

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**DIEGO SIMÕES FERNANDES**

**Caracterização das Tempestades a partir dos canais  
Infravermelho e Vapor d'água do Satélite GOES 10 e 12**

**São Paulo  
2010**



DIEGO SIMÕES FERNANDES

**Caracterização das Tempestades a partir dos canais  
Infravermelho e Vapor d'água do Satélite GOES 10 e 12**

Dissertação apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências Atmosféricas.

Orientador: Carlos Augusto Morales Rodriguez

São Paulo  
2010

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

Diego Simões Fernandes

Caracterização das Tempestades a partir dos canais Infravermelho e Vapor d'água do Satélite GOES 10 e 12.

Dissertação apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências Atmosféricas.

Aprovado em:

Banca examinadora

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

*Dedico este trabalho aos meus pais, Rosemary e João Carlos, que sempre acreditaram e incentivaram minha escolha pela carreira de meteorologista e que sempre investiram em minha educação, ao meu irmão Rodrigo, pela amizade e o carinho que dedicou mesmo à distância.*

*Fácil é o caminho da sabedoria para aqueles não cegos por si mesmos*

*(desconhecido)*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Augusto Morales Rodriguez pela proposta, e o apoio necessário para o desenvolvimento desta pesquisa, dedicando parte de seu tempo a este trabalho.

Aos grandes amigos Ivan Saraiva, João Ricardo Neves e Luiz Fernando Kruger pelas discussões e ajudas que me deram em momentos difíceis no decorrer desta pesquisa.

Ao meu primo Éder Uria pela ajuda no redesenho de algumas figuras apresentadas na revisão bibliográfica.

Aos novos amigos e amizades que se fortaleceram na USP Maria Custódio, Tatiane Reis, Débora Brum, Mário Quadro, Rubinei Dorneles, Maurício Ferreira, Marta Llopert, Saulo Barros, Carol Mazzoli, Edimilson Freitas, Vanessa Silveira, Taciana Toledo, Roger Delavi, José Felipe e Monica Queiroz pelos momentos de descontração vividos em São Paulo.

Aos professores que me deram os conhecimentos necessários para o desenvolvimento desta pesquisa Márcia Akemi Yamasoe, Rosmeri Porfírio da Rocha, Adilson Wagner Gandú, Leila Maria Véspoli de Carvalho e Ricardo de Camargo.

Ao Laboratório STORM-T pela disponibilização da infra-estrutura computacional e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro durante o desenvolvimento deste trabalho.

E por fim aos colegas do Sistema de Meteorologia e Hidrologia do Estado de Goiás e ao Dr. Alexandre Bryan Heinemann da Embrapa pelo apoio e compreensão nos momentos de ausência para o término desta pesquisa.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>XXI</b>
<b>LISTA DE SIGLAS.....</b>	<b>XXII</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>XXIV</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XXVI</b>
<b>1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....</b>	<b>28</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>30</b>
2.1. Sistemas Convectivos .....	30
2.1.1. Formação de uma Célula de Tempestade .....	33
2.1.2. Técnicas de Rastreamento de Sistemas Convectivos .....	35
2.2. Estrutura Elétrica das Nuvens de Tempestades .....	37
2.2.1 Teorias de Eletrização das Nuvens de Tempestades .....	39
2.2.1.1. Teorias da Precipitação .....	39
2.2.1.1.1. Mecanismo Indutivo .....	39
2.2.1.1.2. Mecanismo Não-Indutivo .....	40
2.2.2.2. Teoria da Convecção .....	42
2.2.2. Relâmpagos.....	43
2.2.2.1. Tipos de Relâmpagos .....	44
2.2.3 Diferenças entre as Temperatura de Brilho dos Canais Infravermelho (IR) e Vapor d'água (WV) .....	45
<b>3 MECANISMOS FORMADORES DE TEMPESTADES NO SUDESTE DA AMÉRICA DO SUL .....</b>	<b>48</b>
3.1. Convecção Local.....	48
3.2. Sistemas Frontais .....	48
3.3. Zona de Convergência do Atlântico Sul .....	51

3.4.	Brisa Marítima/Terrestre e Vale/Montanha .....	53
<b>4</b>	<b>IMAGENS DO SATÉLITE GOES .....</b>	<b>56</b>
4.1.	Características das Imagens do canal Infravermelho.....	59
4.2.	Características das Imagens do canal de Vapor d'água .....	60
<b>5</b>	<b>DETECÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....</b>	<b>61</b>
5.1.	Método de Tempo de Chegada.....	62
5.2.	Método de Direção do Campo Magnético .....	64
<b>6</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>66</b>
6.1.	Controle da Qualidade dos dados de Satélite .....	66
6.2.	Rastreamento de Sistemas Convectivos .....	67
6.2.1.	Definindo Limiares de Temperaturas para Classificação dos Sistemas Convectivos .....	68
6.2.2.	Propriedades Físicas dos Sistemas Convectivos.....	69
6.2.3.	Método de Acompanhamento dos Sistemas Convectivos .....	71
6.2.4.	Taxa de Expansão Normalizada dos Sistemas Convectivos .....	74
6.3.	Diferença das Temperaturas de Brilho dos canais IR e WV integrados com dados de Descargas Atmosféricas .....	75
<b>7</b>	<b>ANÁLISE DAS DIFERENÇAS DE PROPRIEDADES FÍSICAS DE SC QUE APRESENTARAM DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E SC SEM DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....</b>	<b>77</b>
7.1.	Classificação dos Sistemas Convectivos .....	77
7.2.	Caracterização do Ciclo Diurno de Nascimentos dos Sistemas Convectivos.....	80
7.3.	Parâmetros Físicos dos Sistemas Convectivos .....	83
7.3.1.	Tamanho .....	83
7.3.2.	Taxa de Expansão .....	85
7.3.3.	Temperatura Mínima.....	89
7.3.4.	Excentricidade.....	96
7.4.	Análise do Ciclo de Vida dos Sistemas Convectivos .....	102

7.4.1.	Evolução dos Tamanhos Durante o Ciclo de Vida .....	102
7.4.2.	Caracterização do Tempo de Vida.....	107
7.5.	Direção de Propagação dos Sistemas Convectivos.....	111
7.6.	Descargas Atmosféricas .....	117
7.6.1.	Análises das Densidades das Descargas Atmosféricas .....	118
7.6.2.	Distribuição Espacial das Densidades de Raios .....	121
<b>8</b>	<b>ANÁLISE DAS DIFERENÇAS DAS TEMPERATURAS DE BRILHO DOS CANAIS DE VAPOR'ÁGUA E INFRAVERMELHO DO SATÉLITE GOES .....</b>	<b>124</b>
8.1.	Distribuição de Temperaturas na Fase Inicial .....	124
8.2.	Ciclo de Vida .....	130
8.3.	Distribuição das Temperaturas em Função da Densidade de Raios .....	146
<b>9</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>151</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>154</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Sistemas Convectivos em imagens realçadas de satélite. (a) Linha de Instabilidade; (b) Complexo Convectivo de Mesoescala; (c) Sistemas Convectivos Alongados Persistentes.....	33
Figura 2.2 – Representação dos estágios do ciclo de vida de uma nuvem Cumulonimbus. (a) estágio inicial; (b) estágio maduro e (c) estágio de dissipação .....	35
Figura 2.3 – Estruturas elétricas de nuvens de tempestade. (a) Modelo de Tripolo; (b) Modelo e Dipolo.....	38
Figura 2.4 – Representação do processo colisional indutivo de separação de cargas. (a) antes da colisão, (b) após a colisão.....	40
Figura 2.5 – Representação do processo colisional não-indutivo de separação de cargas .....	42
Figura 2.6 – (a) Desenvolvimento do centro de cargas negativas na parte mais baixa da nuvem por meio do processo convectivo .....	43
Figura 2.7 – Representação dos tipos de descargas atmosféricas .....	44
Figura 2.8 – Tipos de relâmpagos que ocorrem entre nuvens e solo. (a) NS positivo; (b) NS negativo; (c) SN positivo; (d) SN negativo .....	45
Figura 3.1 – Composição de Sistema Frontal em consequência do encontro de duas massas de ar com propriedades distintas.....	49

Figura 3.2 – Banda continua de nuvens formando um Sistema Frontal observado no dia 16/01/2008 .....	50
Figura 3.3 – Ilustração da Zona de Convergência do Atlântico Sul em uma imagem infravermelho o qual foi observada a partir do dia 05/12/2009.....	51
Figura 3.4 – Região geográfica de atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul.....	52
Figura 3.5 – Representação esquemática da brisa. (a) Marítima; (b) Terrestre .....	53
Figura 3.6 – Representação esquemática de brisa. (a) Vale; (b) Montanha. ....	55
Figura 4.1 – Região em que foi realizado o rastreamento dos sistemas convectivos ....	57
Figura 5.1 – Localização dos 24 sensores operantes que compõem a RINDAT .....	62
Figura 5.2 – Método TOA com intersecção hiperbólica para localização da descarga utilizando três sensores. ....	63
Figura 5.3 – Método TOA com intersecção circular para localização da descarga utilizando quatro sensores. ....	64
Figura 5.4 – Método MDF para uma ótima determinação de localização da descarga..	65
Figura 5.5 – Método ALDF aplicado a uma descarga com o ponto de impacto localizado sobre a linha base de dois sensores.....	65
Figura 6.1 – Imagens de satélite que apresentaram erros. (a) mais de 10% da imagem com ruído; (b) imagem que apresentavam um ruído em forma de “chuvisco”.....	67

Figura 6.2 – Representação esquemática do ciclo de vida de um Sistema Convectivo .....	68
Figura 6.3 – Método de identificação e acompanhamento dos Sistemas Convectivos. (a) Novo; (b) Continuidade; (c) Separável e (d) Fusão .....	73
Figura 6.4 – Variação da área com o tempo de vida total do SC. Valores positivos/negativos indicam crescimento/decaimento do SC .....	75
Figura 7.1 – Número de famílias de sistemas convectivos distribuídos mensalmente para os 3 anos e 6 meses de dados analisados. ....	78
Figura 7.2 – Número de famílias de sistemas convectivos distribuídos mensalmente. (a) SC Novos ou de geração espontânea; (b) SC que Continuaram em imagens sucessivas; (c) SC que se Separaram em imagens sucessivas e (d) SC que se fundiram em imagens sucessivas .....	80
Figura 7.3 – Distribuição horária da freqüência relativa de nascimentos de SC novos rastreados pelo FORTRACC para todo período de estudo que não se tornaram tempestades. (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera.....	81
Figura 7.4 – Distribuição horária da freqüência relativa de nascimentos de SC novos rastreados pelo FORTRACC para todo período de estudo que se tornaram tempestades. (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera .....	83
Figura 7.5 – Freqüência Relativa dos tamanhos máximos dos SC (km) divididos sazonalmente para SC que se tornaram tempestades (barra vermelha) e SC que não se tornaram tempestades (barra azul). (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera.....	85

Figura 7.6 – Variação da Taxa de Expansão em função do ciclo de vida normalizado para Sistemas Convectivos com diferentes intervalos de tempo de vida. (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera.....	87
Figura 7.7 – Freqüência Relativa da área de expansão dos sistemas. (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera .....	89
Figura 7.8 – Freqüência relativa da temperatura mínima dos SC que se tornaram tempestades (vermelho) e que não se tornaram tempestades (azul) para as estações do ano. Verão (a,b); Outono (c,d); Inverno (e,f); Primavera (g,h) .....	91
Figura 7.9 – Evolução temporal das temperaturas mínimas para SC que se tornaram tempestades (linha vermelha) e SC que não se tornaram tempestades (linha azul). (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera.....	93
Figura 7.10 – Distribuição do número médio de raios em função da temperatura mínima para os meses de verão.....	94
Figura 7.11 – Distribuição do número total de raios em função da temperatura mínima para os meses de outono .....	95
Figura 7.12 – Distribuição do número médio de raios em função da temperatura mínima para os meses inverno. ....	96
Figura 7.13 – Distribuição do número médio de raios em função da temperatura mínima para os meses primavera.....	96
Figura 7.14 – Freqüência relativa das excentricidades dos SC que se tornaram tempestades (linha vermelha) e para os SC que não se tornaram tempestade (linha azul). (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera .....	98

Figura 7.15 – Distribuição do número médio de raios em função da excentricidade para os meses de verão.....	99
Figura 7.16 – Distribuição do número médio de raios em função da excentricidade para os meses de outono.....	100
Figura 7.17 – Distribuição do número médio de raios em função da excentricidade para os meses de inverno.....	101
Figura 7.18 – Distribuição do número médio de raios em função da excentricidade para os meses da primavera.....	101
Figura 7.19 – Variação média do Raio efetivo dos SC em função do tempo de vida normalizado para SC que se tornaram tempestade (linha vermelha) e SC que não se tornaram tempestade (linha azul) para a estação de verão .....	103
Figura 7.20 – Variação média do Raio efetivo dos SC em função do tempo de vida normalizado para SC que se tornaram tempestade (linha vermelha) e SC que não se tornaram tempestade (linha azul) para a estação de outono .....	104
Figura 7.21 – Variação média do Raio efetivo dos SC em função do tempo de vida normalizado para SC que se tornaram tempestade (linha vermelha) e SC que não se tornaram tempestade (linha azul) para a estação de inverno.....	105
Figura 7.22 – Variação média do Raio efetivo dos SC em função do tempo de vida normalizado para SC que se tornaram tempestade (linha vermelha) e SC que não se tornaram tempestade (linha azul) para a estação de primavera .....	106

Figura 7.23 – Distribuição do número total de raios em função tempo de vida dos SC para os meses de verão.....	108
Figura 7.24 – Distribuição do número total de raios em função tempo de vida dos SC para os meses de outono.....	109
Figura 7.25 – Distribuição do número total de raios em função tempo de vida dos SC para os meses de inverno.....	109
Figura 7.26 – Distribuição do número médio de raios em função tempo de vida dos SC para os meses de inverno.....	110
Figura 7.27 – Freqüência Relativa da direção de propagação dos SC que se tornaram tempestades (linha vermelha) e SC que não se tornaram tempestades (linha azul), divididas em intervalos de tempo de vida, para a estação de verão .....	113
Figura 7.28 – Freqüência Relativa da direção de propagação dos SC que se tornaram tempestades (linha vermelha) e SC que não se tornaram tempestades (linha azul), divididas em intervalos de tempo de vida, para a estação de outono .....	114
Figura 7.29 – Freqüência Relativa da direção de propagação dos SC que se tornaram tempestades (linha vermelha) e SC que não se tornaram tempestades (linha azul), divididas em intervalos de tempo de vida, para a estação de inverno .....	115
Figura 7.30 – Freqüência Relativa da direção de propagação dos SC que se tornaram tempestades (linha vermelha) e SC que não se tornaram tempestades	

(linha azul), divididas em intervalos de tempo de vida, para a estação de primavera.....	116
Figura 7.31 – Freqüência de ocorrência de descargas atmosféricas. (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera.....	118
Figura 7.32 – Freqüência da Densidade de Descargas Atmosféricas, divididas em intervalos de tempo de vida dos SC (1 - 2, 2 - 4 e 4 - 8 horas). (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera.....	119
Figura 7.33 – Freqüência da Densidade de Descargas Atmosféricas, divididas em intervalos de tempo de vida dos SC (0 - 20, 20 - 40 e > 40 km). (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera.....	120
Figura 7.34 – Distribuição espacial das densidades das descargas atmosféricas observadas no período estudado. (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera .....	122
Figura 7.35 – Topografia da região de estudo.....	123
Figura 8.1 – Estação de verão. (a) Fração da nuvem em função da Temperatura de Brilho; (b) Fração da nuvem em função das diferenças de temperatura de brilho dos canais WV-IR. ....	125
Figura 8.2 – Estação de outono. (a) Fração da nuvem em função da Temperatura de Brilho; (b) Fração da nuvem em função das diferenças de temperatura de brilho dos canais WV-IR. ....	126

Figura 8.3 – Estação de inverno. (a) Fração da nuvem em função da Temperatura de Brilho; (b) Fração da nuvem em função das diferenças de temperatura de brilho dos canais WV-IR.....	128
Figura 8.4 – Estação de primavera. (a) Fração da nuvem em função da Temperatura de Brilho; (b) Fração da nuvem em função das diferenças de temperatura de brilho dos canais WV-IR.....	129
Figura 8.5 – Fração dos Sistemas Convectivos que não se tornaram tempestades para a estação de verão dívidas em intervalos de durações máximas de 1-2, 2-4 e 4-8 horas. (a) em função da temperatura de Brilho, (b) em função da diferença das temperaturas de brilho dos canais WV-IR .....	132
Figura 8.6 – Fração dos Sistemas Convectivos que se tornaram tempestades para a estação de verão dívidas em intervalos de durações máximas de 1-2, 2-4 e 4-8 horas. (a) em função da temperatura de Brilho, (b) em função da diferença das temperaturas de brilho dos canais WV-IR.....	133
Figura 8.7 – Fração dos Sistemas Convectivos que não se tornaram tempestades para a estação de outono dívidas em intervalos de durações máximas de 1-2, 2-4 e 4-8 horas. (a) em função da temperatura de Brilho, (b) em função da diferença das temperaturas de brilho dos canais WV-IR. ....	136
Figura 8.8 – Fração dos Sistemas Convectivos que se tornaram tempestades para a estação de outono dívidas em intervalos de durações máximas de 1-2, 2-4 e 4-8 horas. (a) em função da temperatura de Brilho, (b) em função da diferença das temperaturas de brilho dos canais WV-IR.....	137

Figura 8.9 – Fração dos Sistemas Convectivos que não se tornaram tempestades para a estação de inverno dívidas em intervalos de durações máximas de 1-2, 2-4 e 4-8 horas. (a) em função da temperatura de Brilho, (b) em função da diferença das temperaturas de brilho dos canais WV-IR .....	140
Figura 8.10 – Fração dos Sistemas Convectivos que se tornaram tempestades para a estação de inverno dívidas em intervalos de durações máximas de 1-2, 2-4 e 4-8 horas. (a) em função da temperatura de Brilho, (b) em função da diferença das temperaturas de brilho dos canais WV-IR .....	141
Figura 8.11 – Fração dos Sistemas Convectivos que não se tornaram tempestades para a estação de primavera dívidas em intervalos de durações máximas de 1-2, 2-4 e 4-8 horas. (a) em função da temperatura de Brilho, (b) em função da diferença das temperaturas de brilho dos canais WV-IR .....	144
Figura 8.12 – Fração dos Sistemas Convectivos que se tornaram tempestades para a estação de primavera dívidas em intervalos de durações máximas de 1-2, 2-4 e 4-8 horas. (a) em função da temperatura de Brilho, (b) em função da diferença das temperaturas de brilho dos canais WV-IR .....	145
Figura 8.13 – Freqüência relativa média dos pixels em que foram observados descargas atmosféricas em função das diferenças das temperaturas de brilho das imagens dos canais WV e IR. (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera .....	148

Figura 8.14 – Freqüência relativa acumulada dos pixels que foram observados a ocorrência de descargas atmosféricas em função das diferenças das temperaturas de brilho das imagens dos canais WV e IR. (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera ..... 150

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 - Características físicas e morfológicas de um CCM .....	32
Tabela 4.1 – Principais características dos canais espectrais disponíveis nos satélites GOES 12 e GOES 10 .....	56
Tabela 6.1 – Valores dos limiares utilizados para detecção e rastreio de Sistemas Convectivos pelo FORTRACC em graus Kelvin. ....	69
Tabela 7.1 – Freqüência relativa da ocorrência das famílias de SC, por estação do ano, rastreados pelo FORTRACC durante o período de estudo.....	79

## LISTA DE SIGLAS

Ae	Área de Expansão
ALDF	Advanced Lighting Direction Finder
ATD	Arrived Time Diference
Cb	Cumulonimbus
CC	Célula Convectiva
CCM	Complexo Convectivo de Mesoescala
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
Ci	Cirrus
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
DJF	Dezembro, Janeiro, Fevereiro
DSA	Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais
ECCE	Excentricidade
EM	Entre - Nuvens
FC	Fração Convectiva
FORTRACC	Forecast and Tracking of Active Convective Cells
FURNAS	Furnas Centrais Elétricas
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellites
IMPACT	Improved Performance from Combined Technology
IN	Intra-Nuvem
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IR	Infravermelho
JJA	Junho, Julho, Agosto
LF	Low Frequency
LI	Linha de Instabilidade
LPATS	Lightning Positioning and Tracking System
LWC	Conteúdo de Água Líquida
MAM	Março, Abril, Maio
MDF	Magnetic Direction Finder
NA	Nuvem-Ar
NMR	Número Médio de Raios

NS	Nuvem-Solo
PECS	Sistemas Convectivos Alongados Persistentes
Re	Raio Efetivo
RINDAT	Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SC	Sistema Convectivo
SCM	Sistema Convectivo de Mesoescala
SF	Sistema Frontal
SIMEPAR	Sistema Meteorológico do Paraná
SN	Solo-Nuvem
SON	Setembro, Outubro, Novembro
St	Stratus
STARNET	Sferics Timing And Ranging Network
Tb	Temperatura de Brilho
TI	Temperatura de Inversão
Tmin	Temperatura Mínima
TOA	Time of Arrival
tv	Tempo de Vida
VLF	Very Low Frequency
WV	Vapor d'água
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

## RESUMO

O conhecimento das diferenças entre as propriedades físicas dos Sistemas Convectivos que se tornam tempestades e Sistemas Convectivos que não se tornaram é de suma importância para a previsão da ocorrência destas tempestades. A previsão destes eventos é fundamental para que os prejuízos socioeconômicos sejam minimizados. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é caracterizar as diferenças entre estes dois tipos de sistemas (com e sem tempestades). Para tanto, dados do satélite geoestacionário GOES e dados de descargas atmosféricas registrados por sensores na superfície foram utilizados. Essa base de dados correspondeu a um período de mais de 3 anos (entre dezembro de 2005 e maio de 2009). A análise dos resultados revelou que os Sistemas Convectivos que se tornam tempestades têm um pico de ocorrência às 17 TMG para os meses de verão, outono e primavera. Nos meses de inverno, um horário preferencial para o “nascimento” destes Sistemas Convectivos não foi observado. Analisando os parâmetros morfológicos e radiativos dos Sistemas Convectivos, observou-se que os sistemas apresentam diferenças nas propriedades quando é identificada atividade elétrica. Os tamanhos médios dos Sistemas Convectivos que se tornam tempestades foram sempre maiores durante todo o ciclo de vida destes sistemas. As diferenças de temperaturas de brilho entre os canais de vapor d’água e infravermelho revelaram que as frações das nuvens de sistemas com raios foram maiores quanto menor a diferença entre as temperaturas dos canais (WV-IR). Foi observado que o número de ocorrência de raios foi maior quanto menor as

diferenças das temperaturas dos canais WV e IR. Os resultados obtidos neste trabalho avaliaram as propriedades físicas dos Sistemas Convectivos (com tempestades) para que dessa maneira, essas informações possam ser utilizadas para melhorar a previsão de tempestades severas.

## ABSTRACT

The knowledge of differences between the physical properties of Convective Systems that become storms and Convective Systems that had not become storms is important to forecast of the occurrence of these storms. The forecast of those events is of main importance to minimize social and economical damages. In this context, this project main goal is to characterize the differences between two types of systems (with and without storms). With this purpose, data from the geostationary satellite GOES and from atmospheric discharges registered by sensors (surface mesuarements) were used. These database corresponded to a period of more than 3 years (between December of 2005 and May of 2009). The results analysis showed that Convective Systems that become storms have a peak of occurrence at 17 GMT during summer, autumn and spring months. During winter months, a preferential schedule to these Convective Systems “births” was not observed. Analyzing morphologic and radioactive parameters of the Convective Systems was possible to observe that the systems properties present differences when electric activity is identified. The average sizes of the Convective Systems that become storms were always larger during the these systems whole life cycle. The differences of bright temperatures of Water Vapor and Infra-Red channels revealed that fractions of clouds of systems with lightning were higher as smaller was the difference between the channels temperatures (WV-IR). It was observed that the number of occurrence of lightning was higher as smaller the differences between WV and IR temperatures are. This work results evaluated physical

properties of Convective Systems (with storms), so these information can be used to improve severe storm forecasts.

## 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Com o surgimento dos satélites geoestacionários foi possível realizar o monitoramento dos fenômenos nebulosos atuantes na atmosfera terrestre. Um dos principais fenômenos de fácil observação são os Sistemas Convectivos que são compostos de nuvens convectivas profundas. Técnicas de rastreamento destes sistemas foram surgindo a partir da década de 80 com o trabalho pioneiro de Woodley et al. (1980) o qual acompanhava o deslocamento e o ciclo de vida das nuvens convectivas observadas. Estas técnicas foram aprimoradas e se tornando de forma operacional como o FORTRACC que está operacional na Divisão de Sistemas e Satélites Ambientais do Centro de Pesquisas do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DSA/CPTEC/INPE).

Os Sistemas Convectivos sendo rastreados e acompanhados se torna factível criar um banco de dados com os registros históricos do acompanhamento destes sistemas podendo, estes sistemas, separados em SC que se tornam tempestades e SC que não se tornam tempestades. Para isso se faz necessária a integração dos dados de descargas atmosféricas, obtidas por sensores de descargas no solo, com as informações de dados de satélite guardadas no banco de dados com as informações dos sistemas registrados por uma técnica de rastreamento.

A integração de ambos os dados (satélite e sensores de descargas) possibilita observar algumas diferenças entre as propriedades morfológicas e radiativas dos SC e, essas diferenças, foi o que se buscou conhecer neste trabalho.

Alguns estudos como o de Kurino (1997) e Lima et al. (2006) sugerem que diferenças positivas entre os canais de vapor d'água e o infravermelho estão relacionadas com topes de nuvens com grande profundidade vertical, essas nuvens são conhecidas como nuvens “penetrativas” devido o seu topo penetrar a tropopausa fazendo com que seja injetada umidade na estratosfera. Neste trabalho essas diferenças entre os canais também são analisadas para a região de estudo (Sudeste da América do Sul).

O estudo das tempestades é de grande importância para vários setores da sociedade, pois muitas vezes são responsáveis por interrupções na

distribuição de energia devido à incidência de descargas atmosféricas, além de provocar incêndios e ocasionar a morte de pessoas. Segundo o Grupo de Eletricidade do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (ELAT/INPE) nos últimos 10 anos foram registradas 1321 mortes de pessoas por causa de descarga atmosférica. Alguns pesquisadores estudando os efeitos do aumento da temperatura no planeta concluíram que o aumento de um grau na temperatura global faz com que se tenha um aumento entre 10 e 20% nas descargas.

## **Objetivo**

O principal objetivo deste trabalho foi caracterizar as diferenças entre as propriedades físicas das nuvens convectivas que se tornaram tempestades daquelas nuvens que não se tornaram tempestades. Para este objetivo ser alcançado se seguiu algumas etapas com objetivos específicos como:

- 1) Analisar os parâmetros morfológicos entre os Sistemas Convectivos que tiveram a presença de pelo menos uma descarga atmosférica (tempestades) e os SC que não se tornaram tempestades.
- 2) Avaliar as possíveis diferenças encontradas nos parâmetros morfológicos e radiativos durante o ciclo de vida dos sistemas.
- 3) Verificar para a região de estudo as diferenças entre as temperaturas de brilho dos canais de vapor d'água e Infravermelho em nuvens que tiveram a presença de descargas atmosféricas (tempestades) e aquelas que não se tornaram tempestades.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão discutidos os conceitos de como são formadas as tempestades, técnicas para o rastreamento e acompanhamento dos Sistemas convectivos, processos de eletrificação de nuvens, formação e tipos de relâmpagos e como se comportam os Sistemas Convectivos quando são observadas diferenças positivas entre os canais de vapor d'água e infravermelho. Esta revisão se faz necessária para melhor compreender os resultados obtidos nos capítulos 7 e 8.

### 2.1. Sistemas Convectivos

A formação de precipitação está diretamente associada à liberação de calor latente na atmosfera, que por sua vez é causada pela convecção (Houze, 1977, 1989). Devido a esse fato, vários estudos (Houze & Betts, 1981; Johnson & Houze, 1987; Torres & Nicolini, 2002) têm buscado explicar a estrutura e evolução dos Sistemas Convectivos (SC), no qual são conhecidos por um aglomerado de nuvens cumulonimbus (Cb) que tem como consequência a formação de tempestades isoladas ou organizadas. Segundo Cotton & Anthes (1989) a convecção pode ocorrer desde a pequena escala, em que os SC têm tamanhos menores que 60 km e durações menores que 4 horas com uma distribuição espacial aleatória e onde a instabilidade condicional gerada pelo aquecimento diferencial da superfície desempenha um papel importante no seu desenvolvimento, até SC mais organizados com tamanhos variando de 200 a 2000 km e com tempo de vida variando de várias horas a dias no qual foram observados nos trabalhos de Guedes, (1985) e Velasco & Fritsch (1987).

Segundo Wallace & Hobbs (2006) a convecção que proporciona a formação dos SC podem ser classificadas em Células Convectivas (CC), Supercélulas ou Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM). As CC são constituídas de apenas uma célula que em geral tem um tempo de vida inferior à uma hora. As Supercélulas são sistemas que envolvem grandes células convectivas cuja vida útil é de várias horas. Já os SCM são constituídos por um grande número de CC em diferentes fases do seu ciclo de vida cuja formação

se dá nas bordas das CC anteriores com um intervalo de tempo que varia de 10 a 15 minutos (Houze, 1993). Os SC são classificados em meso- $\gamma$ , que variam de 2 a 20 km de tamanho, meso- $\beta$  para tamanhos que variam de 20 a 200 km e meso- $\alpha$  que são os SCM.

Os SC freqüentemente trazem prejuízos por onde atuam devido à formação de fortes tempestades associadas com granizos, intensas precipitações, descargas atmosféricas e tornados. Mesmo assim, nem sempre sua ocorrência é vista como um desastre, já que em certos locais as precipitações observadas dependem em grande parte de sua ocorrência (Ricarte et al. 2002).

Alguns trabalhos têm explicado a relação de duração e tamanho dos SC (Laurent et al. 2000), no qual encontram uma relação quase-linear para SC nas regiões tropicais.

De acordo com diversos estudos, os SC podem ser classificados pelo seu formato, tamanho e duração. Devido a isso foram criadas nomenclaturas para identificá-los, podendo ser classificados como Linhas de Instabilidade (LI) (Cohen, 1989), Complexos Convectivos de Mesoscala (CCM) (Maddox, 1980) e Sistemas Convectivos Alongados Persistentes (PECS) (Anderson & Arritt, 1998).

Segundo Zipser (1977) as LI (Figura 2.1a) são basicamente um conjunto de nuvens Cb organizadas em forma linear. Seu tempo de vida pode variar de algumas horas até um dia. Freqüentemente aparecem associadas a situações frontais em regiões subtropicais e de latitudes médias (Silva Dias, 1987), embora ocorram no norte do Brasil com deslocamento até a cidade de Manaus, nesse caso a formação se dá pelo efeito das brisas marítimas (Cohen, 1989).

Um tipo de SC bem particular são os CCM (Figura 2.1b), que são aglomerados de nuvens Cb com um formato predominantemente circular e, estão associados à intensa precipitação e fortes rajadas de vento. Para se confirmar a presença de um CCM é necessário respeitar algumas condições (Tabela 2.1) definidas por Maddox (1980). Alguns estudos mostram uma predominância de ocorrência nas estações da primavera e verão. O horário em que é observado se dá normalmente na madrugada. As primeiras CC que precedem o CCM podem começar a se formar no início da tarde e noite. O tempo de vida dos CCM esta entre 10 e 20 horas.

Os CCM tem origem na América do Sul em regiões como o leste dos Andes, em latitudes de 25°S sobre o Paraná, Paraguai e norte/nordeste da Argentina. Alguns estudos (Bonner, 1966; Cavalcanti, 1982) sugerem que a formação nestas localidades se deve pela Brisa vale-montanha como um dos possíveis mecanismos de sua formação.

Tabela 2.1 – Características físicas e morfológicas de um CCM.

Tamanho A	Região com temperaturas de topos $\leq 241$ K cobrindo uma área $\geq 100.000 \text{ km}^2$
Tamanho B	Região com temperaturas de topos $\leq 221$ K cobrindo uma área $\geq 50.000 \text{ km}^2$
Início	Quando as definições de tamanho A e B forem satisfeitas
Duração	Quando as definições de tamanho A e B forem mantidas por um período mínimo $\geq 6$ horas
Extensão	Quando a região definida pelos limiares de temperatura alcançar
Máxima	o tamanho máximo
Forma	Excentricidade $\geq 0,7$ no instante de máxima extensão
Término	Quando as definições de tamanho A e B não forem mais satisfeitas

Fonte: Adaptado de Maddox (1980).

Os PECS (Figura 2.1c) são SC que tem os mesmos tamanhos e tempo de duração dos CCM, mas não satisfaz a principal característica, formato circular. São observados nas mesmas regiões em que são observados os CCM e o tempo médio de duração é de aproximadamente 12 horas.

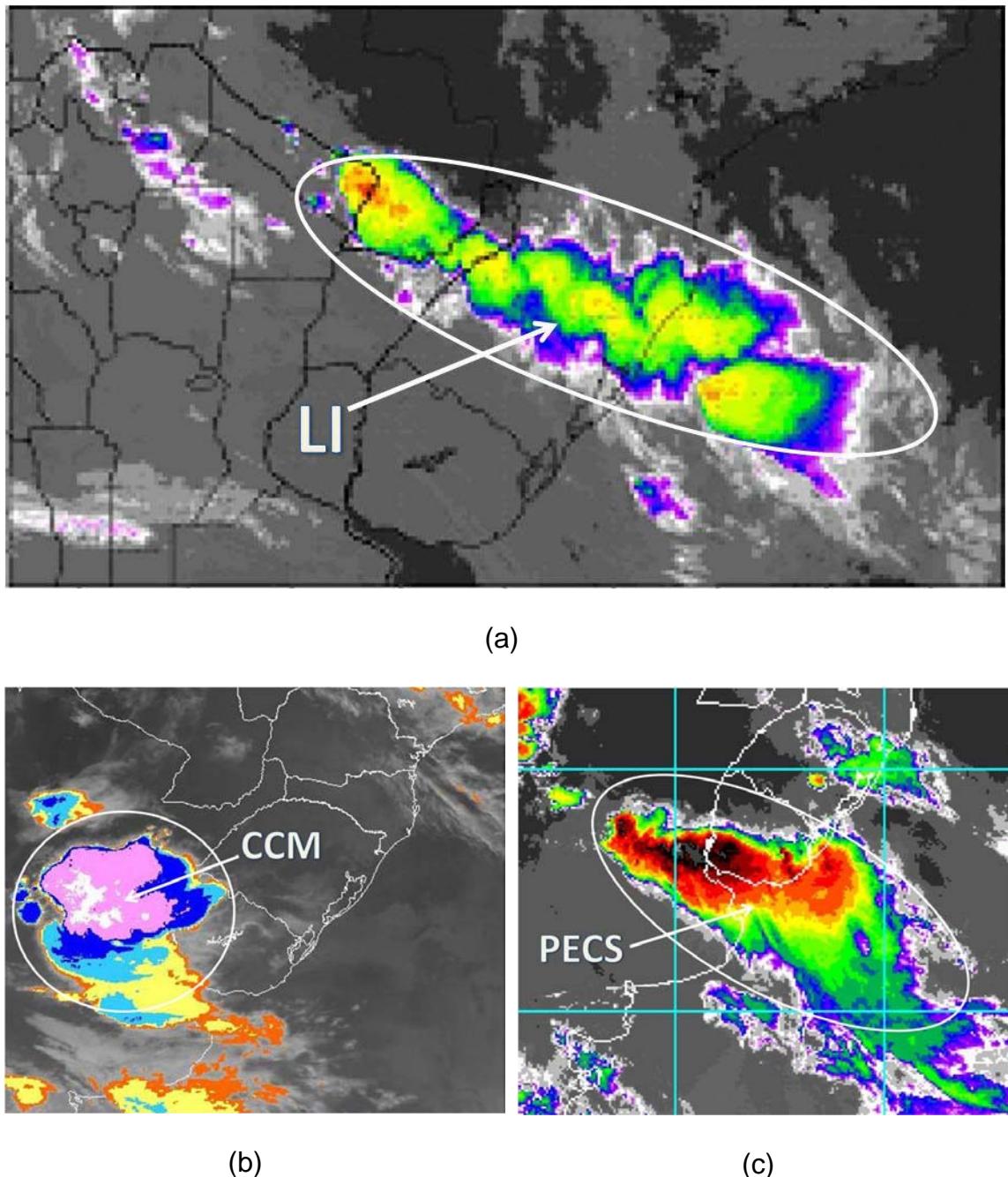


Figura 2.1 – Sistemas Convectivos em imagens realçadas de satélite. (a) Linha de Instabilidade; (b) Complexo Convectivo de Mesoescala; (c) Sistemas Convectivos Alongados Persistentes.

### 2.1.1. Formação de Nuvem de Tempestade

As nuvens cumulus possuem uma espessura maior que as nuvens de tipo stratus (St) e cirrus (Ci) e podem conter gotículas de água e cristais de gelo

quando seu desenvolvimento vertical supera a altitude do nível de congelamento. As nuvens cumulus podem apresentar enorme desenvolvimento vertical e, quando isso ocorre são conhecidas como Cb. Estas nuvens apresentam grande quantidade de vapor d'água e gelo em constante movimento em correntes ascendentes e descendentes o que provoca grande turbulência na região em que está atuando. A presença de uma ou mais nuvens cumulus podem causar a ocorrência de forte turbulência, intensa precipitação, descargas atmosféricas, granizo e tornados. As nuvens cb podem ser identificadas pelas imagens de satélite no canal infravermelho devido às baixas temperaturas dos topo das nuvens (Browning, 1977; Cotton e Anthes, 1989).

Segundo Byers e Braham (1949) e Browning (1977) a base fundamental de uma nuvem cumulus é denominado “célula”, no qual é descrita sendo como uma região com fortes correntes ascendentes. Em seus estudos identificaram três fases na evolução de uma nuvem cumulus: estágio inicial, estágio maduro e estágio de dissipaçāo.

Como ilustrado na figura 2.2a, o estágio inicial é caracterizada por uma ou mais torres de nuvens cumulus que são alimentadas pela convergência de umidade em baixos níveis. Neste estágio a precipitação pode se formar na região superior da nuvem, mas a precipitação formada é insignificante e improvável que ocorra. Nesta fase a nuvem tem um diâmetro que pode chegar a 10 km e sua base pode estar situada em uma altura de 1 km com topo máximo em 8 km.

No estágio maduro (Figura 2.2b) a principal característica são as correntes ascendentes e descendentes. As correntes ascendentes pode se estender através da profundidade vertical da troposfera. A divergência das correntes ascendentes logo abaixo da tropopausa resulta na formação da “bigorna”, característica marcante da nuvem Cb. Próximo a superfície, a divergência das correntes descendentes do ar, resfriada pela evaporação e precipitação, formam a frente de rajada. Chuvas intensas e localizadas são características nessa fase podendo ocorrer à precipitação de granizos. Esta fase tem duração de aproximadamente 30 minutos e sua extensão vertical pode alcançar de 10 a 18 km (Iribarne e Cho, 1980).

O estágio de dissipação ilustrado na Figura 2.2c é caracterizado pelas correntes descendentes da parte mais baixa da nuvem. No entanto, áreas locais de correntes ascendentes podem aparecer principalmente na metade superior da nuvem. Neste estágio é observada precipitação leve, mas constante.

Existem vários estudos para classificar os diferentes tipos de tempestade (Browning, 1977; Weisman & Klemp, 1984; Foote, 1983). Browning (1977) usou o nome “ordinária” para se referir a uma nuvem de tempestade que tem os 3 estágios de evolução, citados anteriormente, em um período de 45 a 60 minutos, sendo que o estágio maduro tenha uma duração de apenas 15 a 30 minutos. Desta maneira foi possível distinguir estas tempestades isoladas de um tipo mais vigoroso da convecção, muitas vezes referida, como “supercélulas”. As tempestades provenientes de supercélulas se distinguem pela grande dimensão das nuvens, onde as correntes ascendentes e descendentes coexistem em períodos de tempo maiores que 30 minutos.

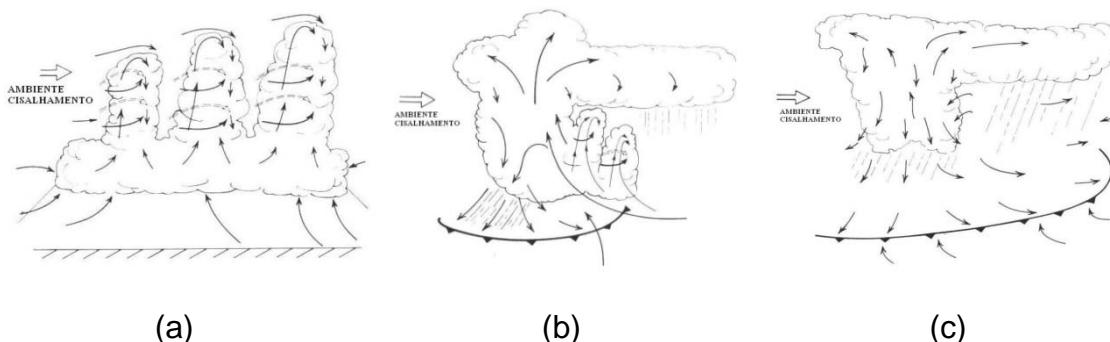


Figura 2.2 - Representação dos estágios do ciclo de vida de uma nuvem Cumulonimbus. (a) estágio inicial; (b) estágio maduro e (c) estágio de dissipação.

Fonte: Adaptado de Cotton & Anthes (1989)

### 2.1.2. Técnicas de Rastreamento de Sistemas Convectivos

Alguns estudos buscam criar métodos e técnicas para identificar os SC e suas características através de imagens de satélite baseando-se nas informações da temperatura de brilho do topo da nebulosidade. Os métodos

existentes para identificar os SC podem ser por um processo semi-automático (Silveira et al. 2006) onde existe a participação de um usuário para tomar algumas decisões, como verificar se o SC que está sendo acompanhado em uma imagem “ $t_{i+1}$ ” realmente é o SC da imagem “ $t_i$ ” ou se tem um candidato melhor para ser seguido, ou também por um processo acompanhamento automático (Woodley et al. 1980; Arnaud et al. 1992; Carvalho & Jones, 2001; Machado et al. 1998; Mathon & Laurent, 2001), onde uma série de rotinas computacionais rastreiam e acompanham os SC durante seu tempo de vida. A seguir são descritas algumas técnicas de rastreamento e acompanhamento de SC automáticas.

O Cb-TRAM (Cumulonimbus TRacking And Monitoring) é uma técnica automática de rastreamento de células convectivas baseada em dados do satélite METEOSAT-8 SEVIRI. O acompanhamento dos SC é feito a partir da sobreposição geográfica entre a detecção do sistema no tempo “ $t_i$ ” e no tempo “ $t_{i+1}$ ”. Esta técnica utiliza um único limiar de temperatura fixado em 218 e 245 K, desta maneira a técnica apresenta alguns problemas para explicar diferentes situações sinóticas e também discriminar sistemas de nuvens convectivas e não convectivas. Segundo Zinner et al. (2008) a ferramenta Cb-TRAM consiste em 4 algoritmos principais. O algoritmo central extrai o campo do vento de duas imagens consecutivas do satélite e descreve o movimento e o desenvolvimento local das nuvens. Após é analisada a detecção dos 3 canais e é feita uma identificação das células padrões com atividade convectiva. O rastreamento e monitoramento conectam os padrões das células detectadas nos diferentes passos de tempo e gera um histórico com informações sobre os padrões detectados. Por fim, a rotina de exibição lê o arquivo gerado e ilustra a informação selecionada, como o padrão de célula existente, seu histórico do rastreamento, ou a posição extrapolada do topo da nuvem de uma imagem de satélite atual.

Outra técnica automatizada é o MASCOTTE (MAximum Spatial CORrelation Tracking TEchnique) que tem como objetivo descrever as propriedades estruturais e a evolução da cobertura das nuvens dos SCM (Carvalho e Jones, 2001). O método é baseado na técnica de máxima correlação espacial, o qual utiliza imagens IR convertida em Temperatura de Brilho como dados de entrada. A técnica MASCOTTE isola, um a um, os

sistemas que preenchem o critério de identificação no tempo “ $t_i$ ” de uma área e correlaciona os SC no “ $t_i$ ” com os possíveis candidatos em uma imagem no tempo “ $t_{i+1}$ ”. O sistema em uma imagem “ $t_{i+1}$ ” representando o valor de máxima correlação sobre um limite mínimo de temperatura é considerado a próxima posição espacial do sistema identificado na imagem no tempo “ $t_i$ ”. Os SC que se sofrem fusão ou Separação entre duas imagens consecutivas são considerado eventos críticos quando se descreve a evolução completa dos SC que também pode ser estimada por esta técnica.

O serviço meteorológico Francês desenvolveu uma metodologia de acompanhamento dos SC conhecido como RDT (Rapid Development Thunderstorm) (Morel, 2001). Esta técnica se baseia em um limiar de temperatura fixo para a detecção dos SC. Esta metodologia de temperatura fixa ocasiona duas situações, quando se utiliza uma temperatura muito fria, a detecção dos SC acontecerá em um estágio mais avançado do ciclo de vida, se for utilizada uma temperatura mais quente ocasionará na detecção de um único sistema que possuiá diferentes células convectivas com diferentes ciclos de vida.

A técnica de rastreamento e acompanhamento de SC utilizada neste trabalho foi o FORTRACC (FORRecast and TRAcking of Cloud Cluster), está técnica vem sendo utilizado de forma operacional na Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (DSA/CPTEC/INPE). Maiores detalhes deste algoritmo são encontradas no item 6.2.

## **2.2. Estrutura Elétrica das Nuvens de Tempestades**

As tempestades são caracterizadas por nuvens que apresentam desenvolvimento vertical acentuado e contem a presença de descargas atmosféricas devido a formação de certos tipos de hidrometeoros congelados e super-resfriados (graupel, granizo e cristais de gelo) que produzem a separação de cargas dentro da nuvem e subsequente aumento do campo elétrico, quando possuem cargas elétricas suficientes, elas são separadas para produzir campos elétricos capazes de quebrar a rigidez dielétrica do ar, o qual

resulta em uma descarga inicial entre dois pontos da mesma nuvem (Wallace & Hobbs, 2006).

