV (Ramos e Dias, 1982; D'Ajuz et al., 1987).

### **3.1 PROTEÇÃO E SEGURANÇA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO**

De acordo com Mattos, 2004, os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas são projetados de acordo com as características descarga piloto, ou líder escalonado de descargas atmosféricas entre nuvem e terra.

Um outro aspecto importante na proteção e segurança de linhas é o cálculo das sobretensões geradas por descargas atmosféricas. Alguns pesquisadores fizeram uso do cálculo de transitórios elétricos para avaliar os efeitos da incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão em redes de média e baixa tensão. Os resultados mostram que o conhecimento dessas sobretensões auxilia na elaboração de medidas de proteção que reduza o número de desligamentos devido à incidência de descargas atmosféricas (F. Visacro et al., 2001; F. Visacro et al., 2002; Pereira, 2001).

Atualmente sabe-se que a utilização de pára-raios em regiões de alta atividade cenáurica (alta densidade de descarga) é imprescindível, principalmente em locais em que os índices de faltas por descarga atmosférica chegam a 70% dos desligamentos. Vários autores

comprovam a grande melhoria no desempenho das LT com o uso destes dispositivos de proteção (Rocha et al., 2001; Zanette Jr e Pereira., 2001 e Piantini et al., 2000).

Schoroeder et al., 2001, pesquisaram os efeitos da corrente de descargas atmosféricas ao atingir torres de transmissão. Verificaram que a corrente sofre contaminação por efeito de descontinuidades (canal de descarga, estrutura e aterramento).

É comum no setor elétrico a utilização de modelos computacionais para simular o efeito de descargas atmosféricas na qualidade do fornecimento e distribuição de energia. Rodrigues et al., 2001, utilizando um modelo eletromagnético para avaliar a impacto da orografia na distribuição de descargas atmosféricas mostraram que o relevo tem influência na distribuição das descargas atmosféricas, mesmo em regiões com baixo declive.

A propagação de transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão, decorrente de surtos atmosféricos foi estudado através de um modelo proposto por Marti e Dommel, 1997. Os principais resultados permitem visualizar as ondas trafegantes durante a ocorrência do surto como também de fenômenos mais complexos envolvendo outros equipamentos (Aquino et al., 2001).

### **3.2 CONDIÇÕES AMBIENTAIS E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.**

Batavia et al., 2000, usaram modelos estatísticos de regressão linear múltipla para obter mapas com configurações espaciais e temporais de variáveis climáticas que influenciam na transmissão das linhas aéreas da Ligth – Rio. Entre as variáveis meteorológicas o vento

representa uma das mais importantes. É uma variável que causa grande impacto na transmissão de energia, devido a sua influência direta sobre a ampacidade. Esse efeito foi avaliado por Silva Filho et al., 2001 através de modelos estatísticos e dados da rede anemométrica. Os resultados mostraram ampacidade mais elevada nos horários de ponta (preferencialmente entre as 17 às 20 horas), aonde os ventos são mais favoráveis.

(AMPACIDADE: termo utilizado no jargão técnico nacional oriundo da palavra inglesa “ampacity”, a qual está relacionada à capacidade da linha de transmissão de transportar energia elétrica diante do aquecimento dos seus condutores sujeito à corrente elétrica associada a esta carga e ao meio ambiente atravessado por esta linha) (<http://jmhb.sites.uol.com.br/>).

Wronski et al., 2003, estudaram a influência das condições climáticas nos índices de continuidade de fornecimento de energia da CELESC (Companhia de Energia Elétrica de Santa Catarina), usando análise multivariada por componentes principais, análise de clusters e RNA (Redes Neurais Artificiais). Os resultados mostraram que a aplicação da metodologia adotada por ambas as técnicas foi satisfatória, os quais proporcionaram um maior controle da empresa sobre os índices de satisfação e alcance das metas estipuladas pelo órgão regulador de energia. Foi possível ainda, definir com maior segurança a quantidade de equipes de apoio para ficar de sobreaviso a possíveis anormalidades no fornecimento provocado por fenômenos climáticos.

Rocha e Oliveira, 2001, utilizaram uma rede de oscilografia desenvolvida pela CEMIG, que permite determinar o tipo de falta, sua duração, localização e o efeito em outros barramentos do sistema de transmissão. Eles concluíram que a avaliação conjunta de

informações da rede oscilografica e dados meteorológicos foram essenciais para a caracterização da falha.

A utilização de sensores de detecção de raios compõe atualmente a metodologia mais apropriada e completa de aquisição de dados sobre descargas atmosféricas. É um método que permite informações imprescindíveis para estudos sobre esse fenômeno tais como, o instante de ocorrência, localização, tipo de descarga e pico de intensidade de corrente. Instituições públicas e privadas, como CEMIG, FURNAS, INPE e SIMEPAR, trabalham em conjunto na manutenção e ampliação da RINDAT (Rede Integrada de Detecção de Descargas Atmosféricas) com o objetivo de permutar informações tecnico-científicas, intercâmbio dos sinais obtidos pelos sensores que contempla praticamente todo o sul, sudeste e centro-oeste do país (maior concentração de descargas atmosféricas). Nesse sentido, novos estudos são realizados continuamente com o objetivo monitorar e estabelecer a localização preferencial da ocorrência de descargas atmosféricas (Beneti et al., 2002; Nozaki et al., 2001 e F. Visacro et al., 2001).

Utilizando dados dos sensores da RINDAT, dados de satélite e radar meteorológico Abdoulaev et al. (2000) realizaram um estudo exploratório de descargas elétricas associadas com 10 sistemas meteorológicos em escala meso- $\alpha$  (frentes, linhas de instabilidade) e aglomerados escala meso- $\beta$  (linhas de convecção, tempestades locais), foi investigado a variação de intensidade das descargas atmosféricas com a sua polaridade durante a atuação desses sistemas. Os resultados mostraram que apesar dos raios negativos predominarem, os de polaridade positiva possuem pico de corrente até duas vezes maiores que os de polaridade negativa. Outro resultado importante é que na maioria dos casos, os raios positivos sobrepõem

as áreas anteriormente ocupadas por raios negativos e que a grande maioria dos raios positivos ocorre em zonas de transformação das nuvens convectivas em estratiformes.

Sensores do tipo Impact Esp instalados para monitoramento na área de atuação da ELEKTRO permitiram obter mapas de densidade e intensidade das descargas, incidência em uma linha, localização das descargas para um dado evento meteorológico e acompanhamento em tempo real da atividade de descarga.

A partir de informações sobre descargas atmosféricas a nível cenáurico e de polaridade das descargas fornecidas pelo SIMEPAR (Sistema Meteorológico do Estado do Paraná), França e Maia, 2003, confeccionaram mapas cenáuricos e de densidades de descargas médias mensais para a área de concessão da Light no Estado do Rio de Janeiro, no período de 1998 – 2002. Essas informações foram incorporadas em projetos da LIGHT visando proteção das linhas de transmissão em regiões identificadas como área de risco.

Antonio e Antonio, 2000, usando imagens de satélite e de radar meteorológico investigaram as condições meteorológicas em São Paulo na noite de 11 de março de 1999. Neste dia ocorreu um blecaute de grandes proporções no Brasil. Foi detectada alta frequência de descargas atmosféricas em áreas de intensa precipitação. O mapeamento da distribuição espacial da chuva e das descargas atmosféricas indicou ocorrência de forma mais agrupada sobre uma das linhas de transmissão de energia. O registro simultâneo da ocorrência da descarga sobre a linha e o desligamento na subestação de Bauru, SP, pode ser um indicativo de que a sobretensão responsável pelo desligamento de disjuntores veio através de uma das linhas de transmissão que aportam em Bauru.

Sistemas convectivos intensos na região metropolitana de São Paulo no dia 14 de março de 1998 foram monitorados usando imagens de radar. Verificou-se através da correlação das variáveis hidrometeorológicas estimadas e das medições elétricas que, os horários de pico ocorreram na maioria das vezes no fim da tarde e início da noite, características típicas de atividade convectiva de verão (Ferreira et al., 2000).

O monitoramento de tempestades severas através de satélites, radares meteorológicos e sensores de detecção de descargas atmosféricas no Estado de São Paulo, mostrou que a máxima densidade de descargas ocorreu na área metropolitana. O estudo atribui o aumento da densidade nessa área a aspectos urbanos (Beneti et al. 2004).

## **4. MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 DADOS**

A principal fonte de informações usada nesta pesquisa é constituída por registros de falhas transitórias no sistema de transmissão da CHESF. Esse banco de dados contém informações sobre as causas de interrupções de energia, data e horário do evento. Vendavais, poluição e descargas atmosféricas estão entre as causas mais importantes de corte de energia. O conjunto de dados é constituído por um período de quinze anos, com início em 1988 e término em 2002.

Neste estudo foram analisadas somente situações cujas ocorrências de falhas estiveram associadas diretamente com descargas atmosféricas. Portanto, foram analisados casos com forte atividade convectiva e desenvolvimento de sistemas precipitantes intensos que afetaram o sistema de transmissão da CHESF. Entretanto, convém ressaltar que a grande motivação para a pesquisa como também a escolha dos eventos analisados surgiu da constatação de falhas por descargas atmosféricas em anos que coincidentemente se destacaram pela redução significativa no total pluviométrico em relação à média climatológica regional causando sérios transtornos à economia decorrente do fenômeno El Niño.

Foram utilizados dados do NCEP (National Center for Environmental Prediction) em pontos de grade de 2,5 X 2,5 Km para as componentes zonal e meridional do vento,

temperatura do ar e umidade específica imagens de satélites na bandas espectrais visível e infravermelho, registros pluviométricos de estações situadas na área de atuação da CHESF.

Conforme mencionado anteriormente a chuva na região Nordeste é predominantemente de natureza convectiva, provém de sistemas isolados (organizados ou não) e mesmo em meses com precipitação acima da média, a distribuição da chuva no tempo é bastante irregular e ocorre normalmente em poucos dias do mês.

Dentro deste contexto, a atividade inicial consistiu do processamento das informações sobre falhas no sistema de transmissão de energia, e da verificação de ocorrência de eventos climáticos extremos.

Na escolha dos períodos de estudo foi necessário definir etapas. De início foi preciso separar anos com episódios de El Niño e La Niña intensos usando informações da CHESF e dados climatológicos. Nessa fase foram bastante utilizadas informações contidas no CLIMANALISE disponível no site do CPTEC (<http://www.cptec.inpe.br/clima>).

O passo seguinte foi determinar quais os episódios de falhas que seriam analisados. Tendo sempre como base os objetivos do trabalho, a opção mais adequada foi selecionar o mês com o maior número de eventos de interrupções no fornecimento de energia por descargas atmosféricas ocorridos em anos de El Niño. A partir desse ponto, usou-se um segundo critério na escolha dos meses representativos de situações neutras e sob impacto do fenômeno La Niña. Tornou-se imprescindível priorizar também aspectos de grande escala (condições sinóticas semelhantes). Dezembro foi o mês de máxima ocorrência de falhas em

ano de El Niño forte. Uma síntese dos eventos de falhas analisados neste estudo é apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Eventos de falhas por descarga atmosférica durante o período de análise.

<b>ANO</b>	<b>Total anual de Falhas(nº)</b>	<b>Período analisado (dias / mês)</b>	<b>Interrupções no Período(nº)</b>	<b>Episódio</b>
<b>1997</b>	65	11;13;14;20;21;26 dezembro	21	El Niño
<b>2000</b>	52	01,05,13,15,20,21,24 janeiro	13	La Niña
<b>2001</b>	37	01,02;27 dezembro	06	Neutro
<b>2002</b>	28	02,04,07,14,15,17,19,24;29 janeiro	15	Neutro

#### **4.1.1 BASE DE DADOS DE FALHAS**

Para avaliar a associação entre condições atmosféricas e interrupções no fornecimento de energia foi preciso lidar com bases de dados diferentes. Uma das maiores dificuldades para estruturar a base necessária à análise estatística foi encontrada no processo de mapeamento das localidades afetadas pelas descargas atmosféricas.

Os dados sobre eventos de falhas transitórias no sistema de energia da CHESF não contêm informações sobre a localização geográfica atingida por raios. Nas situações em que

toda a linha é afetada o problema é corrigido automaticamente. Apenas nos episódios de falhas permanentes providencia-se o deslocamento de uma equipe de manutenção até o local da ocorrência, e então é possível obter as coordenadas do setor afetado.

Por esta razão, os dados sobre ocorrências de falhas, não são referenciados geograficamente. Os registros contêm informações sobre linhas de transmissão com dimensões bastante variáveis. A extensão do trecho da linha afetada por descarga atmosférica (atingida pontualmente) pode abranger vários estados ou simplesmente parte de um deles.

Já os dados usados para quantificar o grau de intensidade e avaliar mecanismos de formação e desenvolvimento de nuvens convectivas responsáveis pelas descargas atmosféricas são obtidos em estações meteorológicas identificadas através das coordenadas latitude e longitude.

No caso de subestações foi possível determinar coordenadas geográficas extraído diretamente de um mapa do sistema elétrico da região Nordeste. No entanto, a localização dos setores atingidos pelas descargas atmosféricas foi feita de forma subjetiva. Na maioria dos casos foi considerada uma posição aproximada obtida a partir das coordenadas geográficas de cidades situadas na região do trecho afetado.

O sistema de transmissão da CHESF possui cinco tipos de tensão de operação em linhas (34,5 kV, 69 kV, 138 kV, 230 kV, 500 kV). Na Tabela 4.2 é apresentado o número de falhas ocorridas nas linhas de cada tensão de operação. Destas, em apenas quatro foram registradas ocorrências de falhas transitórias por descarga atmosférica.

Tabela 4.2 – Distribuição quantitativa dos eventos de falhas por descarga atmosférica nas linhas de tensão de operação para o período de estudo analisado por ACP.

Tensão de operação	Total do ano				Total do período (dias escolhidos)			
	1997	2000	2001	2002	1997 (21/22 dez)	2000 (21/22 jan)	2001 (02 dez)	2002 (07 jan)
<b>69kV</b>	11	01	04	00	01	00	02	00
<b>138kV</b>	14	12	12	12	08	00	00	00
<b>230kV</b>	39	33	18	15	02	05	02	01
<b>500kV</b>	01	06	03	01	00	02	00	00

Observa-se que dentro do período analisado as linhas mais afetadas foram as de 230kV seguida das de 138kV. Para o ano de El Niño as linhas mais prejudicadas foram as de 138kV, enquanto para o ano de La Niña as linhas com tensão de operação de 230kV foram as mais atingidas por descargas atmosféricas. Fatores como a diferença nas localidades atingidas nas categorias de El Niño, La Niña e Neutro e o maior número de linhas de tensão de operação de 230 e 138 kV nessas localidades, podem explicar essa distribuição nas linhas afetadas.

#### 4.2 - ANÁLISES DE COMPONENTES PRINCIPAIS

A indefinição sobre a frequência de ocorrência e distribuição espacial de descargas atmosféricas, evidencia a multiplicidade de elementos climáticos usados para explicar esses fenômenos. Na maioria dos casos o desenvolvimento de tempestades e ocorrência de descargas elétricas está associado com mudanças significativas no padrão de circulação

atmosférica, no teor de umidade do ar, na pressão atmosférica e na temperatura do ar. Entretanto, o grau de influência de cada variável isoladamente ou resultante da interação entre elas varia consideravelmente dependendo da região e do período analisado.

Para explicar a estrutura de dependência entre as variáveis dominantes na ocorrência desses eventos foram estimados modelos de análise fatorial com base na matriz de correlação pelo método de componentes principais. A vantagem deste método é que não há pressuposição da normalidade das variáveis envolvidas. Os fatores são obtidos a partir da matriz de covariância. No processo de decomposição obtêm-se cargas fatoriais que indicam quanto cada variável está associada a cada fator. Os autovalores refletem a importância de cada um deles e representam as variâncias das componentes principais. As correlações das variáveis com suas componentes principais (CP) são denominadas de “pesos” e assumem valores entre zero e um. Quanto mais próximo de um, mais representativa é a variável naquela componente. Os pesos apresentam sinais algébricos com valores negativos ou positivos, indicando se a associação é direta ou inversa.

Em geral a primeira solução obtida através de programas estatísticos não fornece fatores que tenham uma interpretação adequada. Neste trabalho, para melhorar a análise usou-se o procedimento de rotação de fatores através do método VARIMAX. Na escolha do número de fatores adequados ao estudo foi utilizado o critério desenvolvido por Kaiser (1958). Na aplicação deste critério foram excluídos os fatores com autovalores menores que um. Efetivamente, este critério descarta aqueles fatores que tem grau de explicação menor que o de uma variável isolada.

A análise em componentes principais (ACP) foi aplicada ao vento nos níveis de 200, 500 e 925 hPa; umidade específica e temperatura do ar em 925 hPa para os dias com registro de falhas.

As matrizes foram dispostas e organizadas em arquivos na forma de matrizes com 50 colunas para o vento (componentes zonal e meridional) e 361 linhas (número de pontos de grade de 2,5 X 2,5 Km) nos níveis de 200, 500 e 925 hPa para a análise conjunta (aplicação da técnica aos episódios de El Niño, La Niña e Neutralidade juntos). No caso da umidade específica e da temperatura do ar em 925 hPa o número de colunas se reduz a 25.

Para a aplicação aos episódios de El Niño, La Niña e condição Neutra separadamente, os números de colunas foram de 12, 14 e 24 para o vento, 6, 7 e 12 para a temperatura do ar e umidade específica respectivamente nos níveis especificados.

De acordo com Weare e Nasstrom, 1982, os pontos mais importantes da utilização deste método são: (i) a descrição satisfatória das variações de um campo complexo a partir de um número relativamente pequeno de funções, associado a coeficientes temporais; (ii) o fato de que as funções empíricas derivadas desta técnica são favoráveis para interpretações físicas; (iii) a ACP é um método adequado para campos espaciais em grades regulares ou não.

As componentes principais são combinações lineares não correlacionadas cujas variâncias são tão grandes quanto possíveis. A primeira componente principal é a combinação linear com máxima variância. A segunda componente principal é aquela combinação que não está correlacionada com a primeira e representa a maior parte da variância restante.

### 4.2.1 Descrição do Método

Para se obter as componentes principais consideram-se inicialmente os dados originais,  $[Z]$ , matriz ( $\mathbf{n} \times \mathbf{k}$ ) em que  $\mathbf{n}$  é o número de observações e  $\mathbf{k}$  é o número de variáveis de um determinado campo. Com base na matriz  $[Z]$  obtém-se a matriz correlação  $[R]$  da qual se encontram os autovalores e autovetores da série, a partir dos quais são construídas as componentes principais. Essa técnica tem a vantagem de que a máxima variância pode ser explicada pela classificação dos autovetores associados aos maiores autovalores da matriz de correlação. Isso significa dizer, que a amostra de dados originais pode ser analisada a partir de um pequeno número de componentes independentes entre si (ortogonais) (Presendorfer, 1998).

A matriz de correlação é dada por:

$$R = \frac{1}{n-1}(Z)'(Z) \quad (1)$$

Sendo  $R$  uma matriz simétrica positiva de dimensão ( $k \times k$ ), ela é diagonalizável por uma matriz  $A$ , de mudança de base, denominada de autovetores. A matriz diagonal  $D$  cujos elementos diagonais são os autovalores ( $\lambda$ ) de  $R$ , é expressa por:

$$D = A^{-1}R.A \quad (2)$$

Devido à ortogonalidade dos autovetores, a matriz inversa de  $\mathbf{A}$  ( $\mathbf{A}^{-1}$ ) é igual a sua transposta ( $\mathbf{A}^t$ ). Dessa forma, as componentes principais  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$  são obtidas através de combinações lineares entre a matriz transposta dos autovetores ( $\mathbf{A}^t$ ) e a matriz ( $\mathbf{Y}$ ) (vento, temperatura do ar e umidade específica),

$$\mathbf{Z} = \mathbf{A}^t \cdot \mathbf{Y} \quad (3)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{Z}$$

Com isso, cada linha de  $\mathbf{Z}$  corresponde a uma componente principal formando as séries temporais associadas aos autovalores. Os valores do  $n$ -ésimo local podem ser calculados por:

$$Y = a_{j1} \cdot Z_1 + a_{j2} \cdot Z_2 + \dots + a_{jk} \cdot Z_k + a_{np} \cdot Z_p \quad (4)$$

Em cada Componente Principal existe uma parcela da variância total dos dados, os quais podem ser ordenados de forma decrescente dos autovalores mais significativos de  $a_1$  em  $\mathbf{A}$ , dado por:

$$Z_i = \sum_{j=1}^n a_{j,i} Y_j \quad (5)$$

O número escolhido de Componentes Principais será de acordo com o critério de truncamento de Kaiser, que considera como mais significativos os autovalores cujos valores sejam superiores à unidade Garayalde et al., 1986. Os fatores comuns são obtidos através da

relação entre a matriz de autovetores ( $\mathbf{A}$ ) e a raiz quadrada do autovalor ( $\lambda$ ), ou seja, o primeiro fator comum é obtido pela relação entre o primeiro autovetor  $a_{11}$  e o primeiro autovalor ( $\lambda_1$ ) e assim por diante (Wilks, 1995).

Os fatores podem ser distribuídos espacialmente representando a contribuição (peso) destes em relação à variância total do conjunto de dados. Em nosso caso específico, dados de vento, temperatura do ar e umidade específica nos níveis anteriormente especificados através dos fatores mais significativos, selecionados pelo critério de Kaiser.



## **5. RESULTADOS**

### **5.1 ANÁLISE QUALITATIVA**

A distribuição anual e mensal das ocorrências de falhas por descargas atmosféricas entre 1988 e 2002, no sistema de transmissão da CHESF, é ilustrada nas Figuras 5.1.1a e 5.1.1b. O ano de 1997 destaca-se por apresentar a maior concentração de eventos no período. O comportamento sazonal com maior concentração no período chuvoso é evidente no histograma apresentado na Figura 5.1.1b. Cerca de 74% dos casos, foram observados de janeiro a abril e 30% deles foram registrados só no mês de março.

Percebe-se também, na distribuição anual de falhas (Figura 5.1.1a), uma relação do tipo causa e efeito entre episódios de El Niño e La Niña e frequência de interrupções por descargas atmosféricas. Observa-se nitidamente a queda no número de ocorrências de falhas nos eventos de El Niño (1989/1990, 1991/1992 e 1997/1998). A relação oposta com aumento no número de falhas é verificada em situações sob a influência de La Niña (1988/1989, 1995/1996, 1999/2000).

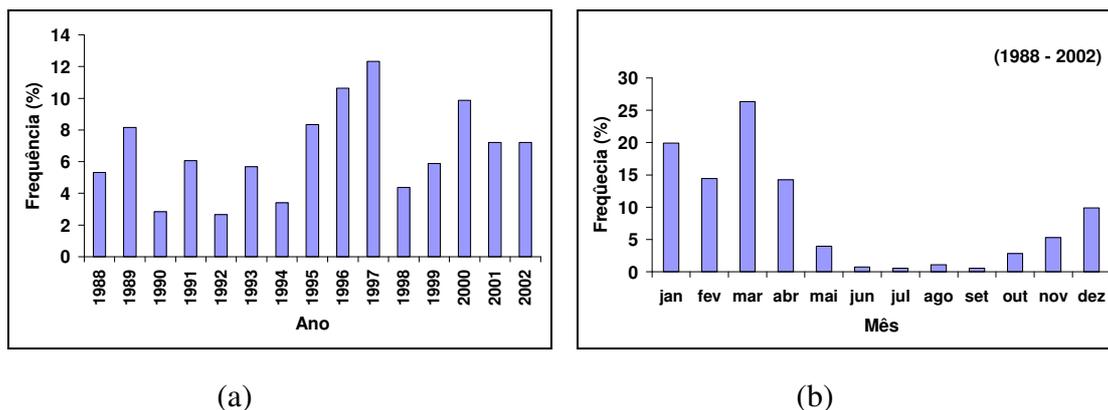


Figura 5.1 - Distribuição anual (a) e mensal (b) das ocorrências de falhas por descargas atmosféricas entre 1988 e 2002, no sistema de transmissão da CHESF. (Fonte dos dados: CHESF)

### 5.1.1 DEZEMBRO DE 1997

Em 1997 foram registradas 66 falhas por descargas atmosféricas sendo que 56% dos eventos se concentraram nos meses de janeiro (24%) e dezembro (32%) (Figura 5.2). Em meados deste ano, mais precisamente a partir do mês de julho, os efeitos do El Niño foram perceptíveis em várias regiões do Brasil. Nesse período as chuvas foram abaixo da média em várias localidades da Região Norte e Nordeste (<http://www.inpe.br>).

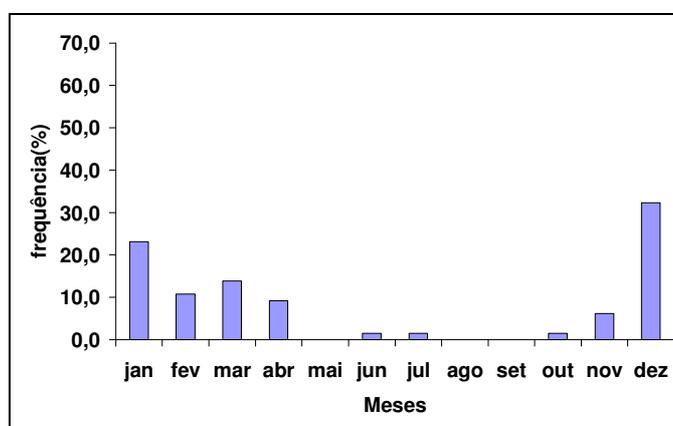


Figura 5.2 – Distribuição mensal das ocorrências de falhas por descargas atmosféricas para o ano de 1997. (Fonte dos dados: CHESF).

O El Niño de 1997/1998 evoluiu rapidamente a partir do mês de abril de 1997. Entretanto, em janeiro a situação observada era de La Niña (resfriamento das águas do Oceano Pacífico Equatorial). No entanto, no mês de dezembro as anomalias de temperatura da superfície do mar do Pacífico Oriental variaram entre 3,5° e 4,5° acima da média climatológica do mês (aquecimento).

Segundo dados do CPTEC, durante quase todo o mês de dezembro a região Nordeste esteve sob a influência de Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis. As áreas de atividade convectiva intensa associadas a esses sistemas produziram chuvas em torno da média climatológica em grande parte dos estados da Paraíba, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Ceará. No setor leste da Paraíba e Rio Grande do Norte foram registradas chuvas acima da média (Figura 5.3).

No setor leste dos estados do Rio Grande do Norte, Pernambuco e Paraíba a precipitação observada foi de 50 mm. Desvios positivos de aproximadamente 25 mm foram observados nas porções leste do Rio Grande do Norte e da Paraíba (Figura 5.3).

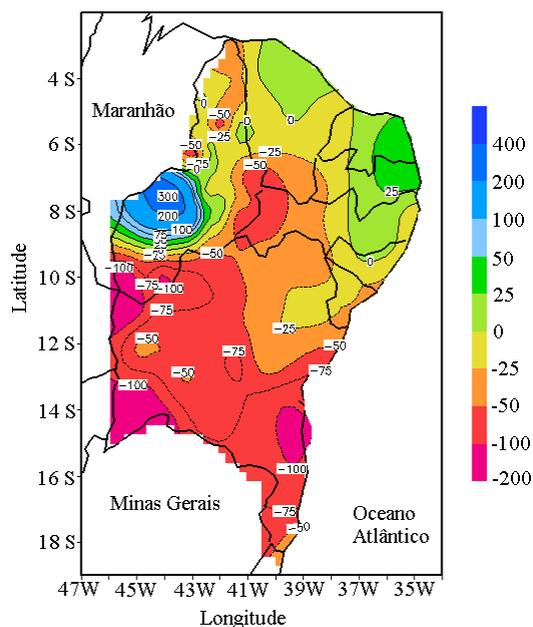


Figura 5.3 – Desvios da média climatológica (mm) para a precipitação no mês de dezembro de 1997 sobre o Nordeste brasileiro.

