



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



INPE-15767-TDI/1510

## RELAÇÕES DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DAS NUVENS CONVECTIVAS COM AS DESCARGAS ELÉTRICAS

Enrique Vieira Mattos

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada  
pelo Dr. Luiz Augusto Toledo Machado, aprovada em 08 de abril de 2009.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/04.01.13.07>>

INPE  
São José dos Campos  
2009

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: [pubtc@sid.inpe.br](mailto:pubtc@sid.inpe.br)

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO:****Presidente:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

**Membros:**

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Viveca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



INPE-15767-TDI/1510

## RELAÇÕES DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DAS NUVENS CONVECTIVAS COM AS DESCARGAS ELÉTRICAS

Enrique Vieira Mattos

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada  
pelo Dr. Luiz Augusto Toledo Machado, aprovada em 08 de abril de 2009.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/04.01.13.07>>

INPE  
São José dos Campos  
2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Mattos, Enrique Vieira.

M436r Relações das propriedades físicas das nuvens convectivas com as descargas elétricas / Enrique Vieira Mattos. – São José dos Campos : INPE, 2009.

243 p. ; (INPE-15767-TDI/1510)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

Orientador : Dr. Luiz Augusto Toledo Machado.

1. Descargas elétricas. 2. Raios. 3. Sistemas convectivos de mesoescala. 4. Propriedades físicas. 5. Sensoriamento remoto. 6. Previsão imediata de tempo I.Título.

CDU 551.501.8:551.508.94

---

Copyright © 2009 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

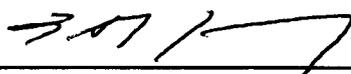
Copyright © 2009 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

**Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de Mestre em  
Meteorologia**

**Dr. Carlos Frederico de Angelis**

  
\_\_\_\_\_  
**Presidente / INPE / Cachoeira Paulista - SP**

**Dr. Luiz Augusto Toledo Machado**

  
\_\_\_\_\_  
**Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP**

**Dr. Osmar Pinto Junior**

  
\_\_\_\_\_  
**Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP**

**Dr. Carlos Augusto Morales Rodriguez**

  
\_\_\_\_\_  
**Convidado(a) / USP / São Paulo - SP**

**Aluno (a): Enrique Vieira Mattos**

**São José dos Campos, 08 de abril de 2009**



***“Os grandes navegadores devem sua reputação aos temporais e tempestades”.***

*Epicuro (341 B.C - 270 B.C), filósofo e escritor.*

***“O raio deve ser composto de um fluido elétrico, embora não consiga explicar sobre como uma coisa tão vaporosa e instável como uma nuvem atue como uma máquina de fricção capaz de gerar eletricidade”.***

*Sir Isaac Newton (1643 - 1727), físico e matemático.*



*A meus pais OSCAR e LUCÍLIA e minha Irmã LETICIA quem amo tanto.*



## **AGRADECIMENTOS**

Ao grandioso mestre DEUS, pelos ombros fortes que tem me dado durante toda a minha vida, para superar as dificuldades encontradas no caminho, pela garra, saúde e disciplina para realizar este trabalho. A tua honra e glória SENHOR dedico todas as minhas vitórias pessoais e profissionais.

A meus queridos pais Oscar e Lucília pelo apoio incondicional durante toda a minha existência e pela oportunidade de aprender aspectos fundamentais de respeito, moral, dignidade, honestidade, comprometimento e dedicação, os quais levarei para o resto de minha vida. Devo tudo a vocês e expresso aqui o meu imenso e eterno amor que sinto por vocês.

A minha querida irmã Letícia pela amiga verdadeira e companheira que tenho a meu lado. Meus sinceros agradecimentos e felicidades que lhe desejo em sua vida.

A minha tia Adélia e primo Augusto que com muito carinho me acolheram em sua residência durante um ano em São José dos Campos. A vocês meu muito obrigado, principalmente pela nossa grande amizade que tem se revelado nesses anos de agradável convivência.

Ao meu orientador Prof. Dr. Luiz Augusto Toledo de Machado pela confiança a mim dada para o desenvolvimento deste trabalho. Pelo exemplo de seriedade, profissionalismo e competência na pesquisa científica.

Aos membros da banca da Proposta de Mestrado doutores Marcos Daisuke Oyama, Carlos Frederico de Angelis e Luiz Augusto Toledo de Machado pelos valiosos conselhos expressos para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao querido amigo Wagner Flauber Araújo Lima que desde o início desta pesquisa não mediu esforços através de apoio computacional e científico. Valiosas foram às discussões e aprendizados obtidos nestes anos e a amizade construída.

Aos colegas da turma do Curso de Pós-Graduação do INPE pelas experiências vivenciadas, pelo conhecimento trocado e pelas valiosas amizades construídas nestes dois anos de mestrado. Em especial aos amigos Iury, Lucimara e Weber pelo excelente convívio e amizade sincera ao longo desses anos.

À equipe da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do CPTEC/INPE pelo suporte técnico, espaço físico cedido para desenvolver a pesquisa e fornecimento dos dados utilizados neste trabalho.

Ao Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do INPE, em particular ao Dr. Kleber Pinheiro Naccarato pelo fornecimento dos Mapas de Eficiência de Detecção de raios e estado de funcionamento dos sensores de relâmpagos.

À amiga Marília Harumi Shimizu pelas correções e conselhos sobre o trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo suporte financeiro através da concessão de bolsa para o desenvolvimento do mestrado nestes dois anos.

## RESUMO

O entendimento das propriedades físicas e microfísicas associadas à formação e ocorrência da atividade elétrica em nuvens convectivas utilizando dados observacionais, é de grande importância para a determinação de parâmetros previsores da ocorrência desses fenômenos atmosféricos. Visto que diversos segmentos da sociedade como, os setores de rede de distribuição de energia elétrica, sistemas de telefonia e telecomunicações, são afetados diretamente pela atividade de relâmpagos em todo o país, o desenvolvimento de estudos que possam levar a uma maior compreensão da atividade convectiva, processos microfísicos na formação de precipitação e ocorrência de descargas elétricas mostra-se de grande relevância. Desta forma, este trabalho teve como objetivo principal caracterizar as propriedades físicas e microfísicas de nuvens convectivas responsáveis pela ocorrência de raios (relâmpagos nuvem-solo). Para tanto, foram utilizadas as temperaturas de brilho do infravermelho ( $T_B$ ) inferidas pelo satélite GOES, a temperatura de brilho em microondas inferida pelo satélite TRMM e NOAA-18 e dados de ocorrência de raios reportados por detectores em solo para o estado de São Paulo entre 2005 e 2007. A análise da distribuição espacial e temporal de ocorrência de raios sobre o estado de São Paulo evidenciou que a alta incidência de raios próxima a cidades de grande porte e região do Vale do Paraíba, deve-se pelo menos em parte, aos efeitos combinados de incursão freqüente de Sistemas Frontais, orografia, efeitos de ilha de calor e poluição atmosférica. Por outro lado, o ciclo diurno das tempestades mostrou um pico bem definido durante as primeiras horas da tarde (16 horas local), sendo o mesmo observado para a estação de verão, primavera e outono. No entanto, o inverno não apresentou um horário preferencial de ocorrência de raios. A combinação de  $T_B$  no infravermelho e informação de ocorrência de raios indicou que as propriedades físicas, tamanho, temperatura do topo, taxa de expansão normalizada, excentricidade e fração convectiva dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) possuem forte influência na ocorrência de raios, desta forma, foi possível ajustar curvas que relacionassem a ocorrência média de raios a cada uma dessas propriedades. Utilizando o mesmo conjunto de dados, foi observado que a taxa de expansão dos SCM durante os estágios iniciais sugeriu ser um parâmetro indicativo da ocorrência de raios e do tempo de vida total dos sistemas. Além disso, dentre os SCM estudados, observou-se que a máxima ocorrência média de raios foi caracterizada entre o estágio de iniciação e maturação dos sistemas, sendo o mesmo ocorrendo para a densidade média de raios (raios/km<sup>2</sup>). Por outro lado, o estudo combinando informações em microondas com as ocorrências de raios, mostrou que o tamanho, conteúdo integrado verticalmente de gelo e a orientação das partículas de gelo possuíram influência direta nos processos de eletrificação das nuvens convectivas e na ocorrência de raios. Com isso, foi possível ajustar curvas de probabilidade de ocorrência de raios em função de cada um desses parâmetros. Uma relação exponencial crescente foi encontrada entre a probabilidade de ocorrência de raios e o tamanho das partículas de gelo; já uma curva polinomial de segunda ordem caracterizou a probabilidade de raios em função do conteúdo de gelo e uma relação linear negativa entre a probabilidade de ocorrência de raios e a diferença de temperatura polarizada do canal de 85 GHz foi observada. Desta forma, esses resultados inéditos na América do Sul permitirão em um futuro próximo serem utilizados para diagnóstico de severidade e realizar previsão de ocorrência de raios.



## **RELATIONSHIP BETWEEN PHYSICAL PROPERTIES CONVECTIVE CLOUDS AND CLOUD-GROUND LIGHTNING**

### **ABSTRACT**

The knowledge of physical and microphysical properties associated to cloud-ground lightning occurrence is very important for determination of potential forecast parameters of electrical discharges activity. The identification of these parameters could give valuable contribution for different segments of society, such as the sectors of electric energy distribution network, telephone systems and telecommunications, which are directly affected by the activity of lightning. In this context, this work presents the relationship between physical and microphysical properties with cloud-ground lightning. For that, were used combined data from satellite infrared and microwave channels with cloud-ground lightning from the ground network for São Paulo Estate during the period from 2005 to 2008. Combined information from infrared channels with cloud-ground lightning showed that size, cloud top temperature, area expansion, eccentricity and convective fraction of Mesoscale Convective System (MCS) have strong influence on lightning occurrence. Also the initial area expansion appears to indicate systems characterized by lightning and their total life time. Moreover the most electrical activity was characterized between initiation stage and maturation, and the same happened to lightning average density (cloud-ground lightning.km<sup>-2</sup>). The preliminary microphysics clouds study has shown that the size, Ice Water Path and ice particles orientation have direct influence in the electrification process of convective clouds and occurrence of cloud-ground lightning. With these results, it was possible to adjust lightning occurrence probability curves for each of these parameters. It was found an exponentially relationship between lightning occurrence probability and ice particles size, a second-order polynomial depending on ice water path and a negative linear relationship between lightning probability and 85 GHz polarized temperature difference. Therefore, the lightning probability relationship found in function of physical and microphysical properties showed considerable potential to be used in severity diagnostic and cloud-ground lightning nowcasting.



## SUMÁRIO

**Pag.**

**LISTA DE FIGURAS**

**LISTA DE TABELAS**

**LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

**LISTA DE SÍMBOLOS**

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	31
1.1 Objetivos .....	33
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	37
2.1 Nuvens e Nuvens de Tempestade.....	37
2.1.1 Nuvens Quentes e Nuvens Frias.....	40
2.1.2 Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM) .....	42
2.2 Estrutura Elétrica das Nuvens de Tempestade .....	50
2.3 Processos de Eletrização das Nuvens Tempestade .....	51
2.3.1 Processo Colisional Indutivo.....	52
2.3.2 Processo Colisional Termoelétrico .....	54
2.3.3 Processo de Eletrificação Convectivo .....	55
2.4 Relâmpago.....	57
2.4.1 Classificação dos Relâmpagos .....	57
2.4.1.1 Relâmpagos no Solo.....	59
2.4.1.2 Relâmpagos nas Nuvens.....	62
2.5 Detectores de Relâmpagos .....	62
2.5.1 Rede RINDAT.....	63
2.5.2 Detectores de Relâmpagos a Bordo de Satélite.....	68
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	73

<b>4 DADOS</b> .....	79
4.1 Dados da RINDAT.....	79
4.2 Dados de Satélite.....	80
4.2.1 Dados do GOES-12.....	80
4.2.2 Dados do GOES-10.....	81
4.2.3 Dados do NOAA-18.....	82
4.2.3.1 Dados do Sensor AMSU-A2.....	82
4.2.3.2 Dados do Sensor MHS.....	82
4.2.4 Dados do TRMM.....	83
<b>5 METODOLOGIA</b> .....	85
5.1 Avaliação das Características Gerais dos Raios Ocorridos Durante o Período de Estudo.....	85
5.2 Análises das Características dos SCM Associadas à Ocorrência de Raios.....	87
5.3 Análises de Parâmetros Previsores da Atividade Elétrica Usando Microondas ....	90
5.3.1 A Utilização do $D_e$ e IWP.....	90
5.3.2 Análise da Relação Entre Polarização do Gelo e a Ocorrência de Raios.....	92
<b>6 ANÁLISES DAS RELAÇÕES EXISTENTES ENTRE PROPRIEDADES FÍSICAS DE SCM E ATIVIDADE ELÉTRICA DE RAIOS</b> .....	95
6.1 Características Gerais dos SCM Ocorridos no Período de Estudo.....	95
6.2 Caracterização da Relação Entre Propriedades Físicas de SCM e a Atividade Elétrica de Raios.....	102
6.2.1 Raio Efetivo ( $R_e$ ).....	103
6.2.2 Taxa de Expansão Normalizada ( $A_e$ ).....	111
6.2.3 Temperatura Média de Brilho ( $T_{med}$ ).....	117
6.2.4 Taxa de Variação da Temperatura Média de Brilho ( $TVT_{med}$ ).....	125
6.2.5 Fração Convectiva (FC).....	135
6.2.6 Excentricidade (Ecc).....	141
6.3 Análise da Evolução do Ciclo de Vida dos SCM.....	146
6.3.1 Caracterização do Tempo de Vida dos SCM.....	146

6.3.2 Caracterização do Ciclo de Vida dos SCM.....	154
<b>7 ANÁLISE DE PARÂMETROS PREVISORES DA ATIVIDADE ELÉTRICA USANDO MICROONDAS.....</b>	<b>167</b>
7.1 Estudo dos Parâmetros Microfísicos dos SCM Utilizando o Sensor TMI do Satélite TRMM.....	167
7.1.1 A Utilização do Diâmetro Efetivo da Partícula de Gelo ( $D_e$ ) .....	168
7.1.2 A Utilização do Conteúdo Integrado Verticalmente de Gelo (IWP) .....	176
7.2 A Orientação das Partículas de Gelo e sua Relação com a Ocorrência de Raios	184
7.2.1 Avaliação da Relação entre a Polarização de Partículas de Gelo e a Atividade Elétrica de Raios.....	185
<b>8 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>195</b>
8.1 Considerações Finais.....	195
8.2 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	198
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>201</b>
<b>A ANEXO A - EQUAÇÕES DE INFERÊNCIA DO <math>D_e</math> E IWP .....</b>	<b>213</b>
<b>A APÊNDICE A - AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS RAIOS PARA O PERÍODO DE ESTUDO .....</b>	<b>217</b>
<b>B APÊNDICE B - TABELAS DE ESTADO DE OPERAÇÃO DOS SENSORES</b> .....	<b>243</b>



## LISTA DE FIGURAS

2. 1 Descrição esquemática de uma célula de tempestade mostrando os três estágios de vida: (a) estágio *Cumulus*, (b) estágio maduro e (c) estágio de dissipação....39
2. 2 Classificação dos SCM para sistemas meso-alfa (250 - 2500 km) com duração maior que 6 horas e de acordo com suas características físicas e localização. ....43
2. 3 Representação da estrutura de nuvens de um típico SCM tropical durante sua formação, maturação e estágio de dissipação.....45
2. 4 Tipos de estrutura elétrica de nuvens de tempestade: (a) estrutura dipolar, (b) estrutura tripolar e (c) estrutura multipolar. ....51
2. 5 Um granizo esférico polariza-se na presença de um campo elétrico ambiente. Partículas de gelo que venham a colidir com a parte de baixo do granizo removem suas cargas positivas, tornando-a negativamente carregada, processo denominado Colisional Indutivo. ....53
2. 6 Microfísica da transferência de carga envolvendo colisões entre granizo e cristais de gelo em função da temperatura do ambiente, processo denominado colisional termoelétrico.....55
- 2.7 Desenvolvimento do centro de cargas negativas na parte mais baixa da nuvem durante o processo convectivo. ....56
2. 8 Diferentes tipos de relâmpagos que ocorrem entre as nuvens e o solo: relâmpago (a) NS positivo, (b) NS negativo, (c) SN positivo e (d) SN negativo. ....58
2. 9 Diagrama esquemático para ilustrar a formação de um relâmpago. (a) – (f) ilustra a formação do líder escalonado, (g) e (h) a primeira descarga de retorno, (i) a pré formação da subsequente descarga de retorno, (j) e (k) o líder contínuo e (l) a segunda descarga de retorno. ....61
2. 10 Localização dos 24 sensores que compõem a rede RINDAT e destaque da abrangência total da rede de cobertura de relâmpagos.....64
2. 11 (a) Método da intersecção hiperbólica usando três sensores e (b) método de intersecção circular utilizando quatro sensores. ....65
2. 12 (a) Método MDF para a determinação da localização ótima e (b) Combinação do método TOA e MDF (método IMPACT). ....66

3. 1	Modelo conceitual da evolução temporal de propriedades elétricas, dinâmicas e processos microfísicos no interior de uma tempestade.....	74
4. 1	Região de estudo definida pelo retângulo em vermelho e a eficiência da rede RINDAT demonstrando o número de relâmpagos NS.....	80
4. 2	Geométrica de escaneamento do sensor TMI abordo do satélite TRMM.....	84
6. 1	Distribuição temporal mensal de ocorrências dos SCM detectados pelo FORTRACC entre julho de 2005 a fevereiro de 2008 para a área em estudo. ....	96
6. 2	Distribuição horária de frequência total de nascimentos espontâneos de SCM detectados pelo FORTRACC para o período de julho de 2005 a março de 2008. ....	99
6. 3	Distribuição horária média da Taxa de Expansão Normalizada ( $10^{-6}s^{-1}$ ), Fração Convectiva e o Número Total de Raios dos SCM detectados pelo FORTRACC para o período de julho de 2005 a fevereiro de 2008.....	100
6. 4	Histograma de frequência para a propriedade física Raio Efetivo (km) dos membros de SCM que (a) não apresentaram raios e (b) para membros dos SCM que apresentaram raios e curvas ajustadas. ....	104
6. 5	Análise comparativa entre a curva ajustada para o histograma de Raio Efetivo de membros de SCM que não apresentaram raios (azul) e a curva ajustada para a amostra de Raio Efetivo que apresentaram raios (vermelha).....	106
6. 6	Frequência Acumulada (%) de ocorrência de raios em função do Raio Efetivo (km) dos SCM.....	108
6. 7	Variação do número médio de raios, desvio padrão em função do Raio Efetivo dos SCM e curva de potência ajustada para a ocorrência média de raios.....	109
6. 8	Variação da Densidade Média de Raios em função do Raio Efetivo, seu desvio padrão e curva de potência ajustada para a ocorrência da densidade média de raios.....	110
6.9	Histograma de frequência para a propriedade física Taxa de Expansão Normalizada ( $10^{-6}s^{-1}$ ) dos membros de SCM que (a) não apresentaram raios e (b) para membros com raios e curvas ajustadas.....	113
6. 10	Análise comparativa entre a curva ajustada para o histograma de Taxa de Expansão Normalizada de membros de SCM que não apresentaram raios (azul) e a curva ajustada para a amostra de Taxa de Expansão Normalizada que apresentaram raios (vermelha). ....	114

6. 11	Frequência Acumulada (%) de ocorrência de raios em função da Taxa de Expansão Normalizada dos SCM.....	115
6. 12	Variação do número médio de raios em função da Taxa de Expansão Normalizada, seu desvio padrão e curva linear ajustada para a ocorrência média de raios. ....	116
6. 13	Histograma de frequência para a propriedade física Temperatura Média de Brilho (K) dos membros de SCM que (a) não apresentaram raios e (b) para membros dos SCM que apresentaram raios e curvas ajustadas. ....	118
6. 14	Análise comparativa entre a curva ajustada para o histograma de Temperatura Média de Brilho membros de SCM que não apresentaram raios (azul) e a curva ajustada para a amostra de Temperatura média que apresentaram raios (vermelho). ....	120
6. 15	Frequência Acumulada (%) de ocorrência de raios em função da Temperatura Média dos SCM.....	121
6. 16	Variação do número médio de raios em função da Temperatura Média de Brilho, seu desvio padrão e curva exponencial ajustada para a ocorrência média de raios. ....	122
6. 17	Variação do número médio de raios, desvio padrão e curva exponencial ajustada em função da (a) Temperatura Mínima de Brilho e (b) Temperatura Mínima Média de Brilho do <i>Kernel</i> de 9 <i>Pixel</i> .....	124
6.18	Histograma de frequência para a propriedade física Taxa de Variação da Temperatura Média de Brilho ( $K.hr^{-1}$ ) dos membros de SCM que (a) não apresentaram raios e (b) para membros dos SCM que apresentaram raios e curvas ajustadas para as duas distribuições.....	127
6. 19	Análise comparativa entre a curva ajustada para o histograma de Taxa de Variação da Temperatura Média de Brilho dos membros de SCM que não apresentaram raios (azul) e a curva ajustada para a amostra de Taxa de Variação da Temperatura Média que apresentaram raios (vermelho). ....	130
6. 20	Frequência Acumulada (%) de ocorrência de raios em função da Taxa de Variação da Temperatura Média de Brilho dos SCM. ....	131
6. 21	Variação do número médio de raios em função da Taxa de Variação da Temperatura Média de Brilho e seu desvio padrão.....	132
6. 22	Variação do número médio de raios e seu desvio padrão em função da (a) Taxa de Variação da Temperatura Mínima de Brilho e (b) Taxa de Variação da Temperatura Mínima Média de Brilho do <i>Kernel</i> de 9 <i>Pixel</i> .....	134

6. 23	Histograma de frequência da propriedade física Fração Convectiva dos membros de SCM que (a) não apresentaram raios e (b) para membros dos SCM que apresentaram raios e as curvas ajustadas.....	137
6. 24	Análise comparativa entre a curva ajustada para o histograma Fração Convectiva de membros de SCM que não apresentaram raios (azul) e a curva ajustada para a amostra que apresentaram raios (vermelho).....	138
6. 25	Frequência Acumulada (%) de ocorrência de raios em função da Fração Convectiva dos SCM.....	139
6. 26	Variação do número médio de raios em função da Fração Convectiva, seu desvio padrão e curva de potência ajustada. ....	141
6. 27	Histograma de frequência da propriedade física Excentricidade dos membros de SCM que (a) não apresentaram raios e (b) para membros dos SCM que apresentaram raios.....	143
6. 28	Frequência Acumulada (%) de ocorrência de raios em função da Excentricidade dos SCM.....	144
6. 29	Variação do número médio de raios em função da Excentricidade, seu desvio padrão e curva polinomial ajustada para a ocorrência média de raios. ....	145
6. 30	Distribuição estatística do número de SCM e frequência relativa em função do tempo de vida em horas para SCM que (a) não apresentaram raios e SCM (b) que apresentaram raios durante seu ciclo de vida. ....	147
6. 31	Análise comparativa entre a curva ajustada para o histograma de Tempo de Vida (horas) dos SCM que não apresentaram raios (azul) e a curva ajustada para a amostra de SCM que apresentaram raios (vermelho). ....	148
6. 32	Variação média do Raio Efetivo Máximo (km), desvio padrão e curvas lineares ajustadas em função do tempo de vida (horas) para SCM que (a) não apresentaram raios e (b) SCM que apresentaram raios durante seu ciclo de vida. ....	150
6. 33	Variação do Número Médio de Raios, desvio padrão e curva exponencial ajustada em função do tempo de vida (horas) dos SCM. ....	152
6. 34	Variação da Densidade Média de Raios (raios/km <sup>2</sup> ), desvio padrão e curva exponencial ajustada em função do tempo de vida (horas) dos SCM.....	153
6. 35	Comparação do ciclo de vida do Raio Efetivo (km) dos SCM que não tiveram raios (azul) e SCM que apresentaram raios (vermelho) durante seu ciclo de vida, para as cinco categorias de ciclo de vida.....	155

6. 36 Variação média do Raio Efetivo (km) de SCM que (a) não apresentaram raios e SCM que (b) apresentaram raios durante seu ciclo de vida, para três valores de duração: 4 horas (preto), 6 horas (vermelho) e 7 horas (azul). ..... 156
6. 37 Variação do Número Médio de Raios (verde) e do Raio Efetivo (km) (vermelho) para os SCM para cinco categorias de ciclo de vida: 1 (iniciação), 2 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), 3 (maturação), 4 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e 5 (dissipação). ..... 159
6. 38 Variação do Número Médio de Raios dos SCM em função do ciclo de vida, para três valores de duração: 4 horas (curva preta), 6 horas (curva vermelha) e 7 horas (curva azul). ..... 161
6. 39 Variação da Densidade Média de Raios (Raios/km<sup>2</sup>) (curva verde) e do Raio Efetivo (km) (curva vermelha) para os SCM para 5 categorias de ciclo de vida: 1 (iniciação), 2 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), 3 (maturação), 4 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e 5 (dissipação). ..... 163
6. 40 Variação da Densidade Média de Raios (raios/km<sup>2</sup>) dos SCM em função do ciclo de vida, para três valores de duração: 4 horas (curva preta), 6 horas (curva vermelha) e 7 horas (curva azul). ..... 165
7. 1 Histograma de frequência relativa (%) da propriedade microfísica Diâmetro Efetivo (mm) de eventos de partículas de gelo que (a) não apresentaram raios e para eventos (b) que apresentaram raios e as respectivas curvas ajustadas. .... 169
7. 2 Análise comparativa entre a curva ajustada para o histograma de frequência relativa de Diâmetro Efetivo de eventos que apresentaram raios (curva vermelha) e para os que não apresentaram raios (curva preta). ..... 170
7. 3 Frequência Acumulada (%) de ocorrência de raios em função do Diâmetro Efetivo das partículas de gelo. .... 171
7. 4 Frequência de ocorrência de raios em função do Diâmetro Efetivo das partículas de gelo para a probabilidade de ocorrer ao menos um (vermelho), dois (azul), quatro (verde), oito (rosa) e dezesseis (amarelo) raios em um intervalo de 15 minutos. .... 173
7. 5 Curvas exponenciais ajustadas para a probabilidade de ocorrência de raios em função do Diâmetro Efetivo das partículas de gelo, para a probabilidade de ocorrer ao menos um (vermelho), dois (azul), quatro (verde), oito (rosa) e dezesseis (amarelo) raios em um intervalo de 15 minutos. .... 173

7. 6	Histograma de frequência relativa (%) da propriedade microfísica Conteúdo Integrado Verticalmente de Gelo (IWP) ( $\text{kg/m}^2$ ) de eventos que (a) não apresentaram raios e para eventos (b) que apresentaram raios e as respectivas curvas ajustadas.....	177
7. 7	Análise comparativa entre a curva ajustada para o histograma de frequência relativa de Conteúdo Integrado Verticalmente de Gelo (IWP) Diâmetro Efetivo de eventos que apresentaram raios (curva vermelha) e para os que não apresentaram raios (curva vermelha). ....	177
7. 8	Frequência Acumulada (%) de ocorrência de raios em função do Conteúdo Integrado Verticalmente de Gelo (IWP). ....	180
7.9	Frequência de ocorrência de raios em função do Conteúdo Integrado Verticalmente de Gelo (IWP) para a probabilidade de ocorrer ao menos um (vermelho), dois (azul), quatro (verde), oito (rosa) e dezesseis (amarelo) raios em um intervalo de 15 minutos.....	181
7. 10	Curvas polinomiais de segundo grau ajustadas para a probabilidade de ocorrência de raios em função do Conteúdo Integrado Verticalmente de Gelo (IWP) para a probabilidade de ocorrer um (vermelho), dois (azul), quatro (verde), oito (rosa) e dezesseis (amarelo) raios em um intervalo de 15 minutos.....	182
7. 11	Histograma de frequência relativa (%) da diferença de polarização (vertical menos horizontal) em 85 GHz de eventos ( <i>pixels</i> ) (a) sem e (b) com raios e as respectivas curvas ajustadas. ....	186
7. 12	Análise comparativa entre a curva ajustada para o histograma de frequência relativa de $T_{BV}-T_{BH}$ sem (azul) e com raios (vermelho). ....	186
7. 13	Frequência Acumulada (%) de ocorrência de raios em função da diferença de polarização (vertical menos horizontal) em 85 GHz de eventos ( <i>pixels</i> ).....	189
7. 14	Frequência de ocorrência de raios em função da diferença de polarização (vertical menos horizontal) em 85 GHz de eventos para a probabilidade de ocorrer ao menos um (vermelho), dois (azul), quatro (verde), oito (rosa) e dezesseis (amarelo) raios em um intervalo de 15 minutos.....	191
7. 15	Curvas de potência ajustadas para a probabilidade de ocorrência de raios em função da diferença de polarização (vertical menos horizontal) em 85 GHz de eventos ( <i>pixels</i> ) para a probabilidade de ocorrer ao menos um, dois, quatro, oito e dezesseis raios em um intervalo de 15 minutos.....	191

## LISTA DE TABELAS

	<b><u>Pag.</u></b>
2.1 Definição de um CCM com base em características físicas.....	44
6.1 Estatística de ocorrência sazonal de SCM durante o período de estudo.....	97



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

$A_e$	-	Taxa de Expansão Normalizada
ALDT	-	Advanced Lightning Direction Finder
AMSU	-	Advanced Microwave Souding Unit
AR	-	No ar
Cb	-	Cumulunimbus
CCD	-	Charge-Coupled Device
CCM	-	Complexo Convectivo de Mesoescala
CCN	-	Cloud Condensation Nuclei
CEMIG	-	Companhia Energética de Minas Gerais
CERES	-	Clouds and Earth's Radiant Energy System
CPTEC	-	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
$D_e$	-	Diâmetro Efetivo de Partícula de Gelo
DMR	-	Densidade Média de Raios
DSA	-	Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais
Ecc	-	Excentricidade
EN	-	Entre- Nuvens
EUA	-	Estados Unidos da América
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
JAXA	-	Japan Aerospace Exploration Agency
LF	-	Low Frequency
LI	-	Linha de Instabilidade
LIS	-	Ligtning Imaging Sensor
LPATS	-	Lightning Positioning and Tracking System
MDF	-	Magnetic Direction Finder
MODIS	-	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	-	National Aeronautics and Space Administration
NESDIS	-	National Enviroment Satellite, Data and Information Service
NMR	-	Número Médio de Raios
NOAA	-	National Oceanic and Atmospheric Administration
NS	-	Nuvem-Solo

IWP	– Ice Water Path
ODT	– Optical Transient Detector
PCT	– Polarization Corrected Temperature
PR	– Precipitation Radar
$R_e$	– Raio Efetivo
REM	– Radiação Eletromagnética
RINDAT	– Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas
SCM	– Sistema Convectivo de Mesoescala
SIMEPAR	– Sistema Meteorológico do Paraná
SN	– Solo-Nuvem
SSMI	– Special Sensor Microwave Imager
$T_B$	– Temperatura de Brilho
$T_C$	– Temperatura do local da colisão
$T_{med}$	– Temperatura Média de Brilho
$T_{min}$	– Temperatura Mínima de Brilho
$T_{min9}$	– Temperatura Mínima Média de Brilho do <i>Kernel</i> de 9 <i>Pixels</i>
$T_{IV}$	– Temperatura de inversão
TMI	– TRMM Microwave Imager
TOA	– Time of Arrival
TRMM	– Tropical Rainfall Measuring Mission
tv	– Tempo de Vida
$TVT_{med}$	– Taxa de Variação da Temperatura Média de Brilho
$TVT_{min}$	– Taxa de Variação da Temperatura Mínima de Brilho
$TVT_{min9}$	– Taxa de Variação da Temperatura Mínima Média de Brilho do <i>Kernel</i> de 9 <i>Pixels</i>
VIRS	– Visible Infrared Scanner
VLF	– Very Low Frequency

## LISTA DE SÍMBOLOS

kA	-	QuiloÁmpere ( $10^3$ A)
kHz	-	QuiloHertz ( $10^3$ Hz)
KW	-	QuiloWatt ( $10^3$ W)
GHz	-	GigaHertz ( $10^6$ Hz)
ms	-	Milisegundos ( $10^{-3}$ s)
NaCl	-	Cloreto de Sódio (Sal)
$\mu$ s	-	Microsegundos ( $10^{-6}$ s)



## 1 INTRODUÇÃO

As descargas elétricas são fenômenos atmosféricos que vem ao longo de muitos anos afetando diversas regiões do mundo, indubitavelmente pela sua natureza agressiva e destruidora. Os prejuízos vão desde perdas de vidas humanas, colapsos na rede de distribuição de energia elétrica, incêndios florestais e danos aos sistemas de telefonia e telecomunicações. O Brasil, por possuir uma extensa área territorial e proximidade ao equador geográfico, apresenta uma alta incidência desse fenômeno. Estima-se que cerca de 50 a 70 milhões de descargas elétricas atingem o solo brasileiro por ano em média (PINTO Jr, 2005). Desta forma, torna-se de grande importância estudos que associem propriedades físicas de tempestades severas a ocorrência de descargas elétricas, com vista na determinação de parâmetros para índices de severidade e previsão da atividade elétrica.

Essas intensas descargas elétricas que ocorrem na atmosfera, também conhecidas como relâmpagos, ocorrem inicialmente comumente devido ao acúmulo de cargas elétricas dentro de nuvens de tempestade do tipo *Cumulunimbus* (Cb). Esta separação de cargas produz um campo elétrico capaz de romper a rigidez dielétrica do ar (próximo ao solo é em torno de  $3 \cdot 10^6$  V/m). Quebrada a rigidez, tem-se início um rápido movimento de elétrons da nuvem para o solo ou vice versa, causando uma intensa luminosidade e alcançando temperaturas aproximadamente de  $30.000^\circ\text{C}$ . Este súbito aquecimento faz com que ocorra a expansão do ar ao redor do canal ionizado, produzindo o trovão. A natureza elétrica destas intensas descargas elétricas foi demonstrada pela primeira vez pelo cientista e filósofo americano Benjamin Franklin em 1752, através de seu conhecido experimento com uma pipa inserida dentro de uma nuvem de tempestade, tal que faíscas saltaram de uma chave amarrada na extensão do cordão da pipa para os seus dedos, mostrando que relâmpagos consistem na transferência de cargas negativas e positivas entre as nuvens e o solo.

A análise da atividade elétrica associada a parâmetros físicos em nuvens convectivas feita em muitos países é realizada por meio de radares, detectores de relâmpagos em

solo e dados provenientes de satélites. Apesar da combinação de informações provenientes de radares e detectores de relâmpagos em solo possibilitarem a determinação de forma precisa das propriedades físicas das nuvens convectivas, localização e o instante de ocorrência dos relâmpagos, essas informações são limitadas para regiões relativamente próximas a esses instrumentos. Desta forma, a combinação simultânea de dados de ocorrência de relâmpagos em associação a informações de temperatura de brilho ( $T_B$ ) no infravermelho (IR) e também a associação de dados de relâmpagos com informações na faixa de microondas passivo, têm-se mostrado uma importante técnica para a caracterização da atividade convectiva em regiões onde não se dispõe de uma vasta rede de detectores e radares, como em regiões de florestas tropicais e regiões oceânicas. A importância de estudos que correlacionam propriedades de nuvens convectivas obtidas a partir de informações de  $T_B$  no IR de satélites geostacionários com as ocorrências de relâmpagos deve-se a boa resolução temporal (15 min) e espacial (4 km x 4 km) proporcionada por estes satélites.

Por outro lado, a combinação de informações provenientes de satélites de órbita polar com as informações de ocorrências de relâmpagos é de grande importância visto o grande potencial da radiação em microondas passivo provenientes de sensores a bordo desses tipos de satélites em caracterizar propriedades microfísicas de nuvens convectivas. Nos Estados Unidos (EUA), por exemplo, a *National Environment Satellite, Data and Information Service (NESDIS) da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)* tem desenvolvido um algoritmo que determina propriedades microfísicas de partículas de gelo como: diâmetro efetivo ( $D_e$ ) e conteúdo integrado verticalmente de gelo (*Ice Water Path, IWP*), através de dados de  $T_B$  em 89 GHz e 150 GHz (ZHAO e WENG, 2001). A partir dos resultados desse algoritmo, em conjunto com dados de  $T_B$  no IR e de dados de atividade elétrica de relâmpagos, pode-se inferir sobre os possíveis limites de tamanho e quantidade de gelo associada à atividade de relâmpagos.

## 1.1 Objetivos

O objetivo principal dessa pesquisa foi caracterizar as propriedades físicas e microfísicas de nuvens convectivas responsáveis pela ocorrência de descargas elétricas, com vista na determinação de parâmetros de severidade e de prognóstico para a ocorrência da atividade elétrica.

Para alcançar o objetivo geral desse trabalho, foram buscados alguns objetivos específicos, os quais são os seguintes:

- Avaliar e caracterizar as ocorrências de relâmpagos nuvem-solo reportadas sobre o estado de São Paulo entre 2005 a 2007, através de análises de mapas de Eficiência de Detecção de relâmpagos nuvem-solo e da caracterização da distribuição espacial e temporal dos raios nesta região de estudo durante este período;
- Caracterizar as possíveis propriedades físicas de Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) responsáveis pelos processos de eletrificação e pela ocorrência de atividade elétrica de relâmpagos nuvem-solo, através de informações no infravermelho provenientes de satélite e de relâmpagos nuvem-solo reportados por detectores em solo;
- Analisar o ciclo de vida dos SCM com e sem raios, para entender melhor a dinâmica diferenciada entre esses dois tipos de sistemas. Além disso, pretendeu-se avaliar a evolução da atividade elétrica de ocorrência de relâmpagos nuvem-solo ao longo do ciclo de vida dos SCM com raios;
- Avaliar a relação física existente entre o tamanho das partículas de gelo e o conteúdo integrado verticalmente de gelo com a ocorrência de relâmpagos nuvem-solo, além de parametrizar curvas de probabilidade de ocorrência de relâmpagos nuvem-solo para cada uma dessas propriedades microfísicas;

- Caracterizar o potencial da orientação das partículas de gelo como indicador de ocorrência ou não de atividade elétrica de relâmpagos nuvem-solo, através de informações em microondas passivo e informações de relâmpagos de detectores em solo. Construir também uma função de probabilidade de ocorrência de relâmpagos nuvem-solo em função da diferença de temperatura polarizada (vertical menos horizontal) do canal de 85 GHz.

A seguir é mostrada a descrição do conteúdo de cada capítulo:

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica em que foi feita uma discussão de elementos teóricos como: os processos de formação de tempestades severas, precipitação, processos microfísicos envolvidos na formação de relâmpagos e detectores de descargas elétricas.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica, que serviu de embasamento teórico para a metodologia utilizada e para a discussão dos resultados.

O Capítulo 4 apresenta os dados que foram utilizados bem como o período, o formato e o local de onde foram coletados. A região de estudo também é apresentada neste capítulo.

O Capítulo 5 apresenta a metodologia utilizada neste trabalho usando os dados expostos no Capítulo 4, para serem alcançados os objetivos específicos apresentados anteriormente.

No Capítulo 6 são apresentadas e discutidas as propriedades físicas responsáveis pela ocorrência de relâmpagos nuvem-solo e a evolução do ciclo de vida dos SCM.

No Capítulo 7 são apresentados os resultados preliminares associando ao  $D_e$ , IWP e orientação das partículas de gelo em associação a ocorrência de relâmpagos nuvem-solo.

No Capítulo 8 são realizadas as considerações sobre os principais resultados encontrados durante o desenvolvimento desse trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Os resultados da avaliação e caracterização da distribuição espacial e temporal de relâmpagos nuvem-solo sobre a região e período em estudo são apresentados no Apêndice A.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No presente capítulo serão abordados e discutidos os conceitos relacionados aos processos de formação de tempestades severas, processos microfísicos envolvidos na eletrificação das nuvens convectivas e tipos de relâmpagos, para que se possa obter um melhor entendimento e discussão dos resultados que serão apresentados nos capítulos 6 e 7. Além disso, será apresentada uma breve abordagem dos sistemas detectores de relâmpagos atualmente utilizados no Brasil.

### 2.1 Nuvens e Nuvens de Tempestade

As nuvens convectivas capazes de produzir significativo número de relâmpagos e trovões são definidas como nuvens de tempestade, também conhecidas como nuvens *Cumulunimbus* (Cb). No entanto, outros tipos de nuvens, como *Cumulus Congestus*, *Stratocumulus*, *Altostratus* ou *Nimbostratus*, além de tempestades de areia, de neve e erupções vulcânicas também podem produzir relâmpagos esporadicamente. As nuvens de tempestades distinguem-se das demais por possuírem fortes correntes verticais de ar, grande extensão vertical (10 a 20 km), pelo seu tamanho horizontal (10 a 20 km), presença de gotículas super-resfriadas e de partículas de gelo. Elas podem se apresentar na forma de tempestades isoladas e/ou locais e tempestades organizadas conhecidas também como Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) (será comentado posteriormente), sendo os últimos os mais severos, produzindo chuvas intensas, ventos fortes e até granizo (PINTO Jr e PINTO, 2000).

Uma tempestade isolada tipicamente dura de uma a algumas horas, possui diâmetro em torno de 10 a 20 km, atinge altitudes de 6 a 20 km e move-se com velocidade de até 50 km/h. Elas podem ser formadas por uma única célula (unicelular), várias células (multicelular) e por uma supercélula. Uma tempestade unicelular (típica Cb) é produzida pela convecção local em uma região de fraco cisalhamento vertical do vento e dura aproximadamente menos de uma hora, enquanto, que as demais afetam uma região por várias horas. Tempestades multicelulares consistem basicamente de várias

células adjacentes em diferentes estágios de desenvolvimento, podendo atingir centenas de quilômetros de diâmetro. Por outro lado, as tempestades supercelulares são formadas por uma célula gigante, em ambiente de forte cisalhamento vertical do vento e instabilidade atmosférica, podendo atingir 20 km de altura (ultrapassando a tropopausa), durando de 2 a 6 horas e possuindo fortes correntes ascendentes combinadas com movimentos giratórios (WALLACE e HOBBS, 2006).

Desta forma, as tempestades supercelulares são classificadas também como tempestades de tempo severo, devido a sua capacidade de gerar granizo grande (maior que 2 cm ao atingirem a superfície), fortes rajadas de vento e tornado. São tempestades eletricamente mais ativas do que as tempestades unicelulares e multicelulares. A severidade dessas tempestades é influenciada pela intensidade das correntes de ar ascendentes e velocidade horizontal do vento em níveis superiores. Por outro lado, tempestades isoladas, menos potencialmente ativas que as citadas acima, têm a capacidade de produzir centenas de relâmpagos nuvem-solo ao longo de sua vida (média de quatro por minuto) (PINTO Jr e PINTO, 2000). As características físicas, elétricas, morfológicas e frequência de ocorrência dessas tempestades são reguladas em função da latitude, topografia, perfil de temperatura, estação do ano e diversos fenômenos meteorológicos.

Como definido por Wallace e Hobbs (1977) e Cotton (1989), essas nuvens isoladas (Cb) evoluem ao longo de seu ciclo de vida, de forma que algumas de suas propriedades físicas e dinâmicas se modificam. Portanto, os estágios na evolução de uma típica Cb, apresentada por esses autores são divididos em: estágio inicial (ou *cumulus*), estágio de maturação e estágio dissipativo, conforme mostrado na Figura 2.1.

No estágio inicial (Figura 2.1(a)), há uma predominância de correntes de ar ascendentes, com a velocidade aumentando com a altura dentro da nuvem e considerável entranhamento através dos limites laterais. Devido à intensa velocidade ascendente, as gotículas de água podem estar presentes acima do nível de congelamento. Nesta fase, a base da nuvem encontra-se em torno de 1 km de altura do solo. Contornos irregulares

no topo da nuvem surgem associados às partículas de gelo nesta região. Em geral, pouca chuva e pouco ou mesmo nenhum relâmpago ocorre neste estágio.

O estágio de maturação (Figura 2.1(b)) é caracterizado por correntes de ar descendentes, que começam a ocorrer devido a não sustentação das gotículas de água e cristais de gelo, associado à influência da força gravitacional sobre as mesmas. Desta forma, esta fase é caracterizada por intensa precipitação, granizo, relâmpagos, fortes ventos e até tornados. O topo da nuvem aproxima-se da tropopausa e gotículas de água são encontradas acima do nível de congelamento na região das correntes ascendentes e flocos de neve e granizo podem ser encontrados abaixo do nível de congelamento. A divergência das correntes ascendentes apenas sobre a tropopausa resulta na formação da bigorna da nuvem, que aponta na direção dos ventos presentes nesta altitude.

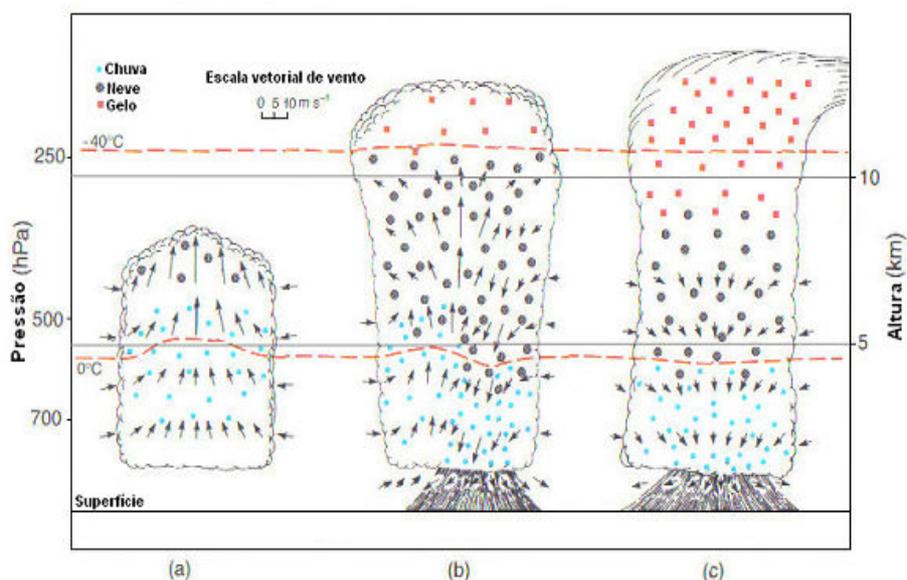


Figura 2. 1 - Descrição esquemática de uma célula de tempestade mostrando os três estágios de vida: (a) estágio *Cumulus*, (b) estágio maduro e (c) estágio de dissipação. Fonte: Adaptada de Wallace e Hobbs (2006).

A predominância de movimentos descendentes caracteriza o estágio de dissipação (Figura 2.1(c)) de uma nuvem Cb. Nesta fase é encontrada uma quantidade significativa de cristais de gelo e neve acima do nível de congelamento. Posteriormente, próximo ao

final deste estágio as correntes de ar supersaturado começam a enfraquecer e as gotículas de água não crescem mais, cessando a precipitação. Desta forma, ocorre a dissipação da nuvem, restando apenas à bigorna composta de nuvens *Cirrostratus* e *Altostratus*.

O processo de formação dessas nuvens de tempestade depende basicamente de três fatores: umidade do ar (associado à quantidade de vapor na atmosfera), grau de instabilidade vertical da atmosfera (associado à variação da temperatura com a altura) e mecanismos dinâmicos forçantes (frentes, brisa marítima, ventos soprando em direção a uma montanha, etc.) (WALLACE e HOBBS, 1977). Portanto, a formação de nuvens ocorre através da condensação do vapor d'água existente na atmosfera formando gotículas de água. Assim, as nuvens formadas são classificadas em quentes ou frias, dependendo de sua localização em relação à isoterma de 0 °C.

### **2.1.1 Nuvens Quentes e Nuvens Frias**

O entendimento da formação de nuvens e os processos de precipitação em seu interior são de grande importância, uma vez que a precipitação é uma característica da atividade convectiva que produz relâmpago. Assim, um importante componente na formação das gotículas são os aerossóis. Os aerossóis são partículas sólidas ou líquidas suspensas na atmosfera, de forma que alguns deles podem agir como núcleo de condensação de nuvens (*Cloud Condensation Nuclei*, CCN). Os menores aerossóis, conhecidos como Núcleos de Aitken, possuem raios entre  $0,005 \mu\text{m}$  e  $0,1 \mu\text{m}$ . Aerossóis grandes possuem de  $0,1 \mu\text{m}$  a  $1 \mu\text{m}$  de raio, enquanto que os gigantes possuem raio entre  $1 \mu\text{m}$  e  $10 \mu\text{m}$ . Os aerossóis menores que  $0,005 \mu\text{m}$  coagulam entre si e os maiores que  $10 \mu\text{m}$  se sedimentam. Os Núcleos de Aitken são essencialmente provenientes da combustão e da atividade humana. Aerossóis grandes e gigantes são provenientes da erosão eólica e partículas de sal (NaCl) sobre os oceanos, respectivamente (WALLACE e HOBBS, 1977).

As nuvens assim formadas podem ser classificadas em nuvens quentes ou frias. Nuvens quentes são aquelas localizadas abaixo da isoterma de  $0^{\circ}\text{C}$ . Essas nuvens formam-se pela condensação do vapor d'água em um ambiente supersaturado sobre a superfície dos CCN, conhecida assim como nucleação heterogênea. Após a formação da gotícula de água ( $0,1\ \mu\text{m}$  a  $1\ \mu\text{m}$  de raio), ela cresce pela condensação do vapor d'água do ambiente sobre sua superfície até em torno de  $25\ \mu\text{m}$  de raio. A partir deste tamanho, ela começa a cair e a crescer por coalescência. Neste processo, a gotícula coletora (maior) colide com as menores (colisão) e as incorpora (coalescência). Quanto maior o raio da gotícula coletora, maior a eficiência de coleta, ou seja, gotículas maiores crescem mais rápido. Ao atingir  $1000\ \mu\text{m}$ , a gotícula é considerada uma gota de chuva, porém parte das gotas chega à superfície e o restante sofre evaporação na atmosfera (WALLACE e HOBBS, 1977).

Nuvens frias, por outro lado, encontram-se acima da isoterma de  $0^{\circ}\text{C}$ . Nestas nuvens podem-se encontrar partículas de gelo e gotículas super-resfriadas (gotícula de água na fase líquida, mesmo abaixo de  $0^{\circ}\text{C}$ ). A coexistência destes dois elementos caracteriza uma nuvem mista. A formação de cristal de gelo se dá através da nucleação homogênea ou heterogênea. Na primeira, estando a gotícula em um ambiente extremamente frio (temperatura  $< -40^{\circ}\text{C}$ ) e supersaturado, ela se congela, formando um cristal de gelo. O processo de formação de gelo pela nucleação heterogênea (presença de aerossóis) através da deposição é similar à condensação de gotícula em nuvens quentes. Ao atingirem certo tamanho, os cristais de gelo começam a cair e coletar gotículas super-resfriadas ou outros cristais de gelo menores. No primeiro caso, processo conhecido como acreção ou *riming* tem-se a formação do granizo, enquanto na colisão com cristais de gelo menores formam-se flocos de neve. A fusão total de granizo ou neve causa precipitação de água líquida, enquanto que na fusão parcial tem-se precipitação de granizo ou neve (WALLACE e HOBBS, 1977).

O resultado de investigações tem mostrado que são raras as ocorrências de relâmpagos em nuvens quentes. Acredita-se que essa limitação em produzir eletrização suficiente

para gerar relâmpago deve-se a sua pequena extensão vertical, o que restringe o tempo disponível para que qualquer mecanismo de eletrização possa agir. Porém, essa limitação não ocorre em nuvens frias (mais duradouras). De forma geral, os estudos têm revelado que a eletrificação de nuvens convectivas tropicais ocorre apenas quando suas temperaturas caem abaixo de  $-6^{\circ}\text{C}$  (NACCARATO, 2001).

### **2.1.2 Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM)**

Os Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM), conhecidos também como tempestades organizadas, são aglomerados de nuvens convectivas profundas e mais largas que tempestades individuais, acompanhados freqüentemente de extensa nuvem estratiforme na baixa troposfera em forma de bigorna de centenas de quilômetros. Segundo Houze (1993), os SCM são sistemas de nuvens que ocorrem em conexão com um grupo de tempestades e produzem precipitação contínua sobre áreas da ordem de 100 km ou mais na escala horizontal. Estes sistemas possuem períodos típicos de vida em torno de 6 a 12 horas e as tempestades embebidas em seu interior freqüentemente são fontes de intensa precipitação, fortes ventos, tornados, granizo e intensa atividade elétrica. Na América do Sul, os SCM são responsáveis pela maior parte da precipitação nos trópicos e em várias regiões de latitudes médias durante a estação quente (VELASCO e FRITSCH, 1987; MACHADO e LAURENT, 2004). Alguns tipos particulares de SCM são: Linhas de Instabilidade (LI) e Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) (COTTON e ANTHES, 1989). Uma classificação realizada por Maddox (1980) dos SCM em função de sua forma e localização é mostrada na Figura 2.2.

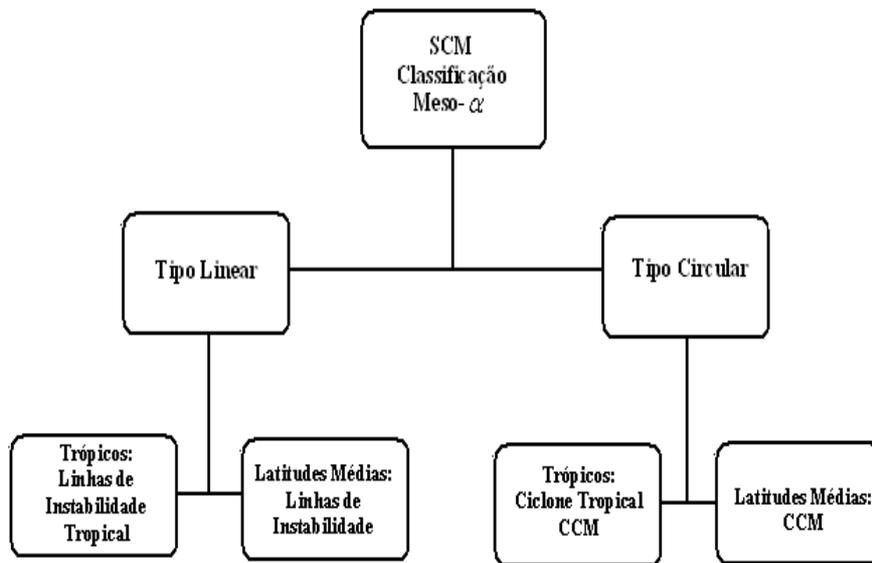


Figura 2. 2 - Classificação dos SCM para sistemas meso-alfa (250 - 2500 km) com duração maior que 6 horas e de acordo com suas características físicas e localização.  
 Fonte: Adaptada de Maddox (1980).

As LI são identificadas por uma vigorosa linha de células convectivas estendendo-se até centenas de quilômetros ao longo de um eixo horizontal, interagindo entre si e conectadas pela região estratiforme. São formadas geralmente próximas à interface entre uma massa de ar quente e úmido e uma massa de ar frio e produzindo, desta forma, ventos muito fortes em superfície (por volta de 12 a 25 m/s) e algumas vezes até tornados. Devido ao deslocamento do sistema, à medida que nuvens vão se dissipando, novas nuvens vão sendo formadas de maneira que a tempestade pode durar várias horas (HOUZE, 1977; COTTON e ANTHES, 1989).

O conceito de CCM foi introduzido por Maddox (1980) durante uma análise de imagens de satélites no IR sobre os EUA central em 1978. Estes sistemas foram classificados como os maiores membros dos SCM, possuindo forma quase circular e diâmetros típicos de 300 a 400 km, com centenas de tempestades individuais interligadas em seu interior, cobertas por uma extensa camada de nuvens *Cirrus*, oriundas de nuvens Cb maduras. Neste tipo de SCM, a forma de organização das células convectivas não é de grande importância, e os mesmos ocorrem principalmente à noite com duração típica

em torno de 10 a 12 horas (MADDOX, 1980). Os critérios definidos por Maddox para um SCM ser definido como CCM é sintetizado na Tabela 2.1.

Tabela 2. 1: Definição de um CCM com base em características físicas.

<b>Tamanho A</b>	Região com temperaturas de topos nebulosos $\leq 241$ K em uma área $\geq 100.000$ km <sup>2</sup>
<b>Tamanho B</b>	Região com temperaturas de topos nebulosos $\leq 221$ K em uma área $\geq 50.000$ km <sup>2</sup>
<b>Início</b>	Quando as definições de tamanho <b>A</b> e <b>B</b> forem satisfeitas
<b>Duração</b>	Quando as definições de tamanho <b>A</b> e <b>B</b> forem mantidas por um período $\geq 6$ horas
<b>Máxima Extensão</b>	Quando a região definida pelos limiares alcançar o tamanho máximo
<b>Forma</b>	Excentricidade $\geq 0,7$ no instante de máxima extensão
<b>Término</b>	Quando as definições de tamanho <b>A</b> e <b>B</b> não mas forem satisfeitas

Fonte: Adaptada de Maddox (1980).

Desta forma, os SCM de maneira geral são constituídos basicamente de uma região convectiva e outra estratiforme. A primeira é caracterizada por forte convecção e alto topo de nuvens, enquanto que a segunda região possui nuvens de grande extensão horizontal e baixo topo de nuvens (semelhante a uma bigorna). Contudo, os diferentes tipos de nuvens inseridos nos SCM variam conforme seu ciclo de vida (Figura 2.3) (MACHADO e ROSSOW, 1993). Na América do Sul tem-se empregado uma metodologia no qual através de imagem de satélite no canal do IR, a área dos SCM é identificada geralmente por regiões de *pixels* com  $T_B$  menores que 235 K e as células convectivas em seu interior por *pixels* de  $T_B$  menor que 210 K.

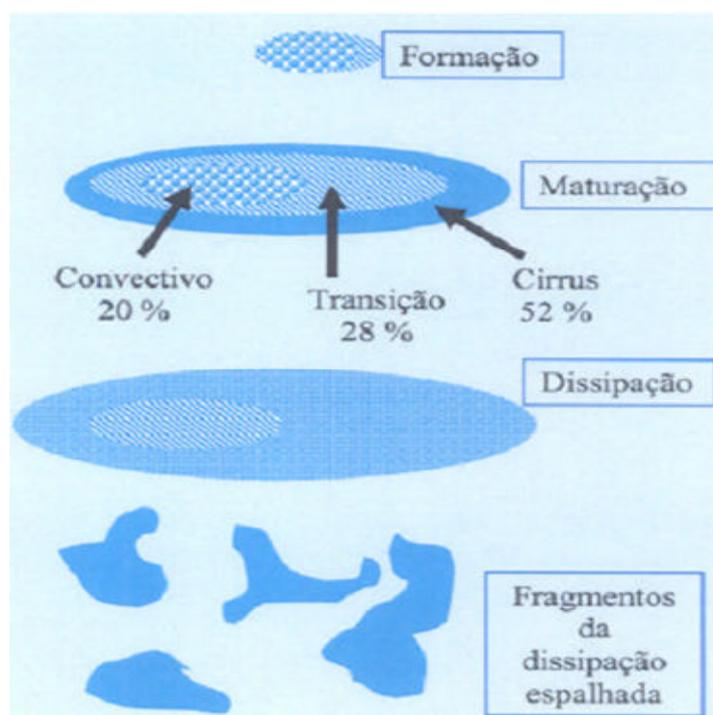


Figura 2. 3 - Representação da estrutura de nuvens de um típico SCM tropical durante sua formação, maturação e estágio de dissipação.  
 Fonte: Machado e Rossow (1993).

Embora diferentes condições dinâmicas e termodinâmicas favoreçam o surgimento dos SCM, um ponto em comum é a forte convergência de umidade em baixos níveis que precede por várias horas a sua formação (FRANK, 1978). Nas LI, a organização das células convectivas fornece o suprimento de ar quente e úmido e o forte cisalhamento vertical do vento separa regiões de *updraft* e de *downdraft*. O desenvolvimento dos CCM, porém está associado a um jato de baixos níveis em um fraco regime de ventos que fornece ar quente e úmido às células convectivas acoplado a um jato de altos níveis (VELASCO e FRITSCH, 1987).

O monitoramento dos SCM em tempo real é de grande importância para se avaliar as condições atmosféricas, cobertura de nuvens, precipitação e quantidade de relâmpagos ao longo do ciclo de vida desses sistemas. No Brasil, um método de identificação e previsão de propagação de SCM em curto prazo utilizado operacionalmente é o *Forecast and Tracking of Active Convective Cells* (FORTRACC) (Vila et al, 2008), implementado na Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) pertencente ao

Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Este algoritmo determina as trajetórias e ciclo de vida desses sistemas através de imagens sucessivas do IR, com base nas características morfológicas (reconhecimento de padrões) e a superposição de áreas entre essas imagens (MACEDO, 2001). Um tamanho mínimo de 90 *pixels* e um limiar de 235 K e 210 K são definidos para detectar os SCM e Células Convectivas (CC), respectivamente. Esse procedimento produz uma série temporal de propriedades físicas dos SCM ao longo de seu ciclo de vida. Portanto, cada SCM com o ciclo de vida completo é compreendido como uma família de SCM, a qual cada membro desta família, corresponde às diversas etapas (cada etapa correspondente a uma imagem de satélite) do ciclo de vida do SCM. Dentre as diversas propriedades físicas determinadas pelo modelo, as utilizadas neste trabalho foram as seguintes:

1) **Raio Efetivo ( $R_e$ ):** corresponde ao raio de um círculo cuja área seja igual à área do SCM, sendo expresso por:

$$R_e = \sqrt{\frac{A_{pxl} \cdot A_{SCM}}{\pi}} \quad (2.1)$$

em que,

$R_e$  é o raio efetivo do SCM em quilômetro;

$A_{pxl}$  é a área de um *pixel* do satélite GOES no IR em quilômetro;

$A_{SCM}$  é a área total do SCM em *pixels*.

2) **Taxa de Expansão Normalizada ( $A_e$ ):** é um parâmetro indicativo do crescimento ou decréscimo relativo do SCM com relação a sua área média em um determinado intervalo de tempo. Se o seu valor for positivo o sistema está em expansão, se o valor está próximo de zero o sistema atingiu a maturação e se for negativo indica que o sistema está em fase de dissipação. A sua expressão é definida por:

$$A_e = \frac{1}{A^*} \left( \frac{\partial A}{\partial t} \right) \quad (2.2)$$

em que,

$A_e$  é a taxa de expansão normalizada do SCM em  $10^{-6}$  segundo $^{-1}$ .

$A^*$  é a área média do SCM entre duas imagens em *pixels*;

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

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

3) **Temperatura Média de Brilho ( $T_{med}$ )**: corresponde à média da temperatura entre todos os *pixels* pertencente ao topo de um mesmo SCM expressa em Kelvin.

4) **Taxa de Variação da Temperatura Média de Brilho ( $TVT_{med}$ )**: corresponde à razão da variação da  $T_{med}$  do SCM entre duas imagens pela variação do tempo entre as imagens, sendo expressa por:

$$TVT_{med} = \frac{\Delta T_{media}}{\Delta t} \quad (2.3)$$

sendo,

$TVT_{med}$  é a Taxa de Variação da Temperatura Média em Kelvin.hora $^{-1}$ ;

$\Delta T_{media}$  é a variação da temperatura média entre duas imagens em Kelvin;

$\Delta t$  é o intervalo de tempo entre as imagens em horas.

5) **Temperatura Mínima de Brilho ( $T_{min}$ )**: corresponde à mínima temperatura entre todos os *pixels* pertencente ao topo de um mesmo SCM expressa em Kelvin.

6) **Taxa de Variação da Temperatura Mínima de Brilho ( $TVT_{min}$ )**: corresponde à variação da  $T_{min}$  do SCM entre duas imagens pela variação do tempo entre as imagens, sendo expressa por:

$$TVT_{min} = \frac{\Delta T_{min}}{\Delta t} \quad (2.4)$$

em que,

$TVT_{min}$  é a Taxa de Variação da Temperatura Mínima em Kelvin.hora $^{-1}$ ;

$\Delta T_{\min}$  é a variação da temperatura média entre duas imagens em Kelvin;

$\Delta t$  é o intervalo de tempo entre as imagens em horas.

7) **Temperatura Mínima Média de Brilho do Kernel de 9 Pixels ( $T_{\min 9}$ )**: é uma média entre a temperatura dos nove *pixels* mais frios pertencente ao topo do SCM para uma determinada imagem expressa em Kelvin.

8) **Taxa de Variação da Temperatura Mínima Média de Brilho do Kernel de 9 Pixels ( $TVT_{\min 9}$ )**: corresponde à variação da  $T_{\min 9}$  do SCM entre duas imagens pela variação do tempo entre as imagens, sendo expressa por:

$$TVT_{\min} = \frac{\Delta T_{\min 9}}{\Delta t} \quad (2.5)$$

em que,

$TVT_{\min 9}$  é a Taxa de Variação da Temperatura Mínima Média do *Kernel* de 9 *Pixels* em Kelvin.hora<sup>-1</sup>;

$\Delta T_{\min 9}$  é a variação da temperatura média entre duas imagens em Kelvin;

$\Delta t$  é o intervalo de tempo entre as imagens em horas.

9) **Fração Convectiva (FC)**: é a razão entre o tamanho médio das células convectivas (núcleos com  $T_B < 210$  K) e a área total do SCM, expressa pela seguinte relação:

$$FC = 100N_{cc} \left( \frac{r_c}{R_e} \right)^2 \quad (2.6)$$

em que,

$N_{CC}$  é número de células convectivas;

$r_c$  é o raio efetivo das células convectivas em quilômetros;

$R_e$  é o raio efetivo do SCM em quilômetros.

10) **Excentricidade (Ecc)**: é representada pela razão entre o eixo menor do SCM pelo seu eixo maior. As seguintes expressões são utilizadas para a determinação da excentricidade:

$$xx_i = LON_i \cos(\beta) + LAT_i \sin(\beta) \quad (2.7)$$

$$yy_i = LON_i \sin(\beta) + LAT_i \cos(\beta) \quad (2.8)$$

sendo,

$$\beta = \tan^{-1}(\alpha) \quad (2.9)$$

em que,

$$\alpha = \frac{N \sum LAT_i LON_i - LAT_i \sum LON_i}{N \sum LAT_i^2 - (\sum LAT_i)^2} \quad (2.10)$$

Assim, utilizando esses parâmetros a excentricidade é determinada pelas seguintes relações:

$$\varepsilon = \frac{|xx(\max) - xx(\min)|}{|yy(\max) - yy(\min)|} \quad (2.11)$$

$$\varepsilon = \frac{|yy(\max) - yy(\min)|}{|xx(\max) - xx(\min)|} \quad (2.12)$$

Em que,

$LAT_i$  e  $LON_i$  representa a latitude e longitude de todos os pontos do sistema e graus;

$N$  representa o número de pontos do sistema;

$\beta$  representa a inclinação do sistema;

$\varepsilon$  representa a excentricidade.

Maiores detalhamentos sobre o princípio físico de rastreamento, determinação de propriedades de SCM pelo modelo FORTRACC, além da definição dessas propriedades

físicas encontra-se em trabalhos como em Machado et al (1998), Fortracc V1.1- Guia do Usuário (2004) e Vila et al (2008).

## **2.2 Estrutura Elétrica das Nuvens de Tempestade**

Há centenas de anos, a polaridade das cargas elétricas dentro de nuvens de tempestade tem sido objeto de muito estudo, constituindo um problema ainda não inteiramente resolvido pela comunidade científica. Este fato deve-se a complexidade dos processos microfísicos e microfísicos responsáveis pela produção e separação das cargas elétricas associadas a cristais de gelo e de granizo.

