

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-8380-TDI/770

**ESTUDO DE RELÂMPAGOS NO BRASIL COM BASE NA
ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO
DE TEMPESTADES**

Kleber Pinheiro Naccarato

Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial, orientada pelos Drs. Osmar Pinto Júnior e Iara Regina Cardoso de Almeida Pinto, aprovada em 30 de maio de 2001.

INPE
São José dos Campos
2001

551.594.22 (815 A/Z)

NACCARATO, K. P.

Estudo de relâmpagos no Brasil com base na análise de desempenho do sistema de localização de tempestades /

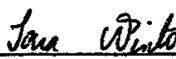
K. P. Naccarato – São José dos Campos: INPE, 2001.

165p. – (INPE-8380-TDI/770).

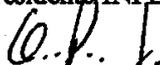
1.Relâmpagos. 2.Tempestades. 3.Medidas eletromagnéticas. 4.Radiação eletromagnética. 5.Sensores. 6.Aquisição de dados. I.Título.

Aprovado pela Banca Examinadora em cumprimento a requisito exigido para a obtenção do Título de **Mestre em Geofísica Espacial**

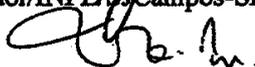
Dr^a Iara Regina Cardoso de Almeida Pinto


Orientadora/Presidente/INPE/SJCampos-SP

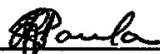
Dr. Osmar Pinto Júnior


Orientador/INPE/SJCampos-SP

Dr. Polinaya Muralikrishna


Membro da Banca/INPE/SJCampos-SP

Dr. Eurico Rodrigues de Paula


Membro da Banca/INPE/SJCampos-SP

Dr. João Alberto Pratini de Moraes


Membro da Banca
Convidado PUC/Belo Horizonte-MG

Candidato (a) : Kleber Pinheiro Naccarato

São José dos Campos, 30 de maio de 2001.

“Sem luta não há vitória. Sem empenho não há conquista.”

Autor desconhecido..

Aos meus pais,
que souberam transformar uma criança em um homem pleno.

Ao meu grande amor,
que soube transformar esse homem em uma eterna criança.

AGRADECIMENTOS

Ao nosso Mestre Maior, que através de sua infinita bondade, nos concede incontáveis oportunidades para o crescimento.

À toda espiritualidade amiga que, silenciosamente, apoia-me, orienta-me e torce pelo meu sucesso.

À minha família que, com muita dedicação e amor, procurou compreender meus erros, sanar minhas dúvidas e manter-me no caminho do bem durante essa e todas as outras etapas de minha vida.

Aos meus orientadores que, com muito profissionalismo e paciência, introduziram-me no meio científico com segurança e companheirismo.

Aos colegas do grupo de Eletricidade Atmosférica (Natália, Heloísa, Fernando Miranda, Dailton, Widinei, Roberto Serrano, Evandro, Rosa, Aurora), pela forte amizade que, direta ou indiretamente, contribuiu para a realização deste trabalho.

Aos grandes amigos Caio Eduardo, Perky, Ana, Ana Paula, Zé Luiz, Manuella, Dário, Rodrigo e André pelo apoio constante e a compreensão paciente durante mais esta etapa de minha vida.

Aos doutores Polinaya Muralikrishna e Eurico Rodrigues de Paula pela boa vontade na análise deste trabalho, enriquecendo-o com suas sugestões.

Ao Dr. João Alberto Pratini de Moraes que, com sua amizade, humildade e experiência, contribuiu com valiosos comentários e ensinamentos.

À Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) por possibilitar o acesso a seu Sistema de Localização de Tempestades, o que tornou possível o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos do Departamento de Planejamento Energético (GE/PE), especialmente Armando Cazetta Filho e Gustavo Enésio Amorim, pela enorme paciência, atenção e dedicação durante a etapa de aprendizado e aquisição dos dados do sistema.

À Sra. Regina e funcionários do Forum Apart Hotel em Belo Horizonte/MG, pela simpática e prestativa recepção que facilitou muito minha estadia nesta cidade, tornando-a produtiva e agradável.

Às funcionárias da biblioteca Marciana, Silvia, Suelena, Eunice e Yolanda pelas importantes orientações e auxílio competente na localização e organização das referências bibliográficas.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pelo apoio técnico e infra-estrutura, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro.

RESUMO

Os efeitos deletérios diretos e indiretos dos relâmpagos sobre os seres humanos têm motivado inúmeros e constantes estudos no Brasil e no mundo sobre suas características e sua relação com fatores geográficos, sazonais, topográficos e demográficos, visando assim minimizar seu impacto sobre um mundo em pleno avanço tecnológico. Os sistemas de localização de tempestades (SLT) sugeriram então como um poderoso aliado a essas pesquisas. Compostos por uma rede de sensores que captam as radiações EM emitidas pelos relâmpagos e enviam essas informações a uma central de processamento, esses sistemas podem determinar com precisão a localização do evento e seus principais parâmetros físicos, abrangendo grandes extensões territoriais. Desta forma, o SLT possibilita desenvolver estudos das características dos relâmpagos para regiões e períodos de interesse. O objetivo deste trabalho foi, primeiramente, avaliar o desempenho do SLT instalado na região sudeste do Brasil para estabelecer suas limitações como instrumento de medida e a influência de sua configuração e de sua rede de detecção nos dados gerados. A partir daí, com base nesses resultados, obteve-se os principais aspectos dos relâmpagos em função das condições geográficas e sazonais usando dados do verão e inverno de 1999 e 2000. Como principais resultados, obteve-se que o percentual de relâmpagos positivos registrados na região sudeste do Brasil foi significativamente maior no inverno (média de 23%) que no verão (média de 5,7%). Além disso, os relâmpagos negativos mostraram-se menos intensos que os relâmpagos positivos. Por outro lado, os relâmpagos negativos apresentaram uma intensidade de corrente de pico maior no verão (média de 36,9 kA) que no inverno (média de 29,9 kA), enquanto que um comportamento contrário pôde ser observado para os positivos (com médias de 50,5 kA no inverno e 46,9 kA no verão). Por fim, os relâmpagos negativos apresentaram uma maior multiplicidade (média de 1,7) em relação aos positivos (média de 1,05), não havendo variações sazonais significativas. Desenvolveu-se também um estudo preliminar sobre a ocorrência de relâmpagos em regiões densamente povoadas no verão dos anos de 2000 e 2001. Os resultados revelaram indícios de uma maior concentração de relâmpagos sobre grandes centros urbanos, como a Grande São Paulo, Grande Campinas e Vale do Paraíba. Acredita-se que estas alterações estejam associadas a eventuais alterações climáticas locais provocadas pelo crescimento populacional e industrial, responsáveis pela emissão de poluentes na atmosfera, urbanização e devastação da vegetação.

A STUDY OF THE LIGHTNING CHARACTERISTICS IN BRAZIL BASED ON AN ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF THE LIGHTNING LOCATION SYSTEM.

ABSTRACT

The harmful lightning effects on the mankind have motivated several investigations on lightning characteristics in the world and, particularly, in Brazil. Many studies on the geographic, seasonal, topographic and demographic features of lightning have been done using lightning location systems (LLS). The LLS, which is located in the southeastern region of Brazil, is a complex measurement system composed by a network of sensors that detects the electromagnetic radiation of the discharges over a wide continental area and sends these informations to a central processing unit. The location of the lightning strike point and the main physical parameters are then precisely calculated. These data play a significant role on the development of the lightning research in specific areas and periods. On the other hand, the LLS presents limitations that should be studied in order to assure more realistic results. The objective of this work is to develop a preliminary analysis of the LLS performance and the influence of its configuration on the lightning data. A study of the lightning seasonal and geographic characteristics during summer and winter seasons of 1999 and 2000 are then performed based on this analysis. The main conclusions reveal that the percentage of positive flashes is significantly greater in winter (about 23%) than in summer (about 5.7%). The peak currents of negative lightning are less intense than the peak currents of positive flashes. Negative flashes tend to be more intense in summer with a mean peak current of 36.9 kA. The correspondent winter value is 29.9 kA. Positive lightning present an inverse behavior with a mean value of 46.9 kA in summer and 50.5 kA in winter. It was observed that single lightning (both positive and negative) were less intense than the first return stroke of multiple lightning. The negative lightning have a greater number of return strokes with a mean value of 1.74 while in positive lightning the mean multiplicity is 1.05. The multiplicity does not present a significant seasonal variation for both polarities. Also, a preliminary study of lightning occurrence over highly populated areas was developed during the summer seasons of 2000 and 2001. The results reveal that lightning tend to concentrate over large urban areas, as the metropolitan regions of São Paulo, Campinas and Vale do Paraíba. It is supposed that population growth and urbanization are responsible for this specific behavior due to the atmospheric pollution and deforestation which cause local meteorological changes.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO 25

CAPÍTULO 2 - ASPECTOS FÍSICOS DOS RELÂMPAGOS..... 29

2.1 - INTRODUÇÃO..... 29

2.1.1 - Visão Geral..... 29

2.1.2 - Radiação Eletromagnética..... 31

2.1.3 - Classificação dos Relâmpagos..... 32

2.2 - RELÂMPAGOS QUE ENVOLVEM O SOLO 35

2.2.1 - Nuvem-Solo..... 35

2.2.2 - Solo-Nuvem..... 39

2.3 - RELÂMPAGOS NO CÉU..... 40

CAPÍTULO 3 - DESCRIÇÃO DE UM SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO DE TEMPESTADES (SLT) 43

3.1 - BREVE HISTÓRICO..... 43

3.2 - TÉCNICAS DE DETECÇÃO..... 45

3.2.1 - Método Magnético de Localização de Direção (MDF)..... 45

3.2.2 - Método do Tempo de Chegada (TOA)..... 46

3.2.3 - Método IMPACT (Melhoria da Precisão através da Tecnologia Combinada) 49

3.3 - CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA 50

3.3.1 - Desempenho..... 50

3.3.1.1 - Precisão da Localização..... 50

3.3.1.2 - Eficiência de Detecção..... 52

3.3.1.3 - Consistência dos Dados..... 53

3.3.1.4 - Utilização de Medidas de Qualidade..... 55

3.3.2 - Principais Parâmetros Fornecidos..... 56

3.3.2.1 - Corrente de Pico da Descarga..... 56

3.3.2.2 - Multiplicidade..... 58

3.3.2.3 - Tempo de Subida e Largura de Pulso..... 60

3.4 - COMPONENTES DE UM SISTEMA	60
3.4.1 - Central de Processamento APA2000.....	61
3.4.1.1 - Módulo LP2000 (<i>Lightning Processor</i>).....	62
3.4.1.2 - Módulo DA2000 (<i>Distribution and Archive</i>).....	63
3.4.1.3 - Módulo NM2000 (<i>Network Management</i>).....	63
3.4.2 - Os Sensores	64
3.5 - CONFIGURAÇÃO E OPERAÇÃO DA CENTRAL DE PROCESSAMENTO	65

CAPÍTULO 4 - INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA 69

4.1 - O SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO USADO NO BRASIL.....	69
4.2 - METODOLOGIA DE TRABALHO.....	71
4.2.1 - Análise de Desempenho do Sistema.....	71
4.2.1.1 - Período dos Dados.....	72
4.2.1.2 - Regiões de Estudo.....	73
4.2.1.3 - Definição dos Cenários de Configuração.....	75
4.2.1.4 - Obtenção dos Dados	80
4.2.1.5 - Método Estatístico de Análise.....	81
4.2.1.6 - Estudo de Qualificação.....	83
4.2.1.7 - Estudos de Efeito de Propagação e Degradação.....	84
4.2.2 - Estudo das Características dos Relâmpagos.....	85
4.2.2.1 - Cenário de Configuração e Região de Estudo	85
4.2.2.2 - Período dos Dados.....	86
4.2.2.3 - Obtenção dos Dados	86
4.2.2.4 - Método Estatístico de Análise.....	86
4.2.3 - Estudo Preliminar de Relâmpagos sobre Regiões Densamente Povoadas	87
4.2.3.1 - Período dos Dados.....	88
4.2.3.2 - Regiões de Estudo.....	88
4.2.3.3 - Cenários de Configuração e Obtenção dos Dados	90

CAPÍTULO 5 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES 93

5.1 - ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SLT.....	93
5.1.1 - Contaminação por Relâmpagos IN	93
5.1.2 - Estudo de Qualificação.....	94
5.1.3 - Estudo de Degradação e Efeito de Propagação	106
5.1.4 - Influência do SLT sobre as Características dos Relâmpagos.....	109
5.1.4.1 - Associada à Configuração.....	109
5.1.4.2 - Associada à Distância da Malha de Sensores.....	116

5.2 - ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DOS RELÂMPAGOS.....	121
5.2.1 - Percentual de Relâmpagos Positivos	124
5.2.2 - Intensidade da Corrente de Pico	125
5.2.3 - Multiplicidade	127
5.2.4 - Intensidade de Corrente versus Multiplicidade.....	129
5.2.5 - Tempo de Subida e Largura de pulso da Radiação Eletromagnética	131
5.3 - ESTUDO PRELIMINAR DE RELÂMPAGOS SOBRE REGIÕES DENSAMENTE POVOADAS.....	136
5.3.1 - Grande São Paulo	136
5.3.2 - Grande Campinas	145
5.3.3 - Vale do Paraíba	148
CAPÍTULO 6 - PRINCIPAIS CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	153
6.1 - ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SLT.....	153
6.2 - ESTUDO DOS RELÂMPAGOS NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL.....	155
6.3 - ESTUDO DOS RELÂMPAGOS EM CENTROS URBANOS.....	157
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	159

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1	Configuração dos centros de carga elétrica em uma nuvem de tempestade segundo modelo idealizado. 30
2.2	Tipos de relâmpagos no céu: (a) entre-nuvens (EN); (b) intra-nuvem (IN) 33
2.3	Tipos de relâmpagos que envolvem o solo: (a) NS positivo; (b) NS negativo; (c) SN positivo; (d) SN negativo..... 34
2.4	Processos de uma descarga de retorno 37
2.5	Assinatura da radiação EM de um típico relâmpago NS 38
2.6	Assinaturas da radiação EM devida a relâmpagos IN típicos a distâncias entre 15 e 30km 41
3.1	Algoritmo da LLP de localização ótima usado no método MDF 46
3.2	(a) Método de interseção hiperbólica para sistemas de localização utilizando três sensores. (b) Exemplo de localização ambígua resultante da interseção hiperbólica a partir de três sensores 47
3.3	Método de interseção circular utilizando quatro sensores..... 48
3.4	Método de localização IMPACT aplicado a uma descarga cujo ponto de impacto localiza-se sobre a linha-base de dois sensores 49
3.5	Elipse de segurança obtida para uma geometria desfavorável entre os sensores 52
3.6	Elipse de segurança obtida para uma geometria favorável entre os sensores 52
3.7	Uso da elipse de segurança na identificação da descarga mais provável (caso #2)..... 56
3.8	Algoritmo de agrupamento de descargas 59
3.9	Janela do aplicativo <i>APAConfig</i> mostrando, no detalhe, o grupo de parâmetros de configuração do núcleo de processamento do LP2000 e aos sensores 68
4.1	Delimitação da área principal da rede incluindo todos os sensores ativos do SLT utilizado neste trabalho, com exceção de Manoel Ribas/PR 71