As condições meteorológicas associadas com o terceiro vórtice que atuou na região foram favoráveis à ocorrência de atividade convectiva intensa e chuva forte na área das linhas de transmissão de 138 e 230 kV, principalmente no trecho entre Campina Grande - PB (CG) e Santa Cruz - RN (SC). As Figuras 5.4 e 5.5 e a Tabela 5.1 mostram a região do Nordeste e em particular da Paraíba afetada por descargas atmosféricas e os histogramas com o total diário da precipitação em dezembro de 1997, observado nas estações situadas no trecho entre CG e SC. Nota-se que as chuvas que atingiram esta área ocorreram preferencialmente entre os dias 20 e 23 do mês.

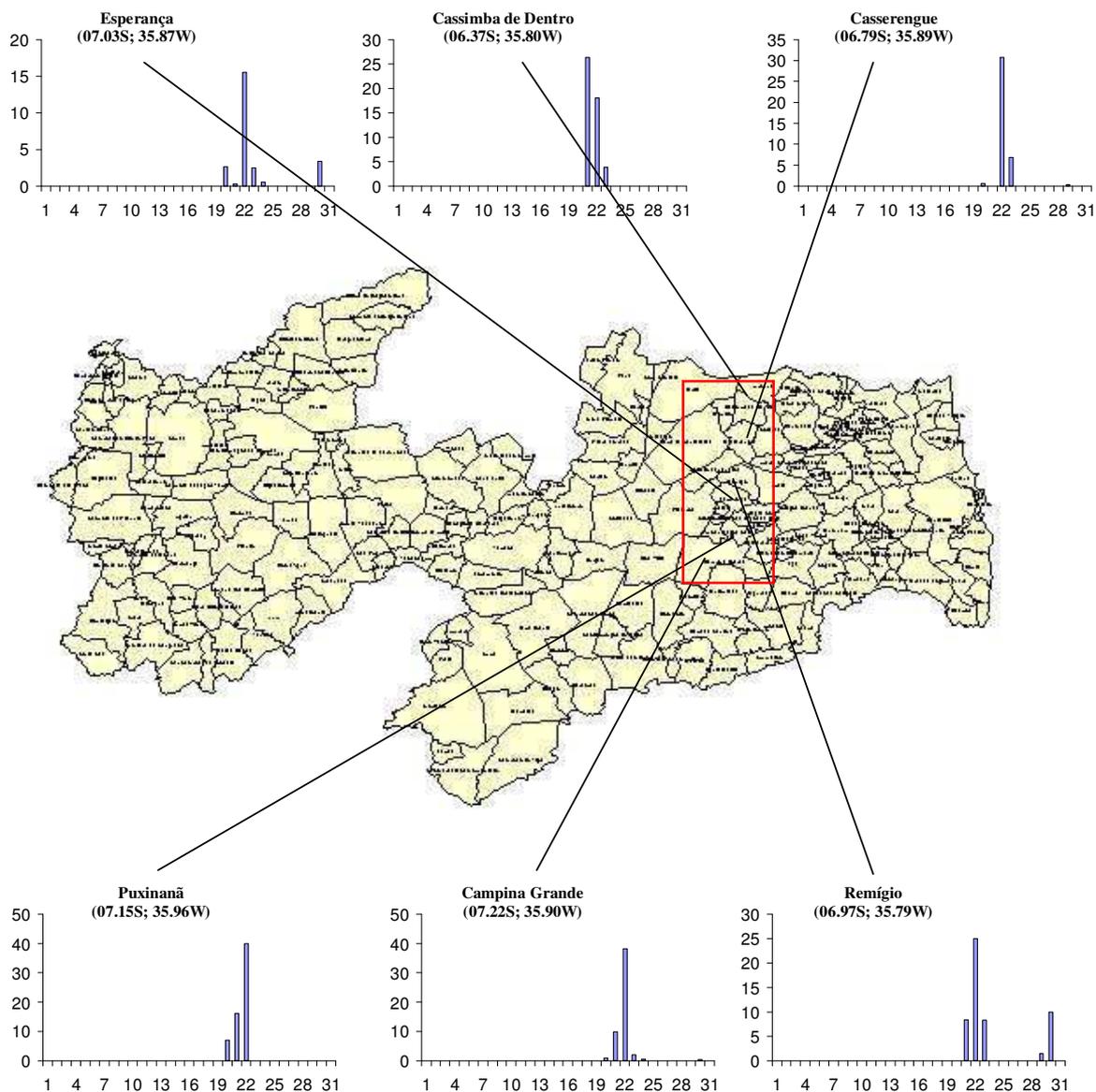


Fig. 5.4 – Distribuição espacial do total diário de precipitação em dezembro de 1997 para postos pluviométricos próximos ao trecho afetado Campina Grande – Santa Cruz. (Fonte dos dados: CHESF e LMRS).

Tabela 5.1 – Postos pluviométricos no estado da Paraíba próximos à ocorrência de falhas por descargas atmosféricas no trecho Campina Grande – Santa Cruz. (Fonte: LMRS).

Posto pluviométrico	Latitude	Longitude
Cacimba de Dentro	-06.37	-35.80
Campina Grande	-07.22	-35.90

Casserengue	-06.79	-35.89
Esperança	-07.03	-35.87
Puxinanã	-07.15	-35.96
Remígio	-06.97	-35.79

Em dezembro de 1997, os trechos atingidos por interrupção de energia se concentraram em uma área específica. A região leste dos estados do Rio Grande do Norte e Paraíba foi à área mais afetada por descargas atmosféricas (Figura 5.5). A legenda de cores representa o número de desligamentos no sistema em cada trecho representado.

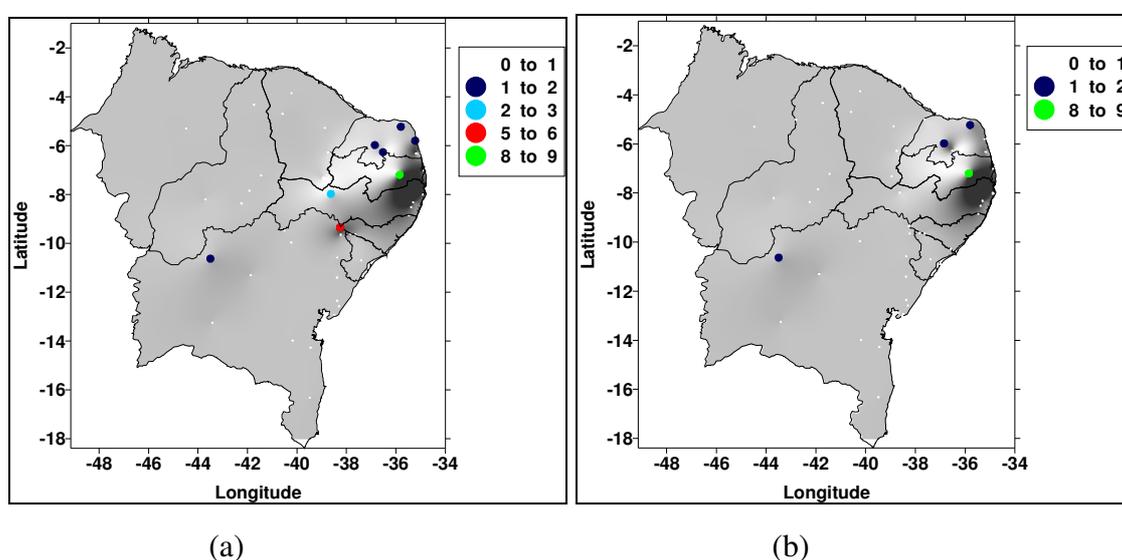
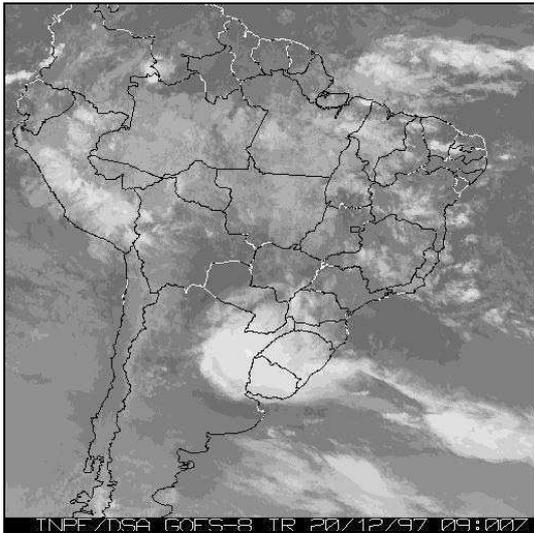
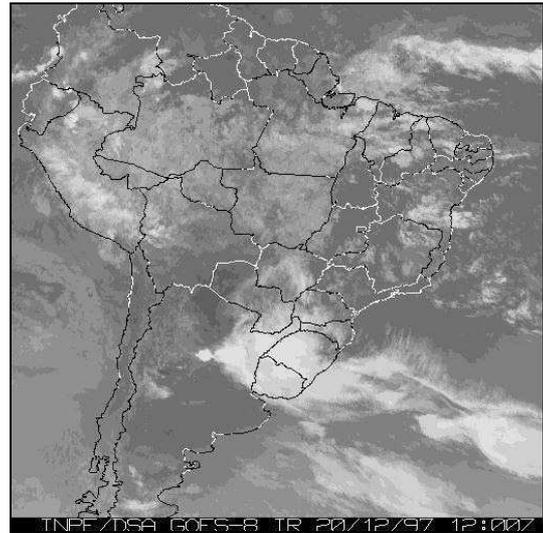


Figura 5.5 – Distribuição espacial das falhas ocorridas no mês de dezembro de 1997 (a) e para os dias 20 e 21 de dezembro de 1997 (b). (Fonte dos dados: CHESF)

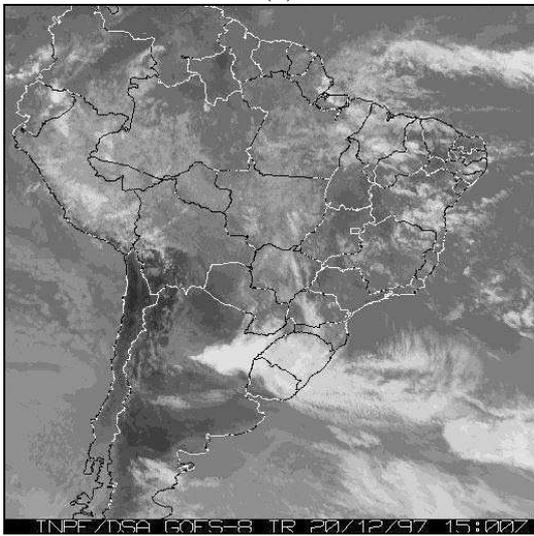
A seqüência de imagens de satélite mostrada na Figura 5.6 ilustra a nebulosidade sobre a América do Sul nos dias 20 e 21 de dezembro. A evolução da nebulosidade e desenvolvimento de aglomerados em mesoescala é evidente em ambos os dias.



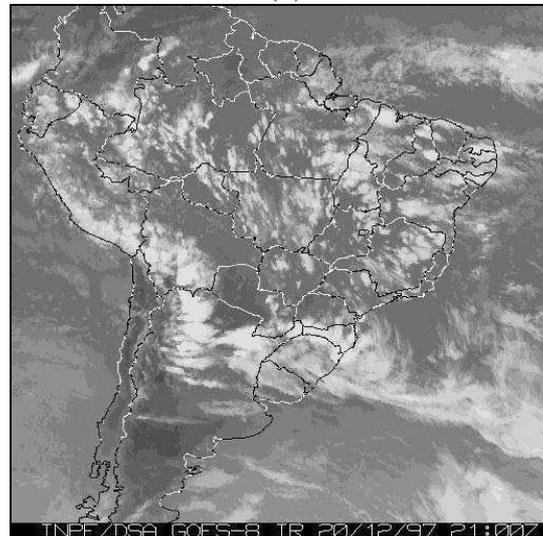
(a)



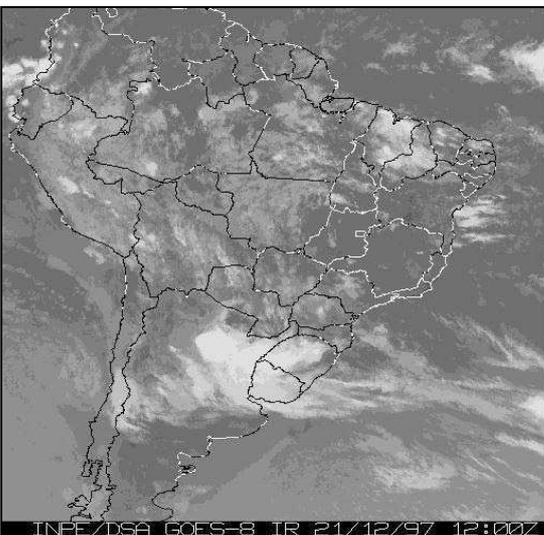
(b)



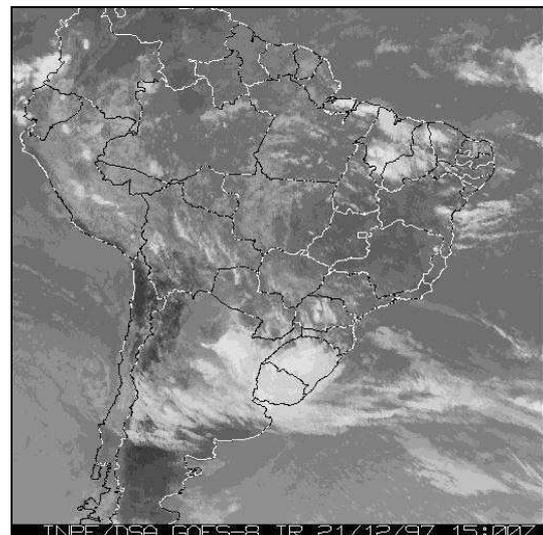
(c)



(d)



(e)



(f)

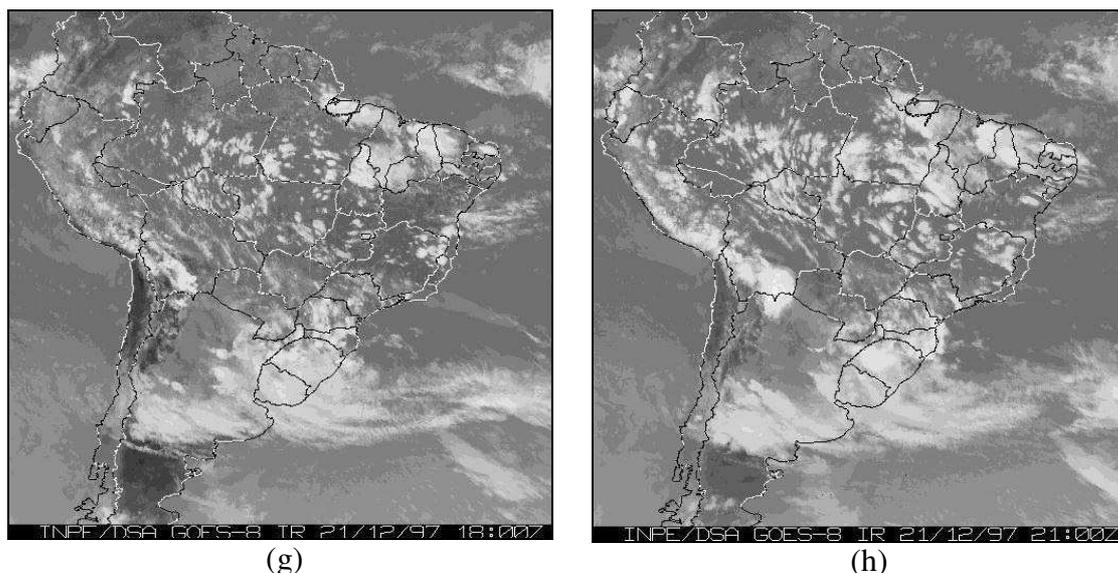


Figura 5.6 – Imagens do satélite geostacionário GOES 8 infravermelho para os dia 20 no horários das 03:00Z (a); 12:00Z (b); 15:00Z (c); 21:00Z (d) e dia 21 no horário das 12:00Z (e); 15:00Z (f); 18:00Z (g) e 21:00Z (h). (Fonte: INPE/DAS).

Os dados coletados na estação meteorológica de Campina Grande foram usados como base para análise considerando eventos significativos observados entre os dias 20 e 21 de dezembro na LT (CGD - STD).

O histograma apresentado na Figura 5.7 permite uma comparação entre a precipitação mensal em 1997 e a média climatológica para Campina Grande PB. Observa-se que na segunda metade do ano, quando o El Niño se encontrava bem definido a chuva registrada em dezembro foi superior ao dobro da média climatológica.

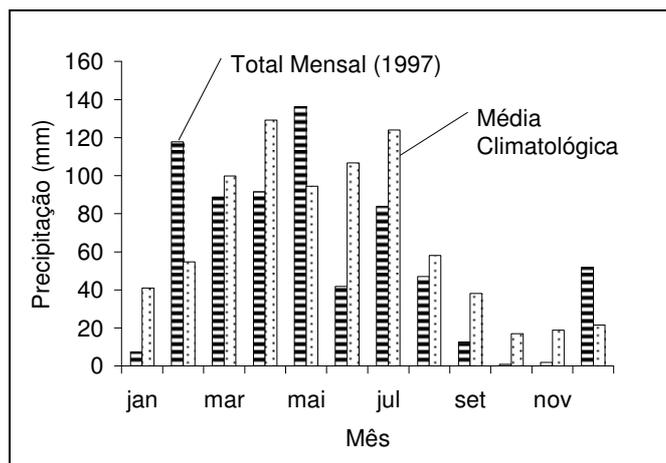


Figura 5.7 – Histograma comparativo entre o total mensal de precipitação em 1997 e a média climatológica em Campina Grande PB. (Fonte de dados: LMRS)

Convém destacar, entretanto, que as chuvas observadas em dezembro de 1997 se concentraram em poucos dias do mês em Campina Grande e em cidades circunvizinhas. Em áreas próximas a Campina Grande (Figura 5.8) e em cidades ao longo do trecho Campina Grande – Santa Cruz (Figura 5.9) verificou-se que a precipitação se concentrou entre os dias 20 e 23 nos sete municípios.

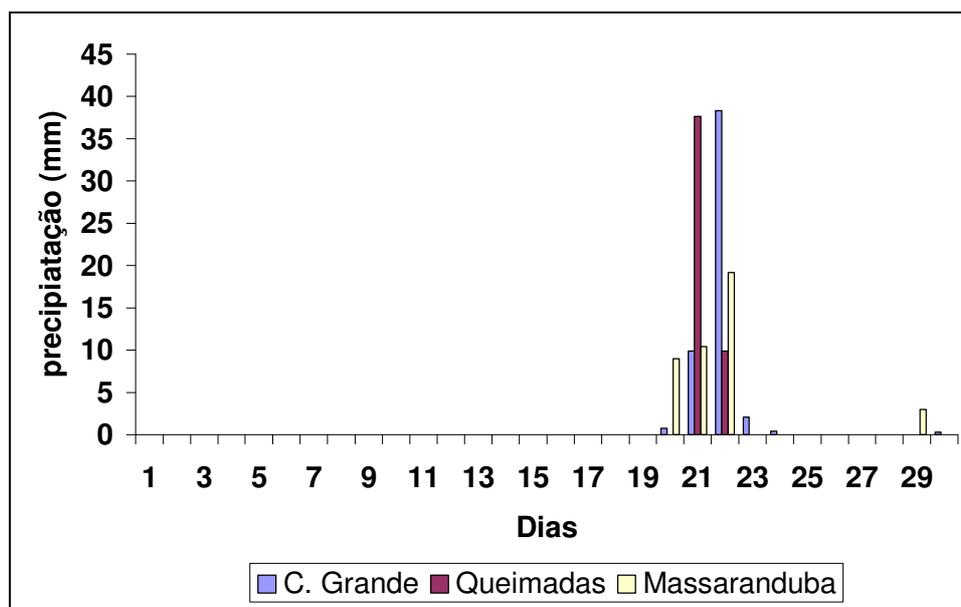


Figura 5.8 – Precipitação diária em dezembro de 1997 para os municípios de Campina Grande, Queimadas e Massaranduba. (Fonte de dados: LMRS)

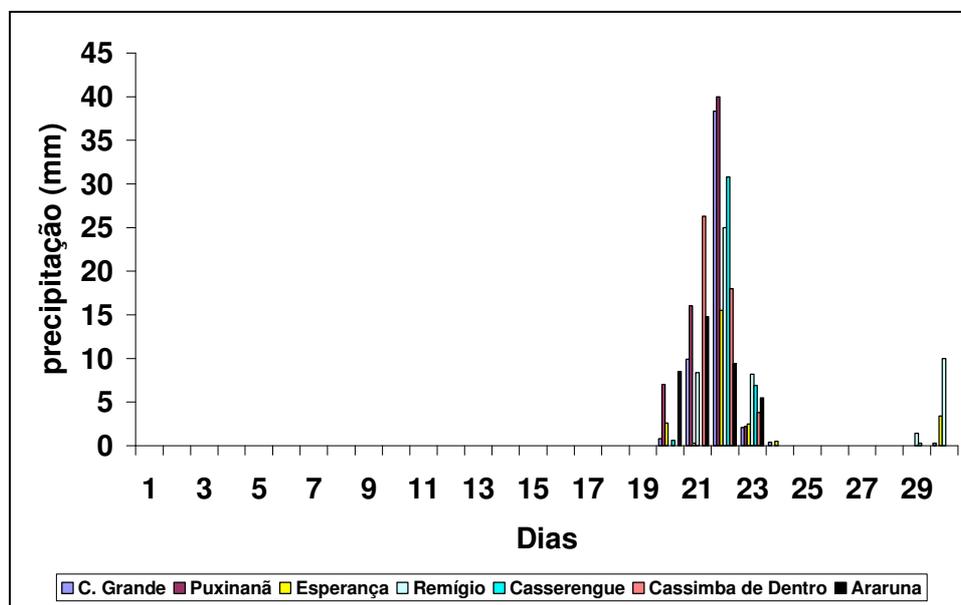


Figura 5.9 - Precipitação diária em dezembro de 1997 nos municípios ao longo do trecho Campina Grande – Santa Cruz. (Fonte de dados: LMRS).

### 5.1.2 JANEIRO DE 2000

Durante o ano de 2000 foram registradas 51 falhas transitórias por descarga atmosférica, sendo a maior concentração no mês de fevereiro com 28,8% das falhas (15 registros), seguido do mês de janeiro com 25% das ocorrências (13 registros de falhas), como pode ser observado na Figura 5.10.

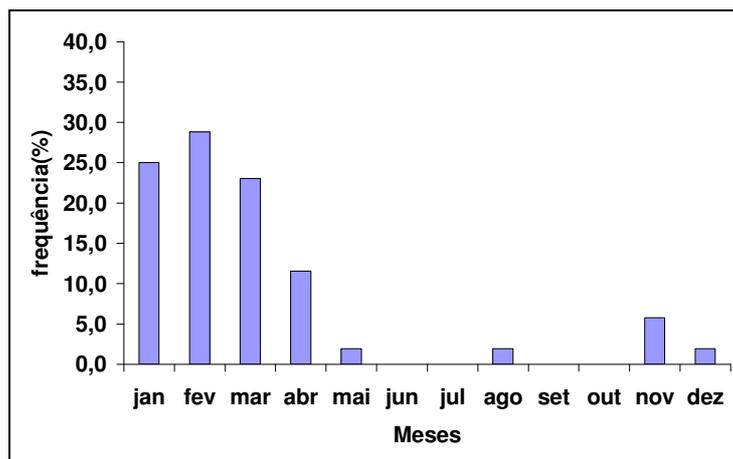


Figura 5.10 – Frequência da ocorrência de falhas transitórias por descarga atmosférica durante o ano de 2000. (Fonte de dados: CHESF)

A temperatura da superfície do mar (TSM) no oceano Atlântico Tropical e Equatorial esteve acima da média climatológica durante todo o mês de janeiro. Foi observada a continuidade da presença do fenômeno La Niña em fase madura, que começou a desintensificar a partir do mês de março do mesmo ano. De acordo com informações do CPTEC, nos estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Paraíba, oeste do Rio Grande do Norte, Zona da Mata, litoral de Pernambuco, oeste da Bahia, Salvador e recôncavo baiano, as chuvas ultrapassaram os 100mm durante o mês de janeiro, enquanto nas demais localidades da região Nordeste a precipitação variou entre 25 e 100mm, como pode ser visto na Figura 5.11a. Durante todo o mês foi identificada a atuação de VCAN sobre o Nordeste, totalizando 4 (quatro) vórtices. Na primeira metade do mês os sistemas frontais e um vórtice ciclônico em altos níveis foram os principais responsáveis pela precipitação, preferencialmente no setor sul sudeste, onde o VCAN também atuou desde o primeiro dia do mês até 10 quando enfraqueceu.

Na segunda quinzena outros três vórtices foram identificados, dois mais ao norte da região Nordeste e o último sobre o litoral norte da Bahia. Foram registradas chevas significativas, decorrentes da atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). A Figura 5.11b mostra os desvios de precipitação para este mês, aonde no norte do Nordeste e no recôncavo baiano foram registradas chuvas acima da normal climatológica e desvios negativos de até -50mm sobre o sul/sudeste da Bahia e sertão de Pernambuco.

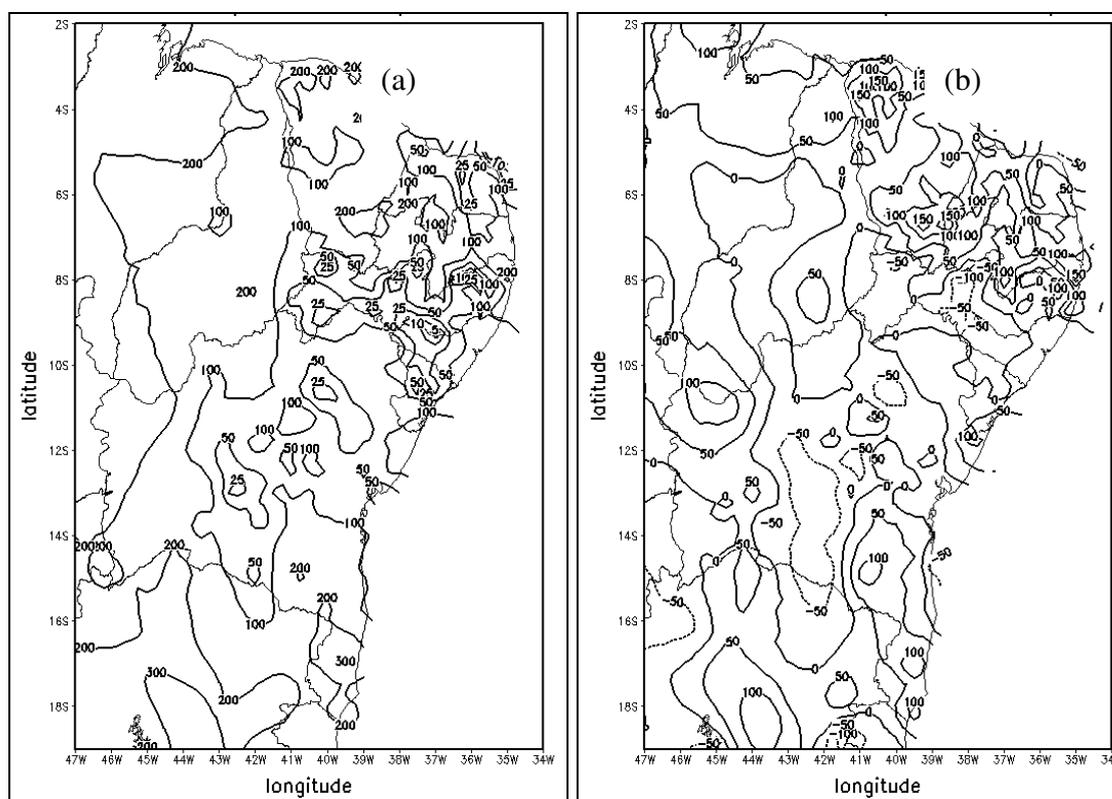


Figura 5.11 –Distribuição da precipitação ocorrida (a) e da anomalia em relação à média climatológica (b) durante o mês de janeiro de 2000 (Fonte: CPTEC).

As descargas atmosféricas decorrentes da atividade convectiva ocorrida neste mês atingiu preferencialmente as linhas com tensão de operação de 138 e 230kV. A distribuição espacial das falhas é apresentada na Figura 5.12.