Estudos de campo elétrico no interior de nuvens Cb sugeriram um modelo simplificado da estrutura elétrica de nuvens de tempestades conhecida como tripolo eletrostático, ilustrado na Figura 2.3a (Williams, 1989). O modelo tripolar idealiza três centros de cargas sendo dois positivos e um negativo. As magnitudes na parte mais baixa da concentração de cargas negativas e na arte superior das cargas positivas são de aproximadamente 10-100 Coulomb. As cargas negativas que também chamadas de principal centro de carga estão localizadas em um nível de temperatura entre -10°C e -20°C. Os centros de cargas positivas ficam localizados um acima do centro de cargas negativas e o outro fica situado próximo ao nível de 0°C. Segundo Krehbiel et al. (1979) as observações de campo elétrico no solo é dominada pelo centro de carga negativa, e esse centro é a fonte para descargas de relâmpagos Nuvem-Solo negativa.

As nuvens de tempestades nem sempre apresentam a estrutura tripolar ilustrada na Figura 2.3a, muitas vezes o centro de cargas positivas que fica localizado abaixo do centro de cargas negativas pode não estar presente, assim, essa estrutura é conhecida como dipolar positiva (Figura 2.3b) devido ao centro de carga positiva estar situado acima da carga negativa.

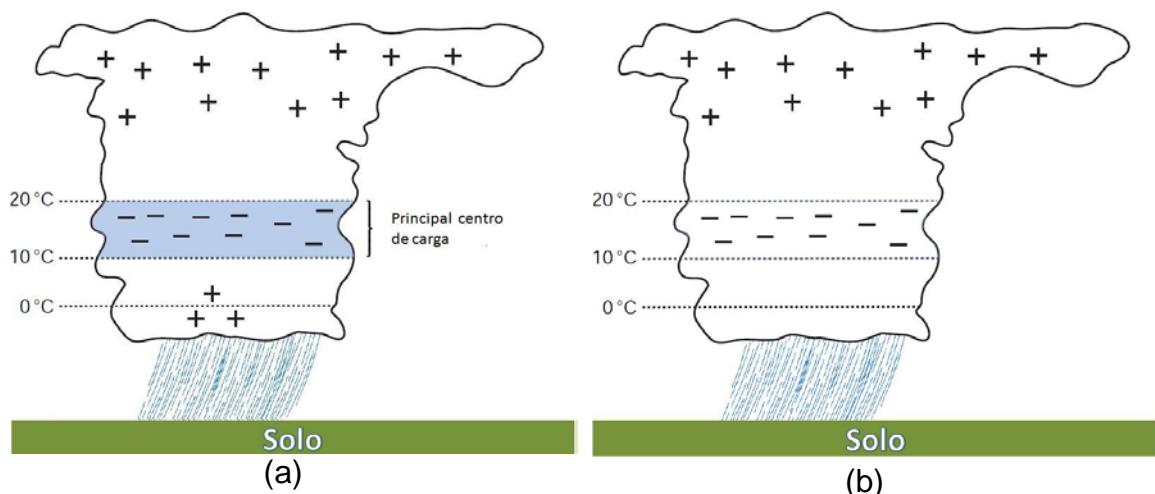


Figura 2.3 – Estruturas elétricas de nuvens de tempestade. (a) Modelo de Tripolo; (b) Modelo e Dipolo.

### **2.2.1. Teorias de Eletrização das Nuvens de Tempestades**

Estudos observacionais do campo elétrico e vários experimentos de laboratório tentam explicar como funciona a eletrificação das nuvens de tempestades. Embora não exista uma caracterização geral sobre os processos de eletrificação, a literatura sugere algumas teorias na tentativa de elucidar esses processos que se dividem em duas principais categorias: a Teoria da Precipitação e a Teoria Convectiva. Essas teorias tentam explicar as estruturas elétricas das tempestades, como o dipolo elétrico e a estrutura tripolar. Nos itens 2.2.1.1 e 2.2.1.2 essas teorias são melhores detalhadas.

#### **2.2.1.1. Teoria da Precipitação**

Proposta por Elster e Geitel, essa teoria não é apenas dependente dos movimentos das correntes ascendentes e descendentes das nuvens de tempestade para que ocorra a separação de cargas. Admiti-se que o processo responsável pela separação de carga é a precipitação, a sedimentação de diferentes tamanhos de hidrometeoros também é um contribuinte para a separação de regiões de carregamento preferencial de polaridades positivas ou negativas.

A teoria da precipitação considera dois tipos de processos para a separação de cargas: Indutivo e não-indutivo. A explicação de ambos processos são descritos nos itens 2.2.1.1.1 e 2.2.1.1.2.

##### **2.2.1.1.1. Mecanismo Indutivo**

O processo colisional indutivo baseia-se nas propriedades microscópicas das partículas de gelo e no momento de dipolo permanente da molécula de água. Neste processo a transferência de cargas ocorre quando os hidrometeoros de diferentes tamanhos colidem durante os movimentos dentro da nuvem. Devido ao momento de dipolo, um campo elétrico externo dirigido para baixo faz com que as moléculas de água tendam a ficar alinhadas com

esse campo, isso faz com que a parte superior de hidrometeoros, graupel, fique polarizada negativamente e a parte inferior positivamente.

Quando a parte inferior destes hidrometeoros colide com os cristais de gelo, ocorre a transferência de cargas negativas do cristal de gelo para o hidrometeoro. Como consequência o cristal de gelo fica carregado positivamente (Figura 4 a-b).

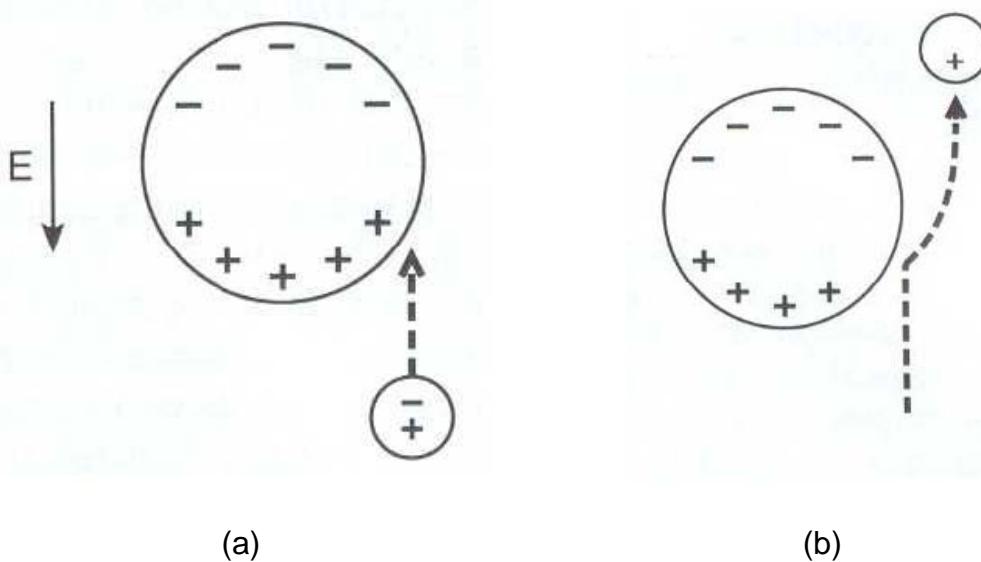


Figura 2. 4 – Representação do processo colisional indutivo de separação de cargas. (a) antes da colisão, (b) após a colisão.

Fonte: Albrecht (2008)

Devido ao graupel (carregado negativamente) ser mais pesado que os cristais de gelo (carregado positivamente), ele fica limitado à base da nuvem, enquanto que os cristais de gelo são enviados para o topo da nuvem pelas correntes ascendentes, isso faz com que se forme uma estrutura de dipolo (MacGorman, 1998, Williams, 1988), está configuração faz com que o campo elétrico da nuvem seja reforçado (Naccarato, 2005).

### 2.2.1.1.2. Mecanismo Não – Indutivo

Esse mecanismo se diferencia do mecanismo indutivo pelo fato de não ter a necessidade de um campo elétrico, porém para ocorrer à separação de

cargas entre os hidrometeoros é necessária uma colisão seguida de separação. Neste caso as cargas são dependentes da temperatura que ocorre a colisão.

Alguns autores (Reynolds et al., 1957; Jayaratne et al., 1983; Takahashi, 1978) através de experimentos em laboratório sobre colisões entre graupel e cristais de gelo, determinaram que o mecanismo não-indutivo além de depender da temperatura no momento da colisão, o conteúdo de água líquida (LWC), o tamanho dos hidrometeoros e a velocidade do impacto devem ser levados em consideração.

Takahashi (1978) sugere que em locais onde as temperaturas são maiores que -10°C o graupel seja carregado positivamente com qualquer quantidade de LWC. Jayaratne et al. (1983) verificaram que o graupel é carregado positivamente em um determinado valor de temperatura. Essa temperatura limite é conhecida como “Temperatura de Inversão” (TI) que é dependente do LWC.

Segundo a Williams (1989) o valor da TI é de aproximadamente -15°C e fica localizada próxima a região de cargas negativas (6 km de altura). Quando a colisão do graupel com o cristal de gelo ocorre em temperaturas maiores que -15°C, o graupel tenderá a ficar carregado positivamente e o cristal de gelo negativamente. Logo, as correntes ascendentes dentro da nuvem fazem com que os cristais de gelo, que são mais leves que o graupel, sejam levados para cima, enquanto que o graupel se concentra na parte inferior da nuvem. Quando ocorre o contrário, ou seja, a colisão se dá a temperaturas inferiores que -15°C, o graupel é quem fica carregado negativamente, isso faz com que se tenham dois centros de cargas (Figura 2.5), essa característica é conhecida como estrutura tripolar (Figura 2.3a).

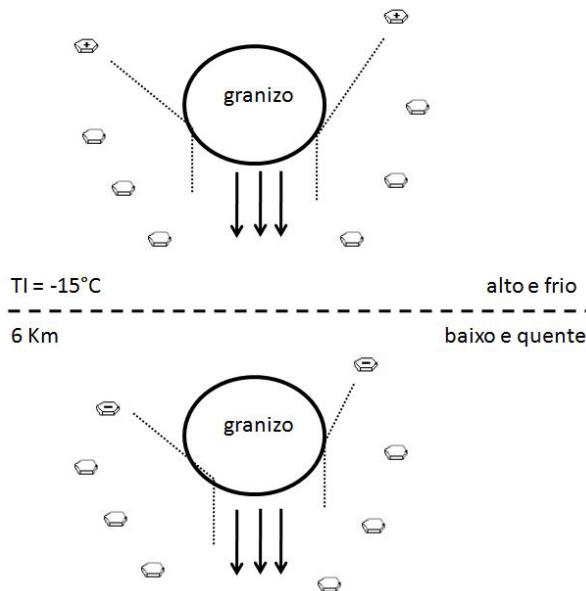


Figura 2. 5 – Representação do processo colisional não-indutivo de separação de cargas.

Fonte: Williams (1989)

### 2.2.1.2. Teoria da Convecção

A hipótese de carregamento por convecção formulada primeiramente por Vonnegut na década de 50 considera que as cargas elétricas são fornecidas por fontes externas. Normalmente, na baixa troposfera a distribuição vertical das cargas elétricas é positiva, em tempo bom. Uma das fontes externas citadas anteriormente é a distribuição de cargas positivas sobre a superfície terrestre que são inseridas para dentro da nuvem por meio das correntes ascendentes. A nuvem começa a se desenvolver verticalmente atingindo os níveis mais elevados da troposfera, então entra em atuação a segunda fonte externa de cargas elétricas, os íons livres produzidos na ionosfera pela radiação cósmica (Vonnegut et al., 1995)(Figura 2.6a).

Conforme a nuvem cresce, ela é carregada de cargas positivas fornecidas pela superfície, assim que são capturadas por gotículas de água e devido às correntes ascendentes, estas cargas positivas são transportadas até o topo da nuvem, atraindo assim os íons livres negativos. Isso faz com que o

topo da nuvem fique carregado negativamente. Essa característica é conhecida como camada de blindagem.

Devido às correntes descendentes, os íons negativos capturados na camada de blindagem, são levados para níveis inferiores da nuvem, como a nuvem ainda não sofreu dissipação, seu interior continua sendo alimentado por cargas positivas provenientes da superfície da terra, esse processo é conhecido como retroalimentação positiva.

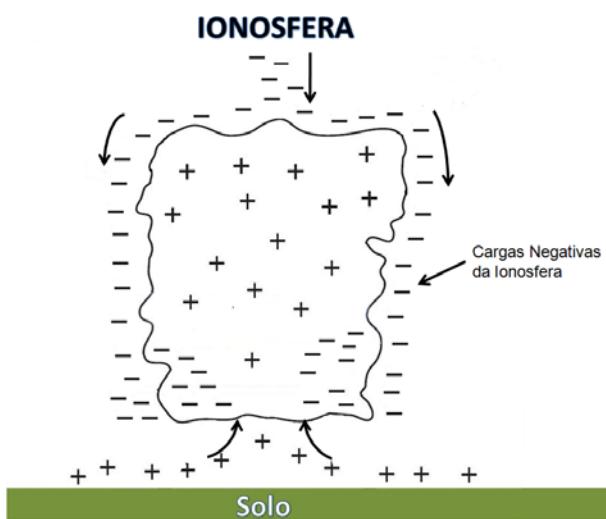


Figura 2. 6 – (a) Desenvolvimento do centro de cargas negativas na parte mais baixa da nuvem por meio do processo convectivo.

Fonte: Adaptada de Saunders (1995).

### 2.2.2. Relâmpagos

Os relâmpagos são basicamente uma descarga atmosférica entre regiões de cargas opostas. Estão associadas a nuvens de tempestade com forte corrente elétrica na qual se propagam por quilômetros (Uman & Krider, 1989). As regiões de cargas opostas podem estar localizadas dentro da mesma nuvem, em duas nuvens distintas, em uma nuvem e o ar fora da nuvem, ou na nuvem e no solo logo abaixo da nuvem. O relâmpago aquece o ar em que está em contato a 30.000°C em menos que um segundo. Os relâmpagos ocorrem

quando o campo elétrico atinge uma intensidade que possa quebrar a rigidez dielétrica do ar que dentro da nuvem atingem valores de 100 e 400 kV/m.

### 2.2.2.1. Tipos de Relâmpagos

Os relâmpagos são classificados em dois grupos: relâmpagos no solo e relâmpagos no céu. Destes, os relâmpagos no solo são os que são mais estudados devido à destruição que causam e o perigo em geral para a sociedade e representam entre 10 e 20% das descargas. Os relâmpagos do solo se subdividem em relâmpago nuvem-solo (NS) ou solo-nuvem (SN). Já os relâmpagos do céu são subdividido em três tipos: intra-nuvem (IN), entre nuvens (EN) e os que ocorrem da nuvem para um ponto qualquer do ar sem tocar o solo (NA), os 5 tipos de relâmpagos aqui mencionados estão ilustrados na Figura 2.7. Abaixo são descritos cada tipo da classificação dos relâmpagos.

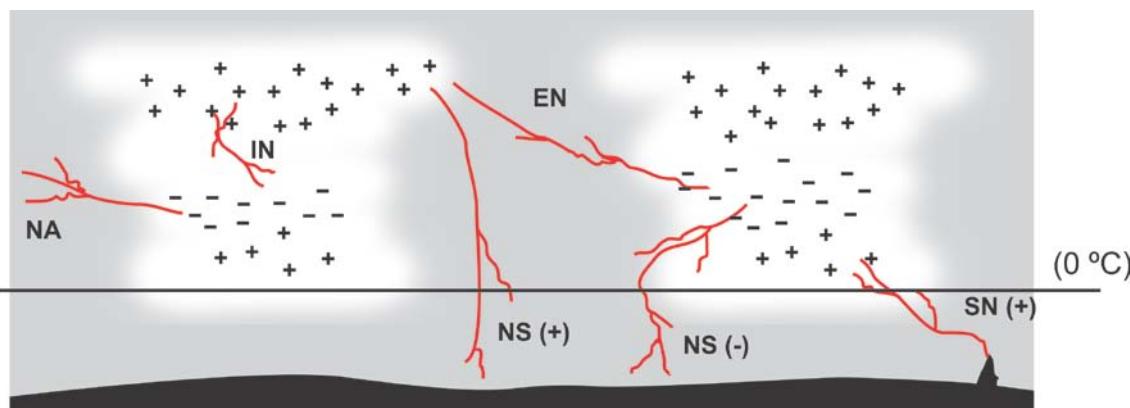


Figura 2.7 – Representação dos tipos de descargas atmosféricas.

As descargas NS são as que têm origem dentro da nuvem e se dirige para o solo, enquanto que as descargas SN são as que se originam no solo e se direciona para a nuvem. Tanto as descargas NS como as SN podem ser positivas (transferência de íons positivos) (Figura 2.8a, Figura 2.8c, respectivamente) ou negativas (transferência de íons negativos) (Figura 2.8b, Figura 2.8d, respectivamente), isso irá depender da carga neutralizada na nuvem. De acordo com Naccarato (2001) as descargas NS negativas ocorrem com mais freqüência do que as descargas NS positivas.

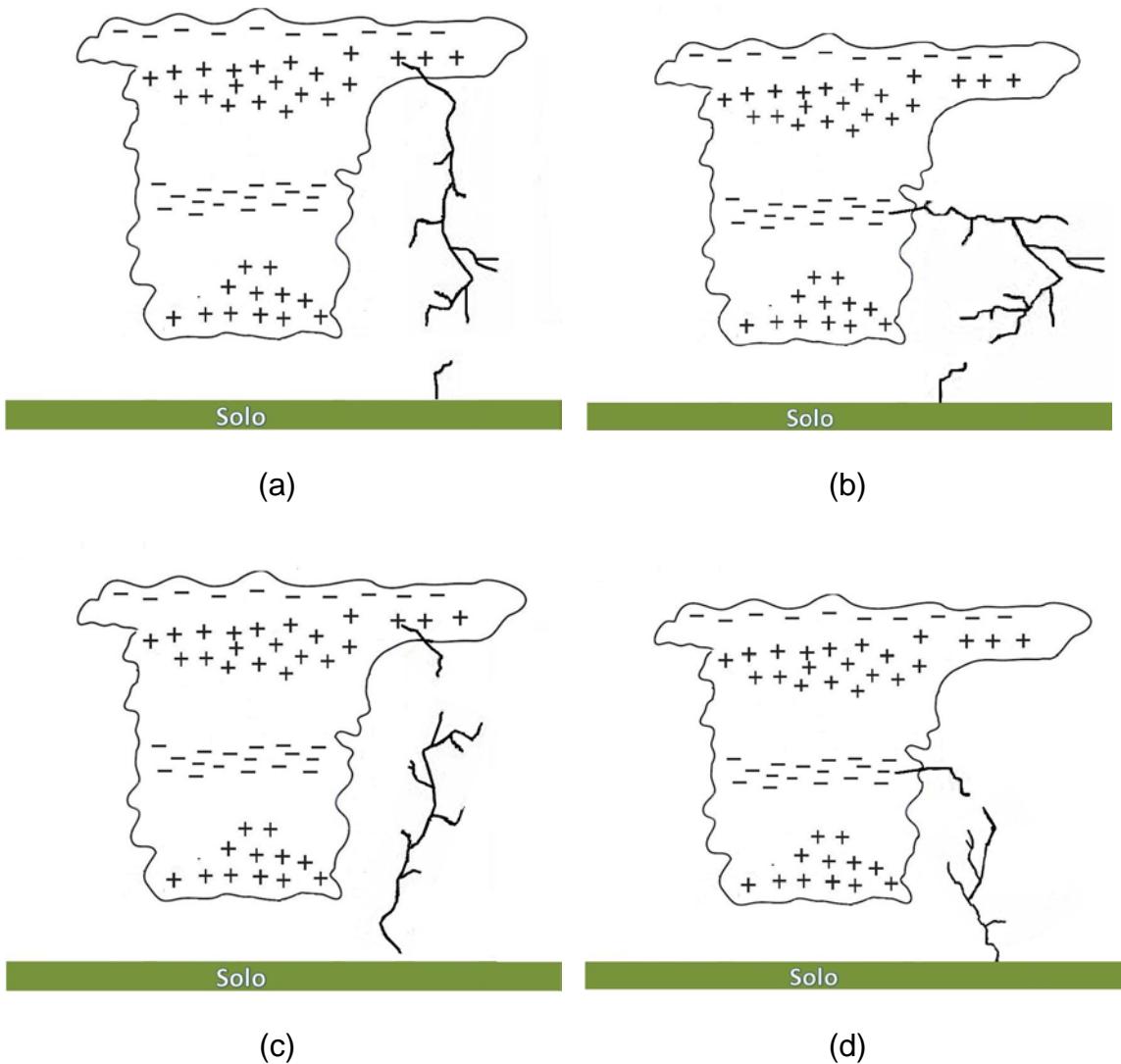


Figura 2.8 – Tipos de relâmpagos que ocorrem entre nuvens e solo. (a) NS positivo; (b) NS negativo; (c) SN positivo; (d) SN negativo.

### 2.3. Diferenças entre as Temperaturas de Brilho dos Canais Infravermelho (IR) e Vapor d'água (WV)

Vários setores da sociedade se preocupam com as tempestades devido à grande destruição que elas provocam por onde passam, sejam desastres provocados por tornados, granizo, intensas precipitações e descargas atmosféricas. Segundo Pinto Jr. et al. (2004) as descargas atmosféricas que ocorrem dentro de nuvens de tempestade são uma resposta ao acúmulo de

cargas dentro da nuvem que devido à este acumulo a rigidez dielétrica do ar é quebrada ocasionando então à descarga. Os centros de cargas positiva e negativa são formadas por vários processos microfísicos que ocorrem dentro da nuvem. Esses processos transferem cargas positivas e negativas durante a formação de gotas de chuva e partículas de gelo (Mac Gorman e Rust, 1998).

As descargas atmosféricas, normalmente estão associadas a nuvens convectivas com grande desenvolvimento vertical. Alguns estudos utilizando dados de satélite procuram associar a diferença entre diferentes bandas espectrais para caracterizar as nuvens de grande desenvolvimento vertical e de convecção profunda, conhecidas como nuvens penetrativas, que tem como principal característica a penetração de seu topo na tropopausa.

Vários autores (Schmetz et al., 1997; Kurino, 1997; Fritz & Laszlo, 1993; Machado et al., 2007) tem mostrado que a combinação de dados dos canais IR e WV podem descrever as profundidades das nuvens convectivas e também caracterizar as fortes precipitações associadas à estas nuvens. Utilizando observações simultâneas de dados dos canais WV e IR do satélite geoestacionário METEOSAT e um modelo de transferência radiativa “line-by-line” Schmentz et al. (1997) observaram que as diferenças maiores que zero graus entre os canais WV e IR estão relacionadas à nuvens convectivas de grande extensão vertical. Os autores ainda concluíram que maiores temperaturas de brilho no canal WV ocorrem devido ao vapor d’ água na estratosfera. Adler e Mack (1986) estudando a estrutura dinâmica das nuvens também encontraram topos de nuvens de convecção profunda acima da troposfera.

Setvak et al. (2007) usando imagens de alta resolução espacial do sensor MODIS para analisar as diferenças entre as temperaturas de brilho dos canais WV e IR concluíram que uma diferença entre os canais é possível desde que haja umidade pré-existente na estratosfera acima do topo da nuvem de tempestade e/ou, que devido ao grande desenvolvimento vertical da nuvem o topo forneça alguma quantidade de umidade para a estratosfera.

Lima et al. (2006) analisaram a relação da atividade elétrica em nuvens com convecção profunda, através das diferenças entre os canais WV e IR do satélite geoestacionário GOES-12 conseguiram determinar uma relação para estimar a probabilidade de ocorrência de descargas atmosféricas sobre a

região da América do Sul. Os autores ainda concluíram que as diferenças dos canais IR e WV podem fornecer uma boa informação de ocorrência de descargas atmosféricas em regiões desprovidas de sensores de medidas de descargas atmosféricas.

### 3. MECANISMOS FORMADORES DE TEMPESTADES NO SUDESTE DA AMÉRICA DO SUL

Neste capítulo se buscou mostrar alguns mecanismos que formam as tempestades na região de estudo. Para isso se descreveu como funciona a convecção local e fenômenos atmosféricos como os Sistemas Frontais, Zona de Convergência do Atlântico Sul e as circulações das brisas.

#### 3.1. Convecção Local

As fortes precipitações estão normalmente associadas com convecção local e efeitos da topografia associados com fenômenos atmosféricos, como os sistemas frontais devido ao mecanismo de levantamento orográfico (Banta e Schaaf, 1987) e, a circulações locais das brisas (Cavalcanti, 1982; Baker et al., 2001). Segundo Wilson et al. (1998) a topografia induz uma zona de convergência o que favorece o desenvolvimento da convecção. A convecção local é caracterizada por movimentos ascendentes de ar úmido (parcelas de ar) resultado de um aquecimento da superfície terrestre durante o dia, o qual se observa a presença, em superfície, de pressões atmosféricas mais baixas devido ao aquecimento ou a atuação de algum fenômeno meteorológico. Essas parcelas de ar quente e úmido elevam-se normalmente a uma velocidade de 36 Km/h, quando as parcelas de ar atingem a altitude do Nível de Condensação por Levantamento (NCL) observam-se o surgimento das nuvens. As nuvens Cb podem atingir velocidades verticais de até 200 Km/h o que ocasiona grandes tempestades, isso ocorre quando se têm disponível grandes quantidades de vapor d'água.

#### 3.2. Sistemas Frontais

Os Sistemas Frontais (SF) são linhas de convergência organizadas como frentes frias, quentes e oclusas que freqüentemente provocam tempestades severas. Sua formação (Figura 3.1) se dá quando ocorre o

encontro de massas de ar com propriedades distintas (temperatura e umidade diferentes). Normalmente as massas de ar possuem grande extensão vertical e horizontal, a extensão vertical é tipicamente conhecida como superfície frontal ou zona frontal.

O desenvolvimento dos SF se dá ao longo das frentes que estão associadas a um ciclone extratropical. Após o encontro das duas massas de ar distintas surge a superfície frontal. A convergência dos ventos na superfície frontal normalmente ocorre ao longo dessas frentes. Devido à convergência, o ar é forçado a elevar-se (correntes ascendentes) conduzindo ao desenvolvimento de linhas de tempestades. Estas linhas podem ser vista como uma banda continua de nuvens (Figura 3.2) com topos frios e estão localizadas à dianteira da banda frontal.

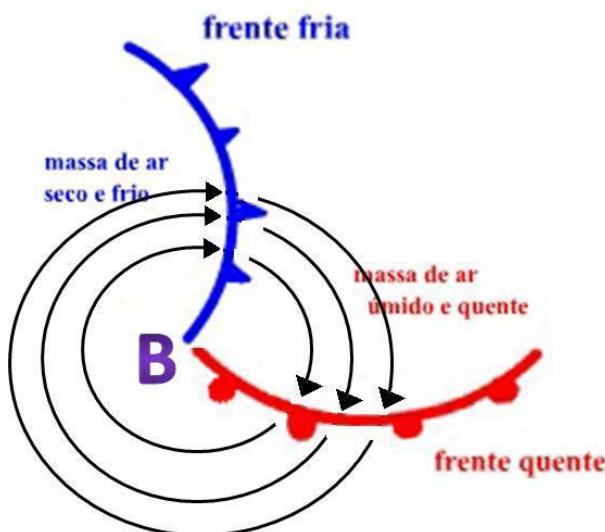


Figura 3.1 – Composição de Sistema Frontal em consequência do encontro de duas massas de ar com propriedades distintas.

Antes da passagem de um SF sobre uma localidade é observada uma redução na pressão atmosférica, aumento da temperatura e forte intensificação dos ventos, sendo que após a passagem do SF a pressão aumenta e a temperatura diminui em consequência de um sistema de alta pressão que se estabelece após a passagem do SF (Cavalcanti, 1995; Oliveira et al., 2001).



Figura 3.2 – Banda continua de nuvens formando um Sistema Frontal observado no dia 16/01/2008.

Fonte: CPTEC/INPE

O conceito de estrutura frontal originados pela escola Norueguesa dominou o meio acadêmico por mais de meio século. Com o intuito de melhorar esses modelos Harrold (1973) introduziu o conceito de esteira transportadora quente. A esteira transportadora quente, em termos gerais, é uma corrente de ar com alta temperatura potencial úmida escoando ao longo do comprimento da frente fria, no qual transporta uma enorme quantidade de calor e umidade de oeste para os pólos e para cima. Browning (1986) e Carlson, (1991) concluíram que o ar transportado na esteira se dá em forma de um jato em baixos níveis na camada limite na dianteira da frente fria.

Segundo Rodrigues (2004) os SF ocorrem com maior freqüência na primavera nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. Fernandes & Campos (2006) estudando a ocorrência de SF no Brasil para o período de 1996 a 2006 mostraram que a freqüência de passagem de SF aumentou quando comparados com trabalhos pioneiros de Oliveira (1986) e Lemos & Calbete (1996) que haviam feito uma climatologia da ocorrência desse fenômeno. O aumento da freqüência de SF pode ter como consequência um aumento de tempestades nas regiões em que esse fenômeno atua.

As regiões mais afetadas por SF no Brasil são a Sul e Sudeste. No entanto, embora com menos freqüência, mas com alguns casos registrados, as regiões do Centro-Oeste e Nordeste também são atingidas.

### 3.3. Zona de Convergência do Atlântico Sul

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é observada na America do Sul nos meses de verão (dezembro, janeiro e fevereiro) sendo tipicamente conhecida como uma faixa de nebulosidade convectiva. Sua formação é observada desde o sul da Amazônia em uma direção Noroeste-Sudeste até o oceano Atlântico e pode ser visualizada na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Ilustração da Zona de Convergência do Atlântico Sul em uma imagem infravermelho o qual foi observada a partir do dia 05/12/2009.

Fonte: CPTEC/INPE

Segundo Quadro (1994) a área geográfica de atuação da ZCAS, ilustrada na Figura 3.4, contempla parte do Estado da Amazônia, regiões dos Estados do Centro-Oeste, Centro-Sul da Bahia, Sudeste e Norte do Paraná.

Nos meses de verão grande parte da precipitação ocorre devido à intensa atividade convectiva, essa atividade convectiva dá suporte ao desenvolvimento de tempestades na área de atuação do fenômeno ocasionando em forte precipitação por um período de tempo mínimo de 5 dias devido o seu caráter estacionário.

Com o objetivo de conhecer os mecanismos característicos das ZCAS, Quadro (1994) analisou varias situações de ZCAS nos meses de verão compreendendo um período de 10 anos (1980 – 1989). Uma das principais

conclusões do estudo foi de que as ZCAS é a interação dos sistemas frontais com a convecção tropical, o mesmo observado por Oliveira (1986).

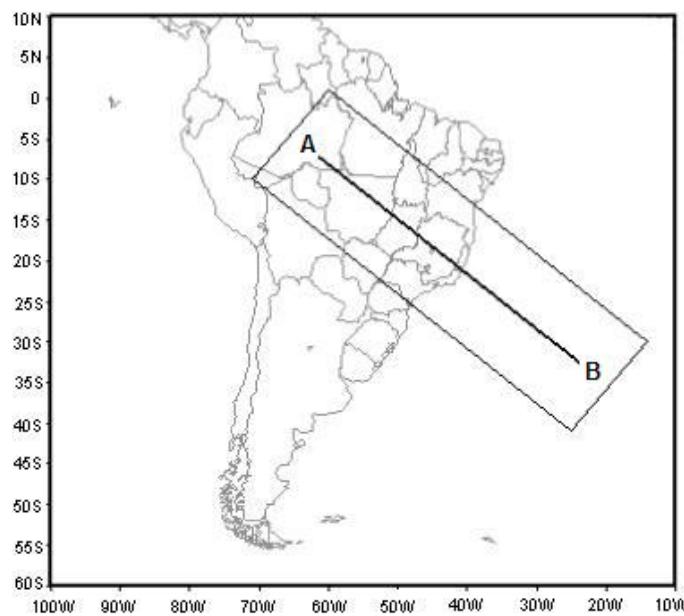


Figura 3.4 – Região geográfica de atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul.

Fonte: Mendonça & Bonatti (2008)

As características mais marcantes das ZCAS é a convergência de umidade em baixos e médios níveis na região de estabelecimento do fenômeno. O escoamento em níveis médios (500 hPa) apresenta a existência de um cavado sobre a costa leste da América do Sul orientado na mesma direção da ZCAS (Quadro, 1994).

Os mecanismos de formação – persistência - dissipação das ZCAS ainda não são bem conhecidos. Vários autores tentam explicar sua formação. Kalnay et al. (1986) utilizando um modelo de circulação geral para explicar o fenômeno, observaram que quando a convecção tropical sofre diminuição a onda estacionária de nebulosidade não é observada e, ainda concluíram que a Cordilheira dos Andes não é responsável pela formação da onda estacionária, o mesmo foi observado por Tanajura (1996) quando utilizando o modelo regional ETA observou a formação das ZCAS sem os Andes.

### 3.4. Brisa Marítima/Terrestre e Vale/Montanha

A seguir são descritos os fenômenos de brisa marítima/terrestre, os quais estão mais bem detalhados no item 3.4.1 enquanto que as circulações da brisa vale/montanha está descrita no item 3.4.2.

#### 3.4.1. Brisa Marítima/Terrestre

A brisa é de fácil conhecimento dos habitantes das regiões vizinhas de fronteira com o mar e são facilmente observados em imagens de satélite. A brisa é um vento puramente local, independente das perturbações da atmosfera. Estas perturbações poderão pela sua intensidade sobrepor-se a brisa, mas não são a sua causa.

Durante o dia a terra aquece mais rapidamente do que o mar e o ar existente sobre a terra, por se tornar mais leve em consequência ao aquecimento, sobe e gera uma região de baixa pressão fazendo com que tenha a convergência do ar mais frio proveniente do mar. Esse fenômeno é chamado de brisa marítima (Figura 3.5a), que começa atuar algumas horas depois do nascer do sol e termina quando ele se põe.

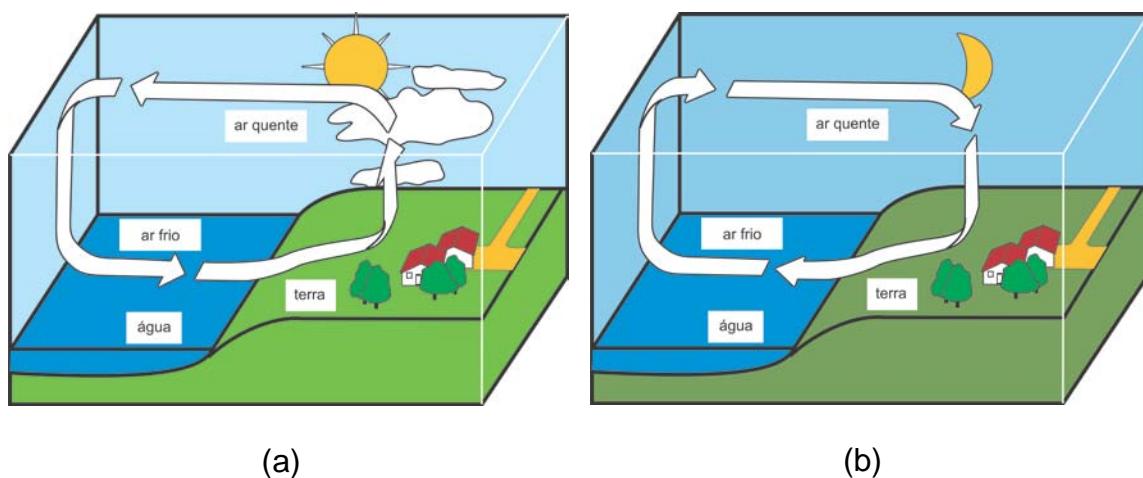


Figura 3.5 – Representação esquemática da brisa. (a) Marítima; (b) Terrestre.

Fonte: <http://www.proclira.uevora.pt>.

Este fenômeno costuma formar uma mesofrente “Frente de Brisa” que se forma ao longo das diferenças de temperatura do ar mais quente e frio e, assim, se torna possível a formação de nuvens cumulus e cumulonimbus. Dependendo da curvatura da costa em que as brisas se formam, pode haver a convergência das “frentes de brisa” o que leva a um fortalecimento da convecção e a formação de tempestades. Vários autores (Freitas, 2003; Oliveira & Silva Dias, 1982) afirmam que as tempestades severas observadas na Região Metropolitana de São Paulo podem ser consequência da penetração da brisa marítima. Pereira Filho et al. (2002) afirmaram que aproximadamente 60% dos casos de enchente ocorridos na RMSP no período de 03/1999 a 03/2002 estavam associados com a penetração deste fenômeno. As brisas marítimas são as que causam o maior desenvolvimento das tempestades.

Inversamente, durante a noite, o mar não se esfria tanto quanto a terra e dessa maneira a circulação se inverte, sendo esse fenômeno conhecido como brisa terrestre (Figura 3.5b) e é observado nas primeiras horas da manhã podendo causar chuva fraca na região de atuação.

Em qualquer caso a brisa não ultrapassa alguns quilômetros em relação à costa e em altitude não ultrapassa os mil metros.

### **3.4.2. Brisa do Vale/Montanha**

Assim como os habitantes das regiões costeiras conhecem o efeito de brisa, também os habitantes dos vales ou encostas montanhosas os conhecem. Neste caso, como as encostas são inclinadas os vales são aquecidos de forma mais intensa do que os pontos mais altos e está condição faz com que durante o dia ocorram as brisas de vale (Figura 3.6a). Durante a noite o ar frio desce as montanhas acumulando-se nos vales e desta maneira à brisa tem o sentido oposto, assim, o fenômeno é conhecido como brisa de montanha (Figura 3.6b).

A brisa do vale também é conhecida como ventos anabáticos enquanto que a brisa da montanha é conhecida como ventos catabáticos.

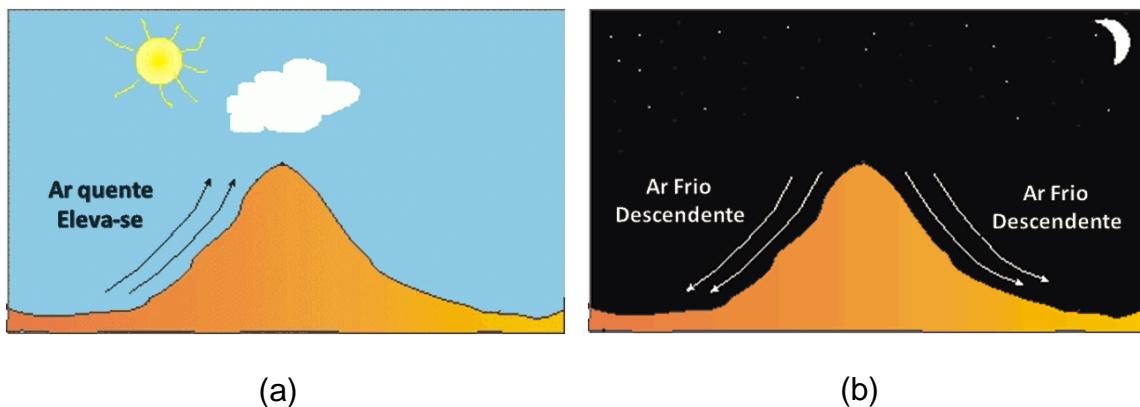


Figura 3.6 – Representação esquemática de brisa. (a) Vale; (b) Montanha.

Fonte: Adaptado de Vera Schlanger (<http://www.atmosphere.mpg.de>).

#### 4. Imagens de Satélite

Para a realização deste trabalho, foram utilizadas imagens de duas gerações de satélites geoestacionários GOES (Geoestationary Operational Environmental Satellites). O GOES 12 que esteve em operação até março de 2007 e o GOES 10 que o substituiu a partir de abril do mesmo ano.

Os satélites GOES estão em órbita a uma altitude de aproximadamente 35800 km sobre o equador. Com essa altitude a velocidade angular é aproximadamente igual a da Terra e, isso faz com que cada satélite observe a mesma área. Esse tipo de órbita é conhecida como geoestacionária, desta forma permite a freqüente visualização de um mesmo ponto. Um das grandes vantagens da utilização de dados geoestacionários é o acompanhamento e deslocamento de vários fenômenos atmosféricos.

Um dos principais objetivos desses satélites é detectar as trajetórias dos sistemas meteorológicos severos e, isso é possível devido ao seu caráter operacional de fornecer imagens de uma mesma área em uma grande freqüência temporal.

Os satélites utilizados nesse trabalho têm em seu imageador seis canais espectrais: um no canal no visível, quatro canais no infravermelho e um no canal de vapor d'água. As principais características dos canais estão descritas na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Principais características dos canais espectrais disponíveis nos satélites GOES 12 e GOES 10.

Canal	Resolução	Comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ )	Nome dado ao canal
1	1 x 1 km	0,53 - 0,75	Visível (VIS)
2	4 x 4 km	3,8 – 4,0	Infravermelho (IR)
3	8 x 4 km	6,5 – 7,0	Vapor d'água (WV)
4	4 x 4 km	10,2 – 11,2	Infravermelho (IR)
5	4 x 4 km	11,5 – 12,5	Infravermelho (IR)
6	4 x 4 km	12,9 – 13,7	Infravermelho (IR)

Foram utilizados os dados dos canais 3 (WV) e 4 (IV) disponibilizadas pela Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DSA/CPTEC/INPE). O período utilizado foi de dezembro de 2005 a março de 2007 do satélite GOES 12 e de abril de 2007 a maio de 2009 do satélite GOES 10, correspondendo a 3 anos e 6 meses de dados, a utilização de ambos satélites se fez necessária para obter um período significativo de dados para a realização das estatísticas referentes a associação das ocorrências de descargas atmosféricas em sistemas convectivos. A região de estudo foi o sudeste da América do Sul, compreendida na área de 15°S a 30°S de latitude e 35°W a 60°W de longitude, conforme está ilustrado na Figura 4.1.

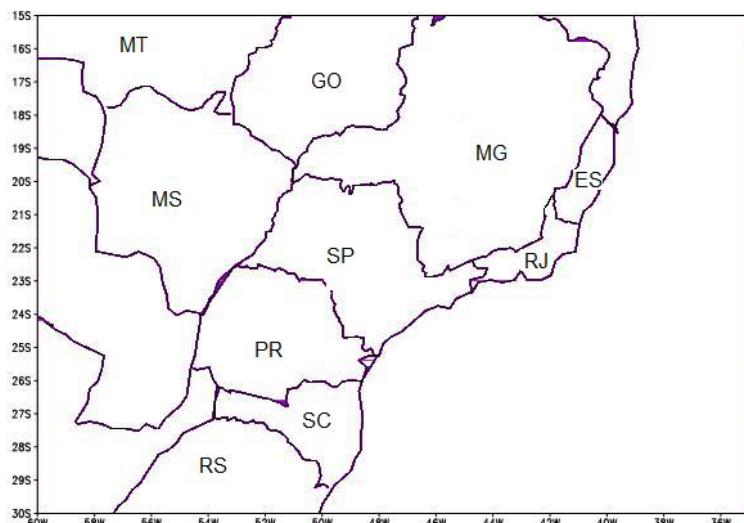


Figura 4.1 – Região em que foi realizado o rastreamento dos sistemas convectivos.

Os dados de imagens de satélites são processados e assim se obtém a temperatura de brilho, que é obtida a partir da radiância considerando a emissividade igual à de um corpo negro. Sendo que o sistema composto Terra-Atmosfera se comporta como um corpo negro e sua energia concentra-se no espectro do infravermelho, a dependência entre a energia radiante e o comprimento de onda pode ser dada pela lei de Planck (Liou, 1980), equação 4.1.

$$M_{\lambda B} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left[ \exp \frac{hc}{\lambda kT} - 1 \right]} \quad (4.1)$$

onde:  $T$  é a temperatura do corpo negro (K),  $h$  é a constante de Planck ( $6,622619 \times 10^{-34}$  J.s),  $k$  é a constante de Boltzmann ( $1,3880622 \times 10^{-23}$  J/K),  $c$  é a velocidade da luz ( $2,997925 \times 10^8$  m/s) e  $\lambda$  o comprimento de onda (m).

A equação 4.1 pode ser escrita de uma forma simplificada na qual está expressa na equação 4.2.

$$M_{\lambda B} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[ \exp \frac{c_2}{\lambda T} - 1 \right]} \quad (4.2)$$

sendo que  $c_1 = 2\pi hc^2 = 3,7427 \times 10^8$  [W  $\mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2}$ ] e  $c_2 = hc/k = 1,4388 \times 10^4$  [ $\mu\text{m} \cdot \text{K}$ ].

A equação 4.2 define a emitância de um corpo negro em função do comprimento de onda e temperatura. A radiação do corpo negro é isotrópica, e por isso, a relação entre emitância espectral ( $M_{\lambda B}$ ) e a radiância espectral ( $L_{\lambda B}$ ) de um corpo negro pode ser obtida usando a equação 4.3.

$$M_{\lambda B} = \pi L_{\lambda B} \quad (4.3)$$

Para se definir a radiância espectral de um corpo negro, emprega-se muito freqüentemente na literatura o símbolo ( $B_\lambda \equiv L_{\lambda B}$ ), ou seja,  $M_{\lambda B} = \pi B_\lambda$  e, portanto, a radiância espectral de um corpo negro é dada pela equação 4.4.

$$B_\lambda = \frac{M_{\lambda B}}{\pi} = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left[ \exp \frac{hc}{\lambda kT} - 1 \right]} \quad (4.4)$$

No sensoriamento remoto da atmosfera, para diferentes finalidades, se utiliza a expressão 4.4 em termos de temperatura, equação 4.5.

$$T = \frac{2hc^2}{\lambda \ln \left[ \frac{hc}{\lambda^5 k B_\lambda} + 1 \right]} \quad (4.5)$$

A temperatura ( $T$ ) calculada pela equação 4.5 caracteriza a temperatura de um corpo negro. Esta equação é também utilizada para descrever uma característica dos corpos reais que é a temperatura equivalente do corpo negro. Dessa forma, para um corpo real, a temperatura equivalente do corpo negro é definida como a temperatura de um corpo negro que apresenta a mesma emitância espectral do corpo considerado, nesse caso o corpo real, para um determinado comprimento de onda.

#### **4.1. Características das Imagens do Canal Infravermelho**

Os dados contidos em imagens infravermelhas fornecem informações da radiação emitida pelas nuvens e pela superfície terrestre. Estas informações são utilizadas para a observação das temperaturas e a localização de áreas de gelo. Uma vez que a temperatura normalmente diminui com a altura, a radiação infravermelha com menor intensidade é emitida a partir de nuvens mais altas, sendo que a superfície terrestre emite radiação infravermelha com maior intensidade, portanto essa é uma imagem representativa da superfície terrestre e dos topo das nuvens. Nas imagens do canal infravermelho as nuvens aparecem escuras em relação à Terra.

As informações contidas nas imagens infravermelhas podem ser utilizadas para observar as propriedades térmicas da Terra e da atmosfera. As nuvens altas podem indicar uma tempestade com forte atividade convectiva e, portanto, imagens no canal infravermelho podem ser utilizadas para prever tempestades.