4.2	Regiões de estudo utilizadas na análise de desempenho do SLT com destaque para a Região (2) que corresponde à malha principal de sensores	74
4.3	Regiões com elevada concentração populacional e intensa atividade industrial (Grande Campinas, Grande São Paulo e Vale do Paraíba) selecionadas para o estudo da influência da ação do homem sobre o comportamento dos relâmpagos.....	89
4.4	Região do Vale do Paraíba que compreende a BR-116 ligando São Paulo/SP ao Rio de Janeiro/RJ com destaque para as principais cidades cortadas pela rodovia	90
5.1	Número total de relâmpagos NS registrados na Região Interna	95
5.2	Percentual de participação dos sensores IMPACT (Região Interna)	97
5.3	Valores médios do erro de localização (χ^2) para a Região Interna	98
5.4	Percentual de relâmpagos IN detectados pelo SLT (Região Interna)	101
5.5	Percentual de relâmpagos positivos abaixo de 10kA (Região Interna)	101
5.6	Total de relâmpagos NS nas Regiões Externas (dados do cenário G)	107
5.7	Valores médios de χ^2 para as três regiões de estudo (dados do cenário G).....	108
5.8	Valores médios da corrente (kA) para relâmpagos negativos na Região Interna	111
5.9	Valores médios de corrente (kA) para relâmpagos positivos na Região Interna	111
5.10	Valores médios da multiplicidade dos relâmpagos negativos na Região Interna	113
5.11	Valores médios de multiplicidade para relâmpagos positivos na Região Interna	113
5.12	Percentual de positivos registrados na Região Interna	115
5.13	Percentual de positivos obtido com dados do cenário G	117
5.14	Valores médios da corrente de pico dos relâmpagos negativos (kA) obtidos através do cenário G.....	119
5.15	Valores médios da multiplicidade dos relâmpagos negativos obtidos utilizando o cenário G.....	120
5.16	Percentual de relâmpagos positivos registrados na Região Interna utilizando o cenário de configuração G	125

5.17	Valores médios da corrente de pico (kA) para relâmpagos negativos e positivos registrados na Região Interna utilizando o cenário de configuração G.....	126
5.18	Valores médios de multiplicidade para relâmpagos negativos e positivos registrados na Região Interna utilizando o cenário de configuração G.....	128
5.19	Percentual de relâmpagos negativos e positivos simples registrados na Região Interna utilizando o cenário de configuração G	128
5.20	Valores médios de corrente de pico (kA) dos relâmpagos negativos simples e múltiplos registrados na Região Interna utilizando o cenário G.....	130
5.21	Valores médios de corrente de pico (kA) dos relâmpagos positivos simples e múltiplos registrados na Região Interna utilizando o cenário G.....	130
5.22	Dois grandes grupos de formas de onda de relâmpagos positivos atualmente conhecidos: (a) escala de microssegundos. (b) escala de milissegundos.....	133
5.23	Forma de onda típica de um relâmpago NS negativo registrado nos Estados Unidos.....	135
5.24	Forma de onda típica de um relâmpago NS positivo registrado nos Estados Unidos.....	135
5.25	Distribuição do número de relâmpagos na região da Grande São Paulo durante verão de 2000 (dados do cenário E)	136
5.26	Distribuição do número de relâmpagos na região da Grande São Paulo durante verão de 2001 (dados do cenário E)	137
5.27	Número total de relâmpagos registrados na região da Grande São Paulo durante o verão dos anos de 2000 e 2001 (dados do cenário E).....	138
5.28	Mapa de ocupação do solo do município de São Paulo para o ano de 1999	140
5.29	Mapa da banda termal do município de São Paulo obtido pelo satélite LandSat-7 em 03/Set/1999	140
5.30	Distribuição acumulada da intensidade de corrente de pico (kA) dos relâmpagos negativos na região da Grande São Paulo para o verão dos anos de 2000 e 2001 (dados do cenário G)	141
5.31	Distribuição acumulada da multiplicidade dos relâmpagos negativos na região da Grande São Paulo para o verão dos anos de 2000 e 2001 (dados do cenário G).....	142
5.32	Correlação entre o número relâmpagos e a intensidade da corrente de pico dos negativos ocorridos na região da Grande São Paulo nos anos de 2000 e 2001.....	143

5.33	Correlação entre o número de relâmpagos e a multiplicidade dos negativos ocorridos na região da Grande São Paulo nos anos de 2000 e 2001	143
5.34	Correlação entre a intensidade da corrente de pico e a multiplicidade dos relâmpagos negativos ocorridos na região da Grande São Paulo nos anos de 2000 e 2001	144
5.35	Distribuição do número de relâmpagos na região da Grande Campinas durante verão de 2000 (dados do cenário E)	145
5.36	Distribuição do número de relâmpagos na região da Grande Campinas durante verão de 2001 (dados do cenário E)	146
5.37	Número total de relâmpagos registrados na região da Grande Campinas durante o verão dos anos de 2000 e 2001 (dados do cenário E).....	146
5.38	Foto da região metropolitana de Campinas/SP obtida pela câmara CCD do satélite CBERS em 27/Abr/2000, cobrindo uma área de aproximadamente 30x30km em torno do centro da cidade	147
5.39	Número total de relâmpagos registrados no Vale do Paraíba durante o verão dos anos de 2000 e 2001 (dados do cenário E)	148
5.40	Distribuição do número de relâmpagos na região do Vale do Paraíba durante o verão de 2000 (dados do cenário E)	149
5.41	Distribuição do número de relâmpagos na região do Vale do Paraíba durante o verão de 2001 (dados do cenário E)	150
5.42	Número total de relâmpagos registrados ao longo da BR-116 no verão dos anos de 2000 e 2001 (dados do cenário E).....	151
5.43	Distribuição acumulada do número de relâmpagos ao longo da rodovia Presidente Dutra (BR-116) durante o verão dos anos de 2000 e 2001 (dados do cenário E).....	152

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 A relação entre σ e a probabilidade	51
4.1 Distribuição dos sensores do SLT no Brasil.....	70
4.2 Configuração das antenas IMPACT da rede.....	70
4.3 Parâmetros do núcleo de processamento selecionados para o estudo de qualificação	77
4.4 Parâmetros excluídos do estudo de qualificação	78
4.5 Composição dos cenários de configuração	79
4.6 Informações derivadas dos dados do SLT utilizadas na análise de desempenho do sistema	81
4.7 Comparações dos dados entre os oito cenários aplicados aos dados de relâmpagos da Região Interna.....	84
4.8 Informações derivadas dos dados do SLT utilizadas no estudo sobre regiões densamente povoadas	91
5.1 Número total de relâmpagos NS da Região Interna	95
5.2 Percentual de participação dos sensores IMPACT.....	96
5.3 Valores médios de χ^2 na Região Interna	98
5.4 Número de relâmpagos IN e positivos abaixo de 10kA	100
5.5 Comparação entre cenários para o verão de 2000.....	103
5.6 Comparação entre cenários para o verão de 1999.....	103
5.7 Comparação entre cenários para o inverno de 2000	104
5.8 Comparação entre cenários para o inverno de 1999	104
5.9 Número total de relâmpagos NS nas Regiões Externas	107
5.10 Valores médios de χ^2 nas três regiões estudadas.....	108
5.11 Comparação dos valores de χ^2 entre as regiões.....	109
5.12 Valores médios absolutos de corrente (kA)	110
5.13 Valores médios absolutos da multiplicidade	112
5.14 Número de relâmpagos NS negativos e positivos na Região Interna	115

5.15	Número de relâmpagos NS negativos e positivos nas três regiões estudadas	116
5.16	Média da corrente e multiplicidade para os relâmpagos negativos.....	118
5.17	Comparações entre as Regiões Interna e Externas.....	119
5.18	Número de relâmpagos NS na Região Interna	122
5.19	Valores médios dos principais parâmetros dos relâmpagos na Região Interna	122
5.20	Total de relâmpagos NS para os anos de 1999 e 2000	123
5.21	Média ponderada dos principais parâmetros físicos dos relâmpagos para os anos de 1999 e 2000	123

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ALDF	- Advanced Lightning Detection Finder
APA	- Advanced Position Analyzer
AR	- Relâmpago para o Ar
ARSI	- Atmospheric Research Systems Inc.
CBERS	- China-Brazil Earth Resources Satellite
CDE	- Common Desktop Environment
CEAG	- Circuito Elétrico Atmosférico Global
CEMIG	- Companhia Energética de Minas Gerais
CRDF	- Cathode-Ray Direction Finder
DA2000	- Distribution and Archive Module (APA2000)
ELAT	- Grupo de Eletricidade Atmosférica
EN	- Relâmpago Entre-Nuvens
EPRI	- Electric Power Research Institute
GAI	- Global Atmospheric Inc.
GPS	- Global Positioning System
IMPACT	- Improved Accuracy from Combined Technology
IN	- Relâmpago Intra-Nuvem
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LAN	- Local Network Area
LANDSAT	- Land Satellite
LLP	- Lightning and Protection Inc.
LP2000	- Lightning Processor Module (APA2000)
LPATS	- Lightning Positioning and Tracking System
MDF	- Magnetic Direction Finder
NLDN	- National Lightning Detection Network
NM2000	- Network Management Module (APA2000)
NS	- Relâmpago Nuvem-Solo
PC	- Personal Computer
RDBMS	- Relational Database Management System
RNSS	- Range Normalized Signal Strength
SIMEPAR	- Sistema Meteorológico do Paraná
SLT	- Sistema de Localização de Tempestades
SN	- Relâmpago Solo-Nuvem
TCP/IP	- Transmission Control Protocol / Internet Protocol
TLM	- Transmission Line Model
TOA	- Time of Arrival

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, os relâmpagos constituíram o ponto central das pesquisas de diversas comunidades científicas e tecnológicas em todo mundo, indubitavelmente pela natureza agressiva e devastadora do fenômeno. Recentemente, este interesse tem crescido por parte dos especialistas devido, em grande parte, à instalação de sistemas de localização de tempestades (SLT), os quais permitem estudos das características físicas, geográficas e sazonais dos relâmpagos, cobrindo grandes áreas continentais e, em particular, as regiões habitadas (Orville. 1994; Orville e Silver. 1997; Diendorfer et al. 1998; Orville e Huffines. 1999a,b). Os avanços tecnológicos possibilitaram então a obtenção de dados com precisão cada vez mais elevada, permitindo utilizá-los em conjunto com informações de radares meteorológicos e satélites no estudo da evolução de sistemas convectivos, seus graus de severidade, trajetórias, origens, etc. Alguns aspectos de estudos meteorológicos utilizando dados de SLT no Brasil podem ser encontrados em Solorzano (1998).

Por outro lado, os aspectos eletromagnéticos (EM) dos relâmpagos não são menos importantes. Interferências em sistemas de navegação de aeronaves, dispositivos de comunicação e sofisticados equipamentos de superfície, acompanhadas de significativos prejuízos econômicos causados pelas freqüentes avarias são exemplos que justificam o estudo da radiação EM gerada pelas descargas atmosféricas. Desta forma, o bom conhecimento do comportamento da radiação dos relâmpagos como um todo é essencial para o desenvolvimento de técnicas de proteção e prevenção. Em outras palavras, a compreensão dos mecanismos físicos dos relâmpagos através do estudo de sua radiação EM é fundamental para o avanço da ciência e para a solução dos sérios problemas resultantes de sua interação com um mundo em pleno crescimento tecnológico. Miranda (2000) apresentou um trabalho pioneiro de análise da radiação EM de relâmpagos no Brasil com importantes contribuições para o entendimento de seus processos físicos.

A energia elétrica, por sua vez, constitui uma das mais importantes bases para o desenvolvimento da civilização humana. Este fato pode facilmente ser comprovado durante a ocor-

rência dos chamados *black-outs* ou “apagões”, responsáveis por grandes prejuízos para a indústria, comércio ou mesmo para as pessoas individualmente. Na grande maioria dos casos, os vilões são os relâmpagos que, atingindo locais próximos às linhas de transmissão, estações de distribuição e retransmissão, causam a interrupção do fornecimento de energia em grandes extensões territoriais e/ou danificam os equipamentos ligados à rede elétrica. Nesse contexto, empresas de geração e distribuição de energia em todo mundo, inclusive no Brasil, realizam enormes investimentos na pesquisa de relâmpagos e no desenvolvimento de sistemas de proteção através de dados fornecidos por sistemas de localização de tempestades (Cummins et al. 1998b) com o intuito de melhorar cada vez mais a prevenção contra interrupções e avarias, gerando resultados práticos de impacto direto e indireto sobre a vida das pessoas. Esse importante aspecto da pesquisa científica de relâmpagos, aliado aos elevados índices cerâmicos observados (Pinto Jr. e Pinto. 2000), têm motivado muitos pesquisadores do Brasil a estudarem os complexos processos físicos associados às descargas atmosféricas no país.

O convênio firmado entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) em 1995 através da linha de Eletricidade Atmosférica (ELAT) da Divisão de Geofísica Espacial, permitiu ao grupo de pesquisa ELAT ter acesso irrestrito aos dados gerados pelo SLT através da central de processamento da CEMIG em Belo Horizonte/MG. Além disso, o grande número de relâmpagos registrados no Brasil, principalmente no verão, e os elevados índices de mortalidade por raios têm motivado o desenvolvimento de estudos pioneiros da distribuição geográfica e características físicas das descargas atmosféricas em nosso país (Pinto Jr. et al. 1996, 1999, 2000; Pinto et al. 1999, 2000). Entretanto, nesta época, o SLT contava com um pequeno número de sensores dotados de poucos recursos tecnológicos, o que limitava muito sua área de abrangência (somente no estado de Minas Gerais), sua eficiência de detecção e precisão de localização. Atualmente, o SLT sofreu inúmeros aprimoramentos tecnológicos aliados a um aumento significativo da cobertura da rede de sensores, sendo capaz então de fornecer dados muito mais precisos e confiáveis de uma área continental bem maior. Isso motivou a realização de novos estudos das características dos relâmpagos na região sudeste do Brasil visando complementar os primeiros resultados obtidos nos trabalhos anteriores.

Uma análise mais detalhada das principais características de um sistema de localização de tempestades revela claramente seu imenso potencial como instrumento de pesquisa científica na área de descargas atmosféricas. De fato, as diversas informações fornecidas sobre relâmpagos permitem a realização de inúmeros estudos estatísticos sobre o fenômeno: sua relação com determinados sistemas meteorológicos, o comportamento de suas características em função da posição geográfica e da época do ano, a relação dos índices de ocorrência com as características geológicas, climáticas e demográficas de determinadas regiões, entre outros. Por outro lado, embora o SLT constitua um complexo instrumento de medida, ele está sujeito a diversos erros sistemáticos. Este aspecto também pode ser explorado através da pesquisa científica a qual, por intermédio de metodologias, pode verificar onde os erros estão ocorrendo e, assim, sugerir possíveis correções. Esta outra abordagem da pesquisa tem como objetivo fundamental aprimorar o instrumento de medida e identificar suas limitações para que os resultados finais ligados ao fenômeno físico em questão sejam mais confiáveis.