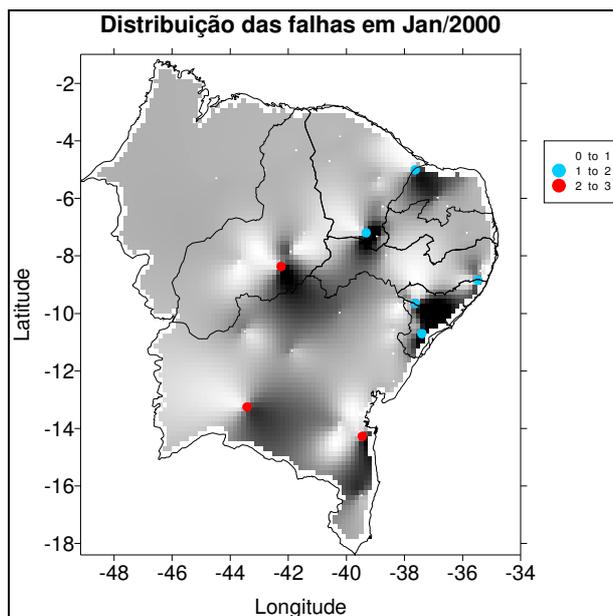
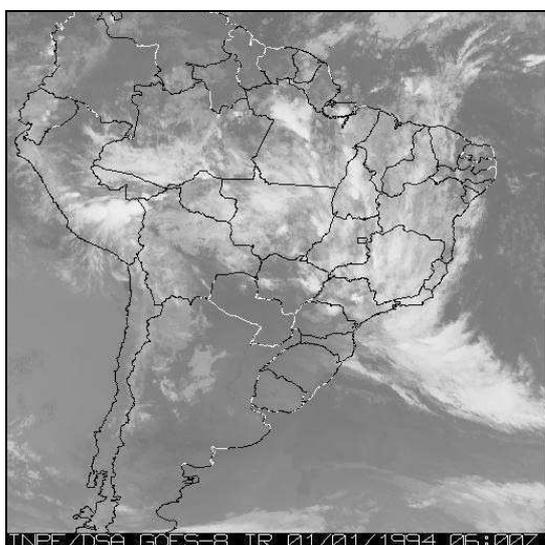
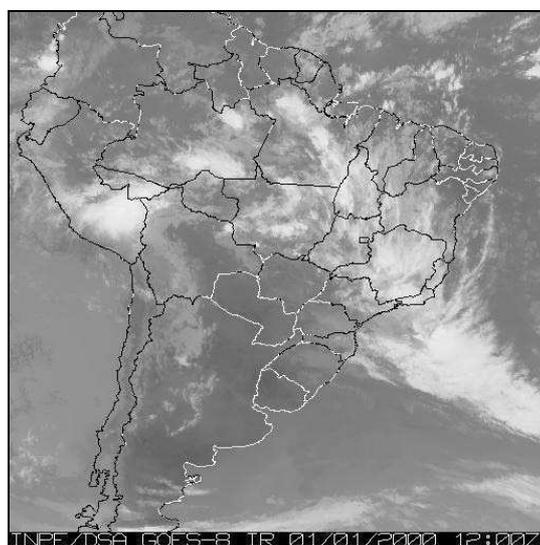


Figura 5.12 – Distribuição espacial das falhas transitórias registradas no mês de jan/2000. (Fonte dos dados: CHESF).

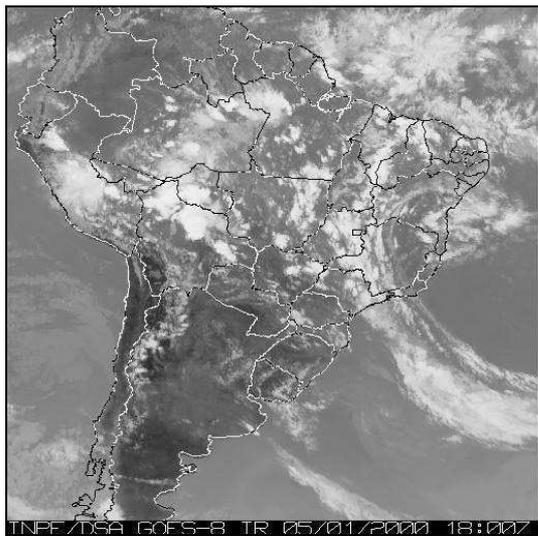
Diferentemente de dezembro de 1997, que é marcado por um evento de El Niño e concentra a maior parte das falhas em áreas isoladas, percebe-se que as falhas registradas em janeiro de 2000 (sob influência da La Niña) São melhor distribuídas pelo Nordeste. A nebulosidade associada aos sistemas responsáveis pela atividade convectiva pode ser vista nas imagens do satélite GOES 8 no canal IR apresentadas na Figura 5.13.



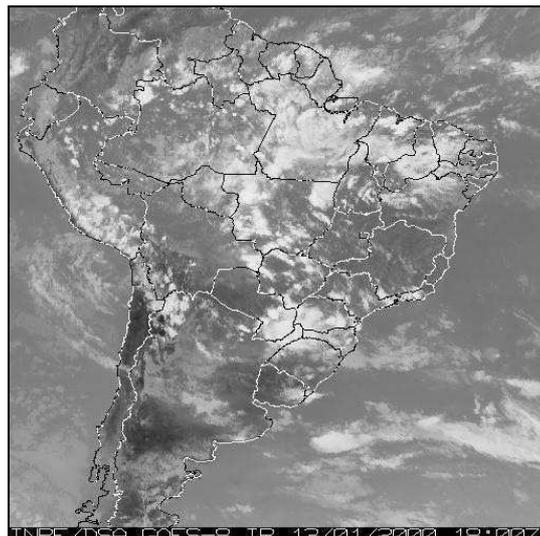
(a)



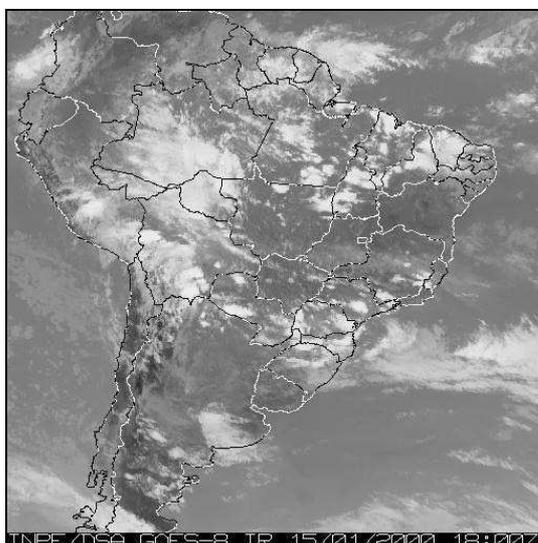
(b)



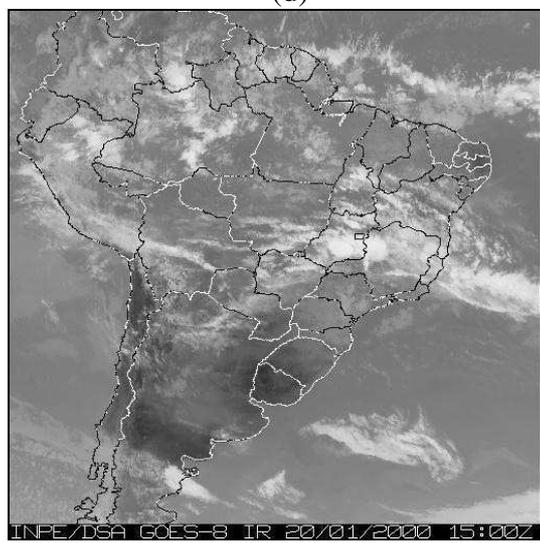
(c)



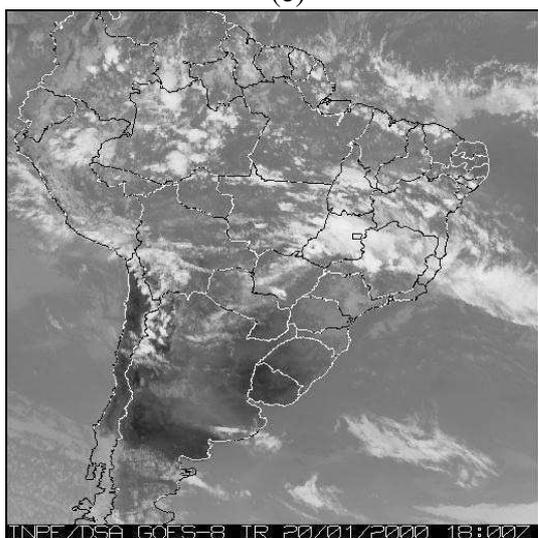
(d)



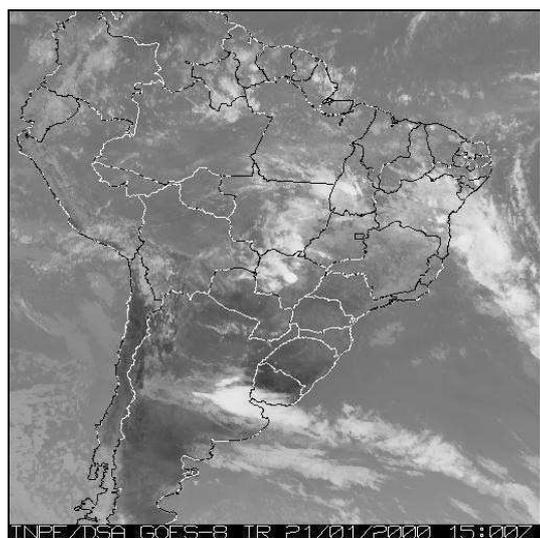
(e)



(f)



(g)



(h)

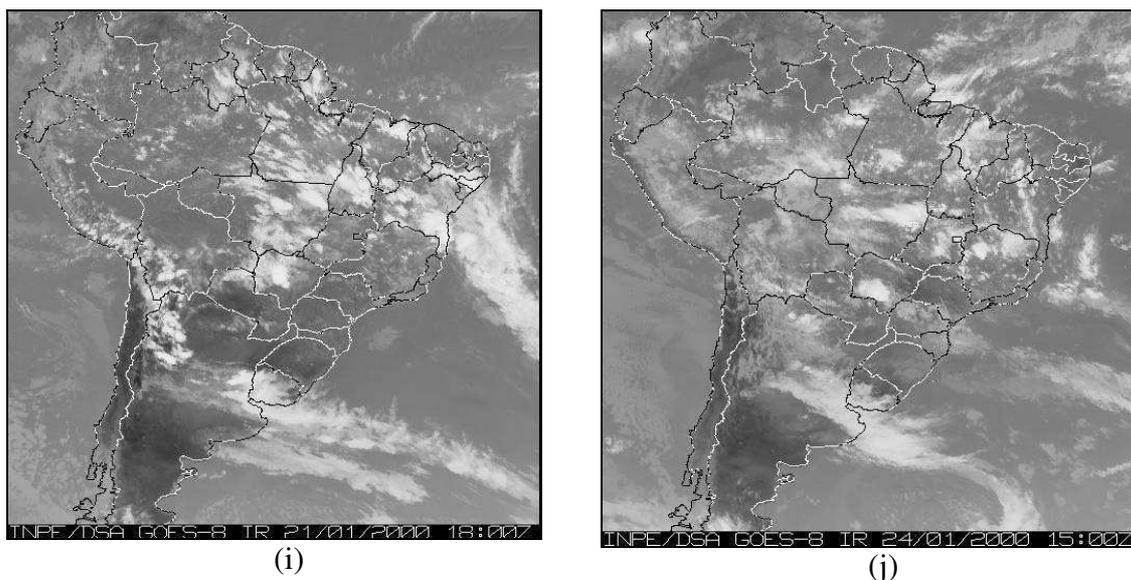


Figura 5.13 - Imagens do satélite geostacionário GOES 8 no canal infravermelho para o dia 01 no horário das 06:00Z (a) e 12:00Z (b); dia 05 às 18:00Z (c); dia 13 às 18:00Z (d); dia 15 às 18:00Z (e); dia 20 às 15:00Z (f) e 18:00Z (g); dia 21 às 15:00Z (h) e 18:00Z (i); e dia 24 às 15:00Z (j), de janeiro de 2000. (Fonte: INPE/DAS).

Elas mostram a cobertura de nuvens nos dias e áreas dos registros de falhas por descarga atmosférica. Por se tratar de um período de La Niña, onde o controle da grande escala favorece a ocorrência e distribuição de precipitação muitas vezes acima da média climatológica, as falhas por descarga atmosférica tendem a ser melhor distribuídas espacialmente no Nordeste, abrangendo vários Estados.

Os histogramas de precipitação de localidades como Rio Largo (AL), Recife (PE), e Santa Cruz de Cabraláia (BA), município próximo a Eunápolis, apresentados nas Figuras 5.14 a 5.16, mostram a natureza convectiva da chuva ocorrida nessas localidades. Como por exemplo, ao tomar-se o trecho Messias – Recife 2, onde houve registro de precipitação em Messias e Rio Largo (municípios próximos a Messias) nos dias 13 e 21/01/00, enquanto para Recife não foi registrada a ocorrência de chuva nos mesmos dias (outra ponta do trecho). No

período compreendido entre os dias 03 e 09 foram registrados os maiores valores de precipitação nas cidades de Recife, Rio Largo e Messias, no entanto, durante esse período foi registrado apenas uma falha no trecho compreendendo o município de Messias, mostrando a aleatoriedade da incidência de descargas em LT's. No trecho Funil – Eunápolis, no dia 21/01/00 houve dois registros de falha por descarga atmosférica no período da noite, por falta de dados nas localidades foi construído o histograma de Santa Cruz de Cabraláia, localidade próxima a Eunápolis, a qual foi verificada a ocorrência de precipitação no dia 21 seguido de chuva intensa no dia posterior. Esse resultado sugere a intensa atividade convectiva nas áreas adjacentes a Eunápolis. Com isso, percebe-se a natureza convectiva da precipitação ocorrida nas áreas analisadas, aonde parte dos trechos são afetados por descargas atmosféricas.

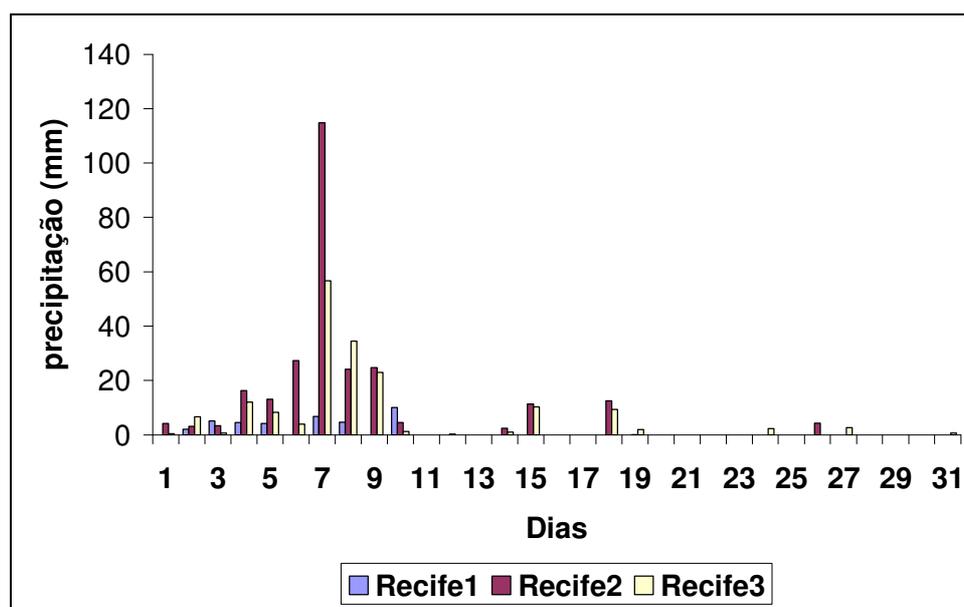


Figura 5.14 – Distribuição da precipitação para Recife no mês de janeiro de 2000.

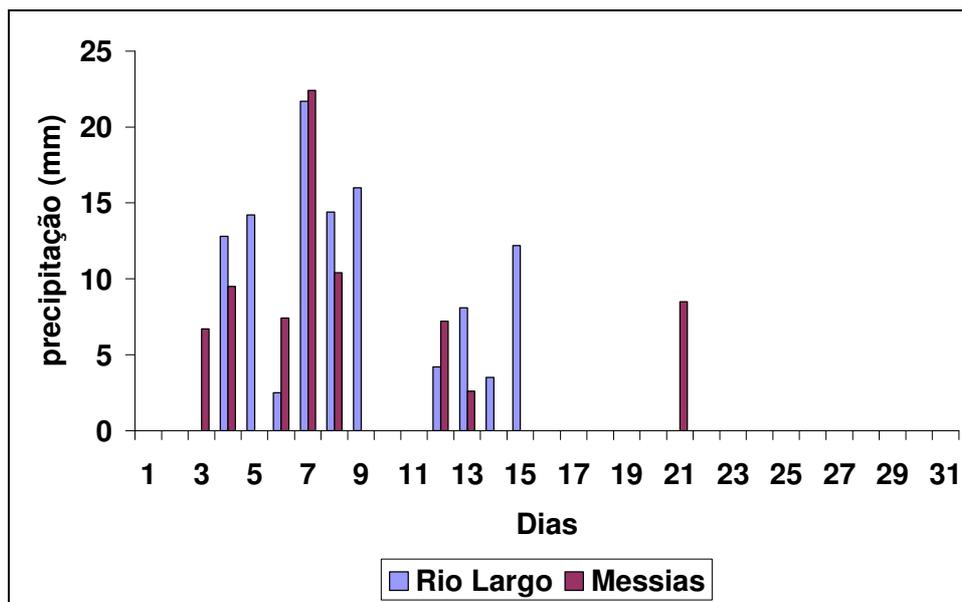


Figura 5.15 – Distribuição da precipitação para as localidades Rio Largo e Messias no mês de janeiro de 2000.

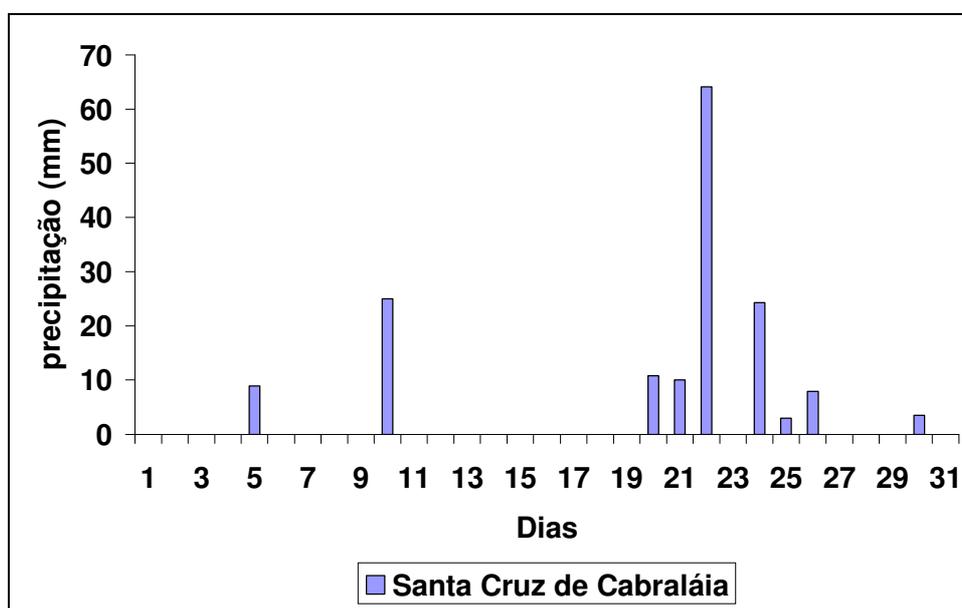


Figura 5.16 - Distribuição da precipitação para a localidade de Santa Cruz de Cabraláia (município próximo a Eunápolis) no mês de janeiro de 2000.

### 5.1.3 DEZEMBRO DE 2001 e JANEIRO DE 2002

O período neutro é composto pelos meses de dezembro de 2001 e janeiro de 2002. Durante o ano de 2001 foram registradas 37 falhas, como mês de março apresentando 40,5% das ocorrências, sendo 06 no mês de dezembro (cerca de 16,6%), enquanto em 2002 foram registradas 28 falhas, sendo 15 só em janeiro (53,6% das ocorrências) de 2002. As Figuras 5.17 e 5.18 mostram os histogramas de distribuição das falhas ao longo dos anos de 2001 e 2002.

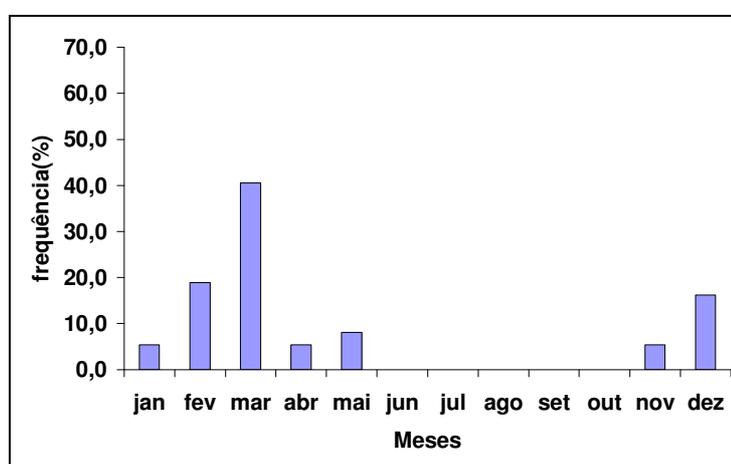


Figura 5.17 - Frequência da ocorrência de falhas transitórias por descarga atmosférica durante o mês de dezembro de 2001. (Fonte de dados: CHESF).

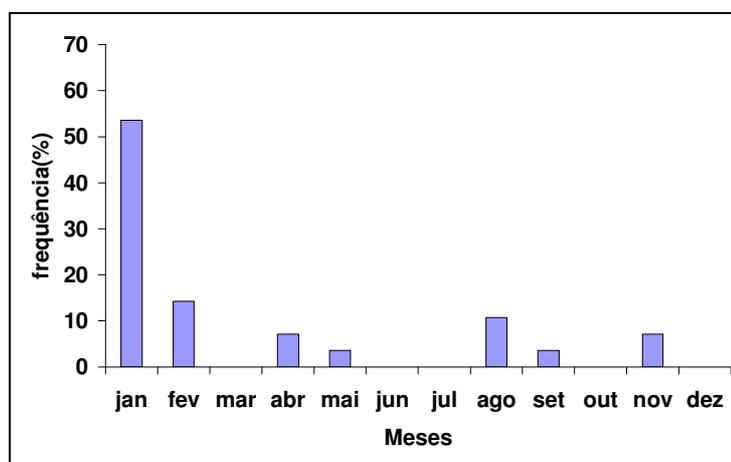


Figura 5.1.18 - Frequência da ocorrência de falhas transitórias por descarga atmosférica durante o mês de janeiro de 2002. (Fonte de dados: CHESF).

As Figuras 5.19a e 5.19b mostram a distribuição espacial das falhas por descarga atmosférica para os meses de dez/2001 e jan/2002.

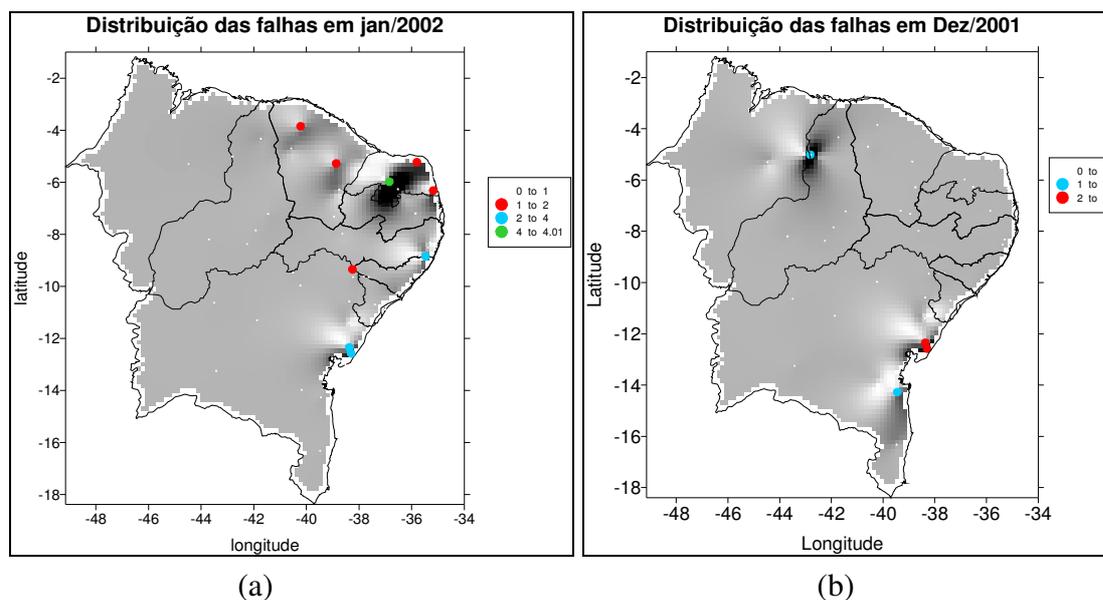


Figura 5.19 – Distribuição espacial da falhas transitórias por descarga atmosférica para os meses de dez/2001 (a) e jan/2002 (b).

Segundo dados do CPTEC, em dezembro de 2001 a porção oeste do Pacífico Tropical e subtropical continuou apresentando um ligeiro aquecimento desde outubro do corrente ano. Na costa oeste da América do Sul as anomalias de TSM permaneceram negativas com valores entre  $-0,5^{\circ}\text{C}$  e  $-1,5^{\circ}\text{C}$ . A configuração de TSM apresentada para o mês de dezembro ainda não evidenciou um padrão do evento quente ENOS (El Niño), podendo o mês de dezembro, dessa forma, ser considerado neutro.

Ainda com base em dados do CPTEC, os desvios positivos de precipitação de até 100mm foram registrados no sul do Ceará, setor central de Pernambuco e em algumas áreas no norte e sul da Bahia (Figuras 5.20a e 5.20b). As chuvas associadas a esses desvios acima da média estiveram relacionadas com atuação da ZCAS e de Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis.

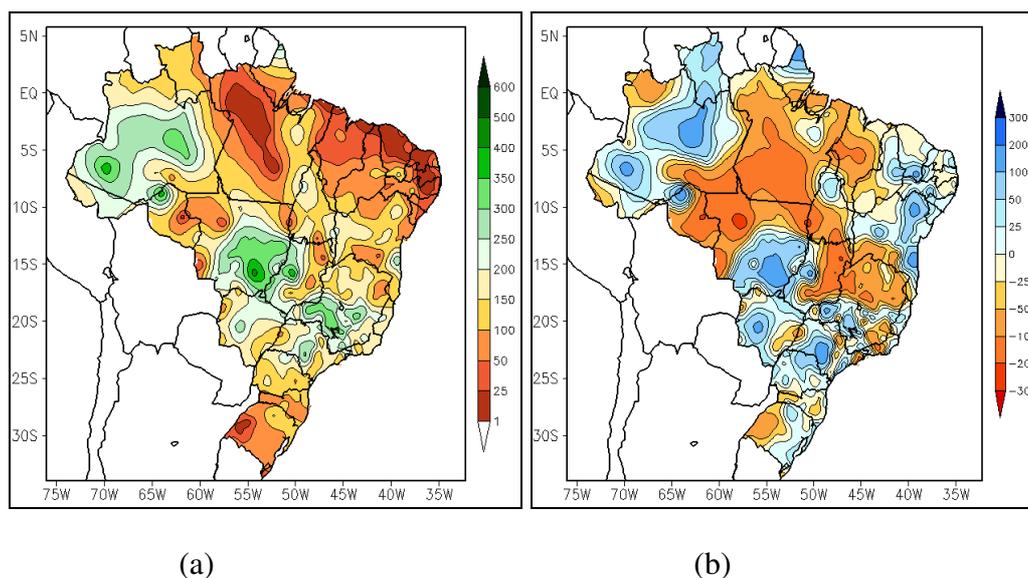


Figura 5.20 - Precipitação total em mm (a) e desvios de precipitação em mm em relação à média climatológica (1961-1990) (b) para dezembro de 2001 (Fonte: CPTEC)

Para o mês de janeiro de 2002, os boletins meteorológicos emitidos pelo CPTEC, informaram que a porção centro-oeste do Pacífico Equatorial esteve com TSM acima da média, com valores de anomalia positiva acima de  $1^{\circ}\text{C}$  em algumas áreas e anomalias negativas de TSM ainda entre  $-0,5^{\circ}\text{C}$  e  $-1,5^{\circ}\text{C}$  na costa tropical da América do Sul. De forma análoga a dezembro de 2001, esta configuração ainda não evidencia um desenvolvimento de um episódio ENOS, caracterizando assim para este mês um padrão de neutralidade. Os vórtices ciclônicos foram os responsáveis pelas fortes chuvas ocorridas no Piauí, Ceará, oeste da Paraíba e Bahia. Nessas localidades foram registrados índices que ultrapassaram a média em até 300mm, como pode ser visto nas Figuras 5.21a e 5.21b.