#### 4.2. Características das Imagens do Canal de Vapor d'água

A energia radiativa utilizada para coletar os dados do canal IR discutida anteriormente é passada livremente pela atmosfera terrestre. Sendo que as informações obtidas desses dados fornecem pouca informação sobre a atmosfera. Isso ocorre porque para a atmosfera esse comprimento de onda é transparente. Os sensores que obtém as imagens dos satélites também são construídos para obter comprimentos de onda IR que são absorvidas por um ou mais gases na atmosfera, como o vapor d'água e dióxido de carbono.

A radiação em torno da faixa de onda de 6.5  $\mu\text{m}$  é absorvida assim como emitida pelo vapor d'água. O canal de vapor d'água (WV) de satélites meteorológicos trabalha em torno deste comprimento de onda. O canal WV detecta o vapor d'água no ar, principalmente em torno de 10.000 a 40.000 pés acima da superfície terrestre. O nível de brilho da imagem obtida nesta faixa indica a quantidade de umidade presente na atmosfera.

## 5. Detecção de Descargas Atmosféricas

A detecção de descargas atmosféricas no solo é feita a partir de um conjunto de antenas receptoras com a finalidade de localizar e determinar as características das descargas de retorno de uma dada região. A detecção é feita através de instrumentos que utilizam o espectro de rádio através de medidas do campo elétrico e magnético emitidos pelas descargas.

O monitoramento das descargas atmosféricas no Brasil é feita por algumas redes, por exemplo, a rede Sferics Timing And Ranging NETwork (STARNET) e a Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT), sendo esta última consultada para obter as informações necessárias sobre os dados de descargas atmosféricas que foram utilizadas neste estudo.

A rede STARNET é formada por sensores que medem no espectro de muito baixa freqüência (VLF), onde se podem medir os ruídos de rádio “sferics” na faixa de freqüência de 7-15 kHz (Anagnostou et al., 2002). O método utilizado para detectar as descargas atmosféricas é o da diferença do tempo de chegada (ATD) (Lee, 1989). No Brasil seus sensores estão distribuídos em 6 estados (RS, MS, SP, DF, AM e CE), sendo que a rede também possui três sensores na África e um no Caribe. Uma das principais características da rede é a alta resolução temporal, 1 mili-segundo, além de monitorar continuamente as descargas atmosféricas. Segundo Morales et al. (2004) a eficiência da detecção da rede é superior a 80% no território nacional. Mais detalhes sobre a rede STARNET podem ser obtidos por meio de seu endereço na web [www.zeus.iag.usp.br](http://www.zeus.iag.usp.br).

Desde 2004 quando empresas do setor elétrico (FURNAS e CEMIG) e institutos de pesquisas (SIMEPAR e INPE) integraram completamente os sensores em que administravam, foi possível organizar uma rede integrada nacional de detecção de descargas atmosféricas (RINDAT). Composta por 24 sensores dos tipos IMPACT (IMProved Accuracy from Combined Technology) e LPATS (Lightning Position and Tracking System) a rede está presente em partes da região sul e centro-oeste e cobre praticamente toda a região sudeste do Brasil. Seus sensores estão distribuídos conforme figura 5.1 e operam na faixa de VLF e baixa freqüência (LF) (Pinto, et al., 1999). Estes sensores

utilizam diferentes tecnologias na detecção das descargas. O sensor LPATS utiliza o método tempo de chegada (TOA), enquanto que o sensor IMPACT, além de utilizar o método TOA utiliza também o método de direção do campo magnético (MDF). Segundo Price (2008) a combinação de ambos os métodos são freqüentemente utilizados para aumentar a acurácia da detecção de relâmpagos. Estes métodos estão melhores descritas nos itens 5.1 e 5.2.

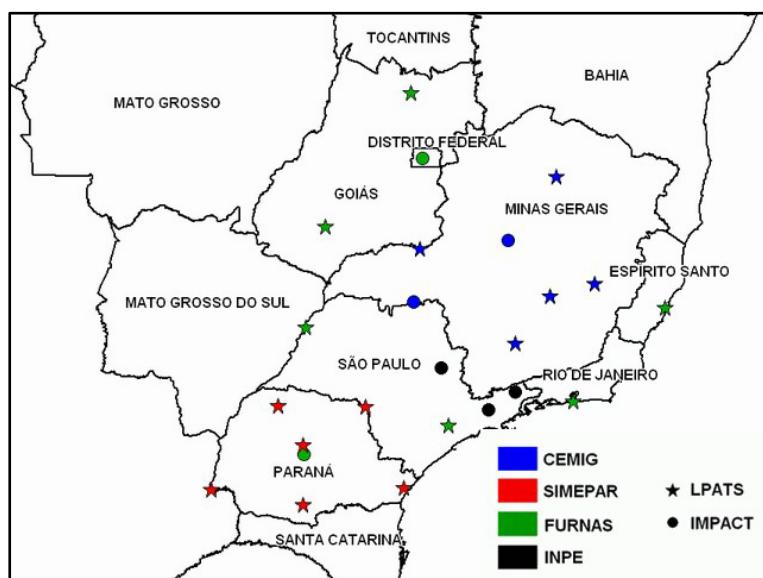


Figura 5.1 – Localização dos 24 sensores operantes que compõem a RINDAT.

Fonte: [www.rindat.com.br](http://www.rindat.com.br) (acessado 10/01/2010).

Os dados de detecção de descargas atmosféricas utilizados neste estudo, compreendeu o mesmo período citado no capítulo 4, ou seja, dezembro de 2005 a maio de 2009. Os dados foram disponibilizados pela RINDAT contendo basicamente parâmetros de localização como data, hora, latitude e longitude e o indicador de relâmpago NS e IN em formato de texto.

### 5.1. Método do Tempo de Chegada (TOA)

O método TOA, utilizados pelas antenas LPATS, baseia-se na detecção da radiação eletromagnética de LF da carga de retorno e identifica o tempo de chegada de uma parte específica da radiação. A diferença no tempo de

chegada entre três antenas de recepção (Figura 5.2) determina hiperbolóides com a localização da descarga de retorno, de modo que o método necessita de um mínimo de quatro antenas (Figura 5.3) para fornecer uma localização sem ambigüidade, conhecida também como intersecção circular. O sinal obtido pelas outras antenas é utilizado a fim de verificar o local determinado. Quando uma tempestade passa acima de uma antena, o sinal desta antena não é utilizado na central de processamento. A resolução espacial é geralmente inferior a 1 km e depende do número de antenas vizinhas.

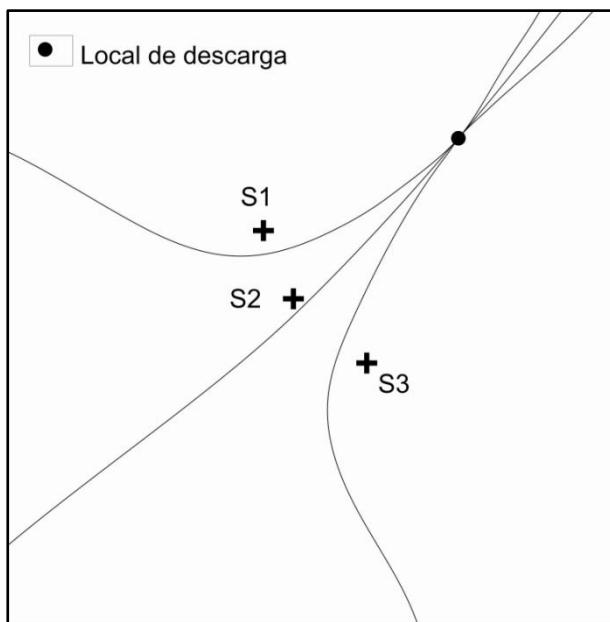


Figura 5.2 – Método TOA com intersecção hiperbólica para localização da descarga utilizando três sensores.

Fonte: Naccarato (2001).

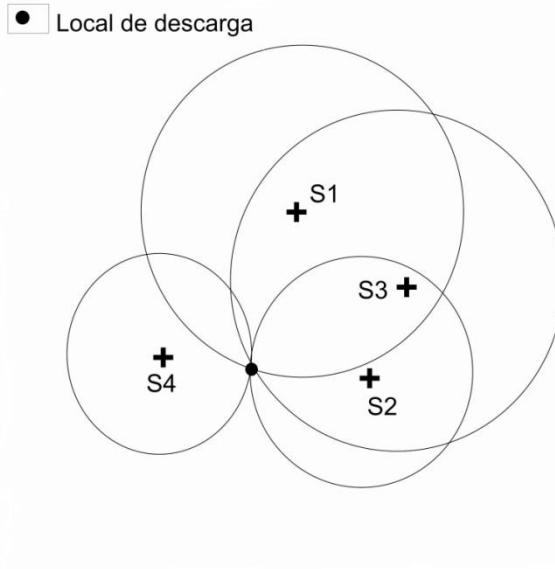


Figura 5.3 – Método TOA com intersecção circular para localização da descarga utilizando quatro sensores.

Fonte: Naccarato (2001).

## 5.2. Método da Direção do Campo Magnético (MDF)

O método MDF determina por meio do campo magnético a direção de propagação da descarga que é representada pelo azimute. Necessita de pelo menos dois sensores para que se obtenha uma boa precisão. Este método utiliza a intersecção das retas do azimute para indicar o local em que ocorreu a descarga.

Uma melhor precisão pode ser obtida na utilização de três sensores, pois a intersecção das linhas base dos três sensores (Figura 5.4) permite utilizar um procedimento mais otimizado, conhecido como triangulação, que tem como objetivo minimizar os erros nos ângulos azimutais.

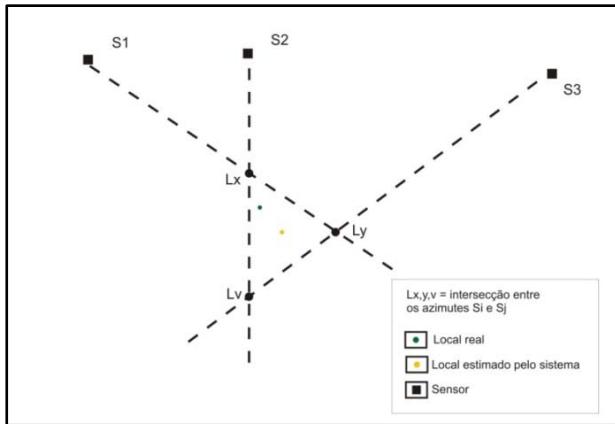


Figura 5.4 – Método MDF para uma ótima determinação de localização da descarga.

Fonte: Naccarato (2001).

Existe um terceiro método, conhecido como ALDF (Advanced Lighting Direction Finder) que combina os métodos MDF e TOA, na qual se obtém uma precisão melhor do que utilizando apenas um método. Os dados obtidos por estes dois métodos são combinados em um método de intersecções circulares (Figura 5.5). No caso de uma descarga atmosférica ocorrer entre a linha base de dois sensores, ela será localizado com boa precisão através da linha do azimute e os círculos definidos pelas distâncias dos sensores.

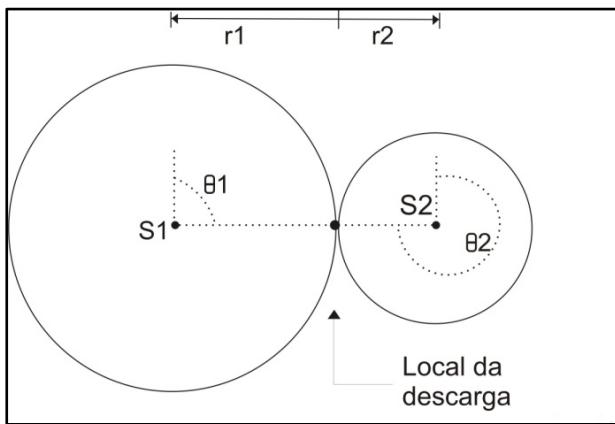


Figura 5.5 – Método ALDF aplicado a uma descarga com o ponto de impacto localizado sobre a linha base de dois sensores.

Fonte: Naccarato (2001).

## 6. METODOLOGIA

A metodologia que foi seguida neste trabalho teve quatro etapas principais. A primeira etapa consistiu em avaliar os dados de satélite para o período estudado eliminando imagens defeituosas. A segunda etapa foi a realização do rastreamento dos SC que posteriormente foram integradas com dados de descargas atmosféricas para separar os SC que não se tornaram tempestades e os SC que se tornaram tempestades. A terceira etapa descreve as variáveis físicas calculadas com o objetivo de conhecer as relações estatísticas das propriedades físicas dos SC que não se tornaram e se tornaram tempestade. A quarta e última etapa consistiu em analisar as diferenças da temperatura de brilho entre os canais Infravermelho e Vapor d'água do satélite GOES para SC que não se tornaram e se tornaram tempestades.

### 6.1. Controle da Qualidade dos Dados de Satélite

O algoritmo do FORTRACC necessita de imagens de satélite do canal infravermelho para realizar a identificação e rastreamento dos SC. O algoritmo descarta as imagens que apresentam ruídos maiores que 10% na imagem. No decorrer do trabalho se observou que o algoritmo travava em algum espaço do tempo depois de executado. Tendo em vista este problema, era registrada a imagem em que ocorria a parada da execução do algoritmo e, posteriormente, a imagem era plotada para ver o que estava ocorrendo. Dessa maneira foi possível observar dois erros nos dados de satélite. O primeiro erro foi de imagens que apresentaram ruídos em mais que 10% da imagem (Figura 6.1a), mesmo o FORTRACC descartando essas imagens ocorria o travamento. O segundo erro foi quando se observava valores de temperatura de brilho, mas quando a imagem era plotada se observava uma imagem completamente com “chuviscos”, como pode ser observado na Figura 6.1b.

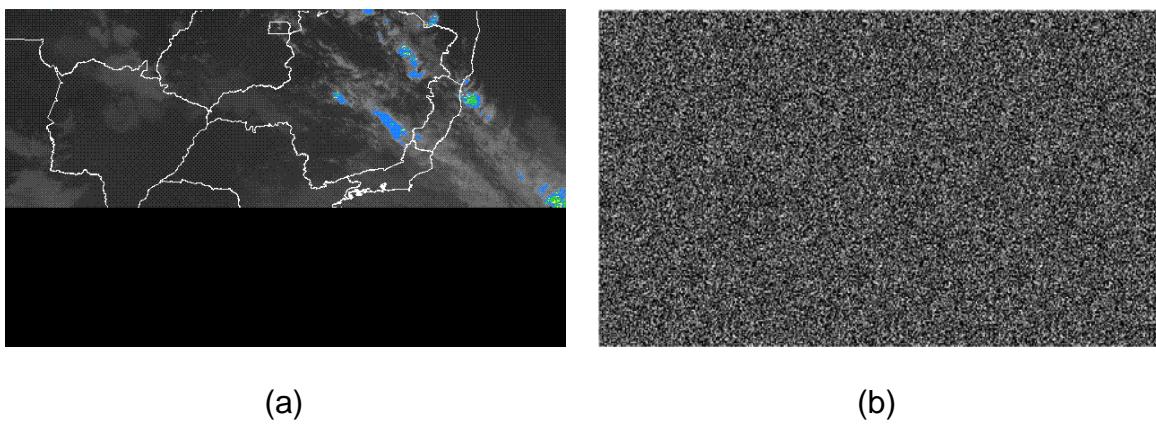


Figura 6.1 – Imagens de satélite que apresentaram erros. (a) mais de 10% da imagem com ruído; (b) imagem que apresentavam um ruído em forma de “chuvisco”.

Para resolver esse problema às imagens foram plotadas uma a uma, assim aquelas que apresentavam os erros descritos anteriormente eram descartadas manualmente.

## 6.2. Rastreamento de Sistemas Convectivos

O FORTRACC (Machado et al., 1998; Mathon & Laurent, 2001; Vila et. al., 2004; Vila et al. 2008) é um aplicativo que se centra na determinação de trajetórias e ciclo de vida dos SC através de imagens consecutivas do canal IR levando em consideração as características morfológicas e a superposição de áreas entre essas imagens (Macedo, 2004) . Utiliza como base fundamental de dados as imagens de satélite geoestacionário (GOES, METEOSAT). Atualmente está operacional na Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), e vem utilizando imagens do satélite GOES 10 e 12 uma vez que cobre a América do Sul com resolução de 4x4 km e freqüência de amostragem de 15 e 30 minutos respectivamente.

A técnica de acompanhamento de SC necessita de imagens em alta resolução temporal e espacial e com poucas falhas, como: falta de imagens sucessivas e de linhas nas imagens. As imagens GOES são recebidas em projeção

satélite, e para a utilização no FORTRACC elas devem ser re-projetadas para projeção retangular antes de iniciar o processamento.

### 6.2.1. Definição dos Limiares para Classificação dos Sistemas Convectivos

Um SC é formado por diversos tipos de nuvens que variam durante os estágios do seu ciclo de vida. A Figura 6.2 exemplifica segundo Machado e Rossow (1993), o ciclo de vida médio de um SC tropical. Para a definição de um SC na imagem do canal 4 do satélite GOES 12 e GOES 10, foram definidos no algoritmo do FORTRACC os limiares de temperaturas de brilho descritos na Tabela 6.1. Utilizou-se o limiar de 270 K para detecção precoce dos SC, 258 K para definir o SC e 235 K para definir CC imersas no SC.

Foram escolhidos limiares diferentes daqueles utilizados por Machado et al. (1998), sendo que para este trabalho os valores de temperatura de brilho escolhidos são mais quentes para detecção precoce dos SC, pois o interesse neste estudo é para previsão em curto prazo dos SC com maior atividade convectiva com maiores possibilidades de se transformar em tempestades.

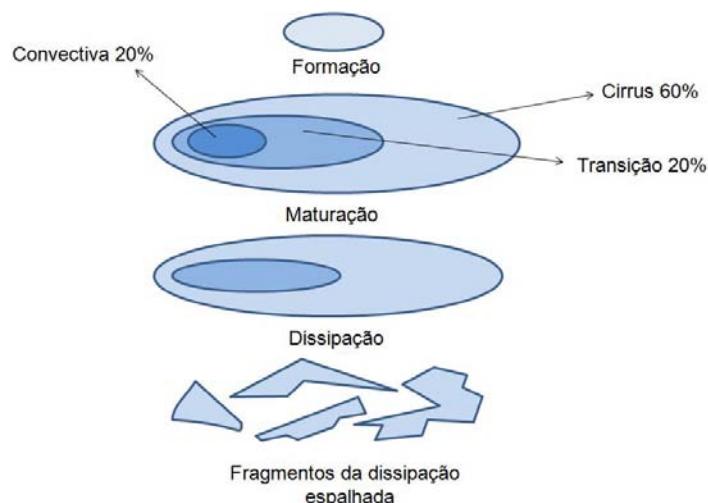


Figura 6.2 - Representação esquemática do ciclo de vida de um Sistema Convectivo.

Fonte: Adaptado de Machado e Rossow (1993).

Tabela 6.1 – Valores dos limiares utilizados para detecção e rastreio de Sistemas Convectivos pelo FORTRACC em graus Kelvin.

	Limiar Quente	Limiar Frio
Detecção precoce do SC	270	258
Rastreio do SC	258	235

Os dois intervalos fixos têm em comum um valor de temperatura: o menor limiar do primeiro intervalo coincide com o maior limiar do segundo intervalo. Neste caso a temperatura comum é de 258 K. Depois de definidos os limiares, são gerados aglomerados de pixels (clusters) segundo os seguintes critérios;

a) Rastreamento de SC: todos aqueles sistemas cujo tamanho em pixels seja superior a um valor mínimo de 10 pixels (definido no arquivo FORTRACC\_INPUT) para o limiar quente (258 K).

b) Detecção precoce de SC: todos aqueles sistemas cujo tamanho no limiar quente (270 K) seja superior a 10 pixels, mas cujos topos frios tenham tamanho inferior a 10 pixels. Também são classificados aqui os sistemas que tem menos de 10 pixels (o sistema é pequeno e ainda não é possível seu rastreamento).

Após inserir essas definições no algoritmo do FORTRACC ele foi executado e a imagem de satélite foi transformada em uma imagem com apenas 3 informações: ausência de SC, presença de SC e ou CC. Baseado nesse critério, os pixels são classificados com características similares, representando os grupos ou “clusters” de SC e CC da imagem (Machado et al., 1993, Laurent et al., 2002, Mathon e Laurent, 2001, Machado et al., 2004, Machado e Laurent, 2004).

### 6.2.2 Cálculo de Propriedades Físicas dos Sistemas Convectivos

Com os limiares de temperaturas escolhidos e o tamanho mínimo do SC para rastreamento definido, o algoritmo do Fortracc é executado. A saída de dados é um arquivo de texto contendo as propriedades físicas dos SC subdivididas em

informações morfológicas, radiativas e de localização de cada família de SC rastreado pelo algoritmo.

Dentre as várias propriedades físicas determinadas pelo algoritmo, as utilizadas para a execução deste trabalho foram: Tamanho dos SC, Raio efetivo, Fração Convectiva, excentricidade, Temperatura média e mínima dos SC, as coordenadas do centro de massa e data e hora de cada família de SC rastreado.

Os tamanhos dos SC são informados no arquivo de saída de dados do algoritmo em numero de pixels, o qual leva em conta as coordenadas geográficas do centro geométrico do SC.

O Raio Efetivo ( $R_e$ ) corresponde ao raio de um circulo cuja área seja igual à área do SC. A área do SC utilizado no cálculo é dada em pixels, e o Raio Efetivo pode ser obtido pela 6.1.

$$R_e = \sqrt{\frac{Area \times 16}{\pi}} \quad (6.1)$$

A fração convectiva ( $FC$ ), obtida pela equação 6.2, é determinada pela razão entre o tamanho médio das células convectivas e a área total dos SC.

$$FC = 100 \times N_{cc} \left( \frac{R_c}{R_e} \right)^2 \quad (6.2)$$

Sendo:  $N_{cc}$  é o número de células convectivas e  $R_c$  o raio efetivo das células convectivas.

A Excentricidade (*Ecce*) é baseada na representação da razão entre o eixo menor e maior do SC. Abaixo são mostradas as expressões que o algoritmo utiliza para a determinação da excentricidade.

$$xx_i = LON_i \times \cos(\beta) + LAT_i \times \sin(\beta) \quad (6.3)$$

$$yy_i = LON_i \times \sin(\beta) + LAT_i \times \cos(\beta) \quad (6.4)$$

onde  $\beta$  é obtido pela equação 6.5,

$$\beta = \tan^{-1}(\alpha) \quad (6.5)$$

e  $\alpha$  é determinado pela equação 6.6,

$$\alpha = \frac{N \sum LAT_i \times LON_i - LAT_i \sum LON_i}{N \sum LAT_i^2 - (\sum LAT_i)^2} \quad (6.6)$$

Sendo:  $LAT_i$  e  $LON_i$  a latitude e longitude em graus;  $N$  o número de pontos do sistema;  $\beta$  representa a inclinação do sistema. Após a determinação destes parâmetros pode-se determinar a  $Ecc$ .

$$Ecc = \left| \frac{xx(max) - xx(min)}{yy(max) - yy(min)} \right| \quad (6.7)$$

$$Ecc = \left| \frac{yy(max) - yy(min)}{xx(max) - xx(min)} \right| \quad (6.8)$$

Os parâmetros radiativos como a Temperatura média e mínima dos SC são expressas em Kelvin. Os parâmetros de localização como as coordenadas do centro de massa, data e hora, assim como os parâmetros radiativos, são obtidas diretamente do arquivo de saída de dados do algoritmo. Mais detalhes sobre as propriedades físicas dos SC rastreados pelo FORTRACC podem ser encontrados no Fortracc – guia do usuário (2004).

### 6.2.3. Método de Acompanhamento dos Sistemas Convectivos

O método de acompanhamento e deslocamento dos SC que o FORTRACC utiliza em seu algoritmo foi desenvolvido a partir da classificação do pixel da imagem levando em consideração os limiares de temperatura previamente escolhidos. Os limiares utilizados neste estudo foram descritos no item 6.2.1.

Este método utiliza o critério de identificação de um mesmo SC em uma imagem no tempo “ $t_1$ ” com uma imagem no tempo “ $t_2$ ”, e assim sucessivamente em quantas imagens forem observado o mesmo SC. O método baseia-se no critério de mínima superposição da área do SC em imagens sucessivas (Mathon & Laurent, 2001).

Após a identificação do mesmo SC no tempo “ $t_1$ ” e tempo “ $t_2$ ”, é calculado inicialmente a velocidade (km/h) do SC o qual considera o deslocamento da posição do centro de massa da imagem no tempo “ $t_1$ ” com a posição do centro de massa da imagem no tempo “ $t_2$ ” e assim para as próximas imagens enquanto existir o SC. O cálculo é basicamente a diferença da posição do centro de massa dividido pelo tempo das imagens consecutivas, que é de 15 minutos para o GOES-10 e 30 minutos para o GOES-12.

Neste estudo, o número mínimo de pixels considerados para que o SC seja identificado, rastreado e acompanhado pelo algoritmo foi de 10 pixels (aproximadamente  $160 \text{ km}^2$ ). Para considerar que o SC no tempo “ $t_1$ ” seja o mesmo no tempo “ $t_2$ ”, sua área deve estar sobreposta pelo menos 15% do tamanho do SC em uma imagem anterior respeitando o limite mínimo de 10 pixels.

O FOTRACC considera a seguinte classificação para identificar e rastrear os SC observados em imagens sucessivas: Novos ou de Geração Espontânea, Continuo, Separado e Fusão dos SC. Abaixo são descritos cada tipo da classificação.

- Sistema novo ou de Geração Espontânea (N): é aquele SC que foi identificado em uma imagem no instante “ $t_{(i)}$ ” e não estava presente na imagem em um instante “ $t_{(i-1)}$ ” ou não cumpliu com o critério de mínima superposição dos SC (Figura 6.3a);
- Continuidade (C): é aquele SC que foi identificado em uma imagem no instante “ $t_{(i)}$ ” e estava presente em uma imagem no instante “ $t_{(i-1)}$ ”, cumprindo com o critério de mínima superposição dos SC (Figura 6.3b);
- Separado (“Split”, S): é o SC que quando no instante “ $t_{(i)}$ ”, cumpre com o critério de mínima superposição dos SC, mas no instante “ $t_{(i+1)}$ ” verifica-se a

presença de 2 ou mais SC, esse processo é considerado como sistema que se separou (Split). Nesse caso, o maior sistema no instante “ $t_{(i+1)}$ ” é considerado como continuidade do sistema da imagem no instante “ $t_{(i)}$ ” (Figura 6.3c).

- Fusão (“Merge”, M): está situação é contraria a dos SC Separados. Quanto no instante “ $t_{(i)}$ ” tem a presença de dois ou mais SC que cumprem com o critério de mínima superposição e se fundem em um só sistema no tempo “ $t_{(i+1)}$ ”, considera-se este processo como fusão (Merge) dos SC (Figura 6.3d).

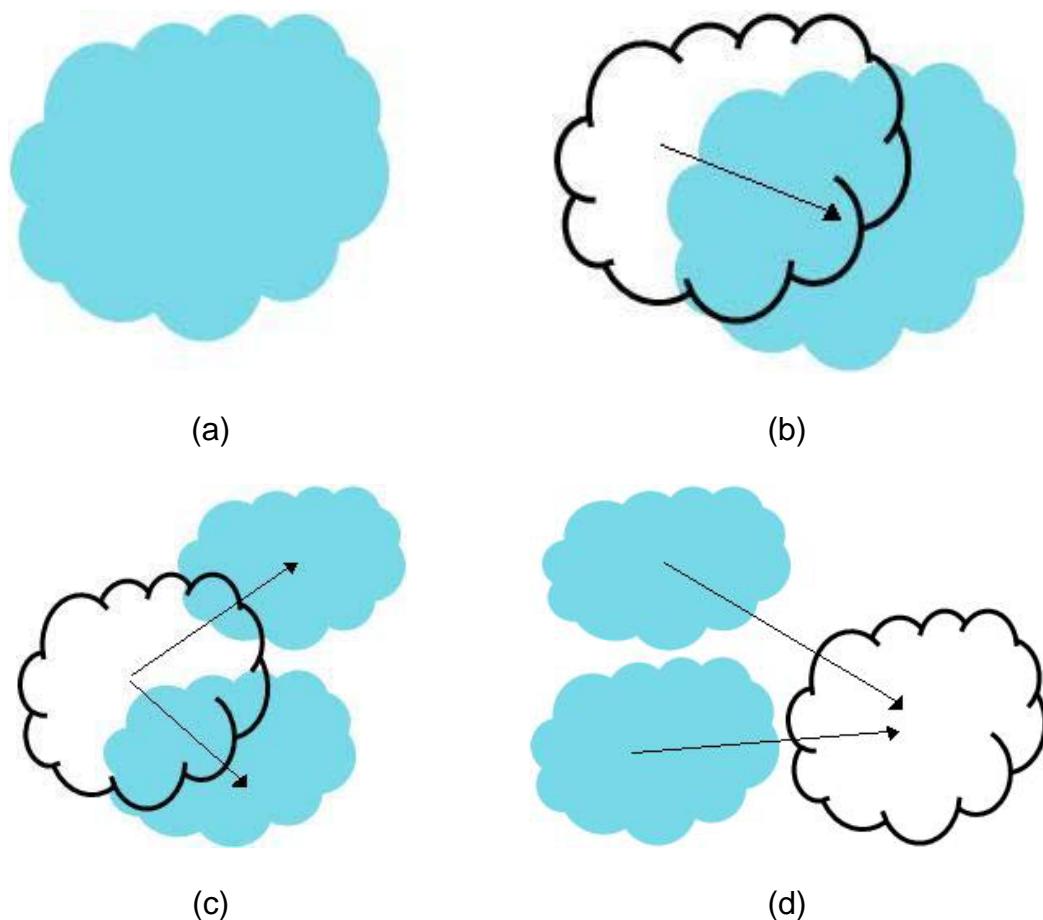


Figura 6.3 - Método de identificação e acompanhamento dos Sistemas Convectivos. (a) Novo; (b) Continuidade; (c) Separável e (d) Fusão.

### 6.2.4 Taxa de Expansão Normalizada dos Sistemas Convectivos

A taxa de expansão normalizada dos SC é um parâmetro na qual se baseia na análise do crescimento (ou decaimento) relativo do SC com respeito a sua área média em um intervalo de tempo (para imagens GOES-12 de 30 minutos e GOES-10 de 15 minutos). Quando o valor deste parâmetro é positivo, indica que o sistema está em processo de expansão, se o valor estiver próximo ou igual a zero o SC atingiu a sua maturação e se o valor encontrado for negativo, o SC está em fase de dissipaçāo.

Nesta etapa o objetivo é a geração de um modelo de vida dos SC baseado na informação estatística de seu comportamento. Com base nos estudos de Machado e Laurent (2004), o modelo do ciclo de vida de um SC pode ser estimado a partir da equação 4.

$$A_e = \frac{1}{\bar{A}} \left( \frac{\partial A}{\partial t} \right) \quad (6.4)$$

sendo que:

$A_e$  é a taxa de expansão normalizada do SC ( $10^{-6} \cdot S^{-1}$ );

$\bar{A}$  é a área média do SC entre duas imagens consecutivas em pixels;

$\partial A$  é a variação da área do SC entre duas imagens consecutivas em pixels;

$\partial t$  é o intervalo de tempo entre essas duas imagens consecutivas em segundos.

Os valores encontrados pela equação 6.4 são tipicamente uma função linear, descrita abaixo.

$$A_e = \frac{1}{\bar{A}} \left( \frac{\partial A}{\partial t} \right) = mt + b \quad (6.5)$$

Vila & Machado (2005) realizaram um estudo estatístico agrupando os SC em quatro classes, respeitando o tempo total do ciclo de vida, sendo, menores que 2 horas, entre 2 e 4.4 horas, de 4.4 a 8.4 horas ou maiores que 8.4 horas. Para cada

classe o valor médio da expansão inicial dos SC foi calculado, mostrando os instantes em que os valores do parâmetro  $A_e$  eram de máxima/mínima expansão, assim construíram um conjunto de curvas (Figura 6.4) com o valor de cada  $A_e$  para cada classe considerada. Machado & Laurent (2004) afirmam que a área que o SC terá nas próximas horas é dependente do valor da expansão inicial, ou seja, com base na expansão inicial e nas curvas da Figura 6.4, pode ser feita a primeira estimativa do tempo total do ciclo de vida do SC.

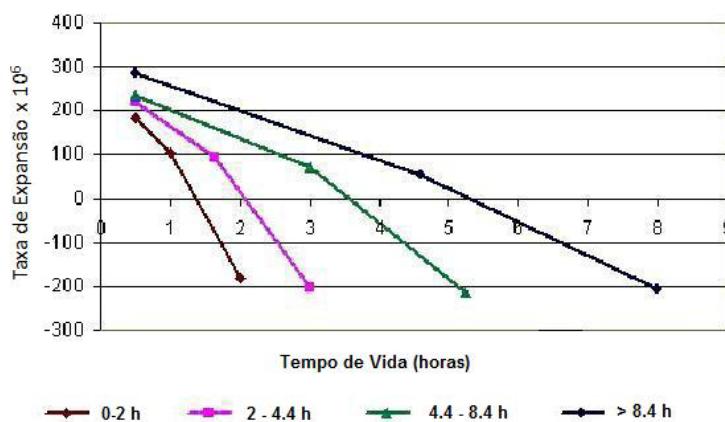


Figura 6.4 – Variação da área com o tempo de vida total do SC. Valores positivos/negativos indicam crescimento/decaimento do SC.

Fonte: Adaptado de Vila & Machado (2005)

### 6.3. Diferença dos canais Infravermelho e Vapor d'água do Satélite GOES

Como foi descrito no item 2.3, estudos tentam relacionar as diferenças de temperatura de brilho dos canais Vapor d'água e Infravermelho com nuvens penetrativas ou de convecção profunda. Schmetz et al. (1997) sugeriram que diferenças positivas entre os canais WV-IR somente é possível quando as nuvens de convecção profundas chegam a tropopausa e, assim, injetam umidade para a estratosfera. Petersen & Rutledge (1998) afirmam que as descargas atmosféricas estão associadas com a presença de grandes partículas de gelo e fortes correntes ascendentes na região de “mistura” (0 a -20°C). Nuvens com grande profundidade

vertical são responsáveis por uma alta taxa de descargas atmosféricas (Abdoulaev et al., 2001).

O canal do Infravermelho está localizado na faixa denominada “janela atmosférica”, uma região do espectro eletromagnético em que a atmosfera terrestre é transparente e absorve a radiação terrestre. Já o canal de vapor d’água está situado no centro da faixa de absorção do vapor d’água, assim a temperatura observada por este canal é a temperatura que o alvo emite menos a radiação que foi absorvida pelo vapor d’água atmosférico. Dessa maneira, normalmente as diferenças entre os canais WV-IR são negativas, no entanto, estudos como os de Schmetz et al. (1997), Kurino (1996) e Setvak et al. (2007) demonstram que as diferenças positivas são possíveis e são um bom preditor de nuvens com convecção profunda.

Tendo como base estes estudos sobre as diferenças entre os canais IR-WV e a atividade convectiva, os dados de satélite e descargas atmosféricas foram combinados para verificar essas teorias na região de estudo deste trabalho. Para isso, os dados de satélite foram integrados com os de descargas atmosféricas considerando um intervalo de tempo de 15 minutos antes e 15 minutos após a varredura do satélite.

Após o processamento dos dados, foram criados arquivos texto divididos nas estações do ano contendo informações das descargas atmosféricas com as respectivas diferenças de temperatura de brilho dos canais IR e WV, onde posteriormente foram analisadas as relações encontradas para nuvens de tempestade.

## 7. ANÁLISE DAS DIFERENÇAS NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE SISTEMAS CONVECTIVOS QUE NÃO SE TORNARAM TEMPESTADES E SISTEMAS CONVECTIVOS QUE SE TORNARAM TEMPESTADES

Neste capítulo serão discutidas as relações estatísticas entre os parâmetros morfológicos e radiativos dos SC que se tornaram tempestades e SC que não se tornaram tempestades. Para viabilizar as análises que se seguem nos próximos itens foram utilizadas as informações que foram rastreadas pela técnica FORTRACC integrados com dados de descargas atmosféricas. Primeiramente será apresentada uma classificação dos SC, após foi feita uma análise do ciclo diurno do SC que foram classificados como SC novos, posteriormente foram analisadas os parâmetros físicos e radiativos dos sistemas, também foi analisado os tamanhos médios dos SC durante o ciclo de vida dos SC, por ultimo foram analisadas as trajetórias e as descargas atmosféricas dos SC.

### 7.1. Classificação dos Sistemas Convectivos

Antes de fazer a análise dos SC faz-se necessária a distinção entre SC e famílias de SC. Quando no texto estiver escrito SC refere-se as suas características em um espaço de tempo, já quando se refere a famílias de SC leva-se em consideração o agrupamento desses SC através do método de acompanhamento no tempo (descrito no item 6.2.3). Para que os SC fossem analisados, eles tiveram que ter o seu centro de massa localizado dentro do perímetro de estudo (descrito no item 4). O período analisado foi de dezembro de 2005 a maio de 2009, totalizando 3 anos e meio de observações de SC.

Os SC foram classificados em escala mensal, mostrando todos os SC observados para o período de estudo, sendo rastreado um total de 142.301 famílias de SC distribuídos conforme a Figura 7.1. Observa-se o maior número de ocorrência de famílias de SC, ou seja, maior atividade convectiva, para os meses de verão (DJF) e primavera (SON) para todos os anos analisados. Os meses de inverno (JJA) foram os que obtiveram a menor ocorrência de famílias de SC, portanto, a menor atividade convectiva, sendo rastreadas apenas 13.341 famílias de SC, seguidos dos meses de outono (MAM) que registraram 40.422, para o período deste estudo. O

mês que apresentou o maior número de famílias de SC rastreadas foi o mês de março, registrando a ocorrência de 6.737 famílias de SC. Os menores registros de famílias de SC foram registrados nos meses de julho de 2006 e julho de 2008, 874 e 858 respectivamente.

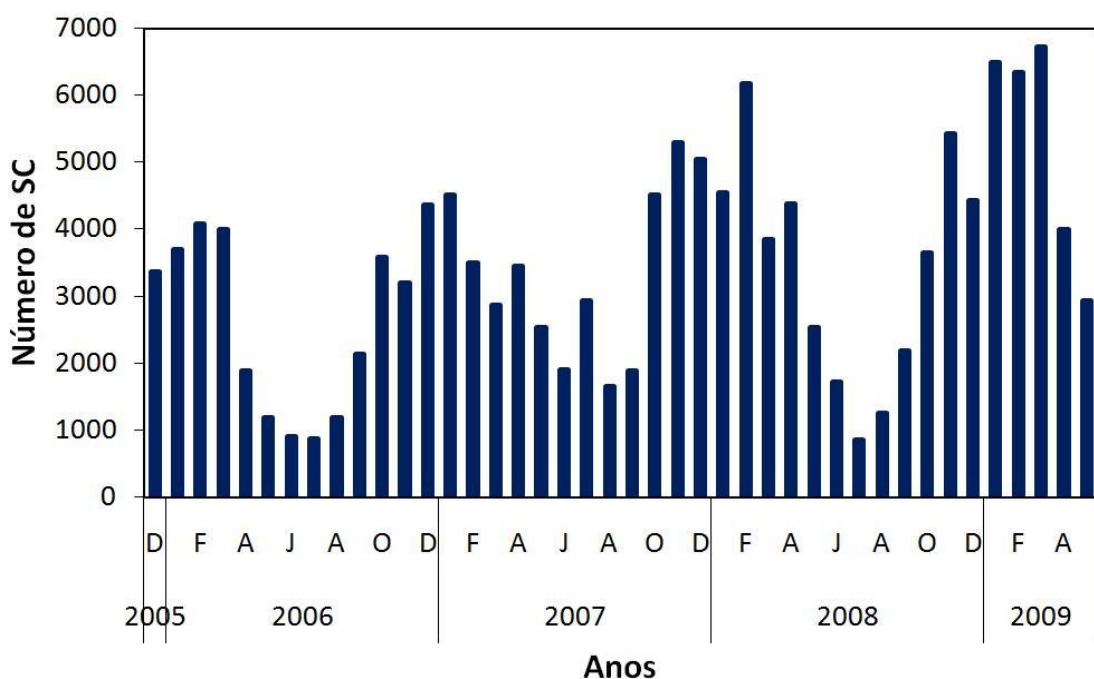


Figura 7.1 - Número de famílias de sistemas convectivos distribuídos mensalmente para os 3 anos e 6 meses de dados analisados.

Conforme a Tabela 7.1, as estações de verão e primavera representaram aproximadamente 65 % da atividade convectiva enquanto que as estações de inverno e outono representaram 35% da atividade convectiva. Esta relação da atividade convectiva já foi observada e é bem semelhante a outros estudos (Maddox, 1980; Velasco e Fritsch, 1987; Vila, 2004; Mattos, 2009) no qual verificaram que a maior atividade convectiva ocorre nos meses de verão enquanto que a menor atividade convectiva ocorre no inverno. Segundo Mattos (2009) o favorecimento da atividade convectiva se deve a variabilidade sazonal da insolação que é maior nos meses de verão e menor nos meses de inverno devido ao ângulo de inclinação solar.

Tabela 7.1 – Freqüência relativa da ocorrência das famílias de SC, por estação do ano, rastreados pelo FORTRACC durante o período de estudo.

	DJF	%	MAM	%	JJA	%	SON	%
2006	11.156	37.0	7.085	23.5	2.979	9.9	8.925	29.6
2007	12.404	31.4	8.860	22.4	6.516	16.5	11.699	29.6
2008	15.787	37.9	10.790	25.9	3.846	9.2	11.276	27.0
2009	17.291	-	13.687	-	-	-	-	-

Conforme a classificação de SC que o método de acompanhamento do algoritmo do FORTRACC considera, descrito na metodologia no item 6.2.3, os tipos de SC aqui classificados são: Novos ou de geração espontânea, Contínuos, Separados ou Split e Fundidos ou Merge.

As Figuras 7.2 a-d ilustra o número de SC distribuídos mensalmente para os diferentes tipos de SC classificados. Essa classificação foi feita levando em conta a primeira aparição do SC no arquivo das famílias gerado pelo FORTRACC. Observa-se que as curvas de distribuição de todos os tipos de SC (Figuras 7.2 a-d) seguem um mesmo padrão, ou seja, maiores valores para os meses quentes e menores valores para os meses frios. Sendo que as famílias de SC que tiveram sua primeira aparição na imagem de satélite, ou seja, SC Novo ou de geração espontânea e as famílias dos SC que se Separaram, foram os que apresentaram as maiores ocorrências de famílias de SC, representando aproximadamente 68% do SC observados no período. Dos 32% restantes de famílias de SC, aproximadamente 75% foram para SC Contínuos e 25% para SC que sofreram fusão.

Para os SC Novos (Figura 7.2a) juntamente com os SC que se Separaram (Figura 7.2c) foram observados valores máximos nos meses de verão e primavera, sendo registrados os máximos de 7.428 famílias de SC para o mês de janeiro para SC Novos e 8.919 famílias de SC também para o mês de janeiro dos SC que iniciaram a ser rastreados como separação de outro SC. As famílias de SC que foram classificadas como Contínuos nos dados de saída do FORTRACC tiveram valores semelhantes aos dos meses de verão das famílias de SC Novos. Os SC classificados como Fusão de outros SC, foram os que obtiveram as menores ocorrências de SC em todos os meses do ano com valor médio de 950 famílias por mês.

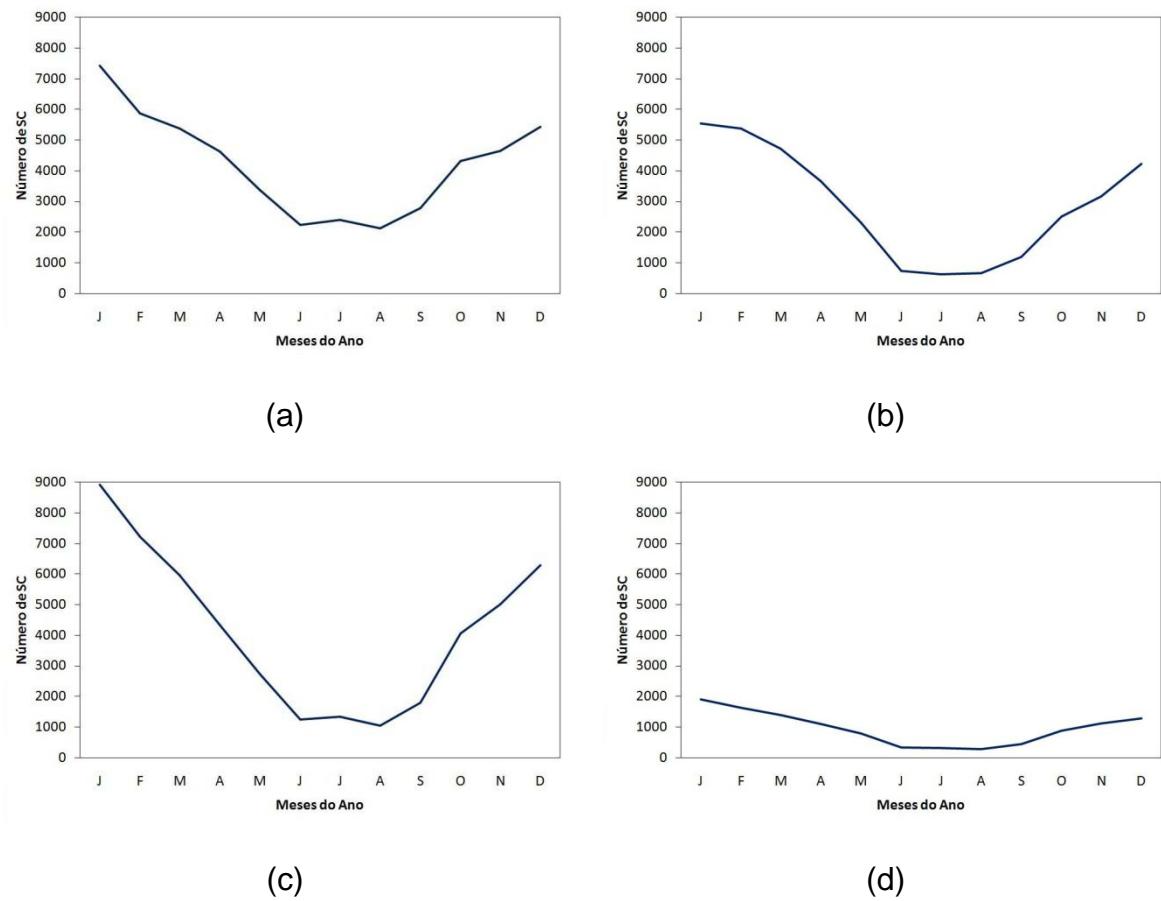


Figura 7.2 - Número de famílias de sistemas convectivos distribuídos mensalmente. (a) SC Novos ou de geração espontânea; (b) SC que Continuaram em imagens sucessivas; (c) SC que se Separaram em imagens sucessivas e (d) SC que se fundiram em imagens sucessivas.