Desta forma, os objetivos gerais do presente trabalho englobam cada uma das abordagens discutidas anteriormente, tanto no que se refere à determinação da confiabilidade do instrumento de medida, como a análise das características dos relâmpagos em função da posição geográfica, época do ano e da distribuição demográfica. Entretanto, dentro de cada abordagem, muitos estudos podem ser desenvolvidos, tornando-se necessário então concentrar-se apenas nos aspectos mais relevantes. Em outras palavras, neste trabalho, procurou-se focar apenas as questões mais importantes relacionadas com o desempenho do SLT utilizado na obtenção dos dados e com as características dos relâmpagos registrados. A idéia fundamental é fazer com que estes resultados preliminares sirvam de base para estudos futuros, mais detalhados e completos, apontando-lhes os rumos a serem seguidos e os objetivos a serem alcançados.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre relâmpagos, descrevendo brevemente os aspectos gerais do fenômeno, sua origem a partir das nuvens de tempestades e suas etapas. Em seguida, são discutidas as principais características dos relâmpagos no céu e que envolvem o solo, dando destaque somente aos pontos relevantes para o desenvolvimento do trabalho proposto.

O Capítulo 3 fornece uma visão geral de um sistema de localização de tempestades (SLT). Partindo de um breve histórico das tecnologias empregadas ao longo dos anos, discute-se então os princípios básicos de funcionamento do SLT e sua constituição física, englobando as atuais técnicas de detecção juntamente com a descrição e o método de determinação dos parâmetros físicos dos relâmpagos e de desempenho do sistema.

O Capítulo 4 traz uma descrição do sistema de localização de tempestade utilizado neste trabalho bem como a metodologia empregada nos estudos desenvolvidos.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados, juntamente com as respectivas análises e discussões pertinentes a cada estudo: 1) Análise da influência dos parâmetros de configuração do sistema sobre a qualidade dos dados com base nos erros associados à localização e à estimativa da corrente de pico dos relâmpagos nuvem-solo e na contaminação dos dados por relâmpagos intra-nuvem; 2) Estudo da degradação da qualidade das informações para relâmpagos detectados em regiões continentais e oceânicas distantes da rede de sensores; 3) Estudo estatístico das características de relâmpagos positivos e negativos (envolvendo número de ocorrências, pico de corrente, multiplicidade, largura de pulso e tempo de subida) na região sudeste do Brasil para diferentes épocas do ano (verão e inverno); 4) Estudo preliminar de relâmpagos sobre regiões densamente povoadas, através da comparação dos dados para o verão dos anos de 2000 e 2001, cujos resultados mostraram indícios de um aumento não uniforme do número de relâmpagos, havendo uma maior concentração de eventos sobre os três maiores centros urbanos do estado de São Paulo (Grande São Paulo, Grande Campinas e Vale do Paraíba).

Por fim, o Capítulo 6 resume as principais conclusões do trabalho e propõe algumas sugestões para trabalhos futuros, dando continuidade ao estudo das características dos relâmpagos através de sistemas de localização de tempestades.

CAPÍTULO 2

ASPECTOS FÍSICOS DOS RELÂMPAGOS*

2.1. INTRODUÇÃO

2.1.1. Visão Geral

Uma nuvem de tempestade na atmosfera terrestre é produzida a partir do vapor d'água e desenvolve-se na troposfera, podendo atingir até a tropopausa, localizada em torno de 15km de altitude na região sudeste do Brasil. Este vapor d'água, existente nas camadas mais baixas da atmosfera, a medida que ascende por convecção (devido à maior temperatura das parcelas de ar próximas da superfície), passa do estado de vapor para o estado líquido e sólido em determinadas alturas da atmosfera, adquirindo formas como gotas de água, gotículas de água super-resfriadas, cristais de neve, granizo leve, pedras de granizo e cristais de gelo em função da altitude, da temperatura e da umidade relativa da atmosfera. Desse processo, forma-se uma nuvem a qual pode continuar se desenvolvendo até atingir um estágio maduro, quando então surgem as chamadas células de tempestade. Uma nuvem de tempestade pode ser constituída por várias células eletrificadas (Pinto. 1987; MacGorman e Rust. 1998; Pinto Jr. e Pinto. 2000). A eletrificação dessas células é causada pelas colisões mútuas e fricções da água em suas várias fases no interior da nuvem em função dos fortes movimentos ascendentes e descendentes de ar. Surgem então grandes centros de carga positivos e negativos como resultado da geração e separação de cargas através de processos micro e macrofísicos ainda pouco conhecidos (Saunders. 1995; Williams. 1988, 1995; Pinto Jr. e Pinto. 2000). Com o acúmulo de cargas, o campo elétrico intensifica-se dando origem às descargas atmosféricas ou relâmpagos, causados pela ruptura dielétrica do ar no interior da nuvem de tempestade. As extensões vertical e horizontal das nuvens variam em função da região do globo e das estações do ano. Mais especificamente, os fatores que

* Visando uniformizar a nomenclatura utilizada neste trabalho, o termo relâmpago denotará sempre um evento completo, constituído por uma ou mais descargas individuais (*strokes*). O termo descarga será sempre empregado como a tradução de *stroke*, significando uma das descargas que compõem o relâmpago. Casos específicos, onde o termo descarga possa ter outro significado físico, será explicitado no texto.

regulam suas dimensões e suas características físicas, elétricas e morfológicas são a latitude, a topografia da superfície, o perfil de temperatura atmosférico e a circulação dos ventos. Da mesma forma, por terem sua origem nas nuvens eletrificadas, os relâmpagos também apresentam uma ampla variedade de características dependendo desses mesmos fatores (Uman. 1987; Pinto Jr. e Pinto. 2000).

Um modelo idealizado da distribuição dos centros de cargas em uma nuvem de tempestade, mostrado na Figura 2.1, estabelece dois centros principais: um negativo, próximo a base, e um positivo na parte superior da nuvem, ambos com magnitude da ordem de várias dezenas de coulombs. Eventualmente um pequeno centro de cargas positivo na base da nuvem, abaixo do centro negativo principal, também pode estar presente. As camadas de cargas negativas e positivas nos extremos superior e inferior da nuvem, respectivamente, correspondem à blindagem dos centros de carga principais através da captura de íons da atmosfera ao redor da nuvem.

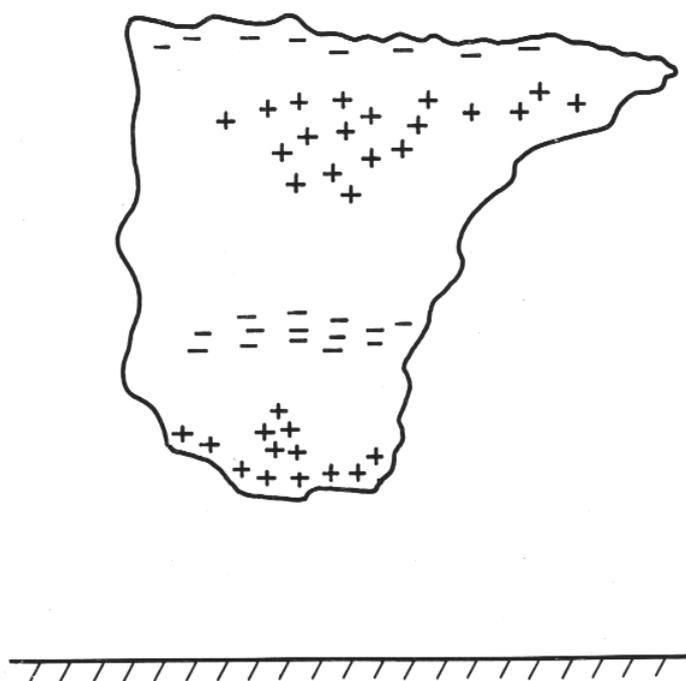


Fig. 2.1 - Configuração dos centros de carga elétrica em uma nuvem de tempestade segundo modelo idealizado.

FONTE: Pinto Jr. e Pinto (1996, p. 41).

O relâmpago, portanto, consiste em uma descarga elétrica de grandes proporções que ocorre na atmosfera e que apresenta imensuráveis fenômenos relacionados, não só próximos ao local de sua ocorrência, como também a grandes distâncias. Acredita-se que os relâmpagos possuam um papel fundamental na manutenção do campo elétrico de tempo bom (cerca de 100V/m apontando para baixo), observável abaixo da ionosfera, que surge devido ao balanço entre a carga negativa líquida da Terra e a carga espacial positiva da atmosfera, constituindo o chamado Circuito Elétrico Atmosférico Global, CEAG (Iribarne e Cho. 1980; Uman. 1987; Williams. 1988). Além disso, uma descarga atmosférica provoca reações químicas no interior e ao redor de seu canal de propagação (dotado de altas temperaturas) que resultam em elementos químicos antes não existentes na atmosfera ou, pelo menos, em concentração minoritária (Uman. 1987; Pinto Jr. e Pinto. 1996).

2.1.2. Radiação Eletromagnética

O relâmpago possui um longo canal ionizado, na maioria das vezes dotado de diversas ramificações, que estende-se por vários quilômetros tanto na vertical como na horizontal. Este canal atua como uma antena de irradiação efetiva de ondas eletromagnéticas (EM) em um amplo espectro de frequências, denominadas *sferics*, as quais propagam-se ao redor do planeta ao longo da atmosfera, gerando um grande número de fenômenos interessantes tanto na superfície como nas camadas mais altas. Diversos estudos indicam que a radiação EM dos relâmpagos produzam efeitos diretos e indiretos no plasma ionosférico e na precipitação de partículas da magnetosfera da Terra (Uman. 1987; Pinto Jr. 1993; Pinto Jr. e Pinto. 2000). Além disso, fenômenos luminosos de baixa intensidade (na maioria das vezes invisíveis ao olho humano) como os *sprites*, jatos azuis e *elves* tem sido observados entre a troposfera e a mesosfera, apresentando estreita relação com a atividade eletromagnética de relâmpagos nuvem-solo (Pinto Jr. e Pinto, 2000). Tais fenômenos, e outros que ainda venham a ser descobertos, estendem a fronteira do conhecimento existente sobre a atuação das tempestades na dinâmica atmosférica como um todo, não se restringindo apenas ao solo e à atmosfera ao seu redor, como antes se acreditava (Tavares. 1999).

Particularmente, as variações do campo elétrico ambiente durante a ocorrência de um relâmpago constitui uma das mais importantes informações que fundamentam inúmeros

estudos de relâmpagos pois, o comportamento do campo elétrico ao longo de todo o evento pode freqüentemente revelar parâmetros físicos significativos de cada etapa que compõe o fenômeno. Em outras palavras, os campos EM irradiados por diferentes processos de um relâmpago possuem assinaturas distintas mas dotadas de características comuns que se reproduzem a cada novo evento (Uman e Krider. 1982; Miranda. 2000). Além disso, medidas da radiação eletromagnética oriundas de relâmpagos no céu levaram diversos pesquisadores a identificar as principais características dos relâmpagos intra-nuvem (Brook e Ogawa. 1977; Proctor. 1981), permitindo assim diferenciá-los dos relâmpagos que envolvem o solo através da análise das assinaturas da radiação EM associadas a cada tipo. Existe uma parcela significativa da literatura descrevendo várias décadas de medidas de sinais EM irradiados por relâmpagos, estando compilada em Uman (1987), Ogawa (1995) e MacGorman e Rust (1998).

2.1.3. Classificação dos Relâmpagos

Em termos de nomenclatura, considera-se um relâmpago como um fenômeno físico completo. O termo descarga atmosférica tem sido freqüentemente empregado de forma equivalente a relâmpago. Existem dois tipos fundamentais de relâmpagos: (1) no céu e (2) que envolvem o solo. A diferença óbvia entre ambos está no fato de que os relâmpagos no céu não alcançam o solo.

Entre os relâmpagos no céu (Figura 2.2), pode-se identificar três tipos principais: (1) relâmpagos intra-nuvem (IN), os quais ocorrem no interior de uma mesma nuvem de tempestade; (2) relâmpagos entre-nuvens (EN), que ocorrem entre nuvens diferentes e (3) relâmpagos no ar (AR), que partem de uma nuvem e terminam na própria atmosfera, sem alcançar uma outra nuvem ou o solo. Bolsões de carga que se formam na atmosfera em torno das nuvens de tempestade seriam responsáveis por esse tipo de relâmpago (Ogawa. 1995).

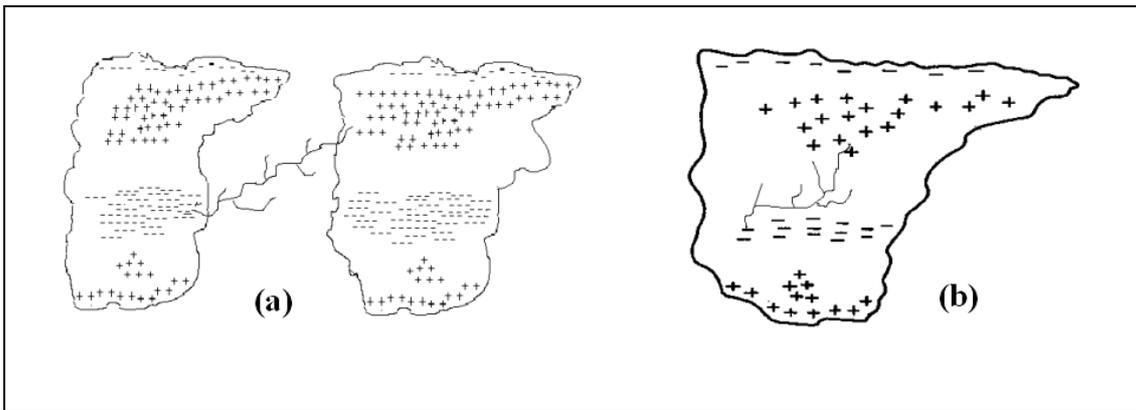


Fig. 2.2 - Tipos de relâmpagos no céu: (a) entre-nuvens (EN); (b) intra-nuvem (IN).

Os relâmpagos que envolvem o solo, também conhecidos como raios, são classificados em dois tipos básicos: (1) relâmpagos nuvem-solo (NS), caracterizados por descargas que, partindo de uma nuvem, atingem a superfície da Terra; (2) relâmpagos solo-nuvem (SN), que ocorrem a partir do solo em direção à nuvem. Os relâmpagos NS e SN também são classificados pela polaridade das cargas efetivamente transferidas ao solo (ou neutralizadas na nuvem), dando origem aos relâmpagos positivos (transferência de cargas positivas) e negativos (transferência de cargas negativas), conforme ilustrado na Figura 2.3.