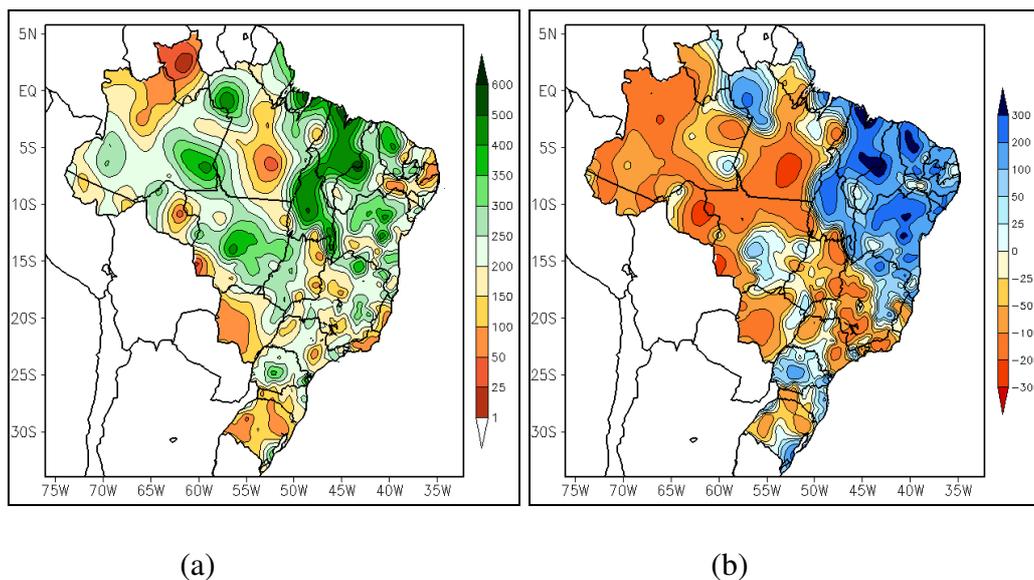
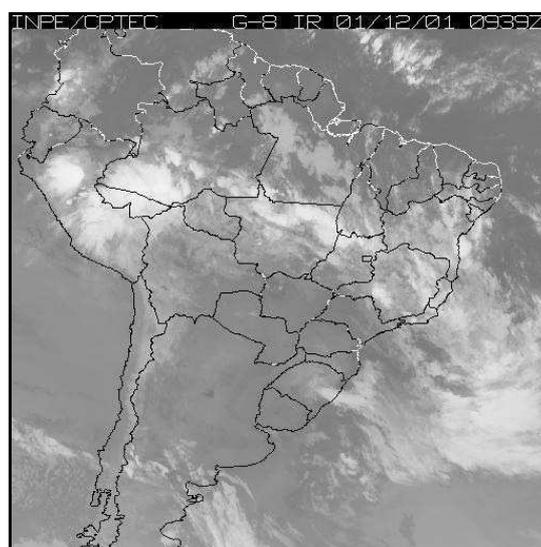
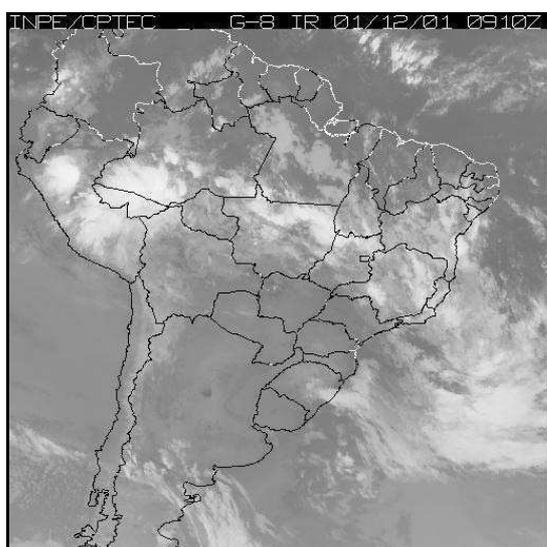
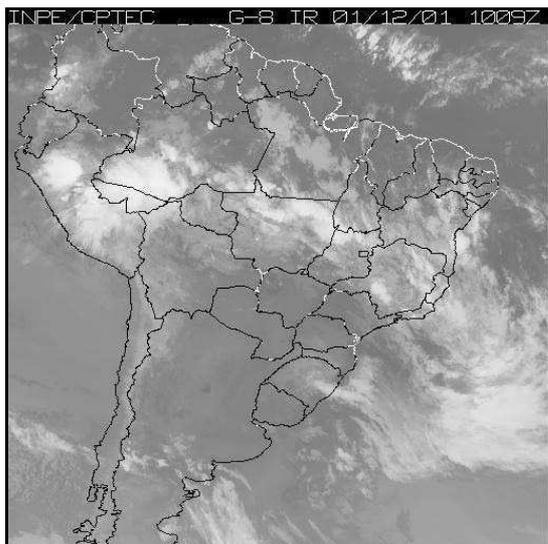


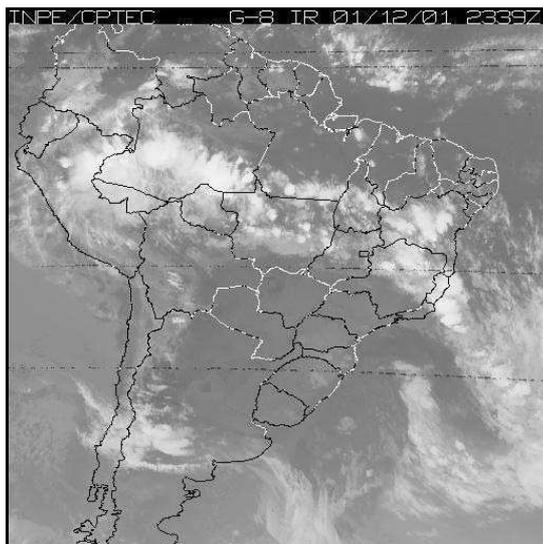
Figura 5.21 - Precipitação total em mm (a) e desvios de precipitação em mm em relação à média climatológica (1961-1990) (b) para janeiro de 2002. (fonte: CPTEC)

Embora os meses de dezembro de 2001 e janeiro de 2002 sejam meses subsequentes e considerados neutros, são muito diferentes em termos de quantidade e distribuição da precipitação, como pode ser visto nas imagens de satélite (Figura 5.22a a 5.22i; 5.23a a 5.23s) a nebulosidade associada aos dois períodos.

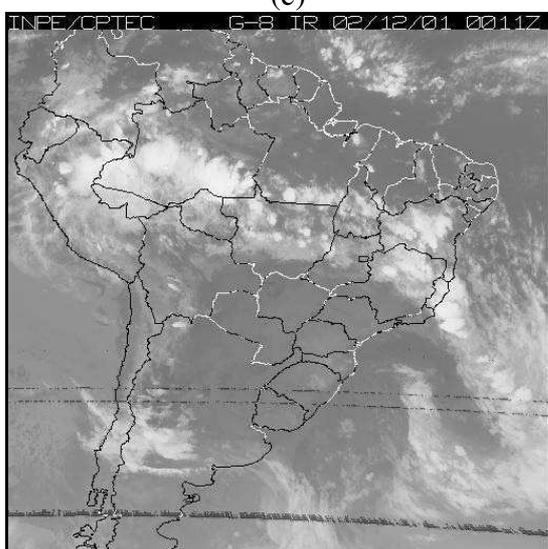




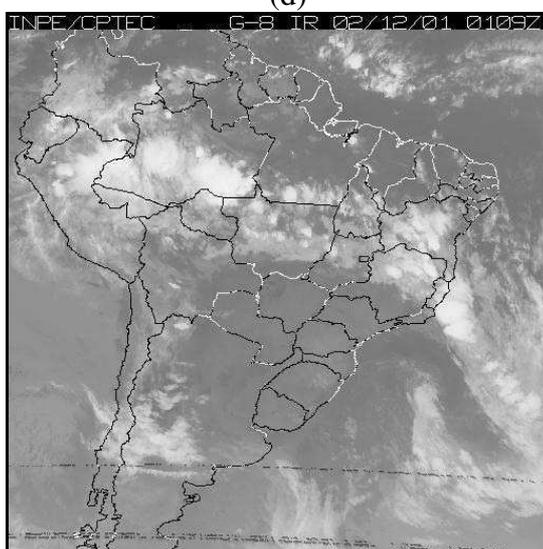
(c)



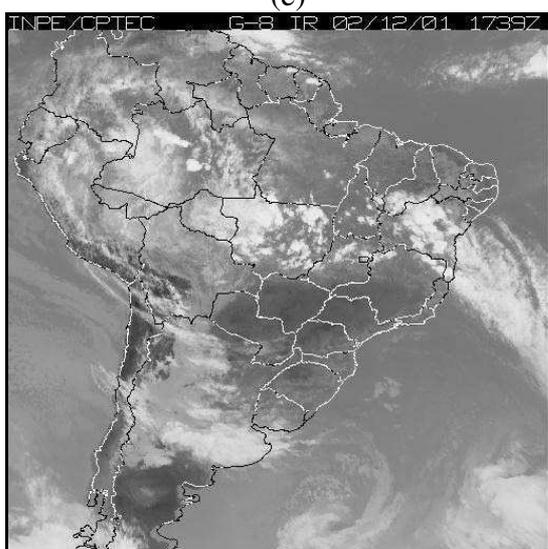
(d)



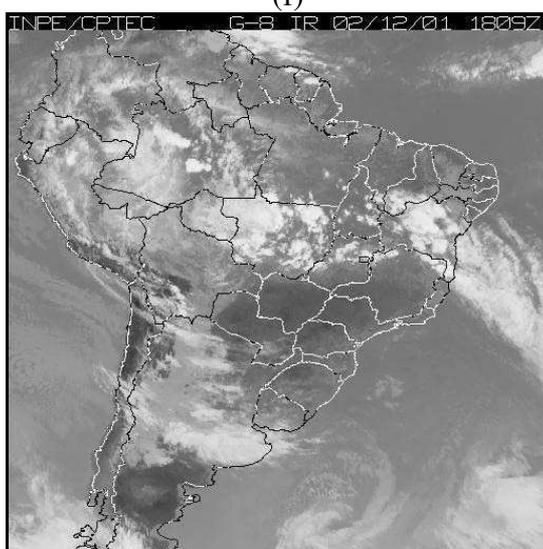
(e)



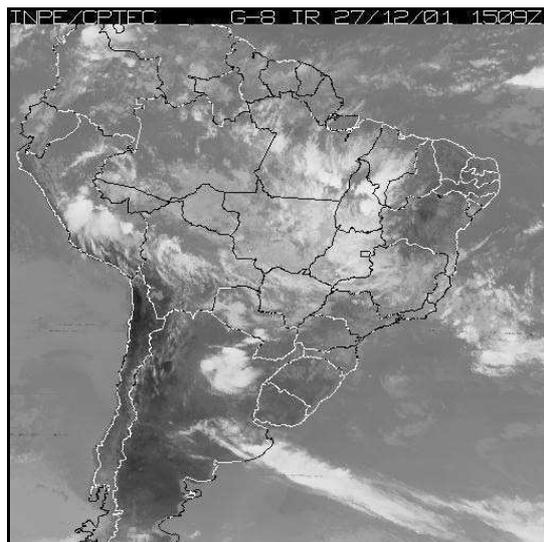
(f)



(g)

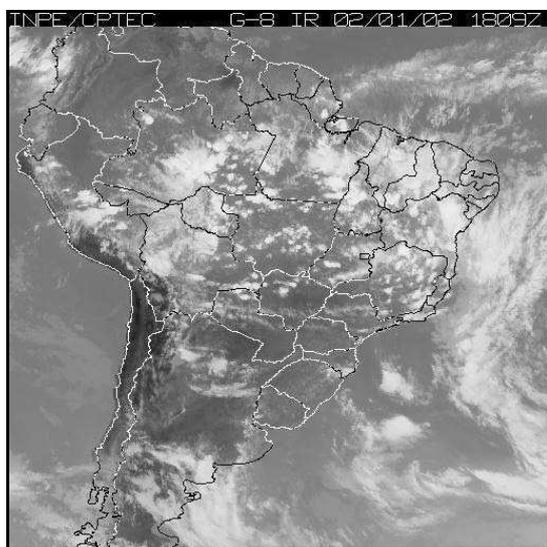


(h)

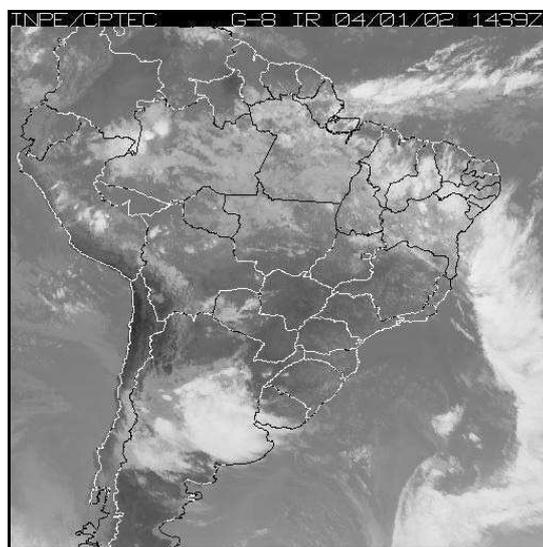


(i)

Figura 5.22 - Imagens do satélite geostacionário GOES 8 no canal infravermelho para o dia 01 nos horários das 09:10Z (a); 09:39Z (b); 10:09Z (c); 23:39Z (d); dia 02 nos horários das 00:11Z (e); 01:09Z (f); 17:39Z (g); 18:09Z (h) e dia 27 no horário da 15:09Z (i), de dezembro de 2001. (Fonte: INPE/DAS).



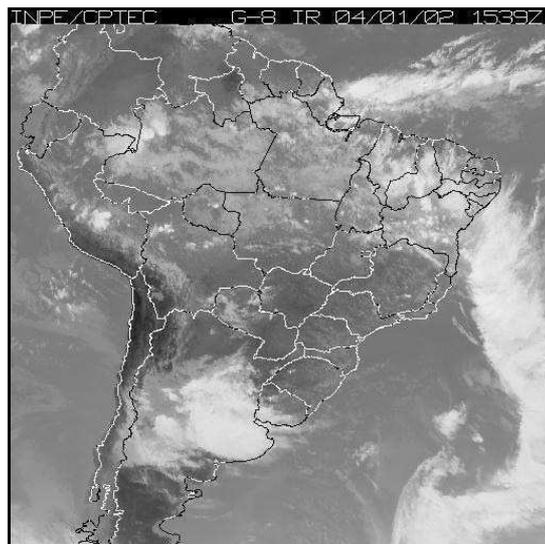
(a)



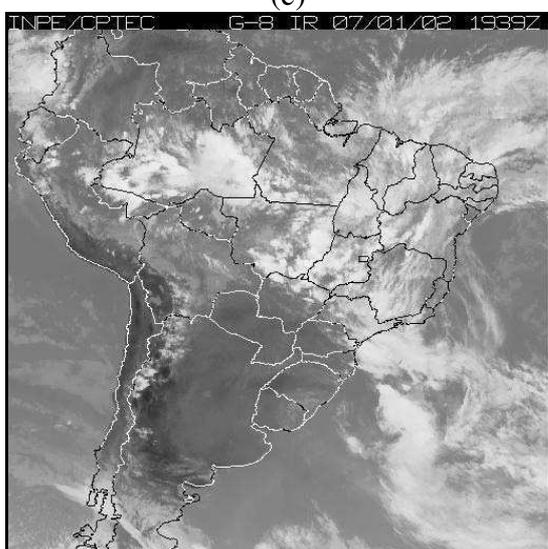
(b)



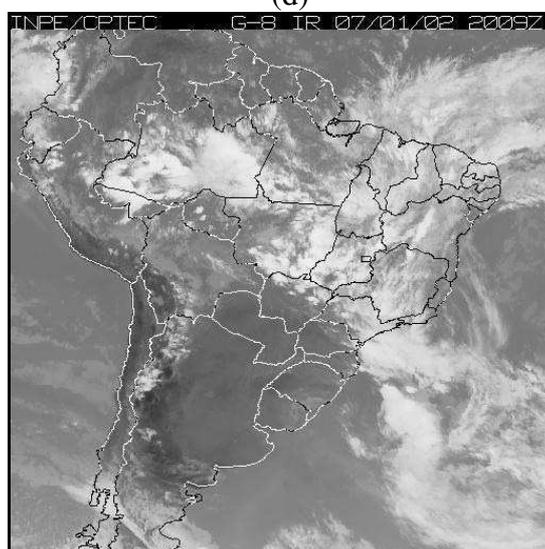
(c)



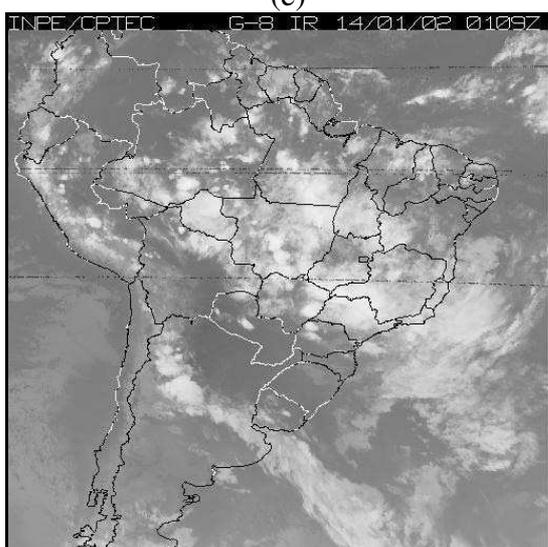
(d)



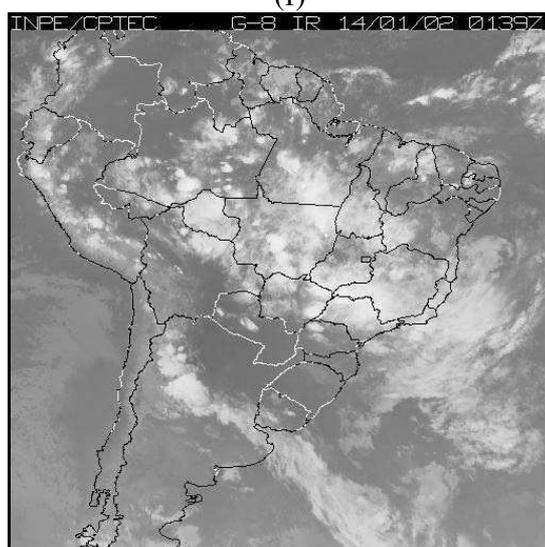
(e)



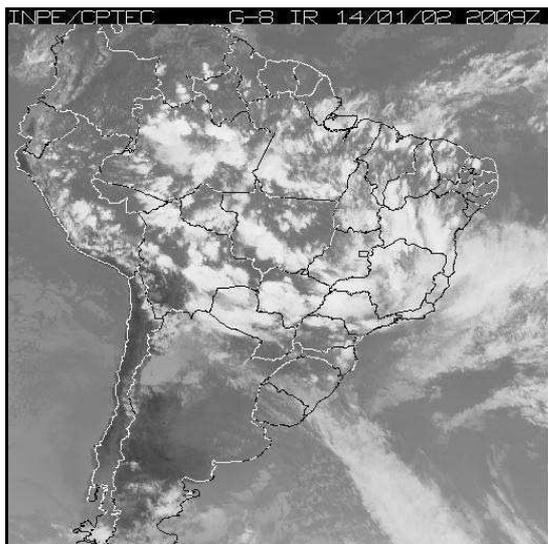
(f)



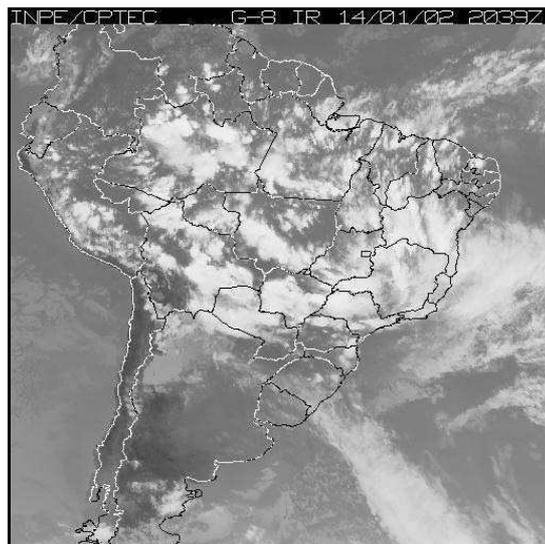
(g)



(h)



(i)



(j)



(k)



(l)



(m)



(n)

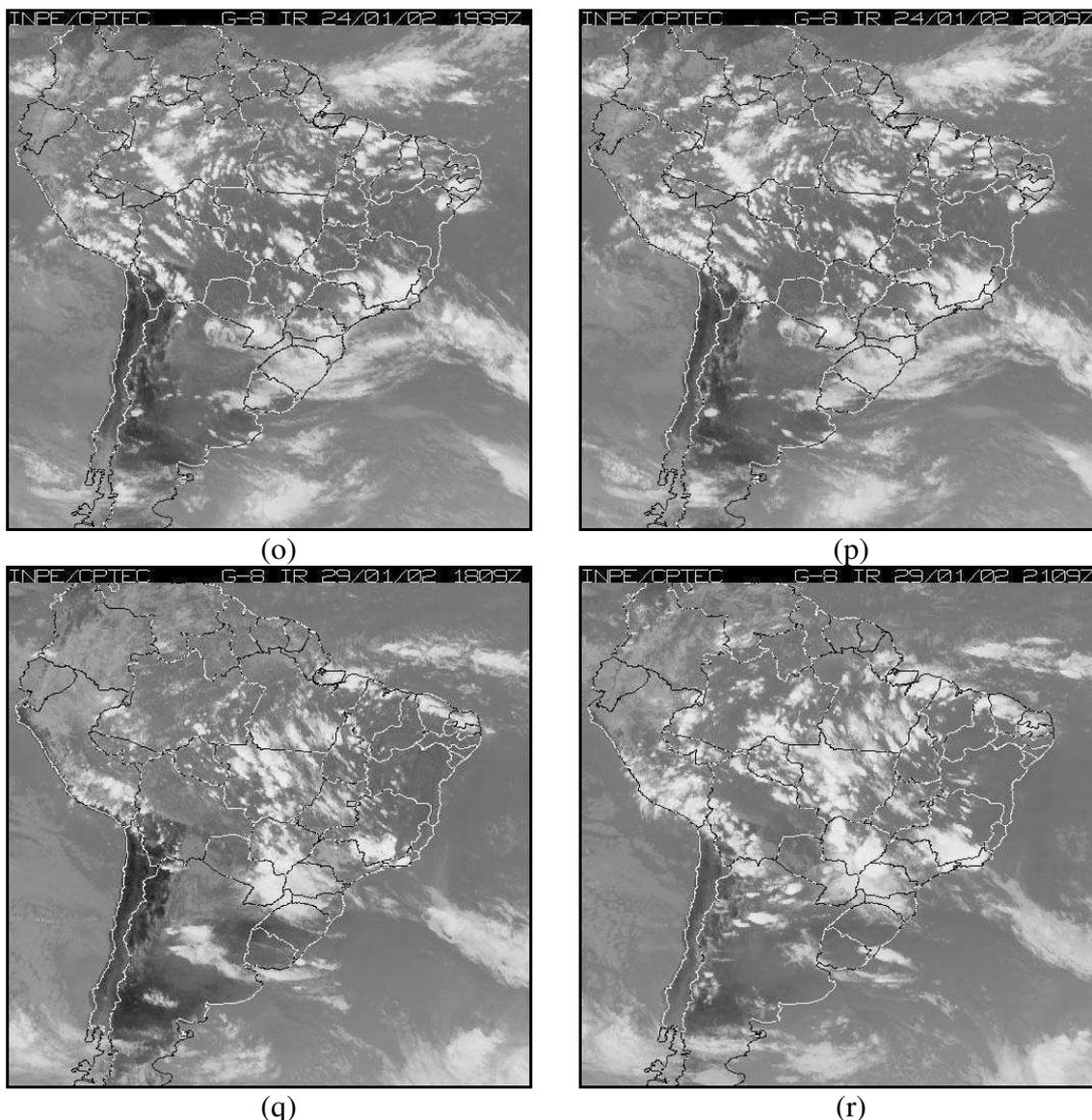


Figura 5.23 - Imagens do satélite geostacionário GOES 8 no canal infravermelho para o dia 02 nos horários das 18:09Z (a); dia 04 nos horários das 14:39Z (b); 15:10Z (c); 15:39Z (d); dia 07 nos horários das 19:39Z (e); 20:09Z (f); dia 14 nos horários das 01:09Z (g); 01:39Z (h); 20:09Z (i); 20:39 (j); dia 15 nos horários das 13:09Z (k); 13:39Z (l); dia 17 nos horários das 19:39Z (m); 23:39Z (n); dia 24 nos horários das 19:39Z (o); 20:09Z (p) e dia 29 nos horários das 18:09Z (q) e 21:09Z (r), de janeiro de 2002. (Fonte: INPE/DAS).

Em dezembro de 2001 as seis falhas transitórias se concentraram praticamente entre os dias 01 e 02/12/2001 nos trechos Governador Mangabeira - Camaçari e Catú, o registro de

precipitação mais próximo desse trecho foi o de Alagoinhas, que registrou 1,9mm para o dia 02/12/2001, mostrado na Figura 5.24. O fato de Alagoinhas registrar precipitação no dia 02 indica que nos trechos citados, muito provavelmente estiveram sob atuação de precipitação convectiva associada a um vórtice ciclônico de ar superior que esteve atuante entre o período de 02 a 13/12/2001, segundo informações do CPTEC.

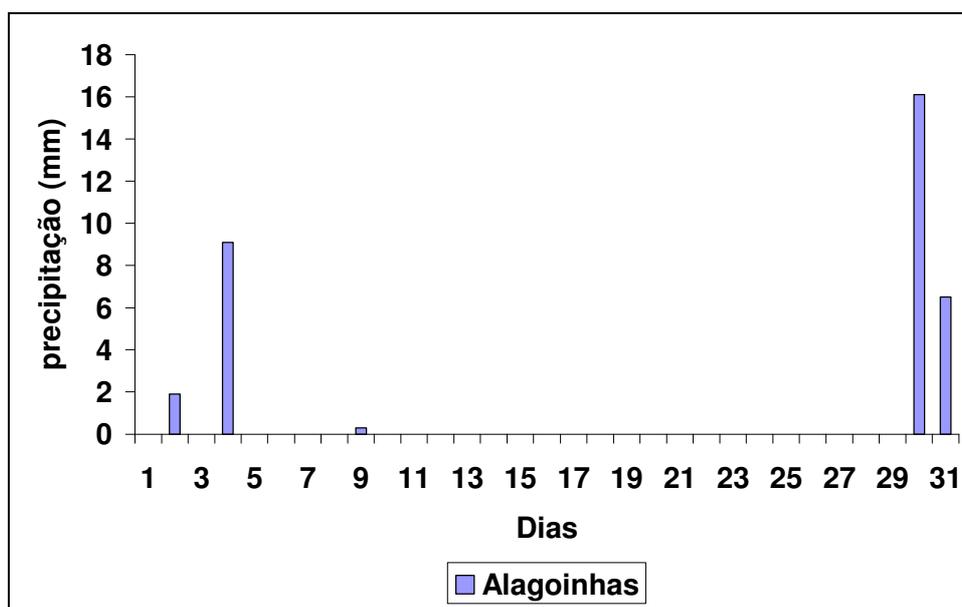


Figura 5.24- Distribuição da precipitação diária para Alagoinhas em dezembro de 2001.