## 7.2. Caracterização do Ciclo Diurno de Nascimentos dos Sistemas Convectivos

Para avaliar o comportamento do ciclo diurno da atividade convectiva dos SC utilizaram-se apenas aqueles SC que nasceram de geração espontânea (conforme classificação descrita no item 6.2.3). Dessa maneira, aqueles SC que foram gerados por meio de separação (split) ou fusão (merge) de SC foram excluídos. Segundo Machado & Laurent (2004), essa limitação na análise dos SC garantem que o crescimento inicial dos SC esteja associado à sua própria dinâmica interna. A

exclusão dos SC que se separaram e se fundiram reduziu o número de famílias de SC analisados, sendo que do total de 142.301 famílias de SC apenas 48.939 foram consideradas. As análises que se seguem nos próximos itens serão sempre levando em consideração apenas as 48.939 famílias de SC gerados espontaneamente.

As famílias de SC foram separadas nas estações do ano e em SC que não se tornaram tempestades e SC que se tornaram tempestades. Nota-se que as ocorrências de nascimentos espontâneos de SC que não se tornaram tempestade (Figura 7.3a-d) podem ocorrer a qualquer hora do dia, embora se possa observar que o horário das 17 TMG é ligeiramente superior em comparação com os outros horários em qualquer estação do ano.

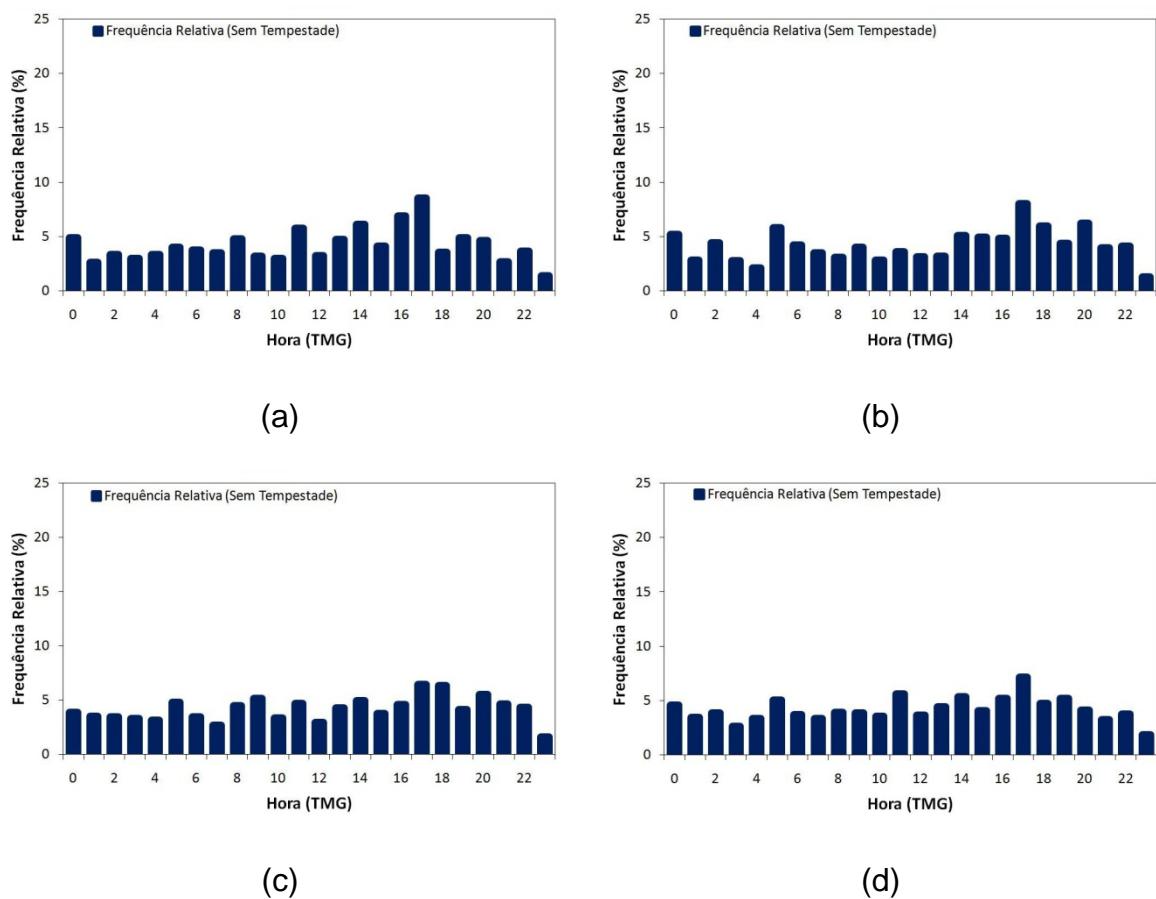


Figura 7.3 - Distribuição horária da freqüência relativa de nascimentos de SC novos rastreados pelo FORTRACC para todo período de estudo que não se tornaram tempestades. (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera.

A figura 7.4a-d ilustra os SC convectivos que se tornaram tempestade. Como se pode observar, a atividade convectiva em que se observa a presença de descargas elétricas também pode ocorrer a qualquer hora do dia. No entanto, existe uma preferência maior de nascimentos no início (15/16 TMG) da tarde com um segundo pico no início da noite (19/20 TMG), isso pode ser observado para qualquer estação do ano. No período das 15 as 20 TMG observam-se a maior atividade convectiva para qualquer estação do ano, sendo mais de 67% para a estação do verão, aproximadamente 63% para o outono, 40% para o inverno e 64% para a primavera. Os horários em que se observam os menores valores de freqüência de nascimentos espontâneos é a madrugada, com exceção do inverno que para o período de análise deste estudo apresentou atividade convectiva considerável na madrugada. Provavelmente isso se deve ao fato de que foram observados poucos casos de SC com tempestades nesta estação, sendo que possivelmente para um período maior de análise esse resultado sofra mudança.

O comportamento da atividade convectiva observada nesse trabalho é semelhante aquela encontrada em trabalhos como o de Mattos (2009), Scaglione (2006), Vila (2005) e Palmeira (2005). Este comportamento da atividade convectiva se deve ao horário de máxima insolação, mostrando que a convecção é diretamente dependente das condições termodinâmicas atuantes na atmosfera.

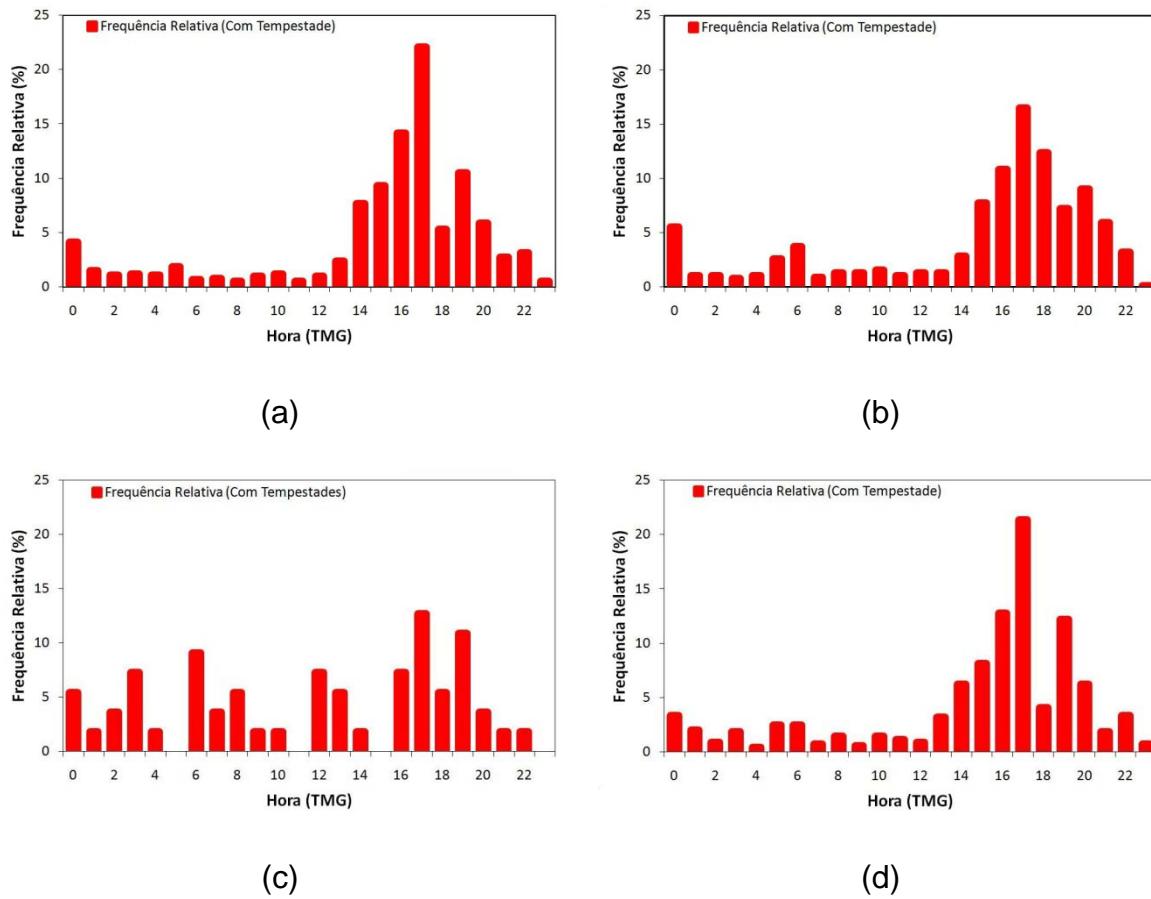


Figura 7.4 - Distribuição horária da freqüência relativa de nascimentos de SC novos rastreados pelo FORTRACC para todo período de estudo que se tornaram tempestades. (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera.

### 7.3. Parâmetros Físicos dos Sistemas Convectivos

#### 7.3.1. Tamanhos dos Sistemas Convectivos

Os tamanhos dos sistemas foram obtidos por meio do cálculo do raio efetivo dos SC, descrito no item 6.2.2. A Figura 7.5a-d ilustra a distribuição dos tamanhos máximos dos sistemas, para SC que se tornaram tempestades e SC que não se tornaram tempestades, divididos nas estações do ano. Como se pode observar na Figura 7.5, a maior freqüência dos tamanhos máximos em todas as estações do ano para SC que não se tornaram tempestades (barra azul) ocorre para tamanhos de 7 a 17 km, seguidos pelos SC com tamanhos entre os intervalos de 17-27 e 27-37 km

de raio. Para as estações de verão, outono e primavera (Figura 7.5a,b,d), os SC que não se tornaram tempestades tiveram aproximadamente 87% das freqüências dos tamanhos máximos entre o intervalo de 7 a 37 km de raio, enquanto os meses de inverno (Figura 7.5c) tiveram, para este mesmo intervalo de tamanho, 85%.

Para os tamanhos máximos dos SC que se tornaram tempestades (barra vermelha), foi observada uma maior freqüência para SC com tamanhos variando entre 17 e 27 km de raio para as estações de verão, outono e primavera, sendo que para o inverno a maior freqüência se observou no intervalo entre 27 e 37 km de raio. Os tamanhos máximos dos SC que se tornaram tempestades no intervalo entre 7 e 37 km de raio apresentaram menores freqüências de ocorrência quando comparados com os SC que não se tornaram tempestades, sendo de aproximadamente 60% para os meses de verão, outono e primavera e para os meses de inverno em torno de 46%, este fato indica que SC que se tornam tempestades normalmente são maiores que SC que não se tornam tempestades.

Analizando os tamanhos máximos maiores que 57 km de raio se obtém freqüências de ocorrências maiores para os SC que se tornaram tempestades, sendo de aproximadamente 10% para a estação de verão, 13% para as estações de primavera e outono e 20% para a estação de inverno. Os SC que não se tornaram tempestades tiveram freqüências em torno de 2,4% (primavera), 2,6% (outono) e 3,1% (verão e inverno).

Uma relação de grande importância que se pode observar entre as freqüências de ocorrência dos SC que se tornaram tempestades e aqueles que não se tornaram tempestades é que para um intervalo de tamanho entre 27 e 107 km de raio as freqüências sempre foram maiores para SC que se tornaram tempestades. Portanto, essa relação indica que os tamanhos dos SC podem estar relacionados com a atividade elétrica nas nuvens, sendo que quanto maior for os tamanhos dos SC, maior é a probabilidade de descargas atmosféricas.

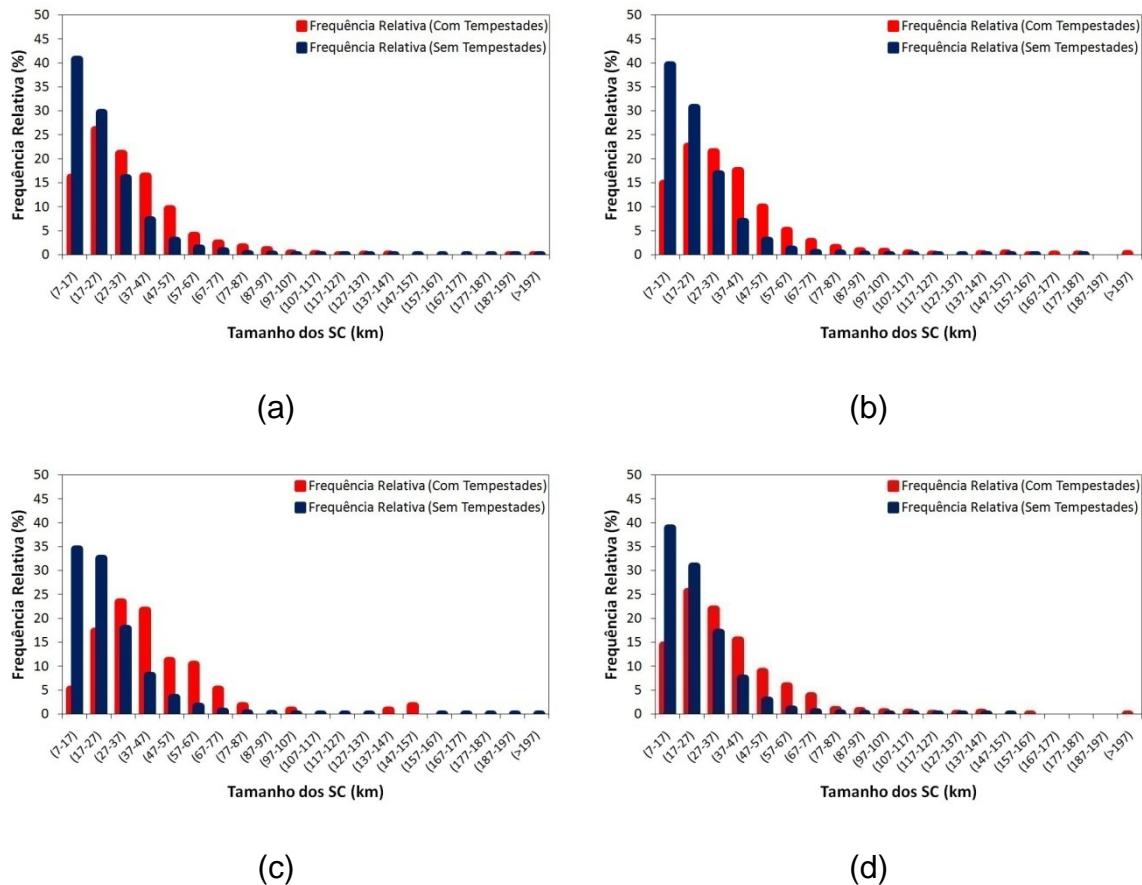


Figura 7.5 - Freqüência Relativa dos tamanhos máximos dos SC (km) divididos sazonalmente para SC que se tornaram tempestades (barra vermelha) e SC que não se tornaram tempestades (barra azul). (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera.

### 7.3.2. Taxa de Expansão dos Sistemas Convectivos

A área de expansão ( $Ae$ ), descrita no item 6.2.4, fornece uma estimativa da divergência dos ventos em níveis superiores (Wallace & Hobbs, 2006), ou seja, maiores área de expansão (decaimento) correspondem a maiores divergência (convergência). A variação média da área de expansão (decaimento) foi calculada para diferentes intervalos de durações máximas dos SC e para cada estação do ano, sendo que o tempo de vida dos SC foi normalizado para podermos compará-los nos diferentes tempos de vida.

Foi observado que para qualquer estação do ano, a  $Ae$  é maior no início do ciclo de vida e decresce com o passar do tempo, sendo esse resultado semelhante

aquele encontrado por Machado et al. (1998). Os SC que se tornaram tempestades tiveram a maior expansão inicial em todas as estações e em todos os intervalos de tempo. Fortes expansões indicam fortes movimentos ascendentes que contribuem para o carregamento do campo elétrico da nuvem, uma vez que a nuvem tenha carga elétrica suficiente para romper a rigidez dielétrica do ar ocorre à descarga. Segundo alguns estudos (Machado et al, 2004, Vila, 2005) o valor inicial da Ae pode ser utilizado como um parâmetro previsor do tamanho máximo e duração dos SC. Outro fator importante dessa variável é que fornece a informação do estágio de desenvolvimento do SC, uma vez que quando o valor positivos de Ae indicam o estágio de crescimento dos SC, valores zero indicam o estágio de maturação e valores negativos indicam o estágio de dissipaçāo dos SC.

A figura 7.6a ilustra os valores da Ae para os SC que se tornaram (não se tornaram) tempestades para os intervalos de duração de 1-2 (linha preta continua para SC que se tornaram tempestades e tracejada para SC que não se tornaram tempestades), 2-4 (linha azul continua para SC que se tornaram tempestade e tracejada para SC que não se tornaram tempestades) e 4-8 horas (linha verde continua para SC que se tornaram tempestades e tracejadas para SC que não se tornaram tempestades). Podemos observar que para o intervalo de 1-2 horas a Ae inicial média dos SC que se tornaram tempestades, nas estações de verão, outono e primavera, decaíram fortemente no estágio inicial (0.0-0.3), mantiveram-se estáveis no estágio maduro (0.3-0.7) e voltaram a cair no estágio de dissipaçāo (0.7-1.0). Já a Ae dos SC que se tornaram tempestades no intervalo de 2-4 horas observou-se uma expansão maior, nos meses de vera, após a expansão inicial ainda no estágio de iniciação, mas volta a cair de forma linear após a máxima expansão. As Ae dos SC que se tornaram tempestades do intervalo de 4-8 horas apresentaram expansões médias positivas em todo o estágio inicial e durante a metade do tempo do estágio de maturação, no estágio de dissipaçāo apresentaram apenas valores negativos da Ae média, o que é esperado.

Os SC que não se tornaram tempestade tiveram sempre a evolução da Ae média decrescente após o estágio inicial, para todos os intervalos de tempo e para todas as estações, o que pode se observar é que quanto maior for o tempo de vida dos SC mais linear e o declínio das retas das Ae médias. Comparando os resultados encontrados com a Ae média dos SC que se tornaram ou não tempestades para a estação de verão com as figuras das estações de outono (Figura 7.6b) e primavera

(Figura 7.6d) verifica-se que as evoluções das curvas nos intervalos analisados são bastante semelhantes.

A estação de inverno, figura 7.6c, mostrou que as Ae médias dos SC que se tornaram tempestades são sempre maiores, durante todo o ciclo de vida, se comparadas com as Ae dos SC que não se tornaram tempestades. Foi observado que as curvas da Ae média de SC que se tornaram tempestades, após a expansão inicial, sofreram decaimentos em uma taxa menor que aqueles SC que não se tornaram tempestades.

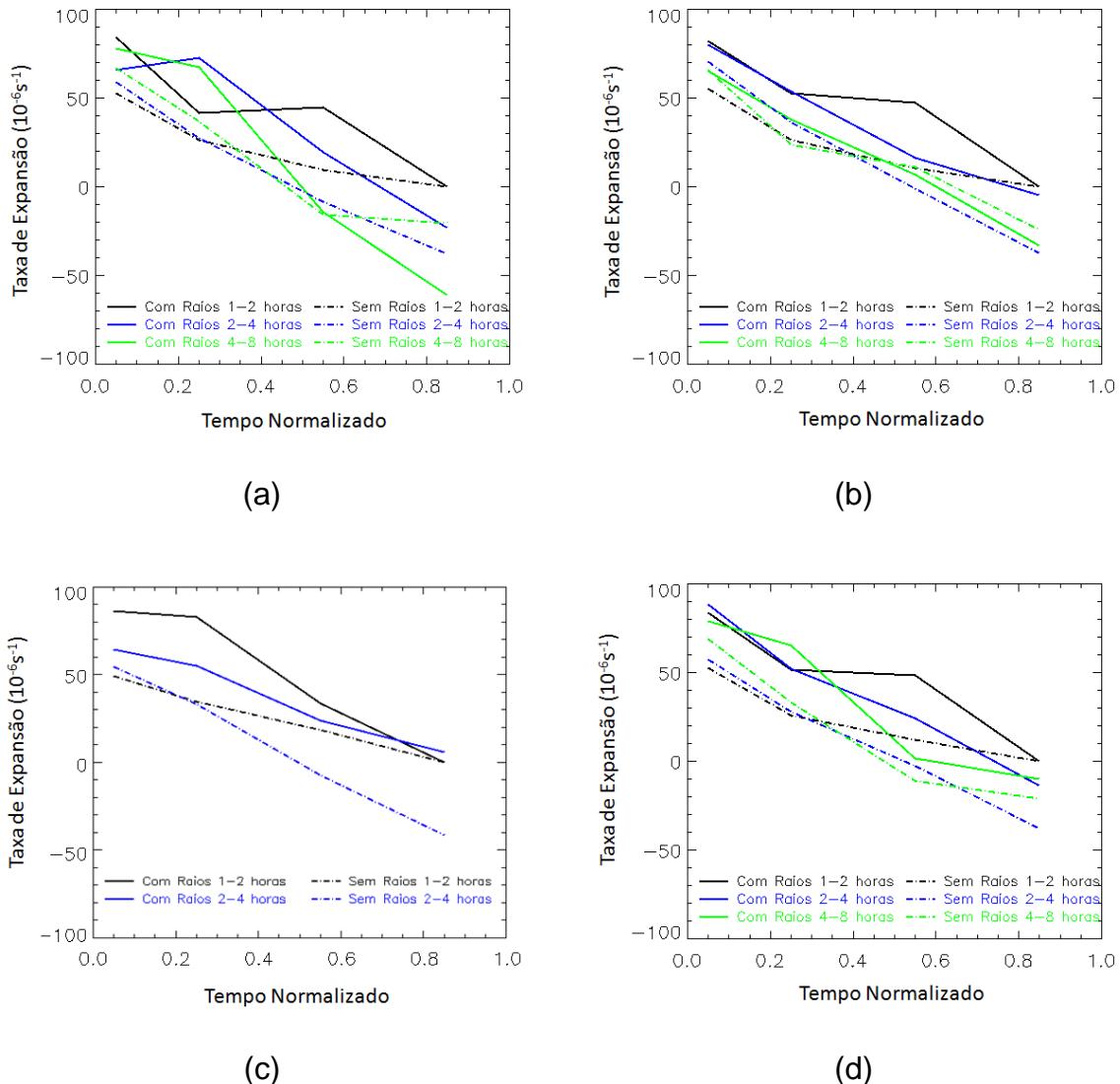


Figura 7.6 - Variação da Taxa de Expansão em função do ciclo de vida normalizado para Sistemas Convectivos com diferentes intervalos de tempo de vida. (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera.

A Figura 7.7a-d ilustra a freqüência relativa dos SC para cada estação do ano. As expansões ficaram concentradas entre  $-250.10^{-6}s^{-1}$  e  $250.10^{-6}s^{-1}$  representando mais de 95% dos casos considerados para análise. Independente da estação do ano foi possível observar que as expansões dos SC que não se tornaram tempestades ficaram próximas ou ligeiramente menores que 0, enquanto que os SC que vieram a se tornar tempestades apresentou expansões próximas ou ligeiramente maiores que 0. Para expansões menores ou iguais a zero as freqüências variaram entre 28 e 33 % para SC que não se tornaram tempestades enquanto que para os SC que se tornaram tempestade os valores ficaram próximos de 20%. Analisando as expansões entre 0 e  $100.10^{-6}s^{-1}$  foi observado que as expansões não apresentam uma distinção entre SC que não se tornaram tempestades e SC que se tornaram tempestades ficando entre 57 e 86% das observações, embora, como foi citado anteriormente as freqüências das expansões próximas a zero e ligeiramente positivas para os SC que se tornaram tempestades sempre são maiores dos sistemas que não se tornam tempestades. Quando são separadas apenas expansões maiores que  $100.10^{-6}s^{-1}$  foram observados que as freqüências dos SC que se tornam tempestades são, para qualquer estação do ano, sempre o dobro daquelas freqüências dos SC que não se tornaram tempestades, sendo que para os SC que não se tornaram tempestades as freqüências variaram entre 5 e 8% e para os SC que se tornaram tempestades as freqüências observadas foram de 11 a 16%.

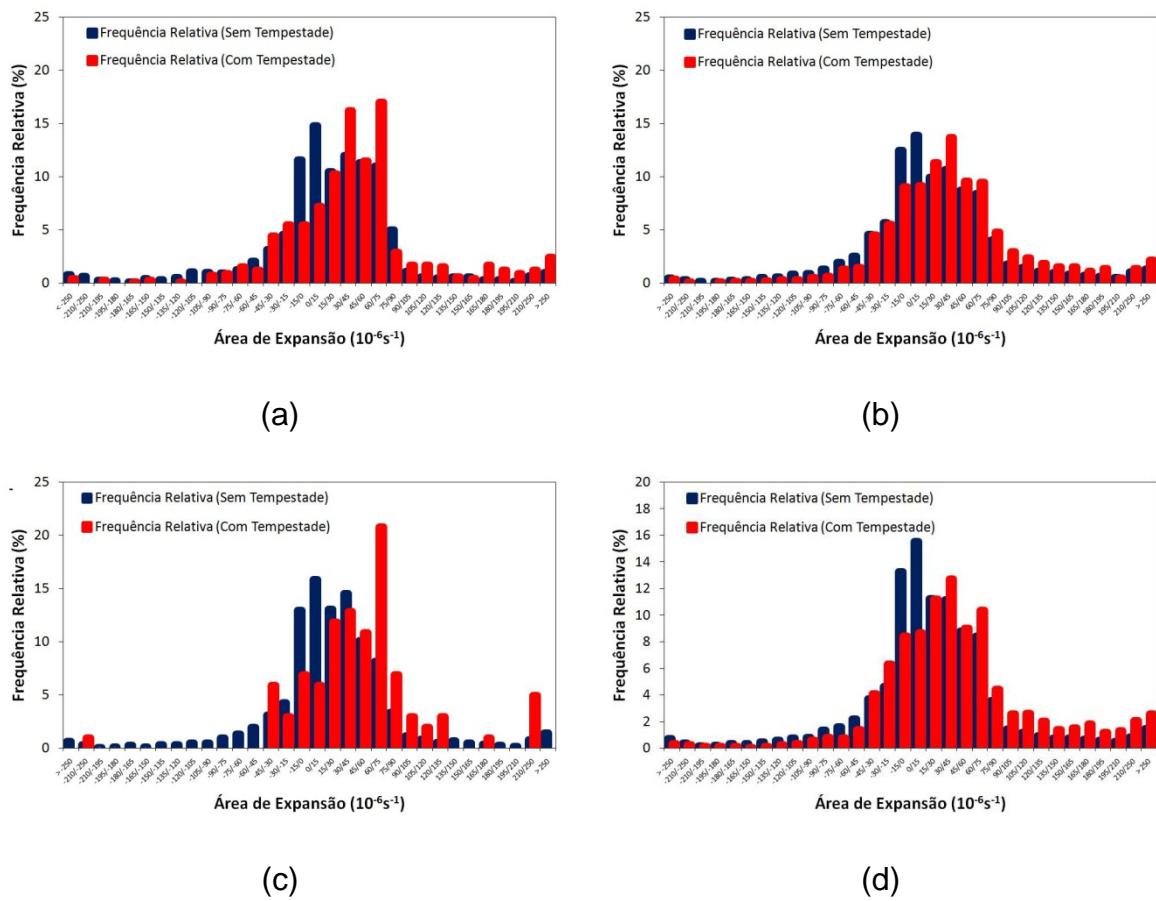


Figura 7.7 - Freqüência Relativa da área de expansão dos sistemas. (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera.

### 7.3.3. Temperatura Mínima dos SC

As freqüências relativas das temperaturas mínimas ( $T_{min}$ ) dos SC rastreados pelo FORTRACC, para cada estação do ano, estão ilustradas na Figura 7.8 a-h. Foi possível observar que para qualquer estação do ano as freqüências das  $T_{min}$  se aproximaram de uma distribuição normal com distintos picos máximos entre os SC que se tornaram tempestades e os que não se tornaram tempestades. Para a estação de verão (Figura 7.8a) a maior ocorrência de freqüência de  $T_{min}$  para SC que se tornaram tempestades ocorreu a 213K, sendo que aproximadamente 78% das  $T_{min}$  observadas para estes sistemas tiveram temperaturas menores ou iguais a 225K. Já os SC que não se tornaram tempestades (Figura 7.8b) foi observado uma relação inversa, ou seja, 83% das freqüências de  $T_{min}$  ocorreram em temperaturas maiores ou iguais a 225K, com pico máximo observado em 243K. A estação de outono apresentou os mesmos valores obtidos na estação de verão, tanto para SC que se

tornaram tempestades (Figura 7.8c), como SC que não se tornaram tempestades (Figura 7.8d). Os valores de freqüência de Tmin para SC que se tornaram tempestades para a estação de inverno (Figura 7.8e), apresentou uma distribuição mais homogênea quando comparada com as outras estações. Sendo que se escolhermos o limite de 225K, o mesmo utilizado nas estações anteriores, obtemos aproximadamente 51% das Tmin menores que este valor e o pico máximo foi observado em 218K. Para os SC que não se tornaram tempestades (Figura 7.8f) foi observado que pouco mais que 96% dos valores observados de Tmin são maiores que 225K. Não foram observados valores maiores que 240K nas Tmin dos SC que não se tornaram tempestades na estação de primavera (Figura 7.8g), sendo a Tmin de maior ocorrência 217K. Aproximadamente 70% das ocorrências de Tmin para SC que se tornaram tempestades foram menores que o valor limite (225K) proposto anteriormente para analise das outras estações, enquanto que para os demais SC 90% dos valores de Tmin se encontraram em temperaturas maiores que 225K.

As análises da Figura 7.8a-h permitiu observar que há uma clara distinção entre as Tmin dos SC que se tornam tempestades e SC que não se tornaram tempestades, sendo que se pode observar que a atividade elétrica das nuvens está diretamente relacionada com topes de nuvens mais frias, uma vez observado que as Tmin dos SC que se tornaram tempestades são em média 75% maiores que 225K.

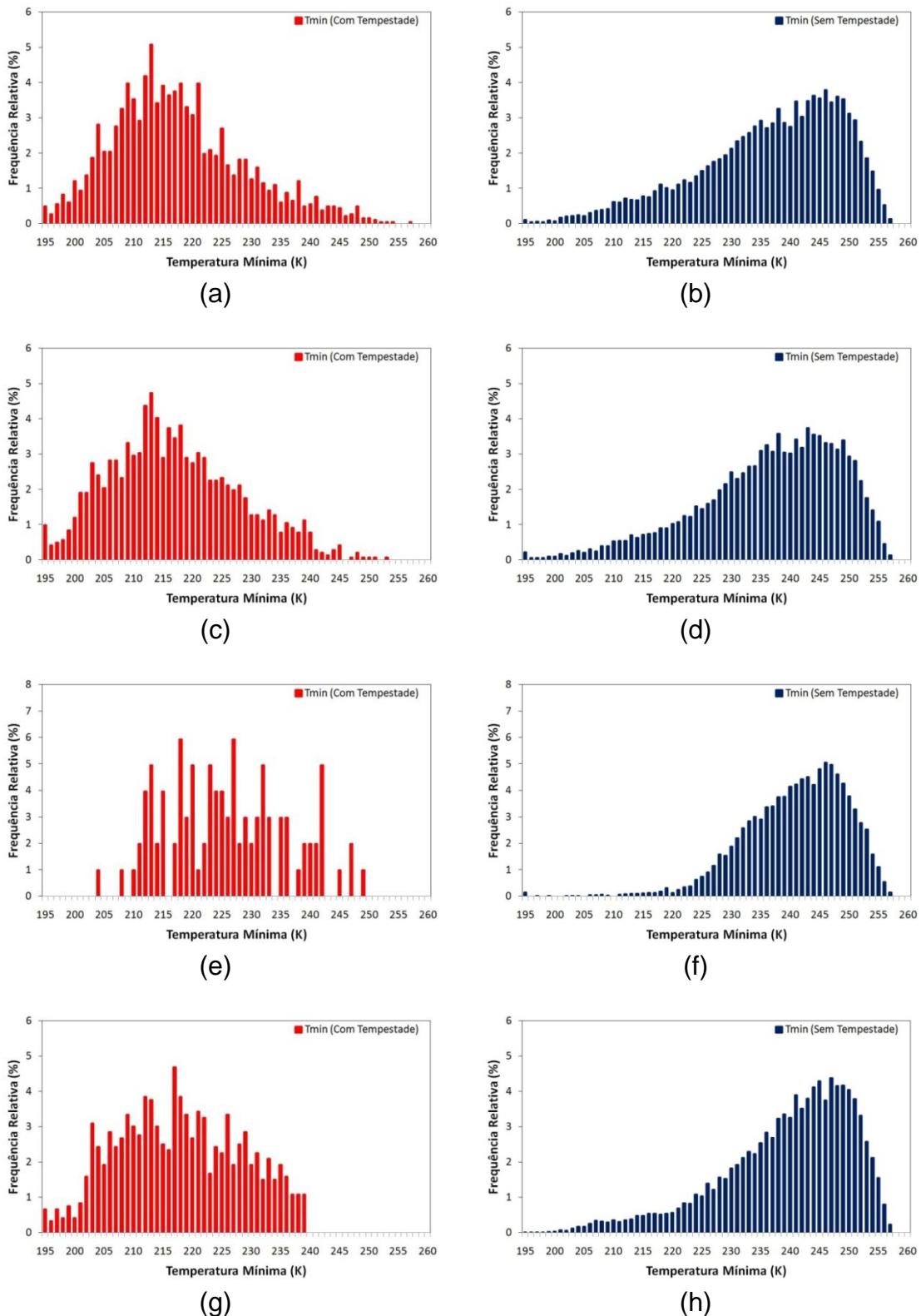


Figura 7.8 - Freqüência relativa da temperatura mínima dos SC que se tornaram tempestades (vermelho) e que não se tornaram tempestades (azul) para as estações do ano. Verão (a,b); Outono (c,d); Inverno (e,f); Primavera (g,h)

Os SC que se tornaram tempestades sempre apresentam Tmin médias menores que aqueles SC que não se tornaram tempestades. Como pode ser observado na Figura 7.9a, a estação de verão teve uma diferença de temperatura entre os SC que se tornaram tempestades e SC que não se tornaram tempestades de 13 a 20K para SC que tiveram tempo máximo de duração de 4 horas e, essa diferença foi de 4 a 6K para SC que duraram de 5 a 8 horas. Os meses de outono (Figura 7.9b) tiveram uma diferença entre as Tmin médias de 15 a 21K para os SC que tiveram ciclo de vida de até 4 horas, sendo que para os SC que duraram entre 5 e 7 horas tiveram diferenças de 7 a 12K e, os SC que tiveram tempo de vida de até 8 horas a diferença foi de 1.5K, sendo está, a menor diferença das Tmin encontradas em todas as 4 estações. A figura 7.9c ilustra a evolução das Tmin para o inverno. Observou-se que para SC que tiveram tempo de vida de até 3 horas, as diferenças de Tmin médias foi de 10 a 16K. Na estação de primavera (Figura 7.9d), os SC que tiveram um tempo de vida de até 4 horas, apresentaram uma diferença de Tmin entre os SC que se tornaram tempestades e SC que não se tornaram tempestades de 9 a 20K e, para SC com tempos de vida de 5 a 8 horas apresentou diferenças de 5 a 9K.

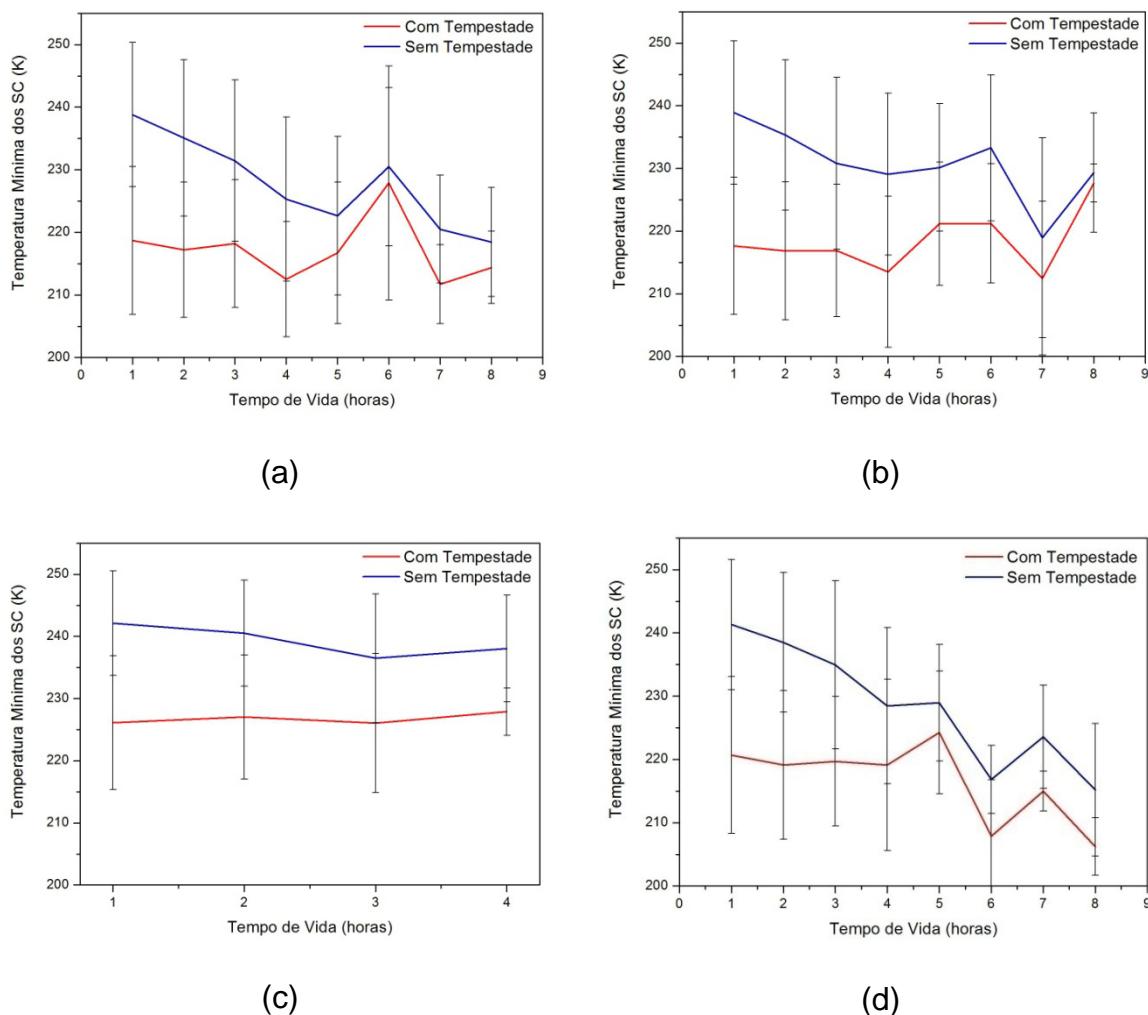


Figura 7.9 - Evolução temporal das temperaturas mínimas para SC que se tornaram tempestades (linha vermelha) e SC que não se tornaram tempestades (linha azul). (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera.

Tendo em vista as diferenças mostradas anteriormente, como a distribuição de freqüências distintas entre os SC que se tornaram e não tempestades e, as diferenças de Tmin médias entre os sistemas, buscou-se parametrizar a relação de ocorrência de tempestades com as Tmin. Dessa maneira, para os meses de verão (Figura 7.10) a função que melhor se ajustou a distribuição dos dados observados foi a quadrática de segunda ordem (equação 7.1), com um bom coeficiente de determinação entre o número médio de raios e Tmin,  $R^2 \approx 0.72$ .

$$NMR_{ver\ddot{a}o} = 0,907 * (Tmin)^2 - 11.73 * (Tmin) + 49,37 \quad (7.1)$$

Sendo que  $NMR_{ver\tilde{a}o}$  é o número médio de raios para o verão e  $Tmin$  é a temperatura mínima.

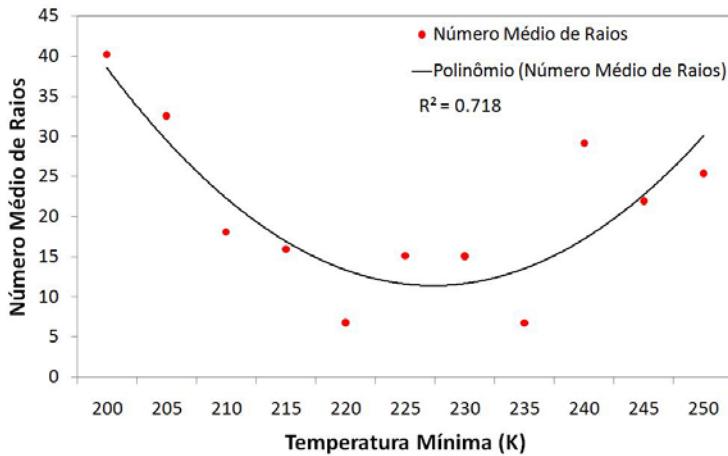


Figura 7.10 - Distribuição do número médio de raios em função da temperatura mínima para os meses de verão.

Na estação de outono, também foi possível parametrizar a relação entre número médio de raios e temperaturas com um alto coeficiente de determinação ( $R^2 \approx 0.95$ ). Como se pode notar na Figura 7.11 foi possível ajustar uma função exponencial na qual está descrita na equação 7.2.

$$NMR_{outono} = 61,1 * \exp(-0,34 * (Tmin)) \quad (7.2)$$

Sendo que  $NMR_{outono}$  é o número médio de raios para o outono e  $Tmin$  é a temperatura mínima.

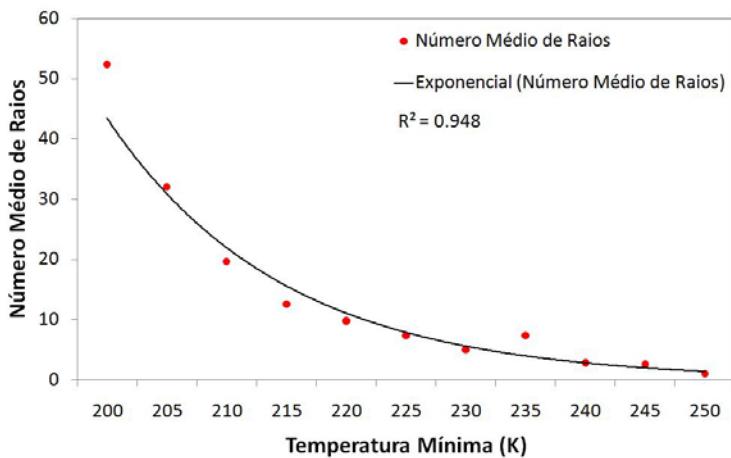


Figura 7.11 - Distribuição do número médio de raios em função da temperatura mínima para os meses de outono.

A relação entre número médio de raios com as  $T_{min}$  para a estação de inverno (Figura 7.12) foi a que apresentou o menor coeficiente de determinação de todos os casos analisados, sendo de aproximadamente  $R^2 \approx 0.46$ , sendo que a melhor curva que se ajustou foi uma exponencial, e a função que melhor descreveu esse ajuste está descrito na equação 7.3.

$$NMR_{inverno} = 19,74 * \exp(-0,2 * (T_{min})) \quad (7.3)$$

Sendo que  $NMR_{inverno}$  é o número médio de raios para o inverno e  $T_{min}$  é a temperatura mínima.

Por fim, a mesma análise foram feitas para a estação da primavera. Sendo que a relação entre o número médio de raios e  $T_{min}$  (Figura 7.13) pode ser parametrizada com uma curva polinomial com um alto coeficiente de determinação ( $R^2 \approx 0.87$ ), A função quadrática que melhor representa esta relação está descrita na equação 7.4.

$$NMR_{primavera} = 0,642 * (T_{min})^2 - 11,59 * (T_{min}) + 56,31 \quad (7.4)$$

Sendo que  $NMR_{primavera}$  é o número médio de raios na primavera e  $T_{min}$  é a temperatura mínima.

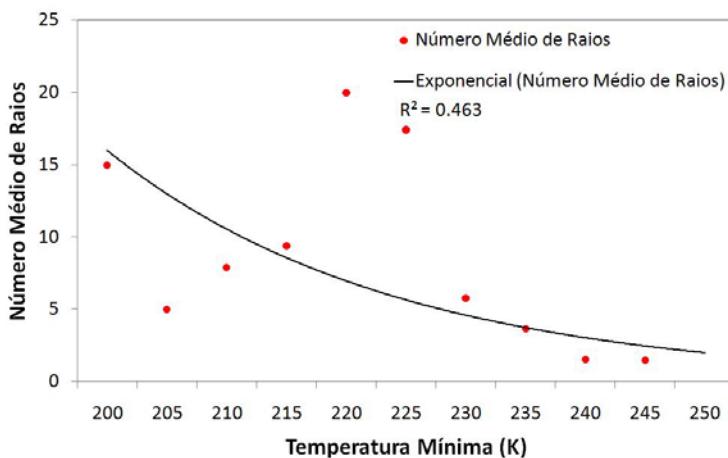


Figura 7.12 - Distribuição do número médio de raios em função da temperatura mínima para os meses inverno.