Os relâmpagos mais comuns ocorrem no interior das nuvens (IN), seguidos pelos relâmpagos NS (Orville. 1995). Já os relâmpagos SN, EN e AR são bem mais raros. Embora os relâmpagos que envolvam o solo não sejam os mais frequentes, eles são os mais estudados e, conseqüentemente, melhor compreendidos devido não só a maior facilidade na realização de medidas como também por sua ação destrutiva na superfície terrestre. Por outro lado, os relâmpagos no céu são bem menos conhecidos, devido a grande dificuldade em obter-se informações detalhadas de seus mecanismos físicos. Entretanto, medidas da radiação EM oriundas desses tipos de relâmpagos possibilitaram a identificação de suas principais características, com destaque para os IN em função de seus elevados índices de ocorrência. Registros de campo elétrico mostram uma grande similaridade entre os três tipos de relâmpagos no céu mas muitas poucas informações sobre os relâmpagos EN e AR estão disponíveis devido a sua baixa freqüência (Pinto Jr. e Pinto. 2000).

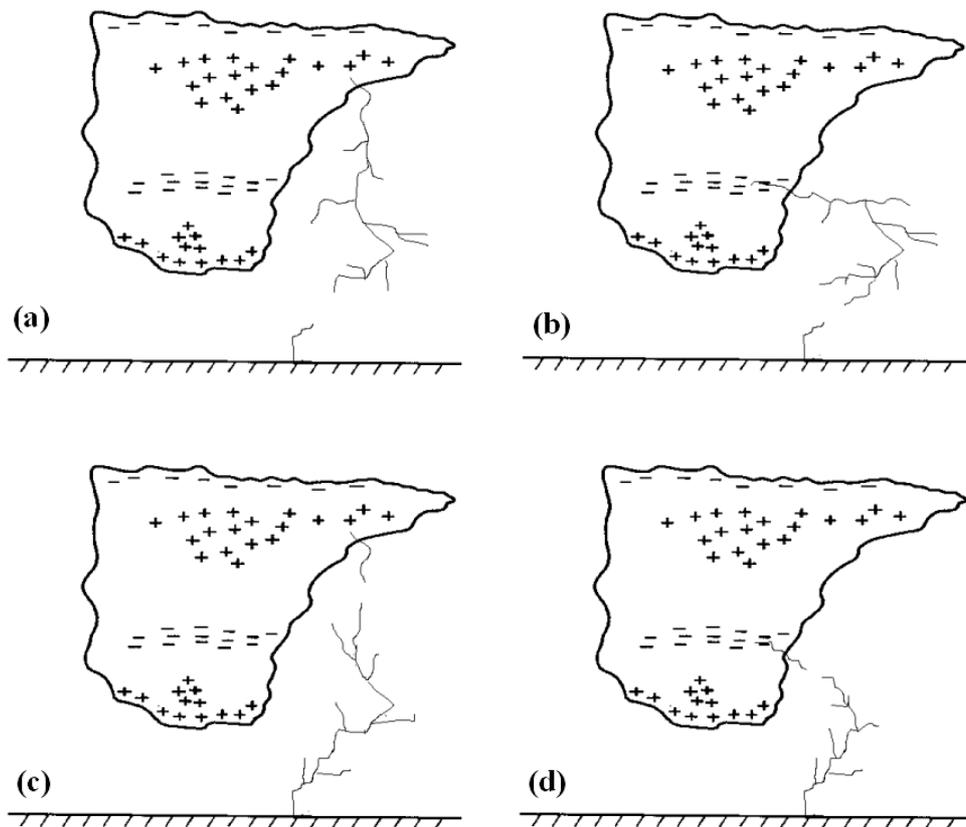


Fig. 2.3 - Tipos de relâmpagos que envolvem o solo: (a) NS positivo; (b) NS negativo; (c) SN positivo; (d) SN negativo.

Nas próximas seções, serão discutidas as etapas e os principais aspectos da radiação EM dos relâmpagos que envolvem o solo, com ênfase aos relâmpagos NS por serem mais freqüentes que os SN (Uman. 1987; Pinto Jr. e Pinto. 2000) e aos relâmpagos IN, cuja radiação pode alcançar a superfície com intensidade suficiente para interferir em instrumentos eletrônicos, particularmente, nos sensores utilizados pelos sistemas de localização de tempestades, levando à contaminação dos dados de relâmpagos NS.

2.2. RELÂMPAGOS QUE ENVOLVEM O SOLO

2.2.1. Nuvem-Solo

Os relâmpagos NS são em sua maioria negativos, representando em média 90% do total (Uman, 1987). A frequência dos relâmpagos positivos, entretanto, parece ser bastante variável, sendo em alguns casos até superior à dos negativos. Três fatores básicos parecem influir sobre o percentual de relâmpagos positivos:

- 1) A altitude das cargas positivas próximas ao topo da nuvem, que está relacionada com a latitude geográfica e com as estações do ano. Quanto menor a latitude, maior a altura do centro positivo, dificultando a ocorrência de relâmpagos positivos. O mesmo acontece no verão, quando as nuvens normalmente são mais altas;
- 2) A variação da velocidade horizontal dos ventos com a altura, associada diretamente às condições meteorológicas. Quanto maior for o gradiente dos ventos com a altura, maior será o deslocamento das cargas positivas em relação às negativas (cisalhamento da nuvem), facilitando assim aos relâmpagos positivos alcançarem o solo;
- 3) Dissipação da nuvem de tempestade. À medida que a chuva elimina os centros de carga negativa na base da nuvem, restam apenas os centros positivos nas partes mais altas. Sem a blindagem dos centros de carga negativa, aumenta a possibilidade de ocorrerem relâmpagos positivos para o solo.

Um relâmpago NS negativo inicia-se na nuvem e, eventualmente, transporta para a Terra dezenas de coulombs de cargas negativas. Possui um tempo de duração médio entre 1/3 e meio segundo, sendo constituído por vários pulsos de alta corrente denominados *strokes* ou descargas individuais. O número de *strokes* que compõe um relâmpago é definido como sua multiplicidade, cujo valor típico varia entre três e quatro (Uman. 1987). Além disso, cada descarga individual dura cerca de centenas de μ s e o tempo típico de separação entre elas é da ordem de dezenas de milissegundos. Visualmente, um relâmpago frequentemente parece “pisar” porque o olho humano tem capacidade de perceber o pulso de luz individual

associado a cada *stroke*. As etapas que compõem um relâmpago NS negativo típico são descritas a seguir.

O líder escalonado (*stepped leader*), que precede a primeira descarga de retorno (*return stroke*) em um relâmpago, inicia-se com uma ruptura preliminar (*preliminary breakdown*) da rigidez dielétrica do ar na parte inferior da nuvem, entre o centro principal de cargas negativas e o pequeno centro de cargas positivas (Figura 2.4) e propaga-se da nuvem para o solo em uma série de passos discretos. Análises fotográficas revelam que os passos do líder apresentam uma duração típica de $1\mu\text{s}$ e estendem-se por algumas dezenas de metros, com uma pausa aproximada de $50\mu\text{s}$ entre os passos. O líder escalonado, durante sua trajetória para o solo, ramifica-se na direção descendente durante sua busca por regiões com melhor condutividade elétrica na atmosfera, produzindo assim uma estrutura geométrica característica.

O potencial elétrico em relação ao solo da base do canal do líder carregado negativamente apresenta uma magnitude da ordem de 10^7V . Desta forma, a medida que a extremidade do líder aproxima-se do solo, o campo elétrico em torno de objetos pontiagudos no chão ou sobre irregularidades da superfície (edificações, torres, montanhas, antenas, pára-raios, etc.) intensifica-se a ponto de romper a rigidez dielétrica do ar, fazendo com que uma ou mais descargas ascendentes surjam a partir desses pontos, dando origem ao processo de conexão (*attachment process*). Quando uma das descargas ascendentes encontra o líder escalonado descendente a algumas dezenas de metros acima do solo, a extremidade do líder conecta-se com o potencial da Terra. Neste instante, uma frente de onda representando o potencial da Terra propaga-se continuamente para cima através do canal, previamente ionizado e carregado eletricamente, descarregando-o. Tem-se então a primeira descarga de retorno, cuja velocidade ascendente é tipicamente da ordem de um terço da velocidade da luz ou mais, diminuindo com a altura. O tempo de trânsito total desde o solo até o topo do canal é cerca de $100\mu\text{s}$. A primeira descarga de retorno tipicamente produz um pico de corrente próximo ao solo da ordem de 30kA , com um tempo de subida em geral de 2 a $10\mu\text{s}$. A descarga de retorno efetivamente transporta para o solo a carga depositada no canal e em suas ramificações, bem como cargas que possam estar disponíveis no topo do canal

naquele instante, gerando um pico de corrente. Além disso, cargas das regiões vizinhas ao canal (resultantes da ionização da atmosfera) podem também ser coletadas durante a descarga, dando origem a um segundo pico de corrente de menor intensidade alguns microssegundos depois. Este padrão de corrente elétrica produz variações do campo elétrico na faixa de alguns nanossegundos a vários milissegundos.

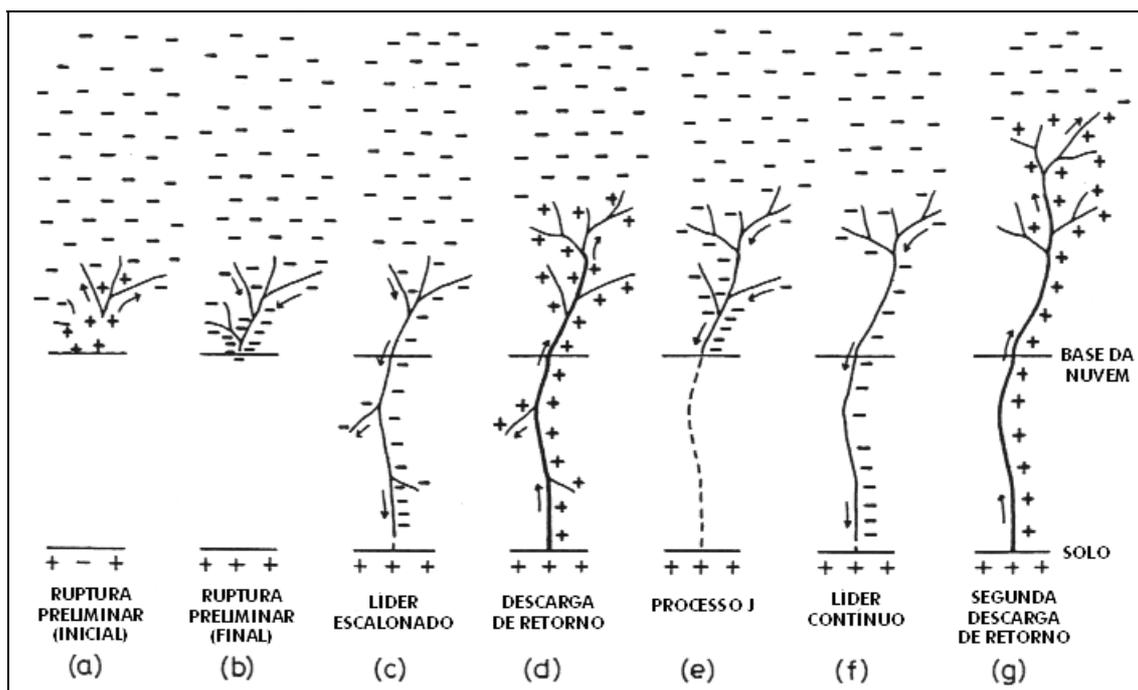


Fig. 2.4 - Processos de uma descarga de retorno desde a ruptura preliminar (a) e (b) até a segunda descarga de retorno (g). O canal no interior da nuvem, a partir de (c), pode ser tanto horizontal quanto vertical. A figura encontra-se fora de escala.
 FONTE: Adaptada de Ogawa (1995, p. 110).

Após a extinção da corrente da descarga de retorno, o relâmpago pode encerrar-se. Tem-se então um relâmpago simples, composto apenas por uma única descarga de retorno. Por outro lado, se cargas adicionais forem depositadas no topo do canal por intermédio de fracas descargas, denominadas processos J e K (que ocorrem entre centros de carga na nuvem), um líder contínuo ou “líder dardo” (*dart leader*) poderá propagar-se em direção ao solo através do canal residual. Não existe ainda um consenso se estes processos estariam necessariamente relacionados com o início do líder contínuo (Uman, 1987). De qualquer forma, esse líder, com correntes da ordem de 1kA, ao atingir o solo, dá origem a uma

segunda descarga de retorno. E tantas outras descargas subseqüentes ocorrerão enquanto houver condições para a formação de novos líderes contínuos, caracterizando assim um relâmpago múltiplo. Os líderes contínuos e as descargas de retorno subseqüentes, geralmente, não são ramificadas. Entretanto, em cerca de 30% dos casos, o líder contínuo pode desviar-se de seu trajeto original em direção ao solo, devido ao decaimento do canal inicial, seguindo um novo caminho na atmosfera (Pinto Jr. e Pinto, 2000). Neste caso, a nova descarga de retorno irá ocorrer a partir de um ponto diferente do solo, dando origem aos chamados relâmpagos bifurcados, os quais apresentam mais de um ponto de impacto na superfície. As variações totais de campo elétrico devidas às descargas de retorno subseqüentes são similares às variações provocadas pela primeira descarga, porém com intensidade duas ou mais vezes menor. Suas correntes apresentam taxas de variação máximas similares, mas com tempos de subida menores em comparação à primeira descarga. A Figura 2.5 ilustra a radiação EM gerada por um típico relâmpago NS.

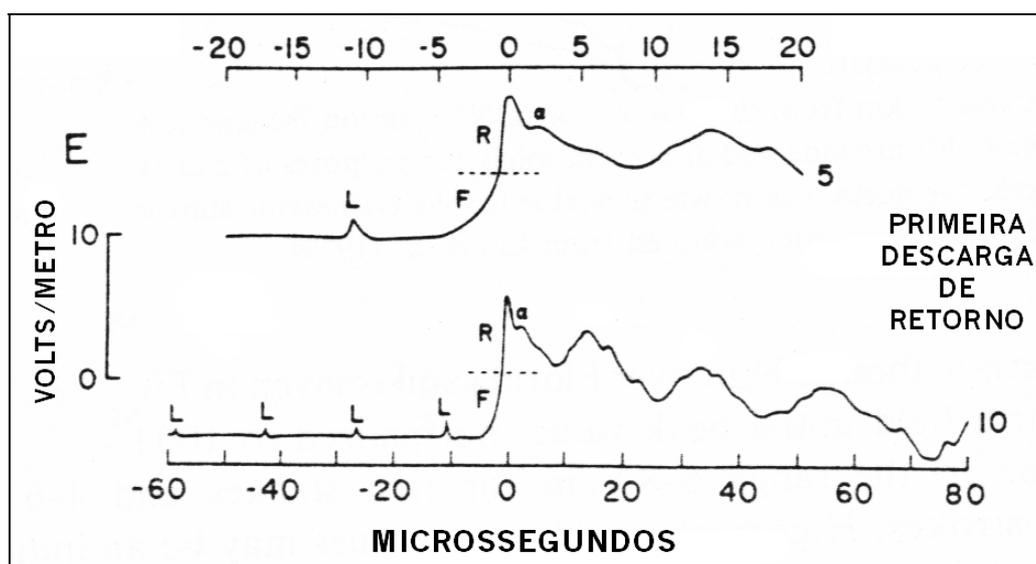


Fig. 2.5 - Assinatura da radiação EM de um típico relâmpago NS. A amplitude do campo elétrico está normalizada para a distância de 100km. Os pulsos característicos do líder escalonado (L) são acompanhados por uma frente de onda lenta (F) seguida por uma transição abrupta e rápida (R) correspondente à descarga de retorno. Após a transição rápida, surge um pico secundário (a) referente à corrente corona. As curvas superior e inferior estão representadas nas escalas de $5\mu\text{s}/\text{div}$ e $10\mu\text{s}/\text{div}$, respectivamente. A origem do eixo do tempo foi escolhida sobre o valor de pico do campo.