O primeiro modelo de estrutura elétrica de nuvens de tempestade foi proposto no início do século 20, conhecido como “modelo dipolar” (Figura 2.4(a)). Esse modelo constituiu-se basicamente de um centro de cargas positivas no topo da nuvem e outro negativo na sua base de mesma magnitude. A localização do centro positivo depende da extensão vertical da nuvem e geralmente está em torno de 1 km abaixo do topo e o centro negativo situa-se entre as isotermas de aproximadamente  $-10^{\circ}\text{C}$  e  $-15^{\circ}\text{C}$ . Devido à captura de íons na atmosfera pelas gotículas de água e cristais de gelo, existe uma camada de blindagem negativa e uma positiva, no topo e na base da nuvem, respectivamente (IRIBARNE e CHO, 1986).

No final da década de 30, surgiu o modelo de “estrutura tripolar” de cargas em nuvens de tempestade (Figura 2.4(b)). Esse modelo consiste de dois centros de cargas positivas e um de carga negativa. Um centro positivo localiza-se no topo e o outro na base da nuvem, enquanto o negativo encontra-se entre esses dois entre as isotermas de  $-10^{\circ}\text{C}$  e  $-15^{\circ}\text{C}$ , possuindo extensão horizontal de alguns quilômetros e vertical em torno de 1 km (WILLIAMS, 1989). Próximo ao topo da nuvem, perto do centro positivo de cargas, comprovou-se a existência de uma camada de blindagem de cargas negativas.

Diversos estudos nas últimas décadas, com medidas de campo elétrico através de balões estratosféricos, têm evidenciado a existência de uma estrutura mais complexa,

denominada “estrutura multipolar” (Figura 2.4(c)). Neste modelo, foram identificados quatro centros de cargas nas regiões de movimento ascendentes (com alturas crescentes com o aumento da velocidade das correntes) dentro da nuvem e seis centros nas regiões de movimentos descendentes. Contudo, apesar da existência de diversos modelos propostos para explicar como as nuvens se tornam carregadas e como é a configuração da estrutura elétrica delas, ainda não se conhece completamente como ocorrem esses processos.

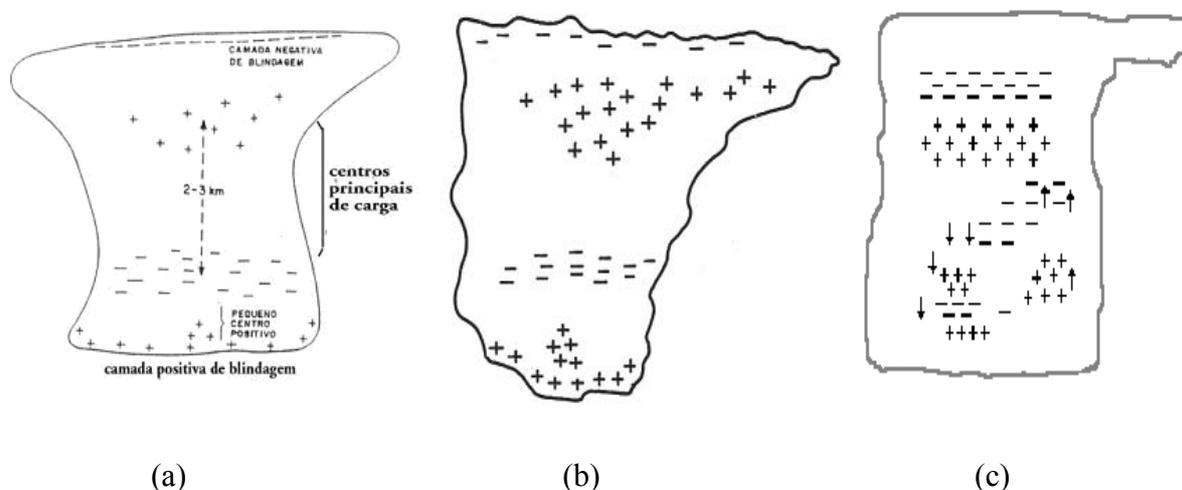


Figura 2. 4 - Tipos de estrutura elétrica de nuvens de tempestade: (a) estrutura dipolar, (b) estrutura tripolar e (c) estrutura multipolar.  
 Fonte: Iribarne e Cho (1986).

### 2.3 Processos de Eletrização das Nuvens Tempestade

As tempestades são largamente estudadas há vários séculos, porém os mecanismos responsáveis pela eletrização das nuvens ainda é assunto de muito estudo e investigação. Esse entendimento não completo pela comunidade científica sobre a formação e a consequente separação das cargas positivas e negativas dentro das nuvens, deve-se a complexidade da própria estrutura elétrica das nuvens e dos processos microfísicos e microfísicos envolvidos, que ocorrem simultaneamente em seu interior.

Diversas teorias têm sido propostas ao longo dos anos na tentativa de explicar esses mecanismos responsáveis pela formação e separação das cargas dentro das nuvens. O fato de geralmente os centros de cargas no interior das nuvens estarem localizados em faixas de temperatura abaixo de 0 °C sugere que a presença de gelo seja um requisito importante para o processo de eletrização (PINTO Jr e PINTO, 2000). Portanto, as teorias mais aceitas postulam que a colisão entre cristais de gelo e pedras leves de granizo de diferentes tamanhos seja um dos mecanismos de transferência de cargas elétricas responsáveis pela formação dos centros dessas cargas elétricas. Dois processos típicos que levam em consideração as colisões entre os cristais de gelo e granizo são: o processo indutivo e o termoelétrico, tendo como papel predominante o campo elétrico ambiente e a temperatura, respectivamente. Um processo alternativo para eletrização das nuvens é o de eletrificação convectivo, onde se considera a produção das cargas elétricas por raios cósmicos. Esses três processos são discutidos com mais detalhes na próxima seção.

### **2.3.1 Processo Colisional Indutivo**

Este processo, inicialmente proposto por Elster e Geitel em 1913, considera o granizo como uma esfera condutora, de forma que durante seu movimento de queda em um campo elétrico uniforme dirigido para baixo no interior da nuvem, cargas elétricas são induzidas no interior do granizo. Assim, a parte superior do granizo fica polarizada negativamente e a inferior positivamente. O cristal de gelo ao colidir na parte inferior do granizo remove cargas positivas, tornando o granizo negativamente carregado e o cristal de gelo carregado positivamente (Figura 2.5). Sendo o granizo mais massivo, ele se deposita na base da nuvem, enquanto o cristal de gelo fica suspenso na nuvem, criando assim uma configuração de um dipolo (cargas positivas no topo da nuvem e negativas na base), reforçando deste modo o campo elétrico no interior da nuvem (WALLACE e HOBBS, 1977).

Através de um tratamento teórico, B. J. Manson em 1988, concluiu que granizos de baixa densidade em queda no interior de uma nuvem com gotículas super-resfriadas,

podem produzir campos elétricos com cerca de 4.000 V/m em aproximadamente 10 minutos (SOLORZANO, 1998). Alguns estudos mostraram que gotículas super-resfriadas ao colidir com um granizo em um campo elétrico radial removem mais cargas do que em um vertical. Isto se deve ao fato de que em um campo radial a diferença de potencial entre o granizo e sua vizinhança é tal que, em qualquer ponto da sua superfície, colisões tangenciais separam a mesma quantidade de carga. Por outro lado, em um campo elétrico vertical as colisões ocorriam próximas ao equador horizontal, onde se tem poucas cargas para serem transferidas.

Considerado aceito por muitos anos, este processo vem sofrendo críticas, pois experimentos em laboratório têm mostrado que o campo elétrico de tempo bom, não é suficiente para induzir cargas no granizo. Desta forma, acredita-se que o mesmo não seja responsável pela formação das cargas no estágio inicial, de modo que este processo atua apenas para intensificar os centros de carga já existentes, devido a outros processos (PINTO Jr e PINTO, 2000).

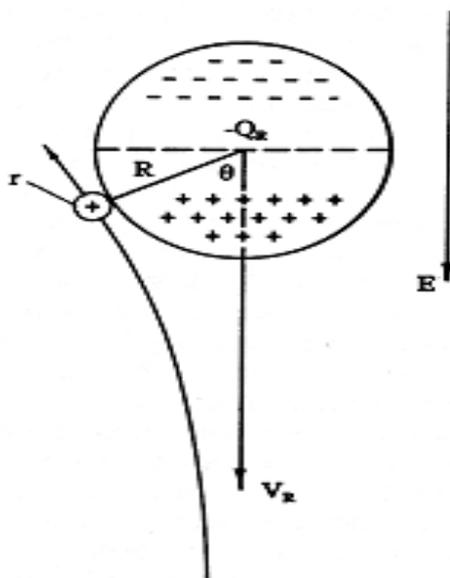


Figura 2. 5 - Um granizo esférico polariza-se na presença de um campo elétrico ambiente. Partículas de gelo que venham a colidir com a parte de baixo do granizo removem suas cargas positivas, tornando-a negativamente carregada, processo denominado Colisional Indutivo.  
Fonte: Naccarato (2005).

### 2.3.2 Processo Colisional Termoelétrico

Este processo foi estudado pela primeira vez na década de 50 através de experimentos de simulação de nuvens. Considera-se que a polaridade das cargas transferidas durante a colisão não depende do campo elétrico local, e sim da temperatura de inversão ( $T_{IV}$ ) e da temperatura no local da colisão ( $T_C$ ). A temperatura de inversão é estimada em aproximadamente  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , localizando-se a cerca de 6 km de altura, próximo a região de cargas negativas (WILLIAMS, 1989). Se  $T_C$  for maior que  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o granizo fica positivamente carregado e o cristal de gelo negativamente. Logo, devido a correntes de ar ascendentes, os cristais ascendem criando um centro de carga negativa próximo à linha de  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  e um positivo na base da nuvem, devido ao granizo. Por outro lado, se  $T_C$  for menor que  $T_{IV}$ , o granizo tenderá a perder cargas positivas, tornando o cristal carregado positivamente e o granizo negativamente. A configuração resultante é uma estrutura tripolar dentro da nuvem. A Figura 2.6 ilustra o processo colisional termoelétrico.

Estudos das últimas décadas têm mostrado que a polaridade da carga transferida entre as partículas além de depender da temperatura do ambiente, sofre forte influência da quantidade de gotícula super-resfriada no local da colisão. Quanto maior essa quantidade, mais os granizos se aquecerão ao colidir com elas, devido à maior liberação de calor latente, alterando assim a temperatura da superfície do granizo e atuando de modo a alterar o valor da  $T_{IV}$ . Segundo Williams (1989), a quantidade de carga transferida depende da velocidade de impacto da colisão e do tamanho dos cristais de gelo. Por exemplo, um cristal de gelo de  $100\ \mu\text{m}$  de diâmetro teria um limite de 1 a  $50 \cdot 10^{-15}\text{ C}$ , de cargas transferidas aparentemente dependendo dos detalhes da colisão.

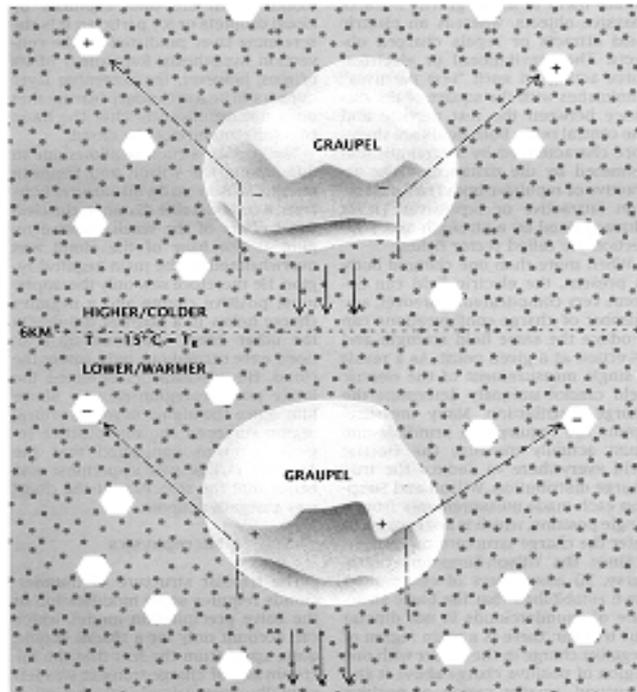


Figura 2. 6 - Microfísica da transferência de carga envolvendo colisões entre granizo e cristais de gelo em função da temperatura do ambiente, processo denominado colisional termoelétrico.  
 Fonte: Williams (1988).

### 2.3.3 Processo de Eletrificação Convectivo

Este modelo de eletrificação de nuvens foi formulado primeiramente por Vonnegut em 1953. Considera-se que as cargas são fornecidas inicialmente pelos raios cósmicos que ionizam as moléculas próximas ao topo das nuvens (criando cargas negativas) e pelo forte campo elétrico associado a objetos pontiagudos, na superfície da Terra, que produzem uma descarga corona de íons positivos. Desta forma, a nuvem *Cumulus* em seu estágio de crescimento arrasta, através de suas correntes ascendentes, esses íons positivos que se encontram próximos a sua base. Ao entrar na nuvem, essas cargas positivas são aprisionadas por gotículas de água e levadas até o topo da nuvem, atraindo cargas negativas nesta região (Figura 2.7). Assim, essas cargas negativas são aprisionadas pelas partículas presentes na fronteira da nuvem, formando uma camada de blindagem de cargas negativas nesta região. Alguns íons negativos capturados por

gotículas de água e cristal de gelo nas bordas da nuvem são carregados até a base da nuvem pelas correntes descendentes, formando um dipolo positivo (WILLIAMS, 1989).

Esse mecanismo apresenta algumas contradições que ainda não foram resolvidas, embora existam evidências que ele de fato ocorre (VONNEGUT, 1991). Entre elas está o fato de que não há evidências de que os íons positivos criados por efeito corona sejam suficientes para eletrificar a nuvem, uma vez que o processo de penetração de cargas positivas na base da nuvem parece ser excessivamente lento para contribuir para a eletrificação. Por outro lado, questiona-se como um campo elétrico tão intenso que gera o efeito corona, não seja capaz de romper a rigidez dielétrica dentro da nuvem. Devido a estes e outros fatores, este processo é alvo de melhorias conceituais e pouco aceitação.

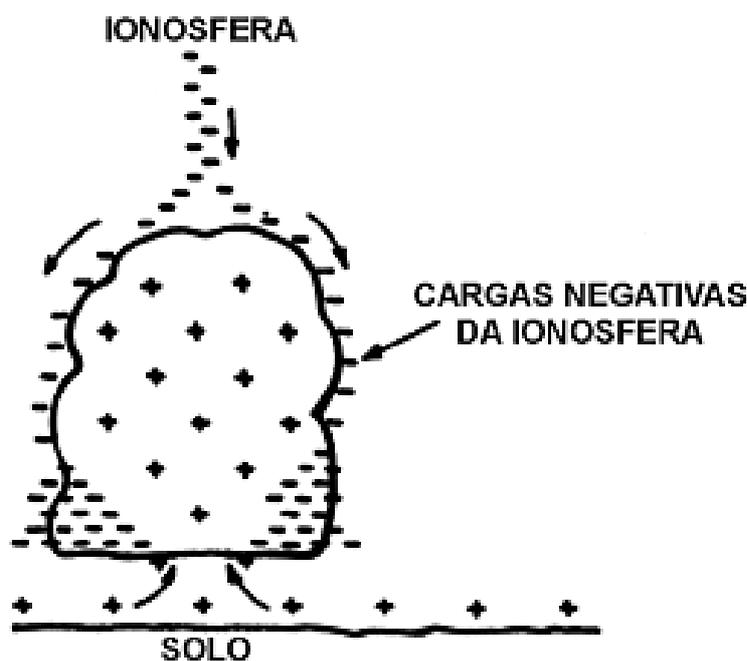


Figura 2. 7 - Desenvolvimento do centro de cargas negativas na parte mais baixa da nuvem durante o processo denominado colisional termoelétrico.

Fonte: Naccarato (2005).

## **2.4 Relâmpago**

Os relâmpagos são definidos como descargas elétricas de grande extensão (alguns quilômetros) e de grande intensidade (valores máximos de corrente chegando aproximadamente a 300 kA) que ocorrem na baixa troposfera. O início das descargas elétricas ocorre pelo acúmulo de cargas elétricas dentro da nuvem até o instante da ruptura dielétrica do ar ser atingida, surgindo assim um intenso movimento de elétrons dentro da nuvem. Deste modo, os relâmpagos caracterizam-se pela existência de um longo canal ionizado tanto dentro como fora da nuvem, sendo que no segundo caso algumas vezes apresenta-se ramificações, com extensões de alguns quilômetros tanto na vertical quanto na horizontal (PINTO Jr e PINTO, 2000).

### **2.4.1 Classificação dos Relâmpagos**

Esta seção é dedicada à explicação dos diferentes tipos de relâmpagos que ocorrem na atmosfera terrestre. Para padronizar a nomenclatura neste trabalho, considera-se relâmpago como o evento completo desde seu início até seu término e sendo constituído de várias descargas elétricas individuais. Portanto, doravante o termo descarga estará sempre se referindo a uma das descargas elétricas individuais que compõem o relâmpago.

Os relâmpagos são basicamente divididos em dois grupos: relâmpagos no solo (Figura 2.8) e relâmpagos nas nuvens. O primeiro grupo é composto pelos relâmpagos que ocorrem da nuvem para o solo, denominados nuvem-solo (NS) e os do solo para a nuvem, conhecidos como solo-nuvem (SN). Os relâmpagos nas nuvens são divididos em três tipos: relâmpagos que ocorrem dentro das nuvens, conhecidos como relâmpagos intra-nuvem (IN); os que ocorrem entre nuvens, chamados entre-nuvens (EN) e os que ocorrem da nuvem para a atmosfera denominados relâmpagos no ar (AR) (OGAWA, 1995).

Relâmpagos NS são os mais estudados devido ao seu alto poder destrutivo e facilidade em ser analisados. Também conhecidos como raios, eles são divididos em função da polaridade da carga transferida ao solo em positivos (Figura 2.8(a)) e negativos (Figura 8(b)). Os raios negativos são aqueles que transferem cargas negativas da nuvem para o solo e os positivos transferem cargas de sinal positivo (fisicamente é o transporte de cargas negativas do solo para a nuvem). Relâmpagos negativos representam 90% dos casos, e tanto esses como os relâmpagos positivos apresentam uma duração de aproximadamente 1/4 s (PINTO Jr e PINTO, 2000).

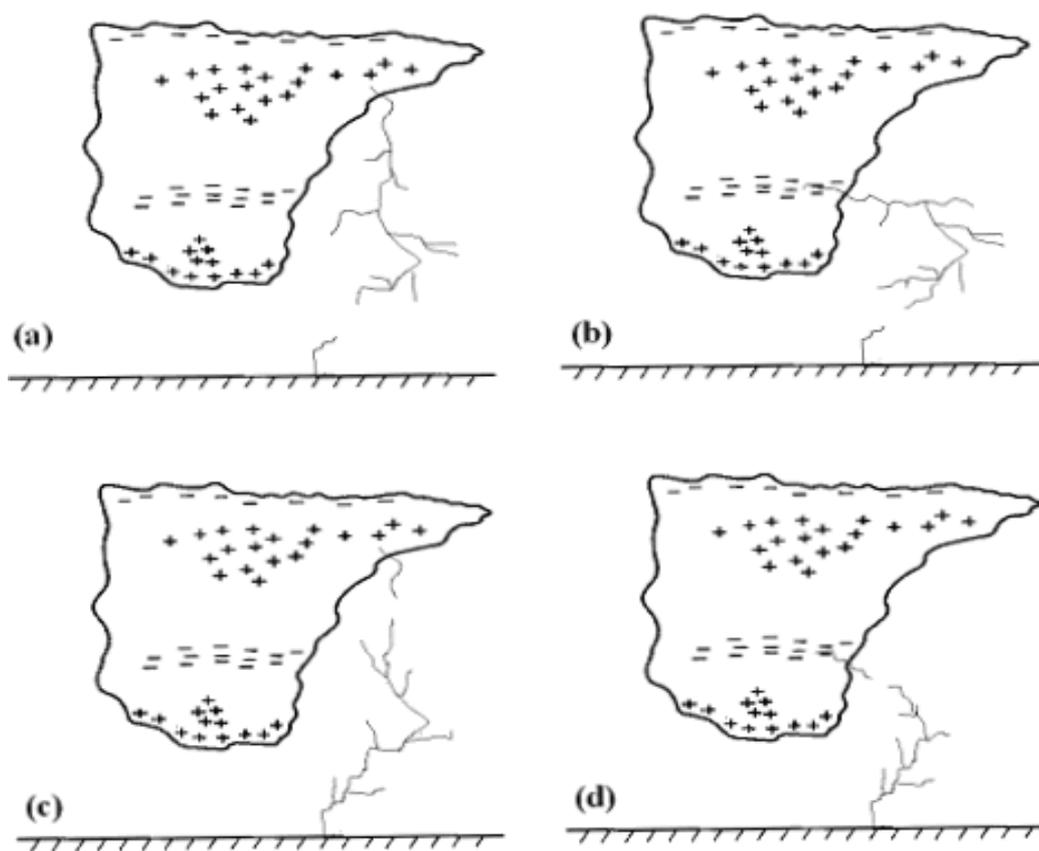


Figura 2. 8 - Diferentes tipos de relâmpagos que ocorrem entre as nuvens e o solo: relâmpago (a) NS positivo, (b) NS negativo, (c) SN positivo e (d) SN negativo.

### 2.4.1.1 Relâmpagos no Solo

Apesar dos relâmpagos parecerem contínuos em observações, eles ocorrem em passos discretos. A aparência contínua deve-se a rápida propagação de elétrons entre a nuvem e o solo. Como os raios negativos são os mais estudados e comuns, as etapas desses relâmpagos são descritas em maiores detalhes abaixo, baseado na revisão feita em Wallace e Hobbs (1977) e Pinto Jr e Pinto (2000), sendo ilustradas na Figura 2.9.

1) Os relâmpagos originam-se através de várias descargas dentro da nuvem com cerca de 3 e 5 km de altura e se deslocam entre o pequeno centro de cargas positivas próximo a base (camada de blindagem) e a região de cargas negativas (Fig. b), durante 10 a 100 ms, período conhecido como “período de quebra de rigidez preliminar”. Estas pequenas descargas liberam elétrons de partículas de precipitação que se encontram próximo a região de cargas negativas. Assim, esses elétrons livres neutralizam parte da pequena carga positiva localizada próxima a base da nuvem e se movem para fora da base (Fig. c e d). Esse movimento de elétrons representa uma descarga luminosa não visível ao olho humano, que se propaga em uma série de passos em direção ao solo, denominada de “líder escalonado” (*stepped leader*), a uma velocidade de 400.000 km/h. O tempo de cada passo é de  $1 \mu\text{s}$ , possuindo de 30 a 100 m de extensão, com pausas de  $50 \mu\text{s}$  entre os passos.

2) Durante seu trajeto de descida, o “líder escalonado” ramifica-se em busca de regiões de melhor condutividade elétrica na atmosfera (Fig. e), produzindo uma estrutura geométrica característica que transporta aproximadamente 10 C de carga e aproxima-se do solo em 20 ms com uma corrente média de centenas de ampères. A uma distância de 100 a 200 m do solo, as cargas elétricas negativas intensificam o campo elétrico em torno de objetos pontiagudos, edifícios, torres e montanhas com um potencial elétrico de  $100 \cdot 10^6 \text{ V}$ . O campo elétrico assim formado é intenso o suficiente para romper a rigidez dielétrica do ar, fazendo com que uma ou mais descargas positivas, denominadas “líderes conectantes”, partam de objetos altos localizados no solo em direção ao “líder

escalonado” (fig. f). Em cerca de 30 % dos casos, mais de um “líder conectante” surge de diferentes pontos do solo.

3) No momento que o “líder conectante” encontra o “líder escalonado”, cargas negativas presentes no canal do “líder escalonado” se movem em direção ao solo na forma de uma forte descarga, seguida por uma intensa luminosidade que se propaga para cima no canal a uma velocidade de  $400 \cdot 10^6$  km/h (fig. g e h). Esta descarga denominada “descarga de retorno” dura cerca de  $100 \mu$ s, com um pico de corrente de 30 kA, produzindo a maior parte da luz emitida. Se após a “descarga de retorno” o relâmpago terminar, ele é chamado de relâmpago simples. Esses raios representam 20 % dos relâmpagos NS negativos. Os relâmpagos que apresentam mais do que uma “descarga de retorno” são denominados de raios múltiplos.

4) Na maioria dos casos, descargas de retorno subseqüentes ocorrem após uma pausa de aproximadamente  $100 \mu$ s. Para que ocorram novas descargas de retorno é necessário que cargas sejam transportadas dentro da nuvem para a região onde o “líder escalonado” iniciou-se, através de pequenas descargas dentro da nuvem (fig. i). Assim, uma nova descarga, chamada “líder contínuo”, inicia-se na região onde se formou o líder escalonado, propagando através do canal ionizado de forma contínua sem ramificar-se, a uma velocidade maior que o líder escalonado, produzindo uma corrente elétrica menor de 1 kA (fig. i e j) com carga de 1 C. Ao chegar próximo ao solo (alguns metros), após cerca de 50 ms de seu início, surge novamente um “líder conectante” (neste caso de apenas alguns metros de extensão), produzindo assim uma descarga de retorno subseqüente (fig.l). Todavia, o líder contínuo pode sofrer desvios, seguindo novos caminhos devido ao decaimento do canal inicial ou fortes ventos e, desta forma, a descarga de retorno ocorrerá a partir de um “líder conectante” proveniente de um ponto diferente no solo. Estes tipos de raios são conhecidos como raios bifurcados.

Os relâmpagos NS positivos seguem, de modo geral, as mesmas etapas dos NS negativos. Originam-se a partir de um líder escalonado que se inicia em uma região de cargas positivas da nuvem, não apresentando etapas e sim uma luminosidade contínua e

mais fraca do que o negativo. Eles costumam apresentar apenas uma descarga de retorno, com uma corrente de intensidade maior do que a dos negativos. Estes tipos de raios dependem fortemente da latitude geográfica, estação do ano e do cisalhamento vertical dos ventos, além do tipo e estágio do ciclo de vida da nuvem (PINTO Jr e PINTO, 2000).

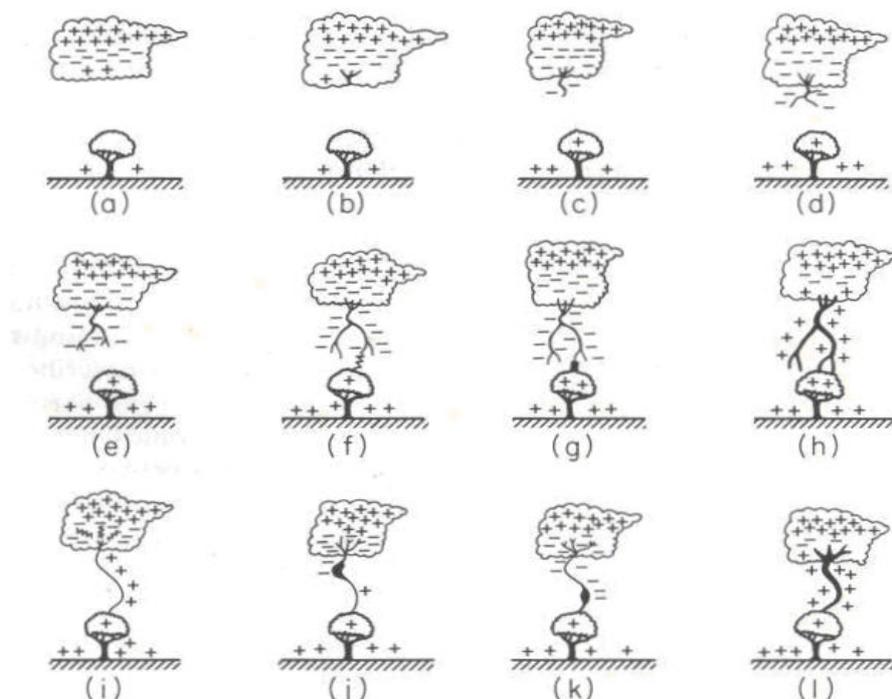


Figura 2. 9 - Diagrama esquemático para ilustrar a formação de um relâmpago. (a) – (f) ilustra a formação do líder escalonado, (g) e (h) a primeira descarga de retorno, (i) a pré formação da subsequente descarga de retorno, (j) e (k) o líder contínuo e (l) a segunda descarga de retorno.

Fonte: Wallace e Hobbs (1977).

Os relâmpagos SN (Figura 2.8 (c) e (d)) propagam-se do solo em direção a nuvem e podem ser negativos ou positivos. Se o líder escalonado propaga-se para uma região de cargas positivas dentro da nuvem, ele é chamado de positivo; se for para uma região de cargas negativas é denominado de relâmpago negativo. Os relâmpagos SN transferem mais cargas para a nuvem do que os NS negativos transportam para o solo e na maioria das vezes não apresentam descarga de retorno e sim apenas a passagem de uma corrente contínua de centenas de ampères em aproximadamente  $100 \mu s$  de duração (PINTO Jr e PINTO, 2000).

#### **2.4.1.2 Relâmpagos nas Nuvens**

Os relâmpagos que ocorrem nas nuvens em geral são mais freqüentes, particularmente os IN, representando 70% do número total de relâmpagos. Isto se deve ao fato de a capacidade isolante do ar diminuir com a altura, em função da conseqüente diminuição da densidade do ar, e porque, dentro da nuvem, os centros de cargas positivas e negativas estão mais próximos do que os centros de cargas dos demais relâmpagos (PINTO Jr e PINTO, 2000).

As descargas elétricas dos relâmpagos IN têm origem em uma região de cargas negativas com ramificações que propagam-se para cima até a região de cargas positivas, surgindo ramificações horizontais nesta região também. O líder escalonado nestes tipos de relâmpagos propaga-se a uma velocidade em torno de  $1.10^4$  m/s e possui uma corrente elétrica em torno de 100 A, com duração de 0,2 s. Estudos têm mostrado que esses relâmpagos parecem ser dominantes no início da eletrificação de uma nuvem de tempestade (WILLIAMS, 1989).

Os demais relâmpagos, EN e AR, são atualmente pouco conhecidos, porém pesquisas recentes têm mostrado que estes são bem mais freqüentes do que se imaginava e acredita-se que suas etapas sejam similar a dos IN (PINTO Jr e PINTO, 2000).

#### **2.5 Detectores de Relâmpagos**

Nas últimas décadas, diversos sistemas de detecção têm sido utilizados para identificar e mapear relâmpagos em várias regiões do planeta. Entre essas técnicas estão o uso de foguetes, balões estratosféricos, aviões, espaçonaves, sensores em solo e satélites (CHRISTIAN, 1987). Os sensores em solo e os satélites têm sido usados extensivamente nos dias de hoje. Os sensores em solo determinam com grande precisão parâmetros como: localização, polaridade, intensidade de pico de corrente e multiplicidade dos relâmpagos. Porém, a eficiência de detecção e localização dos relâmpagos por esses é em partes limitada pela quantidade de sensores empregados e

disposição dos mesmos. Por outro lado, embora a técnica de detecção de relâmpagos usando sensores a bordo de satélite possa suprir a necessidade de regiões desprovidas de sensores em solo, gera observações que representam a densidade total de relâmpagos (IN + NS). Isto porque esses sensores não são capazes atualmente de discriminar os diferentes tipos de relâmpagos. Dada a importância desses sensores, esta seção será dedicada a exibir maiores detalhes sobre a rede brasileira de detecção de raios, denominada Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT), e o sensor *Lightning Imager Sensor* (LIS) de relâmpagos a bordo do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM).

### **2.5.1 Rede RINDAT**

A Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT) é uma rede de sensores e centrais de processamento cobrindo parte das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do território brasileiro, que detecta e identifica em tempo real os relâmpagos NS. Esta rede de detecção no Brasil surgiu por uma iniciativa da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) em novembro de 1988, que estava interessada em acompanhar atividades de raios no estado de Minas Gerais. Essa empresa adquiriu quatro sensores do tipo *Lightning Positioning and Tracking System* (LPATS) que foram instalados em usinas hidroelétricas das empresas nas cidades de Ipatinga, Volta Grande, Três Marias e Lavras, cobrindo todo o centro-sul do estado de Minas Gerais. Esta rede foi expandida ao longo dos anos até que, em 2004, foi criada oficialmente a RINDAT, que constitui atualmente de um convênio técnico-científico firmado entre a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), Furnas Centrais Elétricas (FURNAS), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) (RINDAT, 2008).

Atualmente, a RINDAT é composta por 24 sensores que cobrem parte da região Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil (Figura 2.10). A grandeza física medida pelos sensores é a radiação eletromagnética (REM) emitida pelos relâmpagos NS (raios). Os sensores utilizam um algoritmo que elimina os sinais de REM provenientes de fontes

que não sejam os raios. Desta forma, cada sensor envia os dados que foram detectados como válidos (consistindo em horário do evento, intensidade do sinal, tempo de subida e pulso do sinal) para uma central de processamento. A central de processamento compara os horários informados pelos diferentes sensores para assegurar que eles são de um mesmo evento e em seguida calcula a localização ótima (latitude, longitude, data e hora) da queda do raio, podendo inferir também acerca de grandezas como: pico de corrente da descarga de retorno, polaridade da corrente, multiplicidade, entre outras (NACCARATO, 2005). Após esses processos, os dados são disponibilizados para visualização em tempo real ou armazenados para análises históricas (RINDAT, 2008).



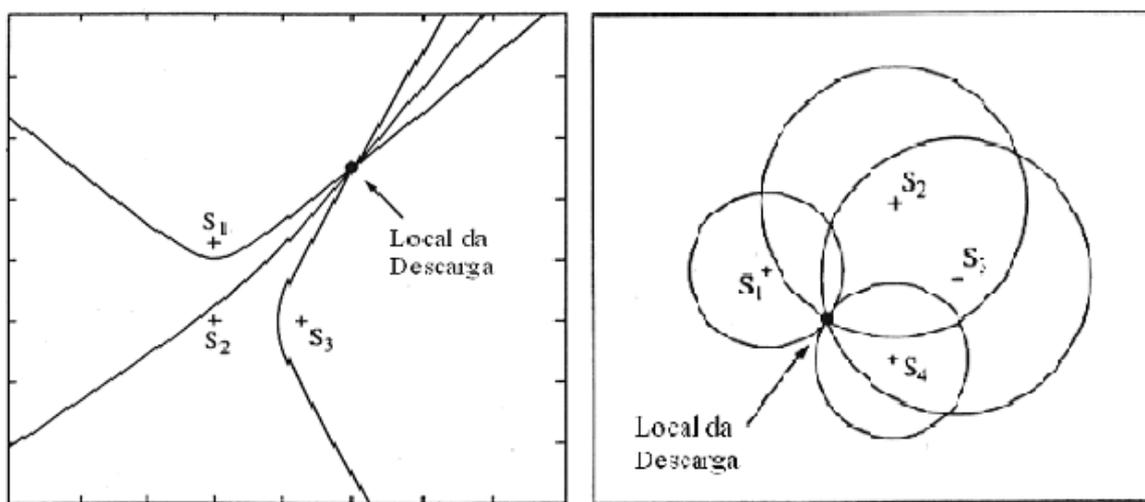
Figura 2. 10 - Localização dos 24 sensores que compõem a rede RINDAT e destaque da abrangência total da rede de cobertura de raios.

Fonte: Rindat (2009).

Sistemas de localização de tempestades (ou de relâmpagos) como a RINDAT registram a radiação produzida pelos raios na faixa de rádio em *Low Frequency* (LF) (30 – 300 kHz). A RINDAT utiliza dois tipos de sensores: os *Lightning Positioning and Tracking System* (LPATS), que utilizam apenas o método de detecção *Time of Arrival* (TOA), e os sensores *Improved Performance from Combined Technology* (IMPACT), que utilizam uma combinação do TOA e do *Magnetic Direction Finder* (MDF).

**Método de Tempo de Chegada (*Time of Arrival, TOA*):** Esse método emprega três ou mais sensores, os quais determinam o instante em que a REM criada pelo raio chega ao sensor. Através de uma diferença temporal relativa dos horários de chegada registrados pelos sensores definem-se curvas hipérbolas para cada par de sensores que detectaram o raio. Essas hipérbolas indicam as possíveis localizações dos raios satisfeitas pela diferença temporal medida. O ponto de intersecção indica a possível localização do raio, e por isso esse método é denominado **método de localização por intersecções hiperbólicas** (Figura 2.11 (a)).

Um método alternativo é o de **intersecções circulares** (Figura 2.11(b)). Neste define-se, ao redor de cada sensor, um lugar geométrico circular das possíveis localizações do raio baseado no instante absoluto de chegada da REM a cada sensor. O raio (medida geométrica) de cada círculo (distância estimada da queda do raio para cada sensor) é determinado através da diferença do instante de ocorrência do raio e o instante em que a REM chegou ao sensor. A intersecção de todos os círculos determina a localização e o horário mais provável da queda do raio.



(a)

(b)

Figura 2. 11 - (a) Método da intersecção hiperbólica usando três sensores e (b) método de intersecção circular utilizando quatro sensores.

Fonte: Naccarato (2001).

**Método de Direção do Campo Magnético (Magnetic Direction Finder, MDF):**

Emprega dois ou mais sensores que medem a direção de um raio utilizando bobinas magnéticas ortogonais entre si. A direção do raio é representada pelo ângulo azimute (ângulo em relação ao norte geográfico) medido por estes sensores. Desta forma, a intersecção das retas definidas pelo azimute de cada sensor determina o ponto onde houve o impacto (Figura 2.12 (a)). Quando três ou mais sensores detectam o raio, utiliza-se um procedimento de otimização, chamado triangulação, que tem o efeito de minimizar os erros no cálculo dos ângulos azimutais. Através da intersecção de três direções determinadas pelos sensores, estima-se a localização dos raios. Esse método não apresenta bons resultados quando o relâmpago NS ocorre em uma linha que liga os dois sensores, e se forem detectados apenas por dois sensores, erros na determinação dos ângulos azimute, pode levar a erros significativos de localização. Portanto, esse método utiliza ao menos três sensores para fins práticos.

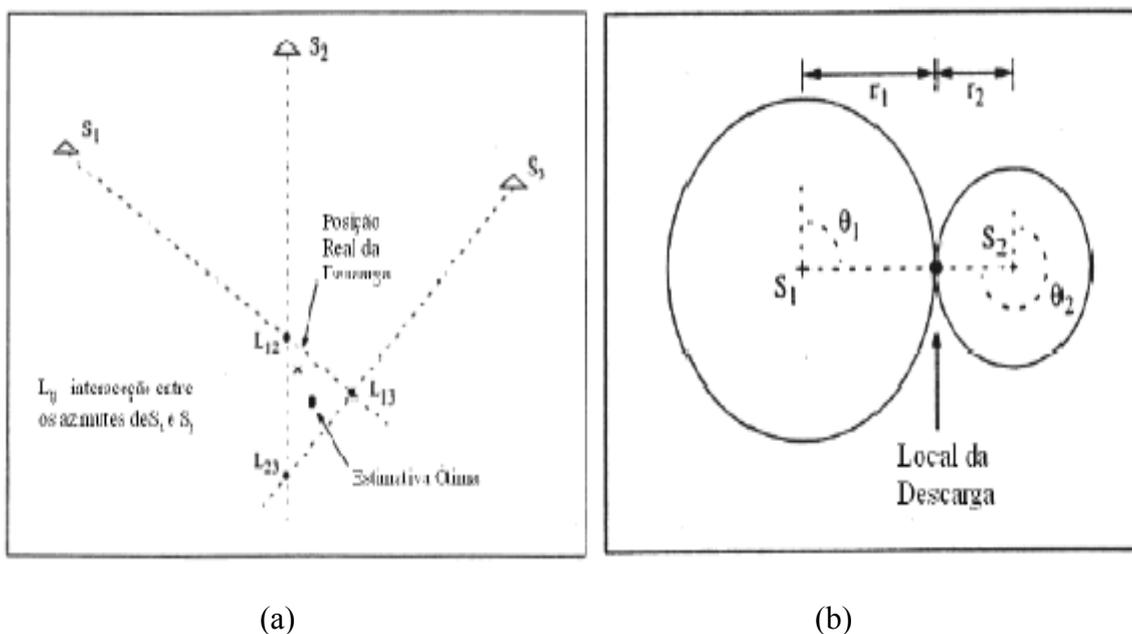


Figura 2. 12 - (a) Método MDF para a determinação da localização ótima e (b) Combinação do método TOA e MDF (método IMPACT).

Fonte: Naccarato (2001).

Os sensores que compõem o sistema IMPACT são resultantes da combinação dos métodos MDF e TOA. Enquanto que o sistema MDF fornece a informação da direção

em que o relâmpago NS ocorreu através do ângulo azimute, o sistema TOA entra com a informação da distância do ponto de impacto do relâmpago NS ao sensor. Os dados fornecidos por esses dois métodos são usados de forma simultânea em um método generalizado de intersecções circulares. Por exemplo, como ilustrado na Figura 2.12 (b) anterior, se um relâmpago ocorre na linha que liga dois sensores, a localização estimada da sua queda será dada pelo ponto de intersecção entres as linhas de direção definidas pelo azimute e os círculos centrados nos sensores.

Os ângulos  $\theta_1$  e  $\theta_2$  correspondem à informação do azimute (direção) e os raios (medida geométrica)  $r_1$  e  $r_2$  representam a distância da queda do relâmpago NS ao sensor (baseada no horário absoluto de chegada) para os sensores 1 e 2. Verifica-se então que quatro parâmetros são efetivamente estimados: os dois ângulos e os dois tempos de chegada. Portanto, este método possui informações redundantes, permitindo desta forma, a localização de relâmpagos NS mesmo quando se tenha apenas dois sensores.

O sensor do tipo IMPACT pode fornecer além de informações como local e horário da queda, fornecem também a intensidade do pico de radiação, tempo de subida, parâmetros associados à largura do pulso e razão entre a intensidade do campo elétrico e o campo magnético (E/B). Através da relação E/B, distingue-se ruídos do ambiente dos sinais dos relâmpagos. A largura do pulso é utilizada para caracterizar os parâmetros relacionados a forma de onda dos raios, diminuindo assim alguma contaminação associada a ocorrência de relâmpagos IN.

Os dois sistemas de detecção de raios discutidos acima possuem, dentro de um perímetro definido pela posição das estações de recepção, aproximadamente 500 m de precisão, referente a informações de localização dos raios. A utilização do *Global Position System* (GPS) permite a detecção de raios com uma resolução temporal de 300ns. Através das tecnologias utilizadas atualmente, a RINDAT tem uma eficiência de detecção de raios (*flashes*-do inglês, doravante será citado como apenas Eficiência de Detecção, sempre lembrando que é Eficiência de Detecção de raios e não de descarga de retorno, *strokes*-do inglês) de aproximadamente 70% a 90%, com precisão de

localização média entre 0,5 km e 5 km e uma habilidade em rejeitar relâmpagos IN de 70 % a 95 %, sendo que estes últimos valores percentuais variam regionalmente (PINTO Jr, 2005; RINDAT, 2008). A estimativa da eficiência de detecção de raios pode ser compreendida como a fração dos raios de um total ocorrido que o sistema foi capaz de detectar. A detecção depende de inúmeros fatores, por exemplo, a configuração geométrica dos sensores que participam do sistema, a sua localização com respeito ao evento e a influência do relevo entre outras variáveis.

### **2.5.2 Detectores de Relâmpagos a Bordo de Satélite**

Os primeiros estudos sobre relâmpagos utilizando imagens de satélite são reportados no início da década de 70 com os trabalhos de Vorpal et al (1970) e visavam caracterizar os relâmpagos associados a tempestades sobre o oceano e continente, utilizando um detector ótico a bordo do satélite *Orbiting Solar Observatory* (OSO-2). No entanto, a primeira geração de sensores a bordo de satélites construídos para detectar relâmpagos foi o *Operational Linescan System* (OLS) a bordo da série de satélites de órbita heliosíncrona da *Defense Meteorological Satellite Program* (DMSP). Este sensor ficou operacional entre 1973 e 1995 e basicamente era um radiômetro de escaneamento que possuía um canal no visível (0.4 - 1.1 $\mu$ m) e outro no IR (10.5 - 12.6 $\mu$ m) e detectava relâmpagos apenas no período noturno, com baixa ED (Orville e Spencer, 1979; Orville e Henderson, 1986).

Posteriormente em abril de 1995 foi lançado o satélite americano MicroLab-1, que carregava a bordo o sensor de relâmpagos denominado *Optical Transient Detector* (OTD), o qual ficou operacional até o ano de 2000. Este satélite localizava-se em uma órbita polar de 70° de inclinação, a 740 km de altura e possuindo lentes com um largo campo de visão, possibilitando assim observar a atividade de relâmpagos em uma faixa de  $\pm 70^\circ$  de latitude. A combinação dessas propriedades permitia que uma área de 1300 x 1300 Km<sup>2</sup> fosse observada durante sua órbita ao redor do globo terrestre com uma resolução entre 8 km e 13 km, ficando observando uma dada localização em um intervalo de 2 a 3 minutos. Além de possuir sistemas de lentes que funcionavam de

modo semelhante a uma câmera, esse sensor também era composto de um detector de REM e um circuito que convertia o sinal de saída do sistema detector em dados digitais (NASA, 2008).

Atualmente existe de forma operacional o sensor de relâmpagos *Lightning Imaging Sensor* (LIS) a bordo do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), cujo ODT foi o seu protótipo. Este satélite foi lançado em 28 de novembro de 1997 e surgiu de uma missão conjunta entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e a *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) com o objetivo de observar e gerar entendimento sobre a precipitação na região tropical e seus efeitos no clima global (KUMMEROW et al, 1998).

O TRMM atualmente está alocado em órbita equatorial, com aproximadamente 35° de inclinação a 402,5 km de altitude desde agosto de 2001 e caracteriza-se por uma resolução temporal correspondente a duas passagens em um período de 24 horas sobre uma determinada localidade. Possui a bordo quatro sensores: *Precipitation Radar* (PR), utilizado para fornecer a distribuição de precipitação sobre o continente e oceano; *TRMM Microwave Imager* (TMI), que estima o conteúdo de precipitação, sua real distribuição e intensidade; *Visible Infrared Scanner* (VIRS), que possui uma alta resolução sobre cobertura de nuvens, tipo e temperatura do topo; o *Clouds and Earth's Radiant Energy System* (CERES), que é um sensor que mede a radiação nos canais visível e infravermelho, emitida e refletida pela Terra atmosfera; e o *Lightning Imaging Sensor* (LIS), que é um sensor pequeno e altamente sofisticado para detectar a distribuição e a variabilidade total de relâmpagos (EN, IN, NS) (KUMMEROW et al (1998).

O sensor LIS identifica a atividade de relâmpagos, detectando mudanças momentâneas do brilho das nuvens quando elas são iluminadas pelos relâmpagos. A precisão de localização de relâmpagos é de 10 km e devido à inclinação de 35°, ele pode observar a atividade dos relâmpagos em uma faixa de  $\pm 35^\circ$  de latitude. O LIS basicamente consiste de um sensor óptico de imageamento composto de uma câmera CCD (*Charge-*

*Coupled Devise*, semelhante a de um televisor) usado para gravar as imagens a uma taxa de 500 *frames* por segundo de amostragem, lentes de largo campo de visão e um filtro passa faixa (centrado em 777,4 nm). Este filtro é usado para registrar uma das linhas mais intensas do espectro do relâmpago, de modo que o sinal seja maximizado em relação ao fundo luminoso. A luz emitida pelo relâmpago é focalizada pelas lentes e discriminada pelo filtro (passa apenas radiação de 777,4 nm) até atingir um fotodiodo da câmera CCD. Posteriormente, o sinal resultante é lido em tempo real, formatado e transmitido à receptores alocados em terra (CHRISTIAN, 1999).

O largo campo de visão das lentes combinado com os 402,5 km (sua segunda órbita nominal) de altitude do TRMM, permite que o sensor visualize as nuvens dentro de uma área de 600 x 600 km com uma resolução entre 3 e 6 km (3 km no equador e 6 km em 35°). O LIS monitora tempestades individuais e sistemas de tempestade através da atividade dos relâmpagos por quase 90 s com diferenças temporais de 2 ms em sua passagem (CHRISTIAN, 1999).

A cada variação individual de intensidade de luz, registrada pelos LIS, define-se um evento. Se diversos eventos ocorrem muito próximos um dos outros durante aproximadamente 2 ms, eles são unidos em um grupo. Portanto, cada relâmpago determinado pode ser composto de vários grupos ou centenas e até milhares de eventos individuais. Devido a sua sensibilidade, são detectados relâmpagos tanto no período noturno quanto diurno, mesmo na presença de intenso brilho e luminosidade proveniente das nuvens, apresentando uma eficiência de detecção de relâmpagos (ED) em torno de 90 % a 95 % (CHRISTIAN, 1999). No entanto estudos recentes (Boccippio et al, 2002) mostraram que esta ED de relâmpagos esta em torno de 88 %  $\pm$  9% e 54 %  $\pm$  8 % para o LIS e ODT, respectivamente. Além disso, foi observado que a mesma sofre uma variação diurna, sendo em torno de 93 %  $\pm$  4% e 73 %  $\pm$  11% e para o sensor ODT de 56 %  $\pm$  7% e 44 %  $\pm$  9% no período noturno e vespertino, respectivamente.

Logo, o sensor LIS tem-se mostrado uma importante ferramenta para o monitoramento de relâmpagos e atividade de tempestades em escala global. Em conjunto com os outros sensores do TRMM, pode ser usado para estudar a dependência da atividade de relâmpagos com os importantes parâmetros meteorológicos (chuva, liberação de calor latente convecção, etc.) que afetam o clima global. Futuros sensores de mapeamento de relâmpagos a bordo de satélites geoestacionário poderão ser subsidiados tecnicamente pelo sensor LIS.



### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A utilização de dados de  $T_B$  em canais como IR janela ( $10,2-11,2 \mu m$ ) e microondas (20-200 GHz) em associação com dados de relâmpagos tem mostrado importantes características físicas de centros convectivos associados à atividade elétrica (GOODMAN e MACGORMAN, 1986; PRIGENT e PARDO, 2001; PRIGENT et al, 2005; PETERSEN et al, 2005; MACHADO et al, 2008). A radiação na faixa do IR emitida pela superfície terrestre é absorvida pelas diversas camadas que compõem as nuvens, assim a radiação total no IR medida pelos sensores dos satélites são provenientes da emissão referente ao topo da nuvem. Desta forma, parâmetros como  $T_B$  do topo e/ou informação sobre a organização das nuvens podem ser utilizados para avaliar a atividade elétrica de uma nuvem convectiva a partir deste canal.

Diversos trabalhos têm mostrado que a atividade elétrica está localizada preponderantemente em regiões de topos mais frios em nuvens convectivas (ORVILLE et al, 1987; GOODMAN et al, 1988; DOTZEK et al, 2005). Goodman et al (1988), combinando  $T_B$  no IR do satélite *Geostationary Operational Enviromental Satellite* (GOES) com dados de relâmpagos de um SCM em 1986 entre imagens consecutivas de satélite, verificaram um aumento da taxa de relâmpagos associado a uma taxa negativa de  $T_B$  de topos frios. Assim, os autores sugeriram que a tendência dessas duas propriedades dos sistemas poderia demonstrar a localização de atividade de relâmpagos e centros convectivos principalmente na presença de nuvens *Cirrus*, que podem mascarar a história de vida dos elementos convectivos embebidos nos SCM. Esses autores também propuseram um modelo conceitual de ciclo de vida de uma típica tempestade e a associada atividade elétrica como exemplificado na Figura 3.1. Observa-se que parâmetros dinâmicos (*updraft e downdraft*) e microfísicos (quantidade de gelo) possuem uma estreita relação com a taxa de relâmpagos. Estudos anteriores como o de Goodman e Macgorman (1986) já haviam mostrado um elevado aumento de relâmpagos associado a uma rápida expansão da bigorna para  $T_B$  menores que 220 K. Usando imagens de satélite no IR com dados de relâmpagos para 10 CCM, esses autores encontraram taxa de pico de relâmpagos 1,8 horas depois da iniciação, 2,6 horas antes

da extensão máxima e 7 horas antes da fase final dos sistemas. Assim, foi argumentado que a taxa máxima de relâmpagos provavelmente não estaria associada ao tamanho da tempestade na máxima extensão e a duração de seu ciclo de vida. Porém, a maior quantidade de relâmpagos e tempo severo foi encontrada entre o estágio inicial e o maduro das tempestades. Complementarmente, Dotzek et al (2005) encontraram alta atividade elétrica abaixo de topos *overshooting* em formato V em temperaturas próxima a isoterma de 203 K.

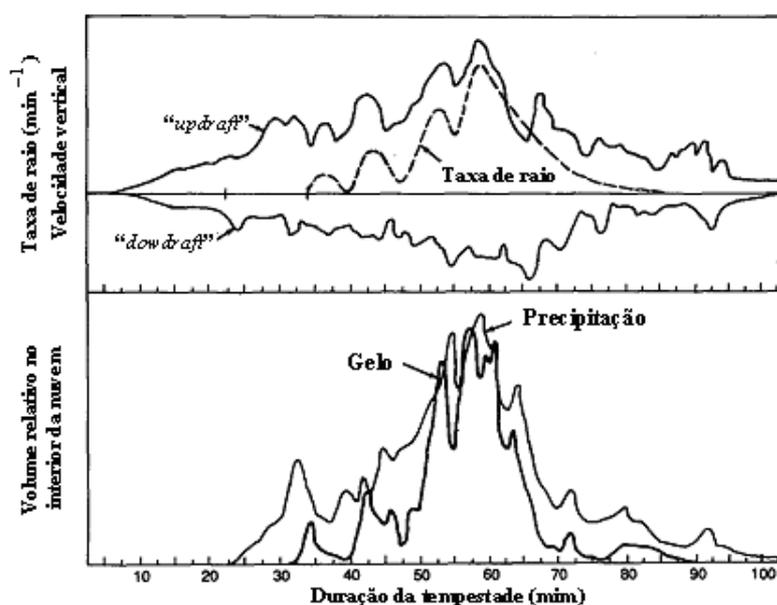


Figura 3. 1 - Modelo conceitual da evolução temporal de propriedades elétricas, dinâmicas e processos microfísicos no interior de uma tempestade.  
 Fonte: Adaptada de Goodman e Macgorman (1986).

Em uma análise usando imagem no IR do satélite GOES e de relâmpagos, Scofield e Kuligowski (2005) encontraram limiar em torno de 248 K associado à ocorrência de relâmpagos. Os autores sugeriram assim que a  $T_B$  poderia ser utilizada como parâmetro preditor da atividade elétrica. Alguns trabalhos têm encontrado uma boa correlação entre precipitação sólida ou líquida e a atividade de relâmpagos (RUTLEDGE e MACGORMAN, 1988; KANE, 1990; ROOHR e HAAR, 1994). Kane (1990), estudando tempestades severas nos EUA, verificou grandes granizos e tornados após 15 minutos de pico de intensidade de raios, com fortes rajadas de vento ocorrendo após 5

minutos da ocorrência desse pico. Nos casos de ocorrência de *merge* (fusão do SCM), foi observado um aumento significativo da taxa de raios. Grecu et al (2000) e Scofield e Kuligowski (2006) também concluíram que regiões de intensa precipitação estavam localizadas próximas à região de intensa atividade elétrica e que um aumento na área da primeira acarretou em um aumento percentual da área associada a ocorrência de relâmpagos. Através de um estudo de caso de SCM sobre o estado de São Paulo em setembro de 1991, Gin et al (2004) também encontraram, através da análise de radar e de relâmpagos, taxas de precipitação de 100 mm/h para topos de nuvem a 15 km associada à grande quantidade de relâmpagos.

Posteriormente, através de uma comparação entre grupos de SCM com raios e sem raios entre setembro e outubro de 2002 no estado de Rondônia, Morales et al (2004) analisaram 87 SCM usando imagens no IR do satélite GOES e dados de raios. Os resultados mostraram que SCM com raios apresentaram maior duração e tamanho associado a uma taxa de crescimento maior no início do desenvolvimento. A análise do ciclo de vida mostrou que SCM maiores que 10.000 *pixels* sempre apresentaram raios enquanto que os pequenos sistemas apresentaram maior frequência de ocorrência de raios por *pixels*. Os autores concluíram que estes resultados indicaram que os SCM grandes possuem grande desenvolvimento vertical, favorecendo a formação de gelo e atividade elétrica. Para o último resultado, foi sugerido que o fato de os SCM grandes possuírem em média em torno de 80 % de sua área estratiforme poderia explicar que os menores sistemas são mais eficientes (apresentaram mais raios por *pixel*) que os grandes. No entanto, ressaltaram que os sistemas maiores devido a sua maior área possuem um total de raios maior em relação aos menores.

As altas frequências (85-150GHz) no microondas passivo também têm revelado características físicas importantes de partículas de gelo e granizo como: tamanho, forma, orientação e conteúdo integrado verticalmente de gelo (*Ice Water Path, IWP*), que estão associados diretamente a atividade de relâmpagos. Essa característica apresentada por esta faixa de radiação está associada à grande sensibilidade (alto espalhamento) das partículas de gelo a radiação proveniente da superfície terrestre e da

atmosfera nas frequências de janela atmosférica (pouca absorção pelos gases atmosféricos) nos canais de 85 GHz e 150 GHz. Portanto, o espalhamento dessa radiação pelos hidrometeoros tende a diminuir a  $T_B$  estimada pelos satélites (KIDDER, 1995). Em um dos trabalhos pioneiros nesta área, Spencer et al (1989) utilizaram o canal de 85 GHz do sensor *Special Sensor Microwave Imager* (SSM/I) e imagem do IR do satélite GOES para analisar o conteúdo líquido de gelo de uma LI sobre Wisconsin em 1987. Através da diferença entre a  $T_B$  polarizada verticalmente e horizontalmente ( $PCT = 1,818T_{BV} - 0,818T_{BH}$ , *Polarization Corrected Temperature*, Temperatura Polarizada Corrigida), para discriminar a assinatura de espalhamento das partículas de gelo daquelas referente à de superfície de água e cobertura de neve, eles encontraram falta de polarização no centro convectivo da tempestade e uma relativamente mais alta polarização (valor mais alto de PCT) na região da bigorna. Foi sugerido que estas observações deviam-se a existência nos centros convectivos, de granizos de formato irregular e orientação randômica, enquanto que a alta polarização em regiões estratiformes devia-se a granizos tendo porções horizontalmente mais homogêneas e possuindo o granizo uma orientação não randômica.

Os resultados de trabalhos atuais como o de Prigent e Pardo (2001) e Prigent et al (2005) corroboram com os trabalhos anteriores. Prigent e Pardo (2001), através da análise de nuvens convectivas nos trópicos utilizando diferença de  $T_B$  polarizada verticalmente e horizontalmente ( $T_{BV} - T_{BH}$ ) e imagens de satélite no IR, encontraram baixos valores de  $T_{BV85}$  (valores menores que 190 K) correspondendo a pequenas diferenças de polarização (menores que 3 K). Estes e os resultados de Prigent et al (2005) indicaram que significativas diferenças negativas de polarização estariam associadas ao espalhamento de radiação por grandes partículas de gelo não esféricas orientadas preferencialmente de forma vertical crescidas por *riming*, além também de estarem associadas a ocorrência de relâmpagos (IN+NS) observado pelo LIS. Por outro lado, diferenças positivas indicaram o espalhamento principalmente por partículas não esféricas orientadas preponderantemente horizontalmente. Desta forma, foi sugerido que observações na faixa de microondas passivo fosse um bom indicador da estrutura interna de nuvens tropicais, particularmente com respeito às características das

partículas de gelo (tamanho, conteúdo de gelo e orientação das partículas de gelo), comportamento entre partes convectivas e estratiformes e as propriedades microfísicas envolvidas com os processos elétricos.

Mohr et al (1996), analisando nove SCM com uso de dados de raios e PCT em 85 GHz, encontraram uma relação inversamente proporcional entre a densidade de raios e os valores da PCT. A mais alta densidade de raios foi encontrada para PCT menores que 200 K. Foi concluído que o padrão e magnitude da diminuição da PCT e, por consequência, a quantidade e distribuição de raios de um SCM estaria associado à presença de grandes partículas de gelo dentro da região de fase mista do sistema. A determinação do diâmetro efetivo ( $D_e$ ) dessas partículas de gelo foi proposta por Zhao e Weng (2001). Esses autores desenvolveram um algoritmo que utiliza como dados de inicialização a  $T_B$  do topo das nuvens em 89 GHz e 150 GHz provenientes do sensor *Microwave Humidity Sounder* (MHS). Através de relações empíricas entre  $T_B$  em 23 GHz e 31 GHz em função da  $T_B$  em 89 GHz e 150 GHz, determina-se a  $T_B$  da base da nuvem nos dois canais. A combinação da  $T_B$  da base e do topo da nuvem para cada faixa de radiação possibilita a determinação de parâmetros de espalhamento para cada canal. Sendo  $D_e$  proporcional à terceira potência da razão dos parâmetros de espalhamento entre as duas frequências (Equação A.10), seu valor pode ser determinado. Assim o valor de IWP pode ser determinado, pois é diretamente proporcional a  $D_e$ , aos parâmetros de espalhamento e a densidade específica da partícula de gelo (Equação A.9). As incertezas nas estimativas de  $D_e$  dependem tanto dos erros na estimativa da  $T_B$  da base da nuvem quanto dos erros associado a densidade volumétrica das partículas de gelo, implicando em erros de estimativa de 5 % a 20 % no  $D_e$ . Por outro lado, erros na estimativa de IWP dependem de erros associados a  $T_B$  da base da nuvem, inferência do  $D_e$  e densidade volumétrica do gelo, sendo que uma incerteza de 30 % na densidade volumétrica do gelo propicia erros em torno de 25 % nos valores estimados de IWP.



## **4 DADOS**

Este tópico descreve os dados utilizados para a realização do presente trabalho. A descrição e detalhamento desses dados foram realizados em duas partes, a primeira tratando dos dados provenientes da rede brasileira de descargas atmosféricas RINDAT e a segunda descrevendo os dados provenientes de satélites.

### **4.1 Dados da RINDAT**

Foram utilizados dados de ocorrência de relâmpagos NS (referido no texto como raios) pertencente ao período de janeiro de 2005 a fevereiro de 2008. Esses dados constituem-se basicamente da data, horário e localização (latitude e longitude) dos relâmpagos ocorridos nas regiões Sudeste, Centro Oeste e parte da região Sul do Brasil, detectados pelos diversos sensores pertencentes a estas regiões. Os arquivos de raios são disponibilizados em formato texto, de forma que cada arquivo corresponde às ocorrências de raios para as regiões citadas acima em um intervalo de tempo de cinco minutos. Os dados estão disponíveis no banco de dados pertencente à DSA/CPTEC/INPE em Cachoeira Paulista, SP e foram recebidos diariamente pela rede de descargas atmosféricas RINDAT.

Devido à quantidade e a configuração da distribuição dos sensores de relâmpagos (descrito em maiores detalhes na seção 2.5.1) nas regiões que a RINDAT atua, a região centrada no estado de São Paulo apresenta a melhor e mais homogênea cobertura de relâmpagos do Brasil (região com eficiência de detecção de raios maior que 90 %). Desta forma, a região centralizada no estado de São Paulo, limitada pelas coordenadas geográficas de 53° O a 44° O e 26° S a 19° S, foi definida como sendo a área padrão para o desenvolvimento deste estudo. Dentro do estado de São Paulo, encontram-se cinco detectores de relâmpagos da RINDAT localizados nas seguintes cidades: Ibiúna (LPATS), Jupia (LPATS), Cachoeira Paulista (IMPACT), Pirassununga (IMPACT) e São José dos Campos (IMPACT), sendo os dois primeiros controlados por Furnas e os

três últimos pelo INPE (NACCARATO, 2005). A Figura 4.1 mostra a região de estudo do presente trabalho e a eficiência de detecção de raios da RINDAT para esta área.

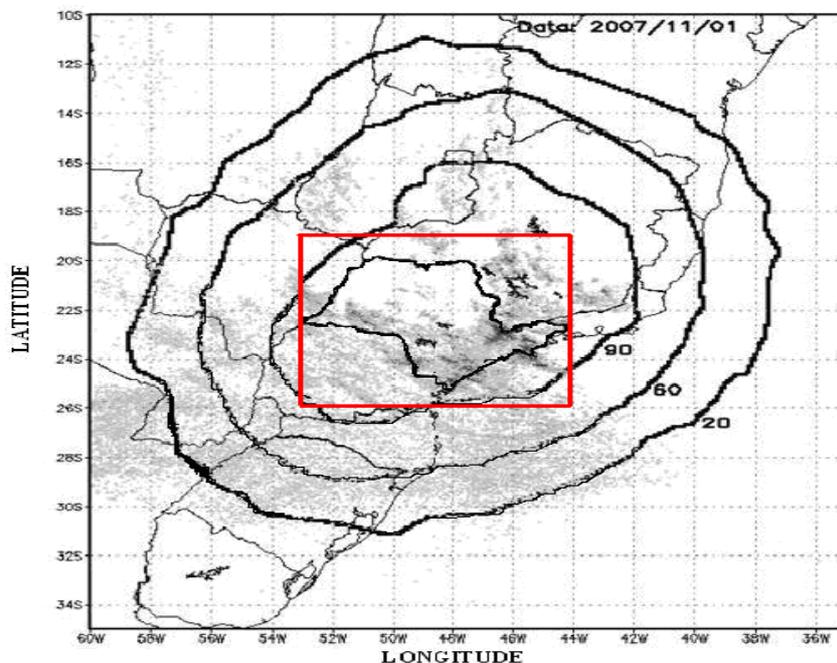


Figura 4. 1 - Região de estudo definida pelo retângulo em vermelho e a eficiência de detecção de raios da rede RINDAT demonstrando o número de relâmpagos NS.

## 4.2 Dados de Satélite

Foram utilizadas informações de quatro tipos de satélites: satélite GOES-12, GOES-10, NOAA-18 e TRMM. Abaixo são descritos os dados e o período de estudo utilizado de informações de cada satélite.

### 4.2.1 Dados do GOES-12

Os dados utilizados do satélite geoestacionário GOES-12, são referentes à  $T_B$  das imagens em projeção satélite do canal 4 do infravermelho ( $10,2 \mu m - 11,2 \mu m$ ) do imageador para o período de julho de 2005 a abril de 2007 pertencentes à área selecionada para o estudo. Esses dados foram disponibilizados pela DSA/CPTEC/INPE em Cachoeira Paulista, SP através de seu banco de dados.

O satélite GOES-12 possui em seu imageador seis canais espectrais, sendo um no visível (0,53-0,75  $\mu\text{m}$ ), quatro canais infravermelhos (3,8-4,0  $\mu\text{m}$ , 10,2-11,2  $\mu\text{m}$ , 11,5-12,5  $\mu\text{m}$  e 12,9-13,7  $\mu\text{m}$ ) e o canal no vapor d'água (6,5-7,0  $\mu\text{m}$ ). No canal visível, a resolução é de 1 km, nos canais infravermelhos, a resolução é de 4 km, contudo, no canal vapor d'água, a resolução é de 8 x 4 km<sup>2</sup> (NOAA, 2009). As imagens da América do Sul são obtidas pelo GOES-12 a cada 30 minutos e são disponibilizadas operacionalmente pela DSA/CPTEC/INPE no seu site.

#### **4.2.2 Dados do GOES-10**

Após abril de 2007 o satélite geostacionário GOES-10 também começou a realizar escaneamento sobre a América do Sul, assim a partir dessa data tais imagens começaram a serem recebidas de forma operacional pela DSA/CPTEC/INPE. Portanto, de maio de 2007 à fevereiro de 2008 foram utilizadas as  $T_B$  do canal 4 do infravermelho (10,2  $\mu\text{m}$ -11,2  $\mu\text{m}$ ) do imageador pertencente a este satélite. As características do satélite GOES-10 são similares as do GOES-12 descrita acima, porém este satélite apresenta um ganho na resolução temporal, sendo que uma imagem completa de toda a América do Sul é obtida a cada intervalo de 15 minutos com a mesma resolução espacial de 4 km. Esses dados também foram obtidos do banco de dados pertencentes à DSA/CPTEC/INPE em Cachoeira Paulista, SP.