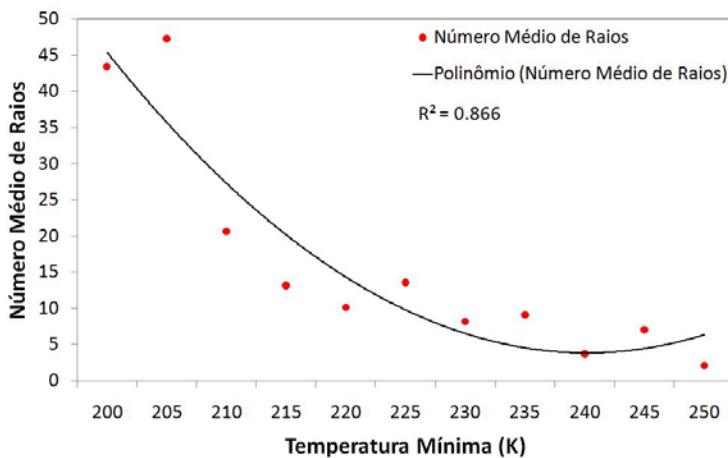


Figura 7.13. Distribuição do número médio de raios em função da temperatura mínima para os meses primavera.

#### 7.3.4. Excentricidade

A excentricidade (ecce) é um parâmetro físico relacionado ao formato do SC, sendo a razão entre o tamanho do eixo menor e o tamanho do eixo maior. Os valores da ecce variam de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo do valor 1 de ecce o SC estiver, mais circular seu formato será.

As ecce foram separadas nas estações do ano e divididas em SC que se tornaram tempestades e SC que não se tornaram tempestades. Como podemos notar nas figuras 7.14a-d, existe uma maior freqüência para ecce maiores que 0.7 para ambos os tipos de SC (com/sem tempestades) e para todas as estações do ano. Para os meses de verão, o total das freqüências de ecce maiores que 0.7 para SC que se tornaram (não se tornaram) tempestades foi de 80% (82%) onde tiveram mais de 52 % (47%) de freqüência para ecce iguais a 1. Para a estação de outono esses valores foram muito semelhantes aos observados no verão, 79% (81%) para SC que se tornaram (não se tornaram) tempestades, onde os SC que apresentaram ecce igual a 1 representaram mais que 50% dos valores de ecce para ambos tipos de SC analisados. Já os meses do inverno apresentaram as menores freqüências para SC com ecce maiores que 0.7, mesmo assim, ainda foi à maioria da freqüência relativa, sendo de 64% para SC que se tornaram tempestades, enquanto que para SC que não se tornaram tempestades o valor foi de 76%. A contribuição de valores de ecce iguais a 1 para os meses de inverno também foram as menores observadas em relação as outras estações, sendo que para os SC que se tornaram tempestade o valor da freqüência foi de 37%, enquanto que para os demais SC, 39%. A estação da primavera teve os mesmos valores de freqüência obtidos na estação de outono.

Como foi possível observar, os SC aqui estudados tiveram mais de 64% das ecce maiores que 0.7, o que dificultou caracterizar as diferenças entre as ecce dos SC que se tornaram tempestades daqueles que não se tornaram tempestades, pois em ambos os casos os SC tiveram uma forma bastante arredondada. Segundo Mattos (2009) os SCM (meso- $\alpha$ ) que se tornam tempestades tendem a ter um formato mais circular em relação aos que não se tornam tempestades, como os SC estudados nesse trabalho são de tamanhos menores (meso- $\gamma$  e meso- $\beta$ ) que aqueles estudados por Mattos (2009) não foi possível observar essa relação, pois tanto as ecce de SC que se tornaram tempestades como as ecce dos SC que não se tornaram tempestades se comportaram de maneira semelhante.

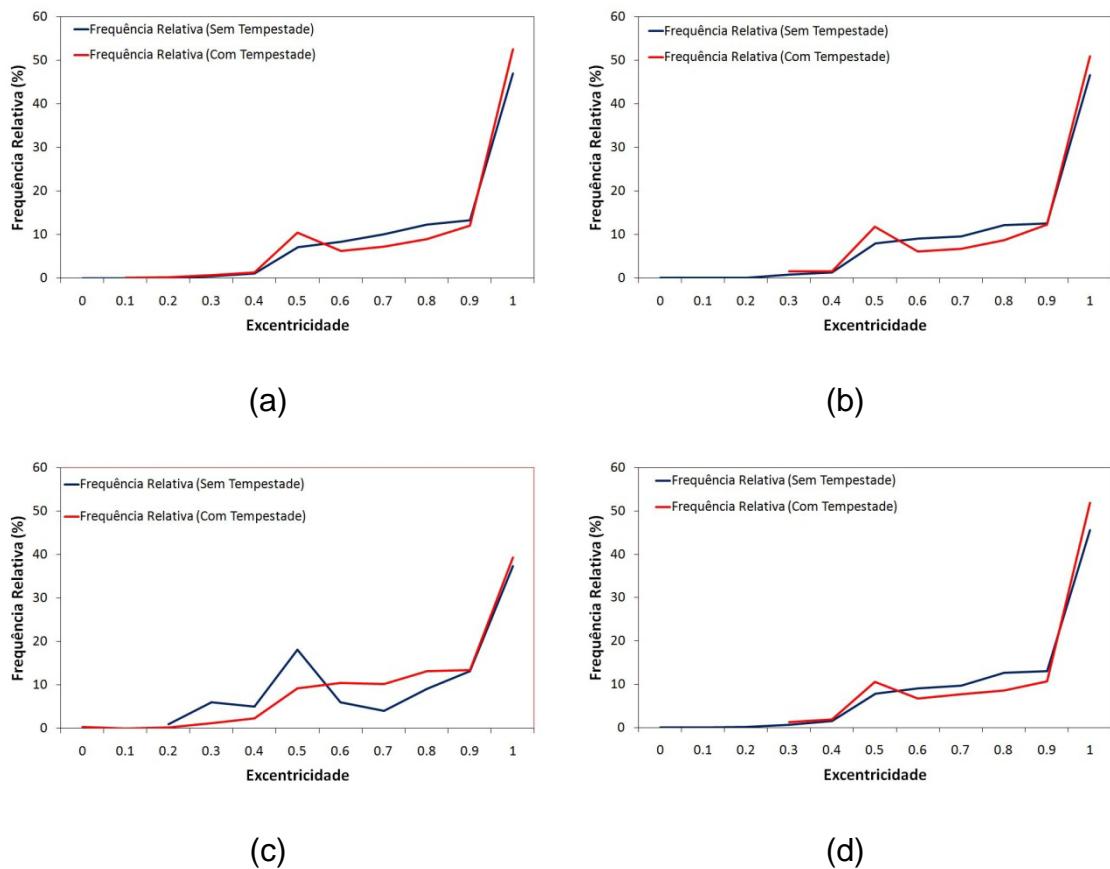


Figura 7.14 - Freqüência relativa das excentricidades dos SC que se tornaram tempestades (linha vermelha) e para os SC que não se tornaram tempestade (linha azul). (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera.

Para analisar a relação entre a atividade elétrica e ecce, foram ajustadas curvas de regressão para cada estação do ano do número médio de raios. A regressão encontrada entre o número médio de raios em função da ecce para a estação de verão está ilustrada na figura 7.15. Como os valores encontrados nesta relação foram bastante dispersos, foi possível ajustar apenas uma função polinomial de terceira ordem no qual obteve um coeficiente de determinação moderado ( $R^2 = 0.46$ ). A função que corresponde o ajuste dessas duas variáveis está descrita na equação 7.5.

$$NMR_{ver\tilde{a}o} = -0,26 * (ecce)^3 - 5,6 * (ecce)^2 - 36,68 * (ecce) + 89,34 \quad (7.5)$$

Sendo que:  $NMR_{verão}$  é o número médio de raios para a estação de verão e  $ecce$  é a excentricidade do SC.

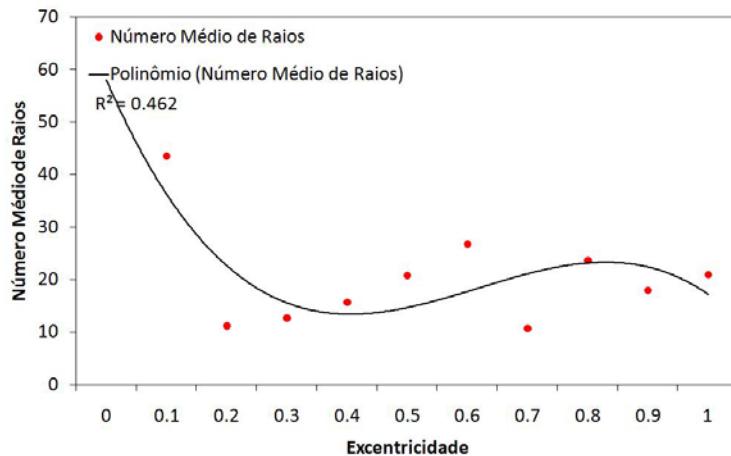


Figura 7.15 - Distribuição do número médio de raios em função da excentricidade para os meses de verão.

A estação de outono também teve uma distribuição bastante dispersa em relação ao número médio de raios em função da  $ecce$  (Figura 7.16), mas para esta estação foi possível ajustar uma curva polinomial de terceira ordem com um alto coeficiente de determinação ( $R^2 = 0.80$ ). A função que melhor descreve o ajuste entre as variáveis está descrita na equação 7.6.

$$NMR_{outono} = 1,503 * (ecce)^3 - 35.38 * (ecce)^2 + 258,1 * (ecce) - 543,2 \quad (7.6)$$

Sendo  $NMR_{outono}$  o número médio de raios para estação de outono e  $ecce$  é a excentricidade do SC.

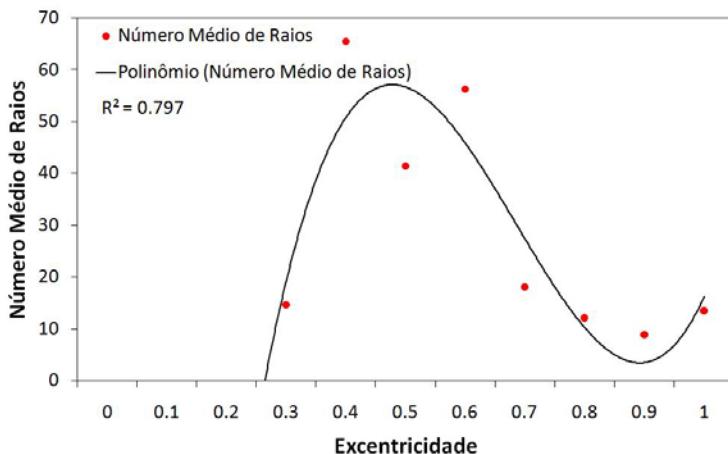


Figura 7.16 - Distribuição do número médio de raios em função da excentricidade para os meses de outono.

Assim como para as estações do ano citadas anteriormente, para a estação de inverno procurou-se ajustar uma curva que melhor representasse a relação entre o número médio de raios e ecce (Figura 7.17). A melhor curva que se ajustou aos valores observados das variáveis foi uma curva de potência com um coeficiente de determinação moderado ( $R^2 = 0.54$ ). A função que associa estas duas variáveis se encontra descrita na equação 7.5.

$$NMR_{Inverno} = 0,271 * (ecce)^{1,678} \quad (7.5)$$

Sendo que  $NMR_{Inverno}$  é o número médio de raios para a estação de inverno e  $ecce$  é a excentricidade do SC.

Para os meses da primavera, a relação do número médio de raios em função da ecce está ilustrada na figura 7.18. Não foi possível um ajuste de um bom coeficiente de determinação ( $R^2 \approx 0.36$ ). Sendo que a melhor curva que se ajustou foi uma polinomial de terceira ordem na qual a função que associa estas duas variáveis está descrita na equação 7.6.

$NMR_{primavera}$

$$= 0,253 * (ecce)^3 - 6,692 * (ecce)^2 + 53,82 * (ecce) - 103,5 \quad (7.6)$$

Sendo que  $NMR_{primavera}$  é o número médio dos raios para a estação de primavera e  $ecce$  é a excentricidade do SC.

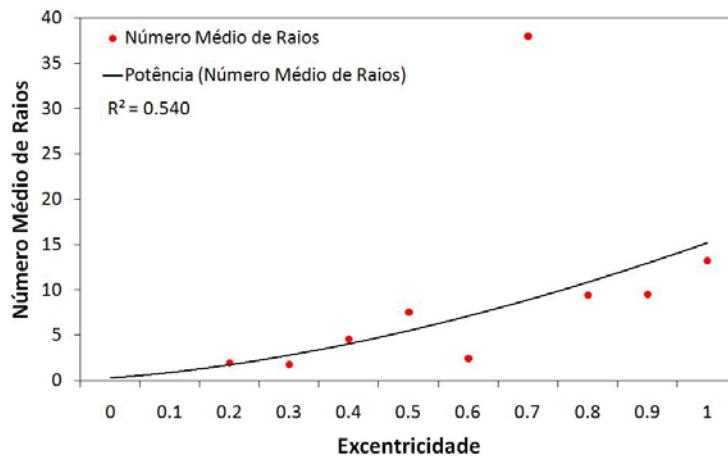


Figura 7.17 - Distribuição do número médio de raios em função da excentricidade para os meses de inverno.

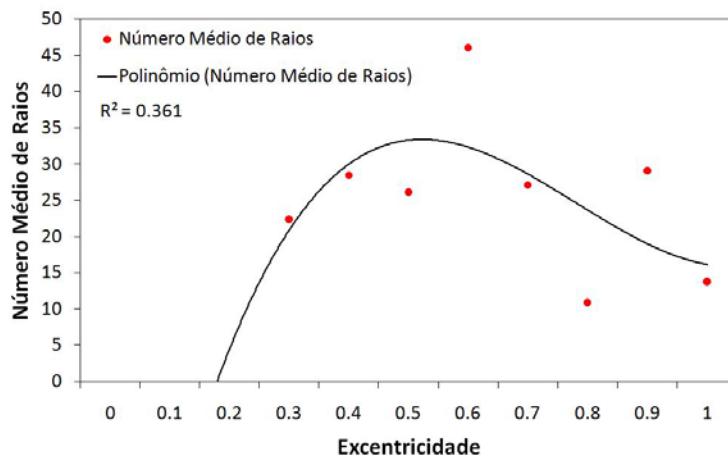


Figura 7.18. Distribuição do número médio de raios em função da excentricidade para os meses da primavera.

## 7.4. Análise do Ciclo de Vida dos SC

### 7.4.1 Evolução dos Tamanhos dos SC Durante seu Ciclo de Vida

Os tamanhos dos SC (Raio efetivo) foram divididos em 3 intervalos de tempo de duração máxima: 0-2, 2-4 e 4-8 horas, sendo que o tempo de vida dos SC foram normalizados de 0 a 1, ou seja, sendo 0 o tempo de inicio e 1 o tempo final, onde os estágios do ciclo de vida do SC são iniciação (0.0-0.3), maturação (0.3-0.7) e Dissipação (0.7-1.0). Assim, a normalização do tempo de vida mostrará o comportamento médio dos tamanhos dos SC, nos respectivos intervalos de duração.

A figura 7.19 ilustra os tamanhos dos SC para a estação de verão. Observou-se que para qualquer intervalo de tempo, os SC que se tornaram tempestade apresentaram tamanhos médios maiores daqueles SC que não se tornaram tempestade. No intervalo de duração de 0-2 horas, observou-se que os tamanhos médios dos SC que se tornaram tempestade, no estágio inicial foram de 30 km, enquanto para os SC que não se tornaram tempestade apresentaram tamanhos médios de 20 km. No estágio maduro, os SC que se tornaram tempestades tiveram tamanhos médios de 31 km e, 25 km para SC sem tempestades. Já no estágio de dissipação, foram observados valores médios de 37 km para SC com tempestades e 24 km para SC sem tempestades. Os tamanhos dos SC que tiveram seu tempo de vida no intervalo de tempo de 2-4 horas apresentaram tamanhos médios ligeiramente superiores aos do intervalo de 0-2 horas. Sendo que para os SC que se tornaram tempestades os tamanhos médios foram: 32 km (iniciação), 37 km (maturação) e 41 km (dissipação). Para SC que não apresentaram tempestades, para este mesmo intervalo, tiveram tamanhos médios de: 24 km (iniciação), 30 km (maturação) e 27 km (dissipação). Já o intervalo de duração de 4-8 horas, teve os maiores tamanhos médios de SC observados na estação de verão, para ambos os tipos de SC analisados (com/sem tempestades). Sendo observados tamanhos médios de: 49 km (iniciação), 50 km (maturação) e 55 km (dissipação) para SC com tempestades e 30 km (iniciação), 38 km (maturação) e 34 km (dissipação) para os demais SC.

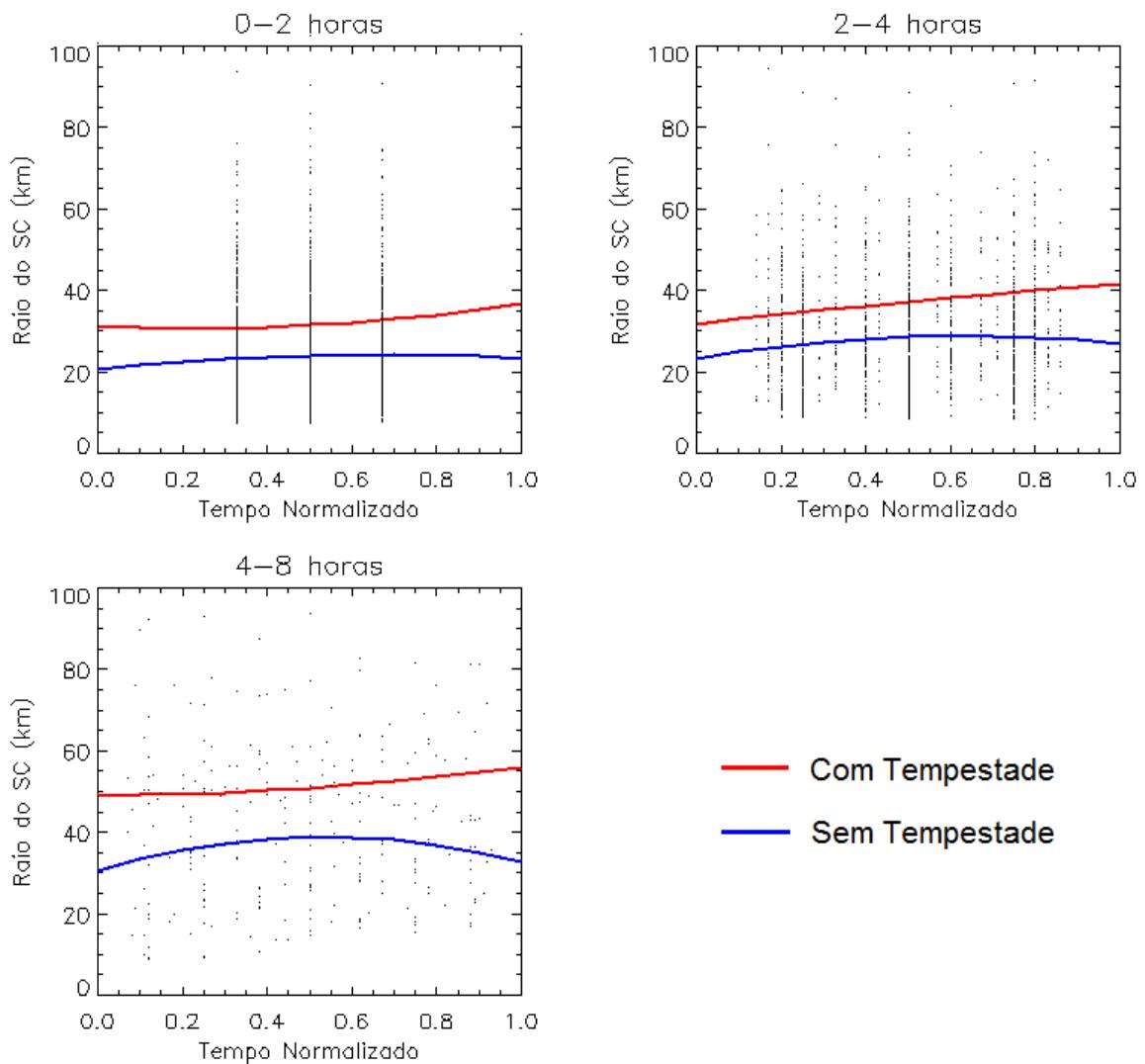


Figura 7.19 - Variação média do Raio efetivo dos SC em função do tempo de vida normalizado para SC que se tornaram tempestade (linha vermelha) e SC que não se tornaram tempestade (linha azul) para a estação de verão.

Para estação de outono, ilustrada na figura 7.20, observou-se que os tamanhos médios dos SC que vieram a se tornarem tempestades foram maiores em quase todos os intervalos de tempos quando comparados com os tamanhos médios de SC registrados na estação de verão. Sendo que os tamanhos médios para o intervalo de 0-2 horas foram: 34 km (iniciação), 37 km (maturação) e 40 km (dissipação) para SC com tempestades e 20 km (iniciação), 25 km (maturação) e 24 km (dissipação) para os SC que não se tornaram tempestades. Já os tamanhos médios dos SC no intervalo de 2-4 horas são: 37 km (iniciação), 45 km (maturação)

e 50 km (dissipação) para SC que se tornaram tempestades e para os SC que não se tornaram tempestades são: 24 km (iniciação), 28 km (maturação) e 26 km (dissipação). O último intervalo de tempo (4-8 horas) analisado para a estação de outono teve os seguintes tamanhos médios observados: 45 km (iniciação), 50 km (maturação) e 62 km (dissipação) para SC que se tornaram tempestades, para os demais SC foram de 22 km (iniciação), 35 km (maturação) e 34 km (dissipação).

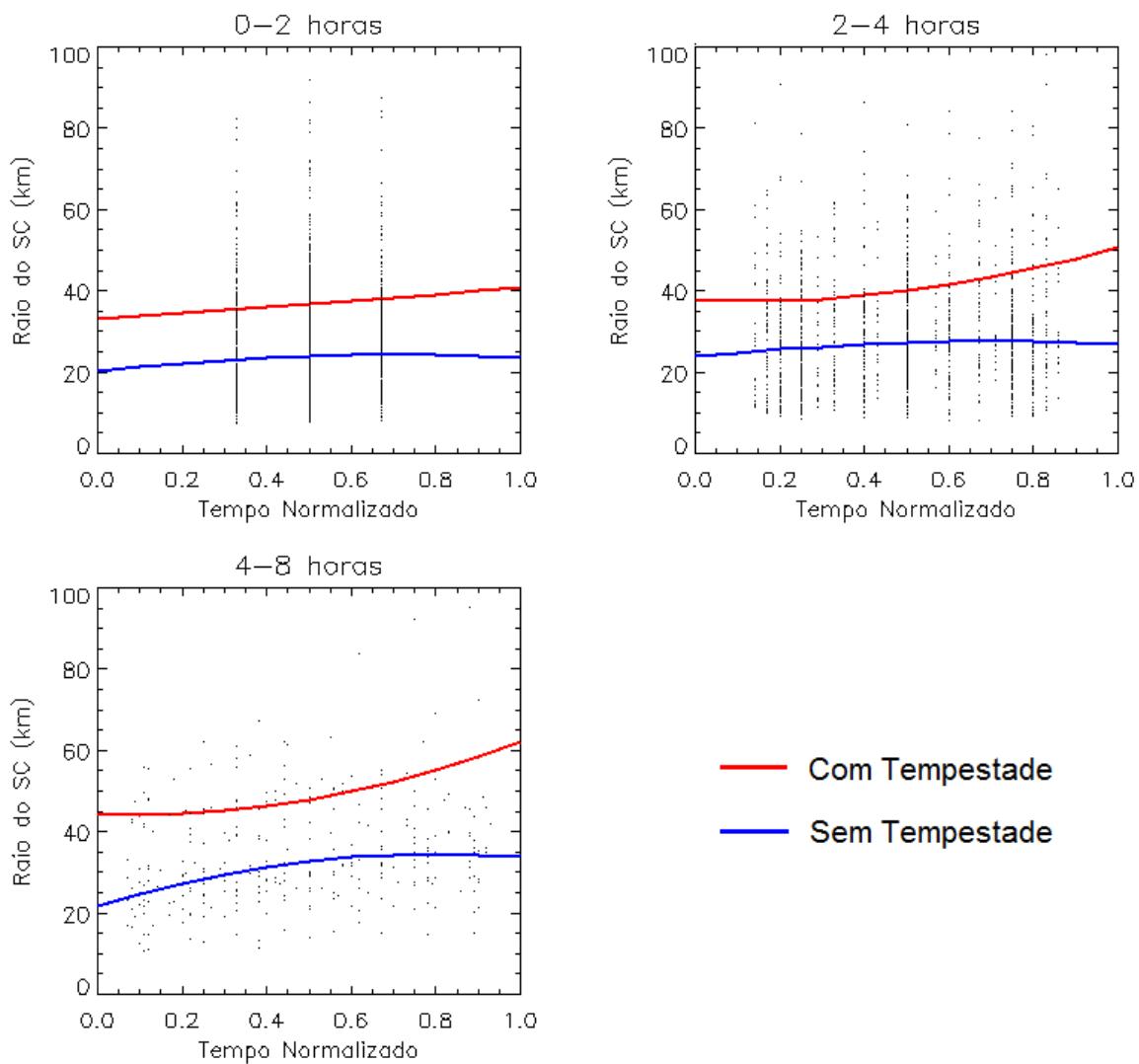


Figura 7.20 - Variação média do Raio efetivo dos SC em função do tempo de vida normalizado para SC que se tornaram tempestade (linha vermelha) e SC que não se tornaram tempestade (linha azul) para a estação de outono.

Na estação de inverno foram analisados os tamanhos médios dos SC apenas para os intervalos de 0-2 e 2-4 horas, pois para o intervalo de 4-8 foram observados muito poucos SC para se fazer uma análise do comportamento dos tamanhos médios.

Os tamanhos médios de SC que se tornaram tempestades no intervalo de 0-2 horas para a estação de inverno (Figura 7.21) nos estágios de iniciação, maturação e dissipação foram de 43 km, 47 km, 52 km, respectivamente. Já para aqueles SC que não foram observados a presença de tempestades, os tamanhos médios dos SC foram de 23 km, 35 km, 29 km para os estágios de iniciação, maturação e dissipação. Para o intervalo de 2-4 horas os SC que se tornaram tempestades tiveram um crescimento praticamente linear durante sua evolução, sendo que os tamanhos médios foram: 30 km (iniciação), 50 km (maturação) e 60 km (dissipação). Já os tamanhos dos SC que não se tornaram tempestade tiveram tamanhos semelhantes aqueles SC que não se tornaram tempestade do intervalo de 0-2 horas.

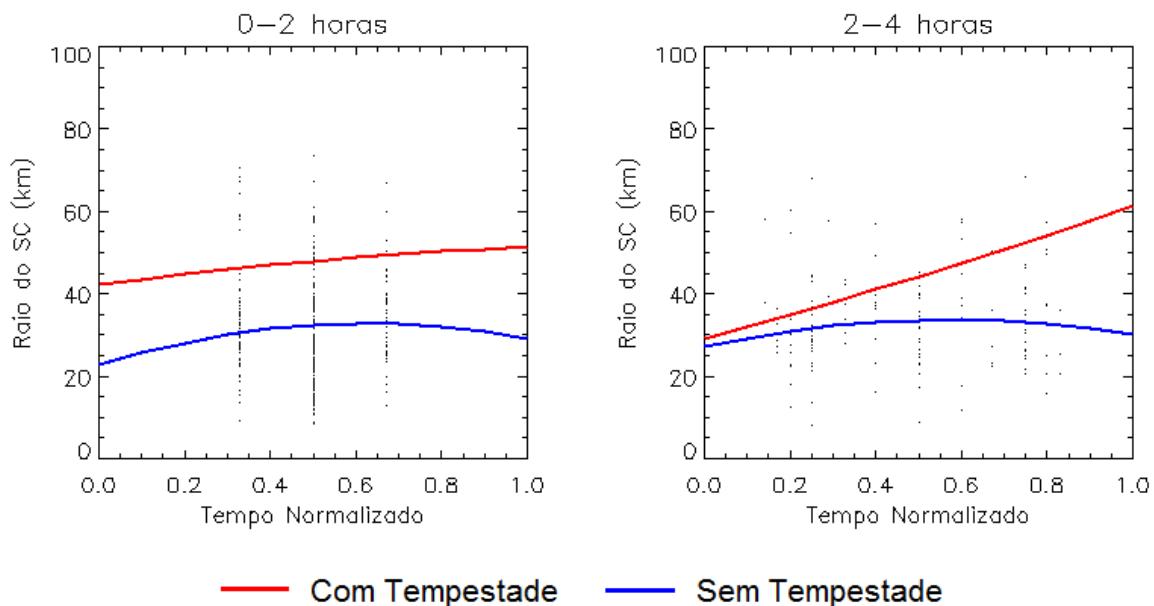


Figura 7.21 - Variação média do Raio efetivo dos SC em função do tempo de vida normalizado para SC que se tornaram tempestade (linha vermelha) e SC que não se tornaram tempestade (linha azul) para a estação de inverno.

A evolução dos tamanhos médios de SC observados nos meses de outono (Figura 7.22) se comportou da mesma forma que a evolução dos tamanhos médios

dos sistemas observado nas outras estações, porém, para o intervalo de 4-8 horas, os SC que se tornaram tempestade tiveram seu tamanho médio menor no estágio de maturação quando comparado com o estágio de iniciação.

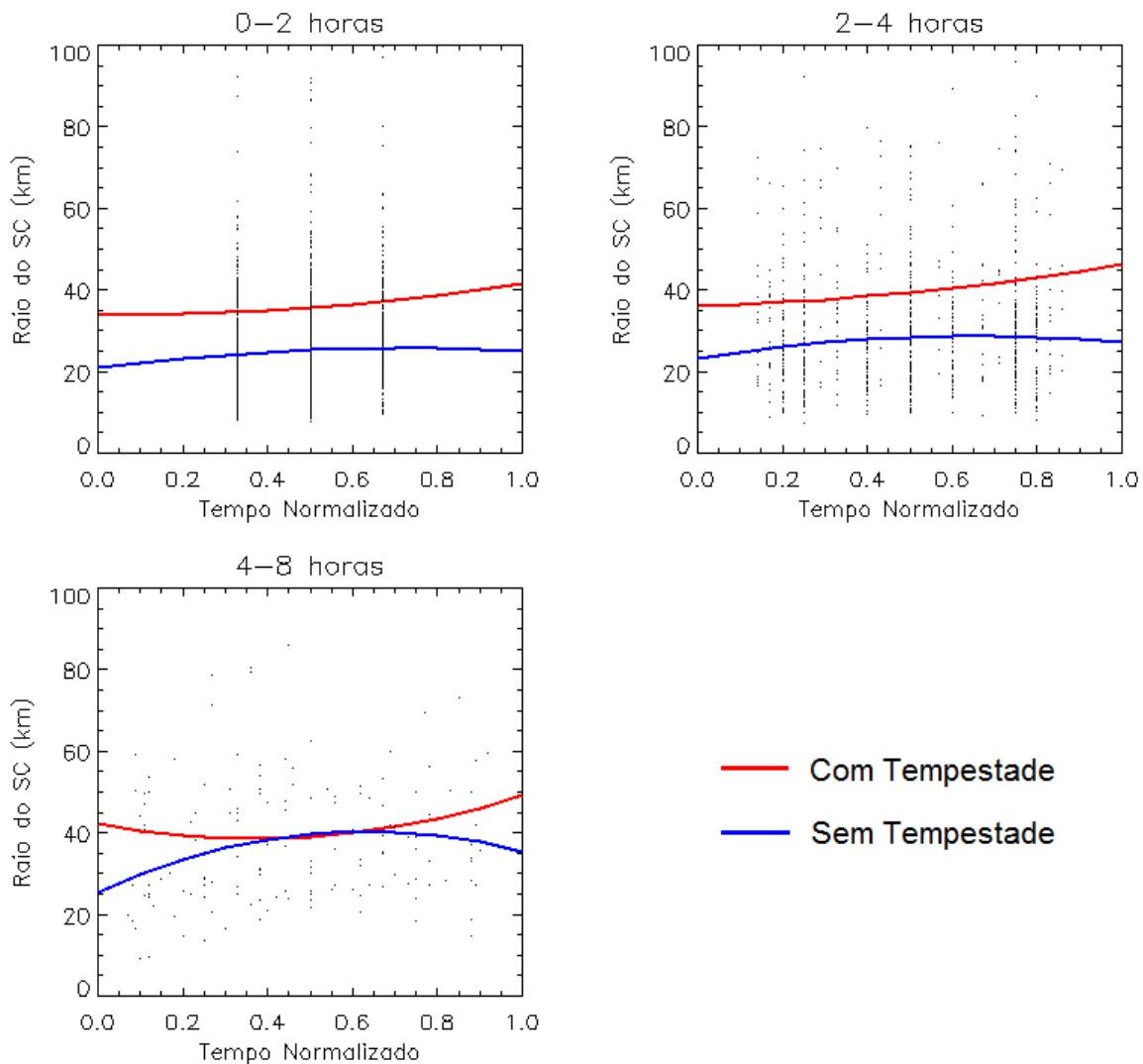


Figura 7.22. Variação média do Raio efetivo dos SC em função do tempo de vida normalizado para SC que se tornaram tempestade (linha vermelha) e SC que não se tornaram tempestade (linha azul) para a estação de primavera.

Os valores observados para o intervalo de 0-2 horas (Figura 7.22) foram de: 35 km (iniciação), 37 km (maturação) e 40 km (dissipação) para SC que se tornaram tempestades, já os tamanhos médios dos SC que não se observou tempestade

foram de 21 km (iniciação), 26 km (maturação) e 25 km (dissipação). No intervalo de 2-4 horas observou-se que os tamanhos médios dos sistemas que se tornaram tempestade para os estágios de iniciação, maturação e dissipação foram de 36 km, 40 km, 46 km, respectivamente, enquanto que para os sistemas que não se tornaram tempestades os tamanhos médios foram de 24 km (iniciação), 30 km (maturação) e 26 km (dissipação). No ultimo intervalo de tempo (4-8 horas) os tamanhos médios de SC para a estação de outono foram de 43 km (iniciação), 40 km (maturação) e 50 km (dissipação) para SC que se tornaram tempestades e 25 km (iniciação), 41 km (maturação) e 35 km (dissipação) para os demais sistemas.

As análises das figuras 7.19, 7.20, 7.21 e 7.22 permitem observar que os tamanhos médios dos SC que se tornam tempestades são sempre maiores que os SC que não se tornam tempestade durante todo o ciclo de vida, ou seja, iniciação, maturação e dissipação. Isso mostra que a taxa de crescimento inicial é mais eficiente para SC que se tornaram tempestades. Segundo Morales et al. (2004) a taxa de crescimento inicial dos SC se mostra muito importante na intensificação da convecção, de forma que isso influencia os sistemas a atingirem maiores tamanhos durante o seu ciclo de vida, fazendo assim, com se tenha uma maior probabilidade destes sistemas virem a se tornar tempestades.

#### **7.4.2. Caracterização do Tempo de Vida dos SC**

Conforme mostrado nos itens 7.3.5 e 7.3.6 existe uma relação entre número médio de raios em função das temperaturas mínimas e em função das excentricidades com bons coeficientes de determinação. Tendo em vista estes resultados, buscou-se comparar o tempo de vida dos SC com o número médio de raios.

Para a estação de verão, não se conseguiu ajustar nenhuma curva com bom coeficiente de determinação, sendo que a única curva que foi possível se ajustar mesmo com um baixo coeficiente de determinação ( $R^2 = 0.15$ ) foi uma exponencial, ilustrada na Figura 7.23. A função que representa o ajuste da exponencial ao número médio de raios está descrita na equação 7.7.

$$NMR_{verao} = 30,1 \exp(-0,12 * tv) \quad (7.7)$$

Sendo que  $NMR_{verao}$  é o número médio de raios para o verão, e  $tv$  o tempo de vida do SC.

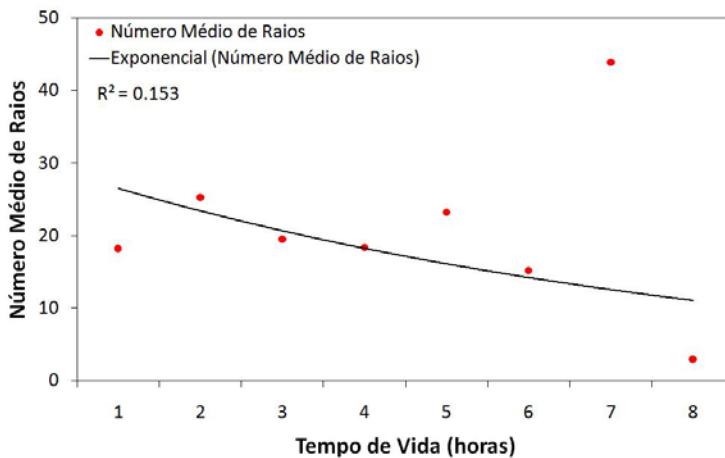


Figura 7.23 - Distribuição do número total de raios em função tempo de vida dos SC para os meses de verão.

Para estação de outono (Figura 7.24) também buscou escolher uma curva de ajuste que melhor representasse a relação entre o número médio de raios e o tempo de vida dos SC. Sendo que também foi possível ajustar uma curva polinomial de terceira ordem com um coeficiente de determinação de  $R^2 \approx 0.69$ . A equação 7.8 descreve a equação polinomial que representa o ajuste entre as duas variáveis analisadas.

$$NMR_{outono} = 0,862 * (tv)^3 + 11,73 * (tv)^2 - 43,19 * (tv) + 17,89 \quad (7.8)$$

Sendo que  $NMR_{outono}$  é o número médio de raios para outono, e  $tv$  o tempo de vida do SC.

Os meses de inverno foram o que obtiveram o maior coeficiente de determinação entre a regressão do número médio de raios e tempo de vida, sendo de  $R^2 = 1$ , esse resultado não deve ser levado em consideração devido aos poucos pontos analisados devido aos poucos casos de tempestades para está estação. A

curva que se ajustou foi uma polinomial (Figura 7.25), sendo que a função que descreve esse ajuste está descrita na equação 7.9.

$$NMR_{inverno} = 10,29(tv)^3 * 79,4 * (tv)^2 - 183,3 * (tv) + 107,5 \quad (7.9)$$

Sendo que  $NMR_{inverno}$  é o número médio de raios para inverno, e  $Tv$  o tempo de vida do SC.

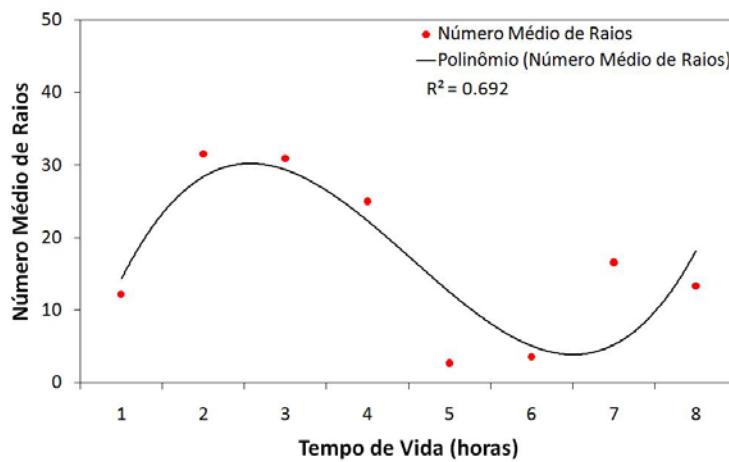


Figura 7.24 - Distribuição do número total de raios em função tempo de vida dos SC para os meses de outono.

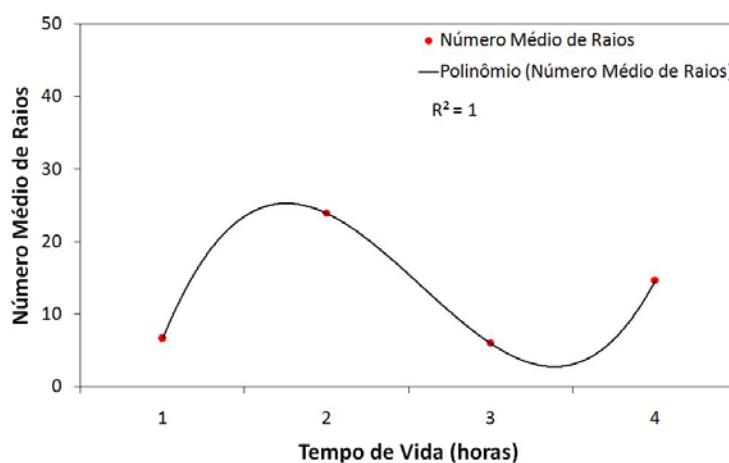


Figura 7.25 - Distribuição do número total de raios em função tempo de vida dos SC para os meses de inverno.

Por fim, foi analisada a mesma relação para a estação de primavera. Como as estações de verão e outono não foi possível ajustar uma curva com um bom coeficiente de determinação, sendo que a curva que se ajustou com o melhor coeficiente observado foi uma exponencial (Figura 7.26) com um coeficiente de  $R^2 \approx 0.31$ . A função exponencial que explica a relação entre o número médio de raios e tempo de vida está descrita na equação 7.10.

$$NMR_{primavera} = 48,72 * \exp(-0,27 * tv) \quad (7.10)$$

Sendo que  $NMR_{primavera}$  é o número médio de raios para primavera, e  $Tv$  o tempo de vida do SC.

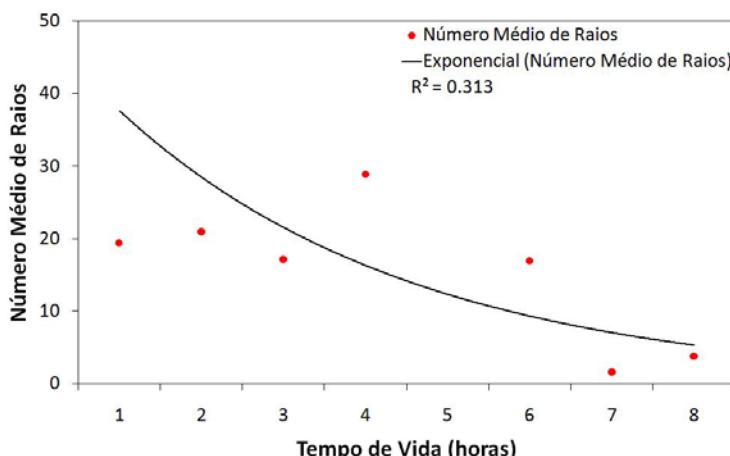


Figura 7.26 - Distribuição do número médio de raios em função tempo de vida dos SC para os meses de inverno.

A relação do número médio de raios em função do tempo de vida não mostrou bons resultados sendo que as curvas que foram ajustadas à relação não encontraram bons coeficientes de determinação como foi possível verificar nas análises, para SC meso- $\gamma$  e meso- $\beta$  não é possível observar a relação do número médio de raios com tempo de vida. Mattos (2009) obteve bons coeficientes de determinação para esta relação estudando os SCM (meso- $\alpha$ ).

## 7.5. Direção de Propagação dos Sistemas Convectivos

Para analisar a freqüência de direção de propagação dos sistemas, eles foram divididos nos mesmos intervalos de tempo duração máxima utilizados no item 7.3, ou seja, 1-2, 2-4 e 4-8 horas. Assim, foi possível observar quais foram às direções de propagação predominantes para cada intervalo.

A figura 7.27 ilustra a freqüência relativa da direção de propagação dos SC com (sem) tempestades da estação de verão. Podemos observar que não existe uma preferência para SC com (sem) tempestade. Sendo que as direções de propagação de  $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$  (Norte - Leste) e  $160^{\circ}$ - $280^{\circ}$  (Sudeste - Noroeste) apresentaram as maiores freqüências para o intervalo de 1-2 horas. No intervalo de 2-4 horas as freqüências foram semelhantes as do intervalo de 1-2 horas, com exceção dos SC que se tornaram tempestades que apresentou um pico em  $50^{\circ}$ - $90^{\circ}$  (Nordeste - Leste) mais acentuado em relação aos SC que não se tornaram tempestades. Para os SC que se tornaram tempestades no intervalo de 4-8 horas observou-se que as direções de propagação de maior freqüência foram entre  $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$  (Norte - Leste) com pico  $50^{\circ}$ - $90^{\circ}$  (Nordeste - Leste) e, também foram observadas as menores freqüências para as direções de  $150^{\circ}$ - $200^{\circ}$  (Sudeste - Sudoeste) e  $230^{\circ}$ - $270^{\circ}$  (Sudoeste-Oeste). As direções de propagação dos SC que não se tornaram tempestades também foram observadas em maiores freqüências entre  $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$  (Norte - Leste), com pico máximo em  $50^{\circ}$ - $90^{\circ}$  (Nordeste - Leste), e com ocorrências em  $180^{\circ}$ - $270^{\circ}$  (Sul - Oeste).

A estação de outono, ilustrada na figura 7.28, mostrou que as freqüências relativas para qualquer intervalo de tempo (1-2, 2-4 3 4-8 horas) apresentaram valores de forma bastante semelhantes para SC que se tornaram tempestades e SC que não se tornaram. Foi observada a predominância em dois intervalos de direção de propagação para ambos os casos, uma entre  $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$  (Norte - Leste) e outra entre  $160^{\circ}$ - $280^{\circ}$  (Sudeste - Noroeste), sendo observados picos entre  $200^{\circ}$ - $220^{\circ}$  para SC que não se tornaram tempestades e  $220^{\circ}$ - $240^{\circ}$  para os SC que se tornaram tempestades.

Para a estação de inverno (Figura 7.29), foram considerados apenas dois intervalos para análise, a escolha destes dois intervalos já foi discutida no item 7.3. Observou-se que os SC que não se tornaram tempestades tiveram uma preferência na direção de propagação entre  $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$  (Norte - Leste) e  $160^{\circ}$ - $290^{\circ}$  (Sudeste -

Nordeste) com a maior freqüência observada em 160°-200° (Sudeste - Sudoeste). Já os SC que se tornaram tempestades a freqüência da direção variou de 0°-65° (Norte - Nordeste) e 160°-290° (Sudeste - Nordeste), sendo a maior freqüência observada entre 200°-270° (Sudoeste - Oeste).

A figura 7.30 ilustra as freqüências da direção de propagação para os SC que ocorreram nos meses da primavera. Como pode se observar, as freqüências das direções de propagação dos SC que se tornaram ou não tempestades são extremamente semelhante, além de serem muito parecidas com os resultados obtidos para a estação de outono.

As análises de todas as estações permitem observar que não há uma direção de propagação preferencial para SC que se tornaram tempestades, sendo extremamente parecidas com as direções de SC que não se tornam tempestades, o que impossibilitou observar diferenças entre os 2 tipos de sistemas analisados.