FONTE: Adaptada de Uman (1987, p. 117).

Os relâmpagos NS positivos seguem em geral as mesmas etapas descritas acima, originando-se a partir de um líder escalonado que se inicia em uma região de cargas positivas dentro da nuvem mas que não apresenta os mesmos passos distintos registrados nos líderes dos relâmpagos negativos. Em muitos casos, o relâmpago positivo pode iniciar-se a partir de um líder contínuo, não apresentando portanto um líder escalonado. Normalmente, os relâmpagos positivos são simples e sua única descarga de retorno transfere ao solo uma quantidade de carga maior quando comparado a um relâmpago negativo. Desta forma, a intensidade da corrente dos relâmpagos positivos costuma ser maior que a corrente dos negativos, ultrapassando 200kA em 5% dos casos, contra apenas 0,1% dos casos de relâmpagos negativos (Pinto Jr. e Pinto, 1996).

Como discutido anteriormente, um relâmpago pode ser considerado um agente radiante de larga faixa espectral. Em geral, os relâmpagos nuvem-solo apresentam uma intensa componente de baixa frequência, uma vez que as descargas de retorno possuem valores de pico na faixa de frequência entre 3–30kHz (Krider. 1996). A amplitude das diferentes frequências varia em função das etapas do relâmpago dependendo, portanto, dos processos físicos em andamento num dado instante. De maneira geral, acima de 10kHz, a amplitude da frequência (em termos da análise espectral) decresce linearmente quando analisada em um gráfico log-log da amplitude *versus* a frequência normalizado para uma dada distância (por exemplo, 10km) e uma dada largura de banda (por exemplo, 1kHz). Esse comportamento parece ser verdadeiro até, pelo menos, 10MHz. Antigamente, as medidas de alta frequência raramente eram efetuadas próximas aos relâmpagos, provocando uma distorção dos dados para frequências acima de 1MHz, cujas amplitudes sofrem atenuações muito maiores com a distância que as baixas frequências (Cooray. 1987, 2000).

2.2.2. Solo-Nuvem

Em geral, os relâmpagos SN iniciam-se a partir de um líder escalonado positivo que se move para cima, dando origem a várias ramificações. Em muitos casos, esta fase é seguida por seqüências de líderes contínuos e descargas de retorno negativas (que transferem cargas negativas para o solo) muito similares aos líderes contínuos e descargas de retorno subsequentes de relâmpagos NS negativos. Entretanto, na maioria das vezes, não há

ocorrência de descarga de retorno e sim apenas a passagem de uma corrente contínua, cujas principais características são baixa intensidade (poucas centenas de ampères) e longa duração (dezenas a centenas de milissegundos), quando comparadas às outras etapas do relâmpago (Pinto Jr. e Pinto. 2000).

2.3. RELÂMPAGOS NO CÉU

Mais da metade de todas as descargas atmosféricas acontecem no interior das nuvens: os relâmpagos IN, os quais apresentam uma duração total de cerca de meio segundo, valor muito próximo da duração dos relâmpagos envolvendo o solo (Uman. 1987). Os relâmpagos IN iniciam-se a partir de um líder contínuo que se propaga no interior da nuvem, de uma região de cargas negativas para uma de cargas positivas. Ele é seguido, em geral, por cinco ou seis descargas de alguns milhares de ampères, com duração de aproximadamente $10\mu\text{s}$ cada, denominadas descargas K, que ocorrem quando o líder encontra pequenas regiões de carga em seu trajeto. Tais descargas estão associadas aos campos elétricos chamados variações K. Relâmpagos deste tipo não apresentam descargas de retorno, sendo acompanhados por emissões de radiação centradas em 100kHz, bem acima dos 10kHz registrados para os relâmpagos nuvem-solo. Este aspecto deve-se basicamente à diferença da geometria dos canais nos dois casos. A Figura 2.6 ilustra assinaturas da radiação EM de típicos relâmpagos IN. Os relâmpagos EN e AR são pouco conhecidos mas, acredita-se que suas características sejam similares aos relâmpagos IN (Pinto Jr. e Pinto, 2000).

Através da análise comparativa entre as assinaturas das radiações EM emitidas por um relâmpago é possível classificá-lo como um relâmpago NS ou um relâmpago IN. Isto pode ser feito comparando-se diretamente parâmetros básicos que definem a forma de onda da radiação como, por exemplo, a largura do pulso e o tempo de subida, que são os parâmetros mais freqüentemente usados. Atualmente, somente a largura de pulso tem sido usada pelos sistemas de localização de tempestades para discriminar os relâmpagos IN dos NS, registrando apenas aqueles cuja largura de pulso for superior a um valor padrão configurável (GAI. 1994). Uma outra informação obtida a partir da forma de onda da radiação corresponde à polaridade e a intensidade da corrente de pico do relâmpago. Os

valores de pico da corrente (e sua polaridade) podem ser estimados a partir dos campos elétricos irradiados através de modelos matemáticos. Mais detalhes sobre os parâmetros da forma de onda da radiação e os algoritmos utilizados pelos sistemas de localização de tempestades serão discutidos no Capítulo seguinte.

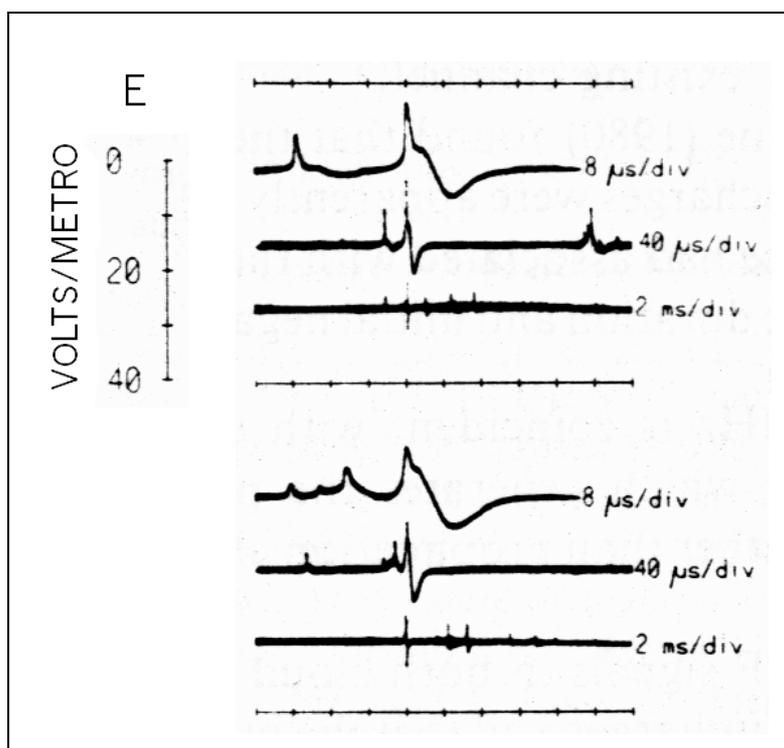


Fig. 2.6 - Assinaturas da radiação EM devida a relâmpagos IN típicos a distâncias entre 15 e 30km. Cada evento é mostrado nas escalas de 2ms/div, 40μs/div e 8μs/div.
FONTE: Adaptada de Uman (1987, p. 247).

CAPÍTULO 3

DESCRIÇÃO DE UM SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO DE TEMPESTADES (SLT)

3.1. BREVE HISTÓRICO

Na década de 20, Watson e Herd (1926) desenvolveram um dispositivo de raios catódicos para localizar a direção de uma fonte de radiação (*cathode-ray direction finder*, CRDF) o qual utilizava um par de antenas fechadas (*loop antennas*) e ortogonais entre si, sintonizadas a uma frequência em torno de 10kHz (faixa onde a propagação na cavidade Terra-Ionosfera é relativamente eficiente), para detectar o campo magnético horizontal produzido por relâmpagos. O ângulo de azimute da descarga era obtido exibindo-se simultaneamente os sinais das antenas norte-sul e leste-oeste em um osciloscópio no modo x-y, obtendo-se assim um vetor resultante apontando na direção da descarga. Dois ou mais CRDF situados em posições conhecidas eram suficientes para determinar a localização da descarga através da intersecção entre os vetores direção. Sistemas de localização similares, denominados sistemas magnéticos de localização de direção (*magnetic direction finder*, MDF), foram usados até a Segunda Guerra Mundial em várias regiões do globo (Krider. 1996).

Em 1976, uma versão aprimorada do sistema MDF foi desenvolvido para localizar relâmpagos nuvem-solo em um raio de, aproximadamente, 500km (Krider et al. 1976, 1980). Esse sistema operava no domínio do tempo (correspondente a faixa de 1 a 500kHz) e foi projetado para responder apenas às formas de onda de radiação EM que caracterizam descargas de retorno (Figura 2.5). Quando um campo EM neste padrão era detectado, a direção magnética era registrada no exato instante do pico inicial do campo de tal forma que o vetor resultante apontasse o mais próximo possível do ponto de impacto. Isso porque, a direção magnética corresponde, efetivamente, ao ponto de contato entre a descarga conectante e o líder escalonado, localizado entre 20-200m acima do solo e que pode estar deslocado horizontalmente em relação ao ponto de impacto real no solo. O campo elétrico também era amostrado neste mesmo instante de tempo para determinar a polaridade da descarga e estimar seu pico de corrente. Redes compostas de dispositivos

MDF seletivos e de banda larga como estes são usados até hoje em muitas regiões do planeta para a localização de relâmpagos.

Paralelamente, Lewis et al. (1960) descreveu um método para localização de relâmpagos utilizando as diferenças entre os tempos de chegada de um pulso de rádio em várias estações de medida. Como sinais de rádio propagam-se à velocidade da luz, a diferença constante no tempo de chegada entre duas estações define uma hipérbole. Com isso, várias estações dão origem a múltiplas hipérbolas cujas interseções definem a localização da fonte de radiação (Bent e Lyons. 1984). Métodos de localização por tempo de chegada (*time-of-arrival*, TOA) podem fornecer localizações mais precisas a longas distâncias que a técnica MDF (Lee. 1989) e, se as antenas detectoras estiverem posicionadas corretamente, os erros sistemáticos são mínimos. No final da década de 80, Casper e Bent (1992) desenvolveram um receptor TOA de banda larga apropriado para localizar fontes EM de relâmpagos a média e longa distâncias utilizando o método hiperbólico.

Nos Estados Unidos, os dois tipos de dispositivos de detecção, MDF e TOA, foram integrados em uma grande rede cobrindo todo o território americano, denominada Rede Nacional de Detecção de Relâmpagos (*National Lightning Detection Network*, NLDN), com o objetivo de fornecer dados de relâmpagos em tempo real para agências florestais e empresas de energia elétrica (Cummins et al. 1992, 1995). A NLDN teve início em 1987, com a união dos dados provenientes de várias redes regionais que cobriam o oeste e centro-oeste dos Estados Unidos, para fornecer informações de relâmpagos em escala nacional. Os sensores que a compunham utilizavam a tecnologia MDF e eram fabricados pela *Lightning Location and Protection Inc* (LLP). Em 1989, esta rede passou a operar em tempo real. Quase simultaneamente, uma rede de sensores TOA, fabricados pela *Atmospheric Research Systems Inc* (ARSI) e denominados *Lightning Positioning and Tracking System* (LPATS), era instalada em escala nacional (Casper e Bent, 1992). Em 1991, o reconhecimento pela indústria de energia elétrica dos benefícios gerados pela localização de relâmpagos nuvem-solo e o crescimento do interesse comercial por esta informação em âmbito nacional justificaram a criação de uma companhia especializada para o fornecimento dos dados comercialmente: da fusão entre LLP, ARSI e *Electric Power Research Institute* (EPRI), surgia a *Global Atmospherics Inc* (GAI). Até então, a maior parte dos

métodos utilizados na localização de relâmpagos eram baseados nas tecnologias MDF e TOA. Em 1992, a LLP (agora uma divisão da GAI) desenvolveu um método que, combinando as informações provenientes de ambas as técnicas, prometia melhorar significativamente a precisão da localização dos relâmpagos, dando origem à chamada tecnologia *Improved Accuracy from Combined Technology* (IMPACT) e a sistemas de detecção capazes de processar tanto informações provenientes de sensores LPATS (TOA) e MDF como de sensores IMPACT, os quais podem medir tanto o tempo de chegada quanto a direção magnética das descargas (Cummins et al. 1998a).

A maioria dos estudos sobre sistemas de localização de tempestades concentram-se nos Estados Unidos devido à existência da NLDN, a maior rede de detecção do planeta. Por esse motivo, ao longo deste trabalho, todas as considerações que dizem respeito a padrões de configuração e princípios de funcionamento dos diversos componentes de uma rede de detecção (funcionamento e configuração de sensores, técnicas de detecção, algoritmos e modelos matemáticos utilizados no cálculo das localizações) referem-se à rede norte-americana, salvo menção contrária.

Na próxima seção, serão detalhados, de acordo com Cummins et al. (1993) e GAI (1999), os três principais métodos empregados nos atuais sistemas de localização de tempestades: MDF, TOA e IMPACT. Na seção 3.3, serão discutidas as diversas características de um SLT bem como as informações por ele geradas e na seção 3.4, são apresentados os principais elementos constituintes de um sistema de localização de tempestades.

3.2. TÉCNICAS DE DETECÇÃO

3.2.1. Método Magnético de Localização de Direção (MDF)

Os sistemas de detecção MDF empregam dois ou mais sensores capazes de medir a direção de uma descarga, representada pelo azimute (ângulo em relação ao norte verdadeiro), o qual é determinado tipicamente pelo uso de duas antenas magnéticas ortogonais na forma de *loop*. Quando três ou mais sensores detectam uma descarga, pode ser empregado um procedimento de otimização que minimiza os erros no cálculo dos ângulos, denominado

triangulação. Esse procedimento está ilustrado na Figura 3.1, mostrando a região formada pela intersecção de três direções medidas pelos sensores e a localização ótima obtida após a triangulação. Os três pontos (L_{12} , L_{13} e L_{23}) mostram as possíveis localizações que seriam calculadas caso apenas dois sensores informassem a ocorrência da descarga.