A utilização tanto de dados de  $T_B$  do satélite GOES-12 e GOES-10 fez-se necessária para obtenção de um período significativo de dados (2 anos e 8 meses completos, que correspondem ao período de julho de 2005 à fevereiro de 2008) para a realização das estatísticas. Esses dados e os dados de raios da RINDAT foram utilizados de forma conjunta para levantar as estatísticas referentes à associação de ocorrência de raios e as propriedades físicas dos SCM.

### 4.2.3 Dados do NOAA-18

Para a determinação das propriedades microfísicas como: Diâmetro Efetivo de Partícula de Gelo ( $D_e$ ) e Conteúdo Integrado Verticalmente de Gelo (*Ice Water Path*, IWP) a partir do algoritmo descrito em Zhao e Weng (2001), fez-se o uso das  $T_B$  em microondas dos canais do sensor *Advanced Microwave Sounder Unit-A2* (AMSU-A2) e do sensor *Microwave Humidity Sounder* (MHS), ambos a bordo do satélite de órbita polar NOAA-18. A descrição das características dos dados utilizados desses dois sensores é especificada abaixo.

#### 4.2.3.1 Dados do Sensor AMSU-A2

Os dados do sensor AMSU-A2 do NOAA-18 utilizados foram as  $T_B$  dos canais de microondas de 23 GHz e 31 GHz, os quais possuem uma resolução espacial no ponto subsatélite de aproximadamente 50 km (Guia do Usuário NOAA, 2009). Estes arquivos de  $T_B$  em formato binário foram obtidos para o período de setembro de 2007 a fevereiro de 2008 a partir do banco de dados pertencente à DSA/CPTEC/INPE em Cachoeira Paulista, SP. Conforme já mencionado, os dados utilizados foram limitados aqueles *pixels* das passagens do NOAA-18 que se localizavam na área definida anteriormente, centrada na região do estado de São Paulo. Visto assim, os valores de  $T_B$  nos canais de 23 GHz e 31 GHz foram empregados para determinar a temperatura da base da nuvem nos canais de 89 GHz e 157 GHz através de uma relação de regressão inserida dentro do algoritmo de inferência de  $D_e$  e IWP.

#### 4.2.3.2 Dados do Sensor MHS

O MHS também é um sondador em microondas a bordo do satélite NOAA-18, composto por cinco canais (89, 157,  $183.3 \pm 1$ ,  $183.3 \pm 3$ , 190.3 GHz) (NOAA, 2009) na faixa de altas frequências em microondas. Para o presente estudo, foram utilizadas apenas as  $T_B$  dos canais em microondas de 89 GHz, 157 GHz e  $183.3 \pm 1$  GHz desse sensor para o mesmo período de setembro de 2007 a fevereiro de 2008. Estes dados são

um produto do processamento feito na DSA/CPTEC/INPE em Cachoeira Paulista, SP, ao qual correspondem a arquivos de saída do tipo binário contendo a latitude e longitude e as  $T_B$  dos diversos canais pertencentes a este sensor. A escolha deste período de estudo foi em razão da alta incidência de raios durante essa época (veja Apêndice A, seção A.2.3) e por representar um período com pouca falha de dados e/ou passagens referente a este satélite, propiciando uma análise estatística mais relevante sobre o  $D_e$  e IWP associado com a ocorrência de raios. Uma vez que a emissividade do oceano é diferente da continental (sendo a emissividade do oceano aproximadamente de 0.4-0.5 e do continente em torno de 0.9) e sendo que o interesse desta pesquisa é a análise de raios, SCM e suas implicações sobre o continente realizou-se uma limitação sobre a área de estudo predefinida, levando em consideração apenas a região continental contida nesta área.

Consideradas estas limitações, foram utilizadas  $T_B$  do sensor MHS correspondentes a 425 passagens sobre a região de estudo. A resolução temporal do satélite NOAA-18 para o período de estudo corresponderam em média a quatro passagens (cenas) em um período de 24 horas. Por outro lado, devido a este satélite estar localizado a uma altitude de aproximadamente 870 km em uma órbita polar (com inclinação em torno de  $98,7^\circ$ ) e possuir geometria de escaneamento de varredura do tipo transversal (*across-track*), há uma deformação dos *pixels* nas direções latitudinal (*along-track*) e longitudinal (*cross-track*), tendo o *pixel* no ponto subsatélite (nadir) aproximadamente 20 km e 16 km (associado aos cinco canais do MHS) na direção *cross-track* e *along-track*, respectivamente (BERNNARTZ, 1999). Em cada cena completa são escaneadas 3.000 linhas com cada linha contendo 90 *pixels*.

#### **4.2.4 Dados do TRMM**

Os dados do sensor *TRMM Microwave Imager* (TMI), a bordo do satélite TRMM utilizados foram as  $T_B$  com polarização vertical e horizontal e a PCT em microondas do canal de 85.5 GHz. Para ser consistente e complementar com as análises de microfísica de nuvens de  $D_e$  e IWP (descritas acima), apenas trabalhou-se com os *pixels* localizados

sobre a região continental da área em estudo, correspondendo ao mesmo período de estudo de setembro de 2007 a fevereiro de 2008. Esses dados foram obtidos diretamente do site da NOAA no formato *Hierarchical Data Format* (HDF), os quais correspondem aos dados de  $T_B$  de cada canal do TMI e a respectiva latitude e longitude.

Aplicadas as condições descritas acima, foram utilizadas 647 passagens, das quais ao menos um *pixel* de cada passagem estava sobre a área definida para o estudo. A cada uma dessas passagens o sensor TMI que é um radiômetro em microondas passivo, registra a radiação eletromagnética polarizada emitida e/ou refletida pelo sistema Terra-atmosfera em cinco faixas de frequências em microondas centradas em: 10,7; 19,4; 21,3; 37,0 e 85,5 GHz (apenas o canal de 21,3 GHz tem somente polarização vertical), fazendo uma varredura cônica com ângulo de incidência na superfície terrestre de  $52,8^\circ$  (KUMMEROW et al, 1998). Este tipo de geometria de escaneamento combinado ao movimento de rotação de sua antena parabólica (31,6 rotações por minuto) permite que um círculo seja desenhado sobre a superfície da Terra, sendo que apenas 130 graus desse círculo é utilizado para aquisição de dados. Desta forma, a varredura ocorre em semi-círculo, tendo cada *pixel* do TMI a mesma forma elíptica e tamanho ao longo de sua varredura com uma resolução espacial aproximadamente de 7 km (*along-track*) por 5 km (*cross-track*) no canal de 85,5 GHz. A Figura 4.2 ilustra a geometria de escaneamento do sensor TMI.

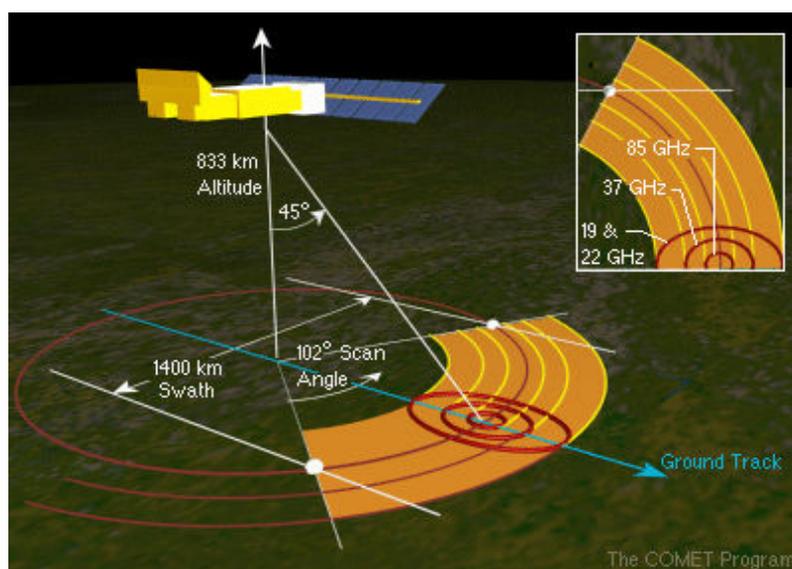


Figura 4. 2 - Geometria de escaneamento do sensor TMI a bordo do satélite TRMM. Fonte: Program Comet (2009).

## 5 METODOLOGIA

A metodologia adotada para a execução deste trabalho foi realizada em três etapas. A primeira etapa foi dedicada à avaliação da qualidade dos dados de raios provenientes da RINDAT para o período de estudo e também a caracterização do comportamento espacial e temporal dos raios ocorridos na região de estudo para o período de 2005 a 2007. A segunda etapa foi realizada com o objetivo de estabelecer relações estatísticas entre as propriedades físicas de SCM e a ocorrência de raios para a possível determinação de parâmetros previsores da atividade elétrica, além de caracterizar a evolução de ocorrência de raios ao longo do ciclo de vida desses sistemas. A terceira e última etapa teve como foco uma análise utilizando-se dados em microondas passivo para avaliar as relações entre propriedades microfísicas de SCM, como  $D_e$  e IWP com as ocorrências de raios. Nesta etapa também foi identificada a relação entre a diferença de  $T_B$  polarizada do canal de 85 GHz e a associada ocorrência de raios. Essas três etapas são descritas em maiores detalhes nas seções seguintes.

### 5.1 Avaliação das Características Gerais dos Raios Ocorridos Durante o Período de Estudo

Esta etapa foi realizada no intuito de avaliar e verificar a qualidade dos dados de raios obtidos pela RINDAT para o período compreendido entre 2005 a 2007, através de análises de mapas de eficiência de detecção de raios (*flash*) para a região de estudo. Para assegurar e garantir a qualidade e verificar o comportamento desses dados, também foi realizada uma caracterização da distribuição espacial e temporal de raios para esta mesma área (resultados são apresentados no Apêndice A).

Assim, o período específico de três anos completos (2005-2007) para essa análise foi escolhido por ser o mesmo período das análises que serão realizadas sobre a associação de propriedade físicas e o ciclo de vida de SCM com as ocorrências de raios (análises que são o foco principal deste trabalho). Visto assim, alguma falha dos dados de ocorrência de raios neste período relativamente curto poderia comprometer de forma

significativa as análises estatísticas a serem realizadas nas etapas seguintes. Para tanto, duas variáveis de suma importância ao se avaliar a qualidade dos dados de raios são a Precisão de Localização (PL) e a Eficiência de Detecção (ED) de raios.

A PL de raios está associada à incerteza na localização da ocorrência de raios em latitude e longitude sobre a superfície terrestre. Durante o período de estudo com base na configuração e geometria dos sensores, a RINDAT foi capaz de localizar um raio com uma PL de aproximadamente de 500 m (PINTO Jr, 2005). Contudo, talvez a mais significativa limitação da qualidade dos dados de raios, esteja associada à variável ED de raios, ou seja, a razão entre o número de eventos de raios detectados e o número real de eventos que ocorreram. Sendo assim, a não obtenção e/ou perda de informação de ocorrência de raios podem acarretar quedas nos valores de ED de raios, a qual sofre influência direta de fatores como: falhas nos sensores, problemas nos canais de comunicação, geometria desfavorável da rede de sensores, falhas na central de processamento e diversos outros fatores (NACCARATO, 2005).

Desta forma, devido à importância e às implicações que os valores de ED de raios podem acarretar para um estudo que utiliza dados de raios, foram gerados mapas de ED de raios, cedidos gentilmente pelo Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do INPE, para a região de estudo. A resolução espacial desses mapas foi de 10 km x 10 km, a qual apesar de menor que a resolução dos satélites GOES (4 km x 4 km), ainda apresenta-se bastante significativa para os objetivos do presente trabalho. Essas curvas de eficiência de detecção foram geradas levando em consideração o tipo e a quantidade de sensores que estavam em funcionamento nos meses de cada ano.

Depois de realizada esta breve avaliação da qualidade dos dados de raios (o qual se mostrou satisfatória para os objetivos principais desta pesquisa) para o período de estudo, realizou-se uma caracterização da distribuição espacial e temporal dos raios ocorridos na área de estudo entre os anos de 2005 a 2007. As análises da distribuição espacial de raios foram feitas usando uma grade regular de 4 km x 4 km (coerente com a resolução espacial do GOES) de modo a contabilizar a ocorrências de raios para cada

grade para cada ano em estudo. Analogamente à metodologia adotada por Naccarato (2005), foram caracterizados a distribuição média de raios (densidade média de raios, raios/km<sup>2</sup>.ano), a variabilidade interanual de ocorrência de raios e o ciclo sazonal de ocorrência de atividade de raios. Estas análises mostraram-se significativas, pois permitiram avaliar os efeitos das mega cidades (poluição, aerossóis e ilhas de calor), orografia e fatores meteorológicos sobre a ocorrência desses fenômenos elétricos atmosféricos. As análises temporais de ocorrência de raios foram realizadas através da caracterização do ciclo diurno e do ciclo sazonal diurno de ocorrência de raios. As ocorrências de raios no ciclo diurno correspondem à soma total de raios para cada horário considerando os três anos em estudo e o ciclo sazonal diurno à soma total horária de ocorrência de raios para cada estação do ano.

## **5.2 Análises das Características dos SCM Associadas à Ocorrência de Raios**

Nesta parte do trabalho, foi analisada e caracterizada a relação existente entre algumas propriedades físicas de SCM como: Raio Efetivo ( $R_e$ ), Taxa de Expansão Normalizada, Temperatura Média de Brilho ( $T_{med}$ ), Taxa de Variação da Temperatura Média Brilho ( $TVT_{med}$ ), Temperatura Mínima de Brilho ( $T_{min}$ ), Taxa de Variação da Temperatura Mínima Brilho ( $TVT_{min}$ ), Temperatura Mínima Média de Brilho do *Kernel* de 9 *Pixels* ( $T_{min9}$ ), Taxa de Variação da Temperatura Mínima Média de Brilho do *Kernel* de 9 *Pixels* ( $TVT_{min9}$ ), Excentricidade ( $Ecc$ ) e Fração Convectiva ( $FC$ ) e a atividade elétrica desses intensos aglomerados de nuvens convectivas (maiores detalhes da definição dessas propriedades físicas encontra-se na seção 2.1.2). Realizou-se também uma caracterização da relação existente entre a atividade elétrica e o estágio de desenvolvimento temporal dos SCM. Estas análises foram extremamente significativas, visto que seus resultados permitiram um melhor entendimento da dinâmica dos SCM, processos físicos e os possíveis parâmetros previsores da atividade elétrica da convecção.

A caracterização dessas propriedades físicas e análise de ciclo de vida foram realizadas, através do levantamento dos SCM ocorridos entre julho de 2005 e fevereiro de 2008

dentro da área de estudo. Utilizou-se para isso um banco de dados constituído basicamente das propriedades físicas dos SCM durante seu ciclo de vida e a respectiva quantidade de raios para cada imagem no IR do satélite GOES. Este banco de dados foi processado operacionalmente pela DSA/CPTEC/INPE utilizando o modelo FORTRACC (método discutido na seção 2.1.2) e dados de raios da RINDAT. Durante este processamento, o modelo utilizou o limiar de 235 K e 210 K do satélite GOES para definir um SCM e célula convectiva em seu interior, respectivamente. Assim, um SCM foi definido como uma área de nuvem com no mínimo 90 *pixels* (aproximadamente 1.440 Km<sup>2</sup>) e, posteriormente, o algoritmo produziu uma série temporal das principais características morfológicas e radiativas como: localização, tamanho, taxa de expansão normalizada, temperatura média e mínima, fração convectiva, excentricidade, ângulo de inclinação, e outros parâmetros dos SCM (MACEDO et al, 2001; VILA et al, 2008). O acoplamento das informações de raios com essas propriedades físicas foram realizadas de forma a contabilizar o número de ocorrências de raios reportados pela RINDAT 7,5 minutos antes e 7,5 depois da passagem do satélite GOES para cada SCM da imagem.

Realizado o processamento desse banco de dados, o levantamento das estatísticas foi gerado primeiramente levando-se em consideração apenas os SCM ocorridos entre julho de 2005 e fevereiro de 2008 que nasceram dentro da região de estudo. Assim, estes SCM possuíam seu centro de massa dentro da região e período em análise no momento em que foram detectados pela primeira vez pelo modelo de rastreamento de SCM FORTRACC. Com esta consideração, foi reportada a ocorrência de 8.158 SCM dentro da área e período de estudo. A partir desse conjunto de dados, levantou-se uma breve análise do ciclo sazonal, ciclo diurno de nascimentos espontâneos de SCM (aqueles SCM que são identificados em uma imagem, mas não estão presentes na anterior) e ciclo diurno da fração convectiva e da taxa de expansão normalizada.

Posteriormente, seguindo uma metodologia similar a adotada por Morales et al (2004), as propriedades físicas de todos os membros dos SCM foram separadas em dois grupos: eventos com raios e sem raios. Portanto, para cada grupo realizou-se análises estatísticas através do levantamento de histogramas de frequência relativa e curvas ajustadas para as

distribuições dessas variáveis. Este passo foi importante, pois visou diferenciar a dinâmica assim como avaliar e quantificar as propriedades físicas que conduziram a ocorrência ou não de atividade elétrica em SCM. Para o grupo de eventos que apresentou raios, histogramas de frequência acumulada de raios foram calculados, e, através de diagramas de dispersão, foi obtida a relação existente entre cada propriedade física e a atividade elétrica de raios.

Para a elaboração dos histogramas para cada propriedade física, os dados dos eventos com e sem raios foram separados em classes, as quais foram determinadas inicialmente com base na Equação proposta por Assis et al (1996):

$$1 + 3,3 \text{Log}_{10}(n) \quad (5.1)$$

Em que,

$n$  é o número total de observações.

Se o número de classes e o intervalo de classes não representassem bem a distribuição dos dados, esses valores seriam determinados por tentativas até que fosse encontrado um valor representativo segundo o teste de aderência. O teste de aderência das distribuições ajustadas para cada uma das variáveis em análise foi realizado através do teste de ajustamento de Kolmogov-Smirnov.

Na última parte dessa etapa, foram realizadas análises para caracterizar a evolução da ocorrência de raios ao longo do ciclo de vida dos SCM. Para tanto, foram selecionados apenas os SCM que iniciaram-se espontaneamente (isto é, que não nasceram como resultado de uma divisão de SCM), finalizaram por dissipação (isto é, não finalizaram por unir-se com outros sistemas), tiveram duração entre 2 e 10 horas e tiveram menos da metade de seu ciclo de vida composto de falta de imagens (imagens virtuais). A primeira limitação foi importante, pois assegurou que o crescimento inicial do sistema foi devido à dinâmica interna e o seu tempo de vida foi representativo do completo ciclo de vida (MACHADO e LAURENT, 2004). Por outro lado, a segunda limitação foi devido a pouca ocorrência de SCM com durações maiores que 10 horas, além de evitar

sistemas com múltiplas fases. Desta forma, analisaram-se propriedades como: duração, variação do tamanho do SCM ao longo do ciclo de vida para sistemas com e sem a presença de raios ao longo de seu ciclo de vida. Além disso, foi realizada a caracterização da fase do ciclo de vida dos SCM com maior atividade elétrica de raios e de densidade de raios.

### **5.3 Análises de Parâmetros Previsores da Atividade Elétrica Usando Microondas**

#### **5.3.1 A Utilização do $D_e$ e IWP**

Esta etapa teve o objetivo de caracterizar, através de análises estatísticas, a possível relação existente entre as propriedades microfísicas de nuvens convectivas como:  $D_e$  e IWP com as ocorrências de raios usando canais de microondas. Este estudo foi importante, pois diversos trabalhos na literatura têm mostrado que há um indicativo de uma estreita relação entre o tamanho das partículas de gelo e o conteúdo integrado verticalmente de gelo com a formação e intensificação da atividade elétrica dentro dessas intensas nuvens geradoras de raios.

Primeiramente utilizou-se o algoritmo de inferência de  $D_e$  e IWP desenvolvido por Zhao e Weng (2001) (descrito em detalhes na seção 3) para que fossem determinadas essas propriedades microfísicas. Portanto, foram realizadas simulações com este modelo, que utilizou como dados de inicialização as  $T_B$  em 23 GHz e 31 GHz do sensor AMSU-A2 e as  $T_B$  dos canais de 89 GHz, 157 GHz e  $183.3 \pm 1$  GHz do sensor MHS. As simulações foram realizadas para o período de setembro de 2007 a fevereiro de 2008 para a região de estudo apenas sobre o continente (foram eliminados *pixels* escaneados pertencentes à parte oceânica). Como explicado anteriormente, este período de estudo foi estrategicamente escolhido por possuir significativa ocorrência de raios (primavera de 2007 a verão de 2008), como relatado em diversos trabalhos (NACCARATO, 2005 e como encontrado nos resultados apresentados na seção A.2.3) e por ser o período com menor falta e/ou falhas de dados desses canais em microondas.

Como o satélite NOAA-18 possui uma órbita polar e geometria de escaneamento transversal (*across-track*), apenas foram considerados os valores de  $D_e$  e IWP relacionados a *pixels* escaneados com ângulo de visada (Ângulo Zenital Local (ou do Satélite)-do inglês *Local Zenith Angle*) entre  $\pm 25^\circ$ . Este limiar foi utilizado com base no trabalho de Bernnartz (1999), em que o autor determinou a variação do tamanho do *pixel* do sensor AMSUB (o qual é semelhante ao MHS) na direção latitudinal e longitudinal ao longo de linhas escaneadas por este sensor, verificando que ângulos maiores que este apresenta relevante deformação dos *pixels* nas duas direções com relação ao seu tamanho no ponto subsatélite (nadir). Stubenrauch et al (2004) utilizaram um valor limitante igual a este para analisar o  $D_e$  e IWP em regiões de médias latitudes e no trópicos. Esta limitação foi importante, pois para *pixels* próximos à borda da imagem, devido à significativa deformação, podem ocorrer erros nas estimativas de  $D_e$  e IWP.

O acoplamento desses dados de  $D_e$  e IWP com os dados de raios fornecidos pela RINDAT foi realizado de forma a contabilizar o número de raios para cada *pixel* do sensor MHS ocorridos 7,5 minutos antes e 7,5 depois do horário da linha escaneada (este intervalo de 15 minutos está em concordância ao utilizado para o estudo de propriedades físicas). A utilização do horário específico do início da varredura da linha, e não do horário da imagem do satélite, justificou-se para que esses dois tipos de dados pudessem ser combinados precisamente. Assim, para cada *pixel* foi pesquisada a ocorrência de raios entre esse intervalo de tempo sobre uma região do tamanho do *pixel* centralizada na posição desse *pixel*. Sabendo que a forma do *pixel* do sensor MHS é aproximadamente uma elipse e que mesmo dentro da limitação ( $\pm 25^\circ$  de ângulo de visada) utilizada há uma pequena variação do tamanho ao longo da linha escaneada, usou-se a expressão matemática descrita em Bernnartz (1999) para determinar o seu tamanho para cada ponto das linhas varridas. Portanto, a determinação do tamanho dos *pixels* nas direções *cross-track* e *along-track* foi realizada usando as seguintes expressões:

$$a = 79.08 + 2.84n - 14.78n^{0.666} \quad (5.2)$$

$$b = 28.72 - 0.90n + 0.094n^{1.5} \quad (5.3)$$

Em que,

$a$  é o tamanho do *pixel* na direção *cross-track* em quilômetros;

$b$  é o tamanho do *pixel* na direção *along-track* em quilômetros;

$n$  é a posição do *pixel* sobre a linha escaneada e possui valores entre 1 e 45.

A seguir, foram realizadas análises estatísticas para os parâmetros  $D_e$  e IWP através da mesma metodologia descrita na seção 5.2, isto é, levantamento de histogramas de frequência relativa para eventos com e sem a ocorrência de raios, histograma de frequência acumulada de raios e análises de probabilidade de raios. Com a análise de probabilidade de raios utilizando o  $D_e$  e IWP buscou-se analisar a relação direta entre cada um desses parâmetros com a ocorrência de raios, além de quantificar esta relação estatisticamente. Seguindo a metodologia proposta por Machado et al (2008), o cálculo da probabilidade considerou o número de ocorrência de raios para cada intervalo de classe e contabilizou a quantidade de vezes que ao menos  $j$  ( $ER_i^j$  - ocorrência de raios no intervalo  $i$ ) raios ocorreram e a quantidade de vezes que nenhum raio foi reportado ( $NER_i$  - não ocorrência de raios no intervalo  $i$ ). Portanto, a probabilidade de ocorrer ao menos  $j$  raios,  $P_i(\geq j)$ , para cada intervalo  $i$  de  $D_e$  ou IWP foi calculada da seguinte forma:

$$P_i(\geq j) = \frac{ER_i^j}{ER_i^j + NER_i} \quad (5.4)$$

### 5.3.2 Análise da Relação Entre Polarização do Gelo e a Ocorrência de Raios

Essa última etapa foi realizada para avaliar e quantificar a relação existente entre a diferença de  $T_B$  polarizada do canal de 85.5 GHz ( $T_{BV} - T_{BH}$ ) e a atividade elétrica. As análises de assinaturas de espalhamento polarizadas em 85.5 GHz foram de grande importância visto a sensibilidade das partículas de gelo em espalhar radiação nesta frequência. Desta forma, como os trabalhos de Prigent e Pardo (2001) e Prigent et al

(2005) mostraram, essa diferença de  $T_B$  polarizada pode dar um indicativo da região e tipo de orientação (convectiva ou estratiforme) das partículas de gelo associadas à atividade elétrica.

Assim, foram utilizadas as  $T_B$  polarizada verticalmente e horizontalmente do canal de 85.5 GHz do sensor TMI, referentes a 647 passagens durante o período e região de estudo. Para eliminar o sinal proveniente da superfície terrestre, rios, lagos e demais alvos espalhadores que não fossem partículas de gelo (visto que o foco é sobre aglomerados de nuvens com significativa quantidade de partículas de gelo), utilizou-se um limiar de PCT de 250 K. Este limiar foi escolhido em concordância com diversos autores (SPENCER et al, 1989; MOHR et al, 1996; MOHR e ZÍPER, 1996; CECIL et al, 2002; Biscaro, 2006). Spencer et al (1989) usaram um valor de PCT de 255 K como limiar para definir aglomerados de nuvens convectivas com intensa precipitação e diferenciá-los de outras superfícies e Mohr et al (1996) encontraram SCM com alta incidência de raios para PCT em 85 GHz do SSM/I menores que 250 K. Por outro lado, Cecil et al (2002), analisando 45 tempestades através dos sensores TMI, PR e LIS do satélite TRMM, encontraram alta atividade elétrica associada a valores menores que 250 K, enquanto Biscaro (2006), caracterizando sistemas precipitantes na bacia amazônica em 1999 através do TMI e PR, encontrou ocorrência desses sistemas para PCT em torno de 260 K. Foram também realizados testes com PCT maiores que 250 K, porém as estatísticas mostraram-se inferiores e desta forma foi utilizado o limiar de 250 K, como proposto pelos diversos autores.

Realizadas as limitações descritas acima, calculou-se a diferença entre  $T_{BV}-T_{BH}$  para cada *pixel* do sensor TMI pertencente ao período de setembro de 2007 a fevereiro de 2008. Para cada *pixel* foi contabilizado o número de ocorrências de raios reportado pela RINDAT 7,5 minutos antes e 7,5 depois do horário de cada linha escaneada, em uma região elíptica de 7 km x 5 km centrada na posição do *pixel*. O período de estudo escolhido e o intervalo de 15 minutos para procura de ocorrência de raios centrado no horário da linha escaneada foram selecionados para estar em acordo com as análises de  $D_e$  e IWP, já que essas análises se complementam. A caracterização estatística, que foi

realizada em seguida para avaliar a relação entre a  $T_{BV}-T_{BH}$  e a ocorrência de raios, foi similar a realizada para as propriedades  $D_e$  e IWP, isto é, levantamento de histogramas de frequência relativa para eventos com e sem a ocorrência de raios, histograma de frequência acumulada de raios e análises de probabilidade de ocorrência de raios.

## **6 ANÁLISES DAS RELAÇÕES EXISTENTES ENTRE PROPRIEDADES FÍSICAS DE SCM E ATIVIDADE ELÉTRICA DE RAIOS**

O presente capítulo tem como foco principal avaliar as relações estatísticas e físicas existentes entre alguns parâmetros morfológicos e radiativos de SCM e a atividade elétrica de raios, caracterizar fisicamente SCM que apresentaram e que não reportaram a atividade elétrica de raios ao longo do seu ciclo de vida, além de analisar a evolução temporal da atividade elétrica ao longo do ciclo de vida dos SCM. Para a realização dessas análises, foram utilizadas informações das propriedades físicas de SCM determinadas pelo modelo FORTRACC e dados de ocorrência de raios reportados pela RINDAT para o período de 2005 a 2008 para a região em estudo. O presente capítulo foi estruturado em três etapas. Primeiro serão apresentadas as avaliações das características gerais dos SCM ocorridos durante o período de estudo, seguida pela caracterização das propriedades físicas de SCM e a atividade elétrica de raios e por fim pelas análises da evolução da atividade elétrica dos raios durante o ciclo de vida dos SCM.

### **6.1 Características Gerais dos SCM Ocorridos no Período de Estudo**

Nesta seção foi realizada uma avaliação e caracterização preliminar dos SCM rastreados pelo modelo FORTRACC para a região de estudo durante o período de julho de 2005 a fevereiro de 2008. Estas análises foram baseadas na caracterização da distribuição mensal de ocorrência dos SCM, comportamento do ciclo diurno de nascimentos espontâneos de SCM, ciclo diurno da fração convectiva (FC) e taxa de expansão normalizada ( $A_e$ ), além da variabilidade diurna dos raios associados aos SCM identificados.

As informações do modelo utilizadas para o desenvolvimento dessa etapa foram referentes ao período de julho de 2005 a fevereiro de 2008, pois corresponde ao período que esses dados começaram a ser gerados de forma operacional pela

DSA/CPTEC/INPE. Desta forma, aplicando a metodologia descrita na seção 5.2, foram rastreados aproximadamente 8.158 SCM. Ressalta-se que a detecção das organizações de nuvens convectivas foi baseada nos critérios de limiar de 235 K da  $T_B$  no IR e um tamanho mínimo de 90 *pixels* para sua identificação. A contingência de SCM detectados foi realizada de forma a contabilizar a ocorrência de SCM que nasceram dentro da região em estudo, isto é, sistemas cujo centro de massa pertencia à área em estudo quando detectados pela primeira vez pelo modelo.

A Figura 6.1 mostra o histograma de freqüência da distribuição mensal dos 8.158 SCM identificados. A atividade convectiva apresentou um ciclo sazonal bastante organizado e definido, havendo ocorrência de SCM em qualquer período do ano. A atividade convectiva em geral apresentou-se mais intensa nos meses de janeiro e fevereiro, mais precisamente em 2007, no qual ocorreram mais de 600 SCM. Por outro lado, os meses de julho e agosto apresentaram as menores ocorrências, com uma quantidade de ocorrências inferior a 30 SCM.

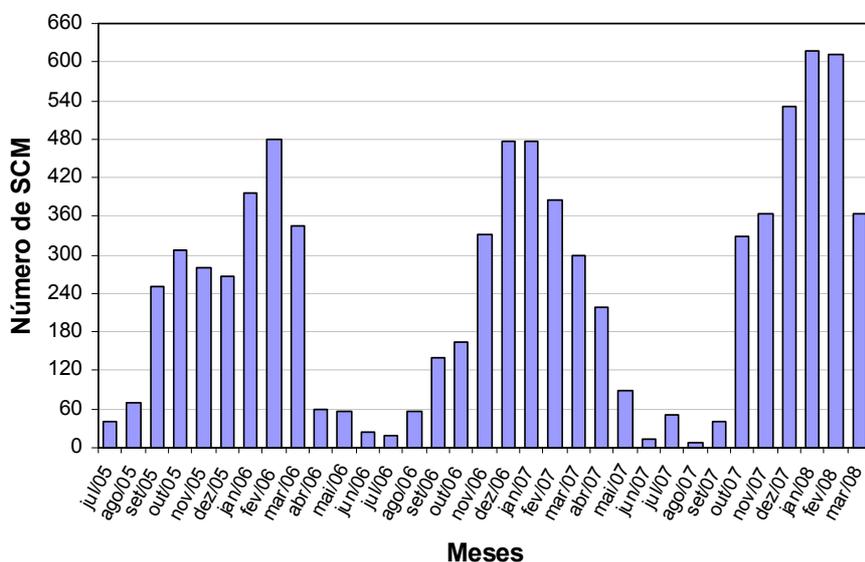


Figura 6.1 - Distribuição temporal mensal de ocorrências dos SCM detectados pelo FORTRACC entre julho de 2005 a fevereiro de 2008 para a área em estudo.

A Tabela 6.1 mostra as ocorrências dos SCM para cada ano e estação. A sigla S/D (Sem Dados) expressa meses e/ou estação que apresentaram ausência de dados. Analisando a

sazonalidade da atividade convectiva, através da distribuição de frequência da Figura 6.1 e da Tabela 6.1, observa-se que o verão foi a estação que apresentou em média a maior ocorrência de SCM (representando quase 50 % do total de ocorrências) enquanto que o inverno foi a estação com menor ocorrência de atividade convectiva (representando entorno de 3 % do total de ocorrências). O período de primavera-verão representou aproximadamente 75 % da atividade convectiva enquanto que o período outono-primavera apenas 25 % da atividade convectiva. Esses resultados foram bastante semelhantes aos encontrados em diversas regiões, como os realizados nos EUA (MADDOX, 1980), América do Sul (VELASCO e FRITSCH, 1987), Austrália, China e região do Pacífico Oeste (MILLER e FRITSCH, 1991) e África (LAING e FRITSCH, 1993). Os resultados desses autores e os observados neste trabalho indicam que a característica da sazonalidade dos SCM parece apresentar um comportamento global. O favorecimento de atividade convectiva mais intensa (menos intensa) aproximadamente durante o verão (inverno) deveu-se principalmente a variabilidade sazonal da insolação.

Tabela 6.1 - Estatística de ocorrência sazonal de SCM durante o período de estudo.

	<b>DJF</b>	<b>%</b>	<b>MAM</b>	<b>%</b>	<b>JJA</b>	<b>%</b>	<b>SON</b>	<b>%</b>	<b>TOTAL</b>
<b>2005</b>	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	836	S/D	836
<b>2006</b>	1142	49.93	459	19.26	99	4.15	634	26.61	2407
<b>2007</b>	1342	48.66	607	22.01	75	2.72	734	26.26	2831
<b>2008</b>	1759	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	1759
<b>Média</b>	1414	<b>49</b>	533	<b>21</b>	87	<b>3</b>	735	<b>26</b>	1958

A comparação entre a ocorrência anual de SCM (Tabela 6.1) e a contingência de raios reportados pela RINDAT (Apêndice A, Figura A.7) não mostraram uma forte correlação. Apesar do ano de 2007 ter apresentado um número maior de SCM (2.831 contra 2.407 em 2006), houve um número menor de raios (1.700.928 contra 2.069.435 raios em 2006, dados numéricos não mostrados), o que pode ser resultado de SCM menos severos que os de 2006. Se considerarmos que os raios são exclusivamente provenientes dos SCM, teríamos em 2006 uma média em torno de 860 raios por SCM contra 601 em 2007. Contudo, muitos raios são também provenientes de tempestades localizadas de menor escala espacial (não detectáveis pela limitação imposta pelo FORTRACC), portanto, não se pode concluir se os SCM em 2006 foram mais ativos ou

se neste ano houve uma maior ocorrência de tempestades isoladas. Além disso, ressalta-se que a limitação de considerar apenas SCM nascidos no estado de SP, elimina aqueles que nascerem fora desta área e depois a adentraram e que também poderiam ter ocasionado raios. No entanto, o comportamento sazonal apresentado pelos SCM analisados, está em apreciável coerência com o comportamento sazonal da atividade elétrica de raios apresentado no Apêndice A, na seção A.2.3. A variabilidade do comportamento sazonal da atividade elétrica de raios mostrou que 42% e 32% da atividade elétrica de raios ocorrem respectivamente no verão e primavera, enquanto que 49 % e 26 % dos SCM analisados ocorreram no verão e primavera, respectivamente. Portanto, os resultados mostraram que 75 % dos SCM e 74 % da atividade elétrica de raios ocorreram no período de primavera-verão. Dessa forma, a forte correlação sazonal entre ocorrência de SCM e de atividade elétrica indica a grande importância dos SCM como intensos produtores de atividade elétrica. A observação da forte correlação entre grandes organizações de nuvens convectivas e a ocorrência de raios tem sido observada desde os trabalhos pioneiros de Goodman e Macgorman (1986). Os resultados encontrados por esses autores mostraram que metade dos SCM analisados estiveram associados a danos relacionados à atividade elétrica de raios.

No intuito de avaliar o comportamento do ciclo diurno de nascimentos dos SCM, realizou-se um levantamento do número de sistemas que iniciaram espontaneamente. A escolha apenas de sistemas que iniciaram espontaneamente tornou esta análise mais representativa, pois, como discutido anteriormente, esses sistemas são aqueles que não foram gerados como um resultado de divisão (*Split*) de SCM, mas sim nasceram naturalmente. Dessa forma, essa limitação assegura que o crescimento inicial desses SCM está associado à própria dinâmica interna desses sistemas (MACHADO e LAURENT, 2004). Essa seleção resultou na redução da amostra de 8.158 SCM para 4.675 SCM. A Figura 6.2 ilustra o comportamento do ciclo diurno de nascimentos espontâneos para os 4.675 SCM em estudo.

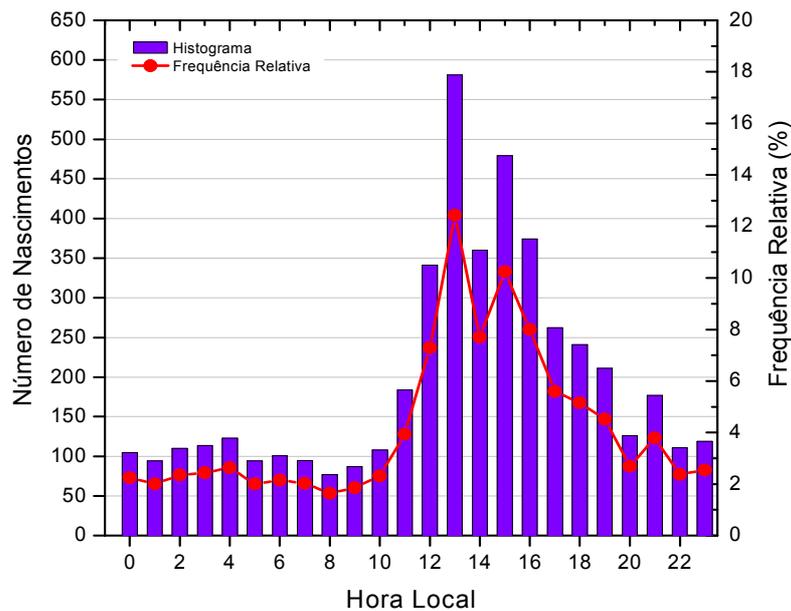


Figura 6.2 - Distribuição horária de frequência total de nascimentos espontâneos de SCM detectados pelo FORTRACC para o período de julho de 2005 a março de 2008.

Pelo histograma de frequência, nota-se que a ocorrência de iniciações espontâneas de SCM pode ocorrer a qualquer hora do dia. No entanto, há uma preferência de nascimentos durante a tarde e as primeiras horas da noite, entre os horários de 11 horas locais e 21 horas locais. Os horários das 8 horas locais e 13 horas locais apresentaram as menores e maiores ocorrência de nascimentos de SCM, representando 2 % e 12 % do total de SCM reportados, respectivamente. Para a região da Bacia do Prata, Vila et al (2004) encontraram um pico de nascimentos espontâneos de SCM situando-se por volta das 13-14 horas local. Na região do Pacífico Oeste, Miller e Fritsch (1991) observaram que o pico da convecção encontrava-se um pouco mais tarde, em torno das 16 horas local. Por outro lado, sobre o continente Africano, Laing e Fritsch (1993) verificaram a maior parte das gêneses de SCM aproximadamente às 19 horas local. Os horários do dia de maior ocorrência de nascimentos de SCM oscilam entre as diversas regiões consideradas. Esses resultados sugerem, portanto, que o horário do dia com maior atividade convectiva sofre influência de fatores regionais. A maior ocorrência da atividade convectiva nas diversas regiões citadas e sobre a região estudada neste trabalho ocorre preponderantemente entre a tarde e as primeiras horas do período noturno, como consequência do caráter termodinâmico da convecção (horário de máxima insolação).

Em complementação à análise do ciclo diurno de iniciações espontâneas discutidas anteriormente, caracterizou-se também o comportamento do ciclo diurno da fração convectiva (FC), taxa de expansão normalizada ( $A_e$ ) e ocorrência de raios associados aos SCM detectados pelo modelo FORTRACC. Esta avaliação torna-se importante, na medida em que o momento do dia de preferencial ocorrência de células convectivas (núcleos convectivos possuindo topos com  $T_B < 210$  K embebidos nos SCM) e a mais intensa taxa de crescimento ( $A_e$ ) dos SCM possa indicar um prognóstico da atividade elétrica de raios. Para o levantamento dessas estatísticas, a representatividade foi assegurada considerando-se somente a FC e  $A_e$  dos membros dos SCM que não foram gerados como resultado de uma imagem virtual (imagem gerada pelo modelo na falta de uma imagem real de satélite). Em particular, como a propriedade física  $A_e$  representa basicamente a taxa de variação da área de um SCM entre duas imagens normalizada pela área média do SCM entre essas imagens, foi realizada também uma seleção de forma a considerar somente aqueles membros de SCM, no qual o membro atual não resultou de uma divisão (*Split*) ou junção (*Merge*) de SCM da imagem anterior. A Figura 6.3 mostra os resultados do comportamento do ciclo diurno médio da FC,  $A_e$  e a soma total de raios associados aos SCM.

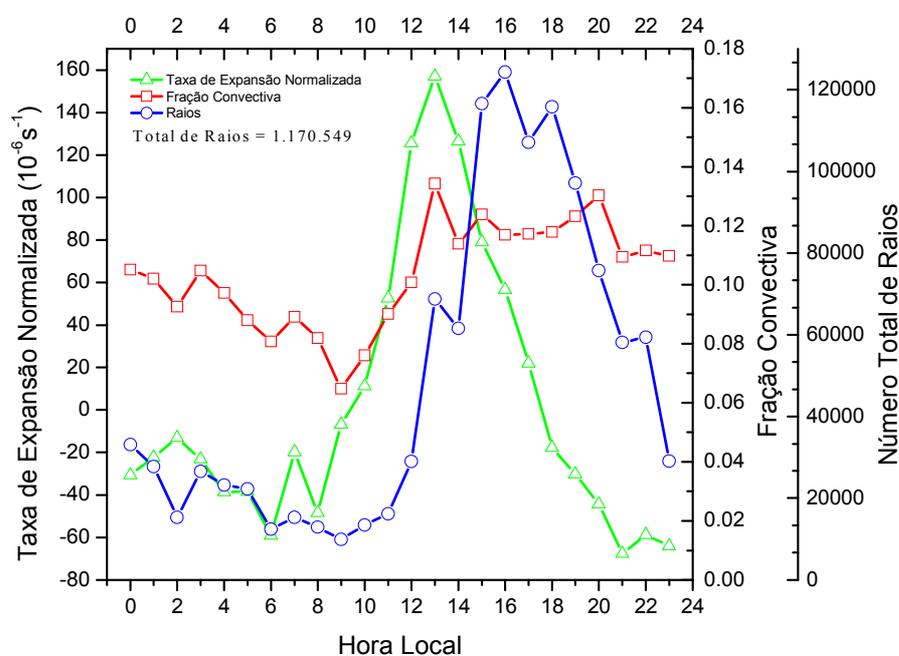


Figura 6. 3 - Distribuição horária média da Taxa de Expansão Normalizada ( $10^{-6}s^{-1}$ ), Fração Convectiva e o Número Total de Raios dos SCM detectados pelo FORTRACC para o período de julho de 2005 a fevereiro de 2008.

A análise do ciclo diurno das propriedades dos SCM (Figura 6.3) mostrou um comportamento bastante organizado, além de evidenciar importantes características físicas e dinâmicas dos SCM. Para este estudo, foi registrado um total de 1.170.549 raios associados aos SCM. Observa-se uma forte correlação entre o comportamento do ciclo diurno da atividade elétrica de raios e da propriedade física  $A_e$ . Houve um rápido crescimento na ocorrência de raios próximo das 11 horas local associado a uma forte expansão dos SCM. O máximo de atividade elétrica (aproximadamente 120.000 raios) ocorreu próximo das 16 horas, três horas depois da máxima taxa de crescimento (aproximadamente  $160 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) e da máxima quantidade de células convectivas dos SCM (aproximadamente 13% da área total). Porém, mesmo a propriedade física FC não apresentando um comportamento de ciclo diurno bem definido, pois também foi verificado um pico secundário em torno das 20 horas (provavelmente relacionado com a formação de nuvens *Cirrus* espessas associado à convecção profunda), os mais altos valores de FC encontraram-se após as 13 horas, período de mais intensa atividade elétrica.

Resultados semelhantes aos observados sobre o comportamento diurno de algumas propriedades de SCM determinadas pelo modelo FORTRACC foram notados também por Machado e Laurent (2004) e Vila et al (2004). Machado e Laurent (2004) encontraram máxima taxa de expansão de SCM sobre a Amazônia as 13 horas local, enquanto Vila et al (2004) encontraram máximos valores de  $A_e$  entre as 14-15 horas local e o mínimo da  $T_{\min}$  próximo das 17 horas. Portanto, os resultados indicam que para a região em estudo a variabilidade da insolação diurna modula de forma direta os máximos de ocorrência de células convectivas e de taxa de crescimento dos SCM estudados. Sugere-se assim que a insolação durante o período da tarde (próximo do horário das 13 horas) favorece a ocorrência das mais intensas correntes ascendentes nos SCM, favorecendo um máximo (porém tímido) de células convectivas.

As análises mostraram que além do máximo de atividade elétrica de raios ocorrer em média três horas após o máximo de  $A_e$ , o mesmo situou-se em um horário (aproximadamente 16 horas) em que a  $A_e$  apresentou os valores mais baixos (valores

entorno de  $30 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ), porém ainda positivos. Essa observação sugere que as intensas correntes ascendentes dos SCM que ocorreram às 13 horas favoreceram o máximo de ocorrência de atividade elétrica próximo a fase de maturação dos SCM. De forma complementar a esta observação, nota-se que após as 19 horas ocorreu um decaimento sistemático no número de raios, em consonância com o período do dia que os SCM começam a dissipar (valores negativos de  $A_e$ ). Esses resultados sugerem, portanto, que as condições meteorológicas após as 19 horas são associadas à fase de dissipação dos SCM, isto é, o fim da fase onde se prevalecem às correntes ascendentes capazes de produzir significativa atividade elétrica de raios. A interpretação desta figura deve levar em conta que há um crescimento da área do SCM (valores positivos de  $A_e$  correspondem a um aumento da área do SCM) logo, apesar do número de raios ser maior após o máximo de  $A_e$  é alcançado, não significa que a taxa de raios/km<sup>2</sup> de nuvem seja maior. Esses pontos serão discutidos em detalhes na próxima seção.

## **6.2 Caracterização da Relação Entre Propriedades Físicas de SCM e a Atividade Elétrica de Raios**

Nesta seção serão avaliadas as relações estatísticas e físicas existentes entre as propriedades físicas de SCM rastreados pelo modelo FORTRACC e a atividade elétrica de raios. Essa abordagem é importante, pois permitirá um melhor entendimento físico das principais características físicas dos SCM responsáveis pela produção e intensificação da atividade elétrica, além de permitir a inferência sobre os possíveis limiares desses parâmetros que possam ser utilizados para diagnóstico e prognóstico da atividade elétrica de raios. Foi utilizado o banco de dados processado que contém o produto final desse modelo, que constituiu-se basicamente das propriedades físicas de SCM acoplado com dados de ocorrência de raios, para o período de julho de 2005 a fevereiro de 2008 para a região de estudo. As propriedades físicas determinadas pelo modelo FORTRACC e utilizadas são as seguintes: Raio Efetivo, Taxa de Expansão Normalizada, Temperatura Média de Brilho, Taxa de Variação da Temperatura Média de Brilho, Temperatura Mínima de Brilho, Taxa de Variação da Temperatura Mínima de Brilho, Temperatura Mínima Média de Brilho do *Kernel* de 9 *Pixels*, Taxa de

Variação da Temperatura Mínima Média de Brilho do *Kernel* de 9 *Pixels*, Fração Convectiva e Excentricidade. As análises estatísticas conduzidas para cada propriedade física serão apresentadas e discutidas nas seções seguintes.

### 6.2.1 Raio Efetivo ( $R_e$ )

A avaliação do tamanho (área do SCM em *pixels*, determinado usando o limiar de  $T_B$  de 235 K) dos SCM mostrou-se de grande importância haja visto que alguns estudos (MORALES et al, 2004) têm evidenciado que o desenvolvimento espacial do topo de aglomerados de nuvens convectivas possui uma forte dependência da presença de partículas de gelo, a qual se correlaciona de forma direta para a ocorrência da atividade elétrica de relâmpagos. A caracterização da relação existente entre o tamanho dos SCM e a atividade elétrica foi realizada através das análises da medida do Raio Efetivo ( $R_e$ ) dos SCM. Segundo Machado et al (1998), esta medida linear representa de forma mais aceitável a dimensão dos SCM, diante dos diversos formatos observados desses *Clusters* de nuvens convectivas. Portanto, aplicando a metodologia descrita na seção 5.2, reportou-se a ocorrência de aproximadamente 8.158 SCM. Para a análise do parâmetro  $R_e$ , considerou-se somente aqueles membros das famílias de SCM que não foram gerados devido à falta de imagem (imagem virtual). Com essas considerações e com o objetivo de realizar comparações, os membros das famílias de SCM foram divididos em um grupo de eventos de tamanho de membros de SCM que não apresentaram raios e outro no qual se reportou a ocorrência de raios. Para o grupo com eventos de atividade elétrica de raios, registrou-se a ocorrência de 1.170.636 raios. A Figura 6.4 mostra a distribuição de frequência de ocorrência para os dois grupos de eventos, o grupo de  $R_e$  sem raios (Figura 6.4 (a)) e com raios (Figura 6.4(b)) em quilômetros (km).

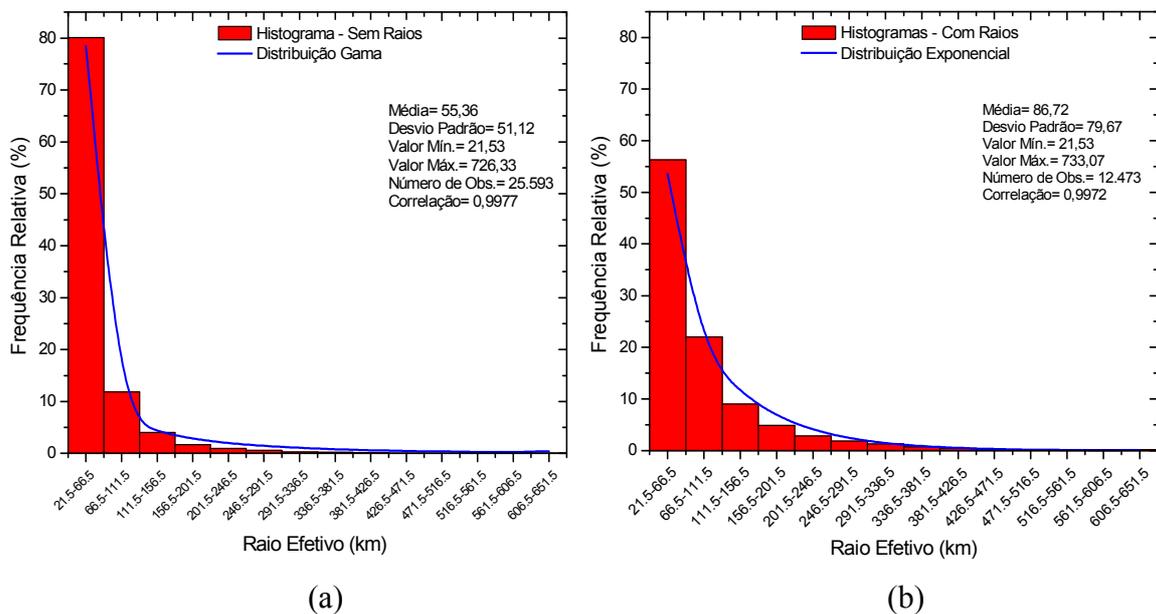


Figura 6. 4 - Histograma de frequência para a propriedade física Raio Efetivo (km) dos membros de SCM que (a) não apresentaram raios e (b) para membros dos SCM que apresentaram raios e curvas ajustadas.

As considerações discutidas no parágrafo anterior possibilitaram o registro de 25.593 observações de eventos de tamanho de membros de SCM que não apresentaram raios (Figura 6.4 (a)). Baseado neste contingente de observações verificou-se que o número de eventos decai bruscamente com o tamanho, principalmente para  $R_e$  maiores que 66,5 km. Segundo o teste de aderência KS, a distribuição Gama (a qual também apresentou alta correlação com a distribuição do histograma, apresentando um valor entorno de 0,998) foi a função de distribuição de probabilidade que melhor representou este rápido decrescimento de eventos com o aumento do tamanho dos SCM. Com isso, aproximadamente 95 % dos eventos apresentaram tamanho menor que 111,5 km, enquanto que uma pequena parcela dos eventos correspondendo a menos de 4% apresentou tamanhos maiores que 246,5 km. O maior número de eventos de tamanho de SCM sem ocorrência de raios (80 %) foi registrado para a classe de tamanho entre 21,5 km a 66,5 km, representando um tamanho médio de 44 km, enquanto que membros de SCM com tamanho entre 471,5 km a 516,5 km apresentaram as menores ocorrências (representando menos de 0,008 % do total de observações). Portanto, os eventos que não apresentaram raios estiveram associados preponderantemente a SCM de tamanhos

relativamente pequenos em relação à amostra analisada com tamanho médio de aproximadamente 55,36 km.

A distribuição de eventos para SCM que reportaram a ocorrência de raios (Figura 6.4 (b)) apresentou algumas semelhanças a dos eventos sem raios, porém importantes características podem ser observadas. Para esta distribuição, reportou-se a ocorrência de aproximadamente 12.473 membros de SCM que apresentaram ao menos a ocorrência de um raio. Portanto, membros de SCM sem a presença de raios representaram em média duas vezes mais ocorrências em relação a membros de SCM que apresentaram a ocorrência de ao menos um raio. No entanto, a distribuição de frequência apresentou um decaimento menos abrupto em relação à distribuição sem raios. Conforme a curva ajustada, o decaimento de eventos de SCM com raios em função do tamanho do SCM seguiu aproximadamente uma relação estatística exponencial (correlação de ajuste de 0,997). Nota-se que 95 % das ocorrências foram reportadas para SCM com  $R_e$  menor que 246,5 km enquanto que os SCM com tamanhos maiores que 381,5 km representaram as menores ocorrências (1,3 % do total de eventos). A classe representando SCM com tamanhos médios de 44 km reportaram a maior ocorrência (representaram 56 % dos eventos). Por outro lado, a menor ocorrência foi observada para SCM com tamanho médio de 516,5 km. Os resultados sugerem que SCM que registraram ao menos a ocorrência de um raio foram em média relativamente pequenos com relação a sua amostra e relativamente maior em relação aos sistemas que não apresentaram raios. Essa observação é reforçada, verificando que os SCM sem a presença de raios apresentaram um tamanho médio de 55,36 km, enquanto os que possuíram raios tiveram um tamanho médio de 86,72 km.

As diferenças mais detalhadas, entre as características das distribuições do grupo de tamanho com e sem a presença de raios é mais bem ilustrada através da comparação entre as curvas ajustadas para cada distribuição (Figura 6.5). Apesar das distribuições apresentarem boa correlação (aproximadamente 0,97) entre si, importantes discrepâncias entre as curvas de distribuições com (vermelho) e sem raios (azul) foram notadas para SCM com tamanho menor que 336,5 km. Em geral, os eventos de tamanho

com ocorrência de raios possuíram uma distribuição mais homogênea em relação aos eventos sem raios, sendo que 30 % a mais de eventos sem raios foram observadas para a classe de tamanho médio de 44 km. Por outro lado, a quantidade de SCM com raios foi sempre superior as dos sem raios para tamanhos maiores que 111,5 km. O SCM de menor (maior) tamanho reportado para os sistemas sem raios foi de 21,53 km (726,33 km), enquanto para os com raios foram 21,53 km (733,07 km). Morales et al (2004), de modo semelhante, encontraram que a maioria dos SCM que apresentaram raios possuíam tamanhos entre 71 km e 226 km, sendo que SCM maiores que 226 km sempre apresentaram raios. Pode-se especular que, apesar do limiar mínimo de tamanho ser igual para os dois grupos, os SCM com maiores (menores) tamanhos possuíram uma probabilidade maior (menor) de possuir atividade elétrica de raios.

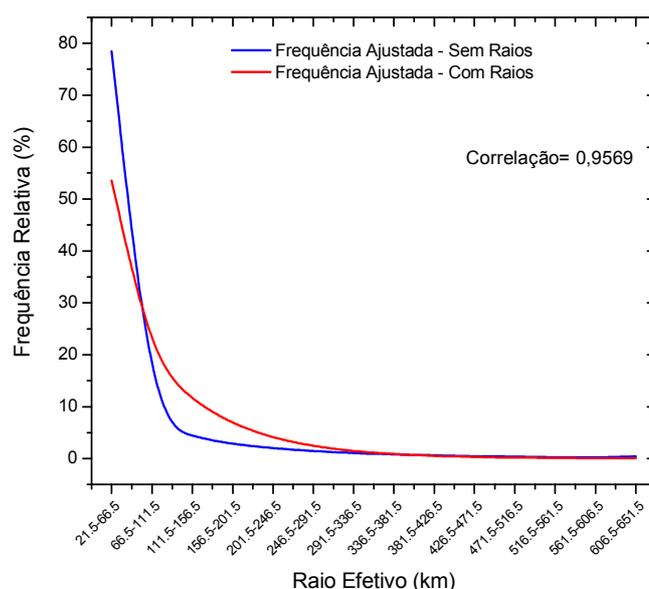


Figura 6. 5 - Análise comparativa entre a curva ajustada para o histograma de Raio Efetivo de membros de SCM que não apresentaram raios (azul) e a curva ajustada para a amostra de Raio Efetivo que apresentaram raios (vermelha).

As análises discutidas acima sugerem que possivelmente o tamanho ( $R_e$ ) dos SCM possa mostrar algum indicativo da ocorrência de atividade elétrica de raios. Portanto, para avaliar essa hipótese, contabilizou-se o número de ocorrências de raios para cada intervalo de classe de tamanho (referentes às classes de tamanho da Figura 6.4(b)). Esta análise foi realizada considerando-se a ocorrência aproximadamente de 1.170.636 raios

reportados, distribuídos entre os eventos de tamanho de SCM que apresentaram raios. A Figura 6.6 mostra o histograma de frequência acumulada de raios em função do tamanho do SCM.

Todas as classes de tamanho apresentaram ocorrência de raios. No entanto, menos de 20% das ocorrências de raios esteve associada com SCM de tamanho menores que 66,5 km, enquanto que mais de 90 % dos raios ocorreram em SCM com tamanho menores que 381,5 km de  $R_e$ . Esta observação é importante visto que a representatividade de 20% de raios ocorreu em uma classe que possuía a mais alta ocorrência de eventos de tamanho, a qual representou mais de 65 % (Figura 6.4 (b)) dos eventos com raios em relação às demais classes. Apesar dos SCM pequenos ( $R_e$  menores que 66,5 km) representarem a maioria dos eventos de tamanho, os mesmos estiveram associados às menores ocorrências de atividade elétrica de raios. Nota-se que 50 % dos raios ocorreram quando os SCM excederam um limiar de tamanho de 111,5 km. Os maiores aumentos de ocorrência de raios foram observados entre as oito primeiras classes, de forma que o aumento foi mais representativo nas classes iniciais de tamanho. Por outro lado, a partir da classe com tamanho maior que 381,5 km, a variabilidade de ocorrência de raios foi apreciavelmente menor. Essas observações estão associadas ao fato que as maiores ocorrências de eventos de tamanho com raios situaram-se nas primeiras classes, enquanto a pouca variabilidade entre as classes com SCM maiores deveu-se em parte a poucos eventos com estas características. Em geral, os resultados mostraram que os SCM maiores possuíram um processo dinâmico diferenciado, o qual propiciou que o aumento da atividade elétrica de raios associasse-se de forma bastante regular com o aumento do tamanho dos SCM.

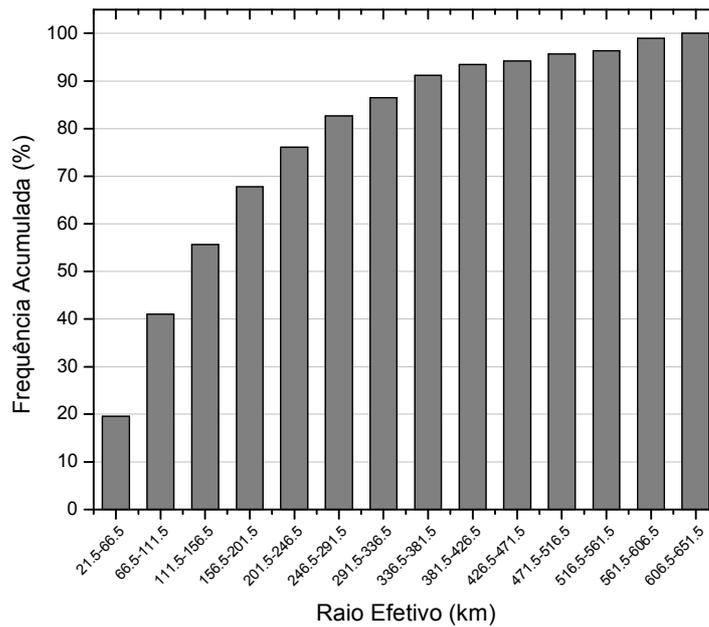


Figura 6. 6 - Frequência Acumulada (%) de ocorrência de raios em função do Raio Efetivo (km) dos SCM.

No intuito de parametrizar estatisticamente a relação física existente entre o tamanho dos SCM e a atividade elétrica de raios, determinou-se o valor médio de raios entre os membros de SCM pertencentes a cada classe de tamanho. A Figura 6.7 mostra a relação estatística encontrada entre o número médio de raios em função do tamanho médio dos SCM. O número médio de raios apresentou uma relação crescente com o aumento do tamanho dos SCM, de forma que foi possível ajustar uma curva de potência com alto coeficiente de determinação de 0,91, como mostrado na equação 6.1.

$$NMR = 0.497 * (R_e)^{1.15} \quad (6.1)$$

Em que,

*NMR* é número médio de raios;

*R<sub>e</sub>* é o raio efetivo do SCM em quilômetros.

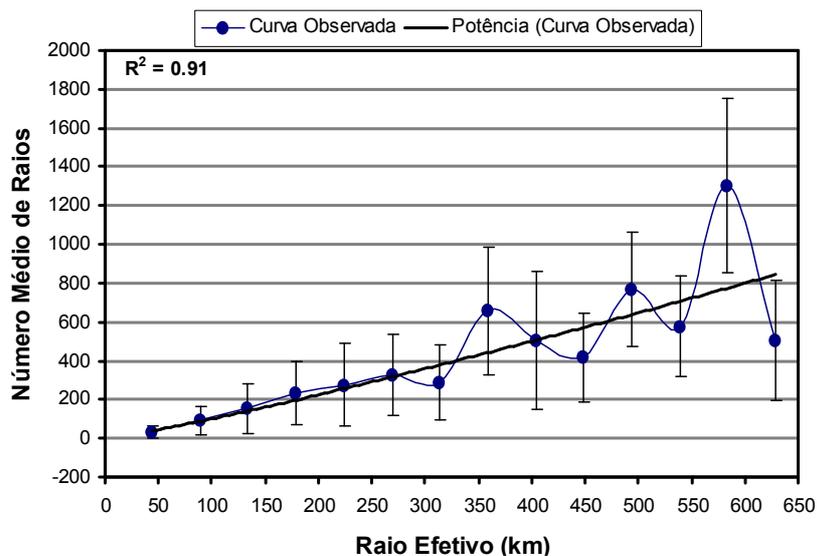


Figura 6. 7 - Variação do número médio de raios, desvio padrão em função do Raio Efetivo dos SCM e curva de potência ajustada para a ocorrência média de raios.

Desta forma, apesar da curva ajustada apresentar uma leve inclinação (0,5), a menor (maior) quantidade média de raios foi encontrada para os SCM com tamanhos médios de 44 km (584 km), os quais apresentaram uma média de 33 raios e 1.301 raios, respectivamente. A ocorrência média de raios (416 raios) foi reportada para SCM com tamanhos de 449 km. A variabilidade no número médio de raios (maiores valores de desvio padrão) observado para SCM com tamanhos maiores que 336,5 km deve-se, como mostrado na Figura 6.4 (b), à ocorrência de poucos SCM com tamanhos maiores que estes valores. Portanto, os resultados mostram que o tamanho dos SCM é uma variável fortemente relacionada com a atividade elétrica de raios, apresentando uma relação de regressão positiva de potência entre esses dois parâmetros e sendo um importante parâmetro a ser considerado no diagnóstico e prognóstico da atividade elétrica de raios. Com isso, esses resultados indicaram que os maiores SCM possuem maior probabilidade de ocorrência de raios em função da sua dinâmica diferenciada (forte desenvolvimento vertical) necessária para criá-los e intensificá-los, produzindo quantidade de partículas de gelo suficiente para gerar altos índices de ocorrência de raios.

Apesar dos resultados mostrarem que em geral os SCM de tamanhos maiores propiciam a uma ocorrência de atividade elétrica de raios mais intensa, torna-se importante

verificar se a concentração de raios por unidade de área (raios/km<sup>2</sup>) também é realmente maior em SCM maiores ou se há uma dependência do tamanho da área convectiva associada a cada sistema. Seguindo uma metodologia semelhante à adotada por Morales et al (2004), determinou-se ao invés da soma de raios para cada classe a densidade de raios, o qual é representada pela razão entre o tamanho de cada membro dos SCM e a sua respectiva quantidade de raios (raios/km<sup>2</sup>). Na Figura 6.8 é ilustrada a relação encontrada entre a densidade de raios (raios/km<sup>2</sup>) e o R<sub>e</sub> dos SCM. Nota-se a existência de uma forte relação de regressão negativa de potência, com alto índice de determinação entre a densidade de raios e tamanho do SCM (coeficiente de determinação de 0,85). A equação que melhor representou essas características é expressa da seguinte forma:

$$DMR = 0,21 * (R_e)^{-0,89} \quad (6.2)$$

Em que,

*DMR* é a densidade média de raios;

*R<sub>e</sub>* é o raio efetivo do SCM em quilômetros.

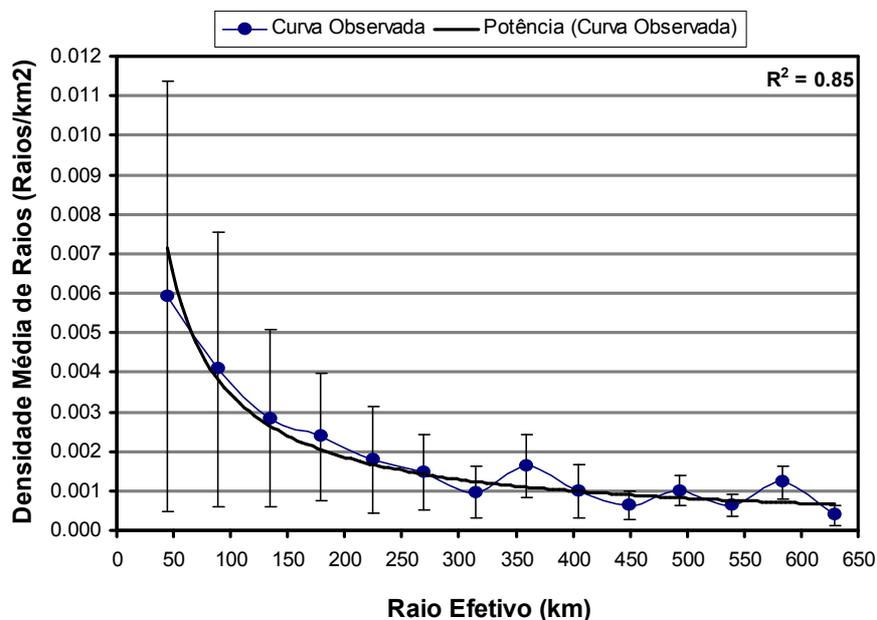


Figura 6. 8 - Variação da Densidade Média de Raios em função do Raio Efetivo, seu desvio padrão e curva de potência ajustada para a ocorrência da densidade média de raios.