Para janeiro de 2002, o histograma de Alagoinhas (Figura 5.25), apresenta um aumento considerável da precipitação também relacionada à atuação de vórtices ciclônicos de ar superior. No trecho entre Angelim – Recife (Figura 5.26), percebe-se a presença de atividade convectiva entre os dois pontos do trecho e durante os dias 04 a 12/01/2002, neste período ocorreram duas falhas uma no dia 04 e outra no dia 07/01/2002.

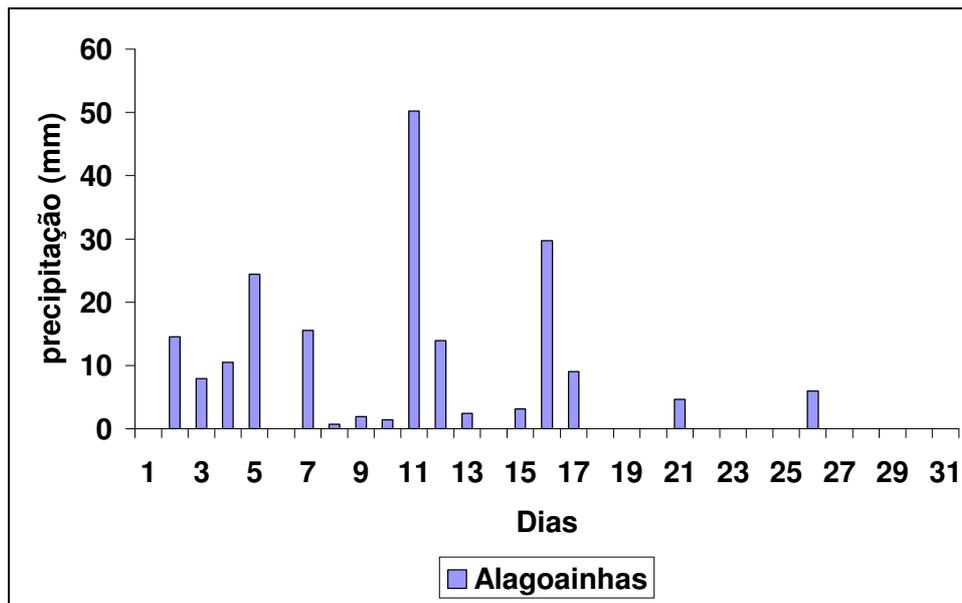


Figura 5.25 - Distribuição da precipitação diária para Alagoinhas em janeiro de 2002.

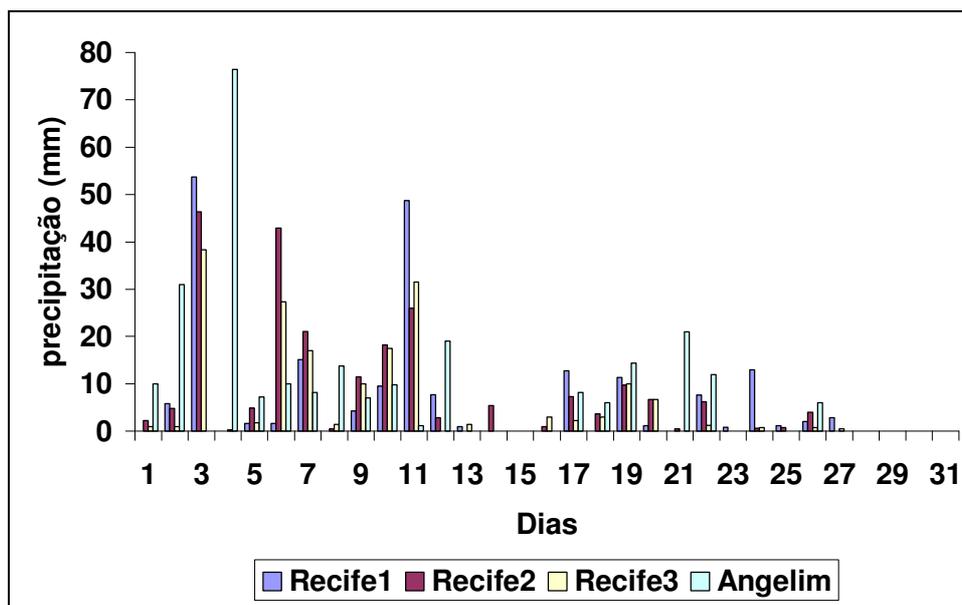


Figura 5.26 - Distribuição da precipitação diária para Angelim e Recife em janeiro de 2002.

## 5.2 ANÁLISE QUANTITATIVA DE EVENTOS DE FALHAS EM FASES DISTINTAS DO ENOS

Os resultados apresentados na seção anterior permitiram uma visão qualitativa das condições atmosféricas associadas à ocorrência de sistemas meteorológicos intensos na área de atuação da CHESF em situações consideradas neutras (N) e sob a influência dos fenômenos El Niño (EL) e La Niña (LN).

Independente da fase (EL, LN ou N) ficou evidente que os temporais responsáveis por eventos de descargas atmosféricas e interrupção no fornecimento de energia ocorreram em áreas isoladas (escalas meso- $\gamma$ ; meso- $\beta$ ). Sistemas com essa dimensão espacial são de difícil previsibilidade principalmente pela ausência de dados meteorológicos com resolução espacial e temporal suficientemente alta que permitam informações detalhadas sobre processos físicos atuantes na área de formação e desenvolvimentos dos sistemas convectivos (SC).

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos da análise fatorial por meio da ACP aplicada a variáveis meteorológicas consideradas importantes para determinação de padrões de comportamento que forneçam indícios capazes de dar suporte nas decisões operativas do setor elétrico.

Em função da ausência de um conjunto de dados de precipitação suficiente para obter informações sobre os sistemas em mesoescala, essa variável não foi usada nas análises. Diante dessa limitação, tornou-se imprescindível a utilização de parâmetros capazes de expressar o potencial atmosférico para o desenvolvimento de atividade convectiva forte. Dentro desse contexto a umidade específica foi escolhida como sendo a variável mais representativa do potencial de formação e evolução de sistemas convectivos intensos.

### **5.2.1 Aplicação da ACP ao conjunto de eventos de falhas**

O método da ACP foi utilizado considerando duas abordagens distintas. Inicialmente, a técnica foi aplicada aos dados incluindo os eventos de falhas pertencentes as três categorias (EL, LN, N).

Numa segunda etapa o conjunto de dados com eventos de falhas de cada categoria foi submetido separadamente, as análises de componentes principais. Com a aplicação desta técnica obtêm-se dois conjuntos de informações. Um deles constitui as componentes principais que, se representadas através de mapas podem mostrar padrões de comportamento em condições atmosféricas extremas. O outro conjunto de dados representa os coeficientes de correlação entre as componentes principais e as variáveis originais.

Como mencionado anteriormente, os dados atmosféricos usados na ACP foram obtidos do NCEP (National Center for Environmental Prediction) em pontos de grade. Para caracterizar as condições meteorológicas foram utilizados dados de vento nos níveis de 200, 500 e 925 hPa; e da umidade específica e temperatura do ar em 925 hPa.

A contribuição das componentes mais significativas é mostrada na Tabela 5.2. Observa-se que as três primeiras CPs juntas explicam 62,4%, 50,23% e 61,9% da variabilidade do vento em 200, 500 e 925 hPa respectivamente. Para umidade específica em 925 hPa a variância acumulada explica 77,72% da variabilidade total e no caso da temperatura em 925 hPa o valor acumulado é de 82,72%.

Tabela 5.2 – Variância explicada (%) e variância acumulada (%) para as primeiras três componentes principais (CP1, CP2 e CP3).

Variável	Vento			Umidade	Temperatura do
				Específica	Ar
Nível	200hPa	500hPa	925hPa	925hPa	925hPa
Variância explicada (%)					
CP1	37,44	29,77	33,09	29,53	37,42
CP2	13,34	11,32	16,22	29,20	24,24
CP3	11,66	09,14	12,59	18,99	21,06
Variância acumulada (%)					
	62,44	50,23	61,90	77,72	82,72

O grau de relação entre o vento zonal e meridional em 200, 500 e 925 hPa e suas componentes principais é mostrado nas Figuras 5.27, 5.28 e 5.29. Nota-se que a CP1 possui alta correlação com a componente zonal nos três níveis analisados para grande maioria dos eventos de falhas independente da categoria (EL, LN ou N). A primeira componente representa o comportamento médio dessa variável no período analisado.

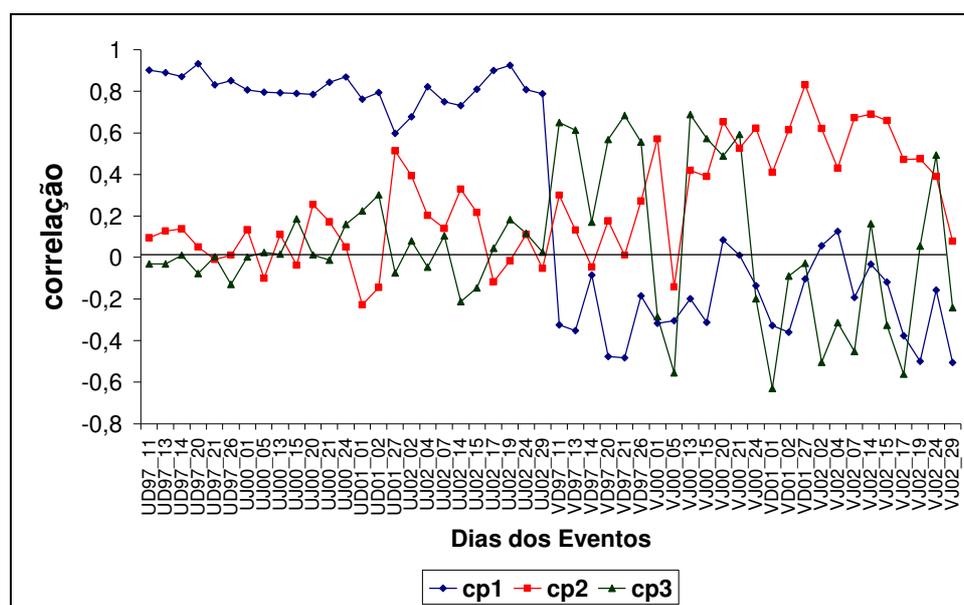


Figura 5.27 - Correlação temporal das componentes principais para as componentes do vento em 200hPa do conjunto das três fases: EL (El Niño), LN (La Niña) e N (Neutro).

No caso da componente meridional as correlações entre o vento e a CP1 são em geral baixas. No nível de 200 hPa, as correlações são maiores com a CP3 nas categorias EL e LN. Na categoria N, os coeficientes de correlação são nitidamente mais altos em relação a CP2.

Na série temporal das CPs em 500 hPa (Figura 5.28) não existe relação bem definida entre as CP1, CP2 ou CP3 e o vento meridional. Os valores dos coeficientes de correlação variam muito com o evento de falha independente da categoria. Entretanto, no nível de 925 hPa, é visível a forte correlação entre o vento meridional e a CP3, na categoria EL. Os valores dos coeficientes de correlação são maiores que 0,6 em todos os eventos de falhas analisados.

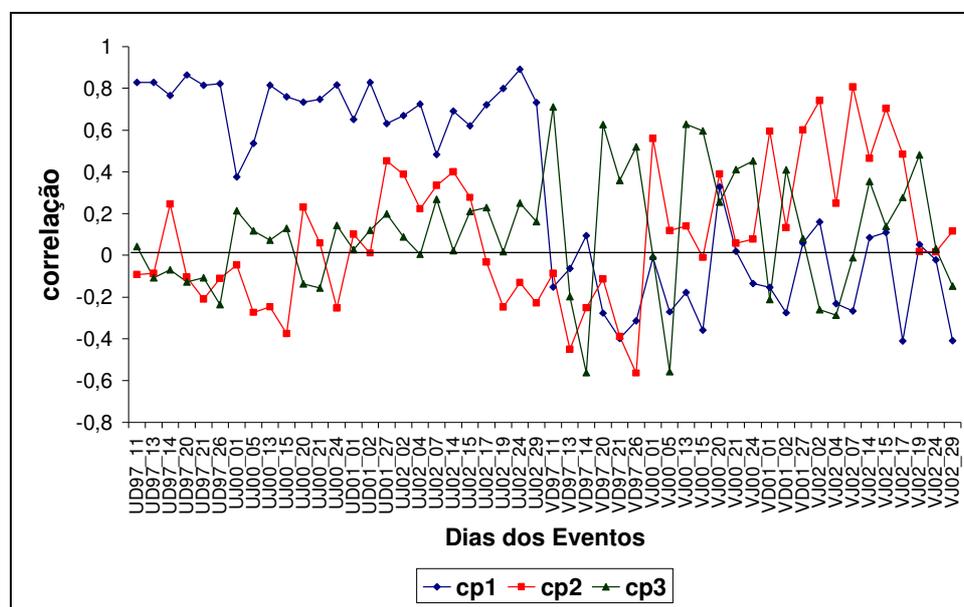


Figura 5.28 - Correlação temporal das componentes principais para as componentes do vento em 500hPa nos períodos de El Niño, La Niña e Neutro.

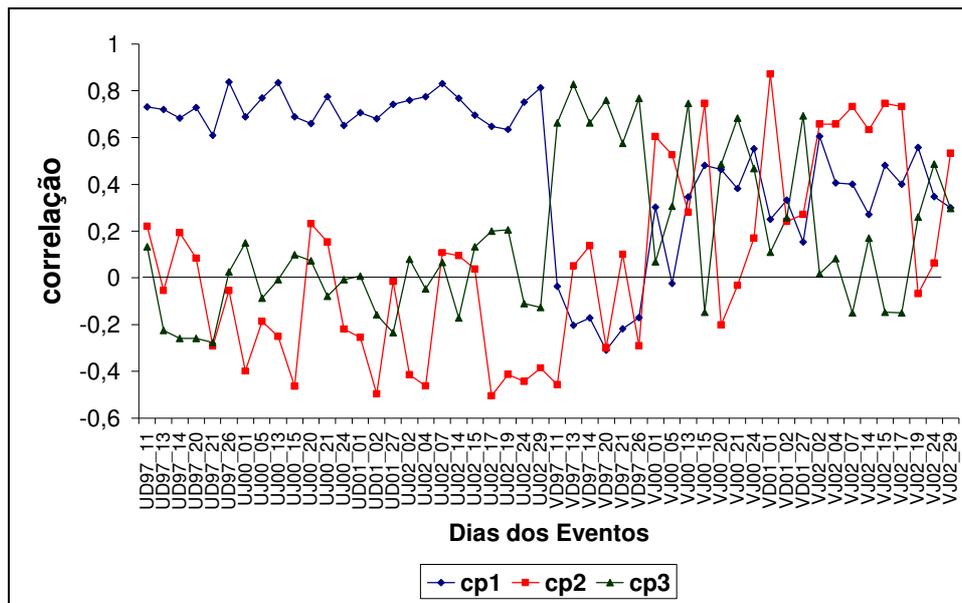


Figura 5.29 - Correlação temporal das componentes principais para as componentes do vento em 925hPa nos períodos de El Niño, La Niña e Neutro.

No caso da umidade específica (Figura 5.30) apesar da variabilidade observada, os coeficientes de correlação entre esta variável e a CP1 mostram valores significativos para os eventos da categoria N. A CP2 está mais bem correlacionada com a umidade específica nos eventos de LN. Em relação ao EL a umidade específica está mais bem correlacionada com a CP3.

Coefficientes da ordem de 0,8 para o EL observados na Figura 5.31 mostram alta correlação positiva entre a temperatura em 925 hPa e a CP3. Também se observam altas correlações entre a temperatura e a CP1 para eventos de falhas observados na categoria LN.

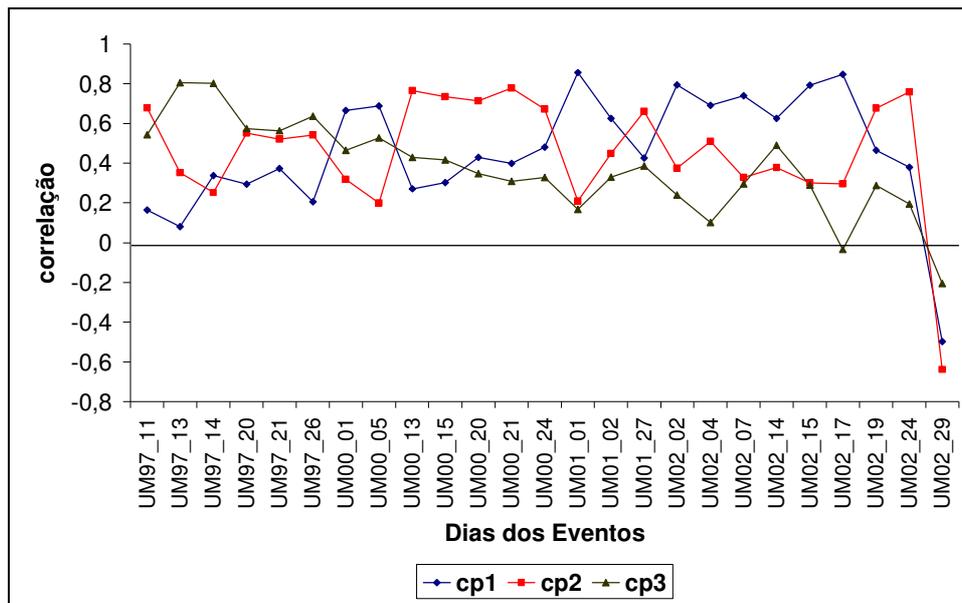


Figura 5.30 - Correlação temporal das componentes principais para umidade específica em 925hPa nos períodos de El Niño, La Niña e Neutro.

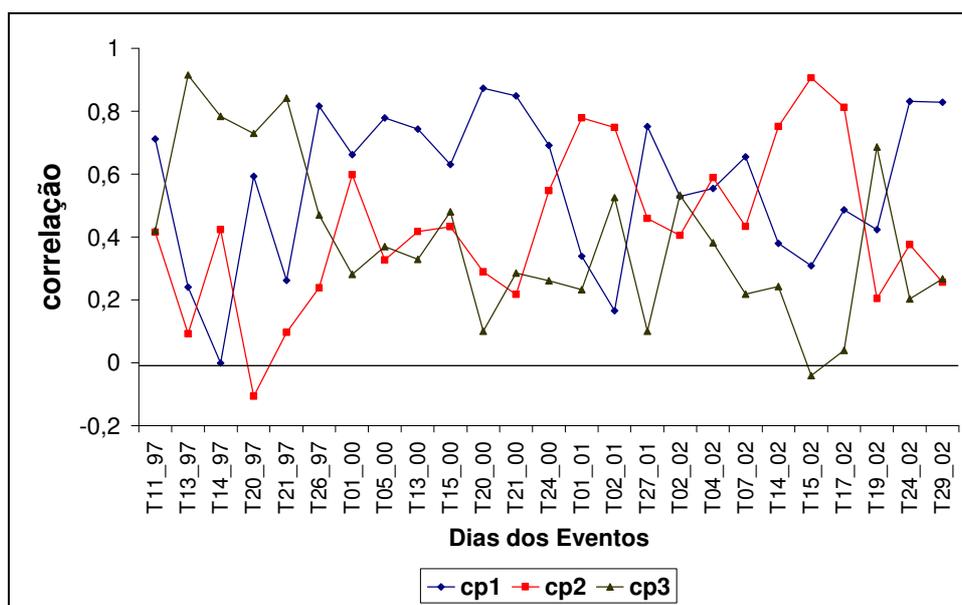


Figura 5.31 - Correlação temporal das componentes principais para temperatura do ar em 925hPa nos períodos de El Niño, La Niña e Neutro.

A análise fatorial pelo método de componentes principais, aplicada ao conjunto total dos eventos (EL, LN, N) permitiu a redução das variáveis analisadas a três fatores.

A ACP permitiu ainda, verificar que a CP1 correlacionou-se mais fortemente com o vento zonal, independente da categoria, com a umidade específica em 925 hPa para os eventos em condições neutras (N) e com a temperatura em 925 hPa para os eventos de LN.

Com base nestes resultados fica evidente que a aplicação da ACP utilizando o conjunto completo de eventos não atingiu a principal meta deste trabalho que consiste em estabelecer relações entre variáveis meteorológicas que permitam equacionar a influência de condições climáticas em interrupções no fornecimento de energia elétrica decorrentes de descargas atmosféricas em situações de El Niño. Neste ponto, verificou-se a necessidade de repetir a análise considerando separadamente os eventos de EL, LN e N.

### **5.2.2 Aplicação da ACP ao sub-conjunto de eventos de falhas do El Niño**

Foram identificadas 21 ocorrências de interrupções de energia por descargas atmosféricas nos dias 11, 13, 14, 20, 21 e 26 de dezembro de 1997 caracterizando seis eventos de atividade convectiva intensa. A ACP foi aplicada aos dados de vento nos níveis de 200, 500 e 925 hPa, aos dados de umidade específica em 925 hPa e a temperatura em 925 hPa.

Os registros foram organizados na forma de matrizes constituídas por 12 colunas para o vento, sendo 6 colunas para cada componente do vento, 6 para a umidade específica e 6 para a de temperatura e 361 linhas para todas as variáveis referente aos pontos de grade da área de estudo. A contribuição das três componentes mais significativas é mostrada na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Variância explicada (%) e variância acumulada (%) para as primeiras três componentes principais (CP1, CP2 e CP3).

Variável	Vento			Umidade	Temperatura do
				Específica	Ar
Nível	200hPa	500hPa	925hPa	925hPa	925hPa
Variância explicada (%)					
CP1	50,81	42,59	31,36	31,55	35,22
CP2	17,05	18,08	28,72	30,08	31,84
CP3	13,18	11,74	13,88	27,94	27,11
Variância acumulada (%)					
	81,05	72,41	73,96	89,56	94,17

Observa-se que as três CPs juntas explicam 81,1%, 72,4% e 73,9% da variabilidade do vento em 200, 500 e 925 hPa, respectivamente. No caso da umidade específica em 925 hPa, a variância acumulada explica 89,6% da variabilidade total e para temperatura em 925hPa o valor acumulado é de 94,2%.

### 5.2.2.1 Séries temporais

O grau de relação entre o vento zonal e meridional em 200, 500 e 925 hPa e suas componentes principais é mostrado nas Figuras 5.32, 5.33 e 5.34. Nota-se que a CP1 possui alta correlação com a componente zonal nos níveis de 200 e 500 hPa (coeficientes > 0,8) e com o vento meridional em 925 hPa, para todos os eventos analisados. A componente zonal do vento em 925 hPa está mais bem correlacionada com a CP2.

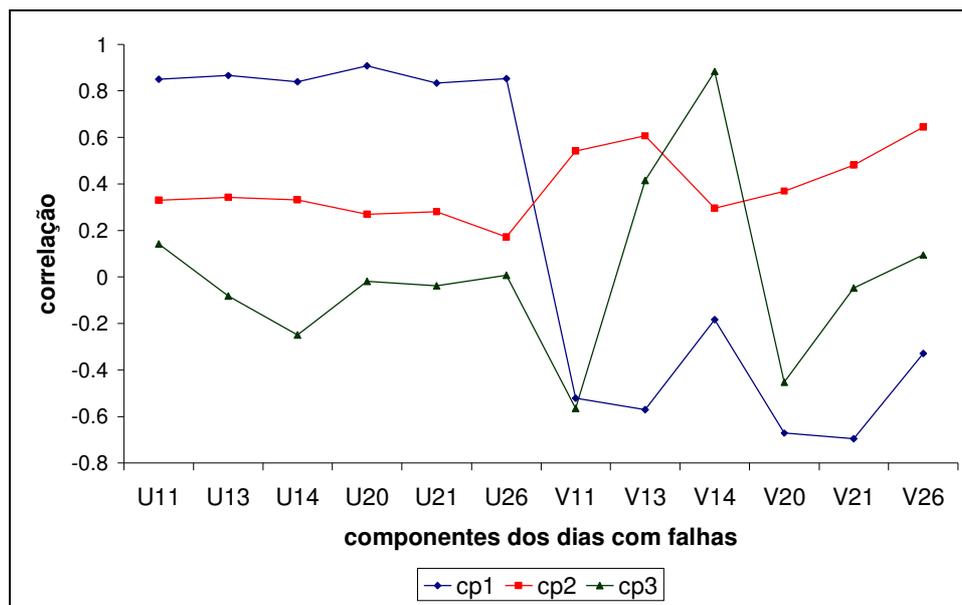


Figura 5.32 - Correlação temporal das componentes principais para o vento em 200hPa no período de El Niño.

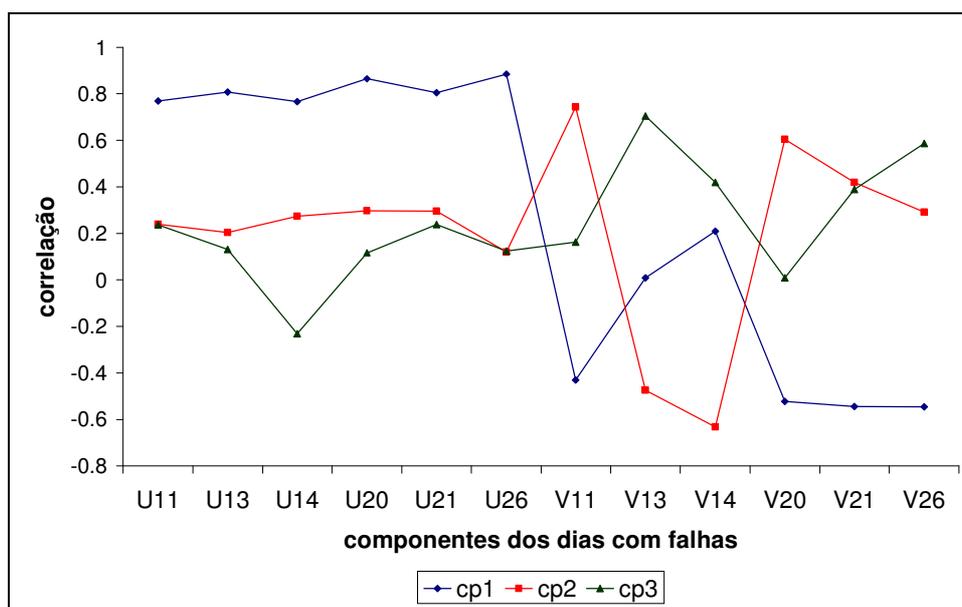


Figura 5.33 - Correlação temporal das componentes principais para o vento em 500hPa no período de El Niño.

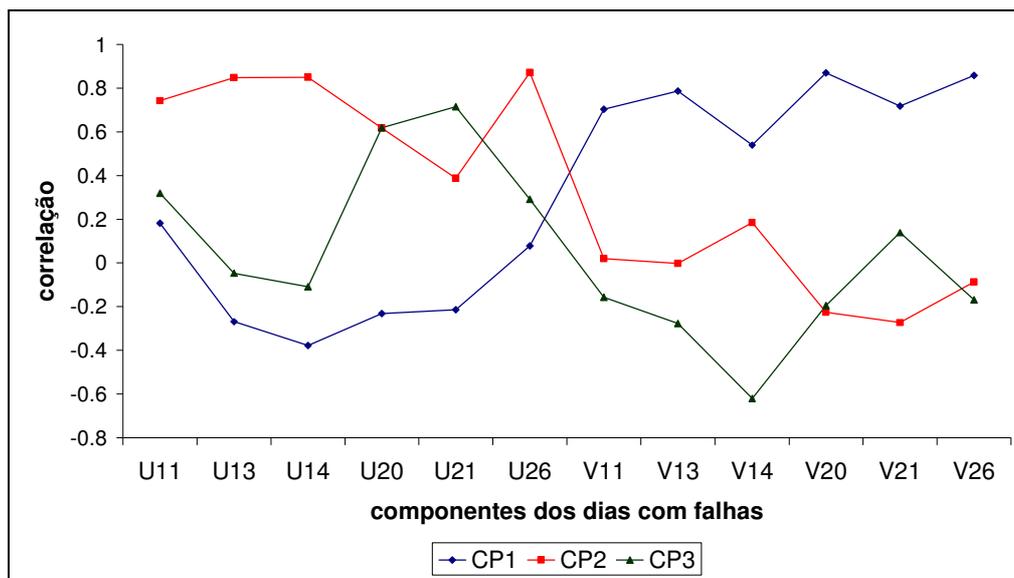


Figura 5.34 - Correlação temporal das componentes principais para o vento em 925hPa no período de El Niño.