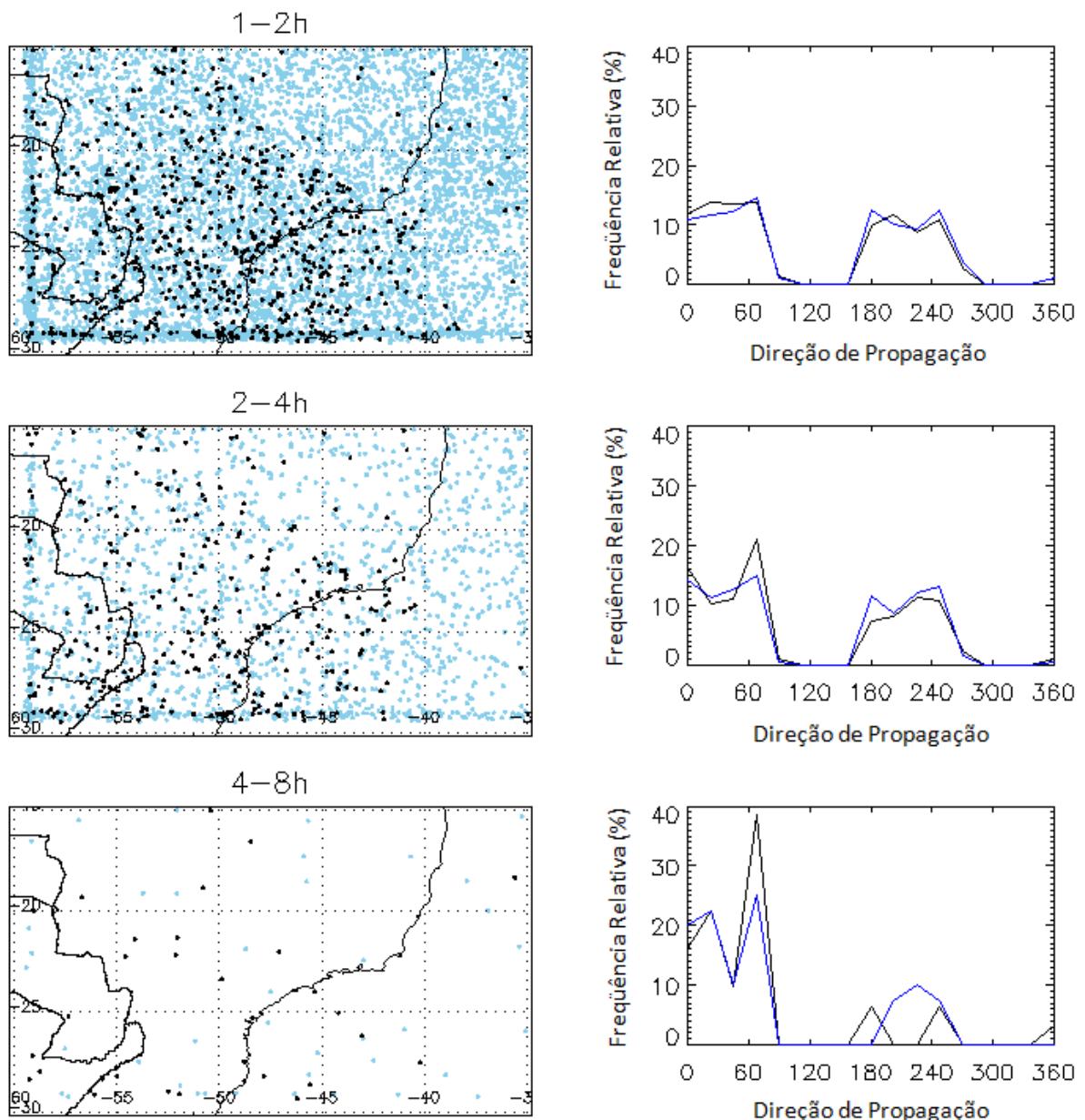


Figura 7.27 - Freqüência Relativa da direção de propagação dos SC que se tornaram tempestades (linha vermelha) e SC que não se tornaram tempestades (linha azul), divididas em intervalos de tempo de vida, para a estação de verão.

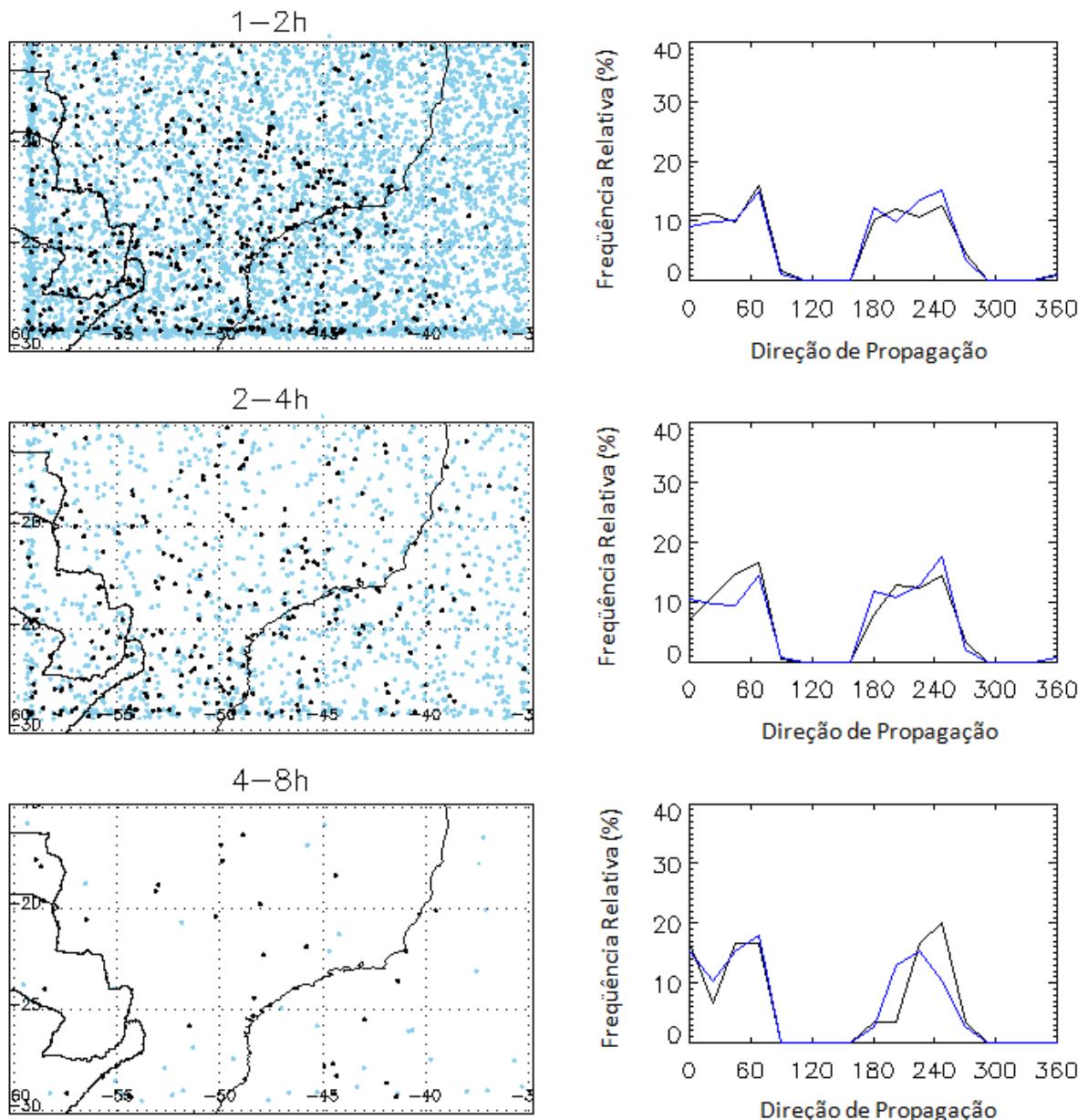


Figura 7.28 - Freqüência Relativa da direção de propagação dos SC que se tornaram tempestades (linha vermelha) e SC que não se tornaram tempestades (linha azul), divididas em intervalos de tempo de vida, para a estação de outono.

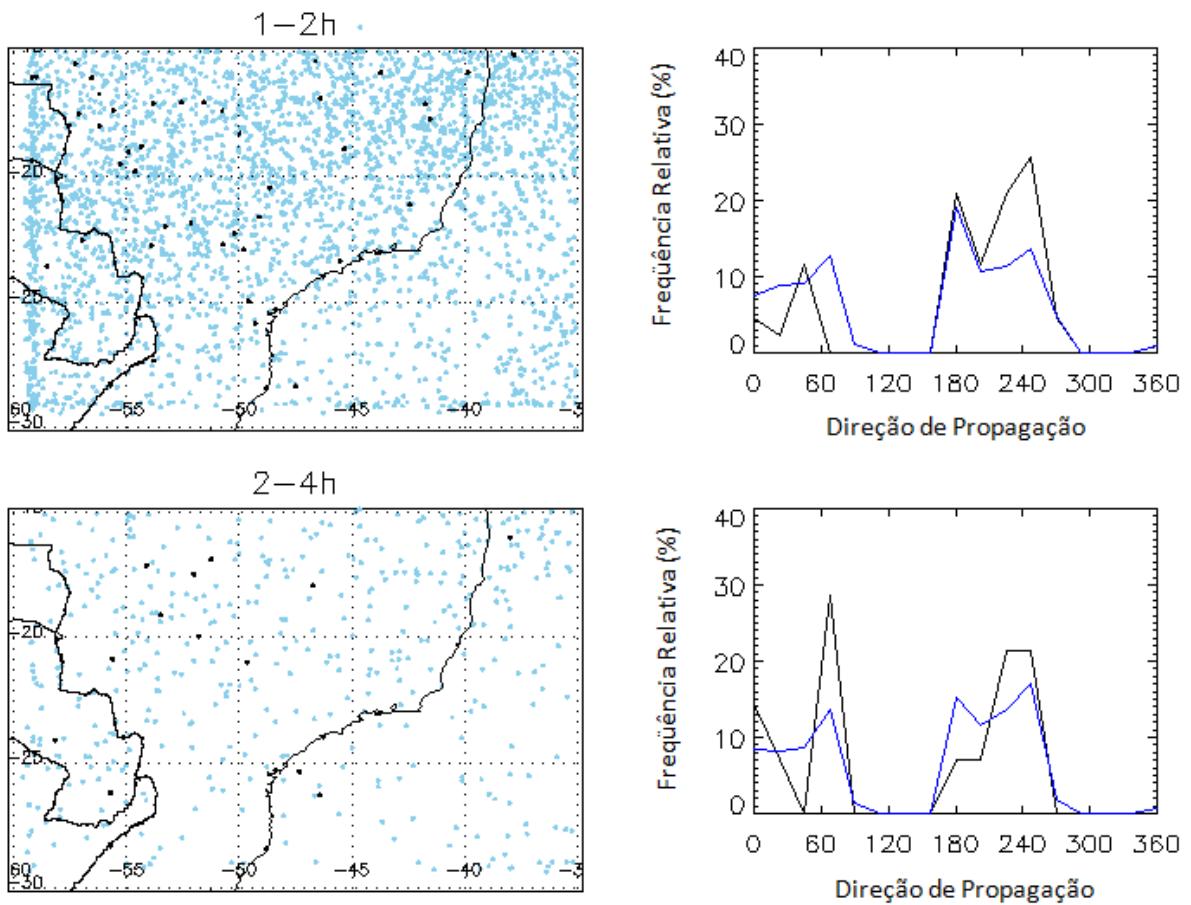


Figura 7.29 - Freqüência Relativa da direção de propagação dos SC que se tornaram tempestades (linha vermelha) e SC que não se tornaram tempestades (linha azul), divididas em intervalos de tempo de vida, para a estação de inverno.

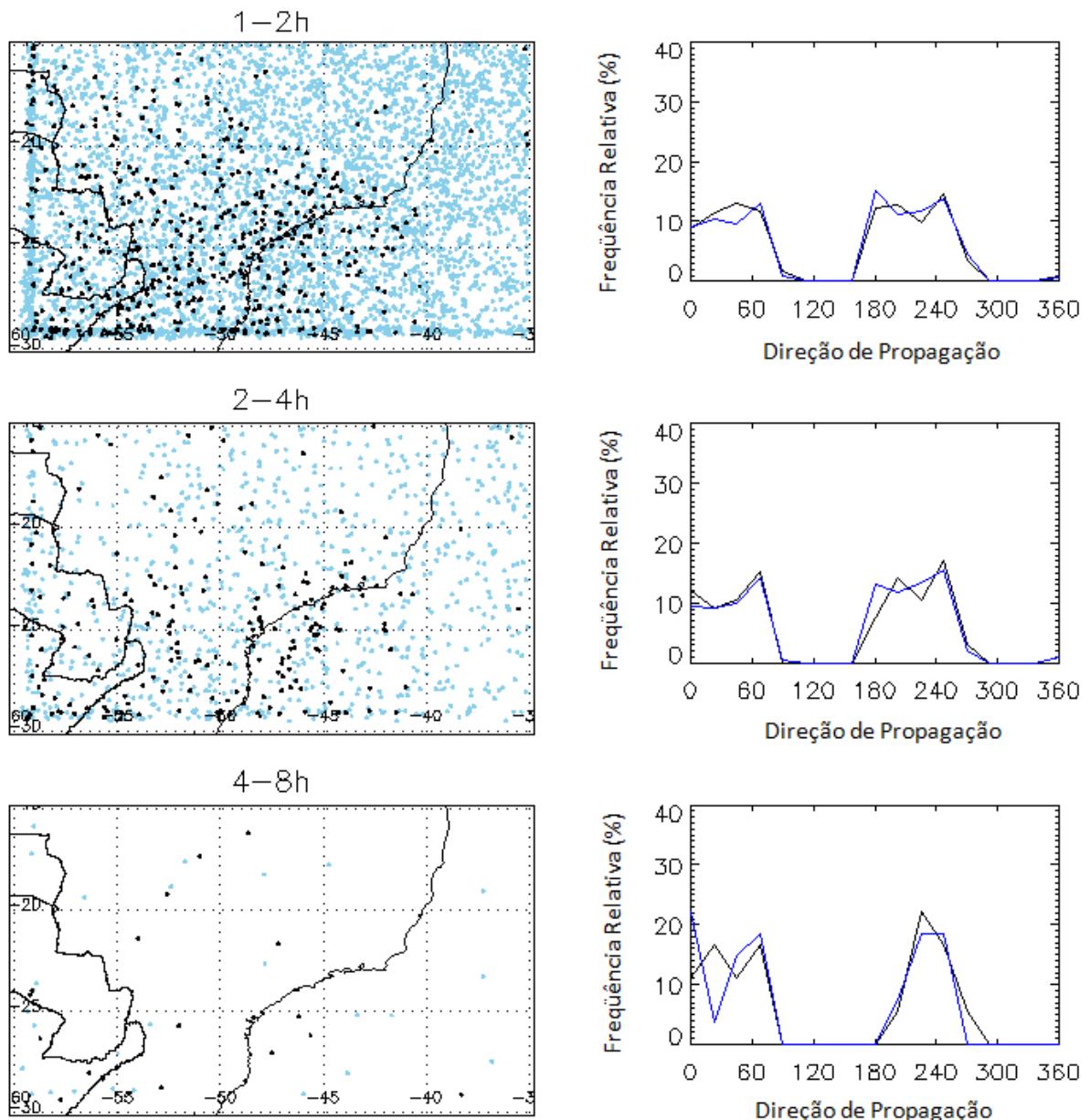


Figura 7.30 - Freqüência Relativa da direção de propagação dos SC que se tornaram tempestades (linha vermelha) e SC que não se tornaram tempestades (linha azul), divididas em intervalos de tempo de vida, para a estação de primavera.

## 7.6. Análise das Descargas Atmosféricas

No período de estudo, dezembro de 2005 a maio de 2009, foram observados a ocorrência de 91.316 raios nos SC novos que foram selecionados conforme descrito no item 7.2. As ocorrências de descargas atmosféricas foram separadas nas estações do ano onde se observou a ocorrência de 36.654 para o verão, 27.829 no outono, 1.038 no inverno e 25.795 na primavera.

Com o intuito de analisar a freqüência de ocorrências das descargas atmosféricas dividiu-se as ocorrências em 5 intervalos para cada uma das 4 estações do ano. Os intervalos foram de quando o SC apresentava a ocorrência de 1 a 3, 4 a 15, 16 a 63, 64 a 127 e maiores que 128 descargas.

A Figura 31a-d ilustra a distribuição de freqüência para as estações do ano. Observou-se que as maiores ocorrências ocorrem no intervalo de 1 a 3 raios para qualquer estação do ano, sendo de 43 a 60%. Para ocorrências de 4 a 15 descargas foi observada uma freqüência entre 24 e 33%, já para 16 a 63 descargas as freqüências ficaram entre 14 e 18%, enquanto que para ocorrências entre 64 e 127 descargas a freqüência observada ficou entre 3 e 4%. As menores freqüências observadas foram para SC que apresentaram mais de 128 observações de descargas atmosféricas ficando em torno de 2,3 e 2,6 %, sendo que para os meses de inverno não se observou ocorrências maiores que 128 raios.

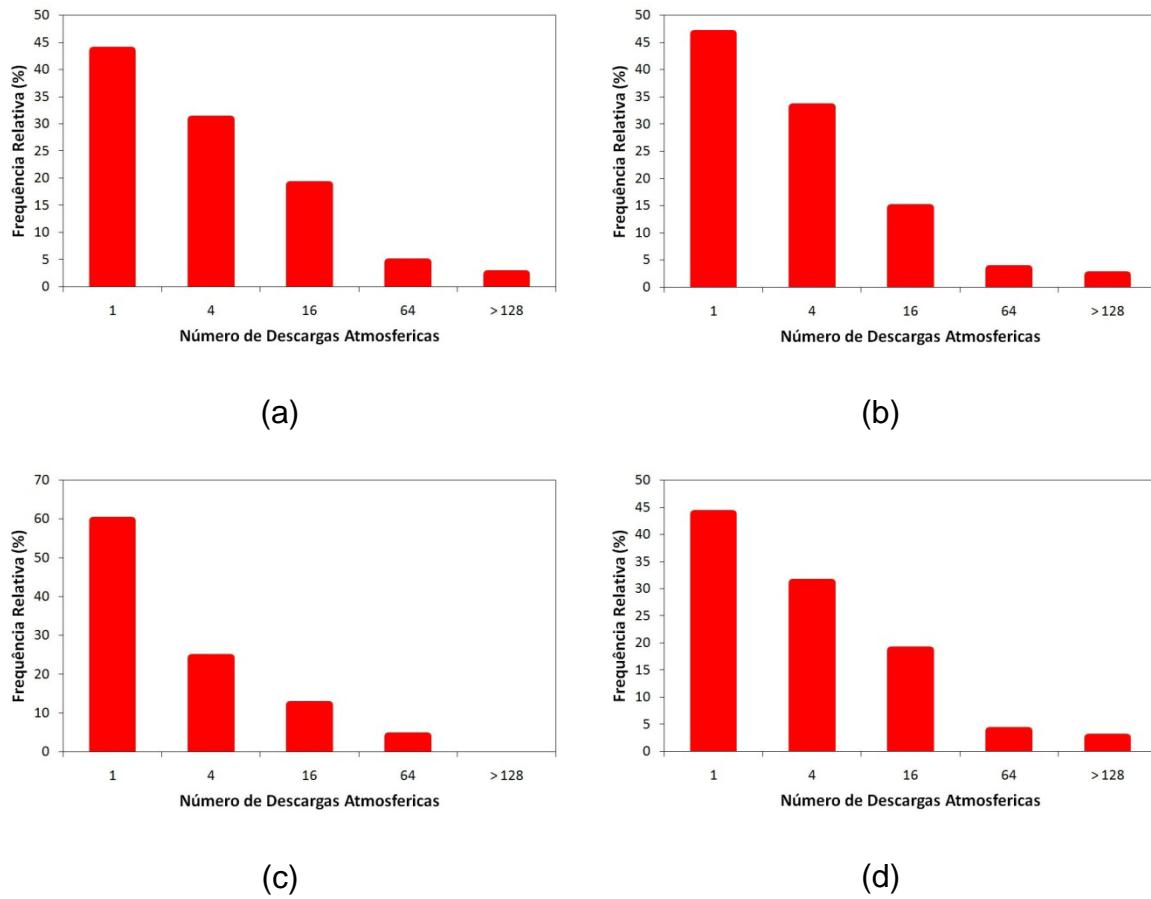


Figura 7.31 - Freqüência de ocorrência de descargas atmosféricas. (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera.

### 7.6.1. Análises das Densidades das Descargas Atmosféricas

As freqüências de ocorrências das densidades de descargas atmosféricas ( $\text{raio}/\text{km}^2$ ) divididas nas estações do ano estão ilustradas na Figura 7.32a-d. Os SC foram divididos em tempos máximos de vida, sendo analisados 3 intervalos (0-2, 2-4 e 4-8 horas). Como podemos observar na figura, as freqüências de densidades para qualquer tempo de vida se comportam como uma distribuição log-normal, com pico máximo para densidades iguais a  $10^{-4}$   $\text{raio}/\text{km}^2$ , sendo que para os SC de verão que apresentaram tempo de vida de até 2 horas foi observado que aproximadamente 59% de densidades de raios estavam contidas no intervalo de  $10^{-4}$  -  $2 \times 10^{-3}$   $\text{raio}/\text{km}^2$  e, esse valor de ocorrência aumentou para SC que tiveram um tempo de vida maior, pois os SC que tiveram tempo de vida de até 4 horas tiveram mais de 62% dos

valores nessa faixa e, os SC com tempos máximos de vida de 8 horas foram observados uma freqüência de 67%.

As estações de outono (Figura 32b), inverno (Figura 32c) e primavera (Figura 32d) apresentaram valores de densidades semelhantes aos encontrados nos meses de verão. Apenas os meses de inverno tiveram valores de freqüências maiores para os SC que tiveram até 2 horas de vida, sendo de aproximadamente 87% das freqüências foram observadas para a mesma faixa de intervalo analisada anteriormente ( $10^{-4}$  -  $2 \times 10^{-3}$  raio/km $^2$ ).

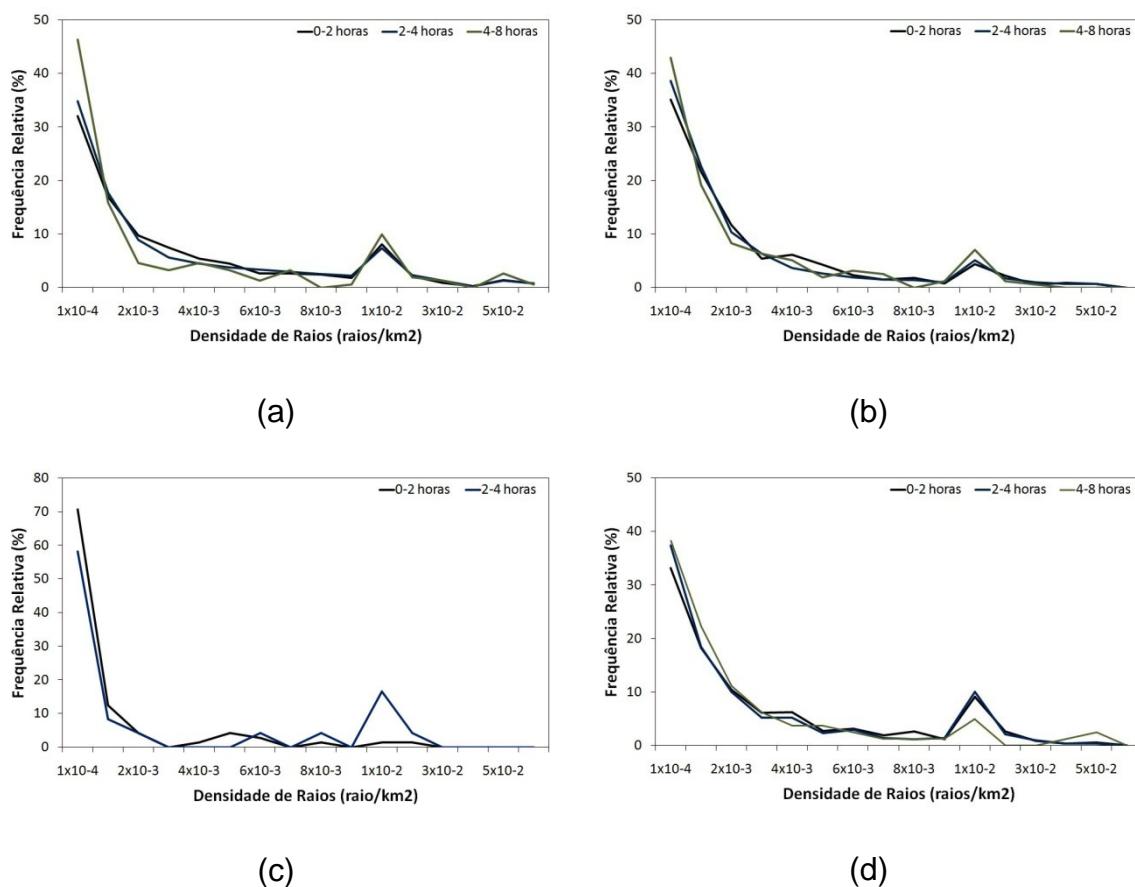


Figura 7.32 - Freqüência da Densidade de Descargas Atmosféricas, divididas em intervalos de tempo de vida dos SC (1-2, 2-4 e 4-8 horas). (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera.

As freqüências das densidades de descargas atmosféricas também foram analisadas em relação aos tamanhos dos SC, sendo os SC separados em 3 intervalos de tamanhos: 0-20, 20-40 e maiores que 40 km. Como pode ser observado na Figura 7.33a-d, para SC que tiveram tamanhos maiores que 20 km as

densidades de descargas atmosféricas se comportam da mesma forma que as densidades dividam em intervalos de tempo, ou seja, uma distribuição log-normal com o máximo observado em  $10^{-4}$  raio/km $^2$ . A diferença está nos SC que tem tamanhos máximos de 20 km, onde apresentaram os maiores valores de freqüência em  $1 \times 10^{-3}$  raio/km $^2$ , sendo esse máximo observado para todas as estações do ano. As densidades de descargas atmosféricas para esses tamanhos de SC foram mais bem distribuídas que em relação aos tamanhos maiores que eles, sendo que para o intervalo de  $10^{-4} - 2 \times 10^{-3}$  raio/km $^2$ , intervalo em que se observaram as maiores freqüências em intervalos de tempo de vida (Figura 7.32), os tamanhos de até 20 km tiveram freqüências de 41% (verão), 56% (outono), 90% (inverno) e 49% (primavera).

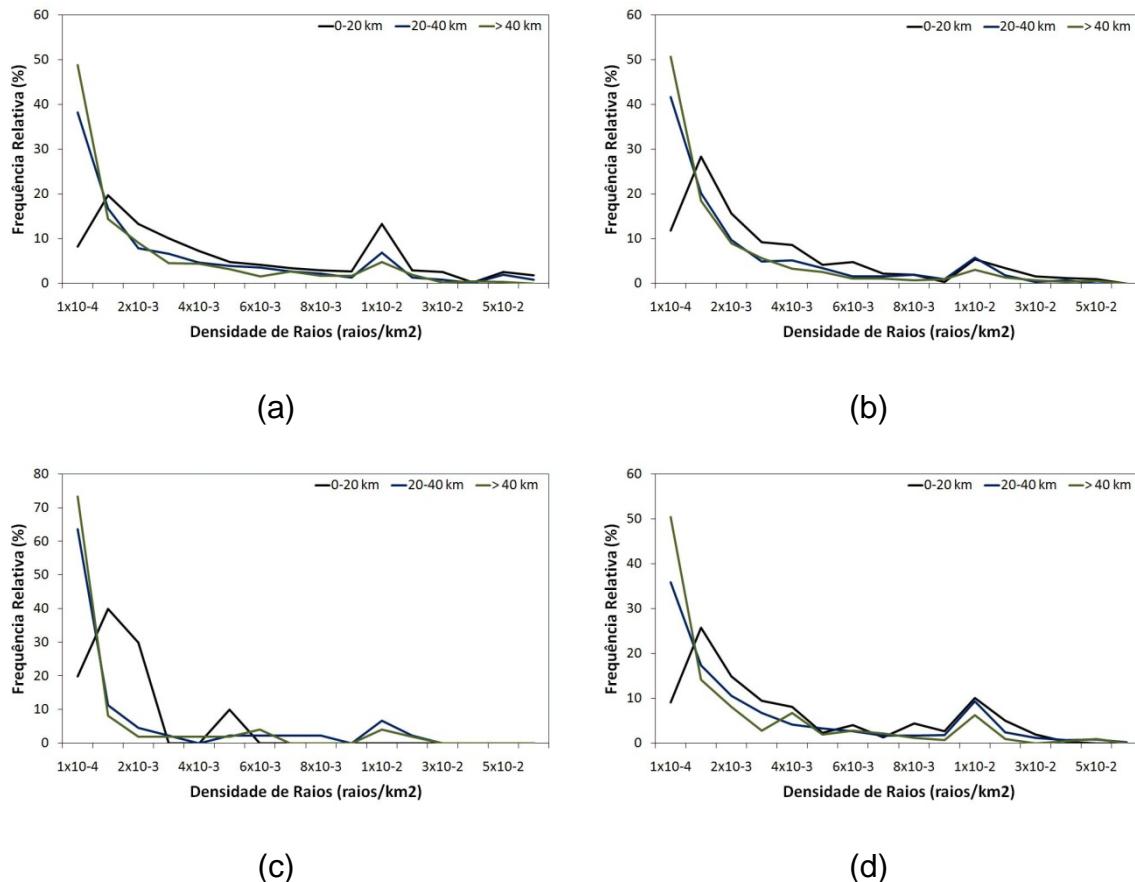


Figura 7.33 - Freqüência da Densidade de Descargas Atmosféricas, divididas em intervalos de tempo de vida dos SC (0 - 20, 20 - 40 e > 40 km). (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera.

### 7.6.2 Distribuição espacial das densidades de raios

A distribuição espacial da densidade de descargas atmosféricas para o período e região do estudo está ilustrada na Figura 7.34a-d. Como podemos observar, com exceção do inverno, existe uma grande distribuição das densidades de raios ( $\text{raios}/\text{km}^2$ ) variando de  $10^{-3}$  a  $10^{-1}$   $\text{raio}/\text{km}^2$ . Para os estados de Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Sul de Goiás, Mato Grosso do Sul e Sudoeste de Minas Gerais as densidades foram praticamente maiores que  $3 \times 10^{-2}$   $\text{raio}/\text{km}^2$  em quase todas as estações. Para o verão (Figura 7.34a) as maiores densidades de raios, no continente, ficaram concentradas no centro do estado de Santa Catarina, na costa e noroeste do Paraná, sobre a região nordeste de São Paulo divisa com o estado do Rio de Janeiro, foram observadas densidades maiores  $9 \times 10^{-2}$   $\text{raio}/\text{km}^2$ . Analisando todas as figuras observou-se que o verão foi a estação que apresentou uma maior quantidade de densidade de raios em relação aos outros meses. Esse fato se explica devido a atuação de fenômenos meteorológicos como os SF, ZCAS (Parmezani et al. 1998; Solorzano et al. 1999), convecção local (Coelho & Diniz, 2009), brisas (Soares et al., 2004) e a maior ocorrência de SC (Scaglione, 2006). No outono as maiores densidades de raios foram para o nordeste do estado de São Paulo, divisa com o estado do Rio de Janeiro e, centro oeste. Os valores para estas localidades foram também superiores a  $9 \times 10^{-2}$   $\text{raio}/\text{km}^2$ . As densidades de raios para os meses de inverno foram de no máximo  $5 \times 10^{-2}$   $\text{raio}/\text{km}^2$  e em locais bem localizados, segundo Lima & Gomes (2009) os meses de Junho e Julho são os que apresentam as menores ocorrências de descargas atmosféricas e que o principal fenômeno meteorológico que atua durante estes meses é os SF, embora atuem praticamente todo ano, são nos meses de inverno que apresentam baixa atividade convectiva (Oliveira, 1986). Sendo as maiores densidades observadas no sudeste e oeste de Minas Gerais e norte do Paraná. O fato de menores densidades observadas nos meses de inverno deve-se ao fato de que nesses meses a atividade convectiva na região de estudo é menor, portanto, se observa menores ocorrências de SC que possam a vir se tornar uma tempestade. Já os meses da primavera, as densidades de raios se mostraram bastante semelhante aos meses de verão e outono, com maiores densidades no nordeste do estado de São Paulo, valores acima de  $9 \times 10^{-2}$ .

As altas densidades de raios na região Nordeste de São Paulo divisa com Rio de Janeiro são explicadas pela topografia (Gomes, 2003), pois nesta região a topografia é elevada (Figura 7.35), conhecida como Serra da Mantiqueira. Fenômenos como os sistemas frontais ao passarem por estas regiões sofrem orografia, ou seja, a banda de nuvens é obrigada a se elevar, resfriando-se e causando precipitações intensas (chuva de relevo) devido à formação de tempestades convectivas.

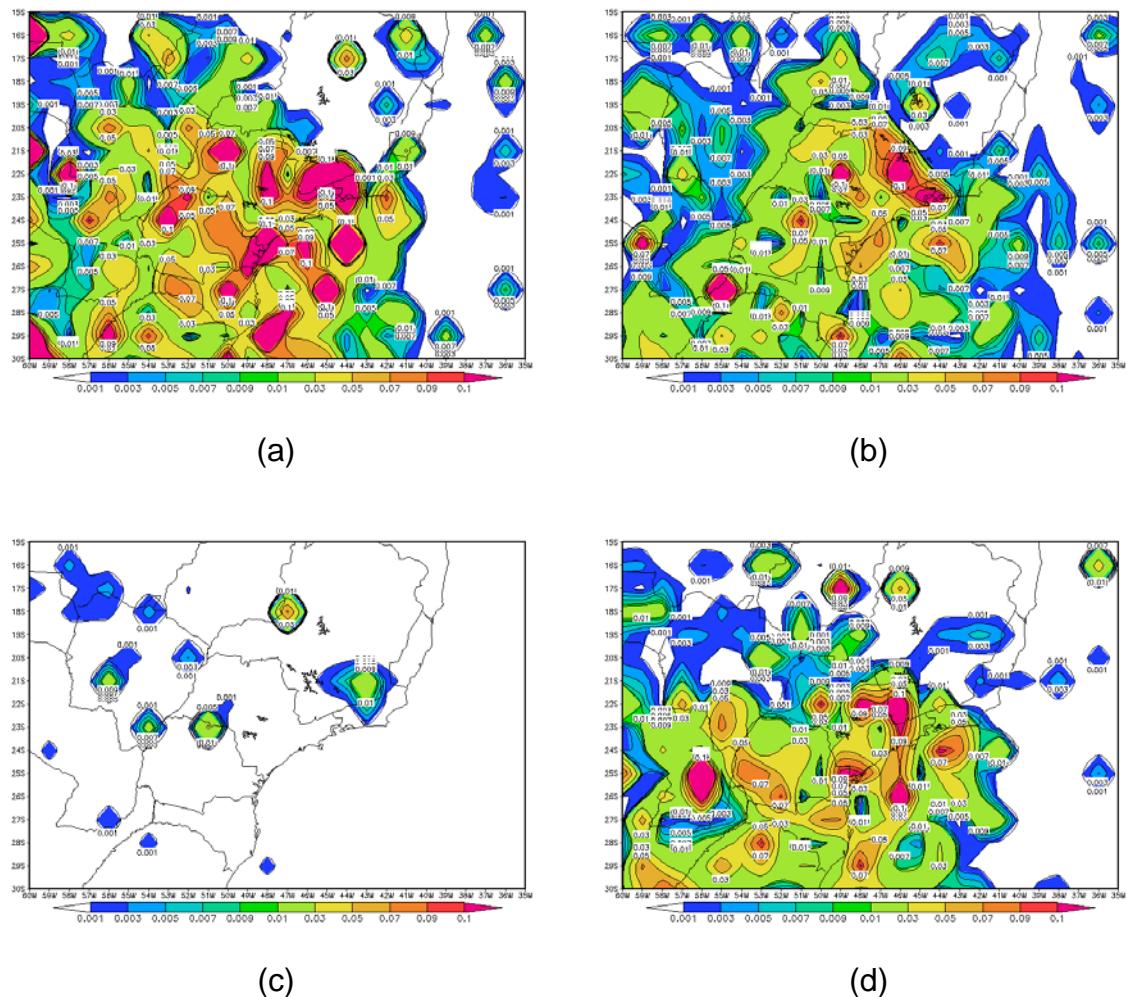


Figura 7.34. Distribuição espacial das densidades das descargas atmosféricas observadas no período estudado. (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera.

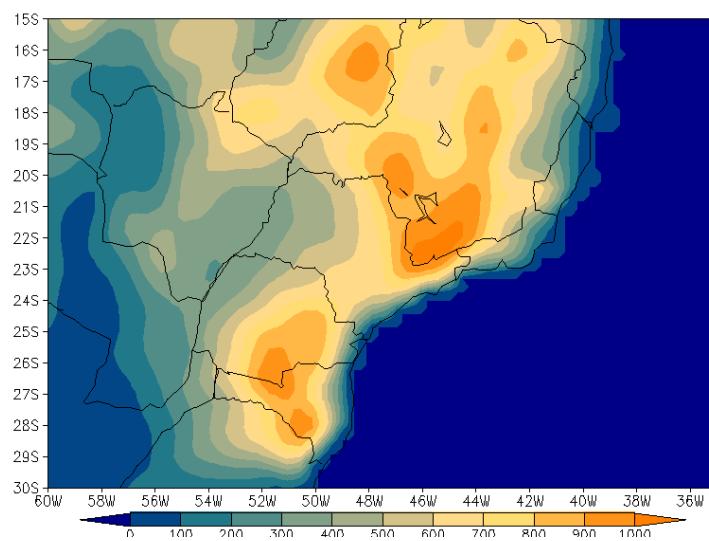


Figura 7.35. Topografia da região de estudo.

## 8. ANÁLISE DAS DIFERENÇAS DAS TEMPERATURAS DE BRILHO DOS CANAIS INFRAVERMELHO E VAPOR D'ÁGUA

Neste capítulo são analisadas as frações das nuvens em função das diferenças de temperaturas dos canais WV-IR para a fase inicial e para todo o desenvolvimento do ciclo de vida dos sistemas. São analisadas também as frações dos SC em função das temperaturas de brilho e por último foi analisado as diferenças das temperaturas de brilho dos canais IW-IR para os pixels que apresentaram descargas atmosféricas.

### 8.1. Distribuição de Temperaturas na Fase Inicial

Com a finalidade de observar diferenças na fração das nuvens de SC que se tornam tempestades e SC que não se tornam tempestades, foi analisada a relação de fração de nuvem em função da temperatura de brilho e, a relação da fração das nuvens em função da diferença das temperaturas de brilho dos canais IR-WV para o início dos SC. Como se pode observar na Figura 8.1a, no qual mostra a relação da fração da nuvem em relação à temperatura de brilho para a estação de verão, não existe uma diferença na fração entre SC que se tornam tempestades e SC que não se tornam tempestades para um intervalo de temperatura de 270 a 255K. Para temperaturas de brilho menores que 255K, se observam maiores frações da nuvem para SC que se tornaram tempestades, enquanto que para os demais SC se observam sempre menores valores da fração da nuvem. Para uma temperatura de brilho de 255K se observa que a fração da nuvem de SC que não se tornam tempestades está em torno de 25% da nuvem, enquanto que para a mesma temperatura para SC que se tornam tempestades observa-se uma maior porcentagem da nuvem com essa temperatura, sendo de aproximadamente 70%. Para SC que não se tornam tempestades foi possível verificar que não se observam nuvens para temperaturas inferiores a 212K, enquanto SC que se tornam tempestades apresentam 10% da fração da nuvem para esta temperatura. Comparando os resultados obtidos na Figura 52a com a análise das temperaturas mínimas dos SC descritas no item 7.3.3, observou-se que os SC que se tornam tempestades normalmente apresentam temperaturas menores do que SC que não

se tornam tempestades e, no caso de tempestades apresentam uma fração da nuvem maior para temperaturas menores.

A Figura 8.1b ilustra a fração da nuvem em função da diferença das temperaturas de brilho entre os canais IR-WV para a estação de verão. Observou-se que para uma diferença de -20 K entre os canais de WV-IR, encontra-se uma fração de 65% da nuvem em SC que não se tornam tempestades, enquanto que para essa mesma diferença os SC que se tornam tempestades tem aproximadamente 90% da fração da nuvem. Já para uma diferença de -10K entre as imagens dos canais IR-WV, a fração da nuvem no inicio dos SC que não se tornaram tempestades e dos SC que se tornaram tempestades foi de 10 e 50%, respectivamente. Com uma diferença de -5%, os SC que não se tornam tempestades têm uma fração de 5% da nuvem, enquanto que os SC que se tornam tempestades apresentam uma fração de 20% para a mesma diferença. Pode-se observar que quanto menor for a diferença negativa entre as temperaturas de brilho dos canais de IR-WV, maior será a fração da nuvem em SC que se tornam tempestades, sendo que para diferenças maiores que zero observa-se uma semelhança entre as frações das nuvens para ambos os casos (com/sem tempestades) com valores aproximados de 2 e 3%.

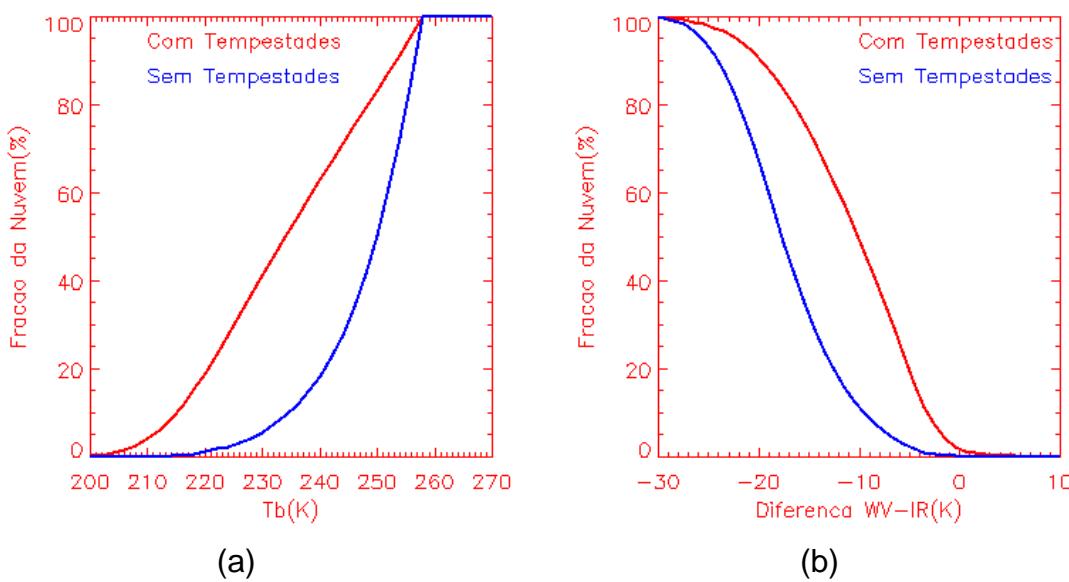


Figura 8.1 - Estação de verão. (a) Fração da nuvem em função da Temperatura de Brilho; (b) Fração da nuvem em função das diferenças de temperatura de brilho dos canais WV-IR.

Para a estação de outono (Figura 8.2a-b), podemos verificar que existe a mesma relação encontrada para a estação de verão, ou seja, a fração da nuvem para SC que se tornam tempestades sempre apresentam valores maiores do que os SC que não se tornam tempestades para temperaturas de brilho menores que 255K. Para as temperaturas de brilho do outono (Figura 56a), não se observou nuvens para temperaturas de brilho inferiores a 210K para SC que não se tornaram tempestades. Já os SC que se tornaram tempestades se observaram nuvens para temperaturas de brilho até 200 K.

A análise das diferenças de temperaturas de brilho em ambos os canais (IR-WV) mostrou que para diferenças negativas maiores que 0 K a fração da nuvem de SC que se tornaram tempestades sempre é maior do que de SC que não se tornaram tempestades, sendo o mesmo resultado encontrado para a estação de verão. Entretanto, para a estação do outono, os SC que não se tornaram tempestades e apresentaram valores de diferenças de temperaturas superiores a 0 K tiveram frações de nuvens de aproximadamente 4%, enquanto que SC que se tornaram tempestades apresentaram valores de fração de nuvens para diferenças de até 0 K, sendo que para esta temperatura a fração da nuvem observada não foi maior que 1% para estes sistemas.

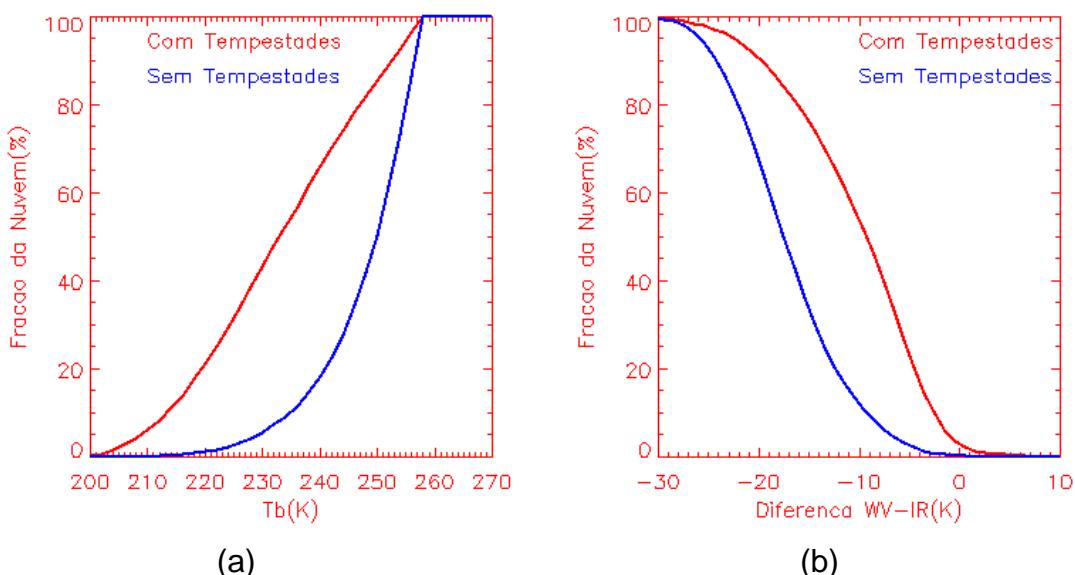


Figura 8.2 - Estação de outono. (a) Fração da nuvem em função da Temperatura de Brilho; (b) Fração da nuvem em função das diferenças de temperatura de brilho dos canais WV-IR.