Apesar da densidade de raios aumentar com a diminuição do tamanho dos SCM, esta variabilidade é relativamente pequena (coeficiente angular de 0,21). A menor (maior) concentração de raios foi observada para SCM com tamanhos de 630 km (48 km) com valores de 0,006 raios/km<sup>2</sup> e 0,0004 raios/km<sup>2</sup>, respectivamente. A quantidade mais significativa de concentração de raios foi observada para tamanhos menores que 246,5 km. Esses índices de densidade de raios ainda foram relativamente baixos, além da quantidade de raios serem bastante flutuante entre SCM de uma mesma classe (demonstrado pelos altos valores de desvio padrão para tamanho menores que 246,5 km). Contudo a mais importante característica observada, associado a mais alta densidade de raios relacionada aos menores SCM, enquanto as maiores ocorrências de raios ocorreram para sistemas maiores que estes (Figura 6.7), indicam que a distribuição espacial de raios sobre a área dos SCM mostra-se diferenciada entre sistemas pequenos e grandes, sugerindo assim que os sistemas grandes produzem mais raios como um todo (devido a sua maior área). Por outro lado, os menores aparentam ser mais eficientes (ocorrência de raios mais concentrada por área unitária).

O trabalho de Machado e Rossow (1993) vem a ratificar esses resultados. Esses autores observaram que em média um SCM tropical grande possui durante o estágio de maturação aproximadamente 80 % de sua área sendo composta de nuvens estratiformes, o que tornaria a eficiência de raios por *pixel* (raios/km<sup>2</sup>) desses sistemas mais baixa, apesar de possuir um número total de raios (soma de todos os raios sobre a área total do sistema) maior, devido a sua maior área em relação aos menores sistemas. Portanto, também em consonância com o trabalho de Morales et al (2004), a densidade de raios mostrou-se um importante parâmetro que, associado com a distribuição de tamanhos dos SCM, possivelmente pode ser utilizada para diferenciar os processos dinâmicos entre sistemas de diversos tamanhos com relação à atividade elétrica de raios.

### **6.2.2 Taxa de Expansão Normalizada ( $A_e$ )**

A Taxa de Expansão Normalizada ( $A_e$ ) é um parâmetro que indica a taxa de crescimento ou decaimento relativa dos SCM em relação a sua área média entre duas

imagens consecutivas, sendo expressa em  $10^{-6}\text{s}^{-1}$ . Essa abordagem torna-se importante, pois esse parâmetro está associado diretamente com a quantidade de fluxo de massa ou taxa de condensação no interior dos SCM (MACHADO e LAURENT, 2004), a qual correlaciona fortemente com a formação de partículas de gelo e, conseqüentemente, com a atividade elétrica (GOODMAN e MACGORMAN, 1986). A partir da contingência reportada de aproximadamente 8.158 SCM, selecionou-se somente aqueles membros das famílias de SCM em que o mesmo e seu antecessor (o próprio sistema, só que 15 minutos antes) não foram gerados devido à falta de imagem e também não surgiram como resultado de um caso de divisão (*Split*) ou junção (*Merge*) de SCM. Esta consideração é relevante, pois, nesta análise a taxa de crescimento e decaimento dos SCM de interesse é aquela devido à própria dinâmica interna dos sistemas e não associado à união ou divisão do SCM. Com estas considerações, as análises a seguir contaram com o registro de 160.321 ocorrências de raios. Para caracterizar os membros que apresentaram e que não possuíam raios em função da  $A_e$ , construiu-se histogramas de frequência para os dois grupos, como mostra a Figura 6.9, (a) sem raios e (b) com raios.

A maioria dos 14.253 eventos que não apresentaram raios (Figura 6.9 (a)) possuíam  $A_e$  entre  $-470.10^{-6}\text{s}^{-1}$  e  $380.10^{-6}\text{s}^{-1}$  (mais de 94 % dos eventos). Em geral, os valores estiveram mais concentrados para baixas  $A_e$ , como mostrado pelo ajuste da distribuição Gaussiana (correlação entre os eventos e a frequência ajustada de 0,97). As maiores (menores) ocorrências por classe de eventos foram reportadas para SCM que apresentaram  $A_e$  entre  $-130.10^{-6}\text{s}^{-1}$  e  $40.10^{-6}\text{s}^{-1}$  ( $890.10^{-6}\text{s}^{-1}$  e  $1060.10^{-6}\text{s}^{-1}$ ), representando 38 % e 0,1 %, respectivamente. Houve uma distribuição simétrica entre SCM com  $A_e$  negativas e positivas com um valor médio de  $34,2.10^{-6}\text{s}^{-1}$ . De maneira geral, SCM que não reportaram a ocorrência de raios caracterizaram-se por valores de  $A_e$  próximos ou menores que zero. Estes resultados indicam que a maioria dos SCM sem a ocorrência de raios em um intervalo médio de 15 minutos possuiu correntes ascendentes menos intensas, sugerindo assim que os mesmos encontravam-se próximos ou depois do estágio de maturação.

No caso dos eventos que apresentaram no mínimo a ocorrência de um raio (Figura 6.9 (b)), dos 6.163 eventos, mais de 94 % tiveram  $A_e$  entre  $-470$  e  $380 \cdot 10^{-6} \text{s}^{-1}$ . De modo semelhante aos SCM que não apresentaram raios, a melhor distribuição que caracterizou esses eventos foi a Gaussiana (correlação de 0,97). As maiores (menores) ocorrências de SCM com raios por classe possuíram valores entre  $40 \cdot 10^{-6} \text{s}^{-1}$  e  $210 \cdot 10^{-6} \text{s}^{-1}$  ( $890 \cdot 10^{-6} \text{s}^{-1}$  e  $1060 \cdot 10^{-6} \text{s}^{-1}$ ), representando 37 % e 0,2 %, respectivamente. Como consequência, a maioria dos SCM com a ocorrência de no mínimo um raio, caracterizou-se preponderantemente por valores mais positivos de  $A_e$  (mais de 60 % dos eventos), como comprovado pela assimetria encontrada na distribuição dos eventos e pelo valor médio de  $83,7 \cdot 10^{-6} \text{s}^{-1}$  (enquanto no grupo sem raios foi de  $34,2 \cdot 10^{-6} \text{s}^{-1}$ ). Diferentemente dos eventos que não apresentaram raios, a ocorrência de raios esteve associada à SCM caracterizados pelas mais fortes correntes ascendentes e que encontravam-se antes da fase de maturação.

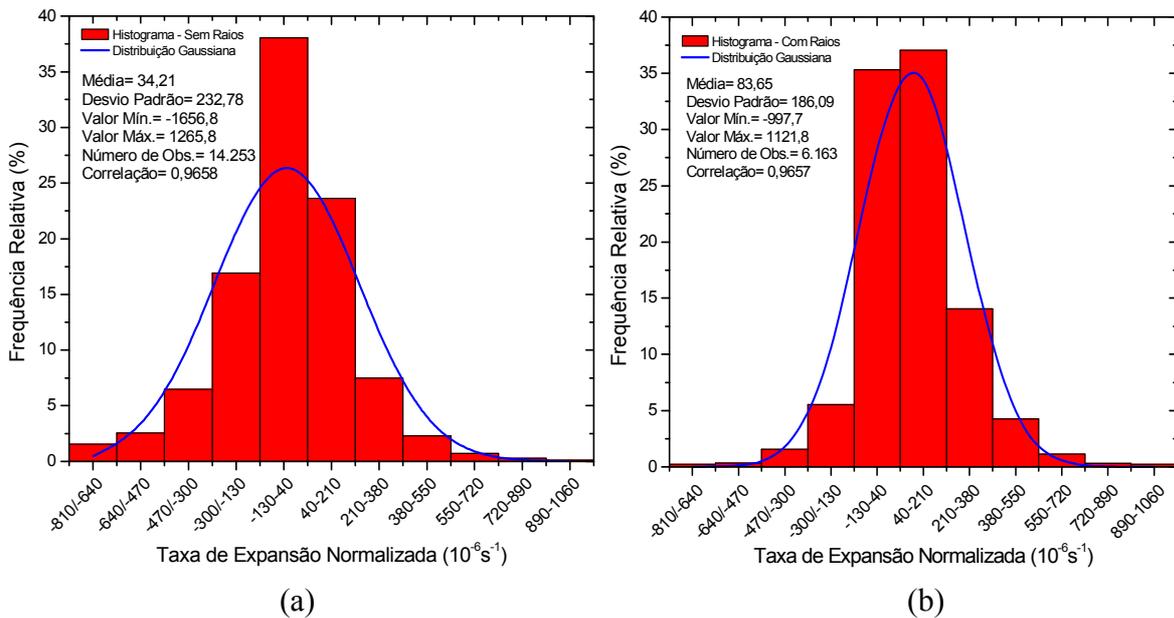


Figura 6. 9 - Histograma de frequência para a propriedade física Taxa de Expansão Normalizada ( $10^{-6} \text{s}^{-1}$ ) dos membros de SCM que (a) não apresentaram raios e (b) para membros com raios e curvas ajustadas.

A Figura 6.10 mostra que as distribuições de eventos sem (azul) e com a presença de raios (vermelho) são diferentes. Um fator de assimetria de  $-0,33$  ( $+0,41$ ) para a distribuição sem raios (com raios) e a largura na meia altura das distribuições conferem

uma maior ocorrência de  $A_e$  positivas ao grupo com raios, sendo o pico de valores encontrado com  $A_e$  média de  $125.10^{-6}s^{-1}$  (34 % do total de eventos) e  $-45.10^{-6}s^{-1}$  (28 % do total de eventos) para o grupo com e sem ocorrência de raios, respectivamente. Esses resultados caracterizaram os eventos sem (com) a presença de raios com uma  $A_e$  média de  $34,2.10^{-6}s^{-1}$  ( $83,7.10^{-6}s^{-1}$ ). Para as classes de  $A_e$  inferiores a  $40.10^{-6}s^{-1}$  observaram-se que as ocorrências de eventos sem raios foram sempre superiores em relação às com raios, encontrando valores coincidentes apenas na classe de  $A_e$  entre  $-130.10^{-6}s^{-1}$  e  $40.10^{-6}s^{-1}$  representando 28 % dos eventos para os dois grupos, e para valores acima desta classe os eventos com raios possuíram sempre frequência de classe superior em relação aos sem raios. Observa-se também a ocorrência de poucos membros dos SCM com e sem raios com  $A_e$  maiores que  $720.10^{-6}s^{-1}$ . Essas análises sugerem que a ocorrência de atividade elétrica de raios está associada à SCM caracterizados com  $A_e$  preponderantemente igual ou superior a zero, indicando desta forma a existência de uma forte correlação entre os processos dinâmicos internos dos SCM e a ocorrência de raios.

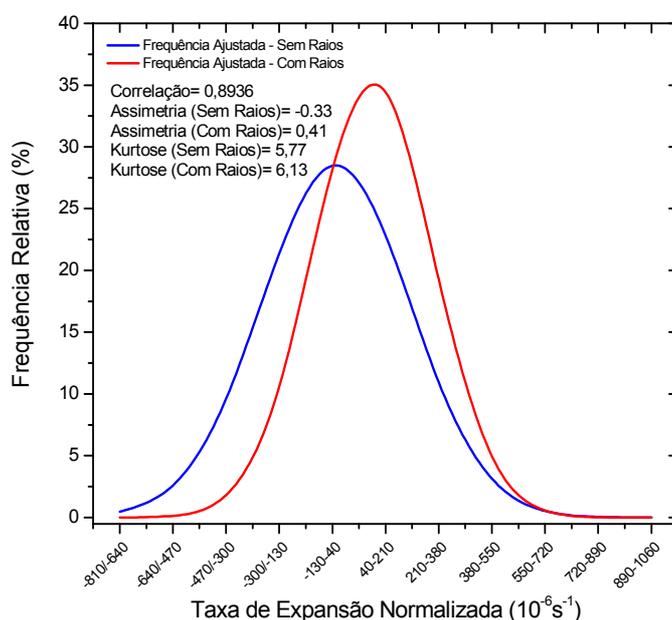


Figura 6. 10 - Análise comparativa entre a curva ajustada para o histograma de Taxa de Expansão Normalizada de membros de SCM que não apresentaram raios (azul) e a curva ajustada para a amostra de Taxa de Expansão Normalizada que apresentaram raios (vermelha).

A Figura 6.11 reforça a hipótese da forte dependência da atividade elétrica de raios com a taxa de crescimento ou decaimento dos SCM. Apenas 40 % da ocorrência total de raios (do total de 160.321 raios) ocorreram para SCM com  $A_e$  menor que  $40.10^{-6}s^{-1}$ , enquanto que 60 % do raios foram reportados para valores maiores que  $40.10^{-6}s^{-1}$ . Em parte, a pouca ocorrência de raios abaixo (acima) de  $130.10^{-6}s^{-1}$  ( $550.10^{-6}s^{-1}$ ) deveu-se a uma quantidade inferior de ocorrência de eventos com raios para essas classes (como mostrado na Figura 6.9 (b)). Contudo, os resultados em geral mostraram que a maior ocorrência de atividade elétrica de raios ocorreu para valores positivos de  $A_e$ , preponderantemente quando um limiar aproximadamente de  $40.10^{-6}s^{-1}$  de taxa de crescimento dos SCM foi atingido.

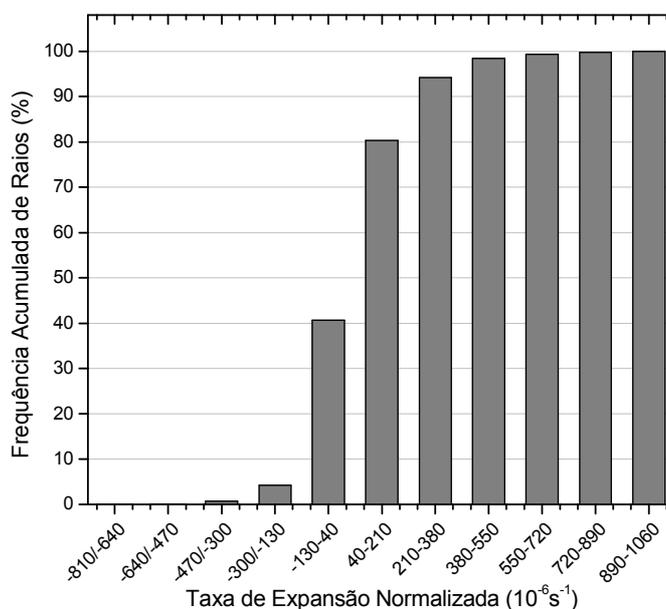


Figura 6. 11 - Frequência Acumulada (%) de ocorrência de raios em função da Taxa de Expansão Normalizada dos SCM.

Dada a forte correspondência entre a taxa de crescimento dos SCM com a atividade elétrica de raios, torna-se importante caracterizar a forma específica da relação empírica positiva entre essas duas variáveis. A Figura 6.12 mostra que em geral há uma tendência de crescimento do número de raios conforme o crescimento apresentado pelos SCM. Há um rápido crescimento no número médio de raios dos SCM até atingir  $40.10^{-6}s^{-1}$  de taxa de crescimento (apresentando entorno de 28 raios). Após este valor, há um relativo

crescimento, porém claramente mais tímido. Verifica-se um mínimo (máximo) valor de ocorrência de raios para  $A_e$  entre  $-810 \cdot 10^{-6} \text{s}^{-1}$  e  $640 \cdot 10^{-6} \text{s}^{-1}$  ( $720 \cdot 10^{-6} \text{s}^{-1}$  e  $890 \cdot 10^{-6} \text{s}^{-1}$ ). Acredita-se que o rápido crescimento observado dos SCM até atingir valores de  $A_e$  positivos deveu-se a forte expansão de regiões convectivas do SCM, enquanto que o mais tímido crescimento para valores mais altos de  $A_e$  pode estar associado à expansão de áreas estratiformes do SCM, mas com quantidade significativa de raios.

A melhor curva que representou a relação crescente entre o número médio de raios e a taxa de crescimento ou decaimento dos SCM foi baseada em uma relação linear entre esses dois parâmetros. A curva linear, com alto coeficiente de determinação em torno de 0,77, ajustada foi a seguinte:

$$\text{NMR} = 0,0156 * (A_e) + 19.2 \quad (6.3)$$

Em que,

*NMR* é o número médio de raios;

$A_e$  é a Taxa de Expansão Normalizada em  $10^{-6} \text{s}^{-1}$ .

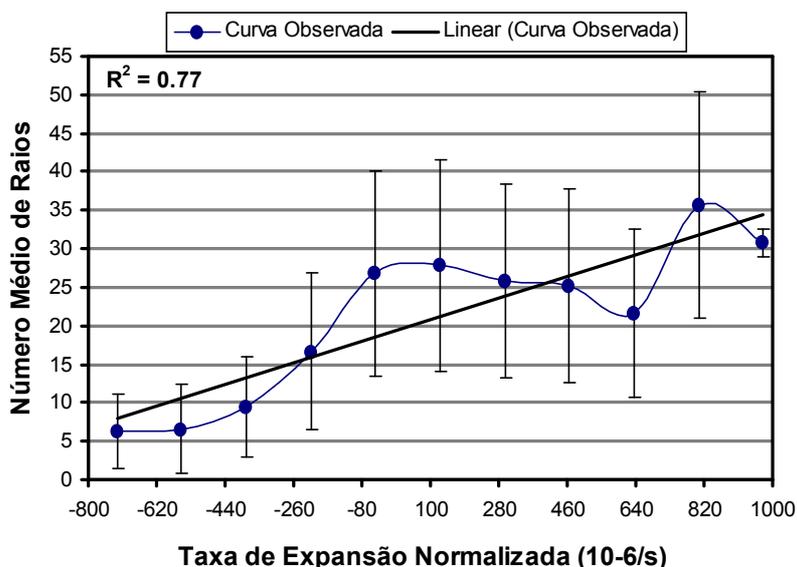


Figura 6. 12 - Variação do número médio de raios em função da Taxa de Expansão Normalizada, seu desvio padrão e curva linear ajustada para a ocorrência média de raios.

Os resultados demonstraram que a taxa de crescimento ou decaimento de um SCM possui uma estreita relação com a ocorrência de raios, caracterizada por uma relação linear positiva. Em concordância com o modelo conceitual de atividade elétrica de relâmpagos em SCM, proposto por Goodman e Macgorman (1986), os resultados indicaram que processos dinâmicos como a intensidade das correntes ascendentes e descendentes possui um importante papel para a formação de partículas de gelo e posterior formação de raios. Com isso, os resultados mostrados sugerem que a  $A_e$  pode ser um parâmetro de grande importância para ser considerado no diagnóstico e prognóstico da atividade elétrica de ocorrência de raios.

### 6.2.3 Temperatura Média de Brilho ( $T_{med}$ )

A Temperatura de Brilho no IR do topo dos aglomerados de nuvens convectivas, como mostrado por alguns estudos (GOODMAN e MACGORMAN, 1986; ORVILLE et al, 1987; DOTZEK et al, 2005), é uma variável termodinâmica relacionada de forma direta com formação de partículas de gelo e conseqüentemente com a geração e intensificação de atividade elétrica no interior dos SCM. A análise dessa hipótese utilizou a Temperatura Média de Brilho ( $T_{med}$ ) no IR dos SCM e dados de raios da rede RINDAT referentes aos SCM detectados pelo modelo FORTRACC. Basicamente a  $T_{med}$  é um resultado da média entre as temperaturas de brilho no IR de todos os *pixels* que compõem o SCM, sendo expressa em Kelvin (MACHADO et al, 1998). A partir dos 8.158 SCM detectados pelo modelo, somente foram selecionados aqueles membros que não foram gerados devido à falta de imagem. Com estas considerações, as análises a seguir contaram com o registro de 1.170.660 raios. A caracterização dos membros com e sem raios foi realizada através de análises de histogramas de frequência para cada grupo. A Figura 6.13 mostra os histogramas de frequência da  $T_{med}$  dos SCM que não apresentaram (Figura 6.13 (a)) e que apresentaram (Figura 6.13 (b)) ocorrência de raios em um intervalo de 15 minutos (típico intervalo entre as imagens consecutivas do satélite GOES).

Reportou-se a ocorrência de 25.593 eventos que não apresentaram raios (Figura 6.13 (a)). Mais de 90 % dos SCM apresentaram  $T_{med}$  entre 223 K e 233 K enquanto que uma amostra relativamente pequena possuiu temperaturas externa a este intervalo (ressalta-se que 235K é um limitante utilizado pelo FORTRACC), como pode ser visto através do ajuste da distribuição Gaussiana (correlação de 0,91). Desta forma, observa-se um rápido crescimento de ocorrência de eventos para temperatura maiores que 223 K, atingindo um máximo para a classe de  $T_{med}$  entre 229K e 231 K, sendo as menores ocorrências reportadas para a classe com temperaturas entre 209 K e 211 K, representando 26 % e 0,004 % do total de eventos, respectivamente. O limiar de  $T_{med}$  mínima encontrada para os SCM que não apresentaram ocorrência de raios foi de 206,5 K enquanto que a máxima temperatura foi aproximadamente 234,5 K, apresentando uma  $T_{med}$  média de 228,1 K. De maneira geral, os resultados mostraram que os SCM que não apresentaram raios em um intervalo de 15 minutos foram caracterizados preponderantemente por valores altos de  $T_{med}$  em relação a sua amostra (maioria das  $T_{med}$  superiores a 223 K), o que pode estar associado a uma contingência insuficiente de partículas de gelo para gerar os centros de cargas e posterior formação de atividade elétrica.

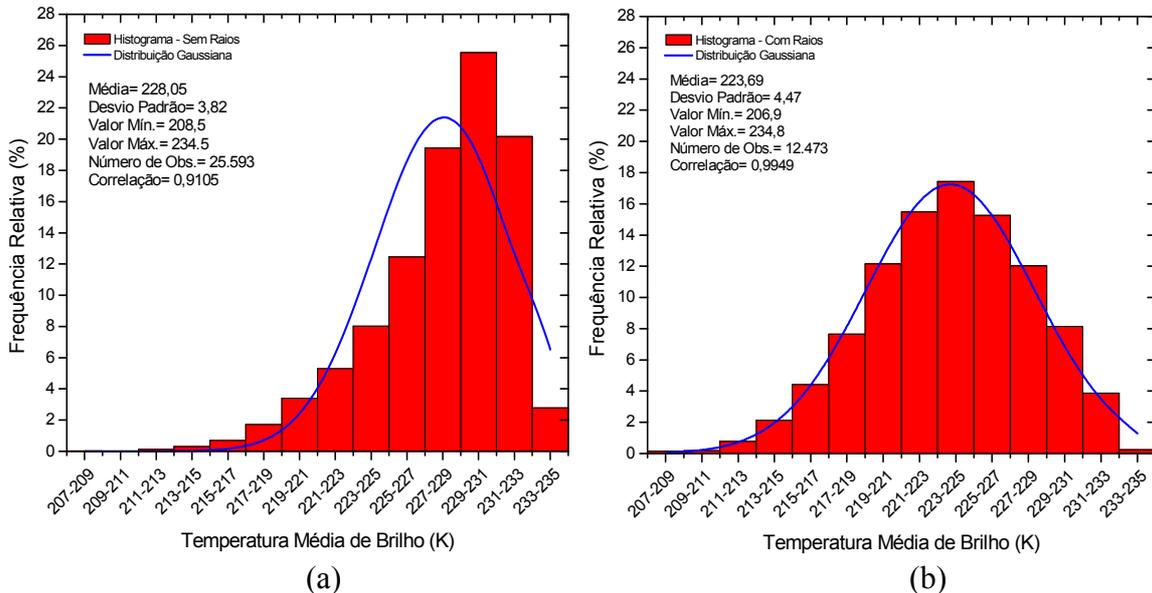


Figura 6. 13 - Histograma de frequência para a propriedade física Temperatura Média de Brilho (K) dos membros de SCM que (a) não apresentaram raios e (b) para membros dos SCM que apresentaram raios e curvas ajustadas.

Por outro lado, os SCM que apresentaram a ocorrência de ao menos um raio (Figura 6.13 (b)) em um intervalo de 15 minutos, apresentaram uma distribuição de  $T_{med}$  mais homogênea. Com uma amostra de 12.473 eventos com a presença de raios, observou-se que a distribuição foi bastante simétrica, sendo caracterizada por uma distribuição do tipo Gaussiana (47 % dos eventos ocorreram para  $T_{med}$  menor que 225 K e 40 % superior a este valor). Aproximadamente 90 % dos membros dos SCM possuíram  $T_{med}$  entre 217 K e 231 K enquanto que uma parcela relativamente pequena encontrou-se externa a este intervalo, sendo o intervalo de classe de temperatura entre 223 K e 225 K (207 K e 209 K) com maior (menor) ocorrências de eventos, representando 17 % e 0,16 % respectivamente. Portanto, essas observações indicam que em média os SCM com ocorrência de raios apresentaram  $T_{med}$  relativamente menores em relação a sua amostra analisada. Essa conjectura é reforçada, notando que a  $T_{med}$  média encontrada para esses sistemas foi aproximadamente de 223,7 K e um limiar de temperatura mínima (máxima) de 206,9 K (234,8 K). Logo, os SCM com a presença de raios possuíram em média 5 K a menos de temperatura que os sem raios e possuíram um limiar mínimo de  $T_{med}$  2 K abaixo. Os resultados mostraram que os SCM com presença de raios foram caracterizados por temperaturas médias mais baixas, indicando uma possível relação física empírica entre atividade elétrica de raios e a  $T_{med}$ .

Analisando a Figura 6.14, percebe-se mais claramente as diferenças em termos das distribuições da variável  $T_{med}$  para os SCM que não apresentaram raios e os que apresentaram. O máximo de eventos com (curva vermelha) raios possuíram uma  $T_{med}$  4 K a menos em relação aos sem raios (curva azul) e os SCM com raios 8 % menos de ocorrência neste máximo de eventos de  $T_{med}$  em relação ao sem ocorrência de raios (o que é mostrado também pelos valores da curtose, sendo de 3 e 4 para os eventos sem e com raios, respectivamente). Para  $T_{med}$  inferiores a 225 K, o número de eventos com a presença de raios foi sempre superior aos sem raios enquanto que para SCM com temperaturas maiores que 225 K a frequência de classe foi sempre superior para aqueles que não apresentaram ocorrência de raios. Esse maior deslocamento da distribuição sem raios para direita em relação aos eventos com raios foi comprovado pelo maior valor do fator de assimetria de -1,06 contra -0,27, respectivamente. Logo, os resultados

discutidos mostram que a variável  $T_{med}$  mostra-se um parâmetro importante para diferenciar SCM com e sem a presença de raios, caracterizando os SCM que apresentam raios com uma  $T_{med}$  5 K a menos em relação aos sistemas sem raios, além de sugerir que a  $T_{med}$  possui uma forte relação com a atividade elétrica de raios em SCM.

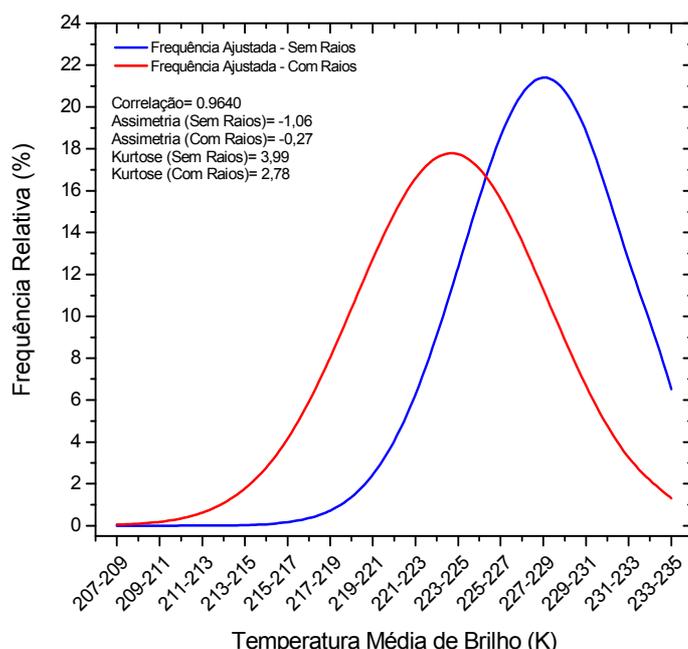


Figura 6. 14 - Análise comparativa entre a curva ajustada para o histograma de Temperatura Média de Brilho membros de SCM que não apresentaram raios (azul) e a curva ajustada para a amostra de Temperatura média que apresentaram raios (vermelho).

Para analisar a hipótese apresentada pelos resultados discutidos acima, construiu-se um histograma de frequência acumulada de raios (Figura 6.15) em função da  $T_{med}$ . Houve um aumento gradual na ocorrência de raios a partir de temperaturas maiores que 215 K, sendo que esse aumento tornou-se muito inferior para temperaturas superiores a aproximadamente 229 K. Mais de 90 % dos raios ocorreram para  $T_{med}$  menores que 227 K enquanto que uma pequena parte das ocorrências de raios esteve associada a temperaturas maiores que 227 K. As menores ocorrências de raios foram reportadas para temperaturas abaixo de 213 K, representando menos de 10 % do total dos raios registrados. Esse resultado está associado aos poucos eventos de SCM com raios para estas classes, os quais representaram aproximadamente 1 % do total de eventos (Figura

6.13 (b)). A mais alta ocorrência de raios acima de 217 K deveu-se em parte ao maior número de ocorrência de eventos de SCM associados a essas temperaturas. Mais de 50 % da atividade elétrica de raios ocorreu para um limiar de 221 K. Estes resultados demonstraram que, apesar das ocorrências de raios serem relativamente baixa para  $T_{med}$  menores que 213 K (associado ao pequeno número de eventos de SCM possuindo esses valores de temperatura), a maior variabilidade de raios entre as classes encontrou-se ainda preponderantemente entre as temperaturas mais baixas dos SCM. Portanto, verifica-se que a  $T_{med}$  caracterizou de forma razoável a ocorrência de raios nos SCM, sugerindo uma forte relação inversamente proporcional com a atividade elétrica de raios.

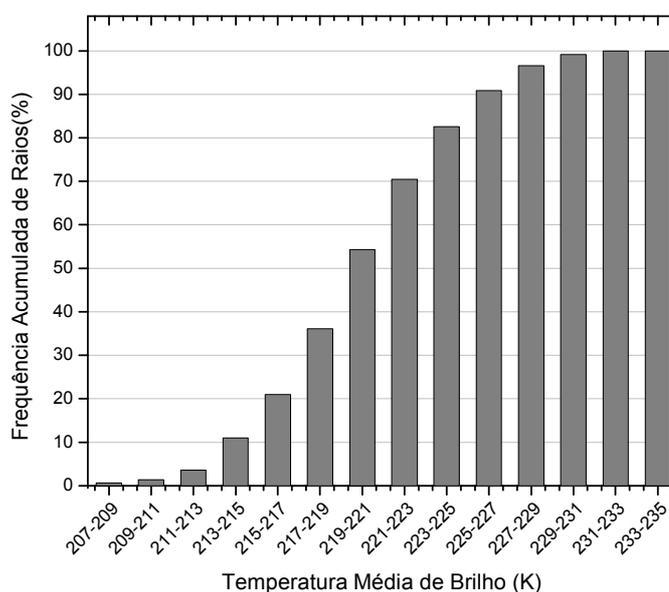


Figura 6. 15 - Frequência Acumulada (%) de ocorrência de raios em função da Temperatura Média dos SCM.

A caracterização da relação empírica entre a ocorrência de raios e a variável  $T_{med}$  foi realizada através da determinação do valor médio de raios para cada intervalo de classe de temperatura. A Figura 6.16 mostra o comportamento encontrado do número médio de raios e desvio padrão em função da  $T_{med}$  e a curva que melhor se ajustou a essa relação. Houve um aumento no número médio de raios conforme a temperatura média do topo do SCM diminuiu, de forma que foi possível ajustar uma função exponencial com alto coeficiente de determinação (0,97). A função exponencial ajustada aos dados com razoável coerência é expressa da seguinte forma:

$$NMR = 4.10^{14} * \exp(-0,13 * T_{med}) \quad (6.4)$$

Em que,

$NMR$  é o número médio de raios;

$T_{med}$  é o valor da Temperatura Média de Brilho em Kelvin.

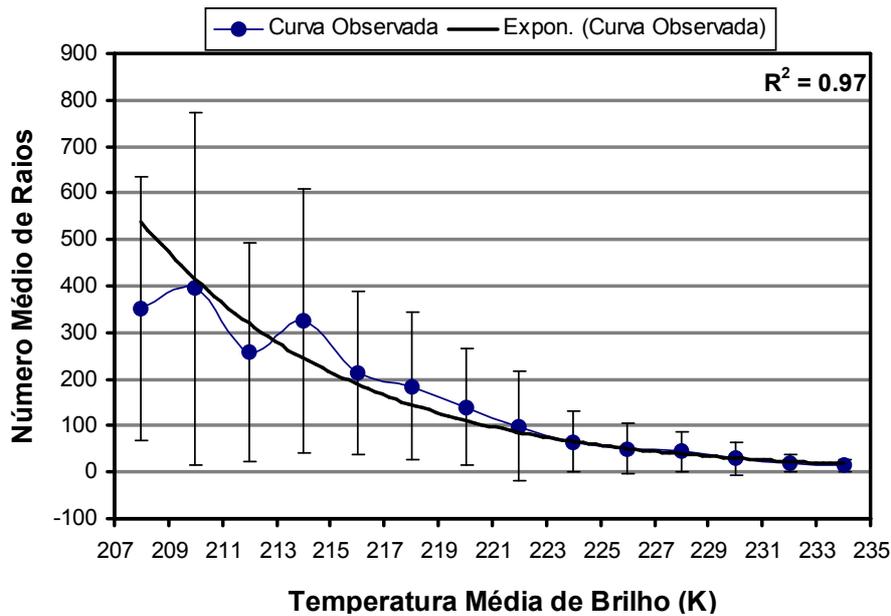


Figura 6. 16 - Variação do número médio de raios em função da Temperatura Média de Brilho, seu desvio padrão e curva exponencial ajustada para a ocorrência média de raios.

Uma relação bastante regular entre o aumento da quantidade média de raios e a diminuição da temperatura até aproximadamente 215 K foi observada. Após este valor, a variabilidade encontrada (em associação com o aumento do desvio padrão) deveu-se a diminuição do número de casos de SCM com ocorrência de raios em um intervalo de 15 minutos (como mostra a Figura 6.13 (b)). A quantidade média de raios ocorreu quando a  $T_{med}$  possuiu valores entre 219 K e 221 K. Houve um rápido aumento na quantidade média de raios quando a temperatura atingiu valores abaixo de 225 K, sendo que o máximo (mínimo) de atividade elétrica atingido ocorreu quando a temperatura alcançou uma média de 210 K (234 K), apresentando 395 raios e 14 raios respectivamente. O aumento significativo no número médio de raios a partir do limiar de 225 K pode estar associado à intensa formação de partículas de gelo, visto que abaixo de 233 K criam-se

as condições termodinâmicas propícias para a intensa existência de partículas de gelo (WALLACE e HOBBS, 1977). Esses resultados estão em concordância com os encontrados por alguns autores (GOODMAN e MACGORMAN, 1986; GOODMAN et al, 1988, DOTZEK et al, 2005 e SCOFIELD e KULIGOWSKI, 2005). Goodman e Macgorman (1986), analisando 10 CCM sobre os EUA, encontraram um elevado aumento no número de raios para temperaturas abaixo de 220 K, enquanto que Dotzek et al (2005) encontraram um limiar de 203 K. Por outro lado, Scofield e Kuligowski (2005) verificaram alta incidência de raios para temperaturas abaixo de 248 K. Portanto, apesar dos limiares de temperatura encontrados em diversas regiões serem diferentes (pode estar associado a condições meteorológicas locais, a altura da tropopausa ou as considerações para a definição dos SCM), em geral há uma alta correspondência entre a temperatura média do topo dos SCM no IR e a ocorrência de atividade elétrica de raios.

As análises das propriedades termodinâmicas  $T_{\min}$  e  $T_{\min9}$  também mostraram-se eficientes em caracterizar (diferenciar) membros de SCM com e sem raios de forma semelhante (não mostrado) ao observado para a variável  $T_{\text{med}}$ , isto é, membros de sistemas com raios possuem em média menores  $T_{\min}$  e  $T_{\min9}$  em relação aos que não reportaram raios. A relação média entre a ocorrência de raios em função desses dois parâmetros mostrou importantes detalhes entre as mesmas e um comportamento mais regular em relação à encontrada para a variável  $T_{\text{med}}$  (Figura 6.16). Desta forma, torna-se mais pertinente comparar a representatividade apenas dessa relação média em relação à  $T_{\min}$  e  $T_{\min9}$ . A Figura 6.17 mostra o comportamento do número médio de raios e desvio padrão em função da  $T_{\min}$  (Figura 6.17 (a)) e  $T_{\min9}$  (Figura 6.17 (b)) e as respectivas curvas ajustadas para cada relação de dispersão encontrada. Nota-se, conforme também observado para a  $T_{\text{med}}$ , que um decréscimo nas temperaturas implica em um aumento na ocorrência de raios e com isso foi possível ajustar uma curva exponencial para as duas relações de dispersão com alto coeficiente de determinação de 0,978 e 0,981 para a  $T_{\min}$  e  $T_{\min9}$ , respectivamente. As parametrizações encontradas são expressas da seguinte forma para  $T_{\min}$  e  $T_{\min9}$ , respectivamente:

$$NMR = 3.10^9 * \exp(-0,0842 * T_{min}) \quad (6.5)$$

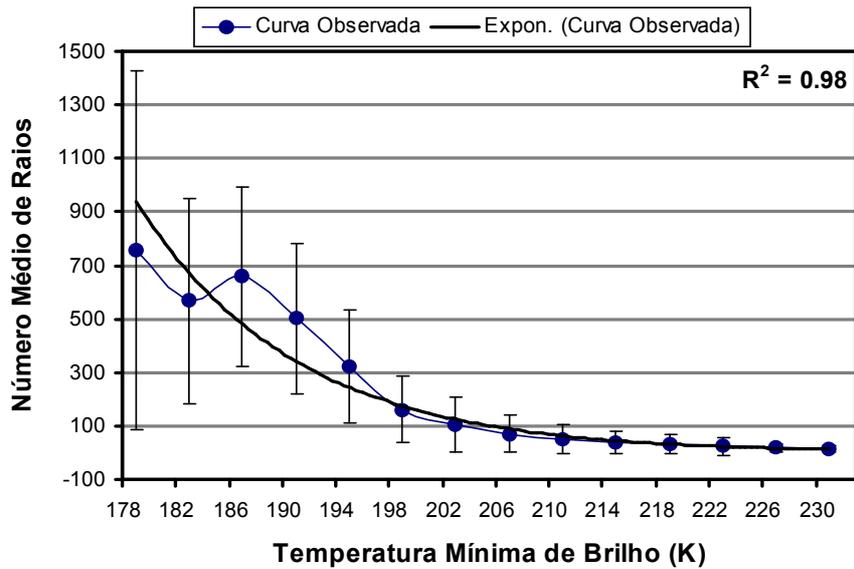
$$NMR = 3.10^{10} * \exp(-0,0937 * T_{min9}) \quad (6.6)$$

Em que,

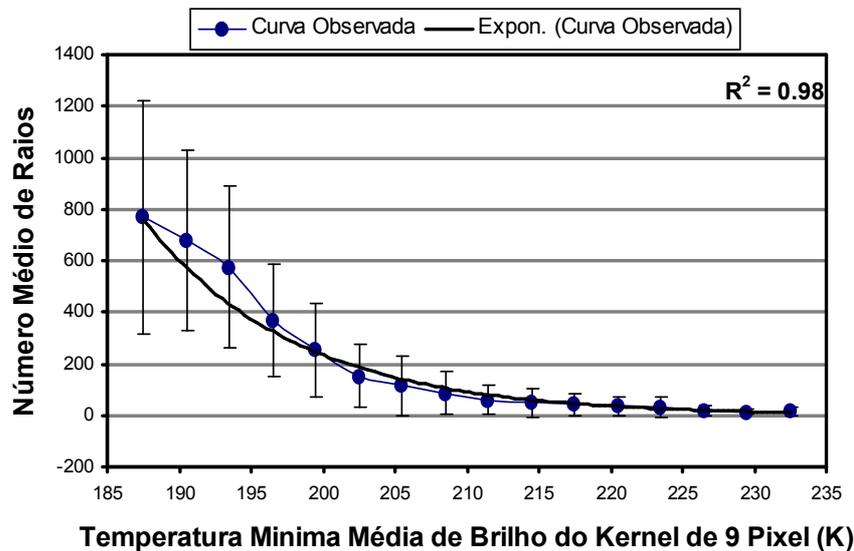
$NMR$  é o número médio de raios;

$T_{min}$  é a temperatura mínima de brilho do SCM em Kelvin;

$T_{min}$  é a temperatura mínima de brilho do *kernel* de 9 *pixel* do SCM em Kelvin.



(a)



(b)

Figura 6. 17 - Variação do número médio de raios, desvio padrão e curva exponencial ajustada em função da (a) Temperatura Mínima de Brilho e (b) Temperatura Mínima Média de Brilho do *Kernel* de 9 *Pixel*.

Embora uma diminuição na  $T_{\min}$  e  $T_{\min9}$  impliquem ambas em um aumento no número médio de ocorrência de raios (mostrada também pela relação exponencial negativa), a atividade de raios em função da segunda propriedade física possui um comportamento mais regular do que a primeira (Figura 6.17), como evidenciado também pelo valor do coeficiente de determinação em torno de 0,981 contra 0,978 para a  $T_{\min9}$  e  $T_{\min}$ , respectivamente. Esta observação sugere que a utilização da temperatura média entre o *Kernel* dos nove *pixels* mais frios ( $T_{\min9}$ ) do sistema possui uma correspondência mais direta com a ocorrência de raios. Além disso, pelo fato de ser o resultado de uma média, a mesma pode evitar possíveis erros na utilização apenas da temperatura do *pixel* mais frio do sistema ( $T_{\min}$ ) na caracterização da ocorrência média de raios. Assim, um mais intenso crescimento na ocorrência de raios foi caracterizado em função da diminuição da variável  $T_{\min9}$  em relação à  $T_{\min}$ , onde quantidade significativa de raios foi reportada a partir de um limiar mínimo de 215 K (média de 39 raios) até 179 K (média de 757 raios) e de 211 K (média de 59 raios) até 187 K (média de 769 raios), respectivamente.

Esta mais forte correlação entre um aumento na ocorrência média de raios e a diminuição da variável  $T_{\min9}$  em comparação a variável  $T_{\min}$  foi notado também pelos valores do coeficiente angular de 0,0937 contra 0,0842, respectivamente. Para ambas, os valores de desvio padrão foram maiores associado às menores temperaturas (maior variabilidade na ocorrência de raios), devendo-se a pequena população de eventos com baixas temperaturas. Esses resultados em geral indicam que a temperatura média entre os nove *pixels* mais frios possui uma correspondência mais estreita com a formação e ocorrência de partículas de gelo no interior dos SCM, caracterizando assim de forma mais direta a ocorrência de raios em relação às demais variáveis  $T_{\text{med}}$  e  $T_{\min}$ .

#### **6.2.4 Taxa de Variação da Temperatura Média de Brilho (TVT<sub>med</sub>)**

Como evidenciado na seção anterior, a propriedade física  $T_{\text{med}}$  demonstrou-se um parâmetro físico fortemente associado à atividade elétrica de raios de SCM. Desta forma, torna-se importante avaliar se a variabilidade (aumento ou decréscimo) dessa temperatura dos SCM entre duas imagens consecutivas do satélite GOES também

reflete algum comportamento físico com a atividade elétrica de raios. A variável utilizada para essa avaliação foi a Taxa de Variação da Temperatura Média de Brilho ( $TVT_{med}$ ), ou seja, a razão entre o aumento ou decréscimo da  $T_{med}$  dos SCM entre duas imagens de satélites consecutivas e o intervalo de tempo entre as duas imagens, sendo expressa em  $Kelvin.hora^{-1}$ . Fisicamente, essa variável pode estar associada a dois fatores: ao crescimento/decrescimento da altura média do SCM e/ou a variação na composição dos diferentes tipos de nuvens que compõem o SCM.

As mesmas limitações realizadas para a caracterização da propriedade física  $A_e$  foram aplicadas, isto é, consideraram-se apenas aqueles membros das famílias de SCM que o mesmo e seu antecessor (o próprio sistema, só que na imagem anterior) não foram gerados devido à falta de imagem e também não surgiram como resultado de um caso de divisão (*Split*) ou junção (*Merge*) de sistemas. Realizadas estas considerações, os membros das famílias dos SCM foram separados em dois grupos: o primeiro associado a membros que não reportaram a ocorrência de raios e o segundo aos que tiveram raios em um intervalo médio de 15 minutos. A Figura 6.18 mostra a distribuição de frequência para a propriedade física  $TVT_{med}$  associada aos membros de famílias de SCM (Figura 6.18 (a)) que não apresentaram raios e os que apresentaram a ocorrência de raios (Figura 6.18 (b)) entre um intervalo de 15 minutos centrado no horário da passagem do satélite.

Ao todo, reportou-se a ocorrência de 14.253 membros de famílias de SCM que não apresentaram raios em um intervalo de 15 minutos. Como pode ser observada na Figura 6.18 (a), essa contingência de membros de SCM possui em sua maioria  $TVT_{med}$  próxima de zero, de forma que essa distribuição é mais bem caracterizada por uma função de distribuição do tipo Gaussiana altamente simétrica. Esta observação foi reforçada pela verificação que mais de 95 % dos eventos possuíam valores entre  $-6 K.hr^{-1}$  e  $8 K.hr^{-1}$ , enquanto uma parcela de membros de SCM significativamente menor encontrou-se externa a esses valores. A classe de  $TVT_{med}$  com maiores (menores) ocorrências possuiu valores entre  $0 K.hr^{-1}$  e  $2 K.hr^{-1}$  ( $-18 K.hr^{-1}$  e  $-16 K.hr^{-1}$ ), representando 29 % (0,04 %) do total de eventos de membros de SCM sem a presença

de raios. Essas características atribuíram uma  $TVT_{med}$  média de 1,3 K e um limiar mínimo (máximo) de aproximadamente -31,1 K (25,4 K). Desta forma, os SCM que não apresentaram raios em um intervalo de 15 minutos estiveram condicionados a acréscimos pequenos (entorno de 1,3 K), porém positivos de  $T_{med}$ . Este fato possivelmente indica que o aumento da  $T_{med}$  dos SCM esteja contribuindo por uma menos eficaz formação e intensificação do conteúdo de partículas gelo no interior dos SCM, que em consonância com outros parâmetros físicos está desfavorecendo a ocorrência de atividade elétrica de raios nestes tipos de sistemas.

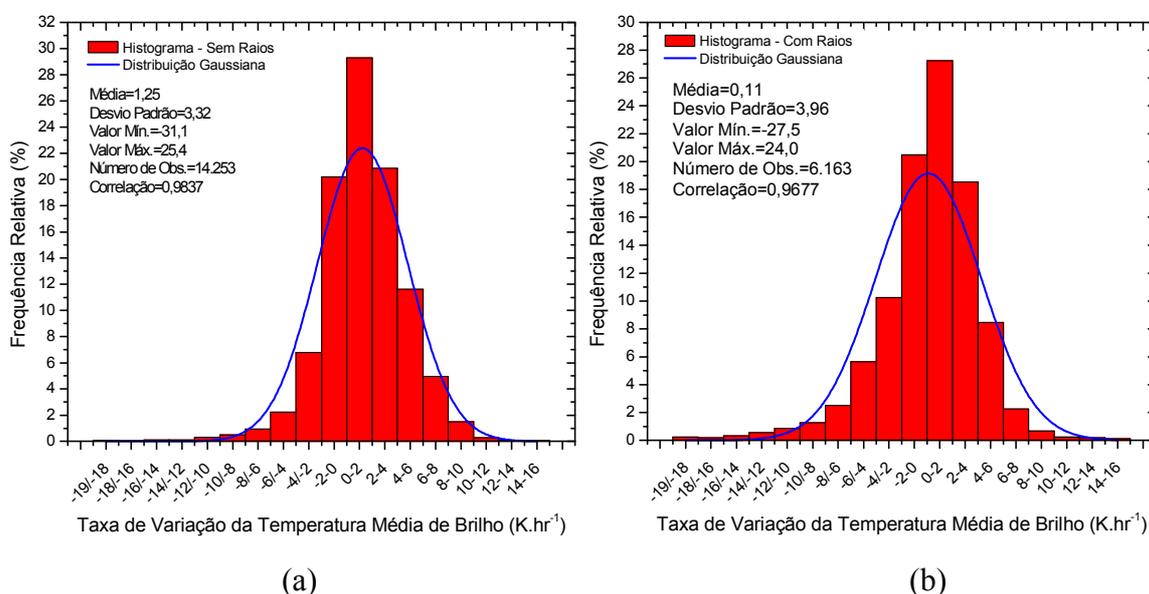


Figura 6.18 - Histograma de frequência para a propriedade física Taxa de Variação da Temperatura Média de Brilho ( $K.hr^{-1}$ ) dos membros de SCM que (a) não apresentaram raios e (b) para membros dos SCM que apresentaram raios e curvas ajustadas para as duas distribuições.

Os membros das famílias de SCM que apresentaram ocorrência de raios (Figura 7.18 (b)) foram caracterizados por uma distribuição de  $TVT_{med}$  semelhante aos que não tiveram a presença de raios, porém detalhes importantes foram notados. Para esta análise reportou-se a ocorrência de aproximadamente 464.921 raios, sendo esses raios associados a uma contingência de 6.163 membros do ciclo de vida dos SCM. A maioria desses membros esteve associada à  $TVT_{med}$  próxima de zero, como é bem ilustrado pela

distribuição ajustada Gaussiana. Mais de 95 % dos membros das famílias dos SCM analisados estiveram relacionados à  $TVT_{med}$  entre  $-8 \text{ K.hr}^{-1}$  e  $8 \text{ K.hr}^{-1}$ , enquanto uma pequena parcela dos eventos encontrou-se externa a este intervalo. No entanto, quase 42 % (58%) dos eventos possuíam valores negativos (positivos) de variação de  $T_{med}$ , enquanto os membros das famílias de SCM sem ocorrência de raios apresentaram 31 % e 69 %, respectivamente.

A maior ocorrência de decréscimo de  $T_{med}$  para sistemas com raios em relação ao sem raios, representando uma diferença de 11 %, indicou que a intensidade da queda da temperatura possibilitou uma maior formação de gelo, aumentando assim a probabilidade de ocorrência de raios. As maiores ocorrências de eventos foram reportadas para valores entre  $0 \text{ K.hr}^{-1}$  e  $2 \text{ K.hr}^{-1}$  (semelhantemente aos eventos sem ocorrência de raios, Figura 7.18 (a)), representando aproximadamente 27 % do total de membros de SCM. A classe de variação de  $T_{med}$  entre  $14 \text{ K.hr}^{-1}$  e  $16 \text{ K.hr}^{-1}$  apresentou a menor ocorrência de eventos (enquanto para os eventos sem a presença de raios encontram-se entre  $-16 \text{ K.hr}^{-1}$  e  $-18 \text{ K.hr}^{-1}$ ). Estas características conferiram uma variação média da  $T_{med}$  de  $0,11 \text{ K.hr}^{-1}$  e um limiar mínimo (máximo) de aproximadamente  $-27,5 \text{ K.hr}^{-1}$  ( $24 \text{ K.hr}^{-1}$ ). Desta forma, os resultados para os membros de SCM que apresentaram ocorrência de raios estiveram associados em média a um acréscimo de  $T_{med}$ , porém pequeno em relação a sua amostra e menor em relação aos eventos que não apresentaram raios (Figura 6.18 (a)). Acredita-se, portanto, que a ocorrência de raios em um intervalo de 15 minutos associados à SCM que apresentaram um aumento (no entanto esses aumentos são relativamente pequenos) da  $T_{med}$  deveu a este acréscimo ocorrer entre temperaturas mais baixas, ou seja, em regiões onde mesmo havendo um aumento da  $T_{med}$ , já existisse um limiar mínimo de concentração de partículas de gelo para potencializar o início do processo de eletrificação das nuvens convectivas.

As principais diferenças entre as distribuições analisadas anteriormente são mais bem percebidas através da Figura 6.19, a qual ilustra a comparação entre as curvas ajustadas para os membros de famílias de SCM que não apresentaram raios (azul) e os que

tiveram a presença de raios (vermelha). A análise visual demonstra que as  $TVT_{med}$  para o grupo sem raios foram um pouco maiores em relação aos com presença de raios. As maiores ocorrências para os dois grupos estiveram associadas à  $TVT_{med}$  entre  $0 \text{ K.hr}^{-1}$  e  $2 \text{ K.hr}^{-1}$ . Os membros sem a presença de raios possuíram 4 % a mais de eventos nesta classe de variação de temperatura. Abaixo (acima) dessa classe de valores, isto é, para valores negativos (positivos) de  $TVT_{med}$ , o grupo de SCM com raios (sem raios) preponderantemente apresentou mais (menos) ocorrências de eventos, o que pode ser notado também pelos valores de assimetria  $-0,77$  ( $-1,05$ ). Para valores aproximadamente acima de  $12 \text{ K.hr}^{-1}$  e abaixo de  $-12 \text{ K.hr}^{-1}$ , as duas curvas foram coincidentes, indicando que houve ocorrência de poucos membros de SCM com valores muito baixos e altos de variação de temperatura. Mesmo havendo considerável  $TVT_{med}$  positiva para os dois grupos, houve uma maior quantidade de membros com raios associados a valores negativos de  $TVT_{med}$  em relação aos sem raios, o que pode ser percebido pelo fato de o grupo com raios apresentar aproximadamente uma variação de temperatura média de  $1,14 \text{ K.hr}^{-1}$  a menos em relação aos sem raios. A ocorrência de raios associada à  $TVT_{med}$  positiva pode estar relacionada à variação de temperatura entre  $T_{med}$  mais baixas, enquanto as ocorrências de atividade elétrica de raios para  $TVT_{med}$  negativa mostram que a diminuição da  $T_{med}$  tende a potencializar a formação de partículas de gelo no interior dos SCM. Portanto, a propriedade física  $TVT_{med}$  demonstra diferenças entre os membros de famílias de SCM com e sem raios, porém de uma forma mais tímida em comparação as demais propriedades discutidas nas seções anteriores.

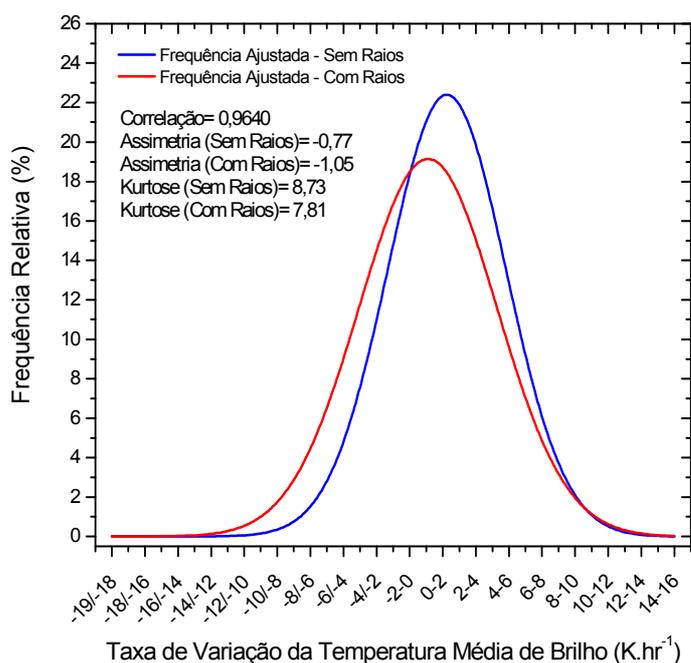


Figura 6. 19 - Análise comparativa entre a curva ajustada para o histograma de Taxa de Variação da Temperatura Média de Brilho dos membros de SCM que não apresentaram raios (azul) e a curva ajustada para a amostra de Taxa de Variação da Temperatura Média que apresentaram raios (vermelho).

Na Figura 6.20 pode ser observado a variação da frequência acumulada de raios em função das classes de  $TVT_{med}$ . Houve um aumento bem tímido de ocorrência de raios para classes menores que  $-6 \text{ K.hr}^{-1}$ , as quais, dos 464.921 raios reportados, representam apenas aproximadamente 13 % desses raios, enquanto que mais de 90 % dos raios ocorrem para valores abaixo de  $4 \text{ K.hr}^{-1}$ . A pouca ocorrência de raios para  $TVT_{med}$  abaixo de  $-6 \text{ K.hr}^{-1}$  e acima de  $6 \text{ K.hr}^{-1}$  deveu-se aos poucos casos de SCM associados a essas classes, os quais representam menos de 6 % e 4 % do total de eventos, respectivamente (Figura 7.18 (b)). Importante ressaltar que quase 50 % do total de raios estiveram associados à SCM com  $TVT_{med}$  negativa e que a classe com a maior ocorrência de raios encontrou-se entre  $0 \text{ K.hr}^{-1}$  e  $2 \text{ K.hr}^{-1}$  (10 % do total de raios), seguida pela classe com  $TVT_{med}$  entre  $-2 \text{ K.hr}^{-1}$  e  $0 \text{ K.hr}^{-1}$  (7 % do total de raios). A grande ocorrência de raios para essas duas classes possivelmente está associada à alta frequência de eventos de membros de SCM para as mesmas, as quais representaram 27 % e 20 % (Figura 6.18 (b)) do total de eventos, respectivamente. De maneira geral, percebe-se que metade das ocorrências de raios estiveram associadas a membros das

famílias de SCM que apresentaram um decréscimo e a outra parte a um acréscimo da temperatura entre duas imagens consecutivas de satélite, não sendo essas variações de temperaturas relativamente muito altas.

As observações destacadas no parágrafo anterior possivelmente estão relacionadas a duas hipóteses. Primeiro a ocorrência de raios associado a um decréscimo da  $T_{med}$  do SCM poderia ser um indicativo que a diminuição da temperatura média produziria uma condição termodinâmica favorável a formação de partículas de gelo e conseqüentemente a eletrificação das nuvens convectivas. Contudo, a ocorrência de atividade elétrica de raios associados à SCM que tiveram um aumento na  $T_{med}$  sugere a hipótese que estas temperaturas associadas à  $TVT_{med}$  já fornecem condições propícias ao início da ocorrência de raios, sendo que um aumento da temperatura desses SCM não altera as condições termodinâmicas a ponto de diminuir a ocorrência de raios.

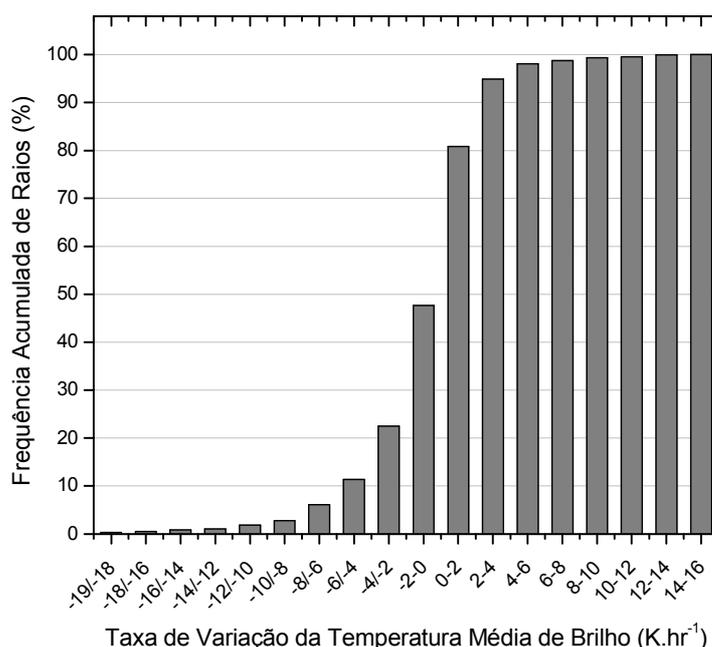


Figura 6. 20 - Frequência Acumulada (%) de ocorrência de raios em função da Taxa de Variação da Temperatura Média de Brilho dos SCM.

A Figura 6.21 exibe o comportamento do número médio de raios em função da  $TVT_{med}$ , em que esse resultado ratifica aqueles discutidos no parágrafo anterior e mostrados também na Figura 6.20. Assim, observa-se que não há uma relação empírica estatística

bem definida entre essas duas variáveis, mostrando que o número médio de raios apresenta valores médios entre 25 e 100 raios associado a um significativo desvio padrão. Desta forma, não há uma  $TVT_{med}$  mais favorável à ocorrência de atividade elétrica de raios, podendo-se observar a atividade elétrica de raios para qualquer valor analisado. Estes resultados sugerem que a intensidade de acréscimo e decréscimo da  $T_{med}$  não favorece uma preferencial ocorrência de atividade elétrica de raios, indicando que possivelmente outros parâmetros dinâmicos ( $A_e$ ) e termodinâmicos (o próprio valor da temperatura) tenham talvez uma relação mais direta com o processo de eletrificação das tempestades. Logo, a  $TVT_{med}$  demonstra ser um parâmetro físico que merece estudos mais detalhados para que possa ser analisada a viabilidade de ser utilizada para realização de diagnóstico de severidade e prognóstico da atividade elétrica de raios.

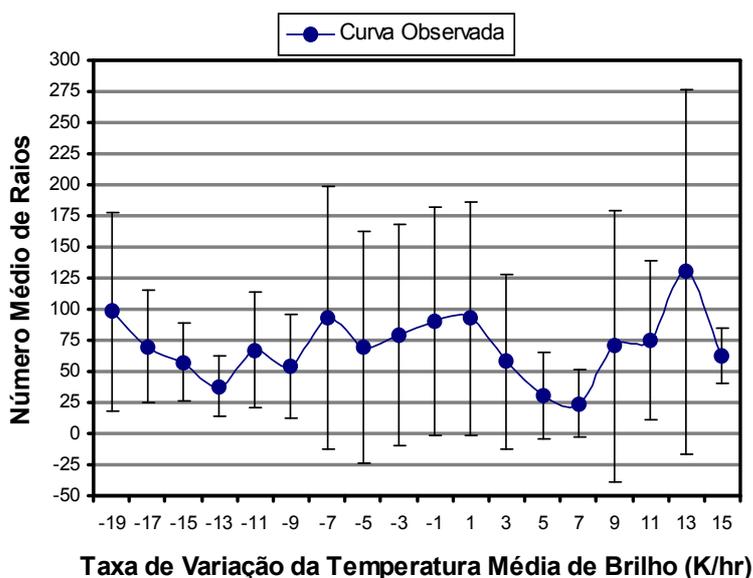
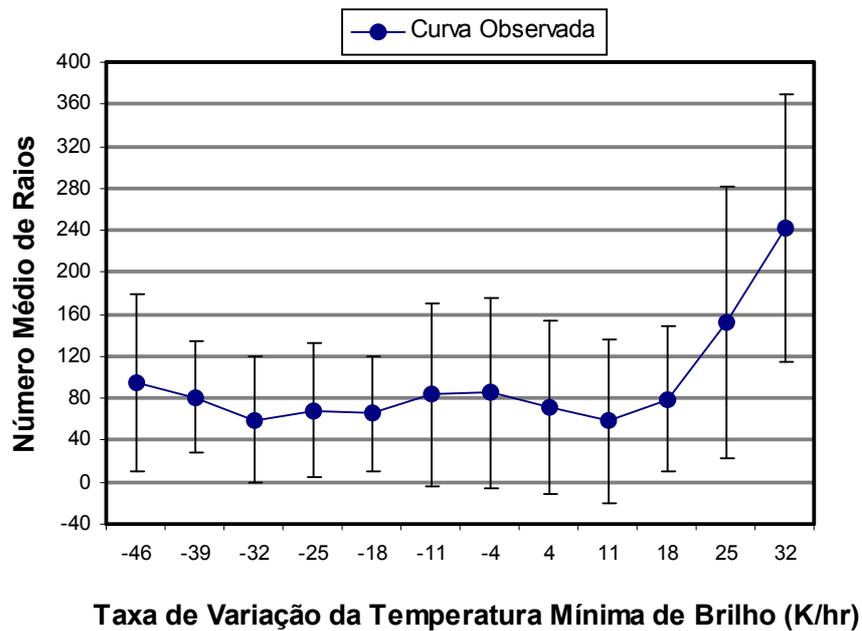


Figura 6. 21 - Variação do número médio de raios em função da Taxa de Variação da Temperatura Média de Brilho e seu desvio padrão.

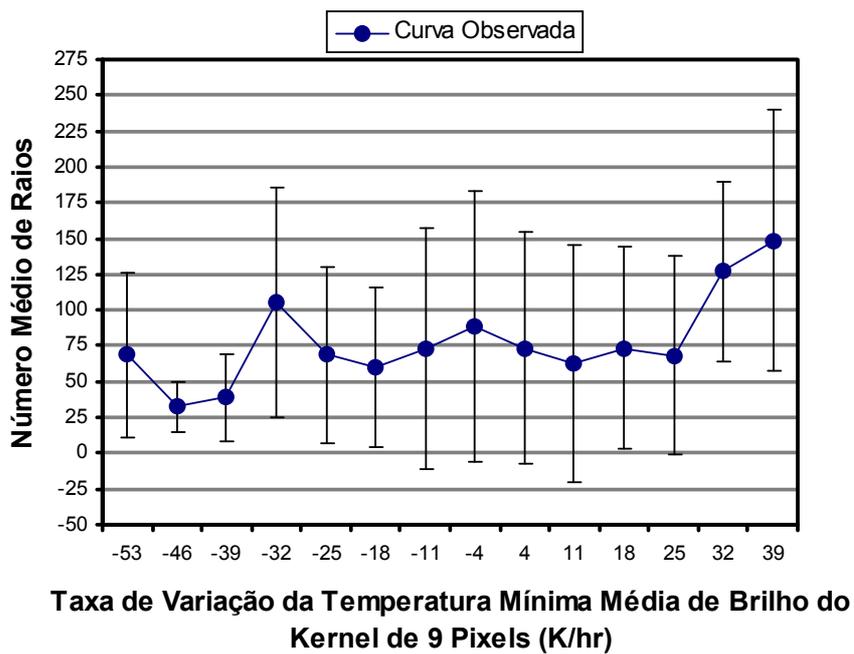
Ressalta-se que resultados similares ao reportado para a  $TVT_{med}$ , também foram observados para as variáveis  $TVT_{min}$  e  $TVT_{min9}$  (não mostrado). Estas duas propriedades também não caracterizaram (diferenciaram) de forma significativa os membros de SCM que tendem a apresentar raios e aqueles sem a presença de raios. Portanto, apenas em nível de comparação entre os resultados da propriedade  $TVT_{med}$  com as  $TVT_{min}$  e  $TVT_{min9}$  e de forma sintética será apresentado e discutido apenas as diferenças baseada

na relação de dispersão entre a ocorrência média de raios em função de cada uma dessas variáveis. A Figura 6.22 mostra o comportamento médio da ocorrência de raios em função da  $TVT_{\min}$  (Figura 6.22 (a)) e da  $TVT_{\min 9}$  (Figura 6.22 (b)). De modo geral, observa-se a ausência de uma correlação bem definida entre a ocorrência média de raios e cada uma dessas propriedades físicas (como também foi observado para a  $TVT_{\text{med}}$ , Figura 6.21). O número médio de raios possuiu uma pequena variação média entre 50 e 100 raios para a variabilidade nos valores de  $TVT_{\min}$  e  $TVT_{\min 9}$ . Além disso, a tímida diminuição (aumento) no número de raios para valores mais baixos (altos) observada para as duas propriedades foram fisicamente pouco significativas, visto a pouca população de eventos de membros de SCM com esses valores.