A série temporal apresentada na Figura 5.35 mostra que o grau de relação entre a temperatura e as componentes principais varia de acordo com o evento analisado. Nos dias 11 e 26 de dezembro a correlação é mais alta com a CP1 ao passo que a CP2 está mais correlacionada nos eventos 20 e 21 de dezembro.

Na série temporal apresentada na Figura 5.36 observa-se alta correlação entre a umidade específica no nível de 925 hPa e a CP1 (31,6% da variabilidade total dos dados) para os eventos 20 e 21 de dezembro. Em relação aos eventos 13 e 14, a correlação é mais significativa com a CP2.

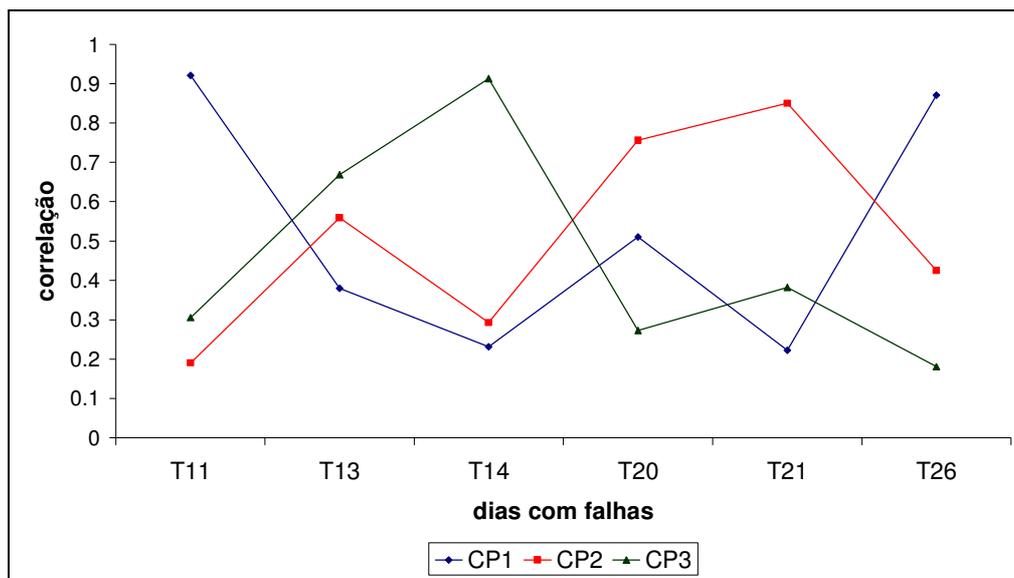


Figura 5.35 - Correlação temporal das componentes principais para a temperatura do ar em 925 hPa para o período de El Niño.

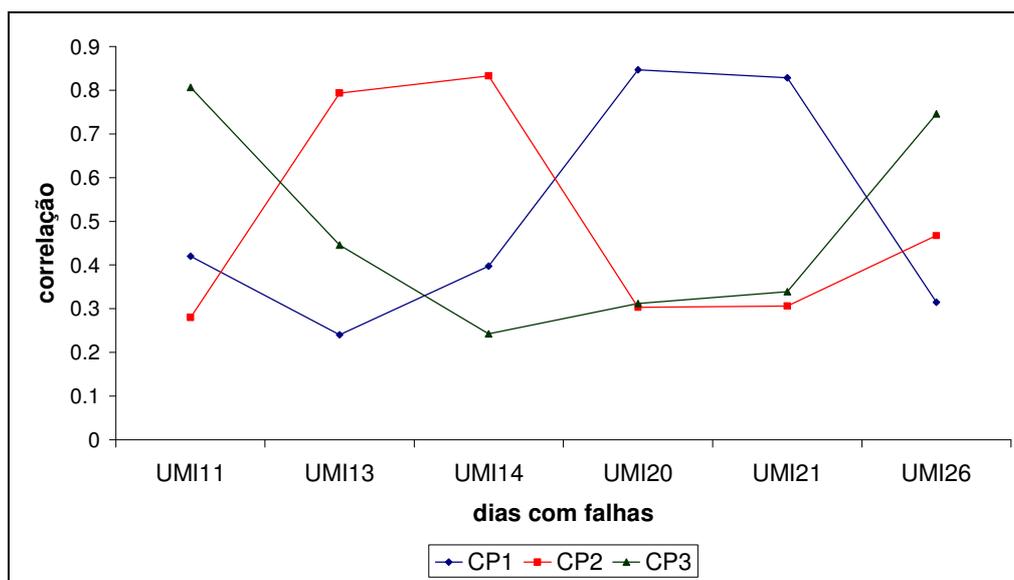


Figura 5.36 - Correlação temporal das componentes principais para a umidade específica em 925 hPa para o período de El Niño.

A ACP permitiu separar grupos de variáveis que juntas expressam situações atmosféricas específicas. Esses agrupamentos são claramente observados na Figura 5.37. A

associação entre o vento zonal e meridional nos níveis de 200 e 500 hPa ( $U_{200}$  e  $U_{500}$ ) e o vento meridional em superfície ( $V_{925}$ ) é bem representada pela CP1 independente do evento.

Nos eventos 20 e 21 caracterizados por fortes temporais e interrupção de energia na região entre Campina Grande e Santa Cruz, a CP1 mostra uma forte associação entre o vento zonal e meridional nos níveis de 200 e 500 hPa ( $U_{200}$  e  $U_{500}$ ), o vento meridional em superfície ( $V_{925}$ ) e a umidade específica e temperatura em 925 hPa ( $q_{925}$ ,  $T_{925}$ ).

**CP1-EL**

dia 11	dia 13	dia 14	dia 20	dia 21	dia 26
$U_{200}$ $U_{500}$ $V_{925}$ $T_{925}$	$U_{200}$ $U_{500}$ $V_{925}$	$U_{200}$ $U_{500}$ $V_{925}$	$U_{200}$ $U_{500}$ $V_{925}$ $q_{925}$	$U_{200}$ $U_{500}$ $V_{925}$ $q_{925}$	$U_{200}$ $U_{500}$ $V_{925}$ $T_{925}$

(a)

**CP2 -EL**

dia 11	dia 13	dia 14	dia 20	dia 21	dia 26
$V_{200}$ $V_{500}$ $U_{925}$	$V_{200}$ $U_{925}$ $q_{925}$	$V_{200}$ $U_{925}$ $q_{925}$	$V_{500}$ $T_{925}$	$T_{925}$	$V_{200}$ $U_{925}$

(b)

**CP3 -EL**

dia 11	dia 13	dia 14	dia 20	dia 21	dia 26
$q_{925}$	$T_{925}$ $V_{500}$	$T_{925}$ $V_{200}$	$U_{925}$	$U_{925}$	$V_{500}$ $q_{925}$

(c)

Figura 5.37 – Agrupamento de variáveis segundo a ACP para os eventos de falhas no período El Niño (EL): (a) CP1, (b) CP2 e (c) CP3.

A associação entre variáveis em níveis atmosféricos distintos reflete a interação entre sistemas de circulação em diferentes escalas. Essa interação é necessária ao desenvolvimento, organização e manutenção da convecção associada com VCAN.

A predominância da componente zonal em 200 e 500 hPa em todos os eventos indica o controle da escala maior.

A associação entre a umidade específica e o vento em 200, 500 e 925 hPa (eventos 20 e 21) pode ser o diferencial que explica a maior concentração de chuvas observadas entre 20 e 23 de dezembro no trecho CG - SC como mencionado no início deste capítulo.

#### **5.2.2.2 Configurações espaciais**

Nesta seção são avaliados padrões de anomalia obtidos com a ACP. As análises são concentradas no evento 20.

Nas Figuras 5.38a e 5.38b são mostrados o campo médio e a distribuição espacial da CP1 da umidade específica para eventos de falhas no período EL.

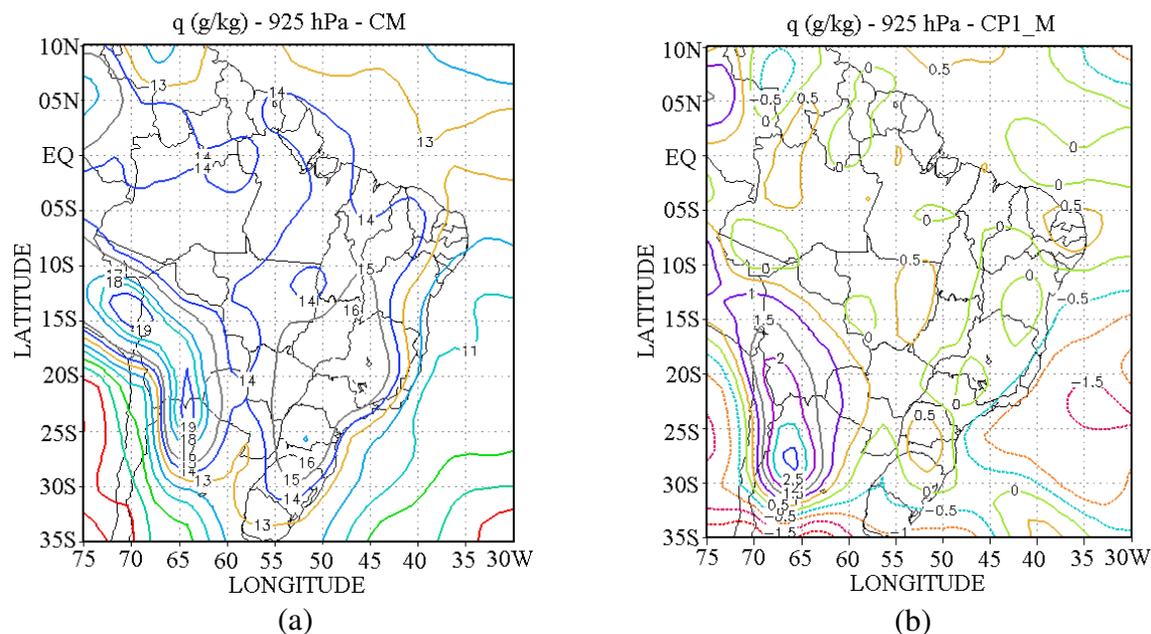


Figura 5.38 – Configuração espacial da umidade específica em 925 hPa no período El Niño (EL): (a) campo médio (CM) e (b) CP1.

A comparação entre as Figuras 5.38a e 5.38b evidencia a eficiência do método de ACP. Não existe qualquer indicativo sobre teor de vapor mais elevado no setor leste do NE no campo médio da umidade específica. Entretanto, observa-se nitidamente na CP1 (Figura 5.38b) um núcleo com máximos valores positivos sobre os Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.

Os coeficientes positivos vistos na CP1 refletem a intensidade desse padrão e indica que há um aumento de umidade nos baixos níveis (anomalia). A ocorrência de algum mecanismo de meso ou grande escala que provoque o levantamento desta massa de ar úmido é suficiente para dar início à formação de SC.

A CP1 e a distribuição espacial da componente meridional do vento para o evento 20 são mostradas na Figura 5.39. Os coeficientes que indicam a intensidade deste padrão (Fig

5.39b) assumem valores positivos e negativos na região NE. O padrão indica que há intensificação de ventos de sul. O núcleo com valores máximos ao sul de Pernambuco representa forte anomalia desta variável. A intensificação do vento favorece a ascensão de ar e formação de nuvens e chuva na região.

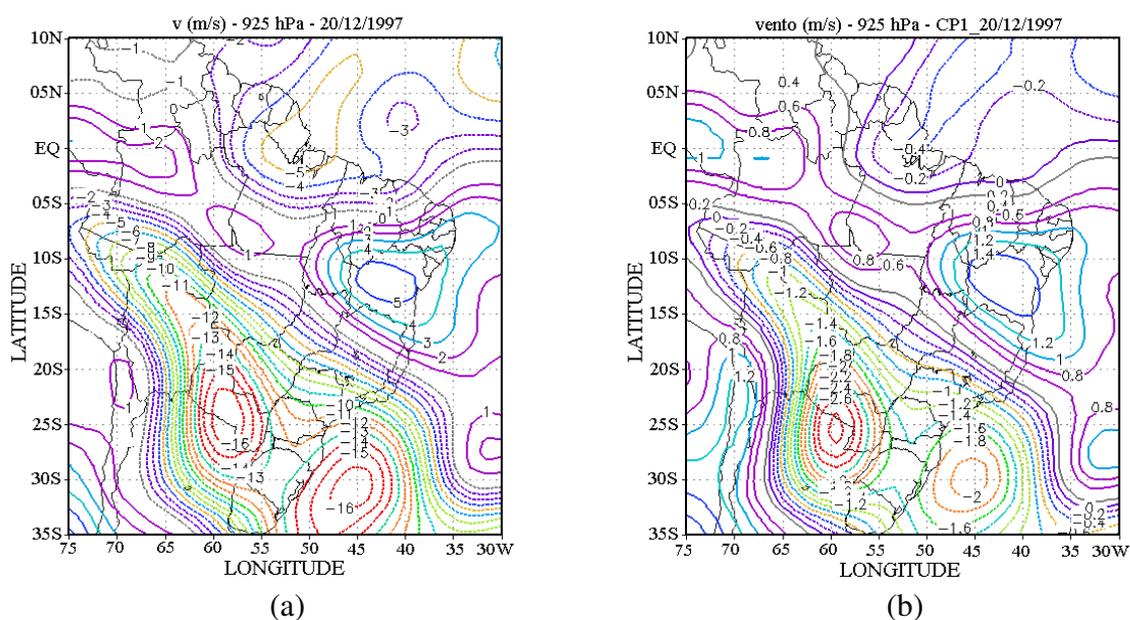


Figura 5.39 - Configuração espacial da componente meridional do vento em 925 hPa no período El Niño (EL): (a) campo real para o evento 20 e (b) CP1.

A CP1 do vento zonal para o evento 20 nos níveis de 200 hPa e 500 hPa são mostradas nas Figuras 5.40a e 5.40b, respectivamente. Os coeficientes que indicam a intensidade deste padrão são positivos no nível de 200 hPa e negativos no nível de 500 hPa sobre a região NE. Esse padrão indica a intensificação de ventos de oeste em 200 hPa sobre o NE e de ventos de leste em 500 hPa.

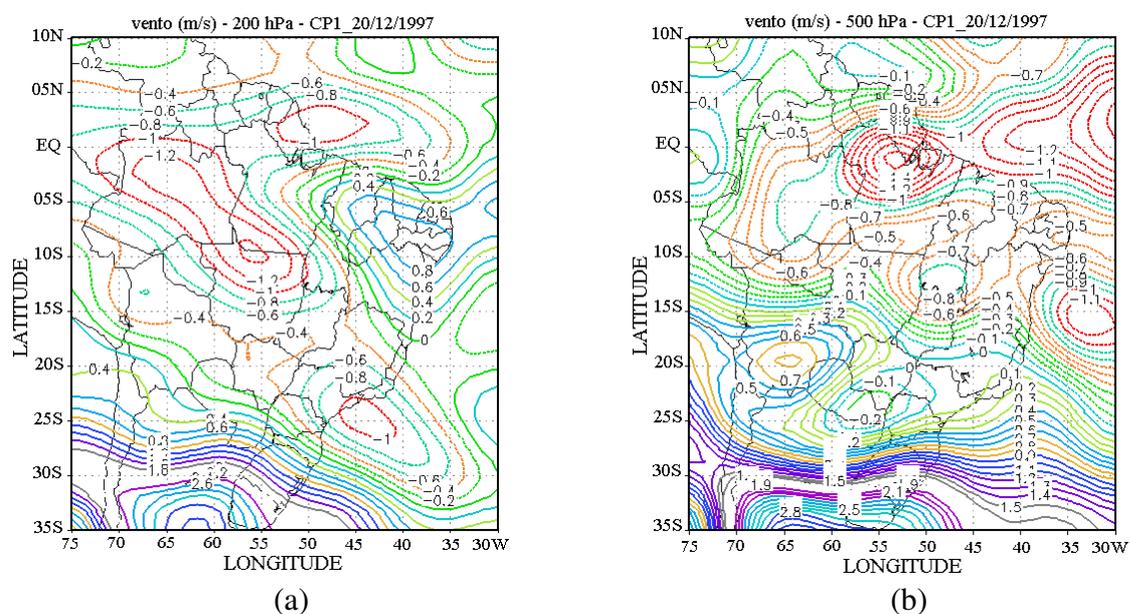


Figura 5.40 – Configuração espacial da CP1 do vento zonal em 200 hPa (a) e 500 hPa (b) para o evento 20.

Esse comportamento caracteriza a presença de cisalhamento vertical do vento (intensidade e direção) fundamental na organização e intensificação de SC.

A CP2 e a distribuição espacial da temperatura em 925 hPa para o evento 20 são mostradas nas Figuras 5.41a e 5.41b, respectivamente. Os coeficientes que indicam a intensidade deste padrão mostram um dipolo de temperatura centrado na região NE. Esse resultado reforça as anomalias representadas no primeiro modo. Aquecimento diferencial está diretamente relacionado com gradientes de pressão e conseqüentemente com intensificação das circulações nos baixos níveis.

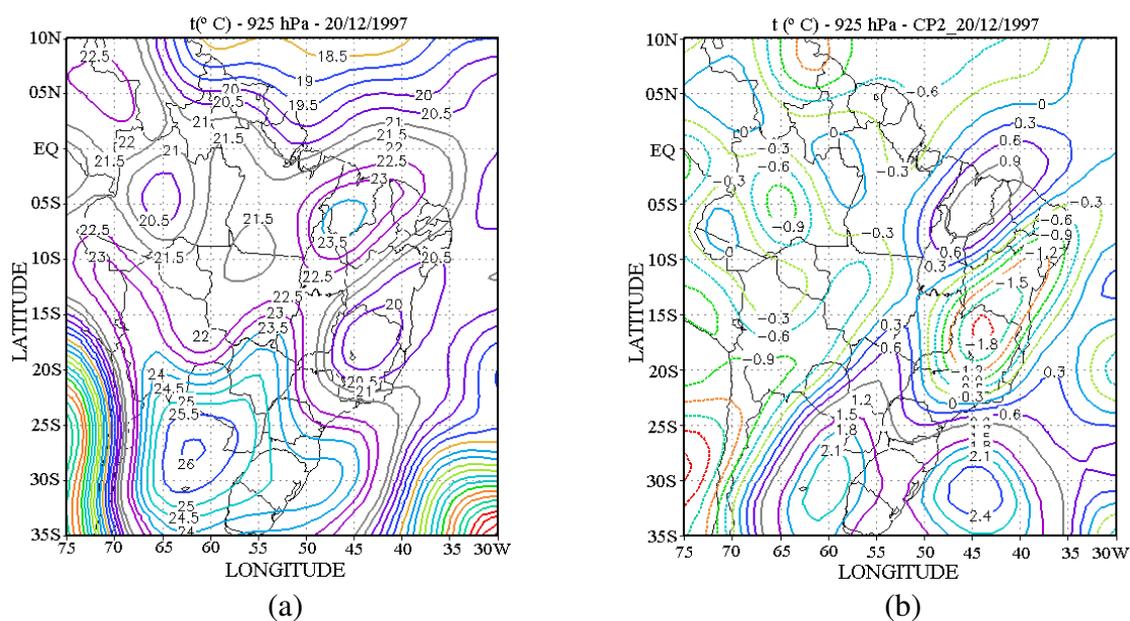


Figura 5.41 - Configuração espacial da temperatura do ar em 925 hPa no período El Niño (EL): (a) campo real para o evento 20 e (b) CP2.

### 5.2.3 Aplicação da ACP ao sub-conjunto de eventos de falhas de La Niña

Foram identificadas 13 ocorrências de interrupções de energia por descargas atmosféricas nos dias 01, 05, 13, 15, 20, 21 e 24 de janeiro de 2000 caracterizando sete eventos de atividade convectiva intensa. A ACP foi aplicada aos dados de vento nos níveis de 200, 500 e 925 hPa, aos dados de umidade específica em 925 hPa e a temperatura em 925 hPa. A contribuição das três componentes mais significativas é mostrada na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Variância explicada (%) e variância acumulada (%) para as primeiras três componentes principais (CP1, CP2 e CP3). Período La Niña (LN).

Variável	Vento			Umidade	Temperatura do
				Específica	Ar
Nível	200hPa	500hPa	925hPa	925hPa	925hPa

Variância explicada (%)					
CP1	40,14	31,88	32,11	34,47	38,39
CP2	22,93	15,79	19,41	30,09	29,01
CP3	10,72	11,04	19,39	27,27	27,35
Variância acumulada (%)					
	73,80	58,71	70,91	92,82	94,76

Observa-se que as três CPs juntas explicam 73,80%, 58,71% e 70,91% da variabilidade do vento em 200, 500 e 925 hPa, respectivamente. No caso da umidade específica em 925 hPa, a variância acumulada explica 92,82% da variabilidade total e para temperatura em 925hPa o valor acumulado é de 94,76%.

### 5.2.3.1 Séries temporais

O grau de relação entre o vento zonal e meridional em 200, 500 e 925 hPa e suas componentes principais é mostrado nas Figuras 5.42, 5.43 e 5.44. Observa-se que a CP1 possui alta correlação com a componente zonal nos níveis de 200, 500 e 925 hPa. A componente meridional do vento em 200 hPa está mais bem correlacionada com a CP2 (maioria dos eventos). O vento meridional em 925 hPa está mais bem correlacionado com a CP2 ou CP3, conforme o evento analisado.

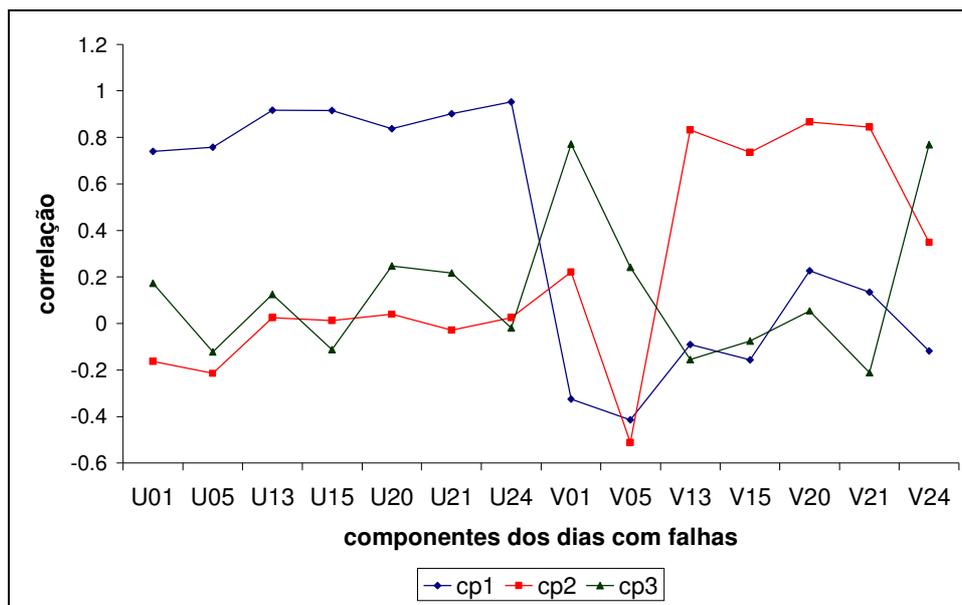


Figura 5.42 - Correlação temporal das componentes principais para o vento em 200hPa no período de La Niña.

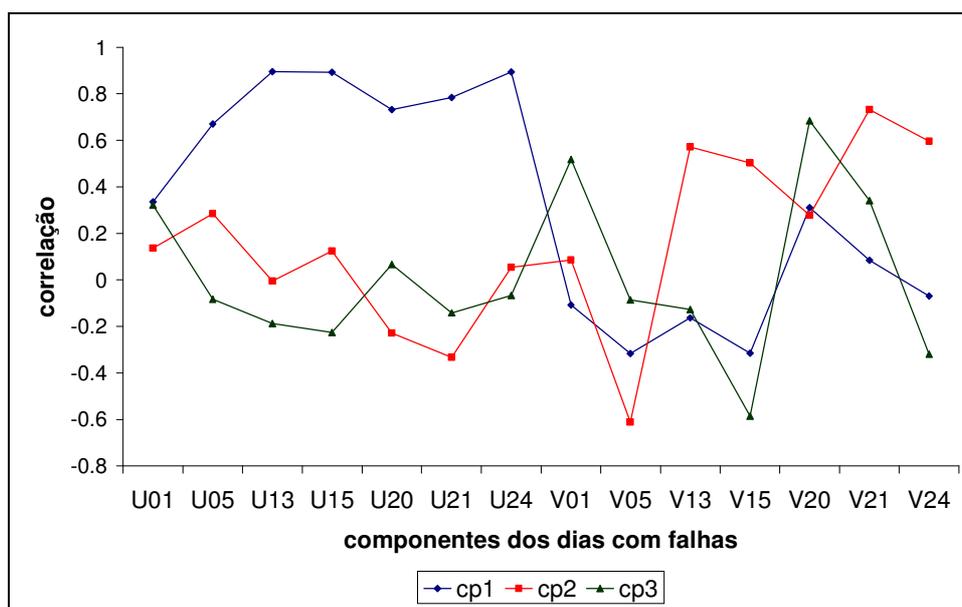


Figura 5.43 - Correlação temporal das componentes principais para o vento em 500hPa no período de La Niña.

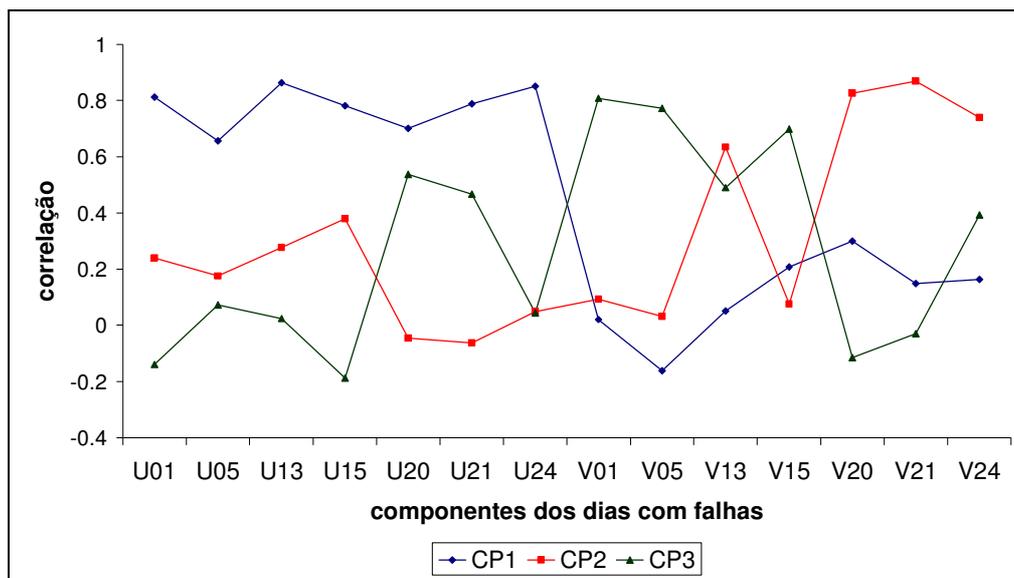


Figura 5.44 - Correlação temporal das componentes principais para o vento em 925hPa no período de La Niña.

As séries temporais apresentadas nas Figuras 5.45 e 5.46 mostram comportamentos semelhantes para umidade específica e temperatura no nível de 925 hPa. Observa-se alta correlação com a CP1 para os eventos 20 e 21 de janeiro. Para os eventos 01 e 05 a correlação é mais significativa com a CP2. Já os dias 13 e 15 de janeiro têm-se a umidade e a temperatura mais bem correlacionadas com a CP3.