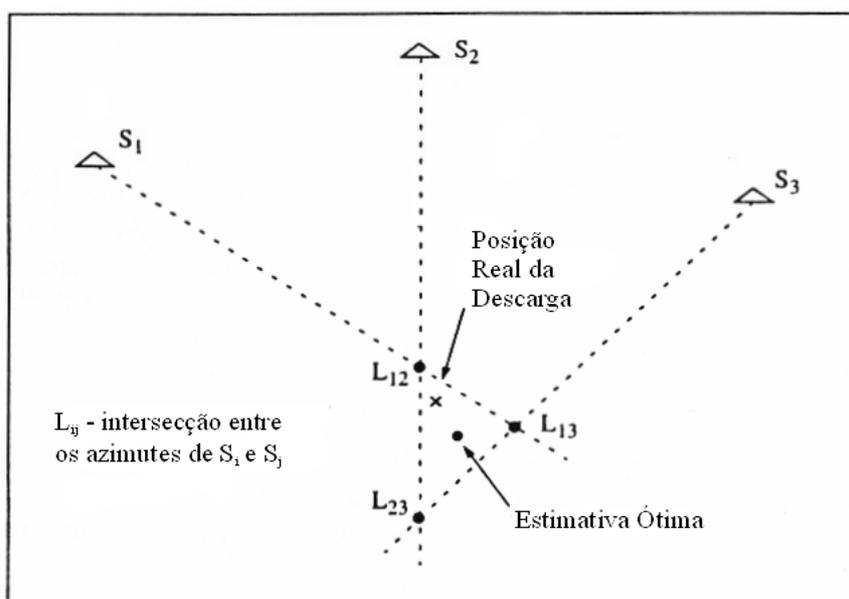


Fig. 3.1 – Algoritmo da LLP de localização ótima usado no método MDF.
 FONTE: Adaptada de GAI (1999, p. B-3).

Existem certas situações onde a geometria relativa entre os sensores e a descarga não produz bons resultados. Mais especificamente, caso uma descarga ocorra justamente na reta que liga dois sensores, sendo detectada apenas por esses dois sensores, então erros na medida do azimute podem levar a erros significativos de localização. Em algumas circunstâncias, é possível até que nem se obtenha uma solução válida (não há intersecção). Devido a esse problema, na prática, as redes de detecção MDF possuem, pelo menos, três sensores.

3.2.2. Método do Tempo de Chegada (TOA)

Os sistemas de detecção TOA empregam três ou mais sensores os quais registram o horário de chegada da radiação EM gerada por uma descarga. Na realidade, o sistema de

detecção calcula a diferença temporal relativa entre os horários de chegada registrados pelos vários sensores. Com esse método, cada par de sensores define uma curva hiperbólica que descreve o conjunto de possíveis localizações (lugar geométrico dos pontos) que satisfaz aquela diferença temporal medida. Dadas duas destas curvas, definidas por três ou quatro sensores, é possível determinar uma localização a partir do ponto de interseção entre elas, conforme mostra a Figura 3.2a. Este método é comumente denominado método de localização por interseções hiperbólicas. Sob certas condições geométricas, as curvas definidas por apenas três sensores participantes poderão resultar em dois pontos de intersecção, levando assim a uma localização ambígua (Figura 3.2b). Esse problema pode ser evitado se pelo menos quatro sensores detectarem a descarga.

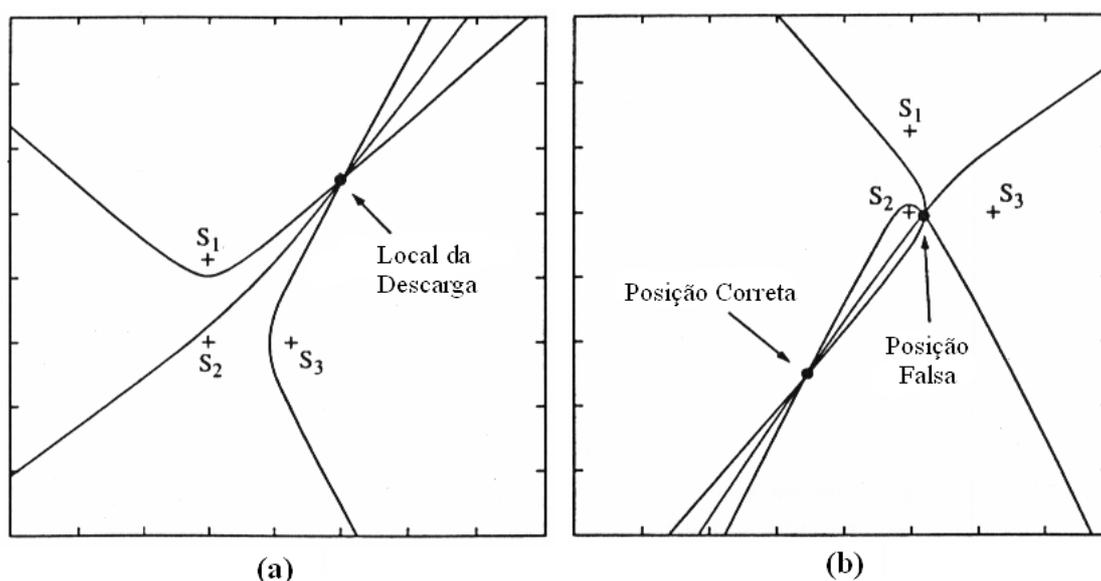


Fig. 3.2 – (a) Método de interseção hiperbólica para sistemas de localização utilizando três sensores. (b) Exemplo de localização ambígua resultante da interseção hiperbólica a partir de três sensores.
 FONTE: Adaptada de GAI (1999, p. B-4).

Uma abordagem alternativa para localização de relâmpagos utilizando o método de tempo de chegada consiste em medir o horário absoluto de chegada da radiação EM em cada sensor e implementar um método para estimar tanto a localização quanto o horário de ocorrência da descarga. Nesta situação, cada sensor fornece uma informação que pode ser interpretada como sua distância efetiva do ponto de impacto da descarga, definindo assim

um lugar geométrico circular com as possíveis posições em torno de cada sensor. O raio de cada círculo é baseado na diferença entre o horário estimado da descarga e o horário medido no instante da chegada da radiação ao local do sensor, conforme ilustrado na Figura 3.3. A localização é determinada então selecionando-se a posição e o horário correspondentes ao ponto de interseção de todos os círculos. Este algoritmo costuma ser denominado método de localização por interseções circulares objetivando diferenciá-lo do método das interseções hiperbólicas descrito anteriormente.

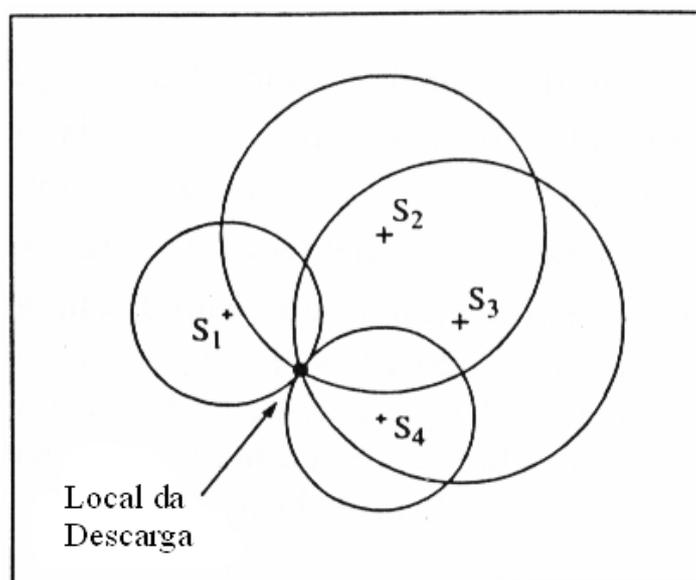


Fig. 3.3 – Método de interseção circular utilizando quatro sensores.
FONTE: Adaptada de GAI (1999, p. B-5).

Em termos comparativos, utilizando-se três sensores, ambos os métodos apresentam a mesma precisão de localização. Quando mais de três sensores informam a ocorrência de uma descarga, o método das interseções circulares pode produzir uma solução otimizada, empregando-se um algoritmo iterativo semelhante ao discutido na Seção 3.2.1. Além disso, o método das interseções circulares pode ser facilmente generalizado para incluir medidas de ângulo de azimute, conforme será visto a seguir.

3.2.3. Método IMPACT (Melhoria da Precisão através da Tecnologia Combinada)

Na década de 90, a LLP desenvolveu um outro método de localização de relâmpagos denominado IMPACT, o qual resulta da combinação dos métodos MDF e TOA. Nesta abordagem, o MDF fornece a informação do ângulo de azimute enquanto que o TOA absoluto fornece a informação da distância em relação ao sensor (raio do círculo). Esses dados são então empregados simultaneamente em uma generalização do método de interseções circulares para obter-se uma estimativa ótima da localização da descarga, utilizando-se assim todos os dados disponíveis. Essa abordagem não sofre com os problemas inerentes de cada método quando empregados separadamente (Cummins et al. 1993). Por exemplo, se uma descarga ocorrer entre dois sensores, ao longo de sua linha-base (segmento de reta que liga dois sensores quaisquer), ela será localizada com precisão através da interseção entre a linha definida pelo azimute e o círculos definidos pelas distâncias aos sensores, conforme mostra a Figura 3.4.

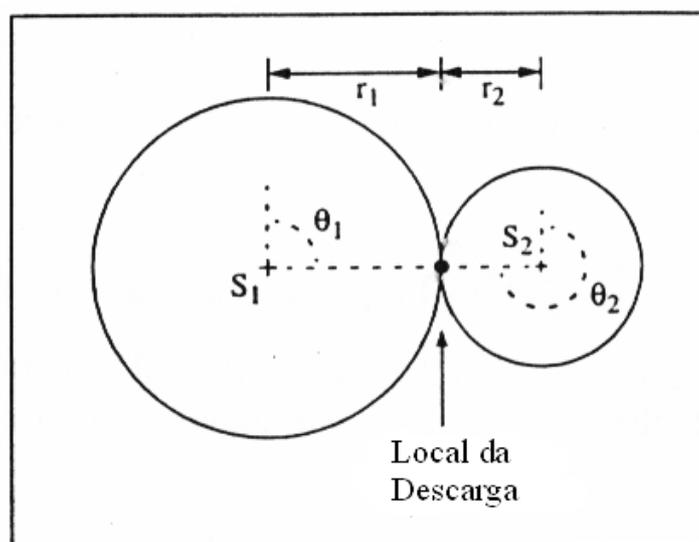


Fig. 3.4 – Método de localização IMPACT aplicado a uma descarga cujo ponto de impacto localiza-se sobre a linha-base de dois sensores.

FONTE: Adaptada de GAI (1999, p. B-5).

Nessa figura, a informação do azimute para o sensor S_1 corresponde ao ângulo θ_1 e o valor da distância (baseada no horário de chegada absoluto) é representada por um círculo de

raio r_1 . É importante notar que, nesse exemplo, existem quatro parâmetros efetivamente medidos, dois ângulos e dois tempos de chegada, os quais produzem três parâmetros estimados: latitude, longitude e o horário da descarga. Assim, o método IMPACT possui informação redundante a qual permite uma estimativa otimizada da localização mesmo em uma condição de detecção mínima, isto é, quando uma descarga é registrada por apenas dois sensores. Avaliações recentes desse método revelaram que o desempenho da combinação dos métodos MDF e TOA supera o desempenho de cada método isoladamente, tanto na precisão de localização quanto na probabilidade de detecção, minimizando assim a probabilidade de obter-se uma localização completamente errada (Cummins et al. 1993).

3.3. CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

3.3.1. Desempenho

Existem uma série de fatores que afetam o desempenho de um sistema de localização de relâmpagos entre eles, a precisão e a consistência dos dados de localização bem como a eficiência de detecção. Com o objetivo de quantificar essas medidas de desempenho, a GAI utiliza modelos matemáticos para calcular a precisão de localização e a eficiência de detecção com base nos tipos dos sensores e nas soluções calculadas pelo sistema. Cummins et al. (1992, 1995) descreveu esses modelos e as respectivas considerações para sua utilização. Um resumo sobre esse assunto também pode ser encontrado no apêndice de Cummins et al. (1998a). A seguir, será feita uma breve descrição dos conceitos envolvidos na determinação do desempenho de um sistema de localização.

3.3.1.1. Precisão da Localização

A maneira mais adequada de se representar a precisão de localização de um sistema é descrevê-la em termos de uma região predefinida que inclua possíveis soluções (região de segurança) dada uma probabilidade específica (ou nível de segurança) de que elas existam naquela região. O trabalho matemático envolvido no cálculo das regiões de segurança para sistemas de localização é tratado com detalhes em Stansfield (1947), o qual apresentou um

importante resultado: quando os erros de localização obedecem a uma distribuição gaussiana, essas regiões de segurança tornam-se elípticas. Com isso, para todas as localizações de descargas calculadas pelo sistema de detecção, pode-se determinar uma elipse de segurança, a qual circunscreve uma região, centrada na posição calculada, na qual existe 50% de probabilidade de que a descarga tenha ocorrido em seu interior. A elipse de segurança pode ser descrita em termos de seu semi-eixo maior, sua excentricidade (razão entre o semi-eixo maior e o semi-eixo menor) e o ângulo de orientação do semi-eixo maior (em graus, relativo ao norte). Exemplos de elipses de segurança são ilustrados na Figuras 3.5 e 3.6, juntamente com os parâmetros que as descrevem. Se uma descarga for detectada por apenas dois sensores MDF situados a uma grande distância de seu ponto de impacto (Figura 3.5), a elipse possuirá grande excentricidade. Entretanto, se a descarga for detectada por vários sensores, cujos ângulos de azimute apresentem uma geometria mais favorável, a elipse tenderá a ser menor e mais circular (Figura 3.6). Com isso conclui-se que a distribuição espacial dos sensores apresenta um papel fundamental na precisão de localização de um sistema de detecção.

A elipse de segurança pode ser calculada para outras probabilidades diferentes de 50%, bastando para isso alterar-se apropriadamente a escala dos semi-eixos maior e menor. O comprimento de cada eixo é proporcional ao valor do desvio padrão normalizado σ (sigma) correspondente à probabilidade desejada (Cummins et al. 1995). A Tabela 3.1 mostra vários valores de σ diferentes e suas respectivas probabilidades. Por exemplo, dividindo-se o comprimento de cada eixo de uma elipse de segurança de 50% de probabilidade por 1,177 e, em seguida, multiplicando-os por 3,030 obtém-se uma elipse de 99% de probabilidade (GAI, 1999).