Esses resultados, mais uma vez, sugerem que aparentemente incrementos e/ou decréscimo na  $T_{\text{med}}$ ,  $T_{\min}$  e  $T_{\min 9}$  possuem pouca correspondência ou afetam de modo pouco significativo (ausência de relação física) a ocorrência de raios, indicando que outras propriedades termodinâmicas (a própria  $T_{\text{med}}$ ,  $T_{\min}$  e  $T_{\min 9}$ ) e dinâmicas (correntes ascendentes) podem estar atuando concomitantemente de forma mais direta no processo de eletrificação dos SCM e conseqüentemente na ocorrência de raios. Desta forma, esses resultados indicam que as propriedades físicas  $TVT_{\text{med}}$ ,  $TVT_{\min}$  e  $TVT_{\min 9}$  sejam parâmetros que necessitam serem analisados mais detalhadamente antes de serem empregados para diagnóstico de severidade e prognóstico da atividade elétrica de raios.



(a)



(b)

Figura 6. 22 - Variação do número médio de raios e seu desvio padrão em função da (a) Taxa de Variação da Temperatura Mínima de Brilho e (b) Taxa de Variação da Temperatura Mínima Média de Brilho do *Kernel* de 9 *Pixel*.

### 6.2.5 Fração Convectiva (FC)

As propriedades físicas  $R_e$  e  $T_{\min 9}$  mostraram como discutido nas seções anteriores (seção 6.2.1 e 6.2.3, respectivamente), uma forte relação com a ocorrência de atividade elétrica de raios. Desta forma, um importante parâmetro também associado com essas variáveis a ser analisado com relação à atividade elétrica é a Fração Convectiva (FC). A FC basicamente é a razão da área coberta com nuvens com  $T_B$  no IR menores que 210 K e a área com  $T_B$  menores que 235 K dos sistemas (MACHADO et al, 1998), sendo assim um indicativo da proporção do tamanho dos centros convectivos em relação à área total dos SCM. Desta forma, a análise desse parâmetro torna-se relevante visto que, como sugerido pelo trabalho de Morales et al (2004), o tamanho da área convectiva dos SCM está relacionado com o desenvolvimento vertical e quantidade de partículas de gelo no interior dos SCM, caracterizando as regiões mais favoráveis para ocorrência de atividade elétrica. Assim, a partir dos 8.158 SCM em análise, analisaram-se apenas aqueles membros dos SCM que não foram gerados como um resultado de falta de imagem (imagem virtual). Com esta limitação, reportou-se a ocorrência de aproximadamente de 947.976 raios. Desta forma, no intuito de caracterizar através da análise da variável FC os SCM que em um intervalo de 15 minutos não apresentaram e os que tiveram a presença de raios, construiu-se histogramas de frequência para os dois grupos de SCM. A Figura 6.23 mostra os resultados encontrados para a distribuição de FC associado aos sistemas que não apresentaram (Figura 6.23 (a)) e para aqueles que apresentaram atividade (Figura 6.23 (b)) elétrica de raios.

Em geral, as distribuições de FC para os SCM que não apresentaram e para os que tiveram a ocorrência de raios, mostraram-se bastante semelhantes, porém importantes características podem ser evidenciadas para cada grupo. Considerando as limitações descritas no parágrafo anterior para analisar a variável FC, reportou-se a contingência de aproximadamente 3.579 observações de membros de SCM que não apresentaram ocorrência de raios. A distribuição de frequência dos eventos de FC sem a presença de raios (Figura 6.23 (a)) mostra que houve um rápido decréscimo no número de eventos conforme o aumento do valor da FC, indicando uma alta concentração de SCM

com os mais baixos valores de FC. A melhor curva que caracterizou essa distribuição foi uma curva de distribuição do tipo exponencial negativa (valor de correlação de 0,97). Mais de 90 % dos membros de SCM sem raios possuíram aproximadamente 25% da sua área associada a células convectivas, enquanto que menos de 1 % dos membros de todos os SCM apresentaram mais de 55 % de sua área associada a células convectivas. A maior (menor) ocorrência de membros de SCM por classe de FC, a qual representou aproximadamente 53 % (0,08 %) do total de eventos de membros de SCM, foi caracterizada com 2,5 % (70 %) da sua área associada a temperaturas menores que 210 K. Essas características da distribuição de membros de SCM que não apresentaram ocorrência de raios conferiram que em média 8 % da área desses SCM estiveram associadas a células convectivas. O limiar mínimo (máximo) de FC encontrado para este grupo de membros de SCM foi aproximadamente de 0,0073 % (65 %). De maneira geral, os resultados indicaram que SCM que não apresentaram raios em um intervalo de 15 minutos aparentemente possuíram uma pequena parcela de sua área associada a regiões convectivas. Pode-se especular que um menos intenso desenvolvimento vertical e processos de condensação no interior dos SCM podem estar associados à formação de uma menor região convectiva que, como consequência, esteja possibilitando a formação de um número insuficiente de partículas de gelo para a ocorrência de atividade elétrica de raios.

Por outro lado, nota-se que os membros de SCM que apresentaram ocorrência de raios (Figura 6.23 (b)) possuíram em geral uma maior região convectiva associada a sua área total. Este fato pode ser verificado, percebendo-se que foram reportados 6.539 membros de SCM com ocorrência de raios, ou seja, quase 3.000 eventos a mais em relação aos SCM que não tiveram raios. Isto indica que a maior parte de casos de FC ocorreu para SCM que tenderam a apresentar ocorrência de atividade elétrica de raios. De todos estes membros de SCM, mais de 90 % possuíram FC menores que 40 % de sua área total, enquanto menos do que 1 % dos membros dos SCM possuíram 65 % da sua área associada a regiões convectivas. Importante ressaltar que a classe de FC com a maior (menor) ocorrência de eventos representou 40 % (0,3 %) do total de observações, tendo os SCM pertencentes a estas classes uma FC média de 2,5 % e 0,68, respectivamente.

Estas características conferiram um valor médio de FC para os membros dos SCM que apresentaram ocorrência de raios de aproximadamente 13 % e um limiar mínimo (máximo) de 0,0047 % (74 %). Logo, pode-se observar que esses sistemas possuíram em média maiores regiões com  $T_B$  no IR menores que 210 K em relação aos SCM que não apresentaram ocorrência de raios. Esses resultados sugerem que SCM com tendência a apresentar raios possuem uma dinâmica diferenciada que potencializa uma convecção mais intensa, de forma a favorecer uma maior formação de partículas de gelo, aumentando a probabilidade de ocorrência de raios.

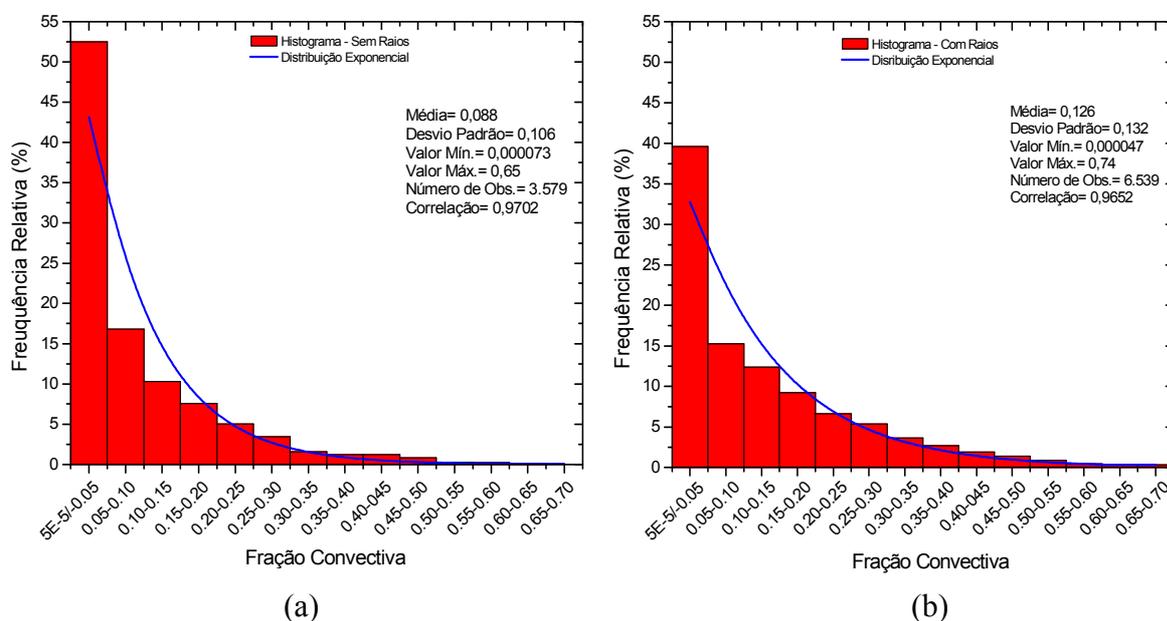


Figura 6. 23 - Histograma de frequência da propriedade física Fração Convectiva dos membros de SCM que (a) não apresentaram raios e (b) para membros dos SCM que apresentaram raios e as curvas ajustadas.

A Figura 6.24 mostra de forma mais nítida as características do parâmetro FC que diferencia os membros de SCM que não apresentaram raios (curva azul) e para os que tiveram a presença de raios (curva vermelha). Como discutido anteriormente, uma quantidade significativa dos membros de SCM sem a presença de raios ocorreram para baixos valores de FC, enquanto os sistemas que apresentaram ocorrência de raios possuíram maiores regiões com  $T_B$  abaixo de 210 K. Estas observações são confirmadas, verificando que as FC abaixo de 15 % foram caracterizadas em sua

maioria em SCM que não apresentam raios em relação aos demais. Os SCM que possuíram ocorrência de raios tiveram regiões convectivas acima de 15 %. Para os dois grupos, a classe de FC com maior ocorrência de membros de SCM possuiu valores menores que 5 %, no entanto o grupo sem ocorrência de raios teve notoriamente 13 % a mais de eventos em relação ao grupo com a presença de ocorrência de raios. Em média, os SCM com raios apresentaram quase 4 % a mais de FC em relação aqueles que não apresentaram raios, sendo que para o valor máximo de FC esta diferença representou 10%. Os resultados de maneira geral, semelhantemente ao encontrado para as variáveis termodinâmicas  $T_{med}$ ,  $T_{min}$  e  $T_{min9}$ , indicam que o tamanho da área dos SCM associada com as mais baixas temperaturas ( $T_B$  inferiores a 210 K) é um parâmetro que distingue de forma razoável os SCM com convecção profunda daqueles que não produzem atividade elétrica de raios.

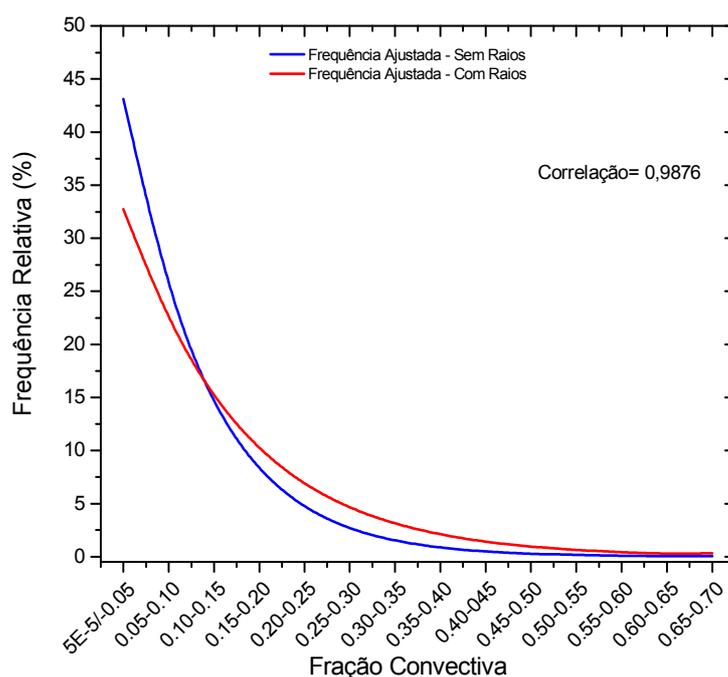


Figura 6. 24 - Análise comparativa entre a curva ajustada para o histograma de Fração Convectiva de membros de SCM que não apresentaram raios (azul) e a curva ajustada para a amostra que apresentaram raios (vermelho).

A significativa correlação encontrada entre o tamanho relativo das regiões convectivas e os SCM caracterizados com atividade elétrica de raios, discutida no parágrafo anterior,

ressalta a importância dessa variável como forçante para a ocorrência de raios. Portanto, com o objetivo de avaliar quais valores de FC são mais propícios a desencadear a ocorrência de raios, contabilizou-se o número de raios para cada classe de FC. A Figura 6.25 mostra a frequência acumulada de raios em função das classes de FC.

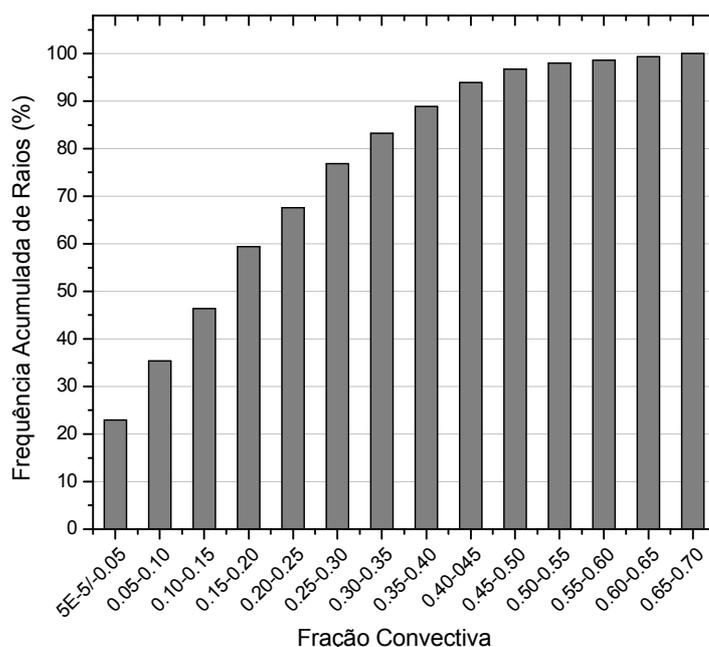


Figura 6. 25 - Frequência Acumulada (%) de ocorrência de raios em função da Fração Convectiva dos SCM.

Uma ocorrência de raios mais tímida é reportada para valores de FC maiores que 50 %, devendo-se aos poucos eventos de SCM pertencentes a estas classes como mostrado na Figura 6.23 (b) (os quais representaram menos de 1 % do total de eventos de membros de SCM com raios). Dos 947.976 raios reportados, mais de 90 % ocorreram para SCM que apresentam menos de 45 % (classes no qual se encontram mais de 98 % dos eventos de membros de SCM com raios) da sua área associada a centros convectivos. Por outro lado, apenas 23 % dos raios ocorreram para FC menores que 5 % (50 % dos eventos de membros de SCM com raios pertencem a esta classe, Figura 6.23 (b)). Mais de 50 % das ocorrências de raios foram reportadas para os membros dos SCM que possuíram menos de 20 % da sua área associada a centros convectivos. Portanto, observa-se de maneira geral, que a maioria dos membros de SCM com ocorrência de atividade elétrica de raios possuiu menos da metade de sua área associada a regiões convectivas. Desta

forma, esses resultados demonstram que a propriedade física FC possui uma associação importante com a severidade de tempestades e como consequência com a atividade elétrica de raios.

Os resultados discutidos no parágrafo anterior sugerem que o tamanho relativo do centro convectivo no interior (FC) dos SCM pode ser um parâmetro importante para a ocorrência de atividade elétrica de raios. Para a avaliação dessa hipótese, determinou-se para cada classe de FC o número médio de raios. A Figura 6.26 mostra o comportamento encontrado do número médio de raios, o desvio padrão em função da FC e a curva que melhor se ajustou a esta relação. Em geral, percebe-se que um aumento no número médio de raios esteve associado com valores crescentes de FC, de forma, que esta relação foi mais bem caracterizada por uma regressão de potência positiva com alto coeficiente de determinação de 0,80. A parametrização que melhor representou a relação empírica entre a ocorrência de atividade elétrica de raios e a FC dos SCM é representada pela seguinte equação:

$$NMR = 407,83*(FC)^{0,49} \quad (6.7)$$

Em que,

*NMR* é o número médio de raios;

*FC* é a Fração Convectiva.

Os resultados mostram que em média um acréscimo de 63 % na FC pertencente aos SCM representa um aumento aproximadamente de 260 raios. Pode-se observar que o comportamento crescente da ocorrência de raios em função do aumento dos valores de FC apresenta-se bastante comportado apenas até valores de FC próximo de 43 %. Este fato como observado na Figura 6.23 (b), deve-se a ocorrência de poucos casos de membros de SCM com raios, os quais representam menos de 2 % do total de eventos, sendo a mesma hipótese associada ao crescente aumento do desvio padrão. Desta forma, nota-se que o crescente aumento do número médio de raios atinge valores máximos (mínimos) para SCM com FC de 43 % (5 %), caracterizando a ocorrência

aproximadamente de 390 raios (84 raios) com ocorrência média de raios reportada à SCM que contém 58 % da sua área relacionada a regiões convectivas. Acredita-se que as maiores áreas associadas à intensa convecção nesses SCM estejam relacionadas à ocorrência de intensos fluxos de massa que propiciam uma convecção mais profunda, promovendo maiores regiões com  $T_B$  menores que 210 K, o que como indicado pela análise da  $T_{\min 9}$  (seção 6.2.3), favorece uma mais intensa atividade elétrica de ocorrência de raios. Portanto, os resultados mostraram que a FC é um parâmetro que caracteriza de forma bastante aceitável as regiões de convecção profunda pertencentes aos SCM, de forma que ocorrência significativa de atividade elétrica de raios está associada aos mais altos valores de FC.

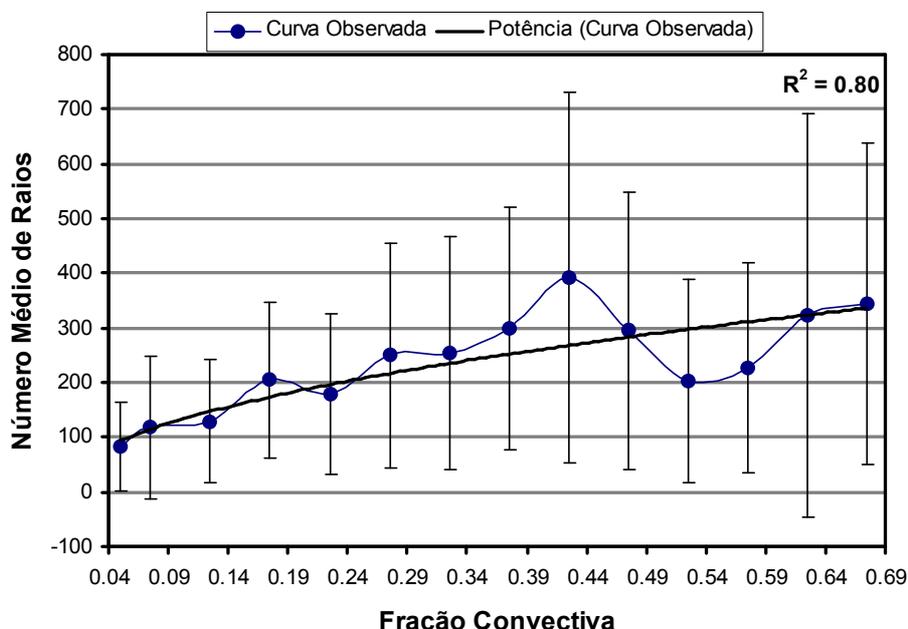


Figura 6. 26 - Variação do número médio de raios em função da Fração Convectiva, seu desvio padrão e curva de potência ajustada.

### 6.2.6 Excentricidade (Ecc)

Em complemento as análises realizadas de algumas propriedades dinâmicas e termodinâmicas, a excentricidade (Ecc) é um parâmetro físico relacionado à forma de um SCM que pode indicar a convecção diferenciada entre os diferentes formatos dos

SCM com e sem ocorrência de atividade elétrica de raios. A forma dos sistemas pode estar associado ao tipo básico de organização da convecção. CCM, por exemplo, apresentam excentricidade alta e linhas de estabilidade e frentes frias valores relativamente mais baixos. Basicamente, a Ecc é expressa pela razão entre o tamanho do eixo menor e o tamanho do eixo maior do sistema (maiores detalhes desta definição na seção 2.1.2). Considerando as mesmas limitações realizadas para a propriedade tamanho dos SCM (seção 6.2.1), os membros das famílias de SCM foram separadas em um grupo sem e outro com ocorrência de raios. A Figura 6.27 mostra os histogramas de frequência determinados para os eventos de Ecc que não tiveram raios (Figura 6.27 (a)) e para os que apresentaram ocorrência de raios (Figura 6.27 (b)).

Pode-se observar a ocorrência de eventos de membros de famílias de SCM que não tiveram raios (Figura 6.27 (a)) para todas as classes de Ecc, apresentando assim pouca diferença de ocorrências entre as mesmas (motivo pelo qual impossibilitou o ajuste de uma curva a esses dados). No entanto, as maiores ocorrências estão associadas a valores acima de 0,39, as quais representam 78 % dos eventos. Nota-se também que a maior (menor) ocorrência de eventos por classe esteve associada à Ecc entre 0,45 e 0,51 (maiores que 0,99), a qual representou 9,5 % (0,5 %). Esta distribuição foi caracterizada com uma Ecc média de 0,59 e um limiar mínimo (máximo) de aproximadamente 0,07 (1,0). Por outro lado, a Figura 6.27 (b) mostra que os eventos que tiveram ocorrência de raios apresentaram valores de Ecc maiores em relação à amostra sem raios. Observa-se que acima de 0,39 de Ecc, encontraram-se 90 % (contra 78 % dos eventos sem raios) dos eventos com raios, de forma que os membros dos SCM apresentaram uma Ecc média de 0,65. A máxima (mínima) ocorrência de eventos por classe foi reportada para valores de Ecc entre 0,63 e 0,69 (0,09 e 0,15), representando 10 % (0,07 %) do total de eventos, enquanto que o limiar mínimo (máximo) de Ecc foi de aproximadamente 0,09 (1,0). Portanto, a propriedade Ecc caracteriza de forma bastante razoável os SCM propícios a ocorrência de raios dos demais, de forma que os SCM que apresentam raios tendem a possuir uma forma mais circular em relação aos que não apresentam raios, pois, segundo Maddox (1980), um limiar de excentricidade de 0,7 define inicialmente SCM com formato mais circulares, caracterizados como CCM (porém outros critérios

como:  $T_B$  no IR e tamanho são utilizados também). No entanto, esses resultados indicam que um formato mais circular do topo dos SCM caracterizados com ocorrência de raios possivelmente deve-se ao fato dos mesmos estarem associados à convecção profunda como os CCM. Por outro lado, para sistemas alongados as frentes frias predominam e são associadas a processos convectivos menos intensos.

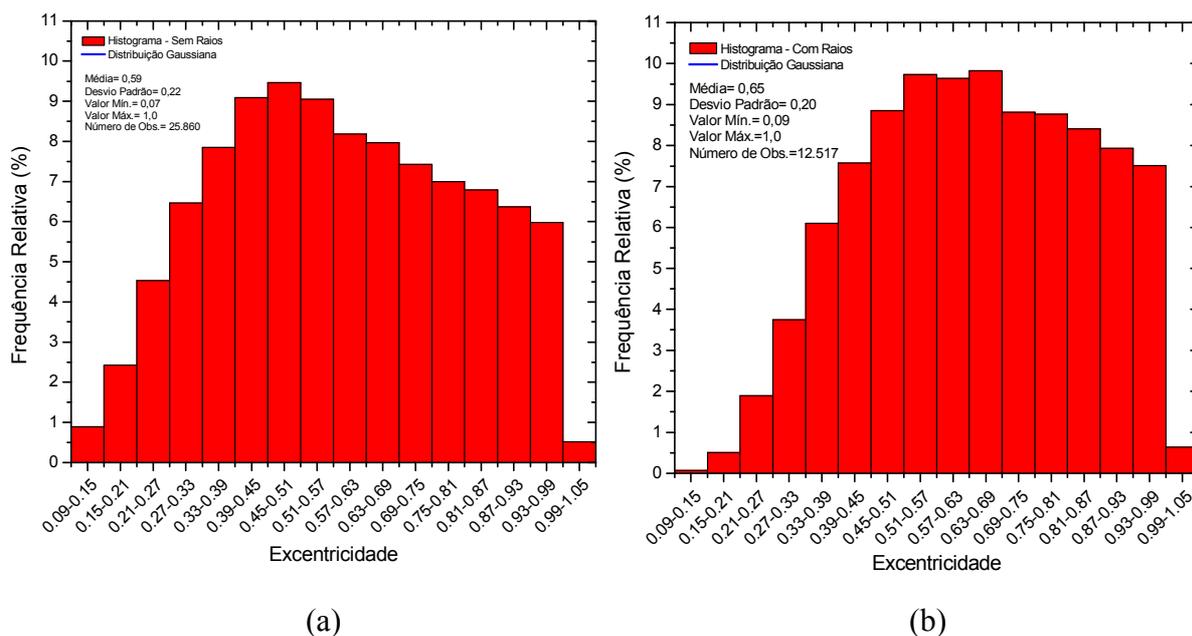


Figura 6.27 - Histograma de frequência da propriedade física Excentricidade dos membros de SCM que (a) não apresentaram raios e (b) para membros dos SCM que apresentaram raios.

Como os SCM com ocorrência de raios apresentaram valores de Ecc um tanto diferenciados dos demais, avaliou-se inicialmente a existência de uma dependência do número de raios em função da forma do SCM, através da contabilização do total de raios para cada classe de Ecc, sendo os resultados mostrados na Figura 6.28. Pouca ocorrência de raios foi observada para Ecc menores que 0,33, as quais representaram menos de 10 % do total, no entanto as classes entre 0,33 e 0,99 de Ecc apresentaram quantidades relativamente próximas de raios (pode estar associado a ocorrências de quantidade de eventos muito próximas entre essas classes, Figura 6.27 (b)). Nota-se também que dos 1.176.132 raios analisados, 85 % ocorreram para SCM com Ecc maiores que 0,39, em consonância com o alto número de casos de SCM com raios

encontrados para estas classes (Figura 6.27 (b)). Os SCM com Ecc acima de 0,69 caracterizaram-se 43 % do total de raios reportados. Desta forma, observa-se que há uma ocorrência maior de atividade elétrica de raios para SCM com Ecc maiores que 0,63 (representando aproximadamente 53 % do total de raios), o qual indica uma possível relação estatística entre a ocorrência de raios e a forma do SCM.

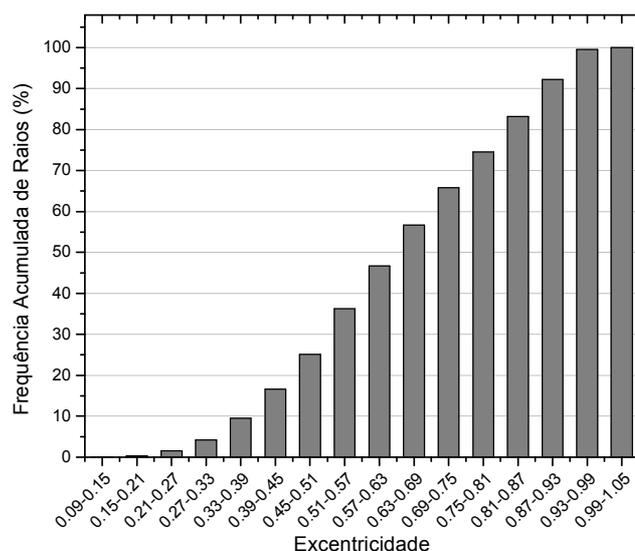


Figura 6. 28 - Frequência Acumulada (%) de ocorrência de raios em função da Excentricidade dos SCM.

A Figura 6.29 mostra a relação de regressão encontrada do número médio de raios e desvio padrão em função da Ecc. Esses resultados ratificam os discutidos anteriormente, indicando que em geral a atividade elétrica de raios aumenta em função da Ecc dos SCM, sendo esta relação caracterizada por uma função quadrática, com alto coeficiente de determinação, entorno de 0,91. A função que melhor corresponde à associação destas duas variáveis é descrita por:

$$NMR = -222.74*(Ecc^2) + 303.19*(Ecc) - 0.5108 \quad (6.8)$$

Em que,

*NMR* é o número médio de raios;

*Ecc* é a excentricidade do SCM.

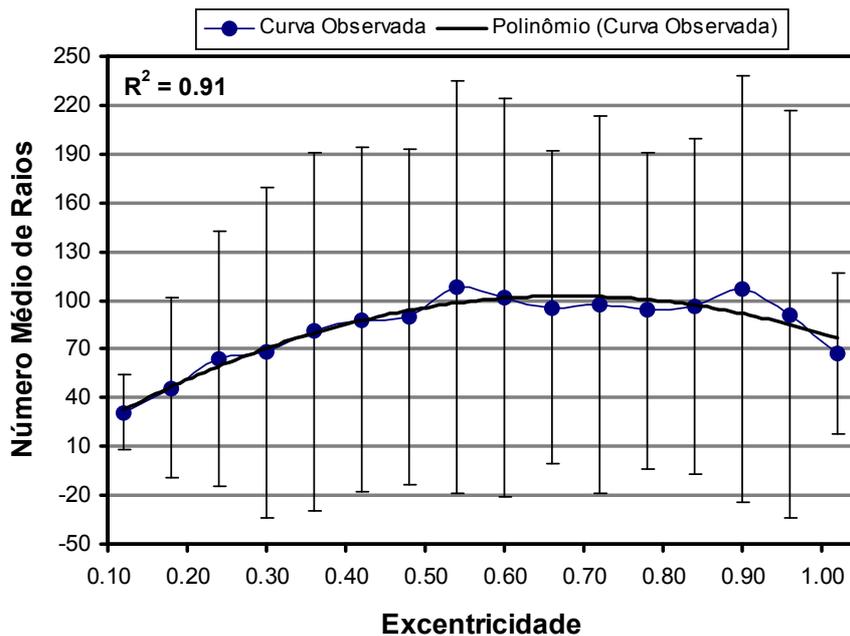


Figura 6. 29 - Variação do número médio de raios em função da Excentricidade, seu desvio padrão e curva polinomial ajustada para a ocorrência média de raios.

O ajuste desta expressão matemática a estes dados mostra a existência de um rápido crescimento na ocorrência média de raios a partir dos SCM com 0,10 (apresentando uma média de 31 raios, mínimo valor de ocorrência de raios observado) de Ecc até um valor de aproximadamente 0,57 (apresentando uma média de 108 raios, máximo valor de ocorrência de raios observado), sendo que após este valor o número médio de raios apresenta uma variabilidade relativamente pequena no seu valor (variabilidade de raios entre 67 e 101 raios). Nota-se que apesar desta relação estatística apresentar-se bastante comportada, os valores de desvio padrão são relativamente significantes, indicando que para cada classe de Ecc pode haver a ocorrência de um número variado de raios.

Assim, a Ecc mostra-se uma importante propriedade física relacionada à forma dos SCM, a qual reflete o tipo de sistema e conseqüentemente as condições dinâmicas e termodinâmicas dos SCM que caracterizam a atividade elétrica de raios. Com base nesses resultados, a Ecc torna-se um parâmetro importante de ser considerado no monitoramento e prognóstico da evolução da atividade elétrica de raios em SCM. Contudo, ressalta-se que o ideal seria realizar uma classificação de SCM de forma a

podermos eliminar sistemas com forma semelhantes, porém que apresentam atividades convectivas distintas, como as frentes e as linhas de instabilidade.

### **6.3 Análise da Evolução do Ciclo de Vida dos SCM**

Nesta seção são apresentadas as principais características observadas para os SCM com e sem raios durante o seu ciclo de vida. Para esta caracterização, foram utilizados os SCM rastreados pelo modelo FORTRACC entre julho de 2005 e fevereiro de 2008 acoplados com as informações de raios reportados pela RINDAT. Esta caracterização física entre os SCM que reportaram a ocorrência de raios e os que não apresentaram raios durante seu ciclo de vida foi realizada em duas etapas. Na primeira etapa, foi analisada a dependência da atividade elétrica de raios com a duração do ciclo de vida dos SCM. A segunda parte apresenta as caracterizações entre SCM com e sem raios em função do tamanho e da evolução temporal da atividade elétrica de raios durante o ciclo de vida.

#### **6.3.1 Caracterização do Tempo de Vida dos SCM**

A partir da metodologia proposta e considerando as limitações discutidas no capítulo 5 (isto é, utilizar apenas SCM que iniciaram e dissiparam espontaneamente, tiveram tempo de vida entre 2 e 10 horas e tiveram menos da metade de seu ciclo de vida compostos por imagens virtuais), dos 8.158 SCM identificados pelo modelo FORTRACC durante o período e região de estudo restaram 517 SCM. Dentre estes, 175 não reportaram a ocorrência de raios, enquanto 342 apresentaram raios em algum momento do seu ciclo de vida. Desta forma, a identificação de características intrínsecas pertinentes a ocorrência ou não de raios durante o ciclo de vida dos SCM foi inicialmente realizada através da caracterização do tempo de vida (duração) desses dois grupos de sistemas. A Figura 6.30 mostra a distribuição de frequência de tempo de vida para os sistemas que não reportaram ocorrência de raios (Figura 6.30 (a)) e para aqueles que apresentaram raios (Figura 6.30 (b)) em pelo menos um momento do ciclo de vida.

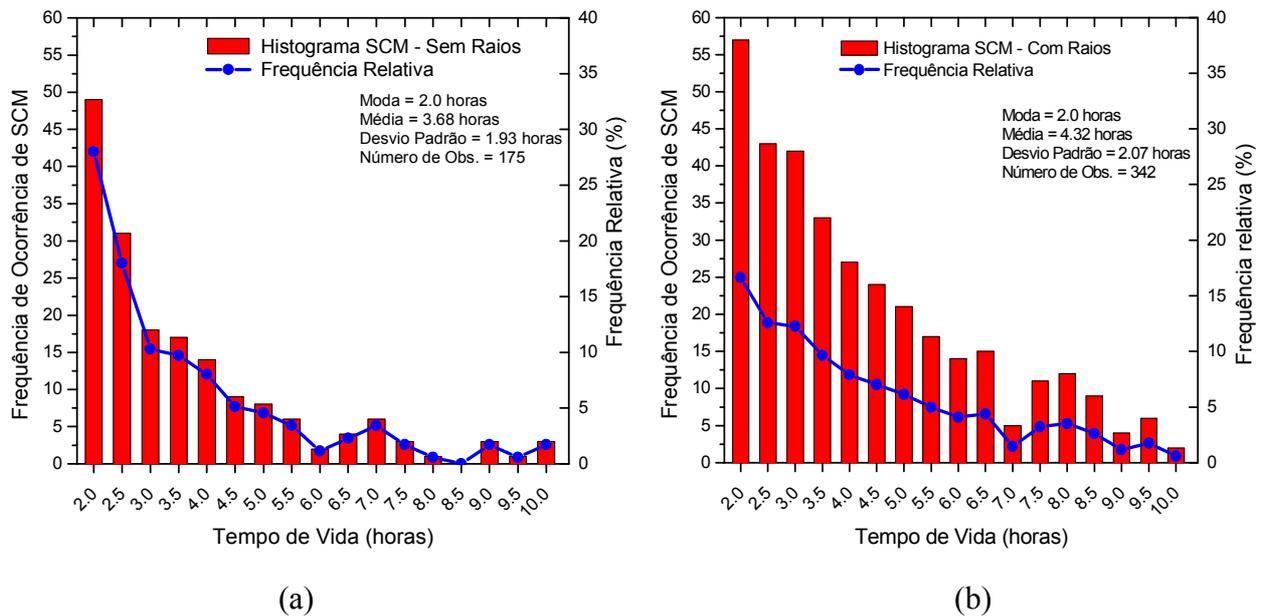


Figura 6. 30 - Distribuição estatística do número de SCM e frequência relativa em função do tempo de vida em horas para SCM que (a) não apresentaram raios e SCM (b) que apresentaram raios durante seu ciclo de vida.

A distribuição de eventos de SCM que não reportaram ocorrência de raios (Figura 6.30 (a)) caracteriza-se por uma queda mais acentuada em relação aos que apresentaram raios (Figura 6.30 (b)) em função do tempo de vida, de forma que mais de 90 % dos sistemas com raios (sem raios) possuem duração menor que 8,5 horas (7 horas). Nota-se que em média os SCM com raios são caracterizados por um tempo de vida maior em relação aos sem raios, como pode ser observado pela duração média de 4,3 horas e 3,7 horas encontrada para estes SCM, respectivamente. As maiores ocorrências de SCM que apresentaram raios com maiores tempo de vida em relação aos sem raios podem ser notadas claramente através da Figura 6.31. Observa-se que os sistemas com tempo de vida menor que 3 horas são em sua maioria caracterizados pela não ocorrência de raios (curva azul), enquanto acima deste valor há uma predominância de SCM que apresentam ocorrência de raios (curva vermelha). Além disso, a maior ocorrência de sistemas por classe de duração para os dois grupos está associada a um tempo de vida de 2 horas, no entanto esta classe representa para o grupo sem raios 28 % contra 16 % para o grupo com raios em relação ao total de eventos.

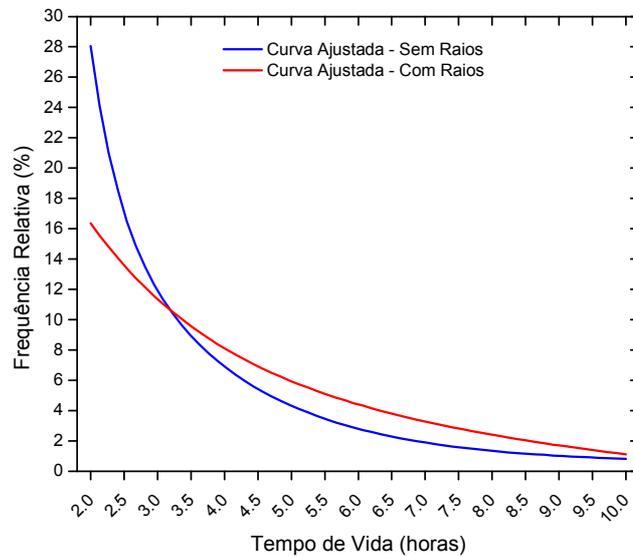


Figura 6. 31 - Análise comparativa entre a curva ajustada para o histograma de Tempo de Vida (horas) dos SCM que não apresentaram raios (azul) e a curva ajustada para a amostra de SCM que apresentaram raios (vermelho).

Em geral, esses valores de tempo de vida são um tanto menores em relação aqueles encontrados por Goodman e Macgorman (1986), Velasco e Fritsch (1987), Machado et al (1998) e Torres (2003), mas semelhantes aos observados por Vila et al (2004) e Tadesse e Anagnostou (2009). Pode-se especular que possivelmente essas diferenças quantitativas podem estar associadas a diferenças dos limiares de tamanho utilizados para detectar os SCM e ao intervalo entre as imagens consecutivas de satélite (a qual delimita o limiar mínimo do tempo de vida a ser utilizado). No entanto, valores quantitativamente semelhantes aos encontrados neste trabalho, foram observados por Tadesse e Anagnostou (2009). Esses autores analisaram SCM com e sem raios, através de uma metodologia semelhante à empregada pelo modelo FORTRACC, e encontraram que 90 % dos sistemas com raios (sem raios) possuem tempo de vida aproximadamente menores que 5 horas (4horas). Esses resultados permitem inicialmente inferir que os SCM que tendem a apresentar ao menos um raio ao longo do ciclo de vida possuem uma probabilidade significativa de ter um tempo de vida maior.

Alguns trabalhos encontrados na literatura têm revelado a forte dependência do tamanho máximo (o qual corresponde ao tamanho do sistema no estágio de maturação) atingido

pelos SCM em função da duração do seu ciclo de vida (CHEN et al, 1996; KNUPP, 1997; MACHADO et al, 1998; LAURENT et al, 2002; MACHADO e LAURENT, 2004, VILA et al, 2004; MORALES et al, 2004). Portanto, como sugerido por Laurent et al (2002), baseado nas características físicas do estágio de maturação dos sistemas, pode-se inferir sobre o seu possível tempo de vida restante depois de atingido este estágio do ciclo de vida. Desta forma, baseado nos resultados mostrados na Figura 6.30, avaliou-se a relação média entre o tamanho máximo ( $R_{em\acute{a}x}$ ) dos SCM com e sem raios em função de seu tempo de vida. A Figura 6.32 mostra a relação de dispersão entre o tamanho máximo médio encontrado em função de cada classe de duração, para os SCM sem (Figura 6.32 (a)) e com (Figura 6.32 (b)) ocorrência de raios. Para maior representatividade e sem perda de generalidade agrupou-se os eventos com valor de tempo de vida intermediário as classes anteriores a eles e os eventos acima de 8 horas (poucos sistemas tiveram tempo de vida maior que este valor, Figura 6.30) foram agrupados a classe de 8 horas. Observa-se de modo geral que para os dois grupos quanto maior é o tamanho máximo atingido pelos sistemas, maior é o tempo de vida associado.

Desta forma, verifica-se que sistemas com raios (sem raios) com 2 horas de duração possuem um  $R_{em\acute{a}x}$  médio entorno de 46 km (42 km), enquanto SCM com 8 horas de duração possuem um tamanho máximo de 107 km (85 km). Assim, foi possível parametrizar a relação existente entre essas duas variáveis, ajustando-se uma reta a esses dados, a qual mostrou alto coeficiente de determinação de 0,93 e 0,98 para os SCM sem e com raios, respectivamente. As parametrizações determinadas para os sistemas sem e com raios são expressas respectivamente da seguinte forma:

$$R_{em\acute{a}x} = 6,64*tv + 30,59 \quad (6.9)$$

$$R_{em\acute{a}x} = 9,33*tv + 25,59 \quad (6.10)$$

Em que,

$R_{em\acute{a}x}$  é o raio efetivo máximo dos SCM em quilômetros;

$tv$  é o tempo de vida em horas;

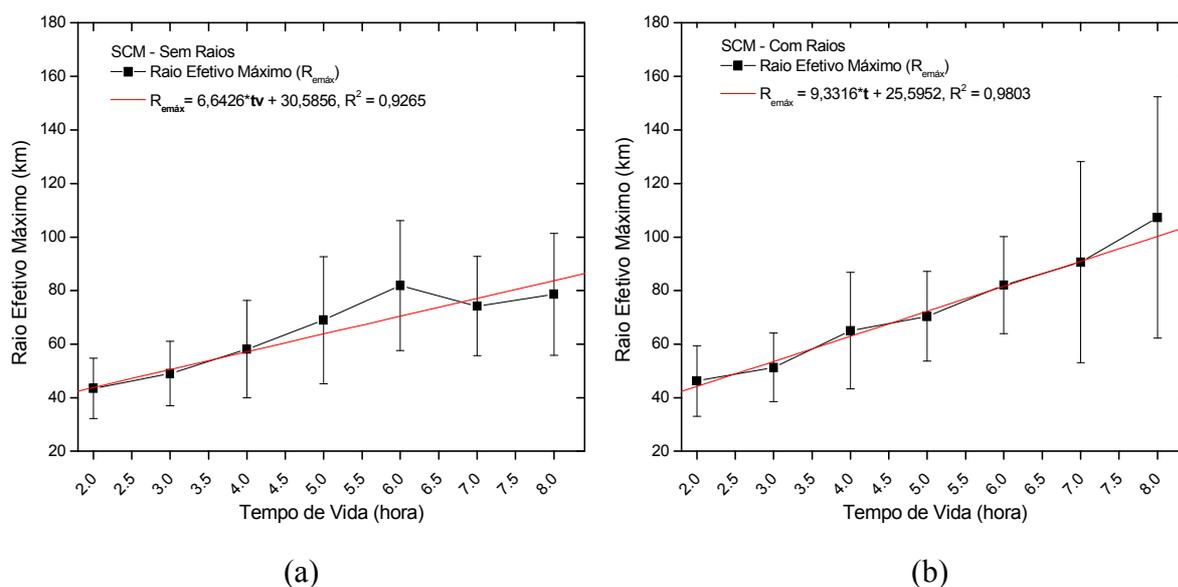


Figura 6. 32 - Variação média do Raio Efetivo Máximo (km), desvio padrão e curvas lineares ajustadas em função do tempo de vida (horas) para SCM que (a) não apresentaram raios e (b) SCM que apresentaram raios durante seu ciclo de vida.

Desta forma, a reta de regressão ajustada mostra que os SCM que apresentam ocorrência de raios possuem maiores tamanhos máximos associados aos mesmos tempos de vida. Este fato é corroborado notando-se que o coeficiente angular da reta ajustada para os SCM com raios (sem raios) indica um aumento em média de 9 km (7 km) do  $R_{em\acute{a}x}$  para cada hora acrescida no tempo de vida. No entanto, o mais alto coeficiente linear encontrado para o grupo sem raios (31 km) em relação ao com raios (26 km) pode estar associado aos maiores valores de desvio padrão observado para os menores tempos de vida do grupo com raios em relação ao sem raios. Os altos valores de desvio padrão verificados para os tempos de vida maiores indicam a ocorrência de tamanho máximo dentro de certa variabilidade (pode estar associado à baixa ocorrência de eventos, como mostrado na Figura 6.30).

De maneira geral, estes resultados sugerem que os SCM com raios caracterizam-se por uma dinâmica diferenciada (intensas correntes ascendentes, como também sugerido pelos resultados da seção 6.2) durante seu estágio inicial de vida, de forma a favorecer que os mesmos alcancem maiores tamanhos no estágio de maturação e mais longa duração em relação aos sistemas sem raios. Assim, o tamanho atingido pelos SCM no

estágio de maturação indica inicialmente ser um importante parâmetro para determinar quanto tempo de vida os sistemas terão depois de alcançado o máximo tamanho.

A forte correlação mostrada pelos resultados encontrados acima entre os SCM que apresentam raios e seu tempo de vida é ratificada pelos resultados apresentados na Figura 6.33. Nesta Figura, é mostrada a relação de dispersão do comportamento médio de ocorrência de raios em função do tempo de vida dos SCM (curva média). Observa-se que, como indicado pelos resultados anteriores, há um crescente aumento no número médio de raios conforme um aumento do tempo de vida dos sistemas, de forma que SCM com uma duração média de 2 horas apresentam aproximadamente 76 raios, enquanto os sistemas com a maior duração (8 horas) caracterizam-se pela ocorrência média de 1.257 raios. Desta forma, foi possível ajustar uma curva do tipo exponencial que descreve esta relação, com alto coeficiente de determinação, 0,98. A curva parametrizada é expressa da seguinte forma:

$$NMR=44,37*\exp(0,4988*tv) \quad (6.11)$$

Em que,

*NMR* é o número médio de raios;  
*t<sub>v</sub>* é o tempo de vida dos SCM em horas.

Importante ressaltar que os altos valores de desvio padrão observados para todos os valores de tempo de vida (principalmente para os tempos de vida maiores) mostram uma importante variabilidade no número de raios para cada duração dos sistemas, estando associada ao um número menor de eventos para estas classes. Entretanto, diferentemente dos resultados encontrados nesta seção, o trabalho pioneiro de Goodman e Macgorman (1986) não encontrou esta relação crescente entre o número de raios e o tempo de vida dos sistemas, o que pode estar associado ao pequeno número de casos de SCM analisados por esses autores, que totalizaram apenas 10 SCM. Como observado por diversos outros autores, a tendência de maior ocorrência de raios conforme a persistência dos sistemas em consonância com o maior tamanho atingido ao longo do seu ciclo de vida pode estar associado a uma mais intensa taxa de expansão da área

(associada as mais fortes correntes ascendentes e formação intensa de partículas de gelo) no estágio inicial dos sistemas que possuem maiores tempos de vida. Esta dinâmica diferenciada fornece condições propícias para a maior formação de partículas de gelo e conseqüentemente uma mais intensa ocorrência de atividade elétrica de raios.

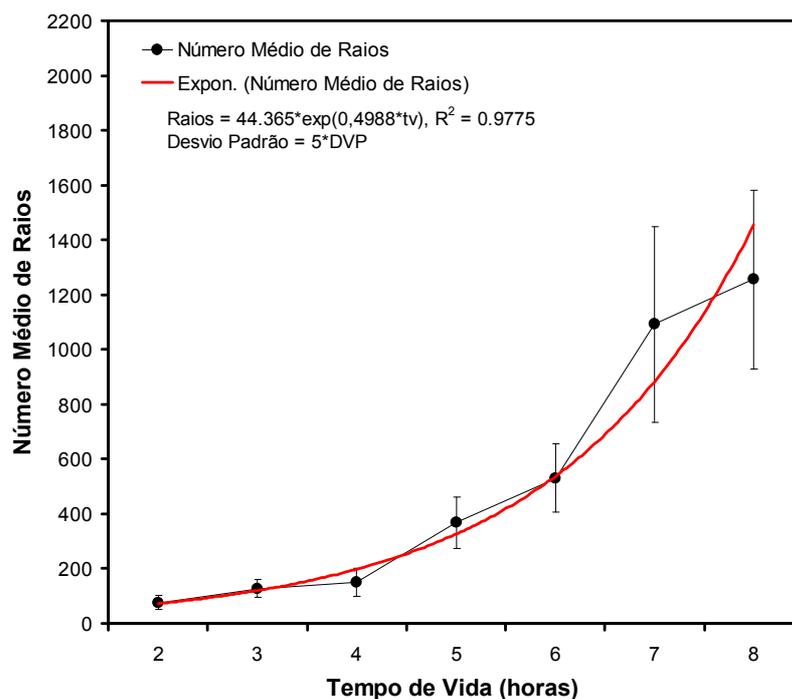


Figura 6. 33 - Variação do Número Médio de Raios (curva média), desvio padrão e curva exponencial ajustada em função do tempo de vida (horas) dos SCM.

Além da ocorrência média de raios, outra propriedade que mostrou importantes características da atividade de raios, como sugerido na seção 6.2.1, foi a densidade média de raios (raios.km<sup>-2</sup>). A Figura 6.34 mostra a relação de dispersão média entre a densidade de raios e o tempo de vida dos SCM. Esta relação é uma média da razão do tamanho máximo atingido pelo SCM e o respectivo total de raios do sistema na maturação, entre os diversos sistemas pertencentes a uma mesma classe de tempo de vida. Pode-se notar um crescente aumento na densidade média de raios conforme um acréscimo do tempo de vida, de forma que SCM com tempo de vida de aproximadamente 2 horas apresentam 0,012 raios.km<sup>-2</sup>, enquanto sistemas com aproximadamente 8 horas de duração caracterizam-se com uma média de 0,040

raios.km<sup>-2</sup>. Esses valores de densidade de raios são consistentes aos encontrados por Parker et al (2001) e Tadesse e Anagnostou (2009). Esta relação empírica foi bem caracterizada por uma função do tipo exponencial, que apresentou um coeficiente de determinação em torno de (0,91) e sendo expressa pela seguinte parametrização:

$$DMR = 0,0096 * \exp(0,1982 * tv) \quad (6.12)$$

Em que,

**DMR** é a densidade média de raios em raios.kilômetros<sup>-2</sup>;  
**tv** é o tempo de vida do SCM em horas.

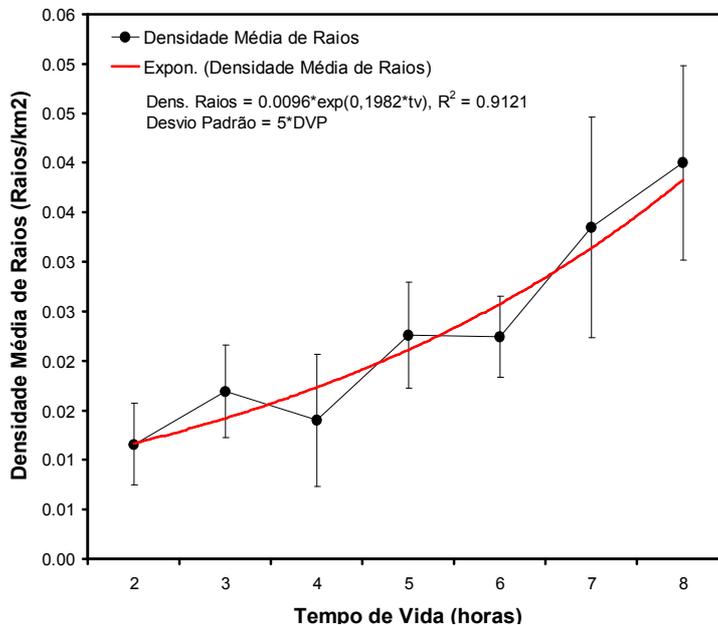


Figura 6. 34 - Variação da Densidade Média de Raios (raios/km<sup>2</sup>), desvio padrão e curva exponencial ajustada em função do tempo de vida (horas) dos SCM.

Os resultados apresentados acima estão em concordância aos observados por Tadesse e Anagnostou (2009), onde os sistemas analisados por esses autores com uma duração média de 4 horas caracterizaram-se com 0,010 raios.km<sup>-2</sup>, enquanto os sistemas desse estudo apresentaram 0,014 raios.km<sup>-2</sup>. O coeficiente angular da curva ajustada indica que a cada hora de acréscimo no tempo de vida dos SCM, a densidade de raios média aumenta 0,20 raios.km<sup>-2</sup>. Este fato sugere que não apenas o número médio de raios aumenta conforme a duração dos sistemas (Figura 6.33), mas também o número total de

raios por *pixel* pertencente ao estágio de maturação, porém de uma forma menos acentuada. Pode-se especular, portanto que o tempo de vida alcançado pelos sistemas é de forma significativa dependente da atividade convectiva e atividade elétrica próximo ao estágio de maturação (máximo tamanho).

### **6.3.2 Caracterização do Ciclo de Vida dos SCM**

As análises realizadas na seção anterior indicaram que a ocorrência total de raios depende fortemente da duração do ciclo de vida dos SCM. Desta forma, torna-se importante neste momento avaliar em qual estágio do ciclo de vida dos sistemas esta atividade elétrica de raios é mais pronunciada. Estas análises podem evidenciar os diferentes processos dinâmicos envolvidos durante o desenvolvimento dos SCM, podendo assim indicar os principais fatores que influenciam alguns sistemas a tenderem a apresentar raios enquanto que outros não.

A caracterização e o entendimento da evolução da atividade elétrica de raios ao longo do ciclo de vida foram realizados através da análise comparativa entre a evolução da área ( $R_e$ ) dos SCM com e sem raios ao longo do ciclo de vida. Através de uma metodologia semelhante à empregada por Machado e Laurent (2004), o ciclo de vida dos SCM para foi dividido em cinco classes (ou estágios): iniciação (estágio 1); estágio intermediário entre iniciação e o máximo tamanho (estágio 2); máximo tamanho, o qual corresponde à maturação (estágio 3); estágio intermediário entre o máximo tamanho e dissipação (estágio 4) e dissipação (estágio 5). Utilizando os 175 SCM sem raios e os 342 sistemas que apresentaram ocorrência de raios, avaliou-se a evolução média da área desses sistemas em função dos cinco estágios de ciclo de vida, como mostrado na Figura 6.35. De forma consistente aos resultados apresentados nas seções anteriores, a curva de cor azul representa a evolução temporal da área dos SCM sem raios, enquanto a curva de cor vermelha está associada aos SCM que reportaram a ocorrência de raios.

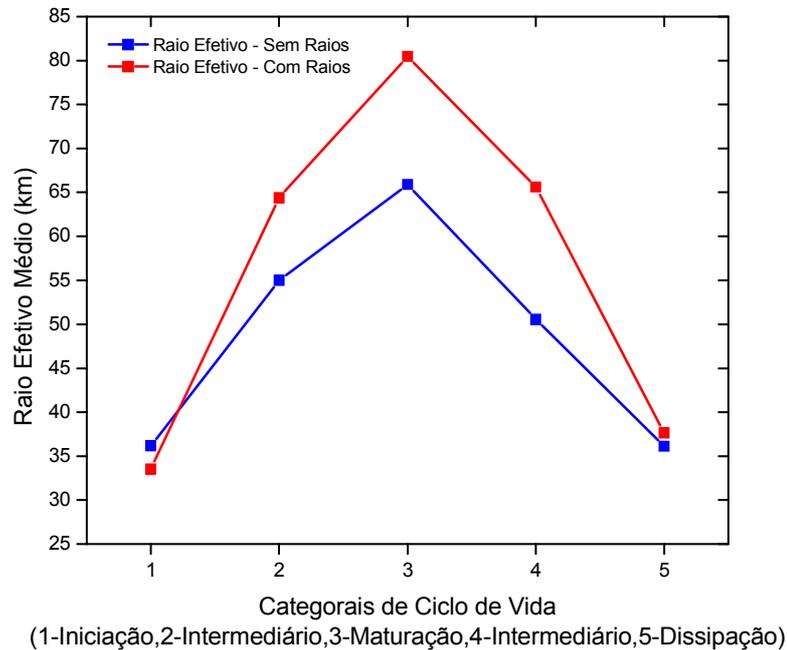


Figura 6. 35 - Comparação do ciclo de vida do Raio Efetivo (km) dos SCM que não tiveram raios (azul) e SCM que apresentaram raios (vermelho) durante seu ciclo de vida, para as cinco categorias de ciclo de vida, sendo 1 (iniciação), 2 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), 3 (maturação), 4 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e 5 (dissipação).

A Figura 6.35 demonstra uma significativa variabilidade na evolução da área dos SCM em função dos cinco estágios de ciclo de vida analisados. Percebe-se que os SCM com raios são caracterizados por uma maior área durante toda a sua evolução temporal. Este fato pode ser notado verificando que os SCM com raios (sem raios) apresentaram um tamanho médio de 33 km (36 km) no estágio inicial, 80 km (66 km) durante a maturação e dissiparam com um tamanho médio de aproximadamente 37 km (36 km). Tadesse e Anagnostou (2009) encontraram uma evolução temporal da área com o ciclo de vida para sistemas com raios muito semelhante a esses valores, verificando um tamanho médio de 43 km, 83 km e 63 km nos estágios inicial, maturação e dissipação, respectivamente. Percebe-se claramente que os sistemas com raios caracterizam-se por uma evolução do ciclo de vida (isto é, iniciação, maturação e dissipação) mais bem definida em relação aos sem raios. Nota-se, portanto que o processo de crescimento (expansão da área dos sistemas com o tempo) no estágio inicial é mais eficiente (mais intensa expansão da área) nos sistemas com a presença de raios, enquanto que após o

estágio de maturação a dissipação dos sistemas sem raios torna-se mais eficiente (mais rápida diminuição da área com o tempo). Esses resultados, consistentes aos encontrados por Morales et al (2004) e Tadesse e Anagnostou (2009), sugerem que a intensidade da taxa de crescimento dos SCM durante o estágio inicial (principalmente entre o estágio 1 e 2), mostra-se extremamente importante na intensificação da convecção neste estágios dos SCM, influenciando os sistemas a alcançarem maiores tamanhos e caracterizando uma maior probabilidade de ocorrência de raios ao longo do ciclo de vida.

A relação mostrada na Figura 6.35 é válida para o comportamento médio da evolução temporal da área dos SCM, mas há uma considerável variabilidade dessas características quando se considera os variados tempos de vida dos sistemas sendo analisados. Sabendo disso, os SCM de mesma duração foram agrupados e a evolução média da área para os SCM com os mesmos tempo de vida foram analisados. Na Figura 6.36 é apresentado como exemplo o ciclo de vida médio determinado dos SCM sem e com raios (Figura 6.36 (a) sem raio e Figura 6.36 (b) com raio) que possuem tempo de vida de 4 horas (curva em preto), 6 horas (curva em vermelho) e 7 horas (curva em azul).

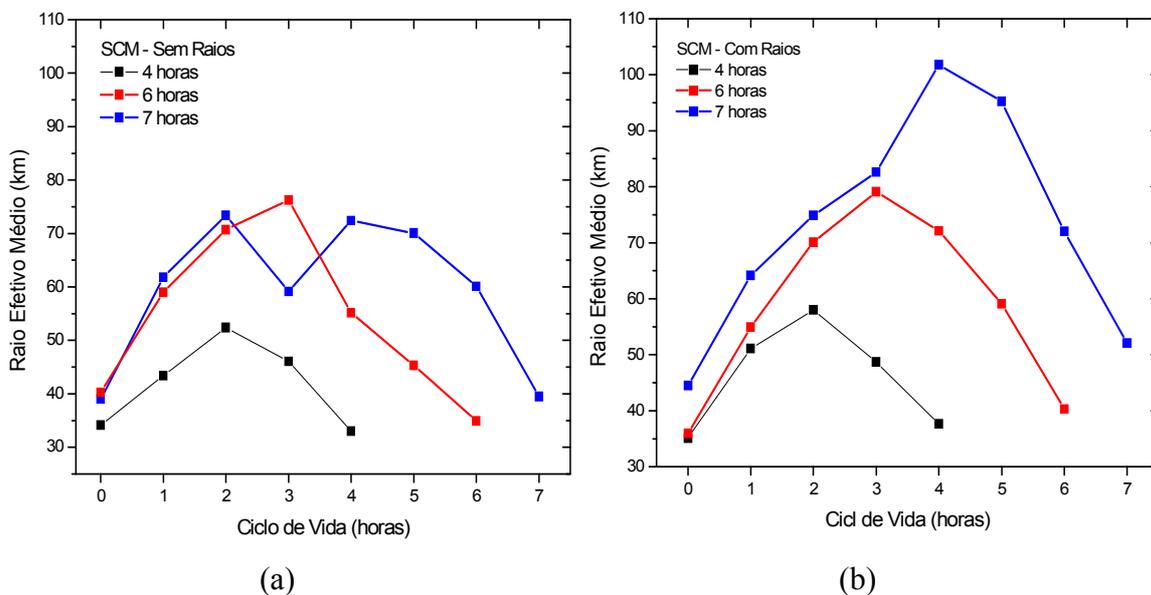


Figura 6. 36 - Variação média do Raio Efetivo (km) de SCM que (a) não apresentaram raios e SCM que (b) apresentaram raios durante seu ciclo de vida, para três valores de duração: 4 horas (preto), 6 horas (vermelho) e 7 horas (azul).

Como observado (Figura 6.36), os SCM com raios possuem um ciclo de vida mais bem caracterizado em relação aos sem raios (nota-se pelos maiores tamanhos alcançados ao longo do ciclo de vida dos sistemas com raios em relação aos sem raios). De forma geral, a máxima área (maturação) de ambos os sistemas é observada próxima a sua meia vida e a magnitude de crescimento do tamanho dos dois grupos de SCM é mais intensa em comparação ao seu estágio de decaimento (início do estágio de dissipação). Pode-se observar também, como já esperado, que sistemas que possuem maior duração alcançam maiores valores de tamanho ao longo do seu ciclo de vida, sendo que o tamanho de ambos os SCM (com e sem raios) nos estágios inicial, maturação e dissipação são progressivamente maiores quando o tempo de vida aumenta. Uma das principais características mostradas por esses resultados está associada ao fato de que a expansão da área dos SCM durante o seus estágios iniciais correlaciona-se de forma significativa com a duração (resultados similares tem sido observados por MACHADO et al, 1998; MACHADO e LAURENT, 2004 e VILA et al, 2004) e com a caracterização de sistemas que apresentam ocorrência de raios (de modo similar ao observado por MORALES et al, 2004; TADESSE e ANAGNOSTOU, 2009). Este fato pode ser verificado, observando que a taxa de crescimento médio no estágio inicial dos sistemas com raios com 7 horas de duração possuem um valor mais acentuado de expansão da área em relação aqueles com 4 horas de tempo de vida que também com raios. Os sistemas com raios que possuem em média 6 horas de duração caracterizam-se com uma taxa de expansão média no estágio inicial aproximadamente quatro vezes maior em relação à taxa de expansão associadas aqueles sistemas que não apresentaram raios e que possuem a mesma duração. Entretanto, nota-se que o decréscimo da área dos SCM sem raios depois de atingido o estágio de maturação é muito maior em relação aqueles sistemas que apresentaram ocorrência de raios.

Esses resultados indicam que os SCM que possuem um tempo de vida maior e uma tendência de apresentar raios estão associados a uma mais vigorosa convecção no seu estágio de vida inicial, a qual está relacionada a fortes movimentos verticais (devido pelo menos em parte a um mais intenso fluxo de massa durante este estágio) e altas taxas de condensação, propiciando assim a manutenção do sistema por mais tempo e a

formação de condições mais favoráveis a ocorrência intensa de partículas de gelo, gerando alta probabilidade de ocorrência de raios durante seu ciclo de vida. Logo, estes resultados, em consistência com os encontrados por Machado e Laurent (2004), Morales et al (2004) e Tadesse e Anagnostou (2009), ressaltam que a expansão da área dos SCM durante o estágio de crescimento pode possivelmente indicar o tempo de vida dos sistemas e a ocorrência ou não de atividade elétrica de raios ao longo do ciclo de vida.

Os resultados discutidos no parágrafo anterior são ratificados quando se faz uma análise comparativa entre a evolução temporal média da área dos SCM que apresentaram ocorrência de raios e a atividade elétrica de raios em função dos cinco estágios de ciclo de vida em análise. A Figura 6.37 mostra a evolução temporal média da área (curva em vermelho) e da ocorrência média de raios (curva em verde) em função dos cinco estágios de ciclo de vida obtida entre os 324 SCM analisados que apresentaram ocorrência de raios. Em média, o ciclo de vida da atividade elétrica de raios mostra que os sistemas apresentaram aproximadamente 162 ocorrências de raios ao longo do seu ciclo de vida.

Pode-se observar um rápido crescimento na atividade elétrica de raios a partir da iniciação até atingir o segundo estágio, entre a iniciação e a maturação, alcançando o máximo de raios durante este estágio do ciclo de vida, caracterizado pela ocorrência média de 78 raios. Segundo Machado e Laurent (2004), essa fase do ciclo de vida corresponde ao momento de máxima divergência em altos níveis e o fim da taxa de condensação, isto é, ao momento de máxima atividade convectiva. Após este momento, a taxa de condensação é negativa, apesar da área dos sistemas continuarem aumentando, porém de uma forma menos intensa e a ocorrência de raios começa a diminuir atingindo 41 raios durante o estágio de maturação. Depois de alcançado o máximo tamanho dos SCM, há uma queda acentuada na ocorrência de raios acompanhada da diminuição do tamanho dos sistemas, atingindo um mínimo valor de raios aproximadamente de 2 raios no estágio de dissipação. Essas características implicaram que 90 % (ou ocorrência de oito vezes mais raios antes da maturação em relação às ocorrências durante a fase de dissipação) das ocorrências de raios são reportadas entre o estágio de iniciação e

maturação (fase de crescimento dos sistemas), sendo que 64 % do total de raios ocorreram entre o estágio de iniciação e o intermediário entre iniciação e maturação (estágio 2), caracterizado pela mais intensa expansão da área dos SCM analisados. Esses resultados são consistentes e corroboram aos encontrados por Goodman e Macgorman (1986), os quais observaram a ocorrência em média de 80 % do total de raios entre a fase de desenvolvimento e maturação do ciclo de vida dos SCM, sendo que este período mais eletricamente ativo estava também associado às maiores incidências de ocorrências de tempo severo (como tornados, largos granizos, fortes ventos, intensa precipitação e danos associados à ocorrência de raios).