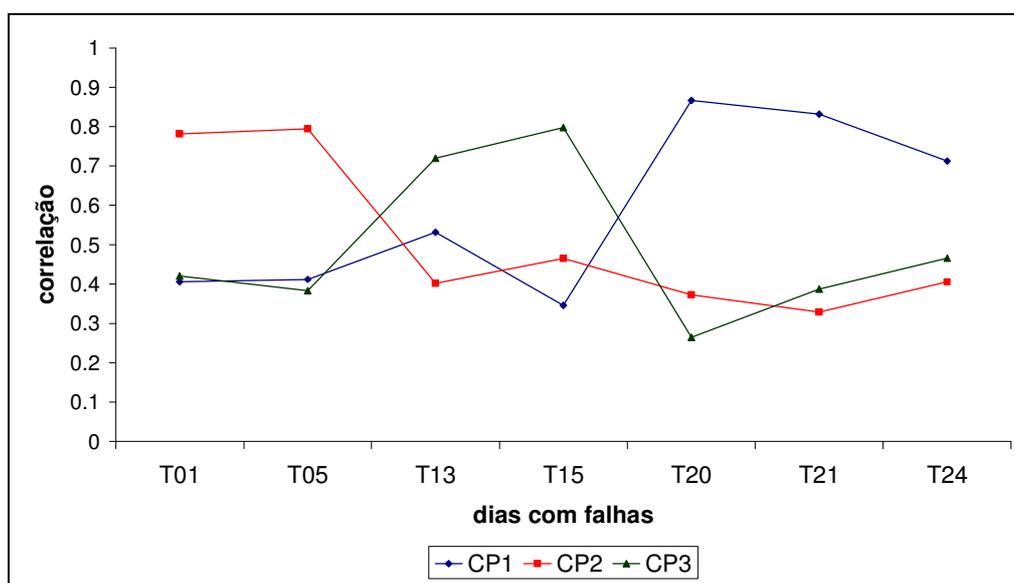


Figura 5.45 - Correlação temporal das componentes principais para a temperatura do ar em 925 hPa no período de La Niña.

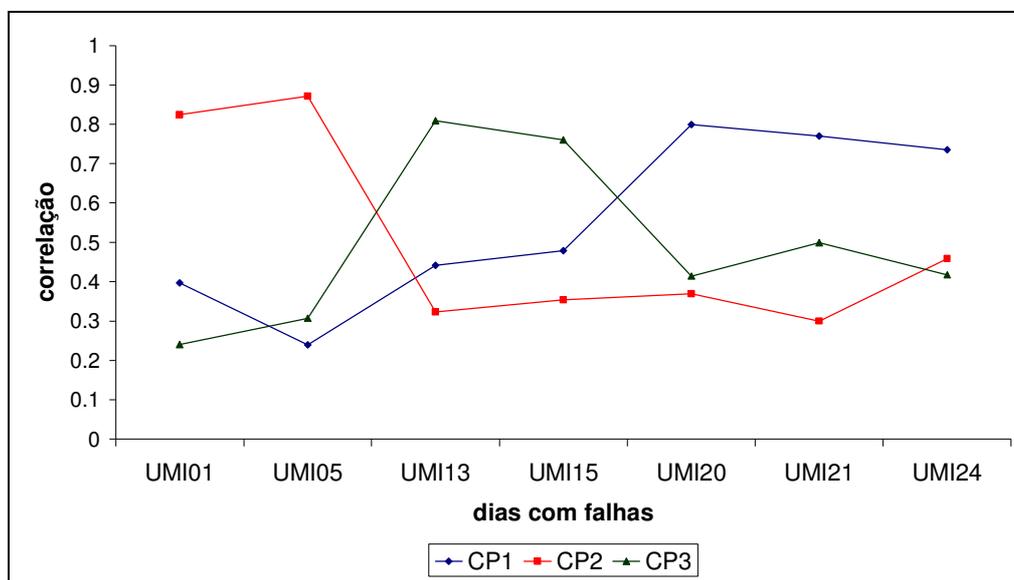


Figura 5.46 - Correlação temporal das componentes principais para a umidade específica em 925 hPa no período de La Niña.

Com o objetivo de visualizar melhor a associação entre as variáveis meteorológicas nos dias com interrupção de energia no período LN, os agrupamentos obtidos com a ACP são mostrados na Figura 5.47.

#### CP1 - LN

dia 01	dia 05	dia 13	dia 15	dia 20	dia 21	dia 24
$U_{200}$	$U_{200}$ $U_{500}$					
$U_{925}$	$U_{925}$	$U_{925}$	$U_{925}$	$U_{925}$ $T_{925}$	$U_{925}$ $T_{925}$	$U_{925}$ $T_{925}$
				$q_{925}$	$q_{925}$	$q_{925}$

(a)

**CP2 - LN**

dia 01	dia 05	dia 13	dia 15	dia 20	dia 21	dia 24
$T_{925}$ $q_{925}$	$T_{925}$ $q_{925}$	$V_{200}$ $V_{500}$ $V_{925}$	$V_{200}$ $V_{500}$	$V_{200}$ $V_{925}$	$V_{200}$ $V_{500}$ $V_{925}$	$V_{500}$

(b)

**CP3 - LN**

dia 01	dia 05	dia 13	dia 15	dia 20	dia 21	dia 24
$V_{200}$ $V_{925}$	$V_{925}$	$T_{925}$	$V_{925}$ $T_{925}$	$V_{500}$		$V_{200}$

(c)

Figura 5.47 – Agrupamento de variáveis segundo a ACP para os eventos de falhas no período La Nina (LN): (a) CP1, (b) CP2 e (c) CP3.

### 5.2.3.2 Configurações espaciais

A Figura 5.48 mostra a CP1 da umidade específica e da temperatura em 925 hPa para os eventos 20 e 21 de 2000 (período LN). Conforme mencionado anteriormente, os coeficientes positivos e negativos indicam a intensidade do padrão. Para ambos os eventos, têm-se núcleos intensos de umidade específica na região NE indicando alto teor de umidade nos baixos níveis (anomalia positiva).

Conforme discutido no caso EL, essa é uma condição extremamente favorável para formação e desenvolvimento de SC na região. A maior diferença entre as duas situações (EL e LN) é extensão da área com alto teor de umidade.

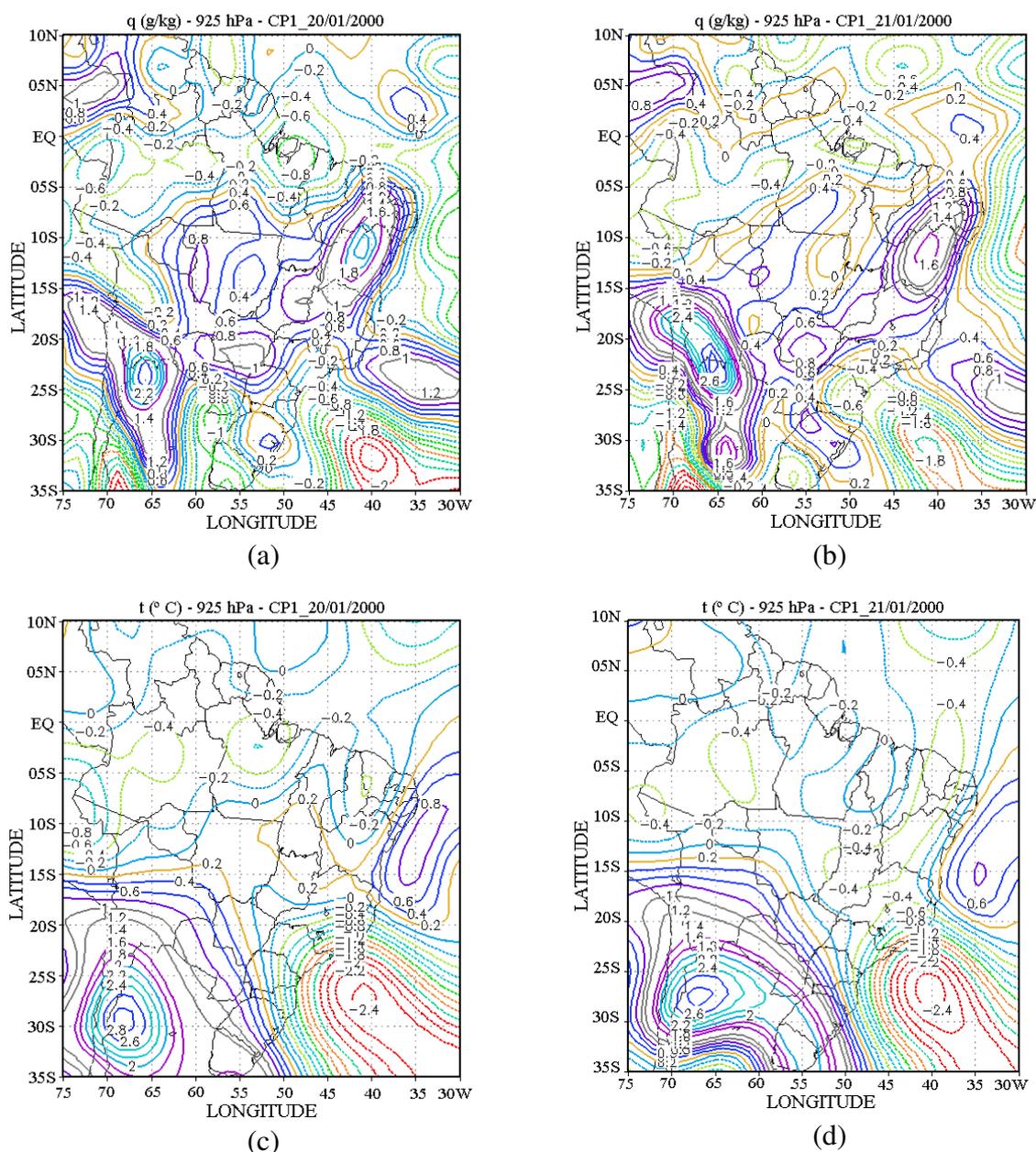


Figura 5.48 - Configuração espacial da umidade específica e da temperatura do ar em 925 hPa no período La Nina (LN): (a) CP1 da umidade específica para o evento 20; (b) CP1 da umidade específica para o evento 21; (c) CP1 da temperatura do ar para o evento 20; (d) CP1 da temperatura do ar para o evento 21.

A primeira componente principal da temperatura em 925 hPa (Figuras 5.48c e 5.8d) mostra para ambos os eventos um dipolo em 10°S. Esse padrão contribui para geração de um gradiente de pressão e intensificação do vento zonal. Na Figura 5.49 são mostradas a CP1 da



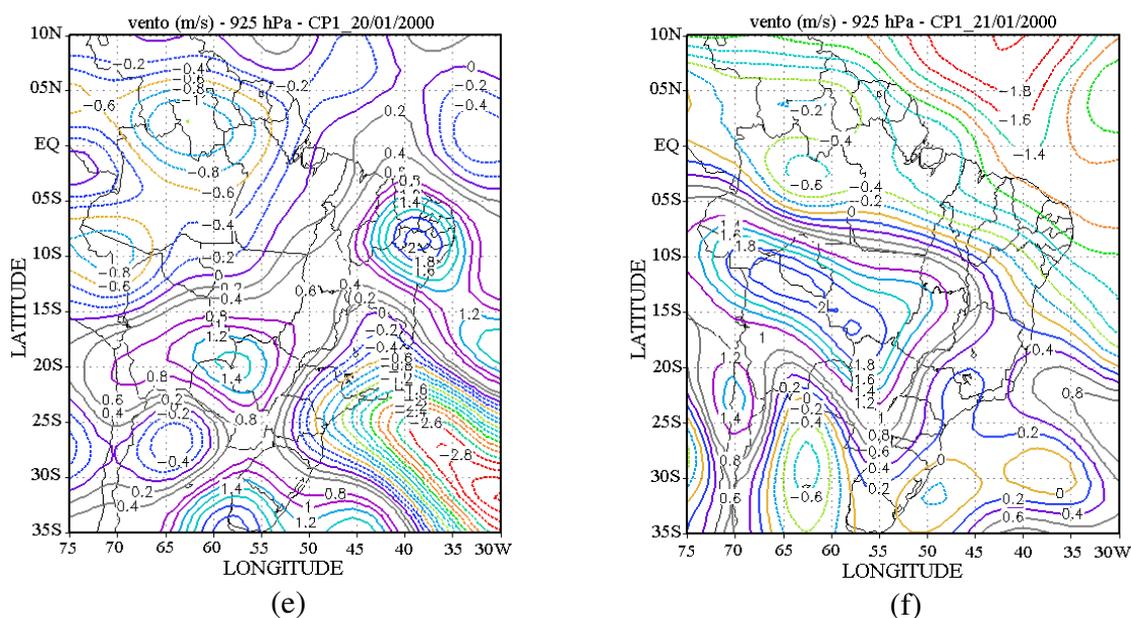


Figura 5.49 - Configuração espacial do vento zonal em 200, 500 e 925 hPa no período La Nina (LN): (a) CP1 do vento zonal para o evento 20 em 200 hPa; (b) CP1 do vento zonal para o evento 21 em 200 hPa; (c) CP1 do vento zonal para o evento 20 em 500 hPa; (d) CP1 do vento zonal para o evento 21 em 500 hPa, (e) CP1 do vento zonal para o evento 20 em 925 hPa; (f) CP1 do vento zonal para o evento 21 em 925 hPa.

Anomalias negativas da componente zonal no evento 20 indica intensificação de vento de leste em 200 hPa numa área significativa da região de estudo. Ao contrário, no evento 21 tem-se anomalia positiva e, portanto, intensificação no vento de oeste. Esse padrão é mais bem definido no nível de 500 hPa (Fig 5.49c e 5.49d).

Nas Figuras 5.49e e 5.49f para a CP1 da componente zonal do vento em 925 hPa para os eventos 20 e 21 de 2000 (período LN), a anomalia positiva (coeficientes positivos) sobre a região NE indica a presença de um jato nos baixos níveis (intensificação da componente de oeste). Esse comportamento indica a presença de cisalhamento na intensidade e direção do vento na vertical.

Na Figura 5.50 são mostradas a CP2 da componente meridional do vento em 925 hPa para os eventos 20 e 21 de 2000 (período LN).

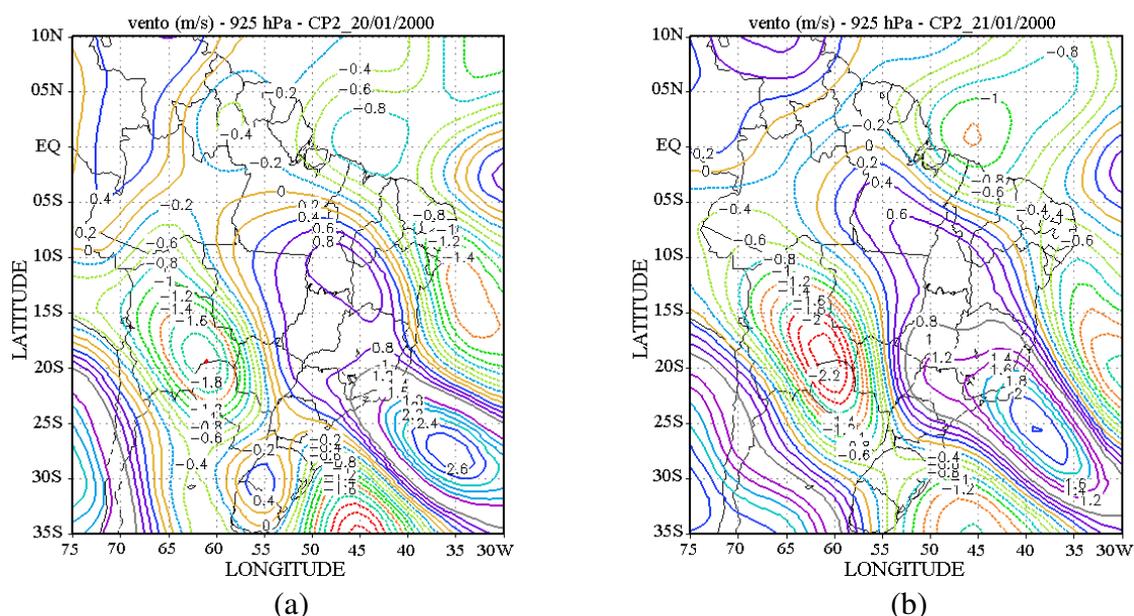


Figura 5.50 - Configuração espacial do vento meridional em 925 hPa no período La Nina (LN): (a) CP2 do vento meridional para o evento 20; (b) CP2 do vento meridional para o evento 21.

A segunda componente mostra coeficientes negativos em grande parte do NE, principalmente nos setores norte e leste da região. Neste caso as anomalias de temperatura em superfície (925 hPa) representadas no primeiro modo são reforçadas. Há uma intensificação do vento de norte nesta área. Por outro lado, coeficientes positivos observados ao sul do Estado de Pernambuco indicam intensificação de ventos de sul.

Assim há convergência nos baixos níveis e, portanto, situação favorável à formação de nuvens.

#### 5.2.4 Análise da ACP ao sub-conjunto de eventos de falhas da fase Neutra

Foram identificadas 06 ocorrências de interrupções de energia por descargas atmosféricas nos dias 01, 02 e 27 de dezembro de 2001 e 15 ocorrências nos dias, 02, 04, 07, 14, 15, 17, 19, 24 e 29 de dezembro de 2002 caracterizando doze eventos de atividade convectiva intensa. A exemplo das análises para os períodos de EL e LN a ACP foi aplicada aos dados de vento nos níveis de 200, 500 e 925 hPa, aos dados de umidade específica em 925 hPa e à temperatura em 925 hPa. A contribuição das três componentes mais significativas é mostrada na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Variância explicada (%) e variância acumulada (%) para as primeiras três componentes principais (CP1, CP2 e CP3). Período Neutro (N).

Variável	Vento			Umidade Específica	Temperatura do Ar
Nível	200hPa	500hPa	925hPa	925hPa	925hPa
Variância explicada (%)					
CP1	38,34	30,99	32,82	34,33	34,38
CP2	21,82	16,52	24,64	33,48	32,19
CP3	07,61	09,02	12,10	20,54	20,17
Variância acumulada (%)					
	67,78	56,53	69,55	88,34	86,74

Observa-se que as três CPs juntas explicam 67,78%, 56,53% e 69,55% da variabilidade do vento em 200, 500 e 925 hPa, respectivamente. No caso da umidade

específica em 925 hPa, a variância acumulada explica 88,34% da variabilidade total e para temperatura em 925hPa o valor acumulado é de 86,74%.

#### 5.2.4.1 Séries temporais

O grau de relação entre o vento zonal e meridional em 200, 500 e 925 hPa e suas componentes principais é mostrado nas Figuras 5.51, 5.52 e 5.52. Observa-se que a CP1 possui alta correlação com a componente zonal nos níveis de 200, 500 e 925 hPa. Esse resultado é semelhante ao encontrado no período LN. A componente meridional do vento em 200 hPa está mais bem correlacionada com a CP2 (maioria dos eventos). O vento meridional em 925 hPa está mais bem correlacionado com a CP2 para maioria dos eventos.

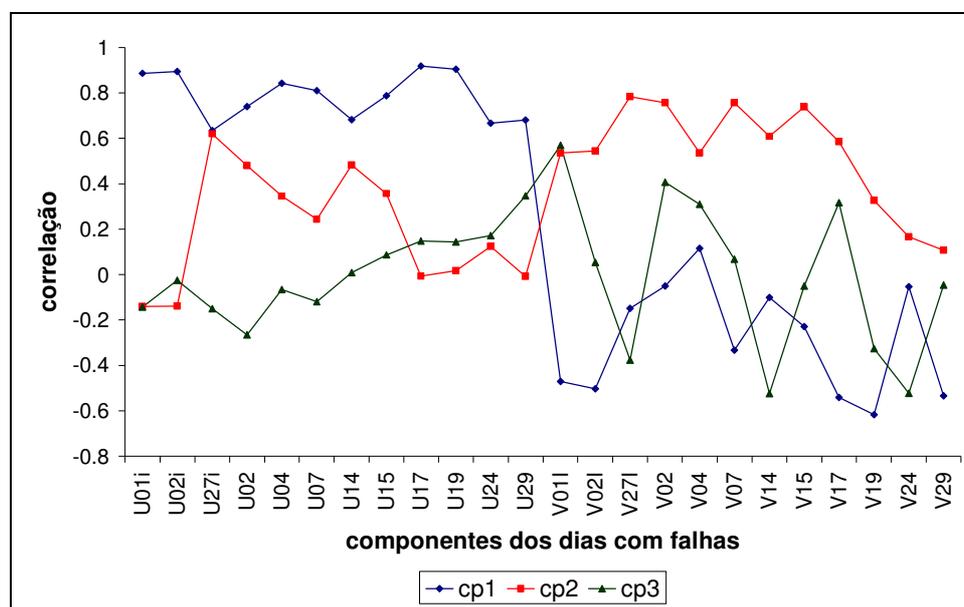


Figura 5.51 - Correlação temporal das componentes principais para o vento em 200hPa no período Neutro.

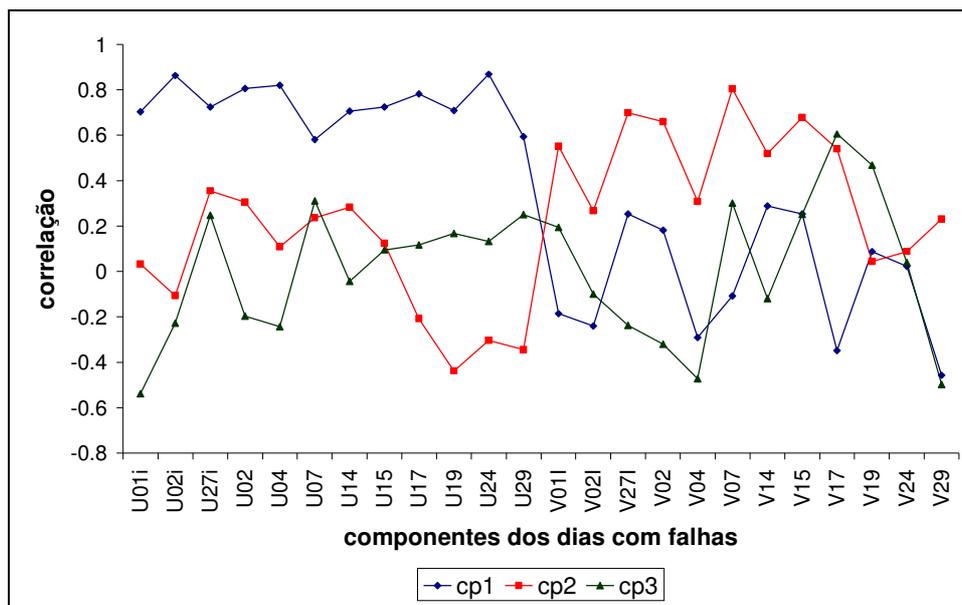


Figura 5.52 - Correlação temporal das componentes principais para o vento em 500hPa no período Neutro.

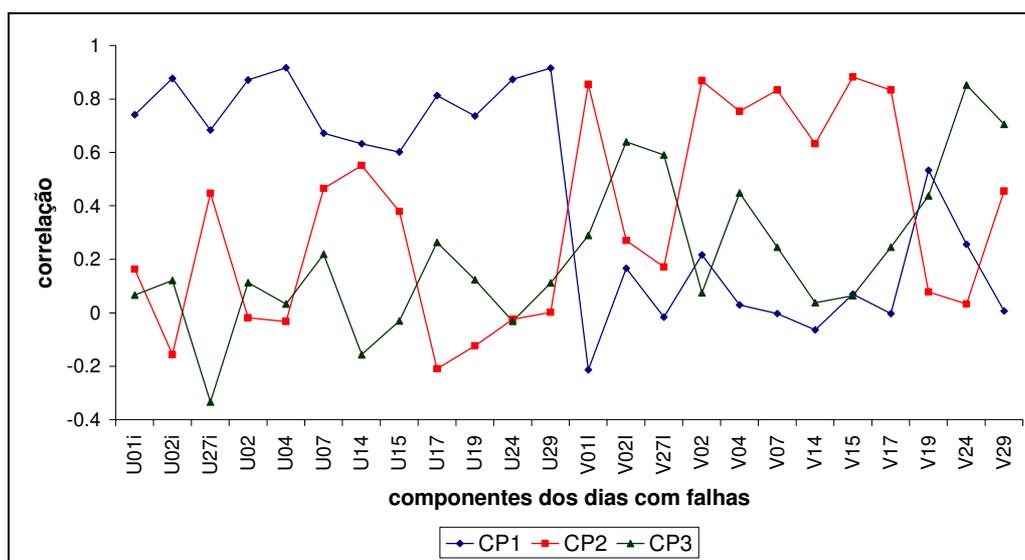


Figura 5.53 - Correlação temporal das componentes principais para o vento em 925 hPa no período Neutro.

Na série temporal apresentada na Figura 5.54 observa-se alta correlação entre a temperatura no nível de 925 hPa e a CP1 para os eventos 01 e 02 de dezembro de 2001 e 14,

15 e 17 de janeiro de 2002. A correlação é mais significativa com a CP2 nos eventos 07, 24 e 29 de janeiro de 2002. O evento 19 de janeiro de 2002 está mais bem correlacionado com a CP3.

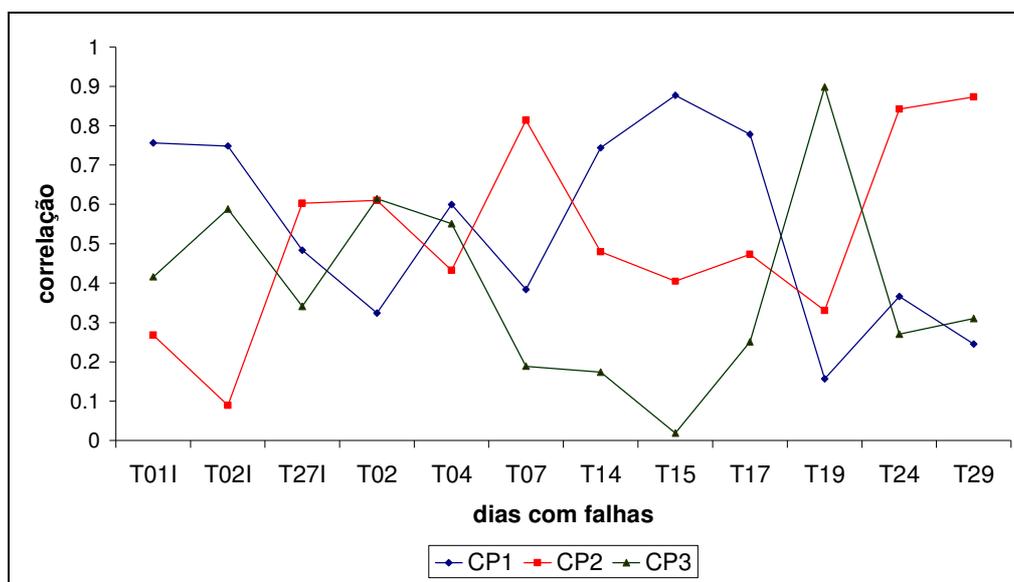


Figura 5.54 - Correlação temporal das componentes principais para a temperatura do ar em 925 hPa no período Neutro.

Na série temporal apresentada na Figura 5.55 observa-se alta correlação entre a umidade específica no nível de 925 hPa e a CP1 para os eventos 27 de dezembro de 2001 e 19, 24 e 29 de janeiro de 2002. A correlação é mais significativa com a CP2 nos eventos 02, 04, 07, 14, 15 e 17 de janeiro de 2002. A CP3 está mais bem correlacionada com os eventos 01 e 02 de dezembro de 2002.