TABELA 3.1 – A RELAÇÃO ENTRE σ E A PROBABILIDADE

σ	Probabilidade
1,000	39,3%
1,177	50,0%
2,000	86,5%
2,450	95,0%
3,030	99,0%

FONTE: GAI (1999, p. B-8)

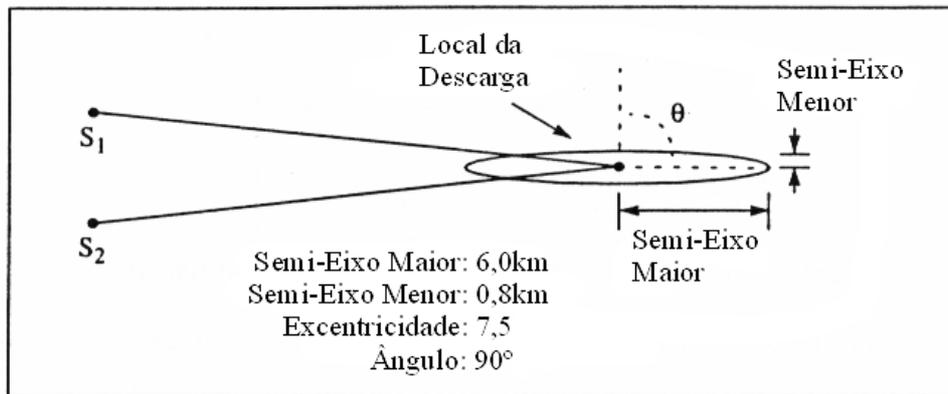


Fig. 3.5 – Elipse de segurança obtida para uma geometria desfavorável entre os sensores.
FONTE: Adaptada de GAI (1999, p. B-7)

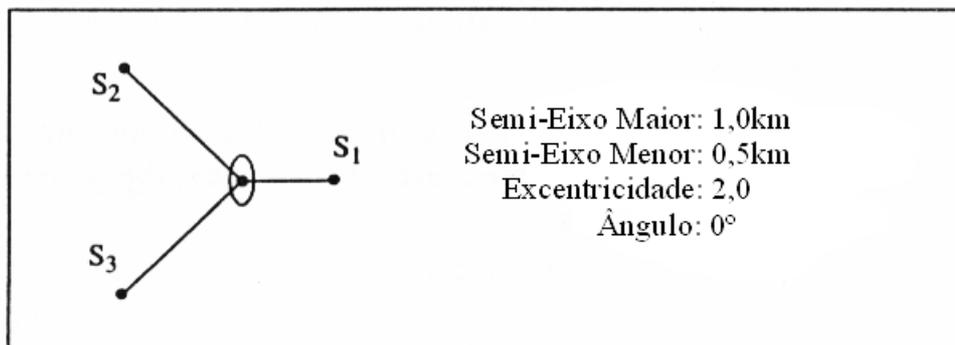


Fig. 3.6 – Elipse de segurança obtida para uma geometria favorável entre os sensores.
FONTE: Adaptada de GAI (1999, p. B-7)

O valor de σ para qualquer probabilidade p desejada pode ser calculada através da seguinte expressão (GAI, 1999):

$$\sigma = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-p)^2}\right)} \quad (3.1)$$

3.3.1.2. Eficiência de Detecção

A precisão dos dados de localização define a precisão com que as descargas são informadas pelo sistema. Entretanto, nem todas as descargas são detectadas e informadas. Aquelas que

apresentarem formas de onda incoerentes ou intensidade de sinal abaixo do limiar dos sensores, não serão informadas pelas antenas detectoras. Por outro lado, a localização de determinadas descargas não poderão ser calculadas pelo sistema caso os respectivos dados informados pelos sensores não puderem ser correlacionados ou produzam soluções erradas. Assim, a habilidade de um sistema de localização em detectar e informar as soluções das descargas (determinar suas localizações) é denominada eficiência de detecção da rede, a qual é calculada como uma percentagem da quantidade real de descargas detectadas pela rede.

A eficiência de detecção da rede como um todo é determinada por vários fatores, entre eles a eficiência de detecção individual dos sensores, o número médio de sensores que contribuem para as soluções, a distribuição geográfica dos sensores (relacionada com a geometria da rede) e a distribuição dos picos de corrente (relacionada com as condições geográficas e meteorológicas locais), a qual apresenta uma significativa influência. Estatisticamente, descargas com correntes de pico de 25kA são detectadas por seis a oito sensores em média e descargas de 5kA são normalmente detectadas por dois a quatro sensores. Tipicamente, 20 sensores ou mais detectam descargas com mais de 100 kA. (Cummins et al. 1998a).

3.3.1.3. Consistência dos Dados

As informações provenientes dos sensores são utilizadas para se calcular a localização da descarga segundo o método dos mínimos quadrados, descrito por Hiscox et al. (1984). Em sua forma original, o processo de otimização minimiza uma função erro que representa a soma dos quadrados dos desvios angulares. O desvio angular constitui a diferença entre o ângulo medido diretamente pelo sensor e o ângulo da localização ótima calculada pelo sistema para o mesmo sensor. Essa função erro, quando normalizada pelo erro angular esperado e pelo número de graus de liberdade, é denominada chi-quadrado (χ^2) normalizado (Cummins et al. 1998a) e, na prática, representa uma medida do grau de concordância das medidas feitas pelos sensores em comparação com a localização calculada pelo sistema, sendo dada pela expressão (GAI, 1999):

$$\chi^2 = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{(m_j - m_j^*)^2}{e_j^2}}{x} \quad (3.2)$$

onde n = número total de medidas (sensores); m_j = valor do ângulo medido pelo j -ésimo sensor; m_j^* = valor do ângulo da localização ótima calculada pelo sistema para o j -ésimo sensor; e_j = erro angular teórico para o j -ésimo sensor (determinado com base no desvio padrão esperado); x = número de graus de liberdade, que corresponde à diferença entre o número de medidas realizadas e o número de parâmetros estimados (veja Seção 3.2.3).

A generalização do algoritmo de otimização definida pelo método IMPACT opera de uma forma bastante semelhante exceto pelo fato de que, além da localização da descarga, o horário no qual a descarga de retorno inicia-se (definido como o instante do pico de corrente, que corresponde ao pico da radiação) também é estimado. Com isso, adiciona-se mais um termo à função erro dada por (3.2), a qual contribui para precisar a informação temporal referente a cada sensor. Esta nova função erro é então dada pela expressão:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{(m_j - m_j^*)^2}{e_j^2} + \sum_{j=1}^n \frac{(t_j - t_j^*)^2}{\sigma_j^2}}{x} \quad (3.3)$$

onde n , m_j , m_j^* , e_j e x possuem o mesmo significado da expressão (3.2); t_j = valor do horário medido pelo j -ésimo sensor; t_j^* = valor do horário da localização calculada pelo sistema para o j -ésimo sensor; σ_j = erro temporal teórico para o j -ésimo sensor.

A precisão do horário estimado da descarga é determinada com base nos erros temporais dos sensores envolvidos na solução. A contribuição relativa dos erros angulares e temporais para o valor total do χ^2 é determinado levando-se em conta os erros de medida individuais, expressos como desvios padrão. Erros de medida podem ser usualmente mantidos abaixo de 1° no ângulo de azimute (erros angulares) e 1,5 μ s no horário da descarga (erros temporais) através da análise dos parâmetros de qualidade da rede.

“Bons” valores de χ^2 encontram-se na faixa de 0 a 3, enquanto que valores aceitáveis ficam entre 3 e 10. Valores maiores representam erros de localização não minimizados, ruídos não previstos ou má correlação no tempo. Localizações associadas a esses valores elevados devem ser consideradas “afastadas” da posição real, indicando a necessidade de correções locais na rede, como ajustes no ganho dos sensores e/ou em sua orientação em relação ao norte verdadeiro, alteração da geometria ou mesmo a inclusão de novos sensores.

3.3.1.4. Utilização de Medidas de Qualidade

Todos os aspectos de qualidade discutidos nas seções anteriores, podem ser usados para se entender melhor o conceito da precisão de localização das descargas. Primeiramente, é necessário verificar se que o valor do χ^2 está na faixa de valores aceitável (normalmente 10 ou menos). Se esse valor for maior que 10, então os parâmetros da elipse de segurança irão subestimar o erro real de localização não podendo, portanto, ser utilizados nas análises. Ao contrário, se o valor do χ^2 é aceitável (entre 0 e 10), então os parâmetros da elipse podem ser usados para avaliar a incerteza na localização da descarga. Por exemplo, durante a investigação de um incidente, onde há dúvidas se uma determinada descarga atingiu ou não um objeto específico, então a orientação e o formato da elipse podem ser usados para responder à questão, conforme ilustrado na Figura 3.7. A informação contida na elipse de segurança também pode ser usada quando a precisão local está sendo estudada para valores de χ^2 aceitáveis. Neste caso, apenas o semi-eixo maior é importante, pois constitui o parâmetro que reflete o pior caso de erro.

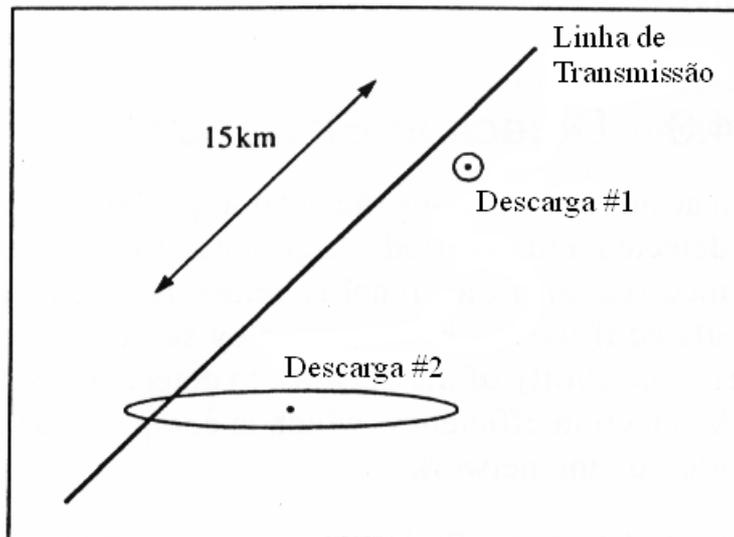


Fig. 3.7 – Uso da elipse de segurança na identificação da descarga mais provável (caso #2).
 FONTE: Adaptada de GAI (1999, p. B-10)

3.3.2. Principais Parâmetros Fornecidos

3.3.2.1. Corrente de Pico da Descarga

Diversos modelos têm sido desenvolvidos ao longo dos anos para representar os vários aspectos físicos e aplicações de engenharia relacionados com os relâmpagos. A maioria desses modelos procura descrever as formas de onda gerais dos campos elétrico e magnético produzidos por descargas de retorno a diferentes distâncias. O procedimento de uso dos modelos pode ser descrito de diversas maneiras. A mais importante delas consiste em, dado uma corrente de retorno em função do tempo como entrada, procura-se reproduzir a radiação EM gerada por essa corrente através de um modelo. Uma outra maneira não menos importante é modelar a propagação do pico de corrente pelo canal com base nas medidas dos campos elétrico e magnético remotos. Rakov e Uman (1998) escreveram uma revisão bastante completa sobre modelos de corrente de descargas de retorno, incluindo avaliações comparativas e possíveis aplicações.

Em particular, esta última abordagem relaciona-se mais diretamente com os sistemas de localização de tempestades. Isso porque, a estimativa da corrente de pico da descarga constitui um dos parâmetros fornecidos pelo sistema obtida a partir das medidas do valor

de pico da radiação EM (intensidade do sinal) gerada pela corrente fluindo no canal. Para obter-se uma relação entre o pico da radiação e o pico da corrente, assume-se que o simples modelo de linha de transmissão (*Transmission Line Model*, TLM), descrito em Uman et al. (1975), seja válido para o pico da radiação; fato confirmado por Le Vine e Willet (1992) e Thottappillil e Uman (1993). Entretanto, esta relação entre a radiação EM e a corrente de pico continua sendo estudada por vários pesquisadores, entre eles Orville (1991, 1999), Rakov et al. (1992), Idone et al. (1993).

Como primeiro passo para estimar-se o pico da corrente, deve-se levar em consideração os efeitos de propagação da radiação visando obter-se um valor de intensidade do sinal normalizado pela distância (*range normalized signal strength*, RNSS) para cada sensor participante da solução, de acordo com o seguinte modelo (Cummins et al. 1998a):

$$RNSS = C \cdot SS \cdot \left(\frac{r}{D}\right)^p e^{-\frac{r-D}{A}} \quad (3.4)$$

onde SS = intensidade do sinal da radiação medida pelo sensor, r = distância em km, D = distância de normalização a qual é definida como 100km, p = expoente de atenuação, A = escala de comprimento da atenuação da radiação e C = constante. O expoente de atenuação atualmente utilizado vale $p = 1,13$ e foi determinado empiricamente por Orville (1991) assumindo A infinito. O valor atualmente adotado para A é 10^5 km. Entretanto, muitos trabalhos estão sendo desenvolvidos com o objetivo de obter-se valores específicos dos dois parâmetros em função de determinadas regiões (Cummins et al. 1998a).

O segundo passo é calcular a média dos valores de RNSS para todos os sensores participantes em um raio de 625km (para evitar a inversão de polaridade devido à reflexão na ionosfera) e que tenham registrado valores válidos dos picos da radiação. O valor do RNSS resultante é então convertido na estimativa da corrente de pico. Esta conversão foi investigada por Orville (1991) e Idone et al. (1993) com base em dados provenientes de relâmpagos induzidos artificialmente. Inicialmente, a conversão utilizada pela GAI era feita através de uma regressão linear determinada por Idone et al. (1993):

$$I_{pk} = 5.2 + 0.148 \cdot RNSS \quad (3.5)$$

onde I_{pk} é dado em kA.. Entretanto, o fato de (3.5) não passar pela origem poderia ser um reflexo de que o sistema seria incapaz de detectar um grande número de descargas com correntes de pico abaixo de 5kA, fazendo com que a intersecção de (3.5) se desviasse da origem. Entretanto, Cummins et al. (1996) mostrou que a rede, após a reconfiguração dos sensores, era capaz de detectar sinais mais fracos, invalidando a expressão (3.5). Com isso, a regressão linear foi recalculada, forçando a intersecção com a origem, obtendo-se assim a expressão de conversão atualmente usada pela GAI (Cummins et al. 1998a):

$$I_{pk} = 0.185 \cdot RNSS \quad (3.6)$$

3.3.2.2. Multiplicidade

Um aspecto interessante dos sistemas de localização de relâmpagos está na sua capacidade de detectar cada uma das descargas de retorno (*strokes*) que compõe um relâmpago e depois, através de um algoritmo matemático específico, agrupá-las para determinar sua multiplicidade.

Atualmente, o método de agrupamento utilizado consiste em um algoritmo que leva em consideração aspectos espaciais e temporais das descargas a fim de decidir quais descargas pertencem ou não a um determinado relâmpago, conforme ilustra a Figura 3.8. Descargas são associadas a um relâmpago ativo por um período de um segundo após a primeira descarga de retorno detectada (tradicional tempo limite de duração de um relâmpago para sistemas de localização) e enquanto estiverem a uma distância máxima de 10km do primeiro ponto de impacto, mantendo um intervalo de tempo máximo de 500ms em relação à descarga anterior. Para evitar que uma dada descarga seja associada a mais de um relâmpago (situação pouco provável), o algoritmo irá sempre adicioná-la ao relâmpago cuja primeira descarga de retorno esteja mais próxima. Além disso, se uma descarga estiver a mais de 10km de distância da primeira descarga (mas ainda dentro de um raio de 50km) e havendo uma sobreposição de sua elipse de segurança com a região espacial do relâmpago

(o que impossibilita uma clara separação entre ambos), então esta descarga será associada ao respectivo relâmpago.