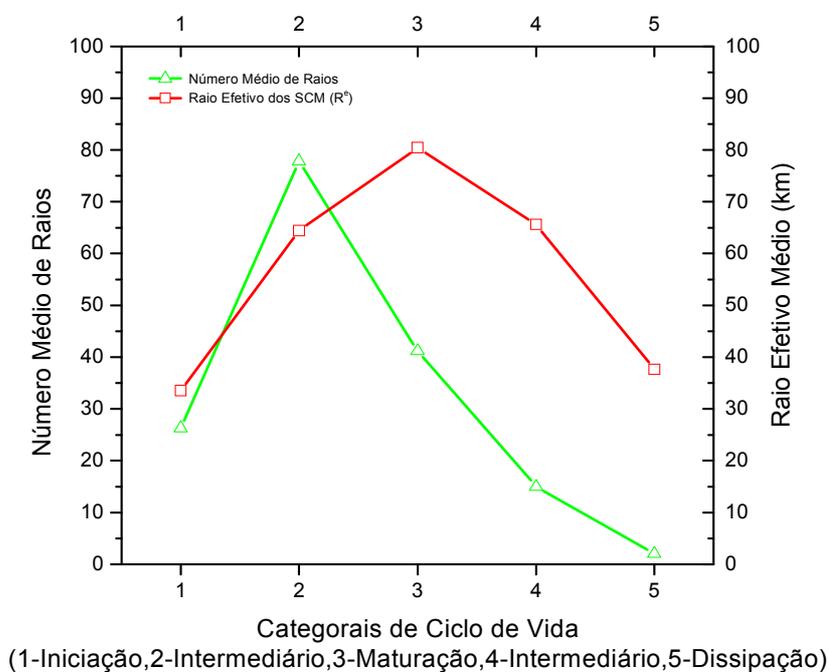


Figura 6. 37 - Variação do Número Médio de Raios (verde) e do Raio Efetivo (km) (vermelho) para os SCM para cinco categorias de ciclo de vida: 1 (iniciação), 2 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), 3 (maturação), 4 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e 5 (dissipação).

Portanto, essas observações indicam a importante influência das intensas correntes ascendentes durante os estágios iniciais de formação dos SCM, como vem sido sugerido pelos semelhantes resultados também obtidos por Goodman e Macgorman (1986), Machado e Laurent (2004), Morales et al (2004) e recentemente por e Tadesse e

Anagnostou (2009). Goodman e Macgorman (1986) sugeriram que a mais alta incidência de raios durante os estágios de crescimento dos SCM poderia estar associado à combinação de vigorosos movimentos verticais e interações de escala convectiva, as quais intensificariam a convergência em baixos níveis e produziriam novos limites de convergência no interior dos SCM. Desta forma, a acentuada convergência de fluxo de massa tenderia a aumentar a intensidade das velocidades verticais e intensificar a taxa de separação de cargas no interior das nuvens convectivas.

Os resultados encontrados neste trabalho e os observados por outros estudos permitem inicialmente sugerir que aparentemente o vigor da convecção durante os estágios iniciais dos SCM com tendência de promover raios estaria relacionada a um intenso processo de condensação e um acentuado fluxo de massa vertical, os quais propiciam uma intensa formação de partículas de gelo, de forma a potencializar o processo de eletrificação no interior das nuvens convectivas pertencentes aos SCM. No entanto, ressalta-se que estas formulações são apenas hipóteses e sugestões, visto a alta complexidade entre a interação dos processos dinâmicos, termodinâmicos e microfísicos envolvidos na formação da atividade elétrica de raios, sendo ainda pouco elucidado pela comunidade científica.

A Figura 6.38 mostra que o comportamento da atividade elétrica média de raios ao longo do ciclo de vida dos SCM com diferentes tempos de vida também apresentam as mesmas características observadas anteriormente (Figura 6.37). De forma semelhante ao apresentado na Figura 6.36, é mostrada a evolução da ocorrência média de raios ao longo do ciclo de vida, referente aos SCM com tempo de vida médio de 4 horas (curva em preto), 6 horas (curva em vermelho) e 7 horas (curva em azul). Observa-se a existência de um comportamento bem definido da evolução da atividade elétrica de raios ao longo do ciclo de vida (isto é, iniciação, maturação e dissipação), acompanhando de forma similar a evolução temporal da área dos mesmos sistemas (Figura 6.36 (b)). Assim, o máximo de ocorrência de raios é encontrado uma hora antes do estágio de maturação (estágio correspondente a meia vida dos sistemas),

correspondendo a uma média de 21 raios, 102 raios e 179 raios para os sistemas com 4 horas, 6 horas e 7 horas de tempo de vida, respectivamente.

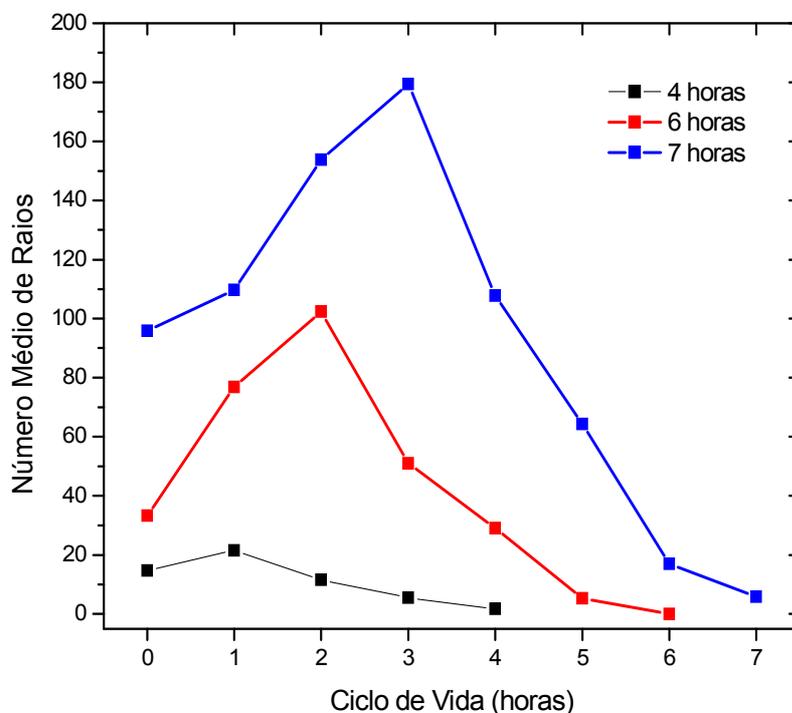


Figura 6. 38 - Variação do Número Médio de Raios dos SCM em função do ciclo de vida, para três valores de duração: 4 horas (curva preta), 6 horas (curva vermelha) e 7 horas (curva azul).

Goodman e Macgorman (1986) observaram um máximo de raios em torno de 2-3 horas antes da maturação, tempo um pouco maior ao encontrado neste trabalho, o que pode estar relacionado aos sistemas de longa duração utilizados por estes autores (sistemas em média com 14 horas de duração). Entretanto, a ocorrência desses máximos valores de raios antes da maturação também está em consonância com o momento que a temperatura mínima e fração convectiva dos sistemas alcançam o mínimo e o máximo valor durante o ciclo de vida dos sistemas, respectivamente (MACHADO et al, 1998; VILA et al, 2004). Nota-se assim um rápido crescimento no número médio de raios a partir do estágio inicial até atingir a máxima atividade elétrica, com uma queda bem mais pronunciada sendo observada depois de alcançado este estágio. Essas observações tornam-se mais nítidas conforme o tempo de vida dos sistemas aumenta, podendo perceber claramente que quanto maior o tempo de vida dos SCM, maiores são os

valores de ocorrências de raios alcançado ao longo do ciclo de vida (importantes diferenças são notadas entre os máximos valores de raios), mais intensa é a taxa de crescimento de ocorrência raios durante os estágios iniciais dos sistemas e mais pronunciada é o decréscimo associado à atividade elétrica de raios depois de atingido seu máximo valor. Resultados semelhantes foram reportados por Goodman e Macgorman (1986), os quais parametrizaram esse crescimento e diminuição da atividade de raios por uma função do tipo exponencial.

De maneira geral, esses resultados mostram que para os diversos sistemas com diferentes tempos de vida, a combinação da taxa de condensação e intensos movimentos verticais durante o início do desenvolvimento dos SCM favorecem a formação e a interação entre partículas de gelo, contribuindo para um intenso processo de eletrificação das nuvens convectivas antes da maturação. Mostra-se também que a taxa de aumento e diminuição de ocorrência de raios durante o ciclo de vida pode expressar um diagnóstico da severidade da tempestade e um prognóstico da intensificação da convecção. Além do fato que a expansão da área e a taxa de crescimento de ocorrência de atividade elétrica de raios durante o estágio inicial podem sugerir um indicativo do tamanho máximo ao longo do ciclo de vida e duração alcançado por estes SCM.

As análises discutidas acima mostraram uma forte correlação entre os estágios de desenvolvimento dos SCM e a evolução temporal de ocorrência total média de raios. No entanto, em conformidade aos significantes resultados observados nas seções 6.2.1 e 6.3.1, tornam-se importante avaliar se a evolução da ocorrência de raios por unidade de área (densidade de raios) também apresenta esta relação com as fases de desenvolvimento dos SCM em análise. Para analisar o comportamento de maneira geral dos 342 SCM que reportaram a ocorrência de raios com relação a esta propriedade, contabilizou-se a densidade média de raios (raios.km<sup>-2</sup>) entre todos estes sistemas para as cinco classes de estágio de ciclo de vida, isto é iniciação, estágio entre iniciação e maturação, maturação, estágio entre maturação e dissipação e dissipação. A Figura 6.39 mostra os resultados encontrados para a densidade média de raios (curva em verde), onde é apresentada também a evolução da área média (curva em vermelho) para esses sistemas.

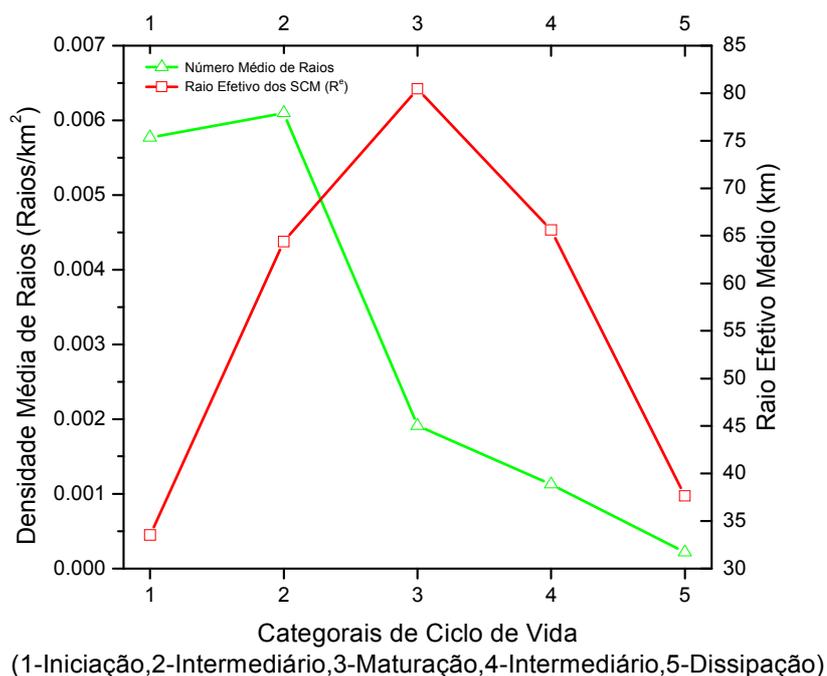


Figura 6. 39 - Variação da Densidade Média de Raios (Raios/km<sup>2</sup>) (curva verde) e do Raio Efetivo (km) (curva vermelha) para os SCM para 5 categorias de ciclo de vida: 1 (iniciação), 2 (estágio intermediário entre iniciação e maturação), 3 (maturação), 4 (estágio intermediário entre maturação e dissipação) e 5 (dissipação).

A análise da evolução da densidade média de raios (Figura 6.39) mostrou características um tanto diferentes das observadas para as ocorrências média de raios (mostradas na Figura 6.37), porém com uma correspondência interessante com a evolução da área média. Observa-se que a densidade de raios possui valores significativamente maiores durante o estágio de crescimento (entre o primeiro e segundo estágio, onde nota-se concomitantemente os menores tamanhos dos sistemas ao longo do ciclo de vida) em relação às demais fases do ciclo de vida. Um suave crescimento da densidade de raios ocorre entre a iniciação (0,0058 raios.km<sup>-2</sup>) e o segundo estágio, sendo que este estágio intermediário apresentou o maior valor (0,0061 raios.km<sup>-2</sup>), apenas um pouco maior em relação à iniciação (note que esta fase foi caracterizada pela mais intensa expansão da área dos sistemas). Próximo ao estágio de maturação, a densidade de raios diminuiu bruscamente (0,0019 raios.km<sup>-2</sup>), em consonância com uma menos intensa expansão da área. Durante a dissipação, há uma diminuição bem menos pronunciada da densidade de raios, atingindo 0,0002 raios.km<sup>-2</sup> no último estágio. Portanto, verifica-se uma média de

0,003 raios.km<sup>-2</sup> durante todo o ciclo de vida, com três vezes mais ocorrências de raios por quilômetro quadrado associadas ao estágio inicial em relação à maturação e vinte e oito vezes mais em comparação ao último estágio. Logo, enquanto a ocorrência média de raios no segundo estágio é quase 3 vezes maior em relação ao primeiro estágio (Figura 7.37), a densidade de raios é apenas um pouco maior.

Esses resultados corroboram qualitativamente com os observados por Morales et al (2004) e Tadesse e Anagnostou (2009) e Parker et al (2001). A mais alta densidade de raios na iniciação e no segundo estágio indica que o processo de convecção nos estágios iniciais é mais localizado, ou seja, associado a mais alta ocorrência de raios durante esses estágios está uma pequena área de intensa convecção (devido à alta taxa de condensação e fluxo de massa, como visto anteriormente). Ao atingir a maturação, apesar das ocorrências de raios serem ainda relativamente alta e possuir a máxima área total, a área associada à convecção (região convectiva) é relativamente menor. Durante a dissipação, apesar do tamanho dos sistemas serem menor, a convecção é muito menos intensa, implicando naturalmente numa menor ocorrência de raios, caracterizando uma menor concentração de raios por unidade de área. Esses resultados estão em consonância aos observados na seção 6.2.1 e 6.2.6, onde as maiores concentrações de ocorrência de raios por unidade de área (raios.km<sup>-2</sup>) estavam associadas aos menores SCM, nos quais a ocorrência de raios mostraram-se mais intensas em sistemas com forma mais circulares, caracterizando assim o início da convecção neste sistemas.

Os resultados discutidos acima são ratificados e complementados quando se analisa separadamente a evolução da densidade média de raios ao longo do ciclo de vida (Figura 6.40) referentes aos SCM com tempo de vida médio de 4 horas (curva em preto), 6 horas (curva em vermelho) e 7 horas (curva em azul). Em geral, a mais intensa ocorrência de raios por unidade de área está associada às primeiras horas do ciclo de vidas desses três sistemas, entretanto os sistemas de mais curta duração (4 e 6 horas) apresentam esse máximo de frequência nos estágios mais precoces que os de maiores tempo de vida (7 horas). Este fato pode ser notado verificando que o máximo de densidade de raios é atingido 1 hora antes da maturação para os sistemas com 4 e 7

horas e 2 horas antes para os sistemas com 6 horas de duração. Isso sugere que, em média, a densidade máxima de raios tende a ocorrer antes da máxima ocorrência de raios, mostrando como discutido anteriormente, o caráter mais localizado da convecção nos estágios iniciais de desenvolvimento dos SCM.

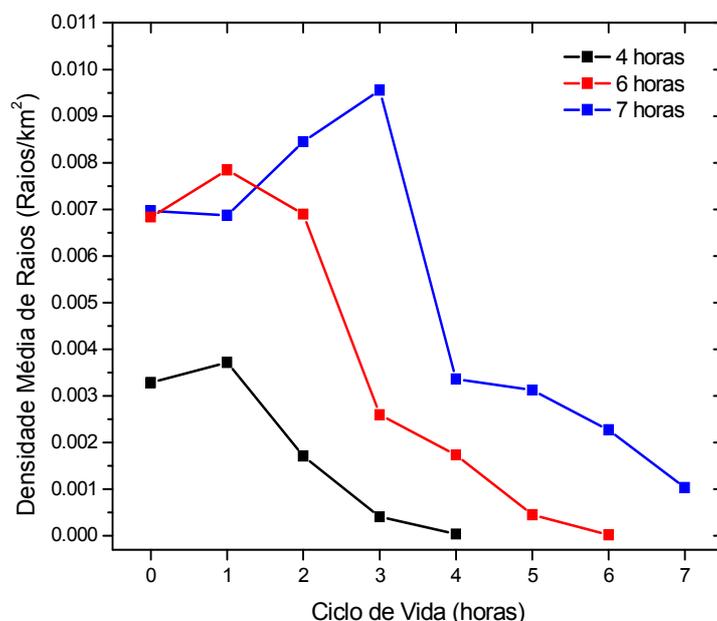


Figura 6. 40 - Variação da Densidade Média de Raios (raios/km<sup>2</sup>) dos SCM em função do ciclo de vida, para três valores de duração: 4 horas (curva preta), 6 horas (curva vermelha) e 7 horas (curva azul).

Nota-se também que a taxa de crescimento da densidade de raios (Figura 6.40) aparenta ser menor em relação à própria ocorrência média de raios (Figura 6.38). Observa-se portanto, que a taxa de crescimento do número de raios por unidade de área nos estágios de desenvolvimento é mais intensa quanto maior o tempo de vida dos sistemas. Uma diminuição pronunciada da densidade de raios é notada depois de atingido seu máximo valor até alcançar à maturação, onde há uma sistemática diminuição da frequência de raios por unidade de área, sendo mais intensas naqueles sistemas de menores tempos de vida. Essas características mostram que a densidade de raios nos sistemas de 6 horas de duração aumenta cerca de 2 vezes mais rápido em relação aos de 4 horas, e os de 7 horas de duração a taxa de densidade aumenta aproximadamente 3 vezes mais rápida,

com a mesma correspondência sendo observada entre os valores máximos de densidade de raios.

Desta forma, a ocorrência de raios por unidade de área (densidade de raios) mostra, em geral, uma correspondência complementar às análises de ocorrência média de raios ao longo do ciclo de vida, indicando uma significativa correlação com a evolução temporal da mais intensa região no interior dos SCM associada com convecção profunda. Em consonância às análises realizadas da ocorrência média de raios, a taxa de crescimento da densidade média de raios durante os estágios iniciais dos sistemas parece expressar um indicativo da intensidade da convecção ao longo do ciclo de vida e, portanto indicar a possível duração dos SCM com raios.

Os resultados apresentados e discutidos neste capítulo de forma geral indicaram e evidenciaram a forte correlação e importância das propriedades dinâmicas e termodinâmicas dos SCM nos processos de eletrificação e produção de raios, além de avaliar a variabilidade desta correlação ao longo do ciclo de vida dos sistemas. Portanto, esses resultados de modo geral sugerem que as propriedades microfísicas de partículas de gelo sejam importantes e tenham contribuição fundamental para os processos de eletrificação e ocorrência de raios em nuvens convectivas, hipóteses estas que serão avaliadas e analisadas no próximo capítulo do ponto de vista da microfísica de nuvens.

## **7 ANÁLISE DE PARÂMETROS PREVISORES DA ATIVIDADE ELÉTRICA USANDO MICROONDAS**

Este capítulo tem como objetivo analisar e estabelecer relações quantitativas entre a ocorrência de raios e algumas propriedades microfísicas de SCM, para avaliar a possibilidade de serem utilizados como parâmetros diagnósticos e precursores da atividade elétrica de raios. Para tanto, são utilizadas informações provenientes da faixa de microondas passivo de sensores a bordo de satélites e dados de ocorrência de raios reportados pela rede RINDAT, para a região de estudo durante o período de setembro de 2007 a fevereiro de 2008. Este capítulo foi estruturado em duas etapas. Na primeira etapa são apresentadas as análises de caracterização da ocorrência de raios associada ao  $D_e$  das partículas de gelo e ao IWP. Na segunda etapa apresentam-se as estatísticas que relacionam a diferença de polarização do canal de 85 GHz com a ocorrência de raios.

### **7.1 Estudo dos Parâmetros Microfísicos dos SCM Utilizando o Sensor TMI do Satélite TRMM**

Como evidenciado por diversos estudos reportados na literatura, o processo de separação de cargas e a posterior eletrificação das tempestades depende de parâmetros dinâmicos e termodinâmicos (WILLIAMS et al, 1991) e das propriedades microfísicas das nuvens. Portanto a atividade elétrica das nuvens possui interdependência também em relação ao tamanho, concentração numérica e fase das partículas de gelo (KEITH e SAUNDERS, 1990; MITZEVA e SAUNDERS, 1990; BAKER et al, 1995; MILLER et al, 2001; MILLER et al, 2001; TSENOVA et al, 2009). Por outro lado, a disponibilidade e distribuição de tamanho de gotículas de água líquida super-resfriada (SAUNDERS et al, 1991) e a velocidade de impacto (MITZEVA e SAUNDERS, 1990; BROOKS et al, 1997) são parâmetros microfísicos também relevantes para a ocorrência de raios. Desta forma, nesta seção analisa-se a possível relação empírica entre o tamanho das partículas ( $D_e$ ) de gelo, conteúdo integrado verticalmente de gelo (IWP) com a atividade elétrica de raios, utilizando-se as propriedades microfísicas  $D_e$  das partículas de gelo e IWP inferidos pelas simulações do modelo radiativo e de microfísica de nuvens proposto por Zhao e Weng (2001). Para isto, utilizou-se das

propriedades microfísicas  $D_e$  e IWP acopladas com dados de ocorrência de raios (como discutido na seção 5.3). Primeiramente serão apresentados os resultados referentes ao  $D_e$  das partículas de gelo, seguida pelas análises do IWP.

### 7.1.1 A Utilização do Diâmetro Efetivo da Partícula de Gelo ( $D_e$ )

De modo semelhante às análises realizadas para as propriedades físicas dos SCM (seção 6.2), nesta seção avaliaram-se as diferenças microfísicas em termos do tamanho das partículas de gelo em função da ocorrência ou não de raios. Para isto, foi realizada inicialmente uma análise comparativa entre a distribuição de frequência de eventos de  $D_e$  associados a *pixels* que não reportaram a ocorrência de raios (Figura 7.1 (a)) e aqueles que apresentaram ocorrência de raios (Figura 7.1 (b)).

Os eventos de nuvens com e sem raios caracterizaram-se por uma distribuição aproximadamente Gaussiana referente ao tamanho das partículas de gelo. A ocorrência de raios esteve associada a partículas de gelo com tamanho um tanto maiores em relação aquelas que não apresentaram raios. Verificou-se que as maiores ocorrências de partículas de gelo por classe possuíam  $D_e$  entre 1,16 mm e 1,39 mm para nuvens com raios e entre 0,92 mm e 1,26 mm para nuvens sem raios, representando 33% e 25 %, da população de partículas de gelo, respectivamente. As características dessas duas distribuições indicaram que as partículas de gelo associadas à ocorrência de raios foram em média 0,26 mm maiores em relação as que não apresentaram raios, notando que um valor médio de 1,23 mm e 0,97 mm foi encontrado respectivamente para os dois grupos de partículas de gelo. Esses resultados foram ratificados pelo limiar mínimo de tamanho na qual se observou que a ocorrência de raios esteve associada a partículas de gelo com no mínimo 0,012 mm de tamanho em comparação a 0,000024 mm das que não apresentaram raios (isto é, o tamanho mínimo reportado para ocorrência de raios é centenas de vezes maior em relação ao mínimo tamanho das partículas de gelo que não apresentaram ocorrência de raios). Esses resultados aparentemente sugerem que o início da ocorrência de atividade elétrica de raios depende das partículas de gelo atingirem um tamanho mínimo, o que é aceitável por causa da significativa dependência da

eletrificação das tempestades em relação à intensidade das interações entre as partículas de gelo, que depende em parte do tamanho dessas partículas que estão interagindo entre si. Contudo, ressalta-se que esta é apenas uma hipótese, visto que a definição de um limiar mínimo de tamanho mais significativo para o início da ocorrência da atividade elétrica de raios necessitaria de estudos mais detalhados com um período estatístico maior.

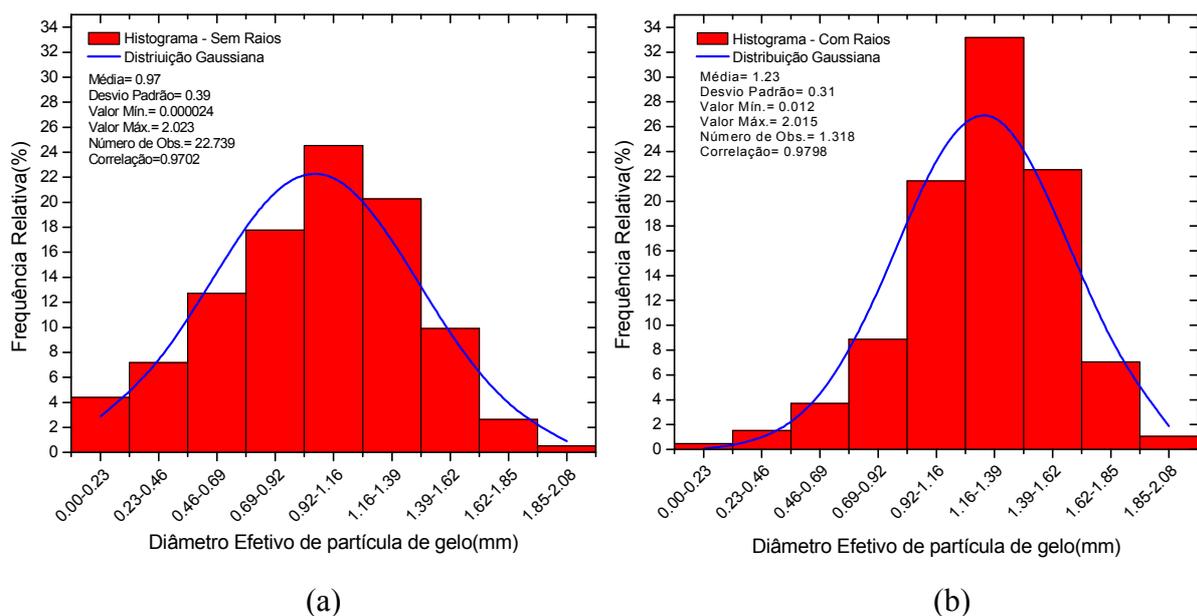


Figura 7. 1 - Histograma de frequência relativa (%) da propriedade microfísica Diâmetro Efetivo (mm) de eventos de partículas de gelo que (a) não apresentaram raios e para eventos (b) que apresentaram raios e as respectivas curvas ajustadas.

A análise da Figura 7.2 mostra como a distribuição de tamanho de partículas de gelo entre aquelas associadas à ocorrência de raios (curva vermelha) e para aquelas que não reportaram ocorrência (curva azul) de raios foram diferentes entre si. O deslocamento da distribuição dos eventos com raios para maiores valores de  $D_e$  foi verificado pelo fato de que acima de 1,16 mm de tamanho houve uma predominância de partículas que apresentaram raios em relação aquelas que não reportaram a ocorrência de raios, sendo que o oposto foi observado para valores menores que este. A ocorrência de raios associada às maiores partículas de gelo em relação as que não reportaram ocorrência de raios está em consonância com os diversos trabalhos encontrados na literatura e é fisicamente aceitável. Essas características mostram que o tamanho das partículas de

gelo pode indicar a ocorrência ou não da atividade elétrica de raios, podendo ser um importante parâmetro para caracterizar estes dois diferentes tipos de distribuições.

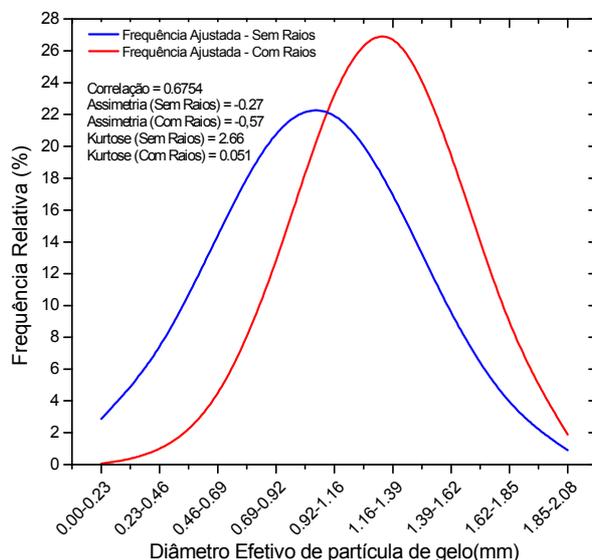


Figura 7. 2 - Análise comparativa entre a curva ajustada para o histograma de frequência relativa de Diâmetro Efetivo de eventos que apresentaram raios (curva vermelha) e para os que não apresentaram raios (curva azul).

O Diâmetro Efetivo das partículas de gelo, como discutido no parágrafo anterior, apresentou uma contingência de valores maiores quando ocorridas em associação com registro de raios. Desta forma, torna-se importante avaliar como foi o comportamento do total de raios em função da variabilidade do tamanho das partículas de gelo. Para isto, para cada intervalo de classe de tamanho, contabilizou-se a ocorrência de raios associadas a todas as partículas de gelo pertencentes a estas classes a partir da contingência de um total de 7.631 raios. A Figura 7.3 mostra o comportamento da frequência acumulada de raios (%) em função das classes de  $D_e$  das partículas de gelo.

A Figura 7.3 mostra que as ocorrências de raios são observadas em associação às maiores classes de tamanho de partículas de gelo, sendo que uma ocorrência significativa de raios começou a ser verificada em média para partículas com tamanho maiores que 0,92 mm, aumentando gradativamente até partículas com 1,85 mm. Assim, as partículas com tamanho menores que 0,92 mm representaram menos de 13 % do total

de raios registrados, enquanto que mais de 90 % dos raios ocorreram em associação a partículas menores que 1,62 mm. Em princípio, a pouca ocorrência de raios associadas a partículas com tamanho maiores que 1,85 mm e menores que 0,92 mm pode estar relacionado a um fator estatístico, visto a pouca ocorrência de eventos de partículas de gelo para estas classes (a qual representou menos de 10 % do total de eventos, Figura 7.1 (b)). Contudo, a baixa ocorrência de raios para partículas de gelo com tamanho menor que 0,69 mm, deveu-se pelo menos em parte a um fator físico, visto a menor ocorrência média de raios entre as partículas de gelo pertencentes a estas classes (não mostrado) e baixo desvio padrão entre esses valores médios. Desta forma, a variabilidade do número total de raios, parece ser modulada em parte pelo tamanho das partículas de gelo. Estes resultados sugerem que pode haver uma relação crescente entre o número de ocorrência média de raios e o tamanho das partículas de gelo, indicando que esta relação pode ser um possível parâmetro de severidade e prognóstico da atividade elétrica de raios.

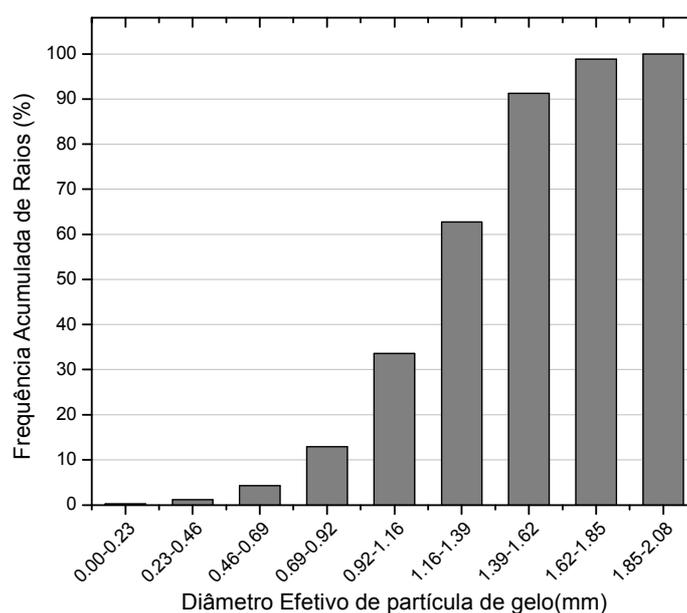


Figura 7. 3 - Frequência Acumulada (%) de ocorrência de raios em função do Diâmetro Efetivo das partículas de gelo.

Estas hipóteses reforçam a importância de caracterizar-se de forma objetiva e quantitativa a variabilidade da ocorrência de raios em função do tamanho das partículas de gelo. Para realizar esta análise, determinou-se a probabilidade de ocorrência de raios

para cada classe de tamanho de partícula de gelo utilizando-se os dados apresentados na Figura 7.1 (b) e a Equação 5.4 (seção 5.3.1). Assim, a probabilidade de ocorrência de ao menos um (vermelho), dois (azul), quatro (verde), oito (rosa) e dezesseis (amarelo) raios em um intervalo de 15 minutos em função do tamanho das partículas de gelo foi determinada e os resultados são mostrados na Figura 7.4.

De maneira geral, houve um crescimento na probabilidade de ocorrência de raios associado a um aumento no  $D_e$  das partículas de gelo, mas os maiores valores para uma mesma classe de tamanho foram reportados para a relação empírica de menor estimativa de probabilidade de raios (isto é, para  $\text{Prob} (\geq 1)$ ), o que deveu-se a predominância de ocorrência de poucos raios do que muitos raios associado a cada *pixel* de  $D_e$ . Desta forma, as curvas associadas às estimativas de menores probabilidades de ocorrência de raios caracterizam-se por um mais rápido crescimento em função do tamanho das partículas de gelo. Observa-se assim um rápido aumento na probabilidade de ocorrência de raios a partir de partículas com tamanho aproximadamente de 0,6 mm até alcançarem 1,7 mm, as quais apresentaram uma probabilidade de 1,6 %; 0,9 %; 0,4 %; 0,2 % e 0,1 % e uma probabilidade de 13,4 %; 8,4 %; 5,0 %; 2,4 % e 0,6 % de ocorrer ao menos um, dois, quatro, oito e dezesseis raios, respectivamente. Contudo, ressalta-se que a probabilidade de ocorrer mais de 16 raios em um intervalo de 15 minutos apenas ocorreu quando o tamanho das partículas de gelo excedeu um limiar em torno de 0,6 mm de  $D_e$ . A ocorrência de oito e dezesseis raios para partículas de gelo com tamanho médio maiores que aproximadamente 1,7 mm possuiu uma probabilidade menor em relação ao valor médio de 1,5 mm, sendo o mesmo observado para ocorrência de ao menos um raio para partículas com 2 mm de tamanho em relação às de 1,7 mm. Esta diminuição na probabilidade de raios associada a partículas de gelo de tamanho maiores pode estar relacionada, como observado na Figura 7.1 (b) e Figura 7.3, a pequena ocorrência de casos de partículas de gelo que apresentaram raios que possuem tamanhos maiores que estes valores.

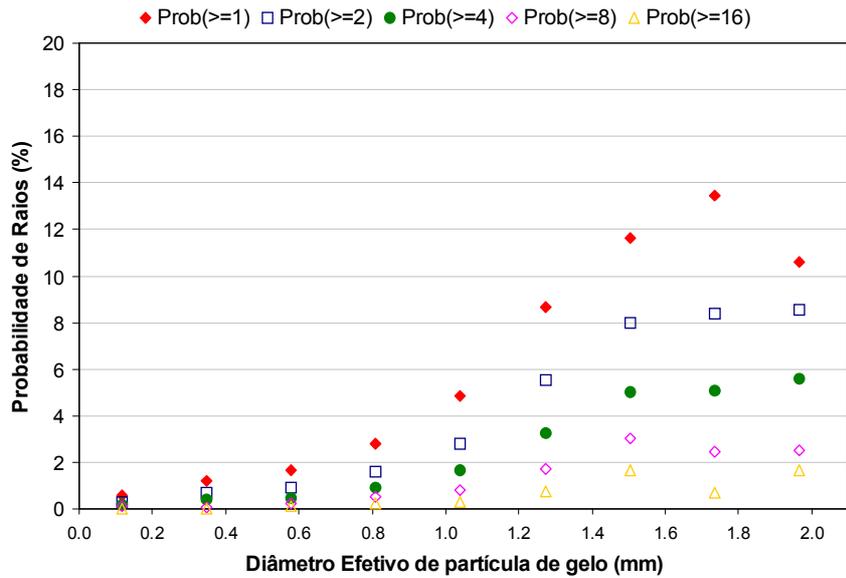


Figura 7. 4 - Frequência de ocorrência de raios em função do Diâmetro Efetivo das partículas de gelo para a probabilidade de ocorrer ao menos um (vermelho), dois (azul), quatro (verde), oito (rosa) e dezesseis (amarelo) raios em um intervalo de 15 minutos.

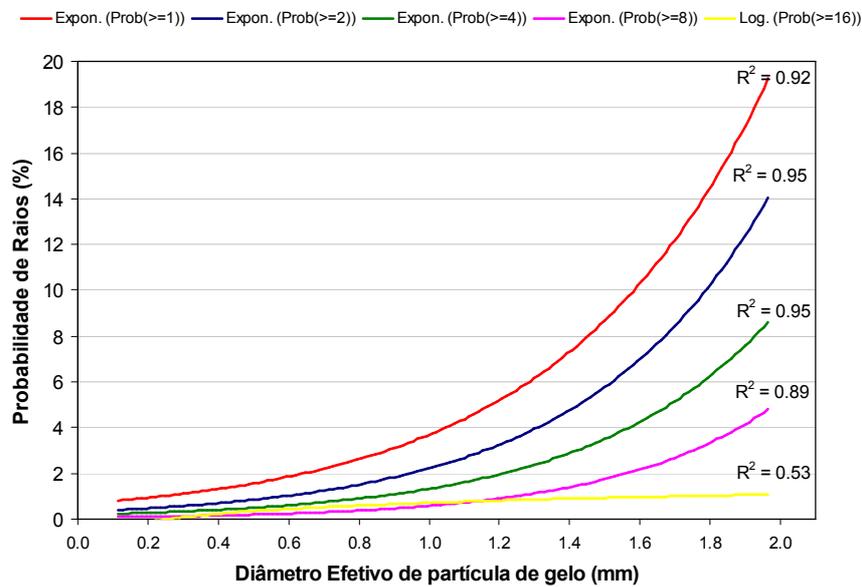


Figura 7. 5 - Curvas exponenciais ajustadas para a probabilidade de ocorrência de raios em função do Diâmetro Efetivo das partículas de gelo, para a probabilidade de ocorrer ao menos um (vermelho), dois (azul), quatro (verde), oito (rosa) e dezesseis (amarelo) raios em um intervalo de 15 minutos.

Desta forma, a forte correlação positiva encontrada entre essas duas variáveis, possibilitou o ajuste de curvas do tipo exponencial para cada relação de dispersão que representou a probabilidade de ocorrência de um, dois, quatro, oito e dezesseis raios em função do  $D_e$ , com alto coeficiente de determinação para as cinco curvas ajustadas. A Figura 7.5 mostra as curvas ajustadas para a probabilidade de ocorrência de um (curva vermelha), dois (curva azul), quatro (curva verde), oito (curva rosa) e dezesseis (curvas amarela) raios em função do tamanho das partículas de gelo. As expressões parametrizadas para cada uma dessas curvas ajustadas são expressas da seguinte forma:

$$P_{D_e}(\geq 1) = 0,67 * \exp(1,71 * D_e) \quad , \text{ sendo } R^2 = 0,93 \quad (7.1)$$

$$P_{D_e}(\geq 2) = 0,33 * \exp(1,91 * D_e) \quad , \text{ sendo } R^2 = 0,95 \quad (7.2)$$

$$P_{D_e}(\geq 4) = 0,20 * \exp(1,94 * D_e) \quad , \text{ sendo } R^2 = 0,95 \quad (7.3)$$

$$P_{D_e}(\geq 8) = 0,067 * \exp(2,17 * D_e) \quad , \text{ sendo } R^2 = 0,89 \quad (7.4)$$

$$P_{D_e}(\geq 16) = 0,52 * \ln(D_e) + 0,72 \quad , \text{ sendo } R^2 = 0,53 \quad (7.5)$$

Em que,

$P_{D_e}(\geq j)$  é a probabilidade de ocorrência de ao menos  $j$  raios em porcentagem;

$D_e$  corresponde ao Diâmetro Efetivo da Partícula de gelo em milímetros.

Portanto, um comportamento tipicamente exponencial representou de forma bastante significativa a relação crescente existente entre a probabilidade de ocorrência de raios e o tamanho das partículas de gelo. Contudo para a probabilidade de ocorrência de mais de dezesseis raios (Equação 7.5), o melhor ajuste foi representado por uma função do tipo Logarítmica, porque a ocorrência dessa probabilidade de raios está condicionada a partículas como tamanhos maiores que 0,6 mm. Os resultados indicam que a probabilidade de raios aumenta de forma mais acentuada em função do tamanho das partículas de gelo para as maiores partículas em relação às menores, principalmente acima de 0,6 mm. Isso sugere a intensa transferência de cargas elétricas durante as interações entre as maiores partículas de gelo. Este mesmo comportamento exponencial foi observado nas análises de ocorrência média de raios associadas às variáveis  $T_{med}$ ,  $T_{min}$  e  $T_{min9}$  apresentadas no capítulo 6, corroborando com o trabalho de Machado et al

(2008), os quais analisando nuvens de convecção profunda, encontraram um crescimento exponencial na probabilidade de raios em função do aumento da diferença de  $T_B$  entre o canal do vapor d'água e IR.

Zhao e Weng (2001) encontraram resultados que reforçam os encontrados pela análises discutidas no parágrafo anterior. Esses autores, analisando uma tempestade em latitudes média, encontraram as maiores partículas de gelo em torno de 0,9 mm a 1,2 mm (note que coincidentemente uma crescente probabilidade de raios foi verificada acima de 0,8 mm no presente estudo) próxima a região convectiva da tempestade, associada às mais baixas  $T_B$  no IR (abaixo de 220 K) com registro de intensa ocorrência de precipitação em solo. Essas observações ratificam os resultados discutidos no capítulo 6, no fato que a  $T_B$  no IR possui uma importante correspondência com a formação de partículas de gelo e a intensificação da atividade elétrica de ocorrência de raios.

O processo microfísico correspondente a esta forte correlação positiva encontrada entre a ocorrência de raios e o tamanho das partículas de gelo observados nesta seção pode estar associado em partes à dependência observada da quantidade de carga transferida por colisão entre as partículas de gelo em função do tamanho e velocidade de impacto das mesmas (embora outros parâmetros microfísicos possuem também significativa importância) (BAKER e DASH, 1989; KEITH e SAUNDERS, 1990; MITZEVA e SAUNDERS, 1990; SAUNDERS et al, 1991; BAKER et al, 1995; MILLER et al; 2001 e TSENOVA et al, 2009). Em concordância a esta hipótese, Keith e Saunders (1990), Saunders et al (1991) e Miller et al (2001), através de simulações de modelos numéricos de desenvolvimento e eletrificação de tempestades e através de estudos observacionais (radar, satélite e medidores em solo de relâmpagos), notaram que a quantidade de carga transferida durante as colisões entre as partículas de gelo possuem uma dependência não linear com o tamanho das partículas de gelo.

Considerando o mecanismo de eletrificação de nuvens colisional não-indutivo (não necessita de um campo elétrico ambiente para ocorrer), a colisão das maiores partículas de gelo com as menores (cristais de gelo) provoca a remoção de uma quantidade mais

significativa de cargas, o que representará uma contingência mais intensa de cargas por partículas de gelo (BAKER e DASH, 1989; KEITH e SAUNDERS, 1990; TSENOVA et al, 2009). Contudo, alguns estudos têm mostrado que as maiores partículas de gelo possuem uma temperatura de superfície maior em relação às menores, sugerindo a maior ocorrência de íons livres em sua superfície ou uma remoção mais eficaz dessa superfície crescida por *riming* durante as colisões (TSENOVA et al, 2009). Logo, aparentemente quanto maior a quantidade de carga associada a cada partícula de gelo, mais intenso será o campo elétrico formado no interior da nuvem, propiciando uma maior probabilidade de ocorrer relâmpagos IN e relâmpagos NS (raios). Todavia, o sinal da carga transferida entre as colisões possui forte dependência da quantidade de água líquida super-resfriada disponível e da temperatura, como sugerido pela Teoria da Taxa de Crescimento Relativa e a Teoria de Eletrificação da Superfície de Gelo em Crescimento ou Evaporação (maiores detalhes em SAUNDERS, 1993).

### **7.1.2 A Utilização do Conteúdo Integrado Verticalmente de Gelo (IWP)**

A análise da propriedade microfísica Conteúdo Integrado Verticalmente de Gelo (*Ice Water Path*, IWP) foi realizada de modo semelhante às associadas ao  $D_e$  das partículas de gelo. A caracterização e diferenciação dos *pixels* associados à IWP com e sem a presença de raios foi realizada inicialmente através de histogramas de frequência relativa. A Figura 7.6 mostra a distribuição de frequência relativa dos eventos de IWP que não estiveram associados à ocorrência de raios (Figura 7.6 (a)) e os que reportaram a ocorrência de raios (Figura 7.6 (b)).

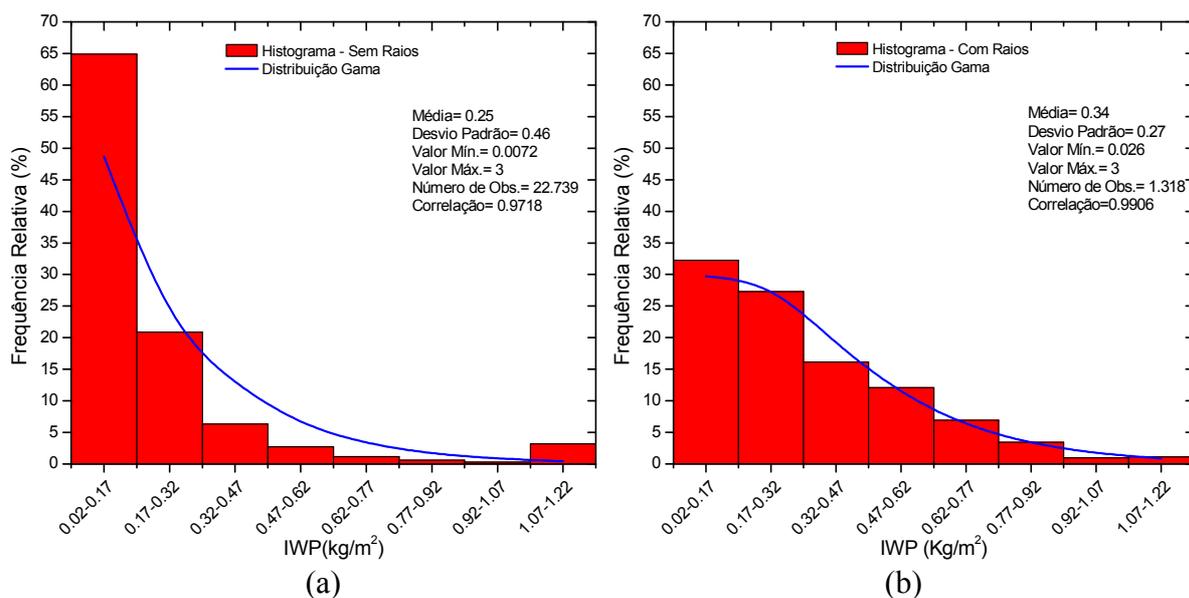


Figura 7. 6 - Histograma de frequência relativa (%) da propriedade microfísica Conteúdo Integrado Verticalmente de Gelo (IWP) ( $\text{kg/m}^2$ ) de eventos que (a) não apresentaram raios e para eventos (b) que apresentaram raios e as respectivas curvas ajustadas.

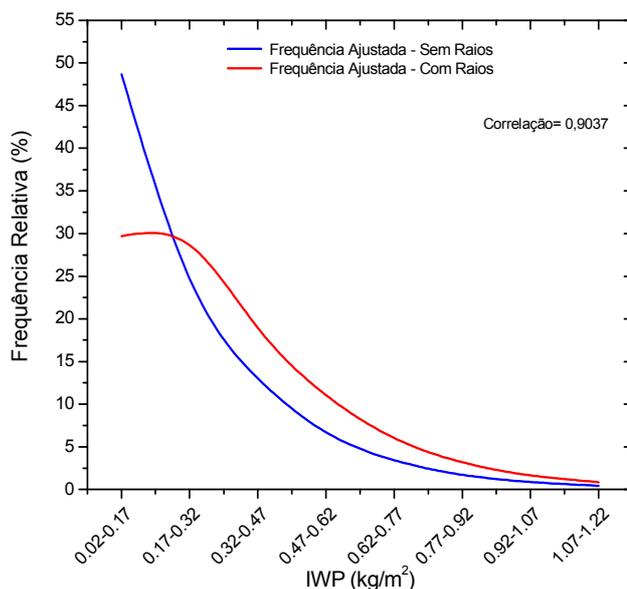


Figura 7. 7 - Análise comparativa entre a curva ajustada para o histograma de frequência relativa de Conteúdo Integrado Verticalmente de Gelo (IWP) de eventos que apresentaram raios (curva vermelha) e para os que não apresentaram raios (curva azul).

Os eventos de IWP que não apresentaram ocorrência de raios (Figura 7.6 (a)) contabilizam 22.739 observações, enquanto que a presença de raios (Figura 7.6 (b)) foi

verificada em 1.318 observações de IWP, mostrando assim que uma amostra relativamente pequena de eventos em estudo caracterizou-se pela ocorrência de atividade elétrica de raios. Observa-se uma rápida diminuição na distribuição de eventos em função do aumento do conteúdo de gelo, conforme pode ser notado pela distribuição de eventos Gama ajustada a esses dois grupos de dados (sem e com raios). No entanto, os eventos de IWP sem raios apresentaram uma diminuição na distribuição de eventos um tanto mais acentuada em relação aqueles que reportaram ocorrência de raios durante as primeiras classes, enquanto que a variabilidade de eventos entre as classes para os IWP com raios apresentou-se mais homogênea. Este fato pode ser confirmado analisando a Figura 7.7, onde nota-se que eventos de IWP acima de  $0,32 \text{ kg.m}^{-2}$  foram predominantemente caracterizados com ocorrência de raios (curva vermelha), enquanto eventos de IWP com valores abaixo desse limiar caracterizaram-se pela não ocorrência de raios (curva azul).

Assim, a ocorrência de raios esteve associada mais significativamente aos *pixels* com maiores conteúdos de gelo em relação aos que não reportaram raios, notando-se que a classe com maiores ocorrências que possuiu IWP entre  $0,02 \text{ kg.m}^{-2}$  e  $0,17 \text{ kg.m}^{-2}$  representou apenas 32 % do total de eventos com raios, contra 65 % do total de eventos para aqueles sem raios. Além disso, 95 % dos eventos com raios ocorreram associados à IWP menores que  $0,77 \text{ kg.m}^{-2}$  contra  $0,62 \text{ kg.m}^{-2}$  para os sem ocorrência de raios. Essas características inferem que a ocorrência de raios esteve associada a um valor médio de IWP em torno de  $0,09 \text{ kg.m}^{-2}$  maior em relação ao valor médio para a amostra sem raios. Desta forma, pode-se especular que a maior concentração de partículas de gelo favoreceu a um aumento na taxa de colisões entre as partículas de gelo que, combinado com outras propriedades microfísicas e dinâmicas, contribuíram para a ocorrência de raios em detrimento aqueles *pixels* associados com menores concentrações de partículas de gelo.

Durante a análise do  $D_e$  das partículas de gelo, notou-se que o limiar mínimo para a ocorrência de raios foi maior em relação a não ocorrência de raios, o qual sugeriu ser um parâmetro microfísico precursor para o início da atividade elétrica de raios, contudo

o mesmo é observado para os valores de IWP encontrados nesta presente análise (Figura 7.6 (a) e (b)). A ocorrência de raios foi reportada quando o conteúdo de gelo atingiu um valor mínimo de  $0,026 \text{ kg.m}^{-2}$ , enquanto o mínimo IWP associado aos eventos que não apresentaram raios foi de  $0,0072 \text{ kg.m}^{-2}$ , ou seja, o início da ocorrência de raios caracterizou-se com um valor de IWP quase quatro vezes maior em relação ao mínimo valor daqueles que não apresentaram ocorrência de raios. No entanto, o valor máximo de IWP encontrado para os eventos com e sem raios não possuiu essa mesma característica, o qual apresentou os mesmos valores máximos ( $3 \text{ kg.m}^{-2}$ ). Essa limitação deveu a metodologia adotada pelo modelo, sendo que para o mesmo há uma insensibilidade ao sinal de espalhamento em 89 GHz e 157 GHz em caracterizar partículas de gelo maiores que 3,5 mm, o qual limita diretamente o máximo valor de IWP a ser utilizado em torno de  $3 \text{ kg.m}^{-2}$ , para que se evite estimativas errôneas tanto de  $D_e$  quanto de IWP. Como mostrado pelos resultados discutidos acima e sugeridos pela análise da Figura 7.6 (a) e (b), para valores de IWP entre  $0 \text{ kg.m}^{-2}$  e  $3 \text{ kg.m}^{-2}$  este parâmetro microfísico diferencia com aceitável coerência a ocorrência ou não de atividade elétrica de raios, podendo dar uma contribuição significativa para o processo de eletrificação das nuvens tempestades e modular, através de uma relação física, a variabilidade de ocorrência de atividade elétrica de raios.

A Figura 7.8 mostra a variabilidade da frequência acumulada de raios em função das classes de IWP, na qual considerou-se a contingência de 7.631 raios observados. A atividade de raios pode ocorrer para todos os valores de IWP, no entanto mais de 90 % dos raios estiveram associados a conteúdo de gelo menor que  $0,77 \text{ kg.m}^{-2}$ . A pouca ocorrência total de raios observada para IWP acima de  $0,77 \text{ kg.m}^{-2}$  aparentemente esteve associado aos poucos casos de eventos de *pixels* com conteúdo de gelo maior que este valor, o qual representou apenas 5 % do total de eventos (Figura 7.6(b)). Observou-se a ocorrência apreciável de raios logo nas primeiras classes de IWP, sendo que a primeira classe, a qual possui valores de IWP entre  $0,02 \text{ kg.m}^{-2}$  e  $0,17 \text{ kg.m}^{-2}$ , caracterizou-se com 32 % do total das ocorrências dos raios. Esta significante incidência de raios para valores mais baixos de IWP deveu-se em parte a elevada ocorrência de casos de conteúdo de gelo que apresentaram raios associados a estas classes, os quais

representaram 60 % do total de observações (Figura 7.6 (b)). A ocorrência de 50 % dos raios apenas foi reportada quando o conteúdo de gelo atingiu valores maiores que aproximadamente 0,32 kg em uma área de 1 m<sup>2</sup>. Estes resultados demonstraram que a concentração de partículas de gelo (kg.m<sup>-2</sup>) esteve associada de forma bastante apreciável à severidade das tempestades e, como consequência, à atividade elétrica das nuvens convectivas embebidas em seu interior. Para explorar e ratificar mais fisicamente estas observações torna-se importante avaliar a relação quantitativa entre a ocorrência de atividade elétrica de raios e a distribuição de valores de IWP em termos probabilísticos.

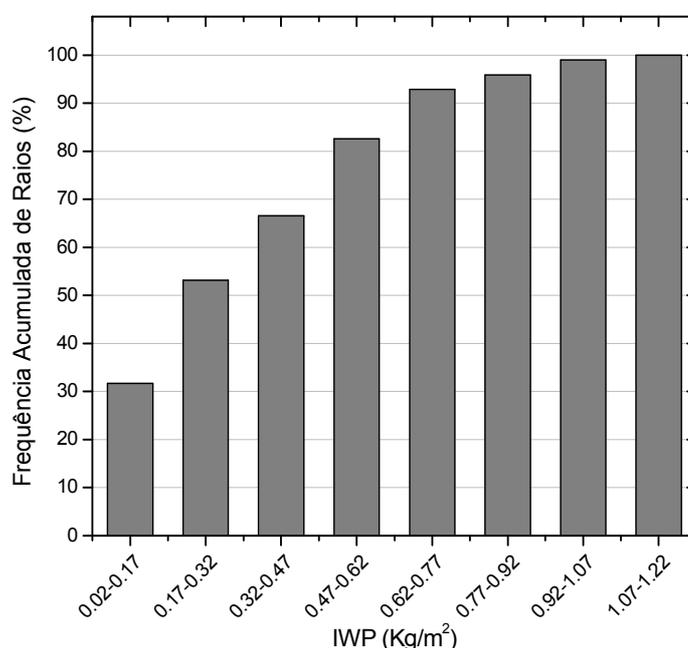


Figura 7. 8 - Frequência Acumulada (%) de ocorrência de raios em função do Conteúdo Integrado Verticalmente de Gelo (IWP).

A Figura 7.9 mostra o comportamento da probabilidade de ocorrência de ao menos um (vermelho), dois (azul), quatro (verde), oito (rosa) e dezesseis (amarelo) raios em função dos valores de IWP. A probabilidade de ocorrência de raios aumentou de forma simultânea com os crescentes valores de IWP. Assim, um mínimo de probabilidade foi observado para conteúdo de gelo de 0,1 kg m<sup>-2</sup> e atingindo máximo valores para IWP aproximadamente de 0,7 kgm<sup>-2</sup>, as quais representam a probabilidade de 3 %, 2 %, 0,9 %, 0,5 % e 0,2 % e de 26 %, 20 %, 15 %, 8, 5 % de ocorrer ao menos um, dois, quatro, oito e dezesseis raios, respectivamente. A rápida diminuição na probabilidade de raios

após  $0,7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  pode estar associada à pequena população de eventos de IWP reportada para estas classes (representaram apenas 4 % das observações, Figura 7.6(b)). Por outro lado, pode estar acontecendo que esses IWP apesar de possuírem mais altos valores, possam estar associados ao estágio de dissipação das nuvens convectivas, apresentando assim pouca ocorrência de raios (como mostrado na seção 6.3.2). Todavia, esta hipótese física também pode estar associada à relação existente entre IWP e  $D_e$ . Como encontrado por Stubenrauch et al (2004), parece existir uma correlação negativa entre IWP e  $D_e$  em nuvens opticamente mais espessas, de forma que altos IWP podem ser caracterizados por baixos  $D_e$ , indicando uma nuvem em formação ainda com partículas pequenas (caracterizando poucos raios, como visto nas análises de  $D_e$ , seção 7.1.1). Em consistência a esta hipótese, Stith et al (2002) observaram menores partículas de gelo associadas a mais altos IWP em regiões de fortes *updrafts* (células convectivas) e partículas maiores em associação a menores IWP em regiões de mais fraco *updraft* (partes estratiforme). Entretanto, estas hipóteses podem ser ratificadas e mais elucidadas utilizando um período maior de dados e através de uma análise simultânea do ciclo de vida de IWP e  $D_e$ .

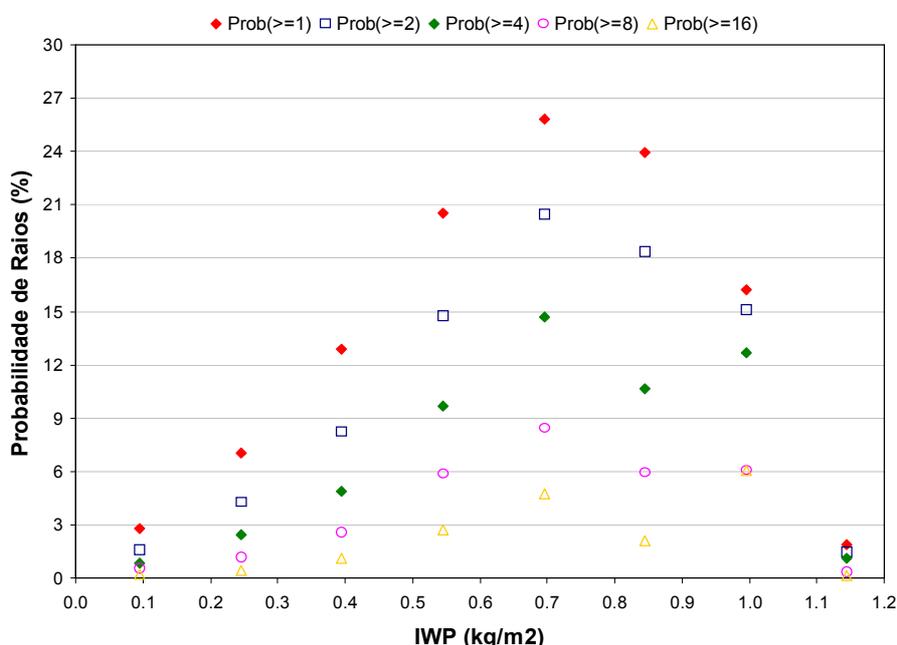


Figura 7.9 - Frequência de ocorrência de raios em função do Conteúdo Integrado Verticalmente de Gelo (IWP) para a probabilidade de ocorrer ao menos um (vermelho), dois (azul), quatro (verde), oito (rosa) e dezesseis (amarelo) raios em um intervalo de 15 minutos.

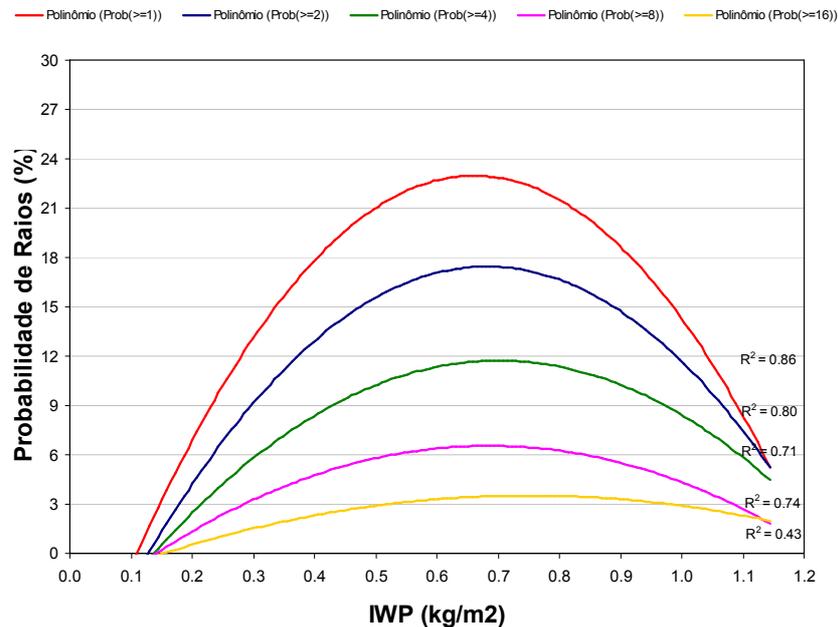


Figura 7. 10 - Curvas polinomiais de segundo grau ajustadas para a probabilidade de ocorrência de raios em função do Conteúdo Integrado Verticalmente de Gelo (IWP) para a probabilidade de ocorrer um (vermelho), dois (azul), quatro (verde), oito (rosa) e dezesseis (amarelo) raios em um intervalo de 15 minutos.

Resultados semelhantes à forte correspondência positiva entre valores de IWP e outros parâmetros de nuvem foram observados por Zhao e Weng (2001) através de um estudo de caso de um sistema tropical nos EUA, utilizando o mesmo algoritmo de inferência de IWP. Esses autores verificaram um pronunciado aumento nos valores de IWP acima de  $0,5 \text{ kg.m}^{-2}$  associado a uma brusca diminuição da  $T_{\text{BIR}}$  e intenso aumento de precipitação, fatores estes fortemente relacionados à ocorrência de atividade elétrica de raios. Baker et al (1995) e Blyth et al (2001), utilizando relâmpagos obtidos pelo LIS,  $T_{\text{B}}$  do TMI e complementado por simulações de modelo de eletrificação de nuvens, observaram que a frequência de relâmpagos tende a aumentar associada a um incremento do conteúdo de gelo das tempestades. Pode-se especular que essa característica pode estar associada ao fato que a quantidade de carga transferida durante a interação entre as partículas depende não apenas do tamanho, mas também da concentração dessas partículas, entre outros fatores microfísicos (KEITH e SAUNDERS, 1990; BAKER et al, 1995 e MILLER et al, 2001). Assim, a maior disponibilidade de partículas de gelo no interior das nuvens poderia estar influenciando

no aumento na taxa de colisões entre as partículas, propiciando a existência de uma quantidade relevante de partículas de gelo eletrizadas, favorecendo a formação de um campo elétrico mais intenso e uma maior probabilidade de ocorrer raios. Contudo, ressalta-se que a quantidade de partículas de gelo pode possuir papel importante em outras formas de transferência de cargas durante as colisões, até porque pela física empregada pelo modelo de inferência de microfísica de nuvens, o IWP é influenciado de forma linear pelo tamanho das partículas de gelo que estão interagindo para formar a eletrificação das nuvens convectivas.

Esse comportamento do aumento da probabilidade de ocorrência de raios em função dos valores crescentes de IWP observado na Figura 7.9, permitiu que fosse parametrizado um ajuste polinomial a esta relação. A Figura 7.10 mostra as curvas ajustadas para a probabilidade de ocorrência de um (curva vermelha), dois (curva azul), quatro (curva verde), oito (curva rosa) e dezesseis (curvas amarela) raios em função do IWP. As parametrizações referentes a cada uma dessas curvas ajustadas são expressas da seguinte forma:

$$P_{IWP}(\geq 1) = -75,7 * IWP^2 + 100,1 * IWP - 10,1 \quad , \text{ sendo } R^2 = 0,86 \quad (7.6)$$

$$P_{IWP}(\geq 2) = -57,9 * IWP^2 + 77,7 * IWP - 9,0 \quad , \text{ sendo } R^2 = 0,79 \quad (7.7)$$

$$P_{IWP}(\geq 4) = -36,9 * IWP^2 + 51,7 * IWP - 6,4 \quad , \text{ sendo } R^2 = 0,71 \quad (7.8)$$

$$P_{IWP}(\geq 8) = -22,2 * IWP^2 + 30,4 * IWP - 3,9 \quad , \text{ sendo } R^2 = 0,74 \quad (7.9)$$

$$P_{IWP}(\geq 16) = -9,9 * IWP^2 + 14,9 * IWP - 2,1 \quad , \text{ sendo } R^2 = 0,43 \quad (7.10)$$

Em que,

$P_{IWP}(\geq j)$  é a probabilidade de ocorrência de ao menos  $j$  raios em porcentagem;

$IWP$  corresponde ao Conteúdo Integrado Verticalmente de Gelo em quilograma.metro<sup>-2</sup>.

As curvas ajustadas (Figura 7.10) e as parametrizações encontradas (Equações 7.6-10) para a relação física mostrada entre a probabilidade de raios e o valores de IWP indicam

o mais rápido aumento na probabilidade de raios para IWP aproximadamente menores que  $0,7 \text{ kg.m}^{-2}$  e uma diminuição pronunciada acima deste valor. Todavia, ressalta-se mais uma vez que esta característica observada para valores mais altos de IWP (acima de  $0,7 \text{ kg m}^{-2}$ ) poderá ser mais elucidada através da utilização de um período maior de análise (devido ao curto período de dados disponíveis utilizados neste estudo) e a classificação dos IWP em função do tamanho das partículas. Com isso, a influência de fatores estatístico (pouca casos de eventos para IWP maiores) e fatores físicos, como a possível existência de processo de saturação dos centros de cargas no interior das nuvens convectivas, poderiam ser mais bem identificados (como discutido anteriormente). A relação positiva entre a probabilidade de raios e o IWP ratifica os resultados e as hipóteses sugeridas no capítulo 6 sobre a forte correspondência encontrada entre a temperatura do topo dos SCM e a ocorrência de raios. Desta forma, o conteúdo de gelo das tempestades (note que o IWP está associado a valores mais altos de probabilidade de raios em relação as curvas de  $D_e$  analisado) parece ser um parâmetro fortemente responsável em concomitância aos demais fatores dinâmicos e microfísicos responsáveis para processo de eletrificação das nuvens.