Para os meses de inverno (Figura 8.3a-b), pode-se verificar que segue a mesma relação encontrada nas estações do ano analisada anteriormente, ou seja, a fração da nuvem para SC que se tornam tempestades sempre apresentam valores maiores do que os SC que não se tornam tempestades para temperaturas de brilho menores que 255K. Para as temperaturas de brilho do inverno (Figura 8.3a), não se observou nuvens para temperaturas de brilho inferiores a 225K para SC que não se tornaram tempestades, sendo que para estação de verão observou-se nuvens para SC que não se tornaram tempestade até 212 K. Já os SC que se tornaram tempestades não se observaram nuvens para temperaturas inferiores a 215K, enquanto que para a estação de primavera observaram-se nuvens até 202K. Isso indica que as nuvens que se tornam tempestades no inverno normalmente são mais quentes do que as nuvens de tempestade das outras estações.

A análise das diferenças de temperaturas de brilho em ambos os canais (IR-WV) mostrou que para diferenças negativas maiores que -2K a fração da nuvem de SC que se tornaram tempestades sempre é maior do que de SC que não se tornaram tempestades, sendo o mesmo resultado encontrado para as outras estações do ano. Entretanto, para a estação do inverno, os SC que não se tornaram tempestades e tiveram valores de diferenças de temperaturas superiores a -2K apresentaram frações de nuvens de aproximadamente 10%, enquanto que SC que se tornaram tempestades apresentaram valores de fração de nuvens para diferenças de até 1K, sendo que para esta temperatura a fração da nuvem observada não foi maior que 2% para estes sistemas.

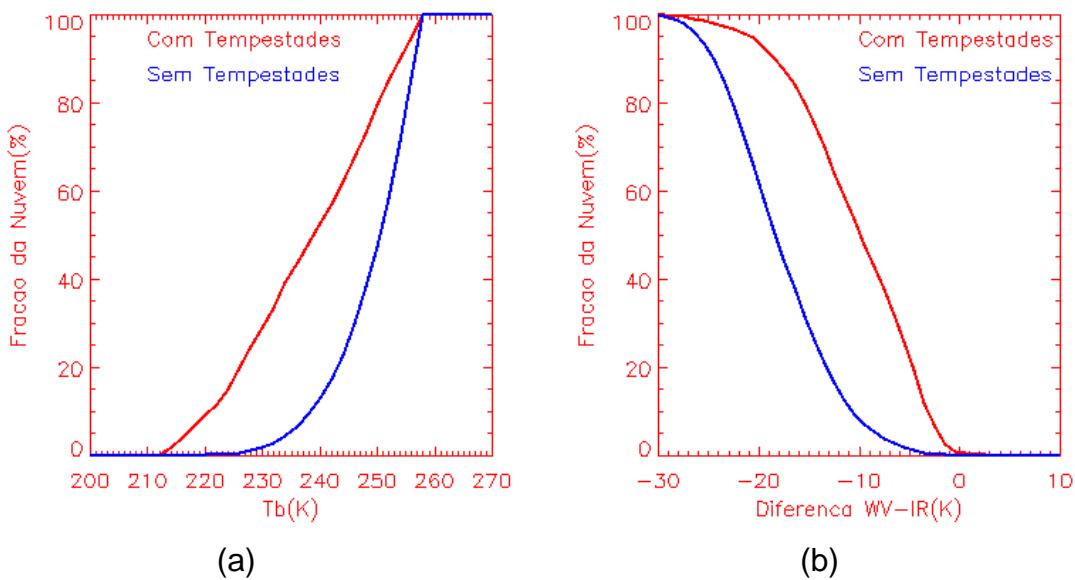


Figura 8.3 - Estação de inverno. (a) Fração da nuvem em função da Temperatura de Brilho; (b) Fração da nuvem em função das diferenças de temperatura de brilho dos canais WV-IR.

Como se pode observar na Figura 8.4a, no qual mostra a relação da fração da nuvem em relação à temperatura de brilho para a estação de primavera, não existe uma diferença na fração entre SC que se tornam tempestades e SC que não se tornam tempestades para um intervalo de temperatura de 270 a 255K, o mesmo observado para as outras estações analisadas. Para temperaturas de brilho menores que 255K, se observou maiores frações da nuvem para SC que se tornaram tempestades, enquanto que para os SC que não se tornaram tempestades observaram-se sempre menores valores da fração da nuvem. Para a temperatura de brilho de 255K se observa que a fração da nuvem de SC que não se tornam tempestades está em torno de 25% da nuvem, enquanto que para a mesma temperatura para SC que se tornam tempestades observa-se uma maior porcentagem da nuvem com essa temperatura, sendo de aproximadamente 70%. Para SC que não se tornam tempestades foi possível verificar que não se observam nuvens para temperaturas inferiores a 215K, enquanto SC que se tornam tempestades apresentam 10% da fração da nuvem para esta temperatura.

Os resultados para a estação de primavera são muito semelhantes aos obtidos na análise da estação de verão, sendo que fazendo a mesma comparação dos resultados obtidos na análise das temperaturas de brilho (Figura 8.4a) com a

análise das temperaturas mínimas dos SC, observou-se que os SC que se tornam tempestades apresentam temperaturas menores do que SC que não se tornam tempestades.

A Figura 8.4b ilustra as frações da nuvem em função da diferença das temperaturas de brilho entre os canais IR-WV para a estação da primavera. Observa-se que para uma diferença de -20K entre os canais de WV-IR apresenta uma fração de 65% da nuvem para SC que não se tornam tempestades, enquanto que para essa mesma diferença os SC que se tornam tempestades tem aproximadamente 90% da fração da nuvem. Já para uma diferença de -10K entre as imagens dos canais IR-WV, as frações das nuvens para SC que não se tornaram tempestades e SC que se tornaram tempestades foi de 10 e 50%, respectivamente. Com uma diferença de -5%, os SC que não se tornam tempestades têm uma fração de 5% da nuvem com essa diferença, enquanto que os SC que se tornam tempestades apresentam uma fração de 20% para a mesma diferença. Pode-se observar que quanto menor for a diferença negativa entre as temperaturas de brilho dos canais de IR-WV, maior será a fração da nuvem de SC que se torna tempestade, sendo que para diferenças maiores que zero observa-se uma semelhança entre as frações das nuvens para ambos os casos (com tempestades/sem tempestades) com valores aproximados de 2 e 3%.

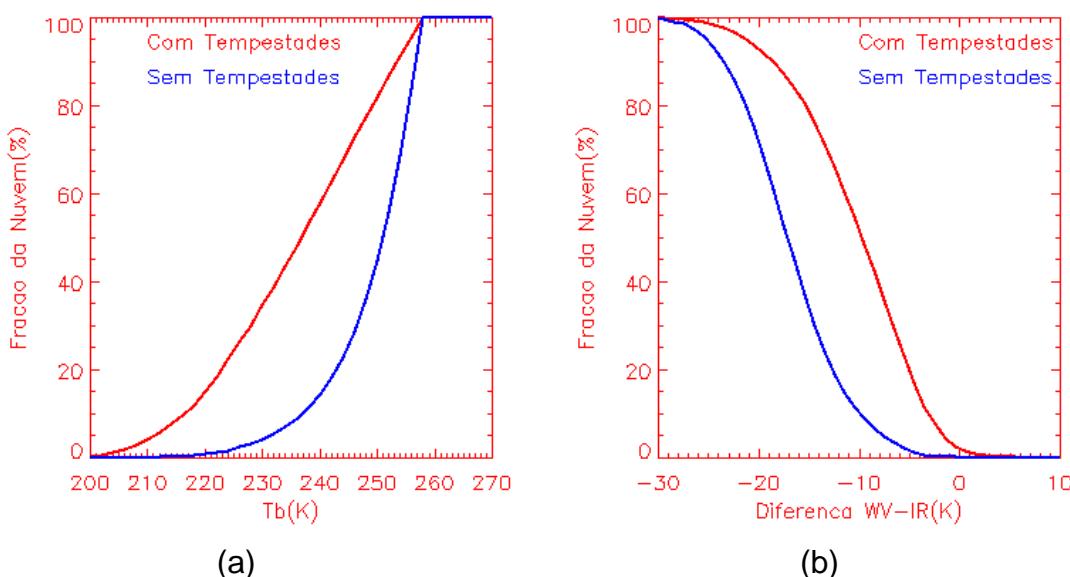


Figura 8.4 - Estação de primavera. (a) Fração da nuvem em função da Temperatura de Brilho; (b) Fração da nuvem em função das diferenças de temperatura de brilho dos canais WV-IR.

## 8.2. Ciclo de Vida

Para investigar se existia alguma relação das frações das nuvens com as temperaturas de brilho durante todo o tempo de vida dos SC, buscou-se analisar essa relação para intervalos de duração máxima dos SC, sendo de 1-2, 2-4 e 4-8 horas de vida. Como pode ser analisado no item 8.5a, as frações das nuvens no inicio dos SC que se tornam tempestades foram sempre maior do que aqueles SC que não se tornaram tempestades para um determinado intervalo de temperatura (aproximadamente de 255 a 210 K). A estação de verão está ilustrada nas Figuras 8.5 (sem tempestades) e 8.6 (com tempestades). Como se pode verificar nas Figuras 8.5a e 8.6a, para os SC que duraram de 1-2 horas não foi observado uma variação nas frações da nuvem durante todo o tempo de vida, ou seja, a fração encontrada em uma determinada temperatura de brilho se manteve durante todo o desenvolvimento do SC, sendo que para uma temperatura de brilho de 250 K, as frações das nuvens de SC que não se tornaram tempestades (Figura 8.5a) foram de 55%, enquanto que para essa mesma temperatura os SC que se tornaram tempestades (Figura 8.6a) apresentaram frações em torno de 85% durante todo o tempo de vida. Os SC que não se tornaram tempestades e que tiveram durações entre 2-4 horas, assim como os SC que tiveram duração máxima entre 4-8 horas, apresentaram aproximadamente 65% da fração da nuvem para a temperatura de 250 K. Já os SC que se tornaram tempestades, tiveram maiores frações da nuvem durante todo o tempo de vida para essa mesma temperatura, sendo que para os SC que tiveram durações de até 4 horas observou-se uma fração da nuvem de 85% e os SC que duraram até 8 horas tiveram uma fração em torno de 90% durante todo o ciclo de vida do SC.

As Figuras 8.5b e 8.6b ilustram as frações dos SC no tempo normalizado em função das diferenças das temperaturas de brilho entre os canais WV-IR para a estação de verão. Os SC também foram divididos em 3 intervalos de durações sendo de 1-2, 2-4 e 4-8 horas. Analisando os sistemas que tiveram durações entre 1-2 horas e se tornaram tempestades (Figura 8.6b) em uma diferença negativa de 5K entre os canais WV-IR, tiveram frações entre 90-100% durante todo o ciclo de vida (iniciação, maturação, dissipação). Para esta diferença os SC que tiveram durações de 2-4 e 4-8 horas apresentaram os mesmos valores de frações dos SC que tiveram durações de 1-2 horas. Para os SC que não se tornaram tempestades

(Figura 8.5b) tiveram para um tempo de vida de 1-2 horas 20% da fração da nuvem para a diferença negativa de 5K, enquanto que sistemas que apresentaram durações de 2-4 e 4-8 horas tiveram frações variando de 60-80% durante todo o ciclo de vida.

Analizando uma diferença nula, ou seja, 0K, observou-se que para os SC que se tornam tempestades (Figura 8.6b) e tiveram durações de 1-2 e 2-4 horas as frações observadas dos SC estiveram em torno de 20-30% durante todo o ciclo de vida dos sistemas. Os SC que tiveram durações de 4-8 horas apresentaram frações variando de 40-50% no estágio inicial e de 10% no estágio de dissipaçāo. Já os SC que não se tornaram tempestades apresentaram frações apenas para sistemas que tiveram durações de 2-4 e 4-8 horas sendo que os valores observados estiveram próximos a 10% para todo o ciclo de vida.

Para uma diferença positiva de 5 K, os SC que se tornaram tempestades apresentaram frações de 10% de nuvens para qualquer tempo de duração e durante todo o ciclo dos sistemas, enquanto que os SC que não se tornaram tempestades (Figura 8.5b) não apresentaram nuvens para qualquer intervalo de duração para esta diferença dos canais WV-IR.

As analyses permitem observar que os SC que se tornam tempestade, na estação de verão, apresentam maiores frações do SC em temperaturas mais frias, sendo que para uma temperatura de 250 K as frações observadas variaram entre 85/90%, enquanto que os SC que não se tornaram tempestade tiveram frações entre 55/65% para este limite de temperatura. Pode-se observar que para diferenças negativas de 5 K, os SC que se tornam tempestades apresentam maiores frações quando comparados com aqueles sistemas que não se tornaram tempestades, sendo que os SC com tempestades e com diferenças negativas de 5 K observaram-se frações entre 90/100% e para os SC que não se tornaram tempestades os valores de frações observados variaram entre 20/80%.

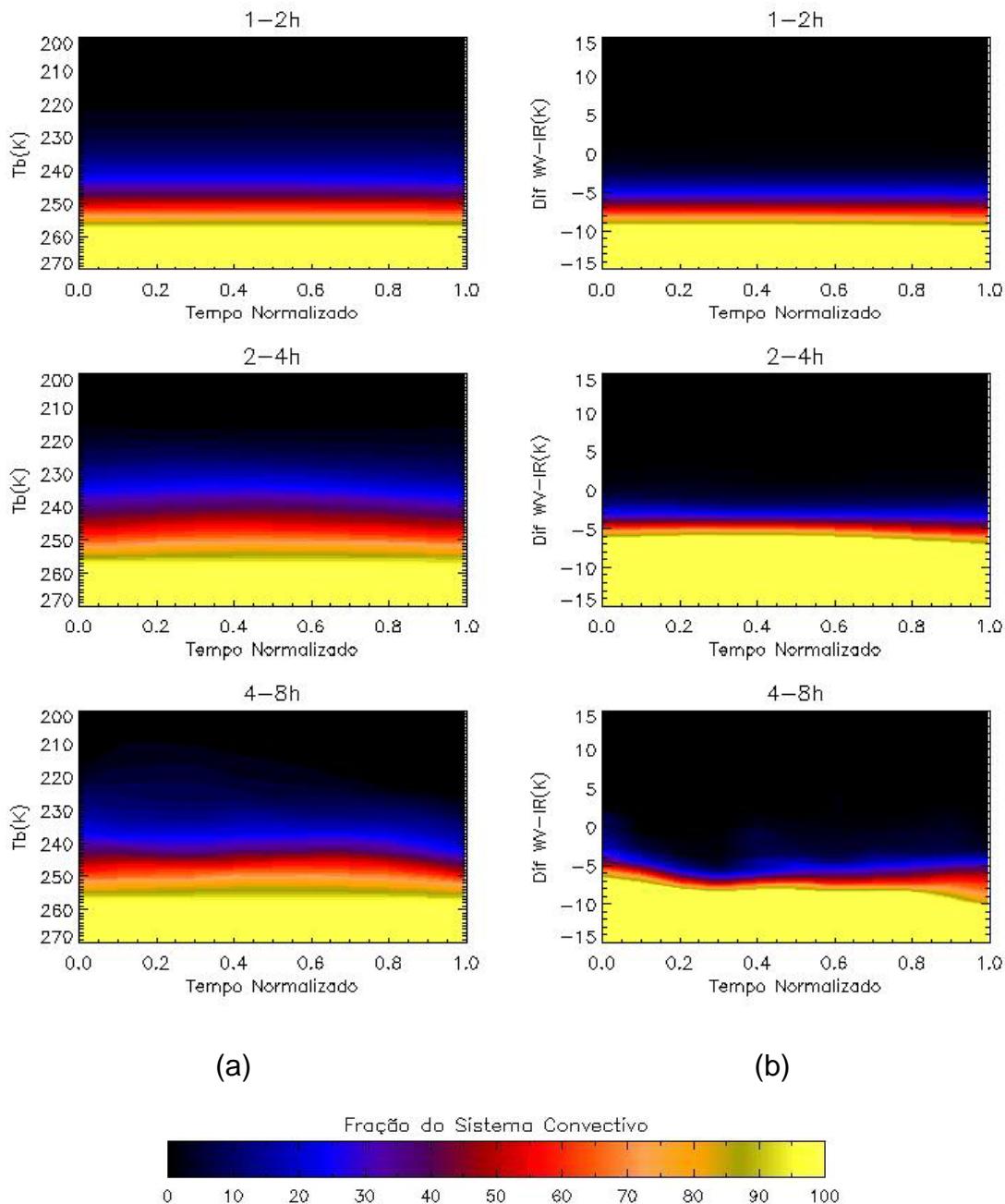


Figura 8.5 – Fração dos Sistemas Convectivos que não se tornaram tempestades para a estação de verão dívidas em intervalos de durações máximas de 1-2, 2-4 e 4-8 horas. (a) em função da temperatura de Brilho, (b) em função da diferença das temperaturas de brilho dos canais WV-IR.

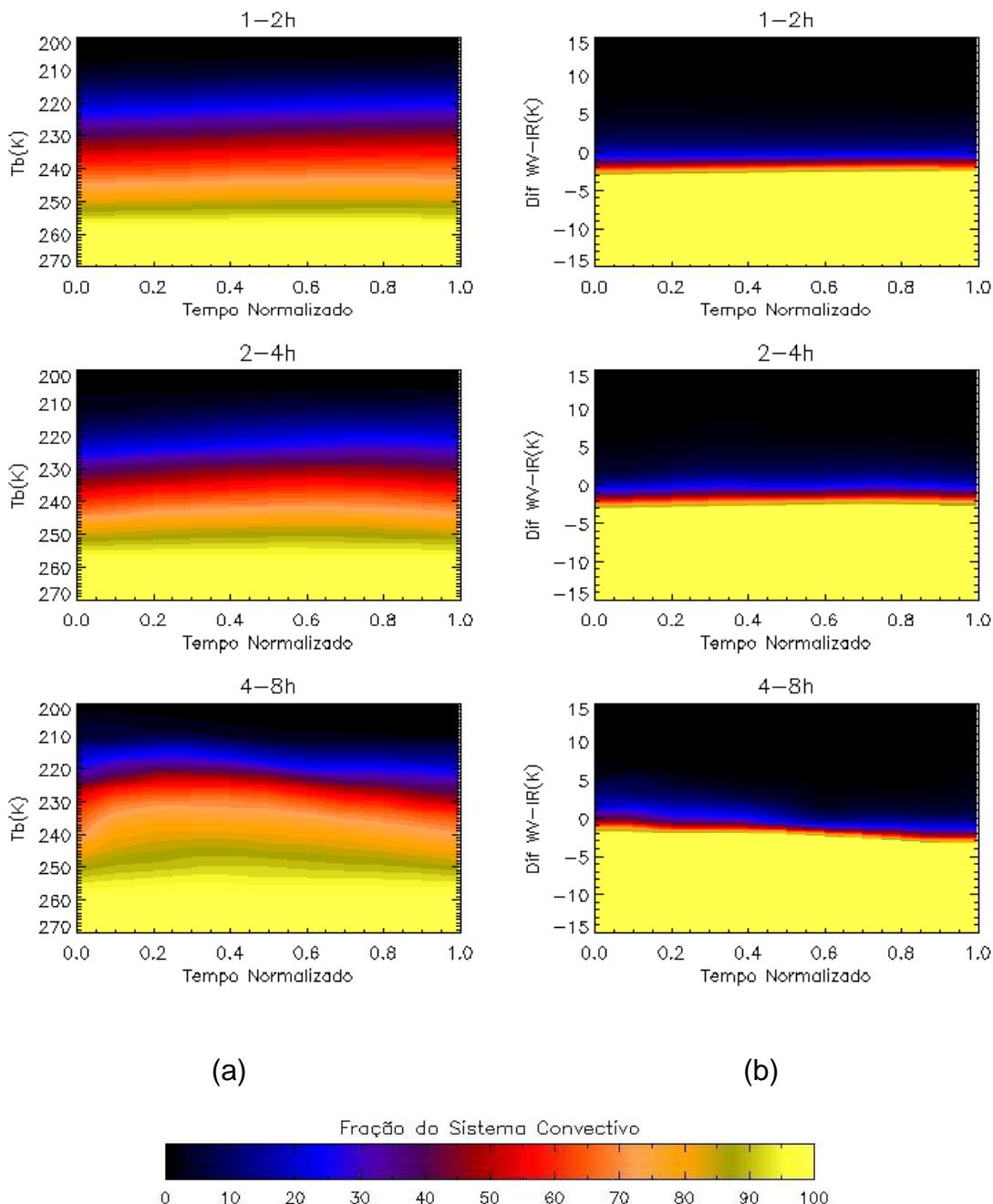


Figura 8.6 - Fração dos Sistemas Convectivos que se tornaram tempestades para a estação de verão dívididas em intervalos de durações máximas de 1-2, 2-4 e 4-8 horas. (a) em função da temperatura de Brilho, (b) em função da diferença das temperaturas de brilho dos canais WV-IR.

Na análise das temperaturas de brilho para a estação de outono (Figuras 8.7.a e 8.8a), observam-se praticamente as mesmas relações encontradas entre SC que se tornam tempestades e SC que não se tornam tempestades dos meses de verão, ou seja, encontram-se maiores frações da nuvem para SC que se tornam tempestades em um valor de temperatura pré-definido, neste caso o valor foi de 250 K.

Observou-se que para os SC que não se tornaram tempestades (Figura 8.7a), na temperatura de 250 K, a fração da nuvem foi de 35% para os SC que tiveram durações máximas entre 1-2 horas e para os SC que tiveram um tempo de vida maior que 2 horas as frações das nuvens foram de 55%. Essa porcentagem da fração da nuvem se mantém constante durante todo o ciclo de vida dos sistemas. No entanto, os SC que se tornam tempestades, ilustrado na Figura 8.8a, apresentaram porcentagens de aproximadamente 80% da fração das nuvens, em 250 K, para todos os intervalos de tempo de vida considerados neste estudo. Nota-se que os resultados encontrados nos meses de outono são semelhantes aqueles encontrados na estação de verão.

As diferenças entre os canais WV-IR para a estação de outono estão ilustradas nas figuras 8.7b (sem tempestades) e 8.8b (com tempestades). Como podemos observar para uma diferença negativa de 5 K os SC que se tornam tempestades tiveram frações entre 90-100% para qualquer tempo de duração e durante todo o ciclo de vida dos sistemas, enquanto que os SC que não se tornaram tempestades apresentaram frações de 10-20% para SC que duraram de 1-2 horas, 50% para SC que duraram entre 2-4 horas e aproximadamente 90% para SC que tiveram durações entre 4-8 horas.

Analisando uma diferença nula para os SC que se tornaram tempestades as frações dos SC que duraram entre 1-2 horas foram de 30-40%. Para SC que tiveram durações entre 2-4 horas as frações observadas foram de 20-30%. Como os SC que tiveram durações de 1-2 horas, os que duraram entre 2-4 horas não sofreram variações na fração durante o ciclo de vida dos SC. Já os sistemas que duraram entre 4-8 horas tiveram frações em torno de 10-20% e também não sofreram variações nas frações durante o ciclo de vida. Analisando os SC que não se tornaram tempestades (Figura 8.7b), para uma diferença nula entre os canais WV-IR, as frações ficaram em torno de 10-20% para qualquer tempo de duração e não sofreram variações durante o ciclo de vida.

Para uma diferença positiva de 5 K os SC que se tornaram tempestade (Figura 8.8b) apresentaram frações em torno de 10% para SC que tiveram durações entre 1-2 horas e 2-4 horas, sendo que para SC que tiveram durações entre 4-8 horas não se observou a presença de nuvens para essa diferença. Para os SC que não se tornaram tempestades (Figura 8.7b) não foram observadas nuvens, nesta diferença de temperatura entre os canais WV-IR, independentemente do tempo de duração analisado.

Assim como a estação de verão, os SC que se tornaram tempestade dos meses de outono apresentaram maiores frações, aproximadamente 80% para qualquer um dos 3 intervalos de durações considerados, sendo que para os SC que não se tornaram tempestades tiveram frações variando de 35/55%. Em alguns casos os valores de frações de SC que se tornaram tempestade foram 2 vezes maiores do que os SC que não se tornaram tempestades. A relação entre a diferença de temperatura e fração dos SC foi semelhante aos dos meses de verão, tendo em vista que os SC que se tornaram tempestades tiveram frações entre 90/100%, para uma diferença negativa de 5K, já os SC que não se tornaram tempestades tiveram frações variando entre 20/90%.

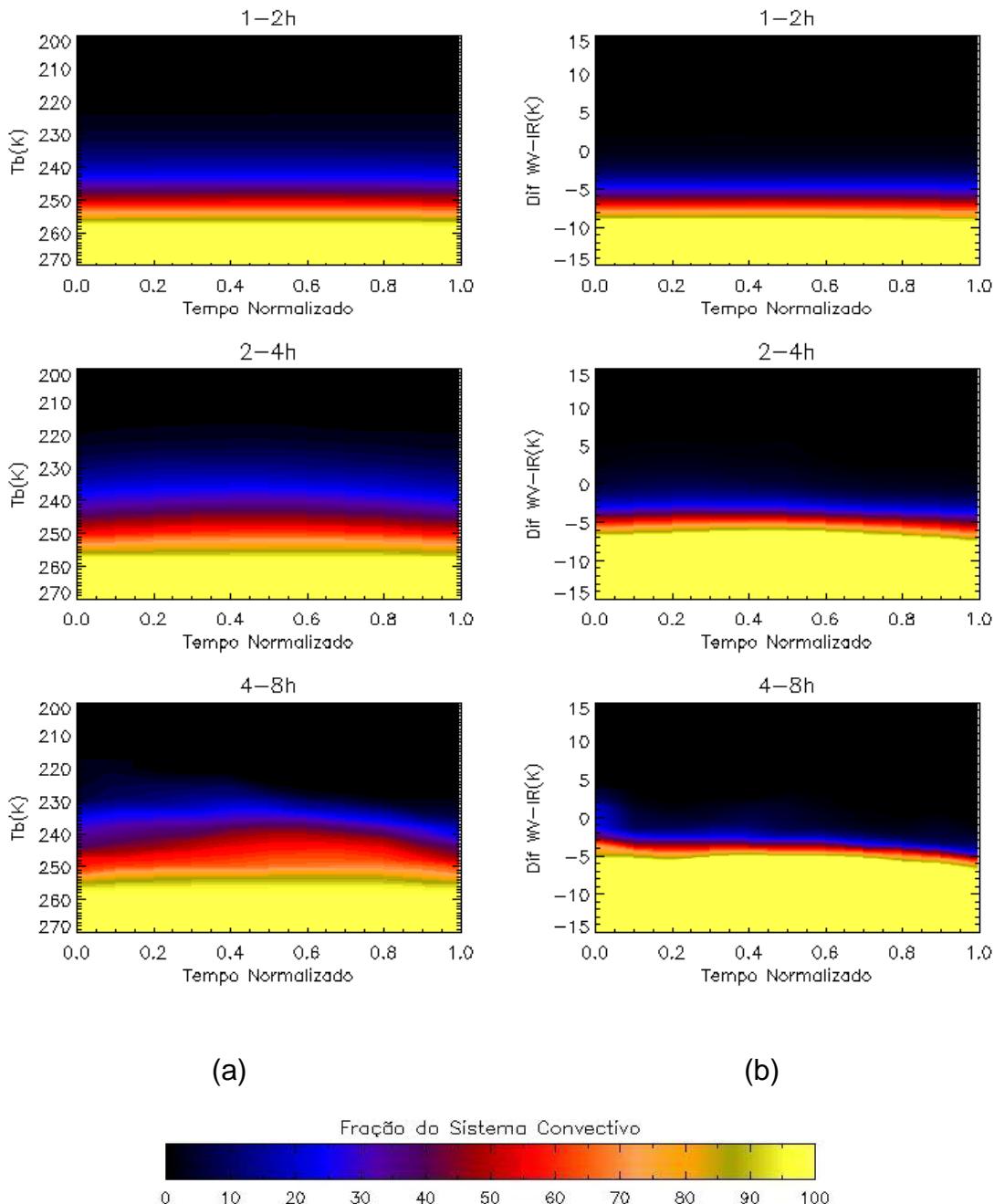


Figura 8.7 - Fração dos Sistemas Convectivos que não se tornaram tempestades para a estação de outono dívidas em intervalos de durações máximas de 1-2, 2-4 e 4-8 horas. (a) em função da temperatura de Brilho, (b) em função da diferença das temperaturas de brilho dos canais WV-IR.

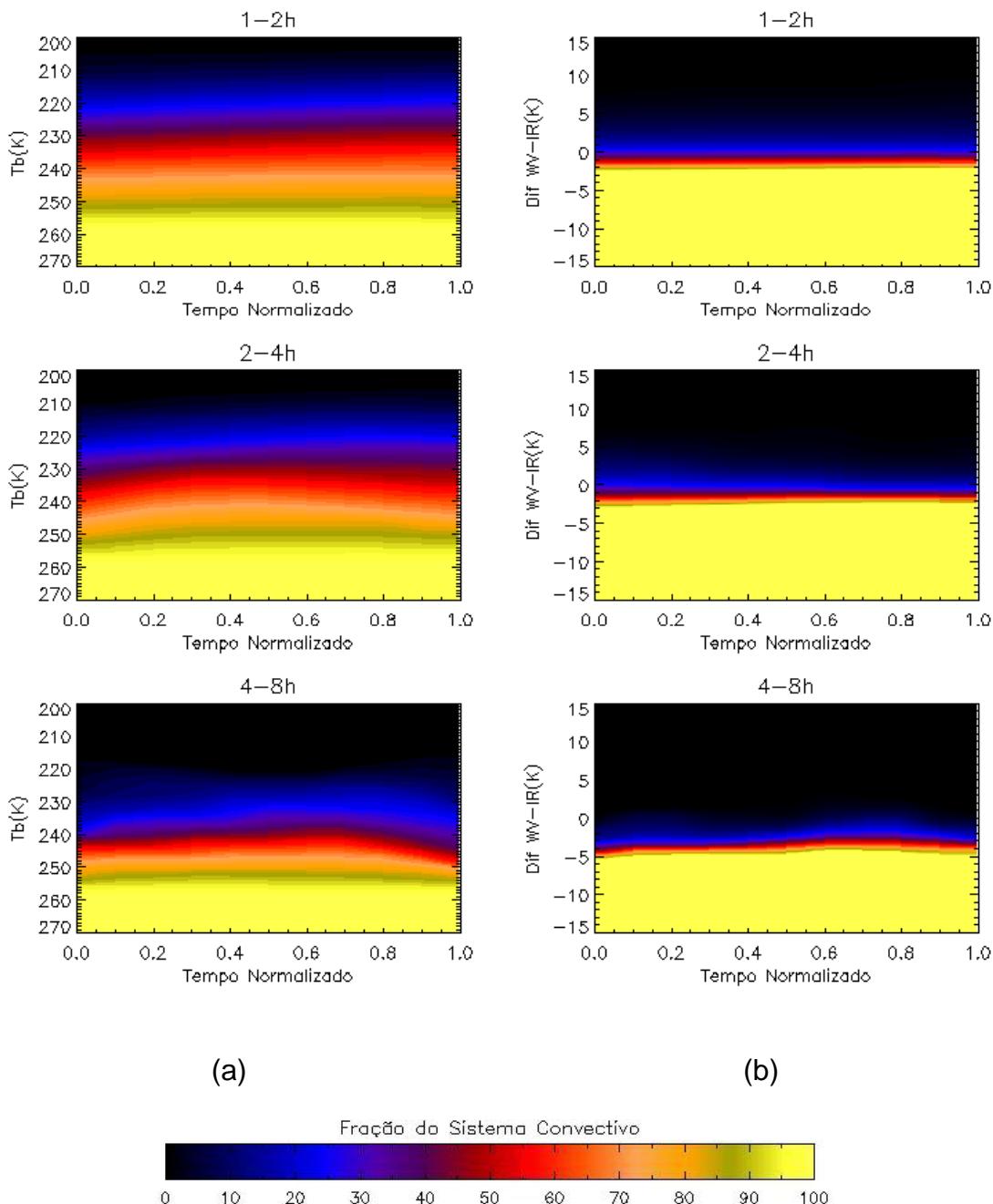


Figura 8.8 - Fração dos Sistemas Convectivos que se tornaram tempestades para a estação de outono dívidas em intervalos de durações máximas de 1-2, 2-4 e 4-8 horas. (a) em função da temperatura de Brilho, (b) em função da diferença das temperaturas de brilho dos canais WV-IR.

Para os meses de inverno também foi observado o mesmo comportamento das frações de nuvem em função das temperaturas de brilho encontradas nas estações do ano analisadas anteriormente. Para os SC que não se tornaram tempestades (Figura 8.9a) as frações das nuvens em função das temperaturas de brilho se mantiveram constante durante todo o tempo de vida. Para uma temperatura de 250 K, os SC que tiveram tempo de vida de até 2 horas apresentaram aproximadamente 45% da fração de nuvem e os SC que tiveram durações entre 2 e 4 horas tiveram frações de 55%. Já para os SC que se tornaram tempestades (Figura 8.10a), observou-se que para uma temperatura de 250 K, independentemente do tempo de vida dos SC, a fração das nuvens se manteve em 75%.

Analizando as frações das nuvens em função da diferença de temperaturas de brilho dos canais de WV-IR para o inverno, foi observado que as frações das nuvens variam com as diferenças de temperatura de brilho durante o ciclo de vida dos sistemas. Para uma diferença negativa de 5 K, os SC que não se tornaram tempestades (Figura 8.9b) e duraram de 1-2 horas tiveram uma fração de 75% no estágio inicial, sendo que nos estágios de maturação e dissipação apresentaram frações de 95%. Quando analisado para um valor nulo (0 K) de diferença das temperaturas entre os canais WV-IR, as frações das nuvens no estágio inicial foram de 60%, no estágio de maturação foi de 75% e na dissipação dos sistemas foi de 95% e não variaram durante o ciclo de vida dos sistemas. Para diferenças positivas de 5 K, os valores encontrados para os estágios de iniciação, maturação e dissipação foram de 45, 55 e 75%, respectivamente.

Para os SC que se tornaram tempestades (Figura 8.10b) e tiveram durações de 1-2 horas, as frações das nuvens observadas para uma diferença negativa de 5 K foram de 95% das frações das nuvens para essa diferença durante todo o desenvolvimento dos SC, analisando uma diferença nula foi observado que os valores também não variaram durante todo o ciclo e mantiveram valores entre 10-15%, sendo que para diferenças positivas de 5 K quase não se observou frações de nuvens nos estágios iniciais e de maturação, já no estágio de dissipação foram observadas no máximo 15% das frações das nuvens.

Analizando os SC que tiveram durações entre 2-4 horas e não se tornaram tempestades (Figura 8.9b), foram observadas para uma diferença negativa de 5 K, frações em torno de 75% no inicio do SC e 95% para os estágios de maturação e

dissipação. Para diferenças nulas (0 K) foi observado que as frações das nuvens não variaram durante o todo o ciclo de vida e estiveram em torno de 55%. Já para diferenças positivas de 5 K as frações das nuvens apresentaram valores de 40% no estágio inicial e 50% para os estágios de maturação e dissipação.

Os SC que tiveram durações entre 2-4 horas e se tornaram tempestades (Figura 8.10b) tiveram 95% das frações das nuvens para uma diferença negativa de 5 K durante todo o tempo de vida dos SC. Em diferenças nulas, as frações variaram de 30% (iniciação), 25-60% (maturação) e menos de 10% na dissipação, para diferenças positivas de 5 K os SC apresentaram frações de aproximadamente 25% no estágio inicial, entre 20-40% na maturação dos sistemas e próximo a 10% no estágio de dissipação.

Os meses de inverno também apresentaram maiores valores de frações de nuvens para SC que se tornaram tempestades, sendo que para uma temperatura de 250 K, as frações foram de 75% para qualquer intervalo de tempo de vida, já os SC que não se tornaram tempestades tiveram frações de 45/55%. A análise das diferenças de temperatura em função das frações para os meses de inverno mostraram que essa relação não se comporta como a observada para as estações de verão e outono, sendo muitas vezes observados valores muito próximos de frações para ambos os tipos de SC aqui analisados (com/sem Tempestades). Para diferenças negativas de 5 K e para SC que duraram entre 1-2 horas, as frações dos SC que se tornaram tempestades ficaram variando entre 90/100%, enquanto que os SC que não se tornaram tempestades tiveram frações entre 75/100%. Para intervalos entre 2-4 horas observou-se que os valores das frações dos SC que se tornaram tempestades e dos que não se tornaram foram bastante semelhantes.

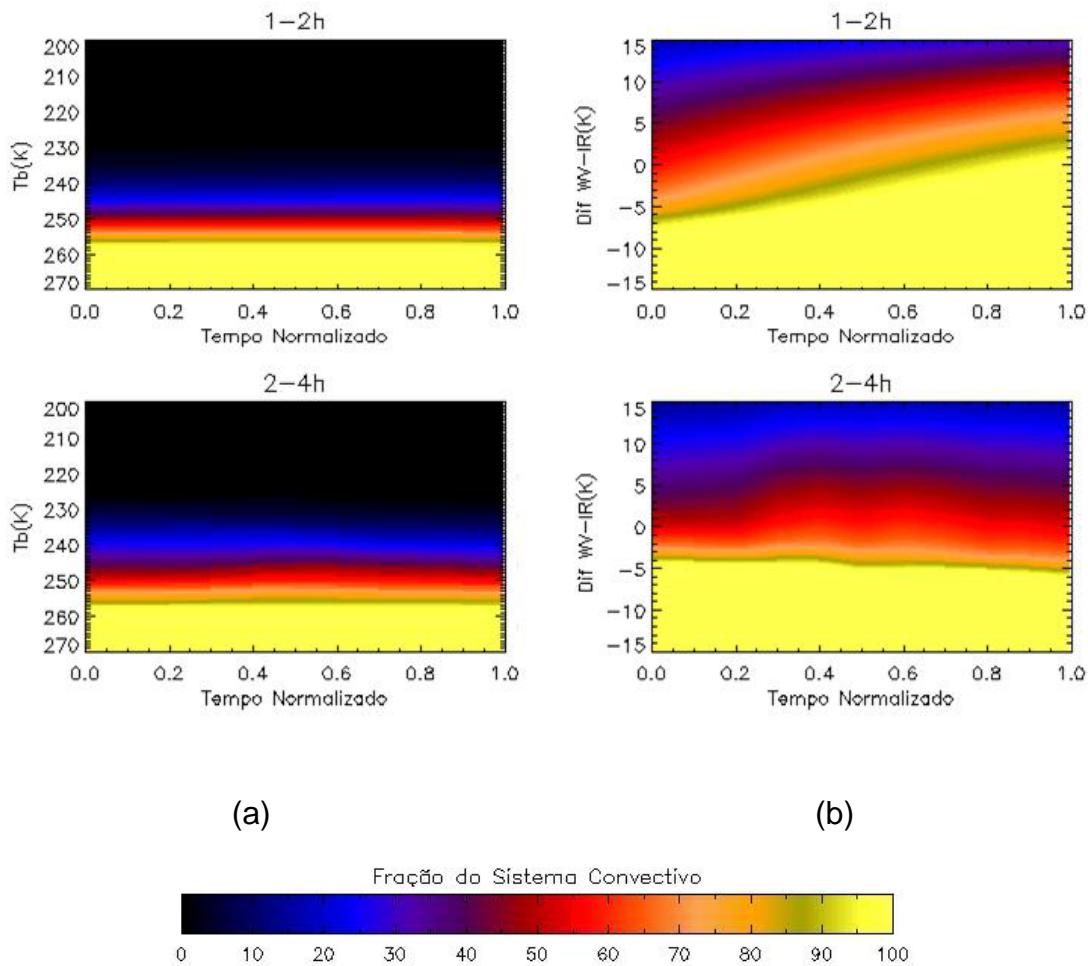


Figura 8.9 - Fração dos Sistemas Convectivos que não se tornaram tempestades para a estação de inverno dívidas em intervalos de durações máximas de 1-2, 2-4 e 4-8 horas. (a) em função da temperatura de Brilho, (b) em função da diferença das temperaturas de brilho dos canais WV-IR.

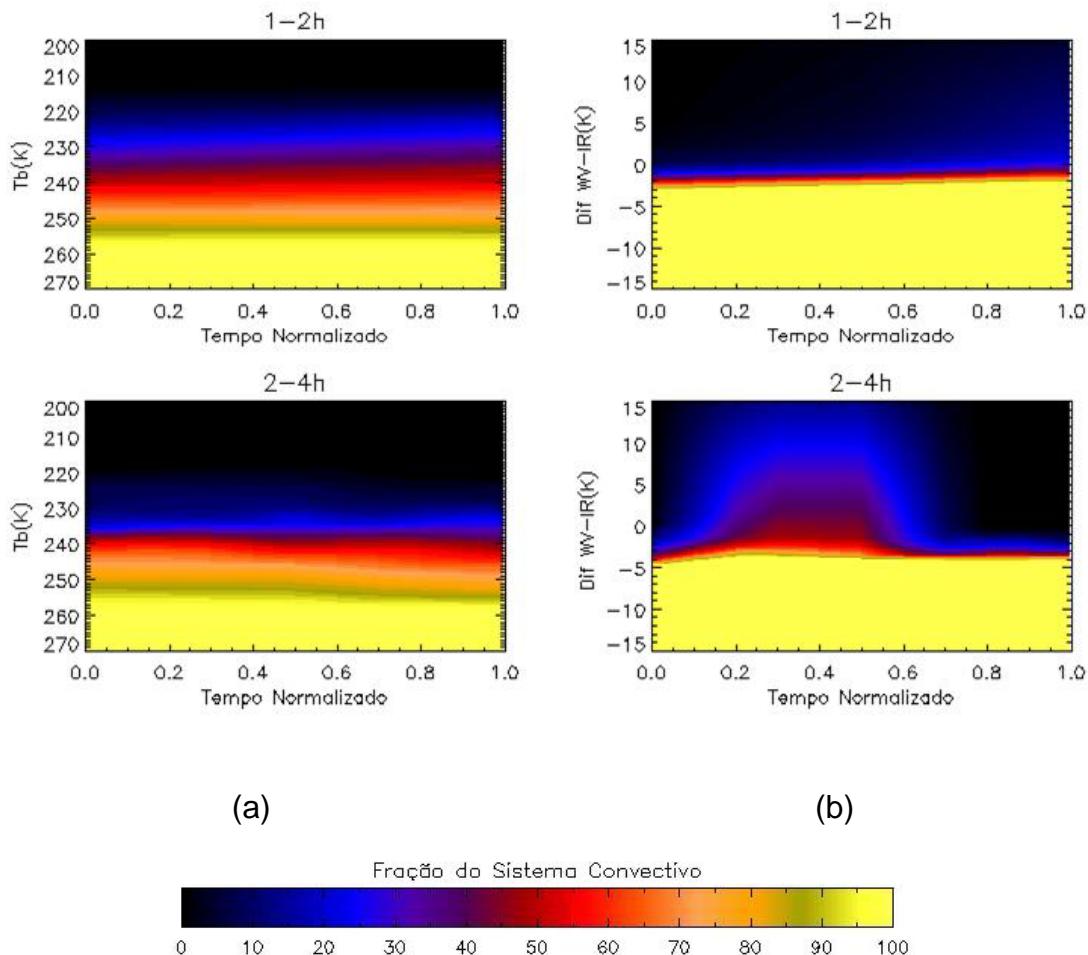


Figura 8.10 - Fração dos Sistemas Convectivos que se tornaram tempestades para a estação de inverno divididas em intervalos de durações máximas de 1-2, 2-4 e 4-8 horas. (a) em função da temperatura de Brilho, (b) em função da diferença das temperaturas de brilho dos canais WV-IR.

Na estação de primavera também se observaram frações de nuvens menores para os SC que não se observaram tempestades para uma temperatura de 250 K. Para os SC que tiveram durações entre 1-2 horas as frações para a temperatura de 250 K foram de 45% para os SC que não se tornaram tempestades (Figura 8.11a), enquanto que para os SC que se tornaram tempestades (Figura 8.12a) para esse mesmo tempo de vida foi observado um valor em torno de 80%. Essas frações foram observadas durante todo o tempo de vida dos SC. Para os SC que tiveram durações entre 2-4 horas, as frações das nuvens para SC que não se tornaram tempestades foram de 55%, e para os SC que se tornaram tempestades foi observado frações de aproximadamente 80%. Já os SC que tiveram durações entre 4-8 horas observou-se para aqueles SC que não apresentaram atividade elétrica frações em torno de 75%, enquanto que os SC em que se observou a presença de pelo menos uma descarga atmosférica foram de 80% no estágio inicial e para os estágios de maturação e dissipação as frações observadas foram de 60/65%.

Analizando as frações das nuvens em função das diferenças de temperaturas de brilho dos canais WV-IR para a estação de primavera, verificou-se que para uma diferença negativa de 5 K, os SC que tiveram durações máximas entre 1-2 horas e não apresentaram descargas atmosféricas (Figura 8.11b) apresentaram valores entre 35-45% frações no estágio inicial, 60% no estágio de maturação e entre 65-70% na dissipação do sistema, já os SC que se tornaram tempestades (Figura 8.12b) apresentaram 95% das frações das nuvens dentro desta diferença, sendo esta fração observada durante todo o ciclo de vida do sistema. Uma diferença nula (0 K) para os SC que não se tornaram tempestades e duraram de 1-2 horas foi de 25% (estágio inicial), 35% (maturação) e entre 45-55% (dissipação), sendo que para os SC que se tornaram tempestades tiveram frações de 30% no estagio inicial e para os estágios de maturação e dissipação ficaram entre 10-15%. Em uma diferença positiva de 5 K, para os SC que duraram entre 1-2 horas, observou-se que as frações variaram de 10-15% (estágio inicial), 20-25% (estágio maduro) e 25-35% (estágio de dissipação) para aqueles SC que não se tornaram tempestades (Figura 8.11b), já as frações das nuvens para SC que se tornaram tempestades (Figura 8.12b) foram praticamente zero, ou seja, sem a presença de nuvens durante os estágios de iniciação e maturação e no estágio de dissipação se observou uma fração de no máximo 15%. Os SC que tiveram durações entre 2-4 horas apresentaram valores constantes de frações durante todo o ciclo de vida, sendo que

para uma diferença negativa de 5 K os SC que não se tornaram tempestades (Figura 8.11b) tiveram frações de aproximadamente 70%, e os SC que se tornaram tempestades (Figura 8.12b) tiveram frações entre 90-100%. Analisando as diferenças nulas entre os canais WV-IR notou-se que as frações das nuvens de SC que não se tornaram tempestades estavam concentradas em torno de 20-30% no estagio inicial e 35-40% para os estágios de maturação e dissipação. Já os SC que apresentaram atividade elétrica, ou seja, se tornaram tempestades, tiveram 30% das frações das nuvens no estágio inicial e para os estágios de maturação e dissipação as frações ficaram entre 10-15% das nuvens. Para SC que duraram entre 4-8 horas e não apresentaram atividade elétrica, tiveram em uma diferença negativa de 5 K, frações variando entre 40-50% no inicio dos SC, 65-95% no desenvolvimento máximo e de 95-100% no estagio de dissipação. Para diferenças nulas e negativas em 5 K as frações ficaram concentradas no máximo em 15% para os estágios de maturação e dissipação dos sistemas. Analisando os SC que se tornaram tempestades para uma diferença negativa de 5 K, observou-se que as frações das nuvens durante os estágios dos SC estiveram sempre entre 95-100%. Quando se considera uma diferença nula, observou-se que para o estágio inicial dos SC as frações da nuvem ficam em torno de 30% (estágio inicial) e entre 10/15% para os estágios de dissipação. Já para diferenças positivas de 5 K quase não se observa nuvens no estágio inicial e de maturação, sendo que no estágio de dissipação observou-se pouco mais que 15% das frações das nuvens.