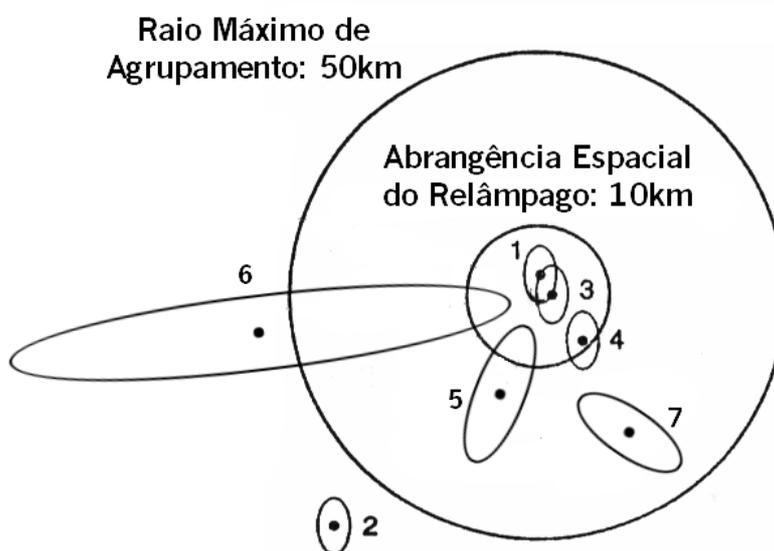


Fig. 3.8 - Algoritmo de agrupamento de descargas. O raio de 10km, correspondente à região espacial compreendida por um relâmpago, está centrada na primeira descarga de retorno. As descargas subsequentes 1, 3, 4 e 5 pertencem a este relâmpago enquanto que as descargas 2, 6 e 7 serão associadas a outros relâmpagos, distintos ou não.

FONTE: Adaptado de Cummins et al. (1998a, p. 9038).

Como exemplo, considere as descargas 5 e 6 mostradas na Figura 3.8. Embora a posição da descarga 5 esteja além do círculo de 10km, ela encontra-se ainda dentro da área de agrupamento (raio de 50km). Como sua elipse de segurança sobrepõe-se ao raio de abrangência do relâmpago, esta é então agrupada ao relâmpago em andamento. O mesmo não acontece com a descarga 6 que, embora tenha sua elipse de segurança sobreposta ao raio de abrangência do relâmpago, sua posição encontra-se fora do raio de agrupamento. Portanto, ela será considerada como integrante de outro evento.

Ainda como parte do algoritmo, o limite máximo da multiplicidade é 15. Em outras palavras, todas as descargas detectadas além da 15ª serão associadas a um novo evento. Vale ressaltar também que a localização de um relâmpago informada pelo sistema corresponde sempre à localização de sua primeira descarga de retorno, o mesmo ocorrendo

para o valor da corrente de pico, que também corresponde ao pico da primeira descarga. Descargas subseqüentes são agrupadas em um determinado relâmpago mesmo que possuam polaridades opostas à polaridade da primeira descarga de retorno (Cummins et al. 1998a).

3.3.2.3 Tempo de Subida e Largura de Pulso

O tempo de subida e a largura de pulso da radiação EM emitida pelo canal de um relâmpago são medidas diretamente pelos sensores e, para um dado evento, correspondem aos valores registrados pelo sensor mais próximo da primeira descarga de retorno (aquele que informou o horário mais próximo do horário da descarga calculado pelo sistema). A utilização dos dados referentes ao sensor mais próximo visa minimizar os efeitos de propagação sobre a forma de onda da radiação, a qual sofre uma maior atenuação das altas frequências em relação às baixas, distorcendo assim seus valores de tempo de subida, largura de pulso e valor de pico em função da distância percorrida e da intensidade do sinal (Cooray, 1987).

Em termos práticos (do ponto de vista do SLT), define-se a largura de pulso como o tempo decorrido entre o pico da radiação e o instante em que seu valor atinge o nível mínimo necessário para ativação dos circuitos dos sensores (*threshold*). O tempo de subida, por sua vez, é definido como o tempo que o sinal EM leva para atingir o valor de pico, partindo do valor mínimo de ativação dos sensores. Atualmente, somente a largura de pulso tem sido usada pelos sistemas de localização de tempestades para discriminar os relâmpagos IN dos NS. Esse processo de seleção ocorre nos próprios sensores, os quais registram apenas os relâmpagos cuja largura de pulso seja superior a 10 μ s, valor padrão de configuração definida pela GAI (1994), que considera como relâmpagos IN todos aqueles com largura de pulso inferior a 10 μ s.

3.4. COMPONENTES DE UM SISTEMA

Em linhas gerais, uma rede de localização de relâmpagos é utilizada para detectar descargas atmosféricas, tanto no céu quanto envolvendo o solo, e identificar precisamente os locais

onde os relâmpagos NS atingem a superfície. Isso pode ser feito pelo uso de vários sensores remotos os quais detectam os sinais emitidos pelos relâmpagos e eliminam aqueles cujas fontes não sejam descargas atmosféricas. Cada sensor que tenha detectado um evento envia os dados obtidos para um sistema centralizado de processamento, conhecido como Central de Análise Avançada de Localização (*Advanced Position Analyzer*, APA), a qual compara os horários informados a fim de assegurar que os dados sejam de um mesmo evento e, em seguida, matematicamente calcula a localização otimizada do ponto de impacto daquela descarga NS. Além da localização, o sistema pode determinar várias outras características descritivas de cada evento conforme discutido na seção 3.3. Por fim, a central armazena toda a informação disponível em bancos de dados específicos, permitindo também a divulgação dos resultados em tempo real para vários usuários simultâneos conectados ao sistema.

3.4.1. Central de Processamento APA2000

A série APA2000 consiste em um complexo software desenvolvido para o sistema operacional UNIX composto por três módulos básicos denominados LP2000, DA2000 e NM2000, os quais destinam-se a realizar diferentes tarefas relacionadas às funções da central de processamento. Este software roda em computadores fabricados pela *Sun Microsystems* e se utiliza do ambiente gráfico *Common Desktop Environment* (CDE) para facilitar as operações com a rede de detecção.

O módulo LP2000 constitui o coração do sistema pois desempenha o papel da central de processamento propriamente dita. O módulo NM2000 é usado para interativamente configurar a rede, permitindo sua visualização e análise como um todo, com o objetivo de manter altos níveis de desempenho. O módulo DA2000 oferece recursos avançados para armazenamento e distribuição dos dados a usuários finais tanto em tempo real como na forma de arquivos. Em geral, cada módulo opera em uma máquina distinta, porém todas interconectadas através de uma rede local TCP/IP Ethernet (*Local Area Network*, LAN). Esses módulos serão detalhados a seguir.

3.4.1.1. Módulo LP2000 (*Lightning Processor*)

O LP2000 é responsável pela produção das soluções referentes à localização dos relâmpagos utilizando os dados brutos das descargas (denominados *raw data*, um tipo de dado binário e sem formatação) gerados pelos sensores. O módulo permite também determinar o desempenho de cada sensor individualmente e gerenciar o armazenamento tanto do *raw data* como das soluções finais.

O número de sensores configuráveis suportado pelo módulo LP2000 varia de 4 até 256, com a possibilidade de formação de uma rede híbrida, ou seja, composta tanto por sensores LPATS como IMPACT. A comunicação destes sensores com a central é feita via interface serial direta (através de linhas telefônicas dedicadas). O LP2000 roda sozinho em uma máquina, funcionando como uma unidade autônoma, sem depender de outros módulos. Utiliza formatos de banco de dados internos para configuração dos sensores, análise histórica dos eventos e informações de operação. Os dados dos relâmpagos estão disponíveis para usuários finais através de portas TCP/IP ou interfaces seriais.

Basicamente, as funções do LP2000 relacionadas à rede são: recebimento dos dados brutos provenientes dos sensores, gerenciamento dos sensores (controle e configuração), configuração dos parâmetros utilizados pelos algoritmos de localização, armazenamento do *raw data*, cálculo da localização dos relâmpagos, suporte à visualização dos resultados em tempo real para micros PC, acesso às soluções de localização armazenadas e *replay* simultâneo dos dados. O LP2000 suporta ainda a operação em tempo real e o reprocessamento dos dados armazenados simultaneamente.

Como resultados, o LP2000 fornece os seguintes parâmetros das descargas: data, horário (com resolução de 100ns e suporte para horário local), latitude, longitude, intensidade do sinal e polaridade (o RNSS ou o valor estimado da corrente de pico em kA), multiplicidade do relâmpago, número de sensores participantes de uma solução, número de graus de liberdade disponíveis para a otimização de uma solução, semi-eixos maior e menor da elipse de segurança de 50% de probabilidade (dados em km), ângulo de azimute da elipse de segurança, medida do erro de localização (χ^2), tempo de subida e largura de pulso da

forma de onda (dados em milissegundos), máxima taxa de subida do sinal ou derivada (dada em kA/ μ s), classificação entre relâmpago NS ou IN e indicação de qual informação foi utilizada na localização da descarga: ângulo, sinal ou tempo (GAI, 1999).

3.4.1.2. Módulo DA2000 (*Distribution and Archive*)

O DA2000 é um módulo projetado para gerenciar várias requisições simultâneas de aplicações clientes que façam uso das informações sobre relâmpagos em tempo real ou não. Utiliza o Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados Relacional (*Relational Database Management System*, RDBMS) *Sybase* e permite um número ilimitado de usuários registrados. Em sua configuração padrão, o DA2000 suporta até 32 usuários conectados simultaneamente. O acesso aos dados armazenados pode ser feito das mais diferentes maneiras através de filtros baseados nos diversos parâmetros dos relâmpagos como data, horário, latitude, longitude, distância, azimute, etc., abrindo assim inúmeras possibilidades de uso das informações.

O módulo obtém os dados das descargas do LP2000 em tempo real e armazena-os no banco de dados *Sybase*. Inicialmente o DA2000 é configurado para buscar e armazenar somente os dados de descargas mas, como os dados de relâmpagos (correspondentes ao agrupamento de descargas) também estão disponíveis em tempo real, é possível fazer com que estes também sejam requisitados ao LP2000 e armazenados independentemente dos dados das descargas (GAI, 1996).

3.4.1.3. Módulo NM2000 (*Network Management*)

O módulo NM2000 é responsável pelo monitoramento e configuração remotos do módulo LP2000. A partir do NM2000, o LP2000 pode ser reconfigurado, além de determinar-se o estado operacional de seus processos e dos sensores. O NM2000 permite também concentrar, registrar e analisar as estatísticas de desempenho da rede, podendo rodar sozinho em uma máquina, como uma unidade autônoma, ou em conjunto com o módulo DA2000.

Como o módulo NM2000 está conectado à mesma rede local do módulo LP2000, o qual replica importantes informações pela rede TCP/IP, ele pode, a partir desses dados, monitorar e controlar todos os processos em execução no LP2000, o que inclui adição ou remoção de sensores, correções de parâmetros e configuração de processos. Se necessário, o NM2000 pode ser conectado diretamente a um sensor remoto com o objetivo de averiguação. Além disso, este módulo concentra estatísticas de desempenho dos sensores e da rede, disponibilizando essas informações em tempo real ou em arquivos. Com o tempo, esses arquivos podem ser analisados e mudanças no desempenho da rede podem ser detectadas e corrigidas (GAI, 1997).

3.4.2. Os Sensores

Atualmente existem duas grandes famílias de sensores utilizados em sistemas de localização de tempestades no mundo: os sensores LPATS, que utilizam apenas o método de detecção TOA, e os sensores *Advanced Lightning Direction Finder* (ALDF), que utilizam o método IMPACT, daí serem conhecidos simplesmente por sensores IMPACT. Conforme discutido na seção 3.2.3, por combinarem os métodos TOA e MDF em um mesmo dispositivo, os sensores IMPACT geram uma redundância de informações que possibilita a otimização das soluções pela central de processamento, minimizando também as limitações intrínsecas de cada método quando empregados separadamente. Além disso, todos os sensores possuem circuitos receptores do sinal de *Global Positioning System* (GPS), permitindo assim grande precisão na sincronização temporal entre eles (da ordem de 100ns), fundamental para um bom desempenho do método TOA, o qual baseia-se justamente em diferenças temporais.

Cabe ressaltar que os sensores LPATS sofreram inúmeros aperfeiçoamentos tecnológicos ao longo dos anos, dando origem a diferentes séries de produtos, entre elas as séries III e IV atualmente em uso em vários sistemas de localização, inclusive no Brasil. Os aprimoramentos concentraram-se essencialmente nos circuitos eletrônicos utilizados: 1) para a amostragem do sinal EM de uma descarga (aumento da taxa de amostragem, memória, precisão e parâmetros amostrados); 2) para a sincronização temporal com o sinal de GPS (aumento da precisão). O método TOA de detecção, contudo, permaneceu inalterado (GAI, 1995, 1998).

Uma rápida análise comparativa entre os sensores LPATS e IMPACT levam a algumas diferenças relevantes. Os sensores LPATS Série III e IV fornecem apenas os dados temporais das descargas, amostrando somente a componente vertical do campo elétrico irradiado, o que lhes permite determinar a intensidade do pico de radiação e seu tempo de subida. Já os sensores IMPACT são capazes de medir não só o campo elétrico vertical como também duas componentes ortogonais do campo magnético irradiado, utilizando para isso um par de antenas ortogonais em forma de *loop*. Com isso, torna-lhes possível fornecer não só as informações temporais das descargas como também a direção da fonte de radiação, dada pelo ângulo de azimute. Os sensores IMPACT, devido a novos aperfeiçoamentos nos circuitos eletrônicos, são capazes de amostrar a forma de onda do campo elétrico vertical e determinar, além da intensidade do pico da radiação, o tempo de subida, largura do pulso e a relação E/B (campo elétrico/campo magnético) do sinal EM captado. A relação E/B é usada para discriminar ruídos ambientes do sinal de radiação provenientes de descargas NS reais. A largura de pulso, por sua vez, permite selecionar apenas as formas de onda de descargas NS, descartando eventuais descargas IN que venham a ser registradas. Desta forma, a aplicação desses critérios de discriminação possibilita ao sensor classificar as formas de onda detectadas e enviar à central para processamento somente aquelas consideradas válidas. Este importante recurso, ausente nos sensores LPATS, permite minimizar a contaminação dos dados de descargas NS por descargas IN muito intensas e, eventualmente, por ruídos do ambiente passíveis de serem confundidos com descargas reais (GAI. 1994, 1995, 1998). Com isso, conclui-se que a participação de pelo menos um sensor IMPACT no cálculo da localização de um relâmpago diminui significativamente a possibilidade de registrar-se um evento que não seja um relâmpago NS real.

3.5. CONFIGURAÇÃO E OPERAÇÃO DA CENTRAL DE PROCESSAMENTO

Como já discutido na seção anterior, o módulo LP2000 (*Lightning Processor*) constitui o coração da central de processamento APA2000 do SLT por ser o responsável pela determinação dos dados das descargas e relâmpagos (tanto sua localização como seus parâmetros físicos) com base nas informações fornecidas pelos sensores (denominada *raw data*). Por esse motivo, daqui em diante, qualquer referência à configuração da central de

processamento corresponderá, na verdade, à configuração do LP2000 propriamente dito. É extremamente importante, portanto, conhecer seus modos de operação e como o módulo pode ser