## **7.2 A Orientação das Partículas de Gelo e sua Relação com a Ocorrência de Raios**

Após analisada e discutida a importância e influência do tamanho e conteúdo das partículas de gelo no processo de eletrificação e ocorrência de atividade elétrica de raios, torna-se importante complementar esta caracterização da composição microfísica de sistemas de convecção profunda avaliando se a forma e orientação dessas partículas de gelo em estudo também expressam alguma correspondência com a ocorrência de raios. A relevância dessa análise está no fato que trabalhos como os de Spencer et al (1989), Prigent e Pardo (2001) e Prigent et al (2005) tem revelado que a assinatura de espalhamento polarizado (vertical e horizontal) na frequência de 85 GHz possui certa sensibilidade à forma e orientação das partículas de gelo. Assim, para esta análise foram computadas as diferenças de temperatura polarizadas ( $T_{BV}-T_{BH}$ ) para o canal de 85 GHz do sensor TMI e acopladas com as ocorrências de raios para cada *pixel*, como descrito na seção na metodologia (seção 5.3.2). Para evitar contaminação de sinal em

microondas oriundos da superfície e demais alvos não sendo partículas de gelo, essas análises são limitadas a valores de PCT em 85 GHz menores que 250 K. A apresentação das estatísticas e discussão dos resultados é realizada na seção seguinte.

### **7.2.1 Avaliação da Relação entre a Polarização de Partículas de Gelo e a Atividade Elétrica de Raios**

A Figura 7.11 mostra a distribuição de frequência relativa (%) característica dos eventos de diferenças de temperatura polarizadas ( $T_{BV}-T_{BH}$ ) para aqueles eventos que não se reportou a ocorrência de raios (Figura 7.11 (a)) e as que estiveram associadas à ocorrência de raios (Figura 7.11 (b)) e as curvas de frequência ajustadas para estas distribuições. Observa-se que a ocorrência de raios esteve associada com valores de  $T_{BV}-T_{BH}$  menores em relação aquelas com ausência de raios, onde pode-se notar um crescente aumento no número de eventos sem raios até atingir o máximo de eventos durante a classe com diferenças de temperatura polarizada entre 6 K e 9 K (a qual representa entorno de 31 % do total de eventos dessa distribuição), enquanto os eventos com raios são mais homogeneamente distribuídos, possuindo um máximo de ocorrência em  $T_{BV}-T_{BH}$  entre 2 K e 4 K (representando 20 % do total das observações dessa distribuição). Cerca de 27 % dos eventos com raios ocorreram para diferenças de temperaturas polarizadas negativamente, contra menos de 10 % dos respectivos eventos para aqueles que não apresentaram raios. Estas observações ficam mais nítidas quando se sobrepõem as curvas de frequência ajustada para as duas distribuições, como mostrado na Figura 7.12. Percebe-se que houve uma maior probabilidade de encontrar *pixels* com raios para regiões das nuvens com  $T_{BV}-T_{BH}$  menores que aproximadamente 4 K. A ocorrência de raios associou-se a  $T_{BV}-T_{BH}$  em média duas vezes menores em relação aquelas sem raios (eventos com e sem raios possuem  $T_{BV}-T_{BH}$  média de 2,35 K e 5,46, respectivamente).

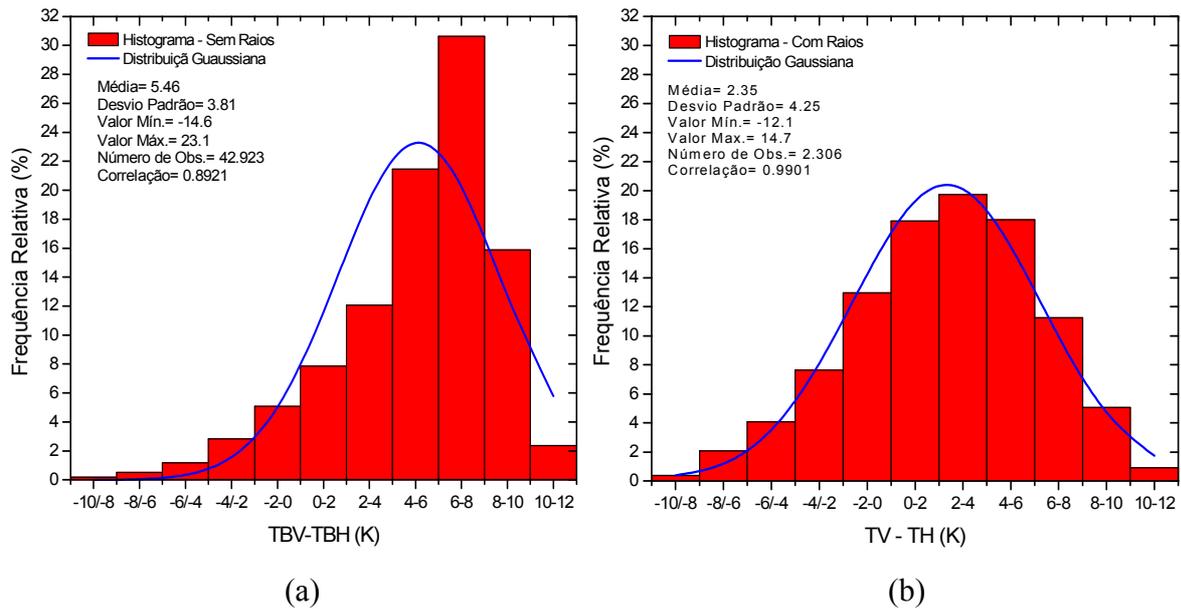


Figura 7. 11 - Histograma de frequência relativa (%) da diferença de polarização (vertical menos horizontal) em 85 GHz de eventos (*pixels*) (a) sem e (b) com raios e as respectivas curvas ajustadas.

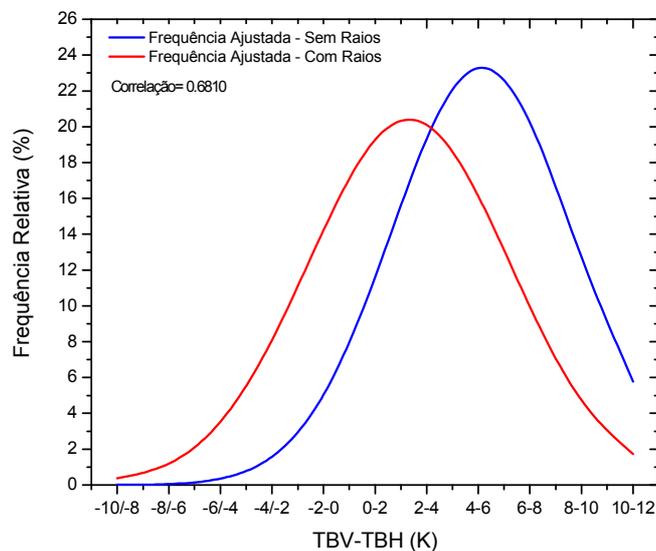


Figura 7. 12 - Análise comparativa entre a curva ajustada para o histograma de frequência relativa de  $T_{BV}-T_{BH}$  sem (azul) e com raios (vermelho).

Esses resultados mostraram que a intensidade do sinal de espalhamento polarizado verticalmente e horizontalmente possui uma correspondência física bastante razoável na implicação da ocorrência ou não de atividade de raios. De fato, o que se observou é

que na presença de atividade de raios o sinal de radiação polarizado verticalmente tendeu a possuir uma intensidade próxima ou até menor em relação ao sinal de radiação polarizado horizontalmente (correspondendo a valores de  $T_{BV}-T_{BH}$  baixos ou até negativos). Spencer et al (1989) mostraram que diferenças baixas e diferença negativas de polarização ( $T_{BV}-T_{BH}$ ) esteve associado ao espalhamento por partículas de gelo pertencentes a regiões de mais intensa convecção nas tempestades (centros convectivos, regiões mais propícias a ocorrência de raios), enquanto que valores mais positivos foram observados em regiões mais estratiformes (região relativamente menos propícia a ocorrência de raios).

As razões físicas para a distinção entre regiões convectivas e estratiformes das nuvens podem estar associadas ao fato que a região convectiva ou tem partículas de gelo mais esféricas ou as mesmas possuem uma orientação de partículas mais verticais em função das correntes ascendentes. Por outro lado, nas regiões estratiformes as partículas de gelo seriam ou mais oblatas ou com orientação horizontal devido à menor intensidade das correntes ascendentes ou a um menor alinhamento com o campo elétrico no interior da nuvem. Portanto, pode-se especular que os valores relativos da  $T_{BV}$  e  $T_{BH}$  (as quais estão associadas à intensidade do sinal de espalhamento polarizado verticalmente e horizontalmente após interagir com as partículas de gelo) e a ocorrência de raios devem-se não apenas ao tamanho e concentração ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) das partículas de gelo existentes em regiões convectivas e estratiformes das tempestades (como mostrado na seção 7.11 e 7.12), mas também pode possuir influência do seu formato e orientação. Assim, esta orientação das partículas pode favorecer o espalhamento da radiação mais preferencialmente em uma direção em relação à outra, o que implica em valores maiores ou menores de  $T_{BV}$  e de  $T_{BH}$ . Sugere-se portanto, que a orientação das partículas de gelo (vertical ou horizontal) pode indicar uma correspondência da existência ou não de um campo elétrico e/ou correntes ascendentes dentro das nuvens convectivas suficiente para alinhá-las verticalmente e por conseqüência gerar a probabilidade de ocorrência de raios.

Para avaliar as hipóteses discutidas anteriormente, torna-se importante quantificar as ocorrências de raios em função das classes de  $T_{BV}-T_{BH}$ . Desta forma, contabilizou-se a quantidade total de raios para cada classe de diferença de temperatura polarizada, considerando as aproximadamente 2.306 observações de  $T_{BV}-T_{BH}$  que reportaram a ocorrência de ao menos um raio. Esta estatística contou com a ocorrência de um total de aproximadamente 6.788 raios, e o comportamento encontrado da frequência acumulada de raios (%) em função das classes de diferença de temperatura polarizada do canal de 85 GHz é mostrada na Figura 7.13.

Analisando a Figura 7.13 observa-se um crescente aumento na ocorrência de raios para valores abaixo de 10 K de  $T_{BV}-T_{BH}$ , sendo que mais de 90 % dos raios reportados são pertencentes a valores menores que 9 K e 50 % do total de raios são observados para intensidade menores que 2 K. Menos de 7 % do total de raios ocorrem para *pixels* caracterizados com diferença de temperatura polarizada abaixo de -5 K, enquanto que uma porção razoável, representando 30 % do total de raios, esteve associada a valores negativos de  $T_{BV}-T_{BH}$ . Logo, as maiores ocorrências de raios não foram predominantemente associadas a valores negativos de diferença de temperatura polarizada, porém estão associadas também a valores positivos. Esses resultados estão em consistência com a hipótese sugerida inicialmente, de forma que a ocorrência total de raios torna-se mais pronunciada quando se observa valores de  $T_{BV}$  próximos ou menores que a da  $T_{BH}$ . Isso indica que a sensibilidade de espalhamento da radiação na direção vertical ou horizontal ao interagir com as partículas de gelo pode sugerir a forma e orientação das mesmas. Portanto há evidências da existência de uma possível relação entre a ocorrência de raios e a diferença de temperatura polarizada no canal de 85 GHz observadas para os *pixels* que contem partículas de gelo com estas características.

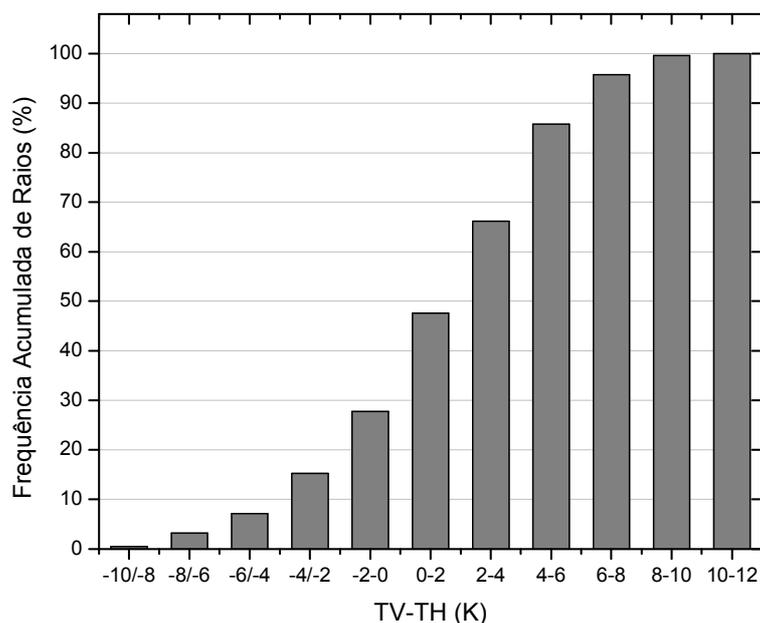


Figura 7. 13 - Frequência Acumulada (%) de ocorrência de raios em função da diferença de polarização (vertical menos horizontal) em 85 GHz de eventos (*pixels*).

A Figura 7.14 apresenta o comportamento da probabilidade de ocorrência de raios (%) em função da  $T_{BV}-T_{BH}$ , em termos da relação de dispersão para a probabilidade de ocorrer ao menos um (vermelho), dois (azul), quatro (verde), oito (rosa) e dezesseis (amarelo) raios em um intervalo de 15 minutos. Para as cinco curvas de probabilidade observa-se um aumento gradual na probabilidade de ocorrência de raios conforme as diferenças de temperatura polarizada tendem a diminuir. Valores crescentes e mais significativos de probabilidade são notados quando  $T_{BV}-T_{BH}$  atinge valores abaixo de 8 K até alcançar um valor aproximadamente de -8 K, possuindo uma probabilidade de 2%, 0,7 %, 0,3 %, 0,1% e 0,03% e de 18 %, 11 %, 5 %, 3 % e 1 %, respectivamente de ocorrer ao menos um, dois, quatro, oito e dezesseis raios em 15 minutos. Mas a ocorrência de quantidades mais elevadas de raios (oito e dezesseis raios) possui probabilidade de ocorrência relativamente mais baixa, uma vez que a ocorrência de oito e dezesseis raios apenas é reportada quando um limiar mínimo de 10 K é atingindo. A ocorrência de raios em um intervalo de 15 minutos para  $T_{BV}-T_{BH}$  igual a -10 K é menor que em relação a -8 K, o que provavelmente deve-se aos poucos casos reportados com valores de -10 K (a qual representou apenas 0,4 % do total de eventos com raios, Figura

7.11 (b)). Embora observou-se uma nítida relação crescente entre a probabilidade de ocorrência de raios e a diminuição dos valores de  $T_{BV}-T_{BH}$ , é importante notar que as probabilidades são relativamente baixas (máximos valores de 20 %), o que aparentemente deve-se a baixa observação de eventos com raios em relação aos sem raios. Esse fato pode estar indicando também que outros parâmetros microfísicos, como o tamanho e conteúdo de gelo, possuem igual importância ou atuam em sinergia na caracterização da atividade elétrica de raios.

A variabilidade notada na probabilidade de ocorrência de raios em função da diferença de temperatura polarizada possibilitou que este comportamento fosse parametrizado em termos de uma função do tipo linear, com significantes valores dos coeficientes de determinação. A Figura 7.15 mostra as curvas ajustadas para o comportamento da probabilidade de raios em função da  $T_{BV}-T_{BH}$  observada na Figura 7.14, para a probabilidade de ocorrer ao menos um (reta vermelha), dois (reta azul), quatro (reta verde), oito (reta rosa) e dezesseis (reta amarela) raios em um intervalo de 15 minutos. As expressões que descrevem essa probabilidade de ocorrência de raios em função da  $T_{BV}-T_{BH}$  e seus respectivos coeficientes de determinação são parametrizados da seguinte forma:

$$P_i(\geq 1) = -0,69 * (i) + 9,52 \quad , \text{ sendo } R^2 = 0,76 \quad (7.11)$$

$$P_i(\geq 2) = -0,46 * (i) + 5,27 \quad , \text{ sendo } R^2 = 0,85 \quad (7.12)$$

$$P_i(\geq 4) = -0,23 * (i) + 2,49 \quad , \text{ sendo } R^2 = 0,95 \quad (7.13)$$

$$P_i(\geq 8) = -0,096 * (i) + 0,98 \quad , \text{ sendo } R^2 = 0,74 \quad (7.14)$$

$$P_i(\geq 16) = -0,045 * (i) + 0,37 \quad , \text{ sendo } R^2 = 0,72 \quad (7.15)$$

Em que,

$P_i(\geq j)$  é a probabilidade de ocorrência de ao menos  $j$  raios em porcentagem;

$i$  corresponde ao valor da  $T_{BV}-T_{BH}$  em kelvin.

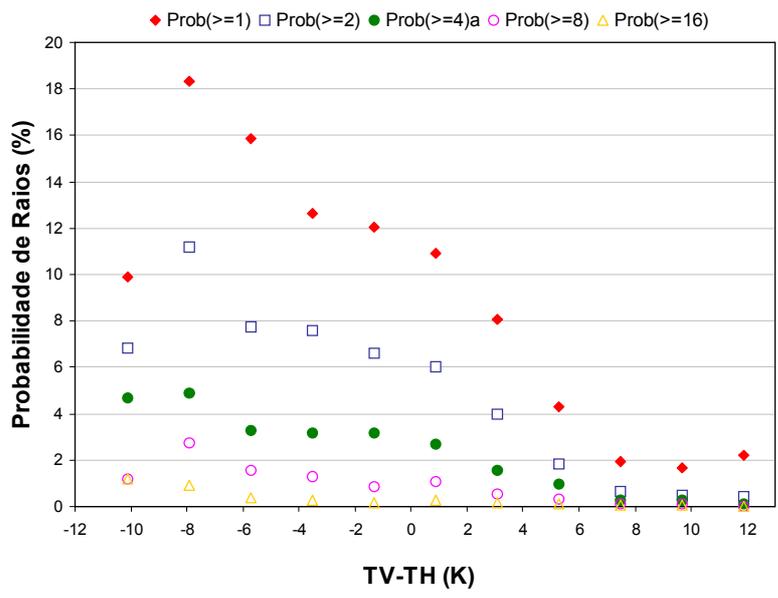


Figura 7. 14 - Frequência de ocorrência de raios em função da diferença de polarização (vertical menos horizontal) em 85 GHz de eventos para a probabilidade de ocorrer ao menos um (vermelho), dois (azul), quatro (verde), oito (rosa) e dezesseis (amarelo) raios em um intervalo de 15 minutos.

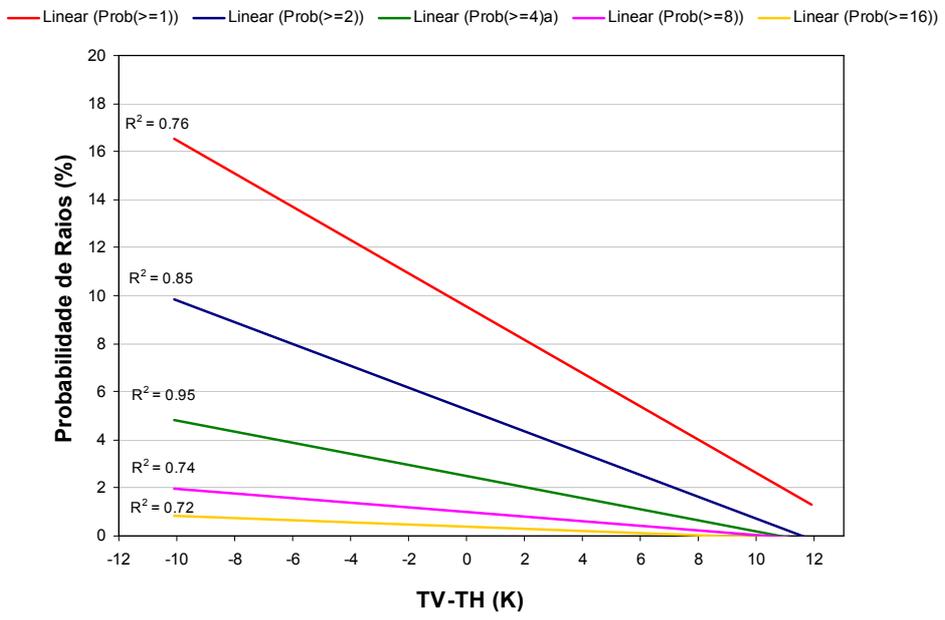


Figura 7. 15 - Curvas lineares ajustadas para a probabilidade de ocorrência de raios em função da diferença de polarização (vertical menos horizontal) em 85 GHz de eventos (*pixels*) para a probabilidade de ocorrer ao menos um, dois, quatro, oito e dezesseis raios em um intervalo de 15 minutos.

Portanto, os valores de  $T_{BV}-T_{BH}$  associados ao canal de 85 GHz parecem modular de forma bastante linear a probabilidade de ocorrência de raios para as ocorrências de ao menos um, dois, quatro, oito e dezesseis raios. O coeficiente angular das equações parametrizadas mostra que em média uma diminuição de 1 K na diferença de temperatura polarizada em 85 GHz aumenta a probabilidade de ocorrência de raios em 0,69 %, 0,46 %, 0,23 %, 0,096 % e 0,045 % para um, dois, quatro, oito e dezesseis raios. Quando as intensidades do sinal dos espalhamentos horizontal e vertical possuem o mesmo valor (isto é,  $T_{BV}-T_{BH} = 0$ ), há uma probabilidade de 9,52%, 5,27%, 2,49%, 0,98% e 0,37 % de ocorrer ao menos um, dois, quatro, oito e dezesseis raios, respectivamente. Contudo é importante ressaltar que essas parametrizações encontradas são válidas para a determinação da probabilidade de ocorrência de raios associados a diferenças de temperaturas polarizadas pertencentes ao intervalo de -12 K a 12 K, o que ao contrário, visto que esses ajustes são lineares poderia acarretar em estimativas de probabilidades não realísticas. Entretanto, a utilização de um conjunto de observações para um período maior poderia validar estas parametrizações para um intervalo maior de valores de  $T_{BV}-T_{BH}$  que possivelmente virem a serem observados.

A importância desses resultados observados e das relações parametrizadas, as quais mostraram uma tendência linear de ocorrência de raios conforme a  $T_{BV}$  tende a diminuir em relação à  $T_{BH}$ , são ratificados de forma qualitativa pelos resultados observados por Prigent e Pardo (2001) e Prigent et al (2005). Prigent et al (2005) observaram um incremento sistemático na probabilidade de raios aumentando de 15 % para 45 % associado a uma diminuição da  $T_{BV}-T_{BH}$  de 7 K para -5 K, para as observações do sensor TMI e relâmpagos reportados pelo sensor LIS. O aumento mais pronunciado da probabilidade de raios em função da diminuição da  $T_{BV}-T_{BH}$  observado por esses autores, em relação aos do presente trabalho, pode estar associado em parte ao fato do sensor LIS não diferenciar entre relâmpagos NS e IN, enquanto que neste trabalho trabalhou-se apenas com relâmpagos NS (raios). Contudo, o estudo da radiação polarizada sugere que a combinação do sinal de radiação em 85 GHz polarizado verticalmente e horizontalmente caracteriza de forma bastante razoável as regiões de mais intensa convecção das tempestades (associado à alta ocorrência de raios), as quais

possuem um campo elétrico capaz de orientar as partículas de gelo. Assim, o fato das maiores probabilidade de raios serem observadas na presença de uma diminuição na  $T_{BV}-T_{BH}$  pode estar associado à existência de grandes partículas de gelo orientadas preferencialmente na vertical (devido à existência de um intenso campo elétrico capaz de alinhá-las), as quais tendem a atenuar (espalhar) de forma mais significativa o sinal da radiação polarizado verticalmente em relação ao horizontal, implicando portanto em valores próximos ou até menores da  $T_{BV}$  em relação à  $T_{BH}$  estimada pelo satélite.

Os resultados apresentados e discutidos neste último capítulo indicaram, em concordância com os diversos trabalhos abordados na literatura, que o sinal de espalhamento em altas frequência do microondas passivo caracteriza de forma bastante satisfatória o tamanho, conteúdo de gelo e orientação das partículas de gelo e a associada atividade elétrica de raios. Além disso, nota-se a importância em combinar os diferentes parâmetros microfísicos para conseguir separar de forma mais apropriada às nuvens de tempestades em relação aquelas menos severas, mas que podem ter uma baixa polarização, ou um alto valor de IWP. Desta forma, as equações parametrizadas mostram que estes três parâmetros microfísicos são uma aproximação bastante razoável para convecção profunda. Isso sugere um possível indicativo do diagnóstico da atividade de raios, principalmente em regiões não cobertas por rede de detecção de raios, possibilitando através de estudos mais detalhados a oportunidade de serem utilizados como possíveis parâmetros prognósticos da ocorrência de raios. Contudo, para uma mais segura significância destas hipóteses, torna-se importante avaliar se os resultados estatísticos encontrados para a região estudada também são válidos para outras regiões continentais, assim como para períodos de análises maiores e para cada estação do ano.



## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 8.1 Considerações Finais

O objetivo do presente trabalho foi caracterizar as propriedades físicas de Sistemas Convectivos de Mesoescala responsáveis pela ocorrência de atividade elétrica de raios (relâmpagos nuvem-solo), através da utilização de dados de  $T_B$  no IR em sinergia com as ocorrências de raios medidas por detectores em solo. Além disso, foi avaliado o potencial de alguns parâmetros microfísicos de nuvens convectivas, como tamanho conteúdo de gelo integrado verticalmente e polarização das partículas de gelo, como parâmetros de severidade e preditores da ocorrência de raios, através da utilização de  $T_B$  na faixa de microondas e informações de ocorrência de raios reportadas por detectores em solo. As considerações sobre os principais resultados encontrados são descritas a seguir.

Para avaliar e caracterizar as ocorrências de raios que seriam utilizadas nas análises de propriedades físicas e microfísicas de SCM realizou-se um estudo preliminar da distribuição espacial e temporal dos raios ocorridos no estado de São Paulo entre os anos de 2005 e 2007. A distribuição espacial de raios mostrou e evidenciou que a porção leste do estado caracterizou-se por uma incidência diferenciada de ocorrência de raios em relação às demais áreas desta região. As maiores ocorrências de raios foram observadas próximas a grandes centros urbanos (Região Metropolitana de São Paulo, Campinas, Piracicaba e São José dos Campos) e região do Vale do Paraíba, o que poder estar indicando que as incursões frequentes de Sistemas Frontais em sinergia com a topografia característica desta região e a brisa marítima possuem influência na ocorrência de raios. Sobre os grandes centros urbanos, uma hipótese observada em consonância com a literatura, é que a ocorrência de ilhas de calor e poluição atmosférica possivelmente também contribui para a intensificação das tempestades sobre esta área. No entanto, ressalta-se a importância de se corrigir a quantidade de raios registrados entre os anos e período de estudo, através da correção espacial e temporal da ED de raios utilizadas para um maior detalhamento dessas características.

A distribuição temporal do total de ocorrência de raios mostrou que o ciclo diurno das tempestades é bastante coerente e organizado, com o máximo ocorrendo próximo as primeiras horas da tarde (16 horas local), evidenciando a importância do ciclo diurno da insolação em modular a atividade convectiva. A caracterização sazonal do ciclo diurno de raios mostrou que o comportamento da atividade elétrica para o verão, outono e primavera são muito similares ao do ciclo diurno total de raios. No entanto, para o inverno não foi observado um horário preferencial de máxima ocorrência de raios. Estas diferenças podem estar associadas à ocorrência diferencial de tempestades entre as estações (as quais são moduladas pela variabilidade da insolação), onde notou-se que em média 45 % e 3 % dos SCM reportados encontram-se no verão e inverno, respectivamente.

Entre as propriedades físicas analisadas, o tamanho, taxa de expansão normalizada, temperatura mínima de brilho do *kernel* de 9 *pixels*, fração convectiva e excentricidade dos SCM foram as variáveis que melhor diagnosticaram a ocorrência ou não de atividade elétrica de raios. Portanto, ficou evidenciado que a combinação de condições dinâmicas (fortes movimentos verticais) e termodinâmicas (altura do topo das nuvens) associadas a estas variáveis são fatores essenciais para o processo de eletrificação das nuvens convectivas e conseqüentemente para o início da ocorrência da atividade elétrica de raios. Desta forma, foi possível parametrizar a ocorrência média de raios em função de cada uma dessas propriedades físicas, com altos valores de coeficiente de determinação. A validação dessas relações empíricas encontradas propiciará em um futuro próximo que as mesmas sejam utilizadas para diagnosticar a severidade das tempestades em termos de ocorrência de raios, principalmente para regiões com ausência de sensores de relâmpagos em solo, e para realizar o prognóstico da ocorrência de raios.

As análises do ciclo de vida dos SCM mostraram que a ocorrência de raios está associada aos sistemas com mais longa duração e tamanho ao longo do ciclo de vida, em consonância com as mais intensas taxa de expansão da área durante os estágios de crescimento. Assim, a taxa de expansão dos sistemas durante os estágios iniciais de

desenvolvimento aparenta ser um forte parâmetro indicativo da severidade da tempestade, a qual pode expressar a ocorrência ou não de raios durante o ciclo de vida, além de ser um indicativo da duração dos sistemas. Os SCM analisados mostraram que a mais intensa atividade elétrica média de raios é caracterizada entre o estágio de iniciação e de máxima extensão dos sistemas (maturação), enquanto que a densidade média de raios (raios/km<sup>2</sup>) possui altos valores durante o estágio de iniciação. Essas características evidenciam que a combinação de intensa taxa de condensação no estágio de iniciação em combinação ao intenso fluxo de massa (a qual influencia na intensidade dos movimentos verticais no interior dos sistemas) entre o estágio de iniciação e máxima extensão seria um dos fatores responsáveis pela máxima ocorrência de raios e densidade de raios durante os estágios iniciais de desenvolvimento dos SCM analisados.

Um modelo de microfísica de nuvens desenvolvido por Zhao e Weng (2001) foi utilizado para avaliar a correspondência entre o tamanho das partículas ( $D_e$ ) de gelo e o conteúdo integrado verticalmente de gelo (IWP) com a ocorrência de raios. Observou-se que o  $D_e$  das partículas de gelo e o IWP são importantes parâmetros responsáveis para a caracterização da ocorrência da atividade elétrica de raios. Assim, foi notado que intensa ocorrência de raios é observado em associação aos maiores tamanhos de partículas de gelo, o que possibilitou o ajuste de uma curva exponencial de probabilidade de ocorrência de raios em função do  $D_e$  das partículas de gelo, com alto valor de coeficiente de determinação. Com relação ao IWP, verificou-se uma relação crescente entre seus valores e a ocorrência de raios até valores em torno de 0,7 kg.m<sup>-2</sup>, o que possibilitou a parametrização de uma função de probabilidade de ocorrência de raios do tipo polinomial de segunda ordem. A diminuição da probabilidade de raios acima desse limiar merece um maior detalhamento para avaliar se está associada a uma característica estatística ou física.

A última etapa deste trabalho avaliou a relação existente entre a diferença de temperatura polarizada verticalmente e horizontalmente ( $T_{BV}-T_{BH}$ ) em microondas do canal 85 GHz com as ocorrência de raios. Os resultados mostraram que quando a diferença de temperatura de brilho diminui, há uma tendência crescente de ocorrência

média de raios. Assim, curvas do tipo linear de probabilidade de ocorrência de raios em função da  $T_{BV}-T_{BH}$  do canal de 85 GHz foram ajustadas para a probabilidade de ocorrência de ao menos um, dois, quatro, oito e dezesseis raios, com valores significativos de coeficiente de determinação. A hipótese física correspondente a estes resultados é a existência de partículas de gelo orientadas preferencialmente na vertical (devido à existência de um intenso campo elétrico capaz de orientá-las), as quais espalhariam (atenuam) mais eficientemente a radiação polarizada verticalmente em relação à polarizada horizontalmente (tendência de diminuição de  $(T_{BV}-T_{BH})$ ). Assim, sugere-se que a orientação das partículas de gelo possa expressar um indicativo das regiões de mais intensa ocorrência de raios (regiões de intensas correntes ascendentes e forte campo elétrico) nas nuvens convectivas.

Desta forma, a combinação de informações provenientes de satélites na faixa do infravermelho e microondas em sinergia com as informações de ocorrência de raios medidas por sensores em solo de relâmpagos, mostra-se uma importante e promissora ferramenta para caracterizar a atividade elétrica de raios e principalmente em um futuro próximo a possibilidade de realizar diagnóstico e prognóstico (*nowcasting*) de severidade de tempestades, principalmente em regiões desprovidas de detectores de relâmpagos em solo. Entretanto, os processos físicos e microfísicos envolvidos na eletrificação das nuvens e ocorrência de raios mostram-se extremamente complexos e dependentes de inúmeras variáveis, suscitando ainda de estudos mais detalhados pela comunidade científica para serem mais bem compreendidos e elucidados.

## **8.2 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Embora os resultados mostrados nesta pesquisa evidenciam importantes relações físicas e empíricas entre a ocorrência de raios e propriedades físicas e microfísicas de SCM, algumas sugestões para trabalhos futuros são extremamente necessárias, as quais são as seguintes:

- 1) As equações parametrizadas que relacionam a ocorrência média de raios em função das propriedades físicas  $R_e$ ,  $A_e$ ,  $T_{\min 9}$ , FC e Ecc, para uma maior significância quantitativa precisam ser validadas, através de análises de probabilidade de detecção e taxa de falso alarme. A validação dessas parametrizações propiciaria que fatores pesos da importância relativa de cada propriedade pudessem ser utilizados através de técnicas de análise multivariada para combiná-las. Isso possibilitará ajustar uma curva de probabilidade de ocorrência de raios considerando todas estas variáveis além da informação da fase do ciclo de vida.
  
- 2) As parametrizações encontradas para a probabilidade de ocorrência de raios em função do  $D_e$ , IWP e  $T_{BV-T_{BH}}$  necessitam ser avaliadas para um período de dados maior, além de analisar-se a relação do ciclo de vida das partículas de gelo na parametrização de probabilidade de raios em função do IWP. Sugere-se também que estas parametrizações sejam testadas sobre outras regiões continentais e validadas através de estatística de probabilidade de detecção e taxa de falso alarme.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSIS, F. N. **Aplicações de estatística a climatologia: teoria e prática**. Pelotas, RS, 101p., Universidade Federal de Pelotas, 1996.

BAKER, M. B.; CHRISTIAN, H. J.; LATHAM, J. A computational study of the relationships linking lightning frequency and other thundercloud parameters. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 121, n. 527, p. 1525-1548, Part A, 1995.

BAKER, M. B.; DASH, J. G. Charge-transfer in thunderstorms and the surface melting of ice. **Journal of Crystal Growth**, v. 97, n. 3-4, p. 770-776, 1989.

BENNARTZ, R. Optimal convolution of AMSU-B to AMSU-B. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 17, p. 1215- 225, 2000.

BISCARO, T. S. **Estimativa de precipitação via sensoriamento remoto e microondas na Bacia Amazônica**. São Paulo, 134 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo, 2006.

BLYTH, B. M.; CHRISTIAN, H. J.; DRISCOLL, K.; GADIAN, B. M.; LATHAM, J.: Determination of ice precipitation rates and thunderstorm anvil ice contents from satellite observations of lightning. **Atmospheric Research**, v. 59-60, p. 217-229, 2001.

BOCCIPPIO, D. J.; KOSHAK, W. J.; BLAKESLEE, R. J. Performance Assessment of the Optical Transient Detector and Lightning Imaging Sensor. Part I: Predicted Diurnal Variability. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 19, p.1318-1332, 2002.

**BOLETIM CLIMANÁLISE - 2009**. Disponível em:  
<<http://www6.cptec.inpe.br/revclima/boletim/>>. Acesso em: 10 de jan. de 2009.

BORNSTEIN, R.; LIN, Q. L. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: three case studies. **Atmospheric Environment**, v. 34, n. 3, p. 507-516, 2000.

BROOKS, I. M.; SAUNDERS, C. P. R.; MITZEVA, R. P.; PECK, S. L. The effect on thunderstorm charging of the rate of rime accretion by graupel. **Atmospheric Research**, v. 43, p. 277-295, 1997.

CECIL, D. J.; ZIPSER, E. J.; NESBITT, S. W. Reflectivity, ice scattering, and lightning characteristics of hurricane eyewalls and rainbands. part I: quantitative description. **Monthly Weather Review**, v. 130, p. 769-784, 2002.

CHRISTIAN, H. J. et al. **The lightning imaging sensor**. In: XI International Conference on Atmospheric Electricity, Nasa, Huntsville, Alabama, 7-11 Junho de 1999. Disponível em: [http://thunder.msfc.nasa.gov/bookshelf/pubs/LIS\\_ICAE99\\_Print.pdf](http://thunder.msfc.nasa.gov/bookshelf/pubs/LIS_ICAE99_Print.pdf) Acessado em: 08/02/2008.

CHRISTIAN, H. J.; GOODMAN, S. J. Optical observations of lightning from a high-altitude airplane. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 4, p. 701-711. 1987.

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

DOTZEK, N. et al. Lightning activity related to satellite and radar observations of a mesoscale convective system over Texas o 7-8 April 2002. **Atmospheric Research**, v. 76, p. 127-166, 2005.

FRANK, W. M. The life cycles of GATE convective systems. **Journal Atmospheric Science**, v. 35, 1256-1264. 1978.

GARREAUD, R. D.; WALLAC, J. M. The diurnal march of convective cloudiness over the Americas. **Monthly Weather Review**, v. 125, p. 3157-3171, 1997.

GIN, R. B. B.; PEREIRA FILHO, B. J.; Silva Dias, M. B. F. **Estudo de descargas atmosféricas em sistemas convectivos organizados: análise preliminar**. 2004. Disponível em: [http://mtc-m15.sid.inpe.br/col/cptec.inpe.br/walmeida/2004/06.29.16.10/doc/Gin\\_Estudo%20de%20descargas%20eletricas.pdf](http://mtc-m15.sid.inpe.br/col/cptec.inpe.br/walmeida/2004/06.29.16.10/doc/Gin_Estudo%20de%20descargas%20eletricas.pdf) .Acesso em: 22 fev. de 2008.

GOODMAN, S. J.; BUECHLER, D. E.; MEYER, P. J. Convective tendency images from a combination of lightning and satellite data. **Weather and Forecasting**, v. 3, No 3, p.173-188. 1988.

GOODMAN, S. J.; MACGORMAN, D. R.; Cloud to ground lightning activity in Mesoscale Complexes Convective. **Monthly Weather Review**, v. 114, p. 2320-2328, 1986.

GRECU, M.; ANAGNOSTOU, E. N.; Adler, R. F. Assessment of the use of lightning information in satellite infrared rainfall estimation. **Journal of Hydrometeorology**, v. 1, p. 211-221, 2000.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS.GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA (INPE.ELAT). **Eletricidade Atmosférica**. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/>>. Acesso em: 06 de mar. de 2008.

GUIA do usuário NOAA - 2009. Disponível em: <<http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm/html/c7/sec7-3.htm>>. Acesso em: 11 de mar. de 2009.

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.

IRIBARNE, J.V.; CHO, H.R. **Atmospheric physics**. Dordrecht: D. Reidel, 1986.

KANE, R. J. Correlating lightning to severe local storms in the Northeastern United States. **Weather and Forecasting**, v. 6, n..1, 1990.

KEITH, W. D.; SAUNDERS, C. P. R. Further laboratory studies of the charging of graupel during ice crystal interactions. **Atmospheric Research**, v. 25, p. 445, 1990.

KIDDER, S. Q.; HAAR, V. **Satellite meteorology: an introduction**. Academic Press. San Diego, 466p., ISBN 0-12-406430-2, 1995.

KUMMEROW, C.; BARNES, W.; KOZU, T.; SHIUE, J.; SIMPSON, J. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, p. 809-817, 1998.

LAING, B. G.; FRITSCH, J. M. Mesoscale Convective Complexes in Africa. **Monthly Weather Review**, v. 21, p. 2254-2263, 1993.

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 Geophysics Research**, 2002.

MACEDO, S. R.; MACHADO, L. A. T.; VILA, D. A.; MORALES, C. A.; LAURENT, H. **Monitoramento de sistemas convectivos de mesoescala atuantes no Brasil utilizando o Fortracc (forecast and tracking of active and convective cells)**. São José dos Campos: INPE, 2004. (INPE ePrint [sid.inpe.br/yolanda/2004/06.25.15.49](http://sid.inpe.br/yolanda/2004/06.25.15.49)). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/yolanda/2004/06.25.15.49>>. Acesso em: 29 maio 2009.

MACEDO, S. R.; VILA, D.; MACHADO, L. B. **Fortracc – previsão a curto prazo e evolução dos sistemas convectivos**. Fortracc v1.1 – guia do usuário. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2004. Disponível em: <http://pirandira.cptec.inpe.br/fortracc/pdf/fortracc.pdf>. Acesso em: 04 de fev. de 2008

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**, 2008, doi:10.1016/j.atmosres.2008.10.003.

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. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 61, p. 1374-1387, 1980.

MANOOCHEHRNIA, P.; RACHIDI, F.; RUBINSTEIN, M.; SCHULZ, W. Lightning statistics in Switzerland. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 9., 2007, Foz do Iguaçu. **Proceedings...** 7 p., Foz do Iguaçu, Brazil: EPFL, 2007.

MILLER, D.; FRITSCH, J. M. Mesoscale Convective Complexes in the Western Pacific region. **Monthly Weather Review**, v. 119, p. 2978-2992, 1991.

MILLER, K.; GADIAN, B.; SAUNDERS, C.; LATHAM, J.; CHRISTIAN, H. Modeling and observations of thundercloud electrification and lightning. **Atmospheric Research**, v. 58, n. 2, p. 89-115, 2001.

MITZEVA, R.; SAUNDERS, C. P. R. Thunderstorm charging - calculations of the effect of ice crystal size and graupel velocity. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 52, n. 4, p. 241-245, 1990.

MOHR, K. I.; TORACINTA, E. R.; ZIPER, E. J.; ORVILLE, R. E. A comparison SSMI brightness temperatures, and lightning for mesoscale convective systems in Texas part brightness temperatures and lightning. **Journal of Applied Meteorol**, v. 35, p. 919-931, 1996.

MOHR, K. I.; ZIPER, E. J. Defining mesoscale convective system by their 85-GHz ice-scattering signatures. **Bulletin of American Meteorological Society**, p. 1179- 1189, 1996.

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.  
Disponível em: <<http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/85605.pdf>>. Acesso em: 10 de jan. de 2009.

NACCARATO, K. P. **Estudo de relâmpagos no Brasil com base na análise de desempenho do sistema de localização de tempestades**. 2000. 165 p. (INPE-8380-TDI/770). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2000. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/lise/2002/03.28.19.09>>. Acesso em: 29 maio 2009.

NACCARATO, K. P. **Análise das características dos relâmpagos na região sudeste do Brasil**. 2005. 362 p. (INPE-14083-TDI/1069). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/09.28.19.00>>. Acesso em: 29 maio 2009.

NACCARATO, K. P.; PINTO JR, O.; PINTO, I. R. C. B. Evidence of thermal and aerosol effects on the cloud-to-ground lightning density and polarity over large urban areas of Southeastern Brazil. **Geophysical Research Letters**, v. 30, no.13, 1674, doi:10.1029/2003gl017496, 2003.

NACCARATO, K.P.; PINTO JR., O.; PITO, I.R.C.A. Application of a detection efficiency model to correct cloud-to-ground flash density maps in Southeastern Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING DETECTION, 18., 2004, Helsinki, Finlândia. **Proceedings...** Helsinki: Vaisala Inc., 2004(c). CD-ROM.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)**. Washington, 2008. Disponível em: <[http://trmm.gsfc.nasa.gov/overview\\_dir/lis.html](http://trmm.gsfc.nasa.gov/overview_dir/lis.html)>. Acesso em: 20 de fev. de 2008.

NASCIMENTO, M. G. **Análise dos impactos dos Jatos de Baixos Níveis sobre a Bacia do Prata**. São José dos Campos, 208 p (INPE-15240-TDI/1327). Dissertação de Mestrado –Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 2008

OGAWA, T. Lightning currents. In: Volland, H. ed. **Handbook of atmospheric electrodynamicics**. Boca Raton: CRC Press. v. 1, Cap. 4, p. 93-136, 1995.

ORVILLE Jr.; R. E. An analytical solution to obtain the optimum source location using multiple direction finders on a spherical surface. **Journal of Geophysical Research Atmospherics**, v. 92, n.D9, p. 10877-10886, 1987.

ORVILLE, R. E.; HUFFINES, G. R. Cloud-to-ground lightning in the United States: NLDN results in the first decade, 1989-98. **Monthly Weather Review**, v. 129, n. 5, p. 1179-1193, 2001.

ORVILLE, R. E.; HUFFINES, G., GAMMON, J. N.; ZHANG, R.; ELY, B.; STEIGE, S.; PHILLIPS, S.; ALLEN, S.; READ, W. Enhancement of Cloud-to-Ground Lightning over Houston, Texas. **Geophysics. Research Letters**, v. 28, No. 13, p. 2597-2600, 2000.

ORVILLE, R. E.; HENDERSON, R. W. Global Distribution of Midnight Lightning: September 1977 to August 1978. **Monthly Weather Review.**, v.114, p.2640-2653, 1986.

ORVILLE, R. E.; SPENCER D. W. Global lightning flash frequency. **Monthly Weather Review.**, v.107, p.934-943, 1979.

PARKER, M. D.; RUTLEDGE, S. B.; JOHNSON, R. H. Cloud-to-Ground lightning in Linear Mesoscale Convective Systems. **Monthly Weather Review**, v. 129, p. 1232-1242, 2001.

PETERSEN, W.A.; CHRISTIAN, H.J.; RUTLEDGE, S. A. TRMM observations of the global relationship between ice water content and lightning. **Geophysical Research Letters**, v. 32, L14819, 2005, doi:10.1029/2005GL023236.

PINTO Jr., O. **A Arte da guerra contra os raios**. São Paulo: Oficina de Textos, 80p., 2005.

PINTO Jr., O.; PINTO, I. R. C. B. **Relâmpagos**. São Paulo: Brasiliense, 1996.

PINTO Jr., O.; PINTO, I. R. C. B. **Tempestades e relâmpagos no Brasil** - São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000.

PINTO Jr, O.; PINTO, I. R. C. B.; Diniz, J. H.; Cazetta Filho, B.; Cherchiglia, L. C. L.; Carvalho, B. M. A seven-year study about the negative cloud-to-ground lightning flash characteristics in Southeastern Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, p. 739-748, 2003.

PINTO, I. R. C. B.; PINTO Jr, O.; Rocha, R. M. L. Cloud-to-Ground lightning in Southeastern Brazil in 1993. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, No. D24, p. 381-387, 1999.

PINTO JUNIOR, O. ; NACCARATO, K.P. ; PINTO, I. R. C. A. ; FERNANDES, W. A. ; PINTO NETO, O. Monthly distribution of cloud-to-ground lightning flashes as observed by lightning location system. **Geophysical Research Letters**, v. 33, p. 26081, 2006.

PRIGENT, C.; DEFER, E.; PARDO, J. R.; PEARL, C.; ROSSOW W. B.; PINTY, J. P. Relations of polarized scattering signatures observed by the TRMM Microwave instrument with electrical processes in cloud systems. **Geophysical Research Letters**, v. 32, L04810, doi:10.1029/2004GL022225, 2005.

PRIGENT, C.; PARDO, J. R. Microwave polarized signatures generated within cloud systems SSMI observations with radiative transfer simulations. **Journal of Geophysics Research**, v. 106, n. D22, p.243-258, 2001.

PROGRAMA COMET . **Geometria de escaneamento do sensor TMI abordo do satélite TRMM**. Disponível em: [http://www.meted.ucar.edu/topics\\_satellite.php](http://www.meted.ucar.edu/topics_satellite.php)>. Acesso em: 10 de mar. de 2009.

REDE INTEGRADA NACIONAL DE DETECÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS – RINDAT. **Sistema de Detecção**. Disponível em: <<http://www.rindat.com.br/>>. Acesso em: 08 de fev. de 2008.

ROOHR, P. B.; HAAR VONDER, T. H. A Comparative analysis o temporal variability of lightning observations and GOES imagery. **Journal of Applied Meteorology**, v. 33, p. 1271-1290, 1994.

RUTLEDGE, S. B.; MACGORMAN, D. R. Cloud-to-ground lightning activity in the 10-11 June 1985 mesoscale convective system observed during the Oklahoma-Kansas PRE-STORM project. **Monthly Weather Review**, v. 116, p. 1393-1408, 1988.

SAUNDERS, C. P. R. A Review of thunderstorm electrification processes. **Journal of Applied Meteorology**, v. 32, p. 642- 655, 1993.

SAUNDERS, C. P. R.; KEITH, W. D., MITZEVA, R. P. The effect of liquid water on thunderstorm charging. **Journal of Geophysical Research**, v. 96, n.D6, p. 11007-11017, 1991.

SCHULZ, W.; CUMMINS, K.; DIENDORFER, G.; DORNINGER, M. Cloud-to-Ground lightning in Austria: a 10-year study using data from a lightning location system. **Journal Geophysical Research**, 2005.

SCOFIELD, R. B.; KULIGOWSKI, R. J.; Qiu, S. Combining lightning with satellite data for analysis and prediction. **American Meteorological Society**, 2005.

SCOFIELD, R. B.; KULIGOWSKI, R. J.; Qiu, S. Satellite, lightning, and model data for nowcasting heavy rainfall from Mesoscale Convective Systems (MCS's). **American Meteorological Society**, 2006.

SOLORZANO, N. N. **Aspectos meteorológicos associados á ocorrência de relâmpagos na região Sudeste do Brasil no verão de 1995/96**. São José dos Campos, 95p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1998.

SOLORZANO, N. N.; PINTO Jr, O.; FERREIRA, N. J. Meteorological aspects related to cloud-ground lightning occurrence in Minas Gerais during the Summer of 195/1996. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 6., 1999, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 1999. p. 202-205.

SORIANO L. R.; PABLO F. Effect of small urban areas in central Spain on the enhancement of cloud-to-ground lightning activity. **Atmospheric Environment**. v. 36, n. 17, p. 2809-2816, 2002.

SPENCER, R. W.; GOODMAN, H. M.; HOOD, R. E. Precipitation retrieval over land and ocean with the SSM/I: identification and characteristics of the scattering signal. **J. Atmospheric Oceanic Technology**, v. 6, p.254-273, 1989.

STITH, J. L.; DYE, J. E.; BANSEMER, B.; HEYMSFIELD, B. J.; GRAINGER, C. B.; PETERSEN, W. B.; CIFELLI, R. Micro-physical observations of tropical clouds. **Journal of Applied Meteorology**, v. 41, p. 97-117, 2002.

STUBENRAUCH, C. J.; EDDOUNIA, F.; RAÑDEL, G. Correlations between microphysical properties of large-scale semi-transparent cirrus and the state of the atmosphere. **Atmospheric Research**, v. 72, p. 403-423, doi:10.1016/j.atmosres.2004.03.024, .2004.

TADESSE, B.; ANAGNOSTOU, E. N. Characterization of warm season convective systems over US in terms of cloud to ground lightning, cloud kinematics, and precipitation. **Atmospheric Research**, v. 91, p. 36-46, 2009.

TORRES, J. C. **Sistemas convectivos en mesoescala altamente precipitantes en el norte y centro de Argentina**. Argentina. Tese (Doutorado em Meteorologia) - FCEyN-UBA, 2003.

TSENOVA, B.; MITZEVA, R.; SAUNDERS, C. A modeling study of the effect of ice particle sizes and relative velocity on ice crystal/graupel collisional charge transfer. **Atmospheric Research**, v. 91, p. 250-258, 2009.

VELASCO, I.; FRITSCH, J. Mesoscale Convective Complexes in the Americas. **J. Geophysics Research**, v. 92 (D8), p. 9591-9613, 1987.

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**. 2004. Disponível em: <http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/yolanda/2004/06.25.14.46/doc/v2.pdf>. Acesso em: 25 de fev. de 2009.

VILA, D. B.; MACHADO, L. B. T.; VELASCO, I. **Some relationships between mesoscale convective systems life cycle and observed rainfall over del Plata Basin**. 2004. Disponível em: [www.isac.cnr.it/~ipwg/meetings/monterey/pdf/Vila.pdf](http://www.isac.cnr.it/~ipwg/meetings/monterey/pdf/Vila.pdf). Acesso em: 25 de fev. de 2009.

VOLLAND, H. **Atmospheric electrodynamic**: New York, N.Y: Springer- Verlag, 1982.

VONNEGUT, B. How the external currents flowing to a thundercloud influence its electrification. **Annals Geophysical**, v. 9, n. 1, p. 34-36, 1991.

VORPAL, J. A; SPARROW, J.G.; NEY, E. P. Sattelite observations of lightning. **Science**, v. 169 p. 860-862. 1970.

WALLACE, J. M. Diurnal variations in precipitation and thunderstorm frequency over the conterminous United States. **Monthly Weather Review**, v. 103, p. 585-598, 1975.

WALLACE, M. J; HOBBS, V. P. **Atmospheric science: an introductory survey**. Academic Press, Inc. 1 Edição, 1977.

WALLACE, M. J; HOBBS, V. P. **Atmospheric science: an introductory survey**. Academic Press, Inc. 2 Edição, 2006.

WENG, F.; GRODY, N. C. Retrieval of ice cloud parameters using a microwave imaging radiometer. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 57, p. 1069-1081, 2000.

WESTCOTT, N. E. Summertime cloud-to-ground lightning activity around major mid-western urban areas. **Journal of Applied Meteorology**, v. 34, n. 7, p. 1633-1642, 1995.

WILLIAMS, E. R. The electrification of thunderstorms. **Scientific American**, v. 259, n. 5, p. 88-99, 1989.

WILLIAMS, E.R., R. ZHANG, AND J. RYDOCK, Mixed phase microphysics and cloud electrification, **Journal of Atmospheric Science**, v. 48, p. 2195- 2203, 1991.

ZHAO, L.; WENG, F. Retrieval of ice cloud parameters using the advanced microwave sounding unit. **Journal of Applied Meteorology**, v. 41, p.384-395, 2001.



## A ANEXO A - EQUAÇÕES DE INFERÊNCIA DO D<sub>e</sub> E IWP

Através de uma aproximação de dois fluxos descrito em Weng e Grodoy (2000) a temperatura de brilho emanando do topo da nuvem  $T_B(z_t, \mu)$  é estimada através da seguinte relação:

$$T_B(z_t, \mu) = \frac{T_B(z_b, \mu)}{1 + \Omega(\mu)}, \quad (\text{A.1})$$

onde  $Z_t$ ,  $Z_b$ ,  $\mu$  e  $\Omega$  são a altura do topo da nuvem, altura da base da nuvem, cosseno do ângulo zenital e parâmetro de espalhamento do gelo da nuvem, respectivamente. Sendo este último parâmetro expresso por:

$$\Omega(\mu) = \frac{\kappa\tau}{2a} = \frac{1}{2\mu}(1 - \omega g)\tau, \quad (\text{A.2})$$

em que,  $\tau$ ,  $\kappa$ ,  $a$ ,  $g$  e  $\omega$  são a espessura ótica da nuvem de gelo, autovalor, parâmetro de similaridade, fator de assimetria e albedo de espalhamento simples, respectivamente.

A espessura ótica pode ser expressa assim por:

$$\tau = \int_{Z_b}^{Z_t} dz \int_0^{\infty} \frac{\pi}{4} D^2 Q_{ext}(x, m) N(D) dD, \quad (\text{A.3})$$

sendo que  $Q_{ext}$ ,  $N(D)$ ,  $x$  e  $m$  são a eficiência de extinção das partículas de gelo, função distribuição de tamanho das partículas, parâmetro de tamanho ( $x = \pi D / \lambda$ ) e índice de refração complexo, respectivamente.

Portanto para partículas de gelo esféricas com distribuição de tamanho  $N(D)$ , o **IWP** pode ser expresso por:

$$IWP = \int_{Z_b}^{Z_t} dz \int_0^{\infty} \frac{\pi}{6} \rho_i D^3 N(D) dD, \quad (A.4)$$

onde  $\rho_i$  é a densidade volumétrica da partícula de gelo, sendo considerada constante com o valor aproximadamente de  $920 \text{ kg.m}^{-3}$ .

Manipulando a equação A.3 e A.4 tem-se que:

$$\Omega(\mu) = \left( \frac{IWP}{\mu \rho_i D_e} \right) \Omega_N(x, m), \quad (A.5)$$

sendo  $\Omega_N$  o parâmetro de espalhamento normalizado expresso por:

$$\Omega_N(\mu) = \left( \frac{3}{4} \right) (1 - \omega g) \overline{Q_{ext}}(x, m), \quad (A.6)$$

onde  $\overline{Q_{ext}}$  é a eficiência de extinção normalizada, definida como:

$$\overline{Q_{ext}} = \frac{\int_0^{\infty} D^2 Q_{ext}(x, m) N(D) dD}{\int_0^{\infty} D^2 N(D) dD} \quad (A.7)$$

Portanto, quando a temperatura próxima a base da nuvem  $T_B(Z_b, \mu)$  é conhecida,  $\Omega$  é determinado através da expressão A.1 como:

$$\Omega(\mu) = \frac{T_B(Z_b, \mu) - T_B(Z_t, \mu)}{T_B(Z_t, \mu)}, \quad (A.8)$$

sendo  $T_B(Z_t, \mu)$  uma medida direta obtida por sensores abordo de satélites.

Desta forma, o valor de IWP é derivado da equação A.5, sendo expresso da seguinte forma:

$$IWP = \mu D_e \rho_i (\Omega / \Omega_N) \quad (\text{A.9})$$

Contudo, o valor do  $D_e$  e o  $\Omega_N$  são determinados empiricamente e são expressos da seguinte forma:

$$D_e = a_0 + a_1 r + a_2 r^2 + a_3 r^3, \quad (\text{A.10})$$

$$\Omega_{N89ou150} = \exp[b_0 + b_1 \ln(De) + b_2 (\ln(De))^2], \quad (\text{A.11})$$

onde  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$  e  $b_0$ ,  $b_1$  e  $b_2$  são coeficientes de regressão que são dependentes da densidade volumétrica das partículas de gelo e da distribuição de tamanho assumida. A densidade volumétrica assumida foi de  $920 \text{ kg.m}^{-3}$  e os valores de cada parâmetro utilizado foram os seguintes:

$$a_0 = -0,300323, a_1 = 4,30881, a_2 = -3,98255, a_3 = 2,78323$$

Para  $D_e \geq 1,0$

$$b_0 = -1.19301, b_1 = 2.08831, b_2 = -0.857469$$

Para  $D_e \leq 1,0$

$$b_0 = -0.294459, b_1 = 1.38838, b_2 = -0.753624$$

Lembrando que:

$$r_e(D_e) = \frac{\Omega_{89}}{\Omega_{150}} = \frac{\Omega_{N89}(x, m)}{\Omega_{N150}(x, m)} \quad (\text{A.12})$$

Para o continente a temperatura próxima a base da nuvem em 89 GHz ( $BT_{89}$ ) e 150 GHz ( $BT_{150}$ ) é determinada através de relações empíricas, as quais são expressas da seguinte forma:

$$BT_{89} = 17,88 + 1,61BT_{23} - 0,67BT_{31}, \quad (\text{A.13})$$

$$BT_{89} = 17,88 + 1,61BT_{23} - 0,67BT_{31}, \quad (\text{A.14})$$

em que,

$BT_{23}$  e  $BT_{31}$  são a temperatura próximo ao topo da nuvem estimada pelo sensor do satélite em 23 GHz e 31 GHz, respectivamente.

Desta forma, a combinação dos parâmetros determinados através das equações A.8 e A.12 permitem o cálculo do  $D_e$  utilizando-se a expressão A.10. A partir desse valor de  $D_e$  e do parâmetro  $\Omega_N$  determinado pela equação A.11, a equação A.9 pode ser utilizada para a determinação do valor do IWP, no caso da região continental.

Por outro lado, para a região oceânica a temperatura próxima a base da nuvem é determinada através de:

$$T_B = T_s[1 - (1 - \varepsilon)\mathfrak{T}] - \Delta T(1 - \mathfrak{T})[1 + (1 - \varepsilon)\mathfrak{T}], \quad (\text{A.15})$$

onde  $\mathfrak{T}$ ,  $\varepsilon$ ,  $T_s$  e  $\Delta t$  são as transmitâncias atmosféricas, emissividade da superfície, temperatura da superfície e diferença de temperatura entre a superfície e a temperatura média da atmosfera, respectivamente.

Sendo a transmitância atmosférica  $\mathfrak{T}$  é expressa por:

$$\mathfrak{T} = \exp[-(\tau_o + \tau_v + \tau_l)/\mu], \quad (\text{A.16})$$

onde  $\tau_o, \tau_v$  e  $\tau_l$  são a espessura ótica do oxigênio, vapor d'água e água líquida da nuvem, respectivamente.

## A APÊNDICE A - AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS RAIOS PARA O PERÍODO DE ESTUDO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados referentes ao estudo da acurácia dos dados de raios fornecidos pela rede de descargas atmosféricas RINDAT para os anos de 2005 a 2007 através das análises de mapas de ED de raios para a região em estudo. Serão mostrados também as análises da caracterização do comportamento anual médio, análise interanual, sazonal, ciclo diurno e ciclo sazonal diurno dos raios ocorridos para este período e região de estudo.

### A.1 Avaliação dos Dados da RINDAT

As informações de ocorrência de raios (data, hora e localização) fornecidos pela rede RINDAT foram referentes ao período de 2005 a 2007 para a região destacada em cor vermelha na Figura A.1. Desta forma, o relativamente pequeno período de estudo forçou a realização de uma avaliação preliminar desses dados de forma a verificar se a quantidade e qualidade dos raios era suficiente para a realização dessas análises estatísticas e das próximas que seriam realizadas.

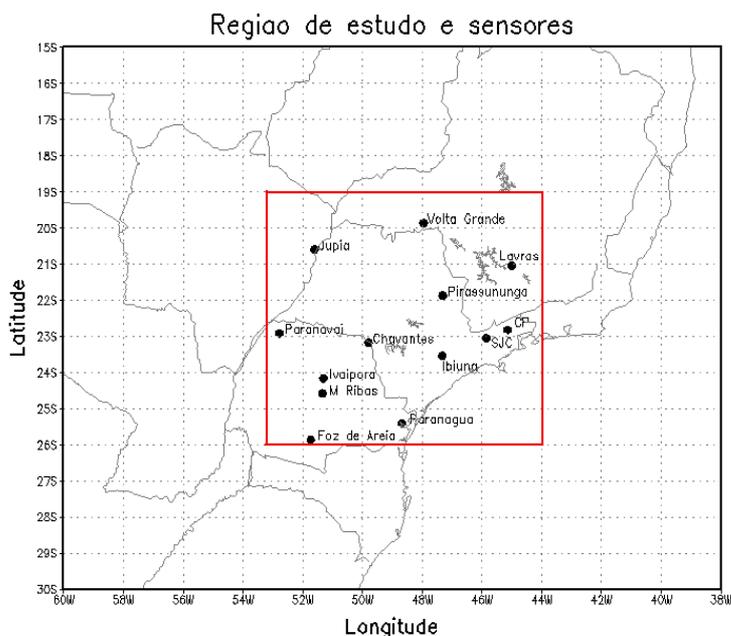


Figura A. 1 - Área que limita a região de estudo e os sensores que a compõem.

Durante esse período, dentro da área em estudo estiveram em operação de forma ativa (Figura A.1) 13 sensores de diversos tipos pertencentes à rede RINDAT, os quais possivelmente participaram de forma direta na determinação das ocorrências de raios para este estudo. Dentro dessa área existe uma quantidade relativamente alta de sensores de descargas atmosféricas que, como lembrado por Naccarato (2005), devido ao tipo e a geometria dessa distribuição de sensores sobre o estado de São Paulo, caracteriza esta região como possuindo a melhor e mais homogênea cobertura de raios do Brasil. A Tabela A.1 mostra a localização (latitude e longitude), cidade onde está localizado, o tipo e a instituição responsável pelos 13 sensores. A notória variedade de tipos de sensores observada mostra-se importante haja visto como discutido na seção 2.6.1, que esta diversidade implica em uma melhor caracterização e avaliação dos diversos tipos de relâmpagos que atingem uma região.

Tabela A.1 - Sensores pertencentes à área de estudo.

	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Cidade</b>	<b>UF</b>	<b>Sensor</b>	<b>Responsável</b>
<b>1</b>	-23,660185	-47,103485	Ibiúna	SP	LPATS IV	FURNAS
<b>2</b>	-20,780504	-51,605938	Jupia	SP	LPATS IV	FURNAS
<b>3</b>	-22,686001	-44,999298	C. Paulista	SP	IMPACT 141T	INPE
<b>4</b>	-21,991869	-47,329266	Pirassununga	SP	IMPACT ESP	INPE
<b>5</b>	-23,211880	-45,866119	S. J. dos Campos	SP	IMPACT ESP	INPE
<b>6</b>	-21,248850	-45,004280	Lavras	MG	LPATS III	CEMIG
<b>7</b>	-20,025829	-48,220558	Volta Grande	MG	IMPACT 141T	CEMIG
<b>8</b>	-24,237795	-51,670422	Ivaiporã	PR	LPATS III	SIMEPAR
<b>9</b>	-24,533001	-51,650902	Manoel Ribas	PR	IMPACT 141T	FURNAS
<b>10</b>	-26,004320	-51,668461	Foz de Areia	PR	LPATS III	SIMEPAR
<b>11</b>	-23,090099	-52,475288	Paranavaí	PR	LPATS III	SIMEPAR
<b>12</b>	-23,113621	-49,722172	Chavantes	PR	LPATS III	SIMEPAR
<b>13</b>	-25,523680	-48,511501	Paranaguá	PR	LPATS III	SIMEPAR

A avaliação quantitativa preliminar da qualidade dos dados de raios utilizados foi realizada através de análises de mapas de ED de raios (flashes-do inglês) para ilustrar a variabilidade da ED de raios na região de estudo. Estes mapas foram gerados considerando-se o número de dias do ano que os diversos sensores que compõem a RINDAT estavam em operação. Portanto, a análise dessa variável específica foi

realizada, pois a PL dos sensores da RINDAT já caracterizava-se relativamente satisfatória (cerca de 0,5 m). A Figura A.2 mostra o mapa de ED de raios para o ano de 2005 com uma resolução espacial de 10 km e indica as cidades de localização dos sensores que compõem a RINDAT. Nota-se para o estado de São Paulo (SP) como um todo que a ED de raios apresentou valores relativamente altos (cerca de 75 %), com os mais altos valores (95%) sobre as áreas central e nordeste de SP e os mais baixos valores (60%) sobre as regiões leste e noroeste. Esses valores baixos de ED de raios possivelmente estiveram associados ao mau funcionamento dos sensores de Jupia e Manuel Ribas, como mostraram as análises de *status* de funcionamento (Apêndice B, Tabela B.1) desses sensores.