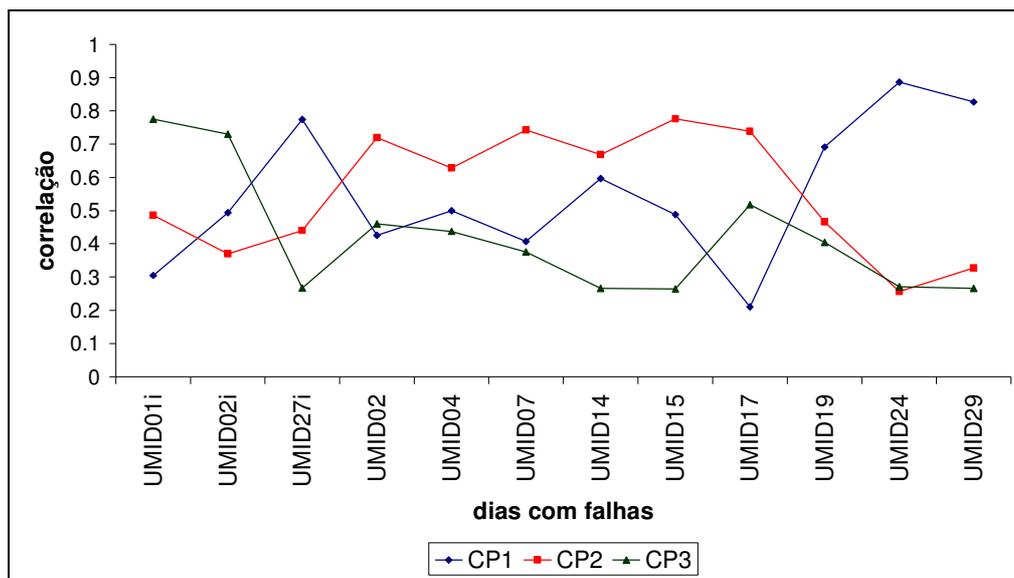


Figura 5.55 - Correlação temporal das componentes principais para a umidade específica em 925 hPa no período Neutro.

Os grupos de variáveis caracterizados pelas CP1, CP2 e CP3 no período neutro são mostrados na Figura 5.56.

CP1 - N

dia 01	dia 02	dia 27	dia 02	dia 04	dia 07	dia 14	dia 15	dia 17	dia 19	dia 24	dia 29
U <sub>200</sub> U <sub>500</sub>											
U <sub>925</sub> T <sub>925</sub>	U <sub>925</sub> T <sub>925</sub>	U <sub>925</sub> q <sub>925</sub>	U <sub>925</sub>	U <sub>925</sub>	U <sub>925</sub>	U <sub>925</sub> T <sub>925</sub>	U <sub>925</sub> T <sub>925</sub>	U <sub>925</sub> T <sub>925</sub>	U <sub>925</sub> q <sub>925</sub>	U <sub>925</sub> q <sub>925</sub>	U <sub>925</sub> q <sub>925</sub>

(a)

CP2 - N

dia 01	dia 02	dia 27	dia 02	dia 04	dia 07	dia 14	dia 15	dia 17	dia 19	dia 24	dia 29
V <sub>500</sub>		V <sub>200</sub> V <sub>500</sub>	V <sub>200</sub> V <sub>500</sub>	V <sub>200</sub>	V <sub>200</sub> V <sub>500</sub>	V <sub>200</sub>	V <sub>200</sub> V <sub>500</sub>	V <sub>200</sub>	V <sub>500</sub>		
V <sub>925</sub>		V <sub>925</sub> T <sub>925</sub>	V <sub>925</sub> q <sub>925</sub>	q <sub>925</sub>	V <sub>925</sub> q <sub>925</sub>		T <sub>925</sub>	T <sub>925</sub>			

(b)

CP3 - N

dia 01	dia 02	dia 27	dia 02	dia 04	dia 07	dia 14	dia 15	dia 17	dia 19	dia 24	dia 29
q <sub>925</sub>	q <sub>925</sub>								V <sub>500</sub>	V <sub>500</sub>	
			T <sub>925</sub>	T <sub>925</sub>				V <sub>925</sub>	V <sub>925</sub> T <sub>925</sub>		

(c)

Figura 5.56 - Agrupamento de variáveis segundo a ACP para os eventos de falhas no período Neutro (N): (a) CP1, (b) CP2 e (c) CP3.

#### 5.2.4.2 Padrões Espaciais

Nesta seção as análises foram concentradas no dia 07 de janeiro de 2002. Como nos casos anteriores (EL e LN), o dia foi selecionado com base em dados de precipitação das estações de superfície situadas em trechos de LT afetados por descargas atmosféricas e imagens de satélite.

Com base nas variáveis agrupadas por fator como vistas na Figura 5.56, nota-se que o dia 07 tem uma distribuição diferente dos eventos intensos analisados anteriormente (EL e LN). O conjunto de variáveis caracterizadas pela CP1 contém somente as componentes zonal do vento (200, 500 e 925 hPa).

A associação entre o vento meridional (200, 500 e 925 hPa), a umidade específica e a temperatura em 925 hPa é melhor representada pela CP2.

A Figura 5.57 mostra a CP1 do vento zonal em 200 para o evento do dia 07. A anomalia positiva sobre a região NE reflete a intensificação nos ventos de oeste.

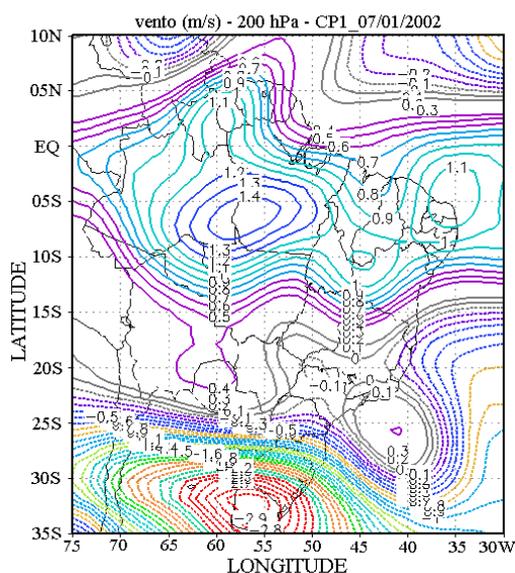


Figura 5.57 – Configuração espacial da CP1 do vento zonal em 200 para o evento do dia 07.

A Figura 5.58 mostra a segunda componente principal da temperatura e da umidade específica em 925 hPa.

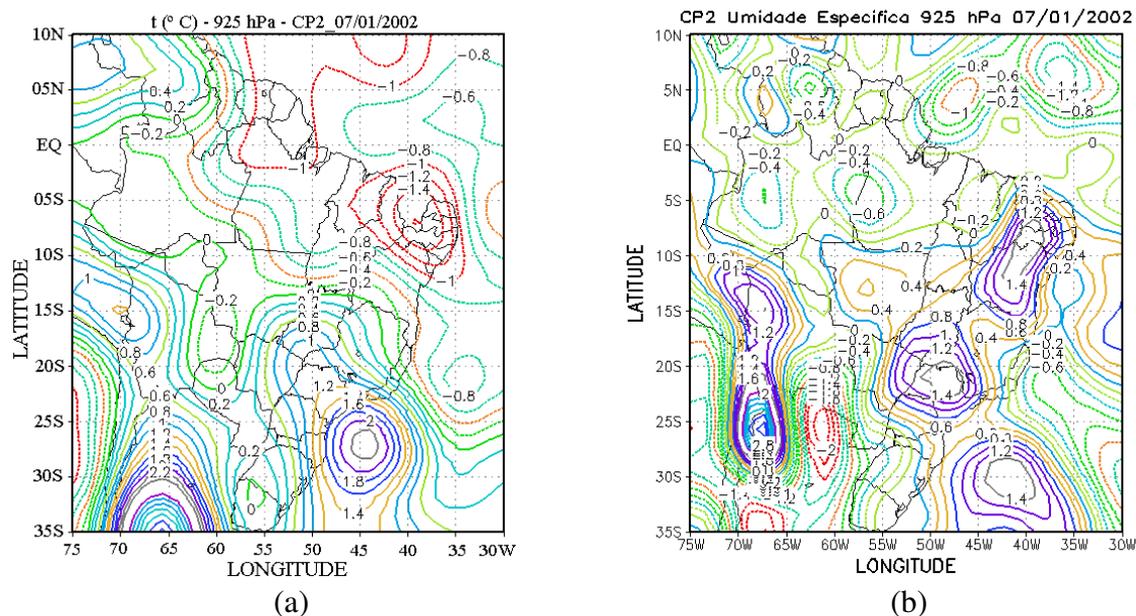


Figura 5.58 - Configuração espacial da CP2 temperatura do ar (a) e da umidade específica em 925 hPa (b) para o evento do dia 07.

Como nos casos anteriores, a anomalia positiva vista na Figura 5.58b representa um alto teor de umidade nos baixos níveis sobre o NE. Este parece ser um fator necessário em todos os casos de eventos intensos.

## **6. SUMÁRIO, CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.**

Relações entre variáveis meteorológicas em ocorrências de descargas atmosféricas e interrupções no fornecimento de energia foram avaliadas com o objetivo de auxiliar na identificação de padrões atmosféricos associados com atividade convectiva intensa na área da CHESF, em episódios de El Niño (EL), La Niña (LN) e condições atmosféricas neutras (N).

Desenvolvimento de atividade convectiva intensa pode ocorrer na área de atuação da CHESF entre os meses de dezembro e janeiro decorrentes da atuação de Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN). Em episódios de LN e N, sistemas frontais e ZCAS também são responsáveis por atividade convectiva no NE.

A ACP foi aplicada às componentes do vento nos níveis de 200, 500 e 925 hPa, à umidade específica e à temperatura no nível de 925 hPa em ocorrências de tempestades associadas a cortes de energia por descarga atmosférica (6 eventos em ano de EL, 07 eventos em ano de LN e 12 eventos em ano N).

Os resultados mostraram que nas ocorrências durante o período:

1- EL, as três primeiras componentes (CPs) juntas explicam 81,1%, 72,4% e 73,9% da variabilidade do vento em 200, 500 e 925 hPa, respectivamente. No caso da umidade específica em 925 hPa, a variância acumulada explica 89,6% da variabilidade total e para temperatura em 925hPa o valor acumulado é de 94,2%;

2 – LN, as três CPs juntas explicam 73,80%, 58,71% e 70,91% da variabilidade do vento em 200, 500 e 925 hPa, respectivamente. No caso da umidade específica em 925 hPa, a variância acumulada explica 92,82% da variabilidade total e para temperatura em 925hPa o valor acumulado é de 94,76%;

3 – N, as três CPs juntas explicam 67,78%, 56,53% e 69,55% da variabilidade do vento em 200, 500 e 925 hPa, respectivamente. No caso da umidade específica em 925 hPa, a variância acumulada explica 88,34% da variabilidade total e para temperatura em 925hPa o valor acumulado é de 86,74%.

### **Agrupamentos**

A ACP também foi usada para explorar a associação entre as variáveis atmosféricas nas ocorrências de interrupção de energia para cada categoria.

Independente da categoria, o número de variáveis agrupadas por componente (CP1, CP2, ou CP3) variou de evento para evento. No entanto, verificou-se que para todos os eventos de EL os grupos caracterizados pela CP1 mostram forte associação entre as variáveis  $U_{200}$ ,  $U_{500}$  e  $U_{925}$  (vento zonal em 200, 500 e 925 hPa).

Para todos os eventos de LN e N, os grupos caracterizados pela CP1 mostram forte associação entre as variáveis  $U_{200}$ ,  $U_{500}$  e  $V_{925}$  (vento zonal em 200 e 500 hPa e vento meridional em 925 hPa).

Como estas características estão presentes em todos os eventos, é um indicativo de que são elementos importantes na geração e desenvolvimento de SD intensos.

Para os eventos 20 e 21 da categoria EL e nos eventos 20, 21 e 24 da categoria LN verificou-se grupos bem caracterizados pela CP1. No EL, formado pelo vento zonal (200, 500 e 925 hPa), e pela temperatura e umidade (925 hPa). Na categoria LN pelas variáveis vento zonal (200 e 500 hPa), vento meridional, temperatura e umidade (925 hPa).

### **Configurações espaciais**

A técnica foi bastante eficiente na determinação de configurações espaciais sob o domínio analisado associadas com anomalias de vento, temperatura e umidade nos eventos intensos de precipitação e, portanto, representa um recurso a mais no conhecimento sobre atividade convectiva em situações climáticas distintas (episódios de EL e LA).

A análise dos padrões mais associados aos eventos de chuva forte mostra, que em altos níveis (200 hPa) a ocorrência desses eventos está principalmente associada com a intensificação dos ventos de oeste. Esta característica está presente em todos os casos analisados (EL, LN e N).

Em baixos níveis, em episódios de LN e N tem-se o fortalecimento do fluxo zonal. Nos eventos EL a predominância é de fluxo meridional mais intenso que a média. Nos dois casos,

a intensificação do vento nos baixos níveis favorece a convergência de umidade e consequentemente formação de nuvens.

Esses resultados foram considerados bastante satisfatórios já que confirmam características ambientais importantes associadas com tempestades intensas, tais como vapor d água abundante nos baixos níveis (anomalias de umidade) e ventos intensos nos baixos níveis com forte cisalhamento vertical do vento.

### **Sugestão para trabalhos futuros**

Os resultados obtidos permitem sugerir para estudos futuros:

Aplicar a metodologia em conjuntos mais homogêneos de eventos considerando todas as ocorrências de convecção intensa sem necessariamente está associada aos casos cujas descargas atmosféricas atingiram diretamente as LT;

Convencer as empresas responsáveis pela geração e distribuição de energia elétrica da necessidade de construir bancos de dados com informações sobre data, horário e localização geográfica das áreas afetadas por descargas atmosféricas;

Usar série de dados mais longa com um número maior de registros de falhas em episódios EL e LN.

Incluir no estudo outras variáveis meteorológicas que caracterize melhor ambientes atmosféricos favoráveis a ocorrência de SC intensos;

Aumentar o domínio analisado que permita detectar padrões associados a perturbações de grande escala.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDOULAEV, S., MARQUES, V.S, PINHEIRO, F.M.A., MARTINEZ, E., LENSKAIA, O. **Descargas à Terra em Sistemas de Mesoescala: Parte 1. Campos Acumulados das Descargas vs Radar e Satélite.** XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro, 2000.

ABDOULAEV, S., MARQUES, V.S., PINHEIRO, F.M.A., MARTINEZ, E., LENSKAIA, O. **Descargas à Terra em Sistemas de Mesoescala: Parte 2. Variação da Intensidade da Tempestade vs Polaridade das Descargas.** XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro, 2000.

ANTONIO, M.A., ANTONIO, C.A.A., **Dados de Radar e de Raios em 11 de Março de 1999.** XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro, 2000.

AQUINO C.F.A., LIMA, S.C.A., CARNEIRO Jr., S. **Modelagem e Visualização de Surtos em Linhas de Transmissão.** XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE Campina - São Paulo, 2001.

ARAÚJO, R.L. DE; DINIZ, J.M.; CHERCHIGLIA, L.C.; ERICSSON, A.J.; GOLDENLUYS, H.J. **Applied research in an intertropical mountainous area**. IEEE International Conference on Power Distribution, Belo Horizonte, M.G., 1990.

ARAUJO, H .A., CORREIA, M . F.; SILVA ARAGÃO, M. R. **Padrões de ecos de radar meteorológico, observados no semi-árido brasileiro**. VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA - II CONGRESSO LATINO-AMERICANO E IBÉRICO DE METEOROLOGIA, Belo Horizonte, MG. p. 238-241. 1994.

ARNTZ, W.E., E. FAHRBACH. 1991. **El Niño-Klimaexperiment der Natur**. Birkhauser, Basel, Boston, Berlin. 264 p.

BENETI, C.A.A., JUCEVICIUS, M.A.R., CALVETTI, L., FILHO, A.J.P. **Características Elétricas e Hidrometeorológicas de uma Tempestade Severa no Paraná**. XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Fortaleza, 2004.

BENETI, C.A.A., PINTO, C.L. da S., ESCUCIATTO R., **Sistema de Análise de Falhas e Acompanhamento de Tempestades Atmosféricas**, IV CIERTEC - Seminário Internacional sobre Automação de Redes de Distribuição de Energia Elétrica e Centros de Controle, São Paulo – Setembro, 2002.

BERRY, F.A.; BOLLAY, E.; BEERS, N.R. **Handbook of meteorology**. New York: McGraw-Hill Book, 1945. 1068p.

CANE, M. A. **Oceanographic events during El Nino**. Science 222: 1189-1194. 1983.

CARVALHO, A.M.G. **Conexões entre a circulação em altitude e a convecção sobre a**

**América do Sul.** São José dos Campos. 109p. (INPE-4923-TDL/383). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1989.

COHEN, J.C.P.; Dias, M.A.F.S.; NOBRE, C.A. **Aspectos climatológicos das linhas de instabilidade na Amazônia.** *Climanálise*, v.4, n.11, p.34-40, nov. 1989.

CIGRÉ WG 33.11, **Application of Metal Oxide Surge Arresters to Overhead Lines,** *ELECTRA* n° 186, pp. 83-112, Outubro 1999.

CORREIA, M. F. **Diagnóstico via radar dos sistemas precipitantes do semi-árido brasileiro: o evento de 1985.** 1989. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo.

D'AJUZ, A., FONSECA, C.S., CARVALHO, F.M.S., FILHO, J.A., DIAS, L.E.N., PEREIRA, P.M., ESMERALDO, P.C.V., VAISMAN, R., FRONTIN, S.O. **Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento.** Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão, FURNAS, Niteroi, UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE/EDUFF, Rio de Janeiro, 1987.

ELGERD, O.L. **Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica.** Tradutor: Ademaro Alberto Machado Bittencourt Cotrim, revisor técnico: Paulo Cavalcanti de Albuquerque. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1977.

FERREIRA, L.P., FILHO, A.J.P., MASSAMBANI, O. **Análise da Atividade Elétrica Atmosférica na Região Metropolitana de São Paulo em 14 de Março de 1998.** XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro, 2000.

FIGUEROA, N.F.; SATYAMURTY, P.; DIAS, P.L.S. **Simulations of the summer circulation over the South American region with an eta coordinate model.** *Journal Atmospheric Sciences*. v.52, p.1573-1584, May. 1995.

FRANÇA, G.B., MAIA, L.F.P.G., **Caracterização das Descargas Atmosféricas na Área de Concessão da LIGHT no Estado do Rio de Janeiro.** II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – CITENEL, 2003.

FRANK, N.L. **The weather distribution with upper tropospheric cold lows in the tropics.** U.S. Weather Bureau, Southern Region, Technical Memorandum no 28, 1966.

FRANK, N.L. **On the energetics of the cold lows.** *Proceedings of the Symposium on Tropical Meteorology*. American Meteorological Society, EIV I-EIV 6, Boston, USA., 1970.

F. VISACRO S., DUARTE J.V.P., CONTI A.R de. **Proteção de Redes Elétricas de Baixa Tensão Contra Descargas Atmosféricas Parte I: Sobretenções Transferidas**, 2002.

GAN, M.A. **Um estudo observacional sobre as baixa frias da alta troposfera, nas latitudes subtropicais do Atlântico Sul e leste do Brasil.** Dissertação de Mestrado em Meteorologia, INPE, S.J. Campos, Brasil. (INPE - 2685 - TDL/126), 1982

GAN, M.A., Kousky, V.E. **Vórtices ciclônicos da alta troposfera no oceano Atlântico Sul.** *Revista Brasileira de Meteorologia*, 1, 19-28, 1986.

GARAYALDE, E. J. G.; da SILVA, M.G.A.; TAVARES, A. de SÁ, **Classificação Meso-Climática da Região Sul do Brasil pela Análise de Componentes Principais**. In: Congresso Interamericano de Meteorologia, 1., Congresso Brasileiro de Meteorologia, Brasília, 1996.

GIN, R.B.B. **Estudo coordenado de um sistema de tempestade sobre a América do Sul**. Ms thesis - 4 Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1992. (INPE - 5388 - TDI / 477).

GIN, R.B.B.; PINTO, I.R.C.A.; PINTO JR., O.; MENDES JR., O. **Medidas de relâmpagos na estratosfera realizadas no Brasil**. In: Lacerda, M.P. ed., Meteorologia e Hidrologia : Aspectos e Considerações do Contexto Brasileiro. Paraná, SIMEPAR, 1994, p.115-127.

GIN, R.B.B; PINTO Jr., O.; PINTO, I.R.C.A.; MENDES Jr., O. **Estudo de Relâmpagos Nuvem-solo no Estado de Minas Gerais Associado às Condições Meteorológicas**. Anais da IX Congresso Brasileiro de Meteorologia SBMET, São Paulo, Nov.1996, p.17.

GIN, R.B.B; PINTO JR., O.; PINTO, I.R.C.A.; MENDES JR., O. **Tempestades Positivas no Sudeste do Brasil**. Anais da IX Congresso Brasileiro de Meteorologia SBMET, São Paulo, Nov.1996, p.15.

GIN, R.B.B. **Estudo das Características de Relâmpagos no Sudeste do Brasil no Verão de 1992-93**. Tese de Doutorado em Ciência Espacial - Área de Eletricidade Atmosférica - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos - em publicação, 1997.

GIN R.B.B., PINTO Jr., O., PINTO, I.R.C.A, MENDES JR., O. **Descargas Atmosféricas no Sudeste do Brasil**. XIV Seminário de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SPTEE Belém, 1997.

GOMES FILHO, F.M., SOUZA, E.P., BECKER, C.T. **Sistemas Convectivos de Mesoescala com Precipitação intensa na Paraíba: Um Estudo de Caso**. Revista Brasileira de Meteorologia, 11 (1/2): 36:46, 1996.

HALL, B.A., 1989: **Westward-moving disturbances in the South Atlantic coinciding with heavy rainfall events at Ascension Island**. Meteorol. Mag.,118, 175-181.

HASTENRATH, S. **Climate and circulation of the tropics**. New York: Atmospheric Sciences Library, 1988. 455p.

IRIBARNE J.V., CHO, H.R. **Atmospheric physics**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1980. 141p.

J. SOARES A., SCHOROEDER M.A. de O., F. VISACRO S., **Calculo de Sobretensões Associadas a Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão**. XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE Campinas - São Paulo, 2001.

KOUSKY, V.E. **Frontal influences on Northeast Brazil**. Mon. Wea. Rev., v. 107, p. 1140-1153. 1979.

KOUSKY, V.E. **Diurnal rainfall variations in Northeast Brazil**. Monthly Weather Review, Stockholm, Sweden, v.108, n. 4, p 488-498, 1980.

KOUSKY, V. E., and M. A. GAN. **Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic**. Tellus, 33, 538-551., 1981

MARTI, L., DOMMEL, H., **Calculation of Voltage Profiles Along Transmission Lines**, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 12, nº 2, April, 1997.

MATTOS, M.A.F., **Simulação Numérica do Líder Passado**, Internacional Conferenc on Grounding and Earthing & 1<sup>st</sup> Internacional Conference on Lightning Physics and Effects, Belo Horizonte, Novembro, 2004.

MELLO, N. G. S., SAKAMOTO, M. S., TORSANI, J. A., **Estudo de Caso de um Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM) Observado no Nordeste do Brasil**. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, Campos de Jordão - SP, v. 2, p. 887-890, novembro, 1996.

MOURA, A. D., SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: observations, theory, and numerical experiments with a general circulation model. **J. Atmos. Sci.**, 38, p. 2653-2675. 1981.

NIEUWOLT, S. **Tropical Climatology**. New York: John Wiley & Sons, 1978. 207p.

OLIVEIRA, A.S. **Interações entre sistemas frontais na América do Sul e a convecção da Amazônia**. Dissertação de Mestrado (PI INPE 4008 - TDL 239) - INPE. São José dos Campos, 246 p., 1986.

OLIVEIRA, G.S. **O El Niño e Você – O Fenômeno Climático**. Editora Transtec. São José dos Campos – SP, março, 2001.

PEREIRA, M.P., **Sobretensões Transitórias devido a descargas atmosféricas em estruturas com dois circuitos de tensões diferentes**. Furnas Centrais Elétricas S.A., 2001.

PHILANDER, S. G. H.. **Ocean-atmosphere interactions in the tropics**. In *Modelling Oceanic Climate Interactions*, NATO ASI Series I, Vol. 11, Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 35-65, 1993.

PIANTINI, A., OHARA, T., JANISZEWSKI, J.M., RONCOLATTO, R.A., **Estudos Preliminares para Implantação de Sistema de Aquisição de Dados de Descargas Atmosféricas e de Tensões Induzidas em LD's**. 2000.

PINTO JR., O.; PINTO, I.R.C.A.; GIN, R.B.B.; MENDES JR., O. **A coordinated study of a storm system over the south american continent 1. weather information and quasi-dc stratospheric electric field data**. Journal of Geophysical Research, 97 (D16) : 18195-18204, 1992.

PINTO JR., O.; GIN, R.B.B.; PINTO, I.R.C.A.; MENDES Jr., O. **Cloud-to-ground lightning characteristics in the Southeastern Brazil during the 1992-93 summer season**. Journal of Geophysical Research, 101 (D23): 29627-29635, 1996.

PINTO JR. O. **A Arte da Guerra Contra os Raios**. Ed. Oficina de Textos, 2005.

PREISENDORFER, R., **Principal Component Analysis in Meteorology and Oceanography**, Amsterdam: Elsevier, p. 425, 1988.

RAMOS, S.D., DIAS, E.M. **Sistemas Elétricos de Potência: Regime Permanente volume 1**. Editora Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro., 1982.

ROCHA A. da C.O., FRANCO, J.L. de., CARMO, L.S. do., CHERCHIGLIA, L.C.L., **Aplicação de Pára-raios para a melhoria do desempenho de linhas de transmissão de 230 kV**. XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE Campina - São Paulo, 2001.

ROCHA, A.da C. O., OLIVEIRA, J.F. de, **Análise da Ocorrência de um Curto-Circuito Trifásico Devido à Descarga Atmosférica no Sistema de Extra-Alta Tensão da CEMIG.**, 2001

RODRIGUES M.G., PORTELA C. **Influência da Orografia de uma Região na Distribuição de Descargas Atmosféricas**. XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE Campina - São Paulo, 2001.

SCHOROEDER, M.A.O. **Modelo Eletromagnético para Descontaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas**; Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Março, 2001.

SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F.; ARAÚJO, H. A. **Characteristic of C-Band meteorological radar echoes at Petrolina, Northeast Brazil**. International Journal of Climatology, v.20, p. 279-298, 2000.

SILVA da S.P, GONÇALVES J., FRANCO J.L. de, PIANTINI A. **Estudo de Desempenho de Redes de Distribuição Frente a Descargas Atmosféricas**. II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2003.

STRANG, D.M.G. **Análise Climatológica pluviométrica do Nordeste brasileiro**. São José dos Campos: Centro Técnico Aeroespacial – CTA, 1992. 70p (Relatório IAE-M-02/72).

TAKARANOV, G.G. **Tropical Meteorology**. URSS: Moscou: Mir, 1966. 150p.

TRENBERTH, K.E., 1997, **The definition of El Niño**: Bulletin of the American Meteorological Society, v. 78, p. 2271-2777.

UMAN, M.A. **All about lightning**. New York, Dover, 1987.

UVO, C. B. **A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação na Região Norte do Nordeste Brasileiro**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, INPE. São José dos Campos, SP. 1989.

VARAJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Brasília: INMET, 2001.

VITORINO, M.I., SILVA, M.E.S., ALVES, J.M.B. **Classificação de Sistemas Convectivos de Mesoescala no Setor Norte do Nordeste Brasileiro**. Revista Brasileira de Meteorologia, v.12, n.1, 21-32, 1997.

VOLLAND, H. **Quase electrostatic fields within the atmosphere**. In: \_\_\_\_\_, ed. Handbook of atmospheric. Florida, CA, CRC, 1982, v.1.

WEARE, B. C., NASSTROM, J. S. Examples of Extended Empirical Orthogonal Function Analyses. **Monthly Weather Review**, v. 110, p- 481-678, 1982.

WRONSKI, V.R., NASSAR, S.M., COELHO, J., GAUCHE, E., QUEIRÓS, H., LIMA, M. de, LOURENÇO, C. **Metodologias para Identificar Associação entre Padrões Climáticos e Qualidade de Fornecimento de Energia Elétrica**. V SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, 17 a 20 de Agosto. Aracajú – Sergipe, 2003.

WILKS, S. D. **Statistical Methods in the atmospheric Sciences**, London: Academic Press, 1995. p. 474.

YAMAZAKI, Y., and Rao, V.B., 1977: **Tropical cloudiness over the South Atlantic Ocean**. J. Meteor. Soc. Japan, 55, 205-207.

ZANETTA, Jr. L.C., PEREIRA, C.E. de M., **Avaliação de solicitações de energias em pára-raios de linhas de transmissão**. XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE Campina - São Paulo, 2001.