A estação de primavera apresentou a mesma relação das frações dos SC com as temperaturas observadas nas outras estações do ano, ou seja, SC que se tornam tempestade tem frações maiores em um mesmo limite de temperatura (250 K). As frações dos SC que se tornaram tempestades ficaram em torno de 80%, enquanto os demais sistemas tiveram frações variando entre 45/75%. Já a relação entre as diferenças de temperaturas e fração do SC foram bastante semelhantes aos dos meses de inverno. Sendo que apenas para os SC que tiveram durações entre 1-2 horas e uma diferença negativa de 5 K as frações dos SC que se tornaram tempestades foram maiores. Para os demais intervalos de tempo de vida e diferenças de temperaturas as frações foram maiores para SC que não se tornaram tempestades.

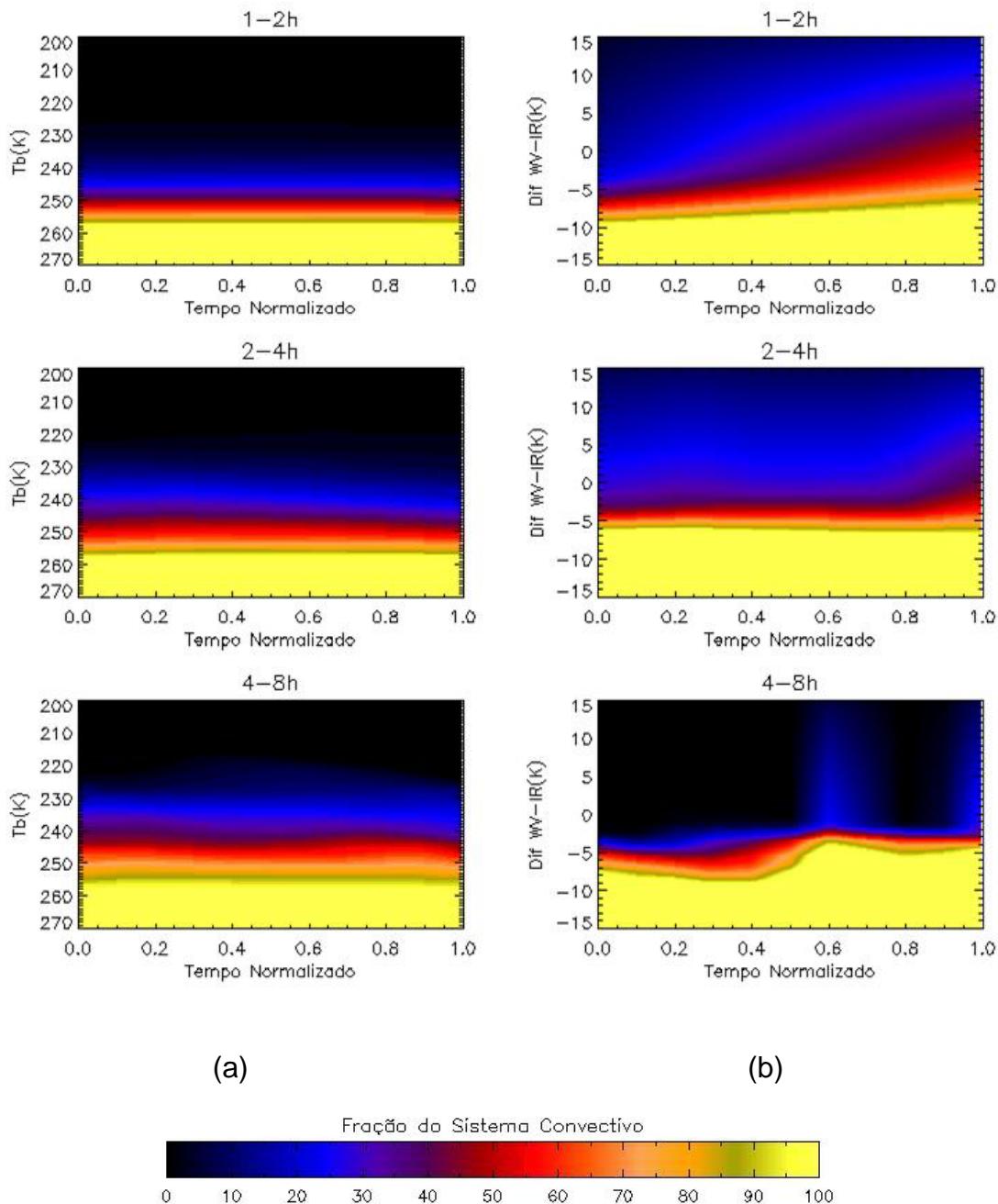


Figura 8.11 - Fração dos Sistemas Convectivos que não se tornaram tempestades para a estação de primavera dívidas em intervalos de durações máximas de 1-2, 2-4 e 4-8 horas. (a) em função da temperatura de Brilho, (b) em função da diferença das temperaturas de brilho dos canais WV-IR.

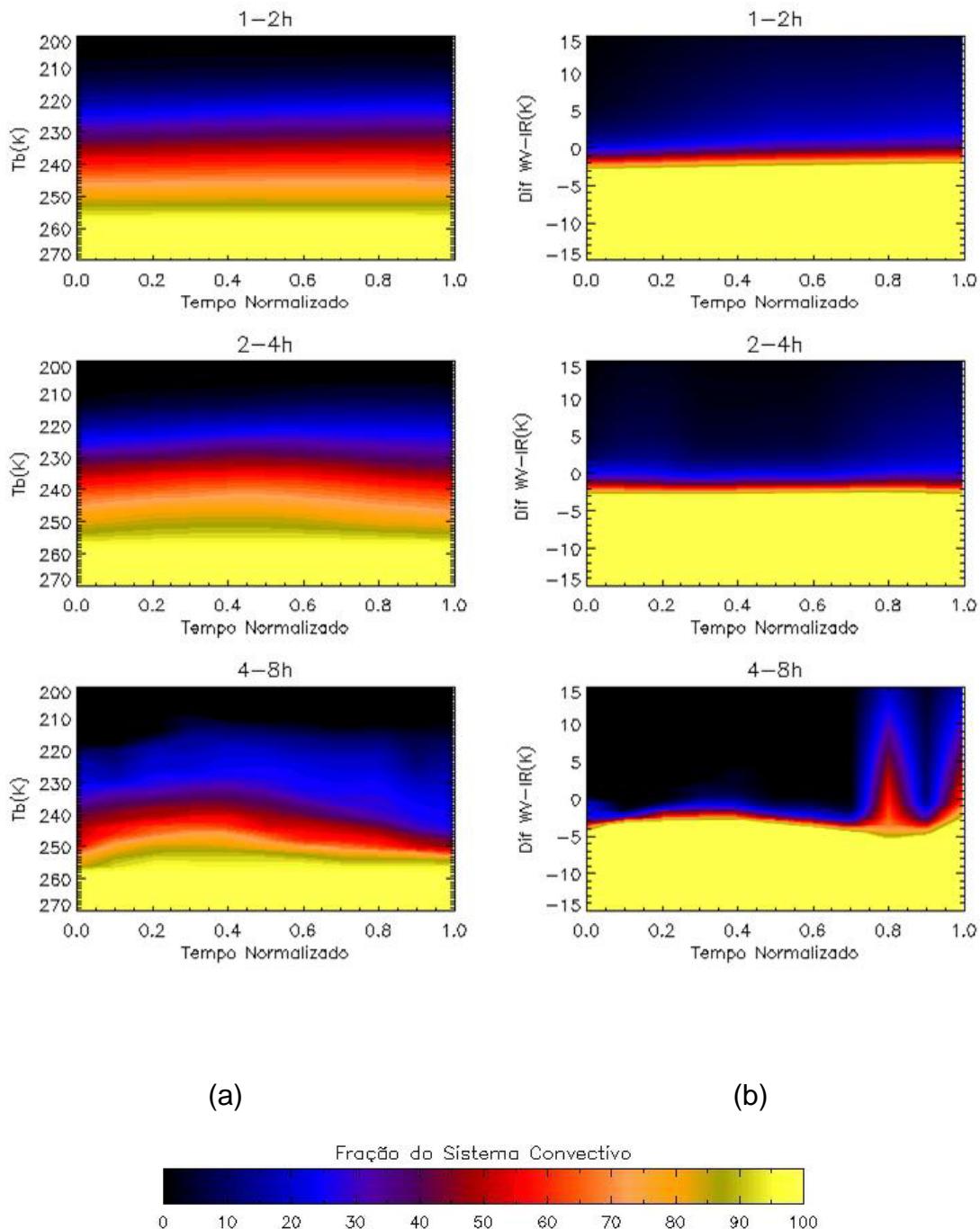


Figura 8.12 - Fração dos Sistemas Convectivos que se tornaram tempestades para a estação de primavera dívidida em intervalos de durações máximas de 1-2, 2-4 e 4-8 horas. (a) em função da temperatura de Brilho, (b) em função da diferença das temperaturas de brilho dos canais WV-IR.

A análise da relação entre as temperaturas de brilho e fração do SC e a relação entre as diferenças de temperaturas entre os canais (WV-IR) e fração dos SC podem indicar se um SC se tornará ou não tempestade. Como se pode observar, para qualquer estação do ano, as frações dos SC são maiores para SC que se tornaram tempestades, enquanto que as diferenças de temperaturas menores que 5K, para os SC das estações de verão e outono, apresentam maiores frações para SC que se tornam tempestades.

### **8.3. Distribuição de Temperaturas em Função da Densidade de Raios**

Para analisar os pixels das nuvens que apresentara ocorrências das descargas atmosféricas em função das diferenças das temperaturas de brilho dos canais WV e IR, as 91.316 ocorrências de raios, descritas no capítulo 7 item 7.6, foram separadas em função dos pixels das nuvens que sofreram a descarga. Para isso, as ocorrências de descargas atmosféricas foram divididas em 6 intervalos de classe de observações: 1, 2-4, 5-16, 17-64, 65-128 e > 129 descargas atmosféricas.

Como podem ser observadas nas curvas de ocorrências de descargas atmosféricas ilustradas na Figura 8.13a-d, com exceção dos meses de inverno (Figura 8.13c), as curvas apresentam um comportamento semelhante durante as estações do ano. Nos meses de verão, outono e primavera (Figura 8.13 a,b,d) foi possível observar que para diferenças dos canais WV-IR em um intervalo de -15 a -8 K das temperaturas de brilho dos canais WV-IR as maiores freqüências de pixels observadas foram para nuvens que tiveram apenas uma descarga, sendo que as ocorrências observadas, para essa classe, ficaram entre 6 e 8%. Nesse intervalo de diferença dos canais WV-IR, as freqüências foram diminuindo quando se observavam maiores ocorrências de descargas, sendo que para nuvens que tiveram mais que 129 raios observou-se freqüências entre 2 e 5%.

Analizando as diferenças negativas maiores que 6 K entre os canais WV-IR se observou que começa a ocorrer uma inversão nos valores de freqüências entre as classes de ocorrências de descargas, ou seja, há uma maior freqüência quando se observa a presença de maiores quantidades de ocorrências de descargas atmosféricas. Para uma diferença igual ou maior que -5 K notou-se que a curva de freqüência de nuvens que tiveram mais que 129 raios é maior que aquelas nuvens

que tiveram apenas um raio, sendo que para essa diferença de temperatura observou-se uma freqüência entre 10 e 12% enquanto que para nuvens que tiveram a presença de apenas uma descarga as freqüências foram em torno de 7 e 8%.

As maiores freqüências observadas foram para diferença negativa de 4 K para as 3 estações do ano (verão, outono e primavera), no qual estiveram em torno de 12% para nuvens com a presença de mais que 129 raios. Nuvens que apresentaram 1 descarga tiveram o pico de ocorrência em uma diferença negativa de 7 K, e tiveram freqüência de 9%. Para a classe que compreende a ocorrência de 2-4 raios a maior freqüência ocorreu em uma diferença negativa de 6 K também em torno de 9% das observações, já para as classes de 5-16, 17-64 e 65-128 raios as maiores freqüências foram observadas entre 10/11% para uma diferença negativa de 5 K.

Para diferenças maiores que zero, também são observadas as maiores freqüências de diferenças dos canais WV-IR para nuvens que apresentam ocorrências maiores que 129 raios, ficando em torno de 2 e 3%, quando estes são comparados com os outros 5 tipos de classes de ocorrências de raios descritos anteriormente, sendo que para nuvens que apresentaram apenas 1 descarga atmosférica as freqüências não ultrapassaram 1% independente da estação do ano.

Nos meses de inverno (Figura 8.13c) foi observado para o intervalo de -15 a -9 K de diferença entre os canais WV-IR, que as maiores freqüências das diferenças foi para nuvens que tiveram a ocorrência de apenas 1 raio, sendo que as freqüências diminuem quando se observam quantidades maiores de ocorrências de descargas atmosféricas para este intervalo. O pico de maior ocorrência de pixels foi em uma diferença negativa de -6 K para nuvens que apresentaram ocorrências de descargas na classe de 65-128 raios. Diferente das outras estações, as quais apresentaram maiores freqüências para nuvens que tiveram a presença de maiores quantidades de observações de raios, os meses de inverno tiveram para diferenças de temperatura de brilho maiores que zero, valores semelhantes de freqüências para as diferentes classes de ocorrências de raios que foram analisadas, sendo que as freqüências para este intervalo não ultrapassaram 1% das observações. Os resultados para esta estação podem não ter uma boa representatividade estatística devido aos poucos casos de tempestades observadas.

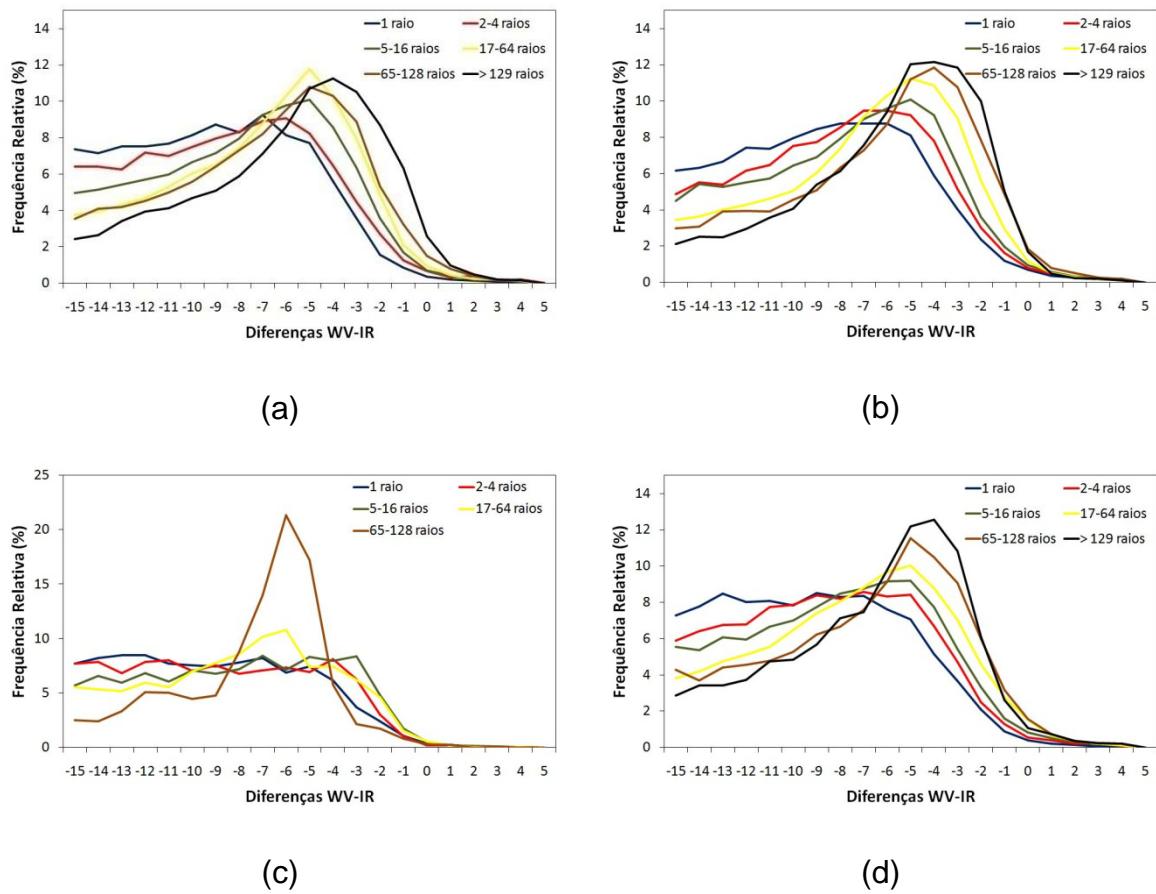


Figura 8.13 - Freqüência relativa média dos pixels em que foram observados descargas atmosféricas em função das diferenças das temperaturas de brilho das imagens dos canais WV e IR. (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera.

Analizando as freqüências acumuladas das diferenças de temperaturas de brilho dos canais WV-IR em função das classes de ocorrências de descargas atmosféricas para as estações de verão, outono e primavera (Figura 61a,b,d), pode-se observar que a ocorrência de 1 raio é maior do que a de 2-4 raios e assim por diante nas outras 4 classes de ocorrências de descargas. Para uma diferença negativa de 15 K as probabilidades de ter ocorrência de pelo menos é de 7%, enquanto para ocorrências entre 5-16 raios é de 5% e para ocorrências maiores que 129 raios é de 2,5%. Quando a diferença das temperaturas de brilho diminui, a probabilidade de ocorrência de descargas atmosféricas aumenta. Em uma diferença negativa de 10 K a probabilidade de ocorrer 1 descarga sobre para 45% e, para ocorrências maiores que 129 raios a probabilidade para essa diferença é de 21%. Para uma diferença negativa de 5 K observa-se uma probabilidade de 87% para

ocorrência de 1 descarga e de mais de 55% para ocorrências de mais que 129 raios. Analisando as diferenças positivas maiores que 1 K se observa uma probabilidade de 99% de descargas atmosféricas para qualquer classe de ocorrência de raios, ou seja, a probabilidade de ocorrer qualquer quantidade de raios é de 99%.

As freqüências acumuladas dos meses de inverno, ilustrada na Figura 61c, tiveram praticamente um comportamento semelhante aos das outras estações do ano discutidas anteriormente. Para esta estação do ano não se observou a ocorrência de mais de 129 raios, sendo que a partir de uma diferença negativa de 5 K foi observado maiores ocorrências para nuvens que apresentaram ocorrências entre 65-128 raios, em torno de 89%, enquanto que para ocorrências de pelo menos 1 raios a probabilidade é de 86%. Quando se observam diferenças positivas entre as temperaturas dos canais WV-IR também foram observadas probabilidades maiores que 99% para a ocorrência de qualquer quantidade de raios.

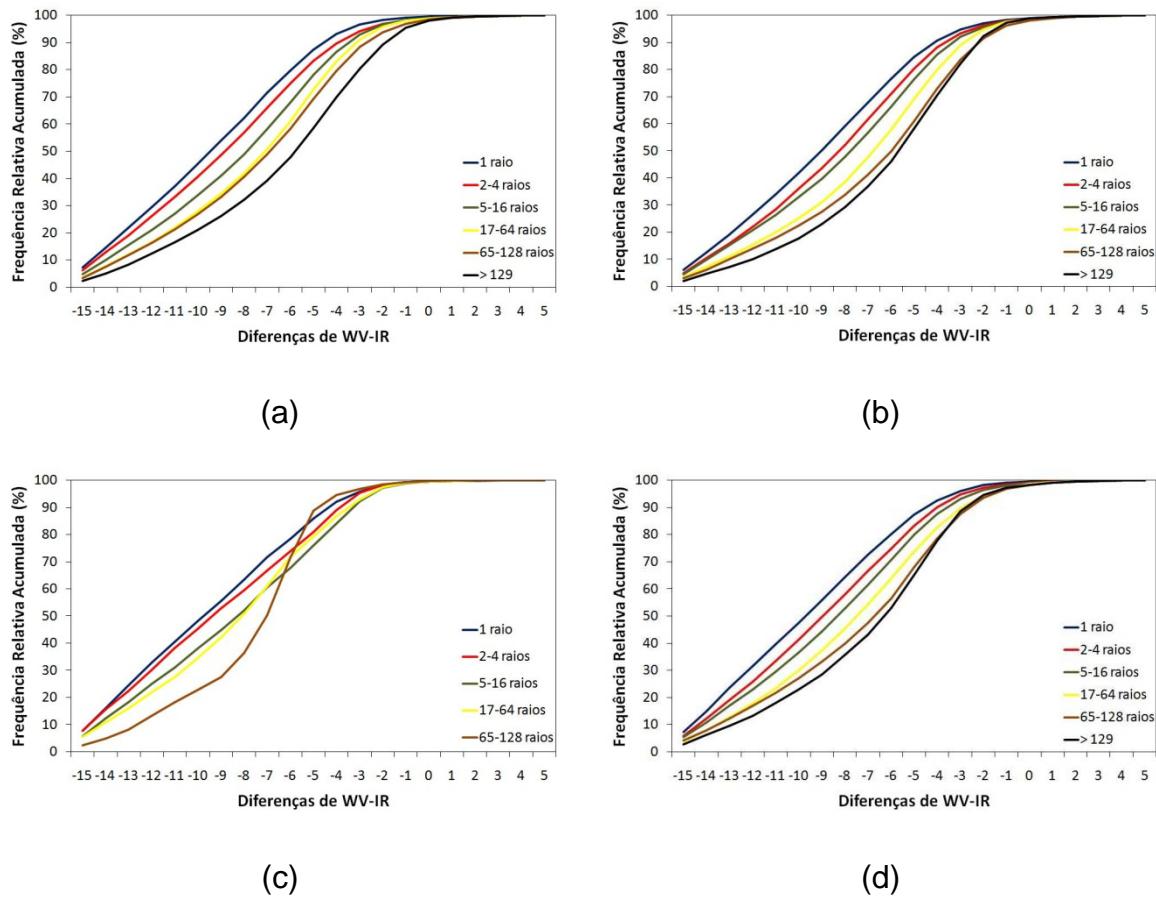


Figura 8.14 - Freqüência relativa acumulada dos pixels que foram observados a ocorrência de descargas atmosféricas em função das diferenças das temperaturas de brilho das imagens dos canais WV e IR. (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera.

## 9. CONCLUSÕES

A análise dos Sistemas Convectivos deste trabalho apresentou as mesmas relações de número de ocorrências de sistemas encontradas em trabalhos na literatura, sendo as máximas ocorrências encontradas nos meses de verão e primavera, onde é observada a máxima atividade convectiva. Esse fato é devido a variabilidade sazonal da insolação. O ciclo diurno dos sistemas que se tornaram tempestades mostrou que os horários preferenciais de nascimento dos sistemas ocorrem no início da tarde e início da noite para os Sistemas Convectivos das estações de verão, outono e primavera, isso é justificado pelo ciclo diurno da insolação.

Analizando os tamanhos médios dos Sistemas Convectivos, se observou que independentemente da estação do ano os sistemas que se tornam tempestades tiveram tamanhos médios maiores durante todo o seu desenvolvimento (iniciação, maturação e dissipação) quando comparado com os Sistemas Convectivos que não se tornaram tempestades. Já os tamanhos máximos dos sistemas tiveram freqüências maiores para os Sistemas Convectivos que não se tornaram tempestade para tamanhos máximos entre 7-17 Km de raio, enquanto que os SC que os Sistemas Convectivos que se tornaram tempestades apresentaram freqüências máximas variando entre 27-37 Km de raio. Isso nos permite concluir que sistemas que são fortes candidatos a se tornarem tempestades normalmente têm tamanhos médios maiores do que sistemas que não se tornam tempestade. Foi possível também observar que para sistemas que se tornaram tempestades e que tiveram tamanhos maiores que 57 Km de raio, a freqüência observada foi de 5 a 7 vezes maiores do que sistemas que não se tornaram tempestade.

As taxas de expansões dos Sistemas Convectivos com durações entre 1-2 e 2-4 horas apresentaram valores médios maiores para sistemas que se tornaram tempestades durante todo o ciclo de vida, esse resultado foi observado para todas as estações do ano. Os sistemas que tiveram durações entre 4-8 horas, para os meses de verão e outono, tiveram expansões maiores para Sistemas Convectivos que não se tornaram tempestades após a maturação dos sistemas. Observou-se que as freqüências das expansões se concentraram em valores próximos de zero, sendo que os Sistemas Convectivos que não se tornaram tempestade tiveram as maiores freqüências para valores menores que zero e os Sistemas Convectivos que

se tornaram tempestades tiveram freqüências maiores para valores maiores que zero.

A análise das freqüências das temperaturas mínimas permitiu concluir que os Sistemas Convectivos que se tornaram tempestades apresentam sempre maiores freqüências para temperaturas mínimas menores do que sistemas que não se tornaram tempestades, sendo que as temperaturas mínimas médias tiveram diferença de 2 a 10 K entre os dois tipos de sistemas analisados. Com essa relação bem distinta das temperaturas mínimas dos Sistemas Convectivos foi possível ajustar curvas entre o número médio de raios e temperaturas mínimas com bons coeficientes de determinação. Para os meses de verão e primavera a melhor função que se ajustou foi a polinomial e para os meses de inverno e outono foi possível ajustar uma função exponencial.

As freqüências da excentricidade mostraram que as maiores ocorrências foram para valores entre 0.7 e 1 no qual representou mais de 80% da amostra para qualquer estação do ano. Não foi possível ajustar uma função que representasse a relação da excentricidade com o número médio de raios, pois as curvas ajustadas, com exceção do outono ( $R^2 \approx 0.8$ ), apresentaram baixos coeficientes de determinação.

As direções de propagações mostraram que tanto para Sistemas Convectivos que não se tornaram tempestades como sistemas que se tornaram tempestades as freqüências de direções são bastante semelhantes, o que impossibilitou uma caracterização preferencial para sistemas que se tornam tempestades.

A analise das descargas atmosféricas permitiram concluir que as maiores freqüências são para sistemas que tiveram a presença de 1 a 4 descargas, aproximadamente 75% da amostra, esse resultado é valido para qualquer estação do ano. As densidades de raios mostraram que independentemente do tempo de duração dos Sistemas Convectivos se concentraram em maiores freqüências para valores de  $1 \times 10^{-4}$  raios/Km<sup>2</sup>, com um segundo pico observado para densidades de  $1 \times 10^{-2}$  raios/Km<sup>2</sup>. Uma diferença observada nas densidades foi de que Sistemas Convectivos que tiveram tempo de vida maior apresentou uma maior freqüência para densidades de  $1 \times 10^{-4}$  raios/Km<sup>2</sup>.

A distribuição espacial das densidades mostrou que as maiores densidades se localizaram em regiões mais elevadas, como exemplo a serra da Mantiqueira em

São Paulo. Esse fato é explicado muitas vezes pela orografia que Sistemas Frontais sofrem para atravessar os locais mais elevados.

A análise das frações das nuvens em função da temperatura de brilho permitiu concluir que as frações das nuvens são maiores pra sistemas que se tornaram tempestades quando escolhido valores de temperatura entre 205 e 255 K. Este resultado foi observado para qualquer estação do ano. Quando analisado as frações das nuvens em função das diferenças de temperaturas de brilho dos canais WV-IR, pôde-se concluir que quanto menor for a diferença entre os canais, maior serão as frações das nuvens que se tornam tempestades, sendo que para diferenças negativas de 5 K foram observadas em média frações de 3% para Sistemas Convectivos que não se tornaram tempestades, enquanto que sistemas que se tornam tempestade, a fração observada são de aproximadamente 15%. Para diferenças maiores que zero quase não se observa a presença de sistemas que não se tornam tempestades.

Por fim, com a análise dos pixels médios das nuvens que apresentaram descargas em função das diferenças de temperatura dos canais WV-IR foi possível observar que para a ocorrência de 1 descarga as freqüências são maiores para diferenças negativas maiores, sendo que para diferenças negativas menor que 5 K à diferenças positivas dos canais WV-IR, as maiores freqüências são observadas para sistemas que apresentaram um numero maior de ocorrências de descargas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdoulaev, S., A. Starostin E O. Lenskaia, 2001: Mesoscale precipitation systems in Rio Grande do Sul. Part 2: Thunderstorms in non-linear mesoscale convective systems. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.16, 101-114.
- Adler, R.F., R.A. Mack, (1986): Thunderstorm cloud top dynamics as inferred from satellite observations and cloud top parcel model. **Journal. Atmospheric. Science**, v.43, pp 1945-1960.
- Albrech, R. I. Eletrificação dos sistemas precipitantes na região Amazônica: processos físicos e dinâmicos do desenvolvimento de tempestades. **Tese de Doutorado**, Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas São Paulo, Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2008.
- Anagnostou, E.N.; C.A. Morales. Rainfall Estimation from TOGA Radar Observations during LBA Field Campaign. **Journal of Geophysical Research**, 2002, vol.107(D20), doi:10.1029/2001JD000377.
- Anderson, C. J., R. W. Arritt. Mesoscale convective complexes and persistent elongated convective systems over the United States during 1992 and 1993. **Monthly Weather Review**, v.126, 578–599, 1998.
- Arnaud, Y.; Desbois, M.; Maizi, J. Automatic tracking and characterization of African Convective Systems on Meteosat Pictures. **Journal of Applied Meteorology**, v.31,n. 5.,p. 443-453, 1992.
- Baker, R. D. The influence of soil moisture, coastline curvature, and land-breeze circulations on sea-breeze-initiated precipitation. **Journal of Hydrometeorology**, v. 2, p. 193–211, 2001.

Banta, R. M.; Schaaf, C. B. Thunderstorm genesis zones in the Colorado Rocky Mountains as determined by traceback of geosynchronous satellite images. **Monthly Weather Review**, v. 115, p. 463-476, 1987.

Bonner, W.D. Case study of thunderstorm activity in relation to the low-level jet. **Monthly Weather Review**, v.94, 167-170, 1966.

Browning, K.A. Conceptual models of precipitation systems. **Weather and Forecasting**, v.1 (1), 2341, 1986.

Browning, K. A. The structure and mechanisms of hailstorms. **Meteorological Monographs**, v. 16, n. 38, pp. 1-43, 1977.

Byers, H. R.; Braham, R. R. **The Thunderstorm**. U.S. Weather Bureau, Washington, D.C, 1949. 287 p.

Carlson, T.N. **Mid-latitude weather systems**. London: Harper Collins Academic, 1991. 50p.

Carvalho, L. M. V., C. Jones. A satellite method to identify structural properties of Mesoscale Convective Systems. **Journal Applied Meteorological**, v.40,1683-1701, 2001.

Cavalcanti, I.F.A. Um estudo sobre interações entre sistemas de circulação de escala sinótica e circulações locais. **Dissertação de Mestrado**, São José dos Campos, 139pp, 1982.

Cavalcanti, I.F.A. Casos de intensa precipitação nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil no período de inverno de 1979 a 1983. São José dos Campos: INPE, 47pp, 1985. **(INPE- 3743-RPE/498)**.

Coelho, C.W.G.A; Diniz, A.M. identificação de áreas de maior ocorrência de descargas atmosféricas em Belo Horizonte – período 2000 a 2002. In:

**Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 13, Anais do...** Viçosa: SBGFA, 2009.

Cohen, J.C.P. Um estudo observacional de linhas de instabilidade na Amazônia. **Dissertação de Mestrado**, São José dos Campos, INPE, 165pp, 1989.

Cotton, R. W.; Anthes, B.R. **Storm and cloud dynamics**. Academic Press, Inc. International Geophysics Series, v. 44, 1989.

Fernandes, D.; Campos, C. R. J. Comparações em diferentes períodos de estudo de passagem de sistemas frontais no Brasil. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 14, Anais do... Florianopolis: SBMET, 2006.

Foote, G.B & H.W. Frank. Case study of a hailstorm in Colorado. Part III: Airflow from triple-Doppler measurements. **Journal Atmospheric Science**, v.40, 686-707, 1983.

Freitas, E.D.; Dias, P.L.S. Circulações locais em São Paulo e sua influencia sobre a dispersão de poluentes. **Tese de doutorado**, Universidade de São Paulo, 157p, 2003.

Fritz, S. & Laszlo, I., 1993. Detection of water vapor in the stratosphere over very high clouds in the tropics. **Journal of Geophysical Research**, 98(D12), 22959-22967.

Gomes, M. A. S. S. Estudo dos relâmpagos na região sudeste do Brasil em função das características geográficas. **Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 151pp, 2003.

Guedes, R.L. Condições de grande escala associadas a sistemas convectivos de mesoescala sobre a região central da América do Sul. 1985. 89p.

**Dissertação (Mestrado em Meteorologia)**, Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo, São Paulo, 89p, 1985.

Harrold, T.W. Mechanisms influencing the distribution of precipitation within baroclinic disturbances. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.99, n.420, p. 232-251, 1973.

Houze Jr, R. B. Structure and dynamics of tropical squall-line systems. **Monthly Weather Review**, v. 105, p.1540-1567, 1977.

Houze Jr, R. B. **Cloud dynamics**. San Diego: Academic Press, 1993. 573 p.

Houze, R.A., Jr., Observed structure of mesoscale convective systems and implications for largescale heating. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 115, 425-461, 1989.

Houze, R. A. & Betts, A.K. Convection in GATE. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, 19, 541-576, 1981.

Iribarne, J.V.; Cho, H.R. **Atmospheric physics**. Dordrecht: D. Reidel, 1980.

Jayaratne E. R., Saunders C. P. R., Hallett J., Laboratory studies of the charging of soft hail during ice crystals interacitons, **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 1983, vol. 109, p. 609.

Johnson, R. H., and R. A. Houze, Jr. Precipitating cloud systems of the Asian monsoon. In **Monsoon Meteorology** (C.-P. Chang and T. N. Krishnamurti, Eds.), 298-353, 1987.

Kalnay, E.; Mo, K.; Paegle, J. Large-amplitude, short-scale stationary rossby waves in the Southern Hemisphere: observations and mechanistic experiments to determine their origin. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.43, n. 3, p.252-275, 1986.

Krehbiel P. R., Brook M., MacCrory R. A., An analysis of the charge structure of lightning discharges to ground, **Journal of Geophysical Research.**, 1979, vol. 84, p. 2432

Kurino, T., 1997: A satellite infrared Technique for estimating “Deep/Shallow” precipitation. **Adv. Space Res.**, 19 (3), 511-514.

Laurent, H.; Machado, L. A. T.; Herdies, D.; Morales, C. Características dos sistemas convectivos observados por satélite durante o experimento WETAMC/LBA. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 11, Anais...Rio de Janeiro, 2000.

Pereira Filho, A. J., Hass, R. E Ambrizzi, T., 2002: Caracterização de Eventos de Enchentes na Bacia do Alto Tietê por Meio do Radar Meteorológico e da Modelagem Numérica de Mesoscala. **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 12. Foz do Iguaçu, 2002.

Laurent, H.; Machado, L. B. T.; Morales, C. B. Characteristics of the Amazonian Mesoscale Convective Systems observed from satellite and radar during the WETAMC/LBA experiment. **Journal of Geophysical Research**, 2002.

Lee, A.C.L. 1989. The Limiting Accuracy of Long Wavelength Lightning Flash Location, **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v.6, p. 43 – 49.

Lemos, C. F.; Calbete, N. O. Sistemas Frontais que atuaram no litoral de 1987-1995. **Climanálise**, Edição comemorativa 10 anos, 1996.

Lima, K. C.; Gomes, R. G. Detecção de Descargas Elétricas Atmosféricas em Sistemas Convectivos com dados do SIMEPAR. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, n. 1, p. 5-16, 2009.

Lima, W.F., Machado, L.A.T., Morales, C.A., Pinto, Jr O. Estimativa de Probabilidade de Ocorrência de Relâmpagos. **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 13, Fortaleza, SBMET, CDROM, 2006.

Liou, K.N. **An Introduction to Atmospheric Radiation**, Academic Press, New York, 1980.

Macedo, S. R. ; Machado, L.A.T. ; Vila, D.A. ; Morales, C.A. ; Laurent, H. . Monitoramento dos Sistemas Convectivos de Mesoescala Atuantes no Brasil Utilizando o Fortracc (Forecast And Tracking Of Active And Convective Cells). In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 13, Anais do..., Fortaleza, 2004.

MacGorman D. R., Rust W. D., **The electrical nature of storms**. Oxford University Press New York, 1998, 422 p.

Machado, L. B. T.; Laurent, H. The Convective System area expansion over Amazonia and its relationships with Convective System life duration and high-level wind divergence. **Monthly Weather Review**, v. 132, p. 714-725, 2004.

Machado, L. B. T.; Lima, W. F. S.; Pinto Jr, O.; Morales, C. B. Relationship between cloud-ground discharge and penetrative clouds: a multi-channel satellite application. **Atmospheric Research**, v.93, p. 304-309, 2007.

Machado, L. B. T., Rossow, W. B. Structural characteristics and radiative properties of tropical cloud clusters. **Monthly Weather Review**, v. 121, pp. 3234–3260, 1993.

Machado, L. B. T., Rossow, W. B; Guedes, R. L; Walker, B. W. Life cycle variations of Mesoscale Convective Systems over the Americas. **Monthly Weather Review**, v. 126, p. 1630-1653, 1998.

Maddox, R. B. Mesoscale Convective Complexes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 61, p. 1374-1387, 1980.

Mathon, V.; Laurent, H. Life cycle of Sahelian Mesoscale Convective Cloud Systems. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 127, n. 57, p.377-406, 2001.

Mattos, E. V. Relações das propriedades físicas das nuvens convectivas com as descargas elétricas. 2009. (INPE-15767-TDI/1510). **Dissertação (Mestrado em Meteorologia)**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 244p, 2009.

Mendonça, R.W.B.; Bonatti, J.P. Estudo da energética modal para episódios de ZCAS. Parte II: impacto da resolução do modelo e da parametrização de convecção. **Revista Brasileira de Meteorologia**. 2008, v.23, n.4, p. 381-403. doi: 10.1590/S0102-77862008000400002.

Morales, C. A; Frediane, M. E.; Machado, L. B. T. thunderstorm characteristics during the 2002 RACCI/LBA field campaign. In: **Conference On Meteorological Applications of Lightning Data**. 2004.

Morel C. Caractérisation objective des systèmes convectifs européens a partir de leur suivi dans l'imagerie satellitaire. **Tese de Doutorado**, l'Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2001.

Naccarato, K. P. Estudo de relâmpagos no Brasil com base na análise de desempenho do sistema de localização de tempestades. São José dos Campos, **Dissertação de Mestrado**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 165p, 2001.

Naccarato, K. P. **Análise das características dos relâmpagos na região sudeste do Brasil**. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 362p, 2005.

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, A. P. & Silva Dias, P. L. Aspectos observacionais da brisa marítima em São Paulo. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 2, Pelotas, 129-145, 1982.

Oliveira, L.L.; Vianello, R.L.; Ferreira, N.J. **Meteorologia Fundamental**, Edifapes, 430pp, 2001.

Palmeira, F.L.B. Análise de Características dos Sistemas Convectivos Através de Imagens do Satélite GOES-12. **Dissertação de Mestrado**, Universidade Federal do Rio De Janeiro, 96 p., 2005.

Parmezani, K.M.; Souza, J.R.S.; Ribeiro, G.E. Associação de ZCAS com os fenômenos El Niño e La Niña. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 10, **Anais do...** Brasília: SBMET, 1998.

Pereira Filho, A. J.; Haas, R. & Ambrizzi, T. Caracterização de eventos de enchente na bacia do Alto Tietê por meio do radar meteorológico e da modelagem numérica de mesoescala. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 12, Foz do Iguaçu, 2002.

Petersen, W.A. and S.A. Rutledge. On the relationships between cloud-to-ground lightning and convective rainfall, **Journal of Geophysical Research**, v.103 (D12), 14025-14040, 1998.

Pinto, I. R. C. A.; Pinto Jr., O.; Rocha, R. M. L.; Diniz, J. H.; Carvalho, A. M.; Filho, A. C. Cloud-to-ground lightning in southeastern Brazil in 1993: 2. Time variations and flash characteristics. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n.D24, p. 31381-31387, Dec. 1999.

Pinto, I. R. C. A.; Pinto Jr., O; Gomes, M. A. S. S.; Ferreira, N. J. Urban effect on the characteristics of cloud-to-ground lightning over Belo Horizonte-Brazil. **Annales Geophysicae**, v. 22, n. 2, p. 697-700, 2004.

Price, C. Lightning sensors for observing, tracking and nowcasting severe weather, **Sensors**, 8, 157-170, 2008.

Quadro, M. Estudo de episódios de zonas de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul. 1994. **Dissertação de Mestrado**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 97p, 1994.

Reynolds, S.E., M. Brook, And M.F. Gourley. Thunderstorms charge separation, **Journal Meteorological**, v.14, 426-436, 1957.

Ricarte, R.M.; Becker, C.T.; Gomes Filho, M.F.; Silva M.C.L. Contribuição do Sistema Convectivo Observado em 14 de fevereiro deste ano para o aumento do volume do açude Boqueirão-PB. In **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 12, Foz do Iguaçu, Anais..., 2002.

Rodrigues, M.L.G.; Franco, D.; Sugahara, S. Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 22, n. 2, p.21-29, 2004.

Saunders, C. P. R., Thunderstorm Electrification. In: Volland, H. ed. **Handbook of Atmospheric Electrodynamics**. Boca Raton: CRC Press Inc., v. 1, p. 61-92, 1995

Scaglione, T. P. Análise convectiva no Sul da America do Sul. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal de Pelotas, 105p, 2006.

Schmetz, J., Tjemkes, S. A., Gube, M., and Van de Berg, L., 1997: Monitoring deep convection and convective overshooting. **Advances in Space Research**, 19 (3), 433-441.

Stevak, M., R.M. Rabin & P. K. Wang. Contribution of the MODIS instrument to observations of deep convective storms and stratospheric moisture detection in GOES and MSG imagery. **Atmospheric Research**. v.83, p. 505-518, 2007.

Silva Dias, M.A.F. Sistemas de Mesoescala e Previsão de Tempo a Curto Prazo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.2, p.133-150, 1987.

Silveira, B.B., Münchow, G.B., Gomes, R.G., Scaglioni, T.P. Procedimento semi-automático para o estudo de sistemas convectivos de mesoescala. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 14, Anais do... Florianópolis: SBMET, 2006.

Soares, F.R.; Guedes, R.L.; Paixão, J.R.; Costa, T.C; Marques, L.F. Impacto de relâmpago no município de São José dos Campos, **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.4, n.2, p.11. 2004.

Solorzano, N. N.; Pinto Jr, O.; Ferreira, N. J. Meteorological aspects related to cloud-ground lightning occurrence in Minas Gerais during the Summer of 1995/1996. In: **International Congress of the Brazilian Geophysical Society**, Rio de Janeiro. Proceedings... Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, v.6, p. 202-205, 1999.

Takahashi T. Rimming electrification as a charging generation mechanism in thunderstorms, **Journal Atmospheric Science**, v.35, 1536p, 1978.

Tanajura, C. Modeling and Analysis of the South American Summer Climate. **Dissertação de Mestrado**, University of Maryland, Estados Unidos, 98p, 1996.

Torres J.C., Nicolini, M. A composite of Mesoscale Convective Systems over southern South America and its relationship to low-level jet events. In: **Conference on South American Low-Level Jet**, Anais... Santa Cruz de la Serra, 2002.

Uman, M.A; Krider, E.P. Natural and Artificially Initiated Lightning, **Science**, v.246, p. 457-464, 1989.

Velasco, I.; Fritsch, J.M. Mesoscale convective complexes in the Americas. **Journal Geophysical Research**, v. 92, n.8, p.9591-9613, 1987.

Vila, D. A., Machado, L.A.T. A technique for forecasting and tracking active convective cells: an application to mesoscale convective systems over del plata basin, **The International Symposium on Nowcasting and Very Short Range Forecasting** (WSN05), 2005.

Vila, D. B.; Machado, L. B. T.; Laurent, H.; Velasco, I. Forecast and tracking the evolution of cloud clusters (ForTracCC) using satellite infrared imagery: methodology and validation. **Weather and Forecasting**, v. 23, p. 233-245, 2008.

Vila, D. B.; Machado, L. B. T.; Velasco, I. Los sistemas convectivos de mesoescala sobre la cuenca del Plata: la técnica Fortracc. **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 12, Anais... Florianopolis, 2004.

Vonnegut, B.; Latham, D. J.; More, C. B.; Hunyady, S. J. An explanation for anomalous lightning from forest fire clouds. **Journal of Geophysical Research**, n. 100, p. 5.037–5.050, mar. 1995.

Wallace, M. J & Hobbs, V. P. **Atmospheric science: an introductory survey**. Academic Press, Inc. 2 Edição, 2006.

Weisman, M. L. & Klemp. The dependence of Numerically simulated Convective Storms on vertical Wind Shear and Boyancy, **Monthly Weather Review**, v.110, 504 – 520, 1984.

Williams E., The tripole structure of thunderstorms, **Journal of Geophysical Research**, v. 94, p. 13151, 1989.

Williams, E.R. The Electrification of Thunderstorms, **Scientific American**, pp. 48 –65, 1988.

Wilson, J. W. Nowcasting thunderstorms: a status report. **Bulletin of the American Meteorological Society** , Boston, v.79, n.10, p. 2079 –2099. 1998.

Woodley, W.L., C. G. Griffith, J. S. Griffin, S. C. Stromatt, 1980: The Inference of GATE Convective Rainfall from SMS-1 Imagery. **Journal Applied Meteororology**, v.19, 388–408.

Zinner, T., H. Mannstein, A. Tafferner: Cb-TRAM: Tracking and monitoring severe convection from onset over rapid development to mature phase using multi-channel Meteosat-8 SEVIRI data. **Meteorology and Atmospheric Physics**, 101, S. 191 - 210, DOI: 10.1007/s00703-008-0290-y, 2008

Zipser, E. J. Mesoscale and convective-scale downdrafts as distinct components of squall-line structure. **Monthly Weather Review**, v.105, n.12, p. 1568-1589, 1977.