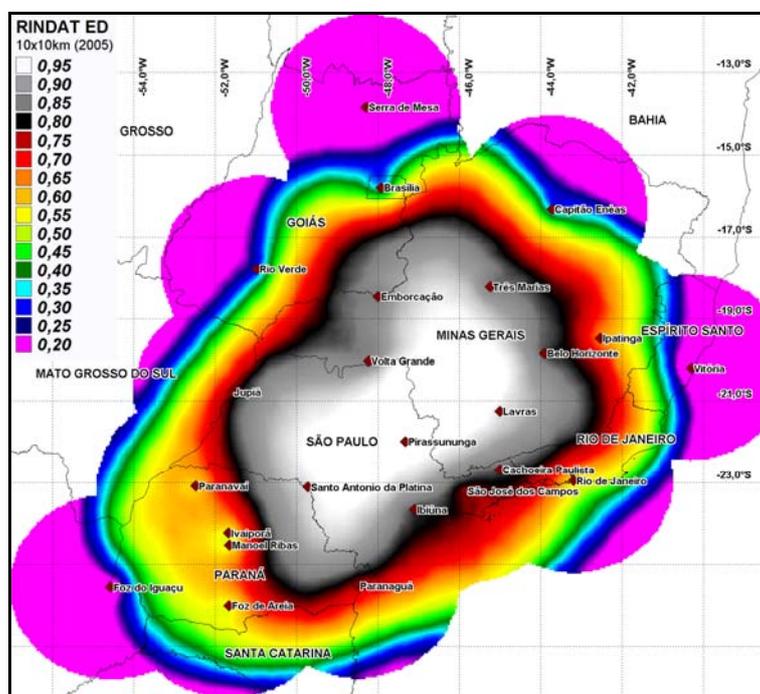


Figura A.241 - Mapa de Eficiência de Detecção de raios (flashes-do inglês) pela rede RINDAT, para a região de estudo para o ano de 2005, baseado nos 24 sensores que compõem a rede.  
Fonte: Inpe.Elat (2008).

A Figura A.3 mostra o mapa de ED de raios para o ano de 2006. Neste ano, a ED de raios foi em geral melhor do que a de 2005, apresentando o estado de SP como um todo valores maiores que 90%. As regiões sul, norte e nordeste apresentaram os mais altos índices de ED de raios, alcançando 95%, e a região leste apresentou os valores mais

baixos, cerca de 80 %. A maior ED de raios em 2006 com relação ao ano de 2005 deveu-se, como algumas análises mostraram (Apêndice B, Tabela B.2), ao fato de que cada sensor da rede esteve em operação em média por um tempo maior neste ano do que em relação ao ano de 2005.

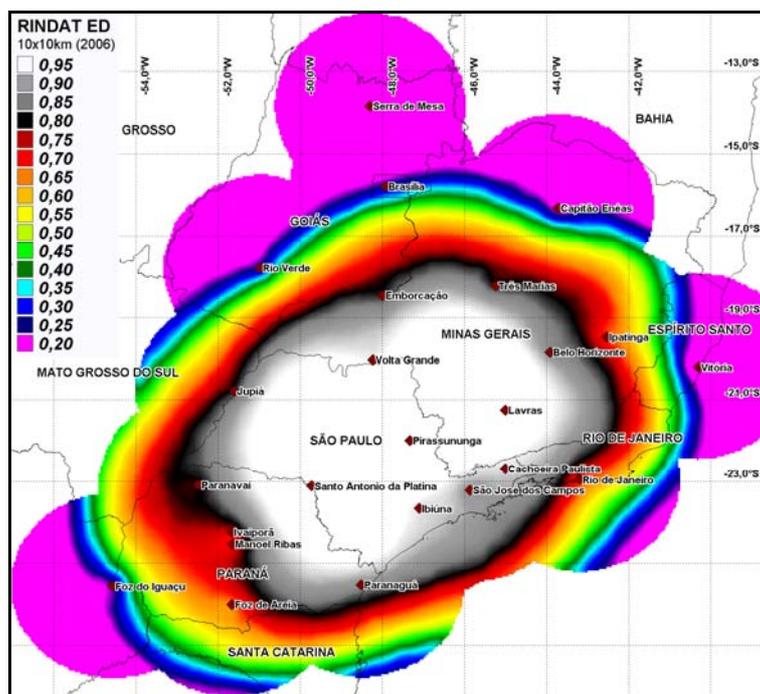


Figura A. 3 - Mapa de Eficiência de Detecção de raios (flashes-do inglês) pela rede RINDAT para a região de estudo para o ano de 2006, baseado nos 24 sensores compõem a rede.  
 Fonte: Inpe.Elat (2008).

Para o ano de 2007 (Figura A.4), percebe-se que a ED de raios continuou com valores altos em todo o estado de SP, entretanto houve um ganho relativamente representativo de ED de raios nas regiões sul, leste, norte de SP, Vale do Paraíba e região sul de Minas Gerais. O estado de SP apresentou valores de 95% de ED de raios, tendo assim uma distribuição espacial de ED de raios mais significativa em comparação a 2006. Estes excelentes valores de ED de raios para 2007 foram configurados em boa parte do estado de SP, pois a maioria dos sensores da RINDAT estiveram em modo operante (Apêndice B, Tabela B.3) na maior parte dos dias.

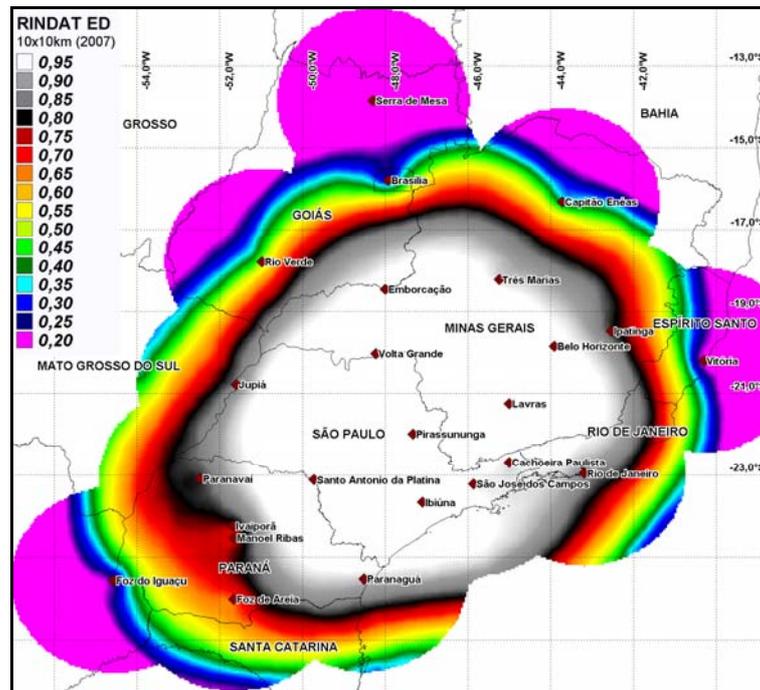


Figura A. 42 - Mapa de Eficiência de Detecção de raios (flashes-do inglês) pela rede RINDAT para a região de estudo para o ano de 2007, baseado nos 24 sensores compõem a rede.  
Fonte: Inpe.Elat (2008).

O objetivo desse trabalho não foi avaliar de forma exaustiva a qualidade dos dados de ocorrência de raios fornecidos pela rede RINDAT durante esses anos e período de estudo. A preocupação desta etapa estava em definir uma área e garantir a qualidade das informações de ocorrência de raios utilizadas, para que fosse analisada sua distribuição espacial e temporal e caracterizadas de modo fidedigno as relações existentes entre propriedades físicas de SCM e raios e a evolução temporal da atividade elétrica ao longo do ciclo de vida dos SCM.

Essa análise verificou que, para a área e período de estudo, a ED de raios da rede RINDAT possuiu valores aceitáveis, sendo que boa parte da região estudada obteve ED de raios em média de 90 %. Pelos diversos motivos discutidos acima, observou-se uma ligeira diferença da distribuição espacial dos valores de ED de raios entre os três anos do período em estudo, de forma que o ano de 2007 (2005) apresentou uma melhor (pior) distribuição espacial de valores de ED de raios. Maiores detalhes dos resultados, assim

como a forma de avaliação e o aperfeiçoamento de modelos de ED de raios dessa rede, podem ser encontrados em trabalhos como o de Pinto Jr (2005) e Naccarato (2005).

## **A.2 Características Geográficas dos Raios**

### **A.2.1 Caracterização Anual Média da Densidade de Raios no Estado de SP**

O estudo de ocorrência de raios para o período de 2005 a 2007 contou com uma média de 1.888.579 raios por ano, reportados pela rede RINDAT para a área de interesse. A distribuição geográfica da densidade média de raios (raios/ano.km<sup>2</sup>), com uma resolução espacial de 4 km (coerente com a resolução do satélite GOES), revelou características interessantes da distribuição de raios (Figura A.5). Grande parte do estado de SP apresentou uma ocorrência de mais de quatro raios por ano, contudo houve uma diferença marcante na distribuição espacial de ocorrência de raios entre as porções leste (região com mais alta incidência de raios) e oeste (região com uma menor incidência de raios) do estado de SP.

Pela análise da distribuição espacial de raios obtida, algumas importantes características particulares dessa região destacaram-se: (1) faixa de densidade de raios bem definida a partir da região metropolitana da cidade de SP, passando por Campinas, São José dos Campos e região do Vale do Paraíba até a região de Rezende no Rio de Janeiro: (2) uma área bem definida de ocorrência de raios partindo da região metropolitana de SP até o sul do estado: (3) região com moderada ocorrência de raios no centro-oeste paulista próxima a cidade de Barra Bonita e Avaré e: (4) área também com moderada incidência de raios próxima a região norte do estado de SP.

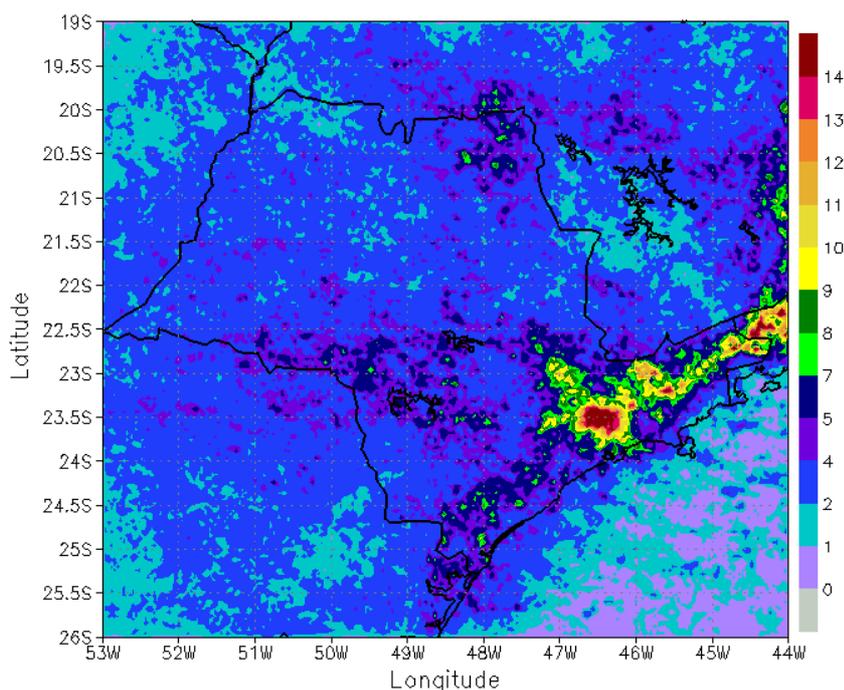


Figura A.5 - Mapa de densidade de raios médio anual (raios/km<sup>2</sup>.ano) com resolução de 4 km para a região de estudo, baseado em três anos de dados consecutivos (2005-2007).

Diversos fatores, em princípio, podem estar envolvidos para a ocorrência desta configuração geográfica de raios no estado de SP. O primeiro deles é que a alta incidência de raios na porção leste do estado, em cidades do Vale do Paraíba e na divisa do estado de SP com a região metropolitana de Resende, segue com exatidão a elevação da topografia (Figura A.6). Desta forma, visto que a noroeste dessa região existe a Serra da Mantiqueira, a associação da topografia com a incursão freqüente de sistemas frontais (SF) poderia estar induzindo a formação de tempestades convectivas ao longo da encosta (e não sobre a encosta). Assim, a alta incidência de raios nesta região do Vale do Paraíba, possivelmente estaria associada à topografia e às condições meteorológicas de mesoescala da região, favorecendo um aumento significativo do número de raios a sudeste da cadeia montanhosa em relação ao lado noroeste da mesma, onde a brisa marítima é presente. Esse resultado concorda com o trabalho de Westcott (1995), em que o mesmo encontrou maior incidência de raios ao redor dos Montes Apalaches nos Estados Unidos, do que sobre a cadeia montanhosa.

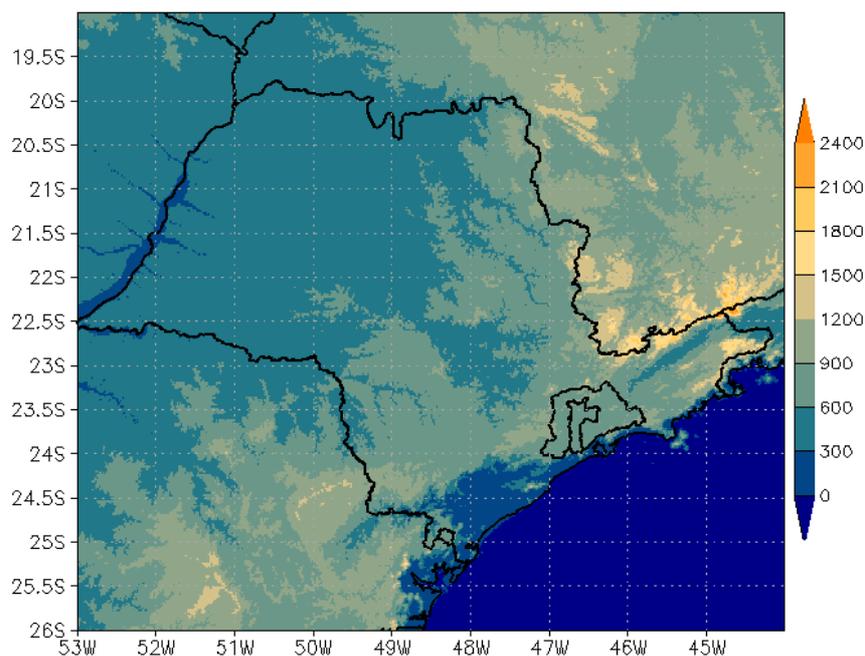


Figura A.6 - Mapa mostrando as características da topografia para a região de estudo com uma resolução espacial de 900 m.

A alta incidência de raios próximos a grandes cidades como SP, Campinas, Piracicaba e São José dos Campos, evidencia possivelmente os efeitos da urbanização (densidade populacional, poluição e ilhas de calor) sobre a convecção nesta região. A região metropolitana de SP apresentou os maiores valores, com pico em torno de 14 raios/km<sup>2</sup>ano, em concordância com os resultados de Naccarato (2005) e Pinto Jr (2005). Por outro lado, estudos realizados em diversas cidades do mundo têm fornecido fortes evidências da estreita relação entre regiões altamente urbanizadas e ocorrência de intensa atividade elétrica. Os trabalhos realizados nos Estados Unidos (WESTCOTT, 1995; BORNSTEIN et al; ORVILLE et al, 2001), Espanha (SORIANO et al, 2002) e no Brasil, em cidades como, Região Metropolitana de SP, Campinas, São José dos Campos e Sorocaba (NACCARATO et al, 2003) e Belo Horizonte (PINTO Jr et al, 2003), em geral sugerem basicamente dois fatores pertinentes para a ocorrência dessa característica: efeito de ilha de calor (hipótese termodinâmica) e efeito da poluição atmosférica (hipótese do aerossol).

Na primeira hipótese, as ocorrências de ilhas de calor (devido ao excesso de construções e carência de áreas com vegetação) em grandes centros urbanos estariam gerando

instabilidade suficiente para potencializar uma intensificação da atividade convectiva local. O aquecimento diferenciado ocasionado pelas ilhas de calor em baixos níveis, possivelmente desestabilizaria o fluxo de ar próximo a superfície, provocando um aumento na velocidade vertical das parcelas de ar na camada limite. Por outro lado, o efeito do aerossol sugere que o contingente de material particulado (devido ao tráfego de veículos e industrialização) encontrado sob grandes cidades urbanizadas exerceria influência sobre a microfísica das nuvens. Nesta segunda hipótese, o aumento de núcleos de condensação (devido à poluição atmosférica) acarretaria uma produção maior de pequenas gotículas (e diminuição no tamanho médio dessas gotículas) que chegariam à fase mista da nuvem, gerando uma intensificação na produção e geração dos centros de cargas levando a um aumento no índice de atividade elétrica da nuvem (NACCARATO, 2005). Embora, essas hipóteses sejam a princípio bastante aceitáveis, estudos da relação do efeito urbano com a atividade local de raios precisam de grande avanço, principalmente diante dos complexos fatores que podem ser responsáveis por este efeito.

A faixa de ocorrência de raios bem definida (com ocorrência em média de 7 a 8 raios por ano) que se inicia na região metropolitana de SP e passa pelas cidades de Ibiúna, Registro e Cananéia até atingir a região sul do estado de SP não mostrou nenhuma relação com a topografia local, visto que não há uma elevação significativa do relevo nesta região. Assim, para um entendimento mais preciso dos fatores que estariam influenciando a configuração de raios nesta região, seria necessária uma análise mais detalhada das condições meteorológicas locais, efeitos de urbanização e de relevo, como a que foi realizada na caracterização de ocorrência de raios na região do Vale do Paraíba.

Por fim, a incidência acima de sete raios por ano em média no centro-oeste paulista, próximo as represas Barra Bonita e Jurumirim perto das cidades de Barra Bonita e Avaré, sugere uma interação entre fatores locais e condições de mesoescala. Neste contexto, poderia estar ocorrendo uma interação entre a circulação local associada a um sistema de brisa e a incursão de SF sobre esta região. No entanto, a ocorrência

moderada de raios sobre a região norte do estado de SP, próxima a cidades como Ribeirão Preto, Barretos e Bebedouro, não mostrou nenhuma correlação com o relevo desta região e também com efeitos de industrialização. Mas importante ressaltar, que nesta região em determinadas épocas do ano ocorre a queima da cana de açúcar para facilitar a sua retirada, o que poderia ser um fator a contribuir para a intensificação das tempestades nesta região através da hipótese do aerossol. No entanto a verificação dos principais fatores locais e meteorológicos responsáveis por esta característica no norte do estado de SP pode ser obtida através de um período maior de dados de ocorrência de raios, além da análise detalhada dos fenômenos meteorológicos que mais afetam esta região.

### **A.2.2 Caracterização Interanual da Densidade de Raios no Estado de SP**

No intuito de avaliar a variabilidade da distribuição geográfica de raios entre os anos de 2005 a 2007, foram gerados mapas de densidade de raios com resolução de 4 km. Para efeitos de análises e comparações em relação à média, a relação de cores e valores da legenda de cada gráfico é a mesma utilizada na análise anual. Os resultados dessa etapa são mostrados na Figura A.7 (a)-2005, (b)-2006 e (c)-2007.

As análises da distribuição geográfica de raios para cada ano em estudo mostraram características particulares interessantes. O ano de 2005 caracterizou de forma razoável a discrepância de densidade de raios entre as porções leste e oeste do estado de SP. Os efeitos urbanos, especificamente das cidades de SP e São José dos Campos, ficaram mais nítidos quando comparado com o mapa de densidade de ocorrência média de raios (não houve união das características de efeito urbano dessas cidades com seus municípios vizinhos). Cidades como Campinas e Piracicaba atingiram valores comparáveis ( $7 \text{ raios/km}^2 \cdot \text{ano}$ ) de raios aos da cidade de SP, sendo os valores dessas duas cidades maiores do que as respectivas cidades na média anual. Percebeu-se também uma nítida ocorrência de raios próximos ao centro-oeste paulista (região apresentando ocorrência de raios acima da média) nas vizinhanças das represas Barra

Bonita e Jurumirim. Por outro lado, não foi identificada, como na distribuição média (Figura A.5), uma área bem definida de ocorrência de raios na região norte do estado.

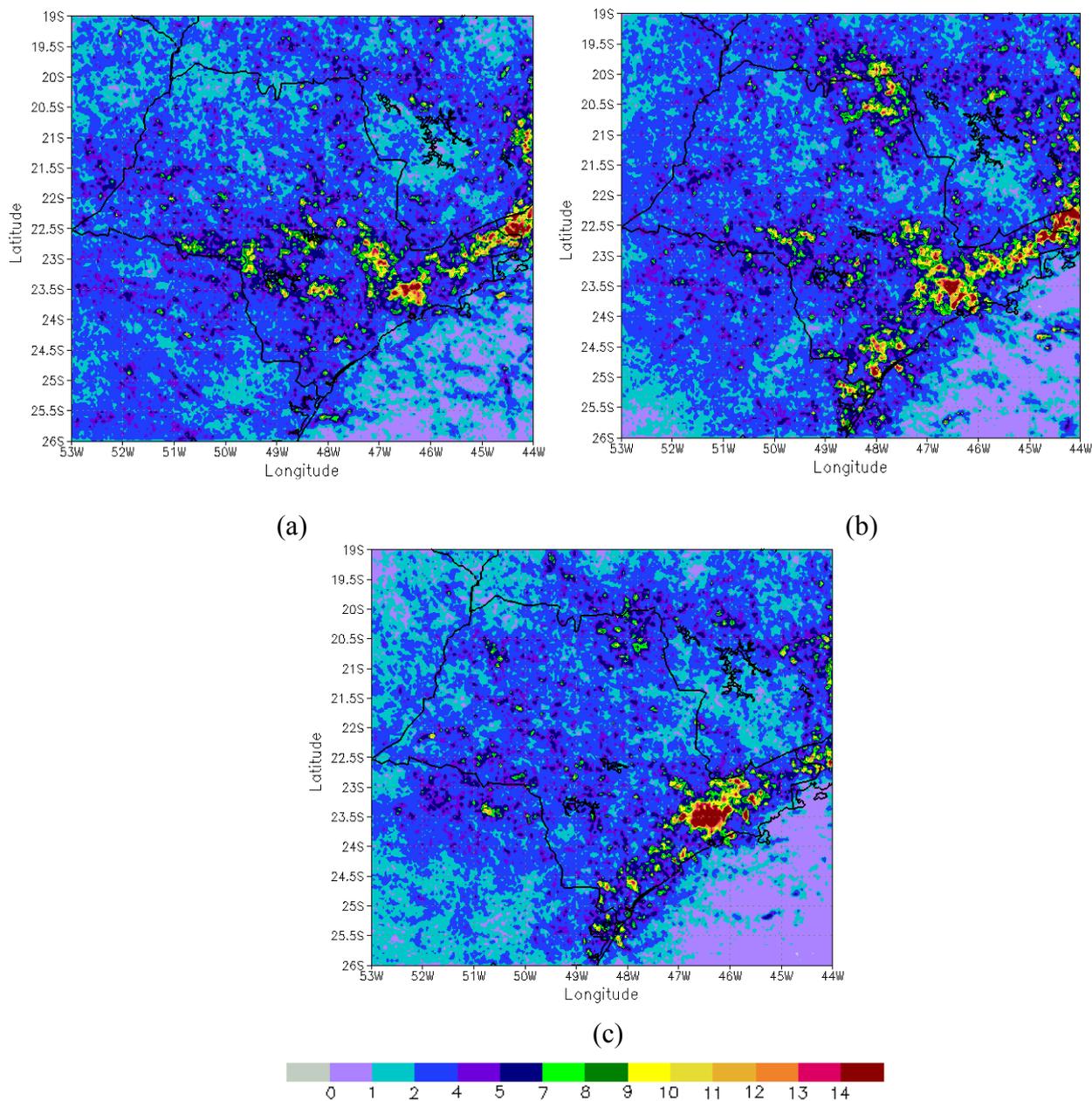


Figura A. 7 - Mapa de densidade de raios (raios/km<sup>2</sup>.ano) com resolução de 4 km para três anos: (a) ano de 2005, (b) 2006 e (c) 2007.

Em 2006, percebe-se uma diferença marcante na ocorrência de raios entre as porções leste e oeste do estado. Este ano apresentou uma ocorrência global de raios significativamente maior em relação ao ano de 2005 e em relação à distribuição anual

média. Houve uma união do efeito urbano da cidade de SP com alguns municípios vizinhos, o mesmo ocorrendo para as cidades de São José dos Campos e Cachoeira Paulista, o que evidenciou a existência de uma faixa bem definida de raios na região do Vale do Paraíba. A região de Campinas e Piracicaba foi novamente evidenciada, assim como a área de densidades de raios em torno de 10 raios/km<sup>2</sup>.ano próxima à região centro-oeste do estado. Semelhantemente ao mapa de distribuição média de raios, observou-se uma faixa bem definida de densidade de raios que se estendeu desde a região metropolitana de SP até o sul do estado, sendo que esta característica não foi evidenciada no ano de 2005. Por outro lado, a região norte da área de estudo foi caracterizada por uma alta densidade de raios, alcançando valores de até 14 raios/km<sup>2</sup>.ano.

Por fim, o ano de 2007 apresentou uma densidade geográfica global de raios inferior aos demais anos estudados. O efeito urbano da região metropolitana de SP, como nos demais anos ficou bastante evidente, sendo constatada a ocorrência de uma união do efeito urbano dessa região com a da cidade de São José dos Campos. A análise de ocorrências de raios, na região próxima a cidade de Cachoeira Paulista (parte da região do Vale do Paraíba) até a divisa com o estado do Rio de Janeiro não evidenciou uma ocorrência significativa de raios como foi observado nos anos anteriores nesta mesma região. As regiões norte, sul e centro-oeste do estado de SP apresentaram uma tímida densidade de raios quando comparado com os anos anteriores. A cidade de Piracicaba também não evidenciou um efeito urbano significativo em comparação aos anos anteriores. Desta forma, a difícil identificação do efeito urbano em cidades de médio porte, como Piracicaba em anos com moderada ocorrência de raios, foi sugerido por Naccarato (2005) como sendo devido à existência de um valor crítico de atividade elétrica regional para a definição nítida do efeito urbano em cidades desse porte.

Assim as análises de distribuição geográfica de ocorrência de raios para os anos de 2005, 2006 e 2007 mostraram em geral as seguintes características da atividade elétrica: existência de um contraste na ocorrência de raios entre as porções leste e oeste do estado de SP; alta incidência de raios sobre a região metropolitana de SP e cidades

como Campinas e Piracicaba e faixa bem definida de alta incidência de raios, seguindo a localização de cidades como São José dos Campos e Cachoeira Paulista, caracterizando a região do Vale do Paraíba. Por outro lado, não se pode afirmar que a variabilidade das características específicas da distribuição de raios nas porções norte, sul e centro-oeste da região para os anos analisados, sejam resultado de um fenômeno natural. Essa ressalva é feita, haja vista, como mostrado na seção A.1, que a ED de raios da RINDAT apresentou uma maior variabilidade entre esses anos, principalmente para essas três regiões (bordas do estado de SP). Baseado nessa observação torna-se importante verificar com um pouco mais de detalhamento se os anos que apresentaram menor (2007), maior (2006) e intermediária (2005) ocorrência de raios estão associados a um fenômeno natural ou se possivelmente foi um problema de detecção da rede.

Esta análise poderia ser feita corrigindo a quantidade de raios registrado na região em estudo, pela correção da ED de raios para cada ano, minimizando assim os efeitos causados por sensores inoperantes e perda de dados nas informações de ocorrências de raios, como sugere o trabalho realizado por Naccarato et al (2005). Por outro lado, a análise da variabilidade de ocorrência de raios entre os anos na região em estudo, poderia ser feita selecionando uma área sobre esta região que sempre apresentou valor alto e constante de ED entre esses anos. Portanto, seguindo a segunda opção, para que a variabilidade da atividade elétrica pudesse ser caracterizada em função dos fenômenos meteorológicos ocorridos neste período escolheu-se, baseado nas análises feitas na seção A.1 (mapas de ED de raios), uma área sobre a região de estudo que apresentou entre os três anos sempre ED de raios maior que 95 %. Esta limitação foi importante, pois minimiza a possível variabilidade de ocorrência de raios entre os anos devido à queda de ED de raios nas bordas da região. A área escolhida para essa análise localiza-se entre as coordenadas geográficas de 50° O a 47° O e 23° S a 21° S. A Figura A.8 mostra a área selecionada, utilizando como referência o mapa de ED de raios do ano de 2005, o qual foi o ano que evidenciou uma distribuição de ED de raios moderada sobre a região.

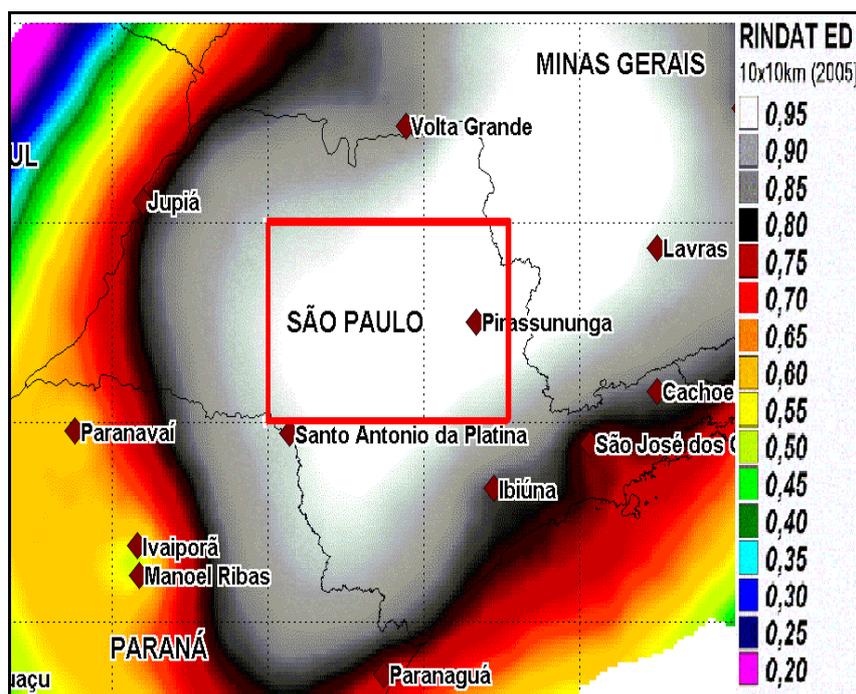


Figura A. 8 - Setor da região de estudo com ED de raios (*flashes*-do inglês) maior que 95 % para os três anos, que foi selecionado para a análise interanual de ocorrências de raios. Este mapa de exemplo refere-se ao de 2005, o qual apresentou uma moderada distribuição de ED de raios sobre a região.  
 Fonte: Inpe.Elat (2008).

Para a área selecionada, houve uma ocorrência média de 205.310 raios entre os anos, a qual corresponde a uma parcela tímida da ocorrência média para a região total de estudo (foi registrada uma média de 1.888.579 raios para a região total em estudo). Porém, pelo caráter preliminar dessa etapa, a área selecionada e as ocorrências de raios conferem características importantes a estas análises. Desta forma, como pode ser notado na Figura A.9, houve claramente a existência de uma variabilidade interanual da atividade elétrica de raios, onde o ano de 2005 apresentou a maior ocorrência de raios, seguido de 2006 e por último o ano de 2007 com uma quantidade relativamente menor que os demais.

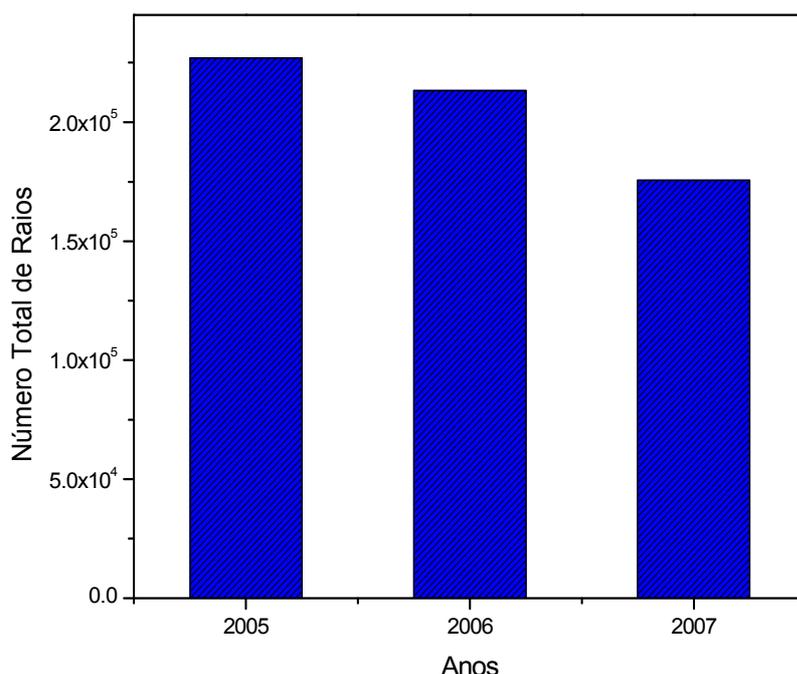


Figura A.9 - Variação anual do número total de raios na região selecionada na Figura A.8, ocorridos para os anos de 2005, 2006 e 2007.

A Tabela A.2 mostra de forma resumida, os valores de ocorrência total de raios encontrada para cada ano. A nítida ocorrência de baixos valores de raios para o ano de 2007 (175.673 raios, representando 28,5 % do total) e a baixa discrepância de raios entre os anos de 2005 e 2006 (diferença de 2 %, porém esses anos tiveram valores mais altos que de 2005) sugerem a importância de fenômenos meteorológicos sobre a variabilidade da atividade elétrica.

Tabela A. 2 - Número de ocorrência anual de raios, média e desvio padrão.

Anos	2005	%	2006	%	2007	%	Total	Média	Desvio Padrão
<b>Número de Raios</b>	226.980	<b>36.85</b>	213.277	<b>34.63</b>	175.673	<b>28.52</b>	615.930	205.310	26.565,14

Através de análises de imagens mensais de  $T_B$  no IR e das publicações mensais do boletim da Climanálise (BOLETIM CLIMANÁLISE, 2009), observou-se que o ano de 2005, mais precisamente os meses de verão, foram caracterizados por um fenômeno El Niño de fraca intensidade. Além disso, foi registrada a ocorrência média de 15 SF sobre

o estado de SP, contribuindo para seis episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e acarretando índices notórios de precipitação no litoral sul de SP, região norte, central e Vale do Paraíba. Por outro lado, o verão de 2006 iniciou-se sob atuação de um fenômeno El Niño em fase madura, o qual posteriormente configurou-se em uma La Niña de fraca intensidade. No verão deste ano, foi registrada uma média de 18 SF sobre o estado de SP contribuindo para sete episódios de ZCAS que, em sinergia com altas temperaturas ocorridas na região, acarretou num índice de precipitação acima da média em todo o estado, tendo as regiões oeste, norte, leste e litorânea intensos temporais. Algumas regiões apresentaram até queda de granizo, enquanto que o sul do estado apresentou uma carência de precipitação em relação às demais áreas. Por fim, no de 2007, segundo essas análises, houve a ocorrência durante o verão de um El Niño em fase de enfraquecimento. Para este período, foi registrada a ocorrência de sete SF sobre o estado de SP (pouco em relação aos demais anos) e sete casos de ZCAS que, em consonância com outros fatores meteorológicos, implicaram na ocorrência de baixa atividade convectiva em todo estado. Apenas em cidades como SP, Campinas e São José dos Campos (reportou-se até queda de granizo) e litoral sul de SP ocorreram curtos temporais.

Os resultados discutidos acima sugerem que o ano de 2006 foi caracterizado por intensa atividade convectiva, seguido pelo ano de 2005, e pelo ano de 2007, que apresentou uma atividade convectiva bem mais moderada. Embora, esses resultados tenham mostrado que alguns fenômenos naturais tenham parcela significativa na variabilidade notada entre esses anos, seria necessária uma análise mais profunda para indicar as verdadeiras razões para esta variabilidade. Essa observação é válida, como lembrado por Pinto Jr et al (2003), dadas as complexas interações de diferentes processos para a caracterização da ocorrência da atividade elétrica.

### **A.2.3 Caracterização Sazonal da Densidade de Raios no Estado de SP**

Com o intuito de entender melhor o comportamento da variabilidade sazonal da ocorrência de raios para a região em estudo, foram gerados mapas de densidade média de raios (raios/ km<sup>2</sup>.estação) com resolução de 4 km para o período estudado para cada

estação. Procurou-se, desta maneira, relacionar alguns fenômenos meteorológicos e estudos de raios realizados no Brasil com os resultados obtidos. A Figura A.10 mostra a distribuição de densidade de raios média encontrada para o (a) verão (DJF), (b) outono (MAM), (c) inverno (JJA) e (d) primavera (SON).

Os resultados mostram diferenças marcantes da distribuição de raios entre as quatro estações. A nítida discrepância no número de eventos de raios ocorridos entre as quatro estações do ano é, de forma sucinta, mostrada na Tabela A.3. Essa tabela mostra a quantidade de raios média reportados para cada estação do ano. Para a geração dos mapas da Figura A.10, foi registrada uma média de 1.924.694 ocorrência de raios (soma das ocorrências médias dos eventos para cada estação do ano, média de três meses).

Como esperado, o verão foi a estação que apresentou o maior índice de raios, representando aproximadamente 42 % (821.635 raios), enquanto que o inverno configurou apenas 6 % (111.197 raios) do total de ocorrências. Estes resultados foram semelhantes aos encontrados por Pinto et al (1999b), Orville et al (2000), Schutz et al (2005) e Manoochehrnia et al (2007). Pinto et al (1999b), através de uma caracterização de raios ocorridos na região sudeste do Brasil no ano de 1993, verificaram que aproximadamente 75 % dos raios ocorreram durante o período de primavera-verão. Em consonância com estes resultados, Orville et al (2000), utilizando uma climatologia de 20 anos de dados de raios (1989-2000) sobre o Texas, observaram no verão (inverno) uma ocorrência média de 47 % (7%) de raios.

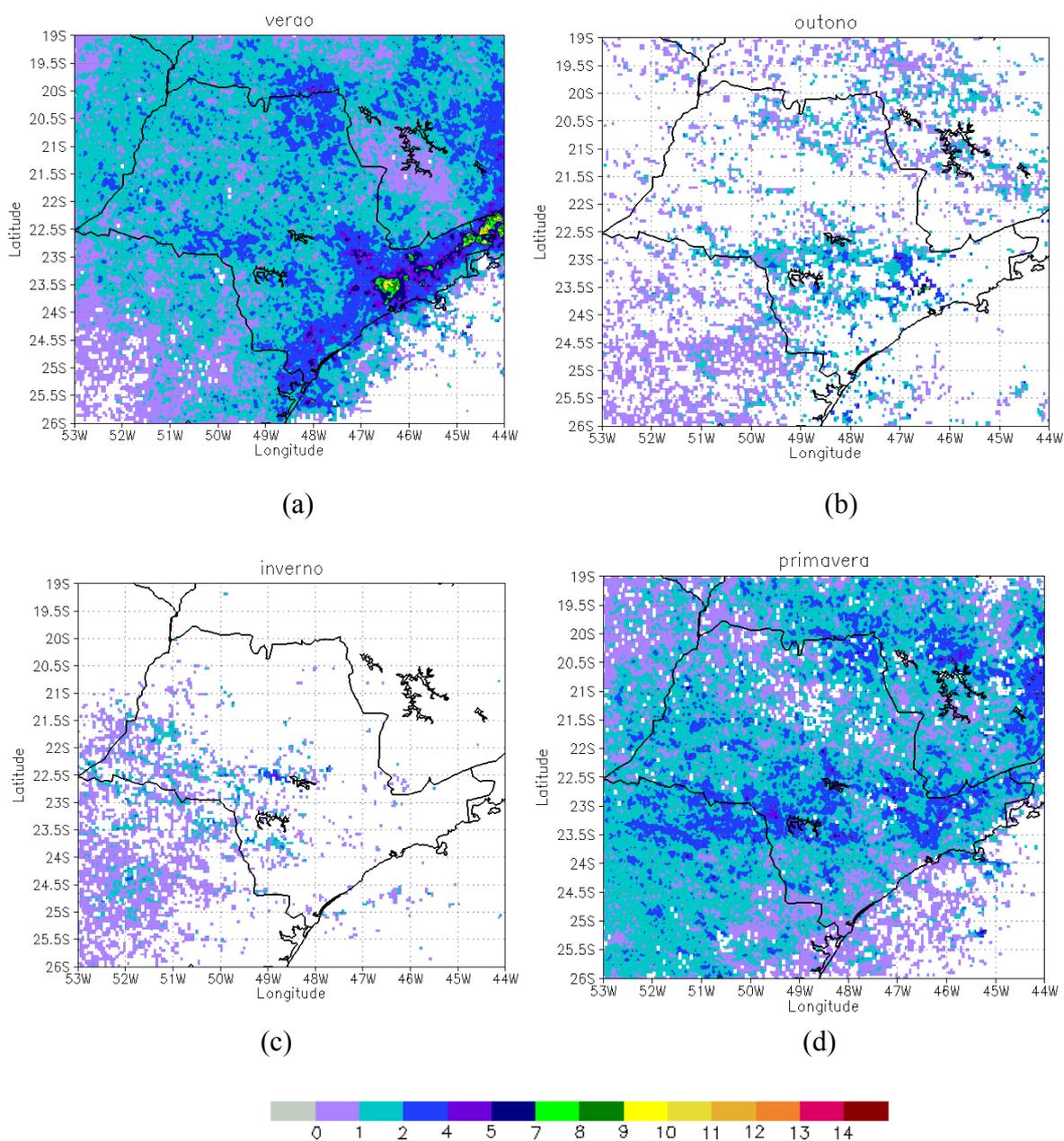


Figura A.10 - Mapa de densidade de raios médio (raios/km<sup>2</sup>.estaçã) com resolução de 4 km para as estações do ano: (a) verão (DJF), (b) outono (MAM), (c) inverno (JJA) e primavera (SON).

Tabela A.3 - Estatística de ocorrência sazonal média de raios durante o período e área de estudo.

Estação do Ano	Verão (DJF)	%	Outono (MAM)	%	Inverno (JJA)	%	Primavera (SON)	%	TOTAL
Média de Raios	821.635	<b>42,47</b>	354.832	<b>18,66</b>	111.197	<b>5,74</b>	637.030	<b>32,12</b>	1.924.694

Os maiores (verão) e menores (inverno) índices de raios são valores em torno de 10 raios/km<sup>2</sup> (região metropolitana de SP) e aproximadamente 4 raios/km<sup>2</sup> (próximo a represa Barra Bonita), respectivamente. Isso sugere, como indicado por Schutz et al (2005), o importante papel do aquecimento solar como forçante da convecção para a formação de tempestades. Portanto, o verão foi a estação que caracterizou de forma mais razoável a distribuição média da atividade elétrica de raios (como visto na seção A.2.1). Essa estação apresentou também as características de alta incidência de raios na região metropolitana de SP, Campinas (7 raios/km<sup>2</sup>) e Vale do Paraíba (8 raios/km<sup>2</sup>), faixa que se estende desde a região metropolitana de SP até o sul do estado, centro-oeste paulista e a área ao norte do estado, as quais possuíram uma média de 4 raios/km<sup>2</sup>.

A alta incidência de tempestades nesta época do ano sobre a região Sudeste (região tipicamente tropical) está atrelada principalmente ao fato da freqüente ocorrência de fenômenos de escala sinótica, como ZCAS e SF, e de mesoescala, como SCM e convecção local associada a fenômenos de Brisa. Como exemplo, o trabalho de Solorzano et al (1999) mostrou que a incidência de raios aumenta de forma significativa durante a ocorrência de eventos de ZCAS. Por outro lado, alguns estudos têm sugerido que os SCM são responsáveis pela produção da maior parte da precipitação (variável estreitamente ligada à atividade elétrica de raios) nos trópicos e em várias regiões de latitudes médias durante a estação quente (VELASCO e FRITSCH, 1987; MACHADO e LAURENT, 2002).

A estação do outono representou uma média de 19 % (uma média de 354.832 raios) do total de raios, sendo sua distribuição espacial relativamente esparsa. A maior quantidade de tempestades durante esta estação concentrou-se próxima à região metropolitana de SP, Campinas e região centro-oeste do estado, regiões as quais apresentaram uma média de 7 raios/km<sup>2</sup>. Nota-se nitidamente a bem caracterizada ocorrência de raios próximos às represas de Barra Bonita e Jurumirim. Este fato indica uma possível intensificação de um sistema de brisa associado a estes corpos d'água (represas) e a incursão de SF nesta região. Contudo, esta sugestão é apenas uma hipótese inicial que, via de regra, merece

um melhor detalhamento em vista da existência de poucos relatos na literatura dessa característica.

Por outro lado, a ocorrência de raios durante o inverno, como discutido anteriormente, representou apenas 6% do total de eventos. As tempestades nesta estação concentraram basicamente no interior do estado de SP (região central e oeste) e com uma frequência significativamente menor na região leste (região de SP, Campinas, São José dos Campos e Vale do Paraíba). Como o padrão do inverno caracteriza-se por ser bastante seco e relativamente frio, a atmosfera tem pouca energia potencial disponível para realizar convecção e os SF ao atingirem a região leste (estando com menores temperaturas) apresentam uma fraca intensidade convectiva, gerando preferencialmente tempestades a oeste do estado em detrimento da região leste. Desta forma, mais uma vez a significativa carência de ocorrência de atividade elétrica na região leste (região que via de regra apresenta a maior concentração de raios do estado) durante o inverno reforça a hipótese de alguns autores de que regiões com elevado índice de urbanização apresentariam o efeito urbano apenas quando um valor crítico de eventos de raios fosse atingido (NACCARATO, 2005).

Em contrapartida, a primavera foi a segunda estação que mais apresentou ocorrência de raios (32 % do total de ocorrências). Durante a primavera, começou a tornar-se notório a atuação das tempestades na região próxima a SP, Campinas, São José dos Campos, Vale do Paraíba e no interior paulista e região norte do estado, implicado na ocorrência em média de 4 raios/km<sup>2</sup>. Logo, estes fatos sugerem que uma quantidade maior de energia potencial disponível para convecção e umidade durante a primavera e o aumento da baroclinicidade estariam propiciando a formação de tempestades na região central e leste do estado de SP.

A Figura A.11 ilustra com maiores detalhes a variabilidade sazonal da ocorrência total de raios, em forma de uma caracterização mensal desses eventos. Os valores correspondem à soma total de raios entre os mesmos meses considerando-se os três anos em estudo. O ciclo sazonal da atividade elétrica de raios foi claramente evidenciado,

tendo um comportamento similar ao obtido por diversos estudos realizados em diferentes regiões do mundo. O mês de outubro (901.977 raios) possuiu o maior número de raios, seguido por janeiro (897.031 raios) e fevereiro (883.424 raios) e o mês de menor ocorrência de raios foi maio (65.331 raios). O mês de janeiro registrou aproximadamente 14 vezes mais ocorrências de raios em relação a maio, mostrando assim o ciclo mensal bem definido das tempestades.

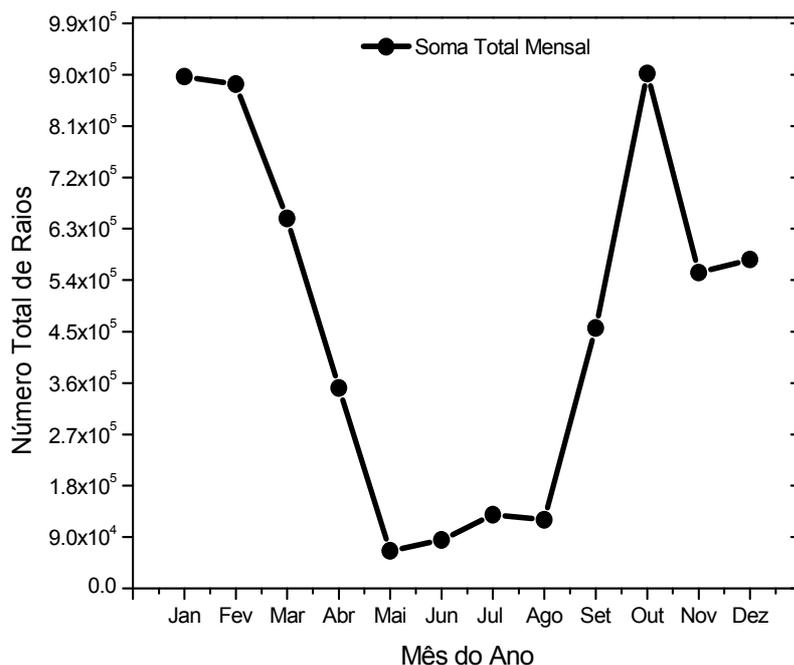


Figura A.11 - Variação mensal das ocorrências total de raios na região de estudo, baseado na soma de raios entre os meses dos anos de 2005, 2006 e 2007.

Resultados semelhantes foram encontrados por Pinto et al (1999b) e Pinto et al (2003), através de análises de raios no estado de Minas Gerais. Pinto et al (1999b) utilizando uma contingência de 1,1 milhão de raios no estado de Minas Gerais no ano de 1993, encontraram um duplo pico de ocorrência de raios, um no mês de março e outro em novembro. Por outro lado, Pinto et al (2003), analisando a ocorrência de raios para um longo período de 7 anos (1988-1995) no estado de Minas Gerais, verificaram altos índices de raios nos meses de fevereiro e novembro. Resultados semelhantes ao encontrado no presente estudo, também foram observados por Pinto et al (2006). Além disso, esses últimos autores verificaram que a distribuição mensal média normalizada de raios na região sudeste do Brasil é similar aquelas determinadas para os Estados Unidos,

Áustria, Itália e Espanha. No entanto, com relação ao pico de raios observado no mês de outubro (Figura A.11), alguns trabalhos como o realizado por Naccarato (2005) têm sugerido que análises realizadas em áreas relativamente pequenas (quando comparadas com toda a região sudeste do Brasil), como no caso atual, sofreriam influência de fatores particulares (componente regional) que agem sobre o comportamento local dos raios. Por outro lado, uma hipótese também para esse máximo de ocorrências de raios na pré-estação chuvosa (especificamente no mês de outubro) seria a condição de baroclinicidade encontrada nesses períodos. Massas de ar ainda com características de inverno se encontram com massas de ar quente desenvolvendo convecção profunda e conseqüentemente gerando tempestades com intensa quantidade de gelo, e propícias a produzir intensa atividade elétrica de raios.

### **A.3 Características Temporais dos Raios**

#### **A.3.1 Caracterização do Ciclo Diurno de Ocorrência de Raios no Estado de SP**

Nesta seção foi analisada a variabilidade do comportamento diurno da convecção, através da caracterização do ciclo diurno de ocorrência total de raios para a região de estudo, entre os anos de 2005 a 2007. Estas análises são importantes visto que estudos realizados em diversas regiões, como nos EUA (WALLACE, 1975), Argentina (PAEGLE et al, 1987), Estado do Amazonas e Antiplano Boliviano (GARREAUD e WALLACE, 1997), Bacia do Prata (VILA et al, 2004 e NASCIMENTO, 2008), têm mostrado que a convecção tem um caráter predominantemente vespertino-noturno. O recente trabalho realizado por Nascimento (2008), caracterizando SCM e SF sobre a Bacia do Prata para um longo período de 7 anos (2000-2006), mostrou altos índices de precipitação (a qual está intrinsecamente associada à atividade elétrica da convecção) entre o período das 18 GMT às 00 GMT. Esta característica particular da convecção com relação à hora do dia está associada ao momento do dia em que são criadas as condições propícias de instabilidade e energia potencial disponível para a ocorrência de intensa convecção. Portanto, para entender melhor essas características para a região de estudo e período analisado, a Figura A.12 ilustra o comportamento diurno

(correspondente a soma total horária de raios entre os três anos em estudo) da ocorrência total de raios para esta região.

O ciclo diurno de ocorrência total de raios apresentou um comportamento bastante nítido e organizado, com um significativo aumento de raios a partir das 11 horas local (102.492 raios) e valor máximo próximo das 16 horas local (636.497 raios). Ocorreram em média 12 vezes mais raios nos horários próximo às 16 horas em relação ao horário das 8 horas local (horário de menor registro de raios em média por ano). Esses resultados deixam evidente a influência direta do ciclo diurno da insolação em modular a variabilidade da atividade convectiva e elétrica ao longo do dia.

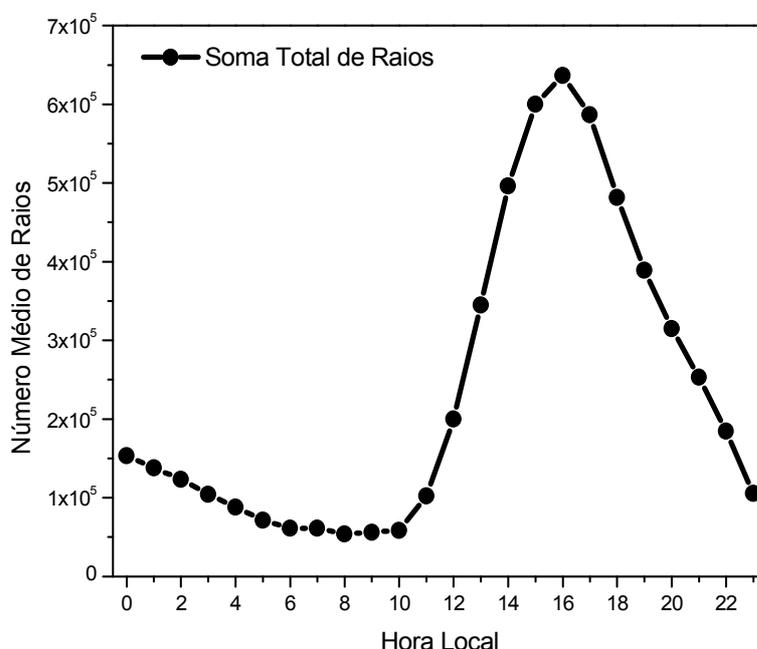


Figura A.12 - Comportamento do ciclo diurno das ocorrências total de raios na região de estudo. O número de ocorrências corresponde a soma total de raios registrados entre os três anos para cada horário.

Esses resultados foram concordantes com os trabalhos realizados em outros países como: EUA (ORVILLE et al, 2000), Áustria (SCHULZ et al (2005), Europa (MANOOCHEHRNIA et al, 2007), e no Brasil (PINTO et al (2003); NACCARATO (2005)). Schulz et al (2005), analisando a distribuição de raios na Áustria entre 1992 a 2001, verificaram alta incidência de raios próximo as 10 horas GMT e alcançando valores mais altos em torno das 16 GMT, em consonância com o trabalho de

Manoochehrnia et al (2007) que também observaram um máximo de atividade elétrica de raios próximo das 16 horas GMT e o mínimo às 7 horas GMT. No Brasil, Pinto et al (2003), analisando raios sobre o estado de Minas Gerais, encontraram um pico de eventos entre 16 e 18 horas local. Semelhantemente, Naccarato (2005), através de uma climatologia de raios na região Sudeste notou a existência de máxima incidência de raios por volta das 15 e 16 horas local. Esses diversos resultados demonstram que apesar de cada região apresentar um máximo de ocorrência de atividade elétrica de raios em horários característicos, em geral a variabilidade diurna das tempestades apresentam comportamento similares ao longo do dia.

### **A.3.2 Caracterização Sazonal do Ciclo Diurno de Raios no Estado de SP**

Analisado o ciclo diurno total de raios e observando-se que a variabilidade diurna da atividade elétrica apresentou-se bastante organizada e coerente, propôs-se agora avaliar se essas mesmas características são apresentadas individualmente para cada estação do ano. Para isto, contabilizou-se o número de raios para cada estação em cada horário do dia para os três anos em estudo, obtendo em seguida a soma das ocorrências de raios entre as mesmas estações para cada horário do dia. Os resultados encontrados para esta análise são ilustrados na Figura A.13 para o (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera.

O comportamento do ciclo diurno da atividade elétrica para o verão, outono e primavera apresentaram-se bastantes similares, em contrapartida o inverno apresentou características bem distintas dos demais. O verão, como esperado, foi a estação que representou de forma mais satisfatória o ciclo diurno total de raios (como observado na seção A.3.1), caracterizando a menor atividade elétrica em torno das nove horas local (total de 10.940 raios, representando 0,4 % do total de raios) e a mais intensa próximo das 16 horas local (total de 324.998 raios, representando 13 % do total de raios). Como discutido anteriormente, esses fatos estão associados ao caráter termodinâmico da convecção durante o ciclo diurno. No outono, um comportamento semelhante foi notado para o ciclo diurno da convecção. A atividade elétrica atingiu seu mínimo valor em

torno das 8 horas local (total de 10.464 raios, representando 1 % do total de raios) e o máximo em torno das 16 horas local (total de 116.590 raios, representando 11 % do total de raios).

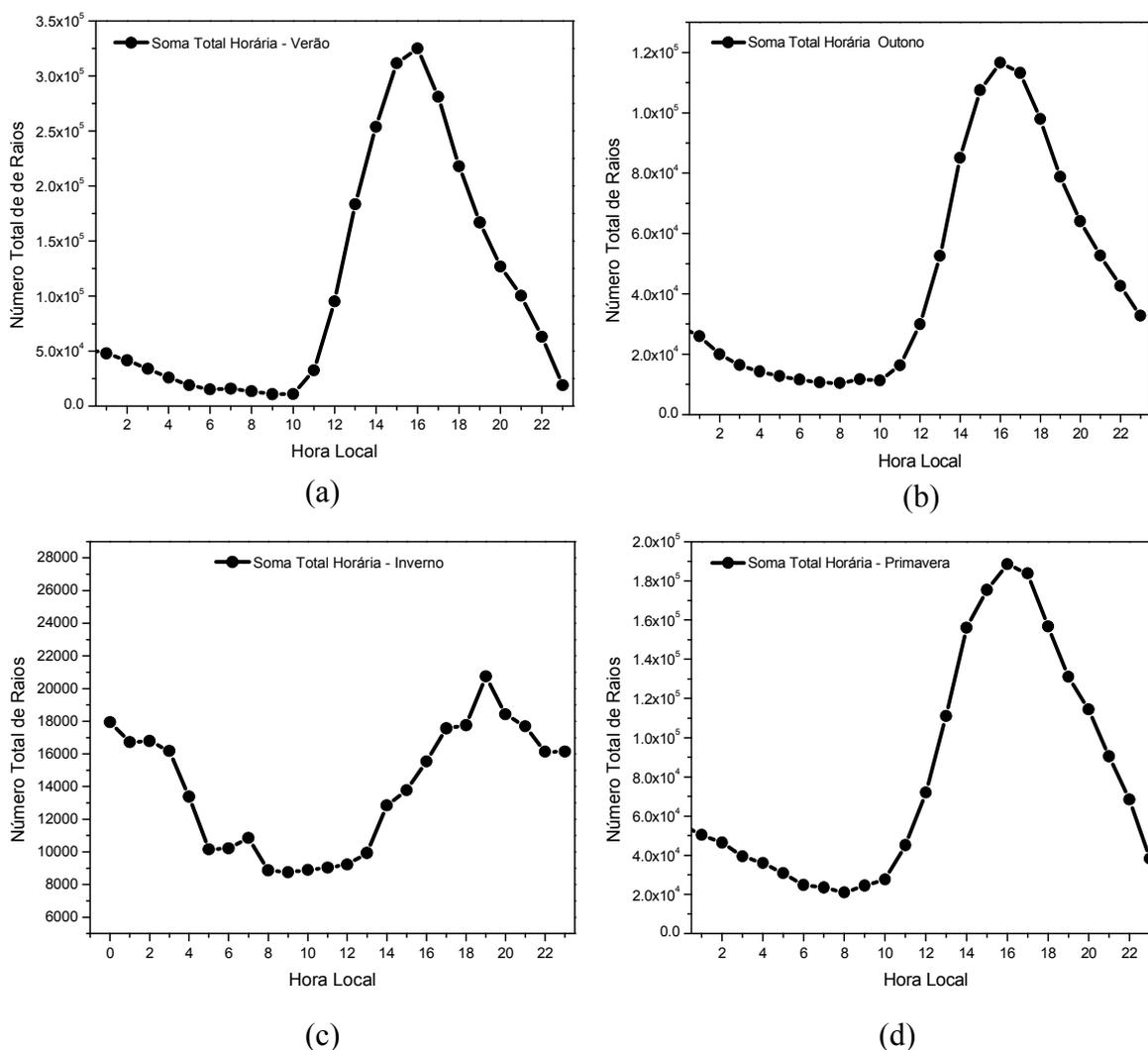


Figura A.13 - Comportamento do ciclo diurno das ocorrências total de raios para o (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera. O número de ocorrências corresponde a soma total de eventos para as estações para cada horário do dia.

De forma diferente de todas as outras estações, o comportamento do ciclo diurno de raios no inverno não apresentou um horário preferencial bem definido da ocorrência da atividade elétrica (nota-se apenas a existência de um tímido mínimo pela manhã e um máximo no início do período noturno). O mínimo valor observado ocorreu próximo das nove horas local (total de 8.749 raios, representando 4 % do total de raios) e a maior

ocorrência em torno das 19 horas local (total de 20.736 raios, representando 10 % do total de raios). Resultados semelhantes foram encontrado por Orville et al (2000) em Houston. Estes autores, através da análise de 119.000 raios reportados por sensores em de relâmpagos em solo durante o inverno pertencente ao período de 1989 a 2000, observaram a ausência de um horário preferencial do dia para ocorrência de atividade elétrica em uma área centrada em Houston. Logo, a tímida diferença de menos de 6 % entre o valor máximo e mínimo de atividade elétrica no inverno (no verão essa diferença é entorno de 13 % e no outono de 10 %) deveu-se a pouca ocorrência de tempestades durante esta época do ano.

Na primavera, o ciclo diurno da atividade elétrica começou a se tornar mais definido e organizado, sendo semelhante ao verão e outono. Um rápido crescimento da atividade elétrica ocorreu em torno das 10 horas local, atingindo um máximo próximo das 16 horas local. Os menores e maiores valores de ocorrência de raios reportados foram aproximadamente às 8 horas local (total de 20.935 raios, representando 1,1 % do total de raios) e às 16 horas local (total de 188.450 raios, representando 10 % do total de raios). A característica bem organizada do ciclo diurno da atividade elétrica nesta estação, semelhantemente ao verão, deveu-se ao fato desta estação responder por aproximadamente 32 % da atividade elétrica ocorrida em média no ano (Tabela A.3).

De maneira geral, os resultados encontrados neste capítulo, com relação à caracterização espacial e temporal da atividade elétrica de raios para a região de estudo para o período de 2005 a 2007, mostraram-se coerentes com diversos trabalhos realizados em diferentes regiões e evidenciaram importantes características geográficas e temporais da atividade convectiva e elétrica de raios. No entanto, esses resultados preliminares apenas permitem apresentar os fatos e sugerir as hipóteses, visto que este não é o foco principal deste complexo estudo (devido às muitas variáveis envolvidas) que necessita de um maior detalhamento e adição de outros dados para indicar os fatores predominantes que caracterizam a distribuição geográfica e temporal da atividade elétrica de raios sobre o estado de São Paulo.

## B APÊNDICE B - TABELAS DE ESTADO DE OPERAÇÃO DOS SENSORES

Este apêndice mostra a tabelas referentes ao estado de funcionamento mensal dos sensores da RINDAT entre os anos de 2005 e 2007, a partir da qual foram gerados os mapas de eficiência de detecção de raios apresentados no Apêndice A. Estas informações das tabelas são geradas levando-se em consideração o desempenho diário da rede.

Nas tabelas para os anos de 2005, 2006 e 2007 as cores que identificam o estado de funcionamento de cada sensor durante cada mês do ano seguem a seguinte convenção: (1) verde: sensor esteve funcionando todos os dias do mês; (2) vermelho: o sensor esteve mais de quinze dias fora de operação e (3) laranja: sensor esteve operante menos de quinze dias durante o mês.

Tabela B.1 - Tabela de estado de operação dos sensores da RINDAT em 2005.

2005																								
Local	TM	Ip	La	VG	CE	Em	BH	CP	RJ	Vi	Ib	Ju	RV	Br	SM	MR	Iv	FA	FI	Pv	SA	Pg	SJ	PI
Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Jan	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Laranja	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Laranja	Verde	Laranja	Verde	Laranja	Vermelho	Verde	Laranja	Laranja	Verde	Vermelho
Fev	Verde	Verde	Verde	Laranja	Verde	Verde	Verde	Verde	Laranja	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Laranja	Verde	Laranja	Laranja	Verde	Verde	Laranja	Verde	Vermelho
Mar	Verde	Verde	Verde	Laranja	Verde	Verde	Verde	Verde	Laranja	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Laranja	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Vermelho
Abr	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Laranja	Verde	Laranja	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Laranja	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Vermelho
Mai	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Laranja	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Vermelho	Laranja	Laranja	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Laranja	Vermelho	Vermelho
Jun	Verde	Verde	Verde	Laranja	Verde	Laranja	Verde	Laranja	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Laranja	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Laranja	Vermelho
Jul	Laranja	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Laranja	Verde	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Laranja	Verde	Verde	Laranja	Laranja	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Vermelho	Vermelho
Ago	Verde	Verde	Verde	Laranja	Verde	Laranja	Verde	Laranja	Verde	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Verde	Laranja	Laranja	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Laranja	Vermelho
Set	Verde	Verde	Verde	Laranja	Verde	Verde	Laranja	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Laranja	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Vermelho
Out	Verde	Verde	Laranja	Verde	Verde	Laranja	Laranja	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Laranja	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Vermelho
Nov	Verde	Verde	Verde	Laranja	Verde	Vermelho	Laranja	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Verde	Laranja	Verde	Verde	Laranja	Verde	Verde	Verde	Laranja	Laranja	Verde	Laranja	Vermelho
Dez	Laranja	Verde	Verde	Verde	Verde	Vermelho	Laranja	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Laranja	Verde	Laranja	Laranja	Verde	Laranja	Verde	Laranja	Verde	Verde	Verde	Verde	Laranja

Fonte: Inpe.Elat (2008).

Tabela B.2 - Tabela de estado de operação dos sensores da RINDAT em 2006.

2006																									
Local	TM	Ip	La	VG	CE	Em	BH	CP	RJ	Vi	Ib	Ju	RV	Br	SM	MR	Iv	FA	FI	Pv	SA	Pg	SJ	PI	
Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Jan	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	
Fev	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Vermelho	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Verde	
Mar	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Vermelho	Amarelo	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Vermelho	Vermelho	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Verde	
Abr	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Vermelho	Vermelho	Verde	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Vermelho	Verde
Mai	Verde	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Verde	Vermelho	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Verde
Jun	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Verde
Jul	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Amarelo	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Verde
Ago	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Verde	Vermelho	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Verde
Set	Amarelo	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Verde
Out	Amarelo	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Vermelho	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Verde
Nov	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Vermelho	Vermelho	Vermelho	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Amarelo	Verde
Dez	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Amarelo

Fonte: Inpe.Elat (2008).

Tabela B.3 - Tabela de estado de operação dos sensores da RINDAT em 2007.

2007																									
Local	TM	Ip	La	VG	CE	Em	BH	CP	RJ	Vi	Ib	Ju	RV	Br	SM	MR	Iv	FA	FI	Pv	SA	Pg	SJ	PI	
Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Jan	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo
Fev	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Verde
Mar	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Abr	Amarelo	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Verde
Mai	Amarelo	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Verde	Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Verde							
Jun	Amarelo	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Verde	Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Verde							
Jul	Amarelo	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Vermelho	Vermelho	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Verde
Ago	Amarelo	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Vermelho	Vermelho	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Verde
Set	Amarelo	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Vermelho	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Verde
Out	Amarelo	Amarelo	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Verde	Vermelho	Vermelho	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Amarelo	Verde
Nov																									
Dez																									

Fonte: Inpe.Elat (2008).

## **PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE**

### **Teses e Dissertações (TDI)**

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

### **Manuais Técnicos (MAN)**

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

### **Programas de Computador (PDC)**

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

### **Pré-publicações (PRE)**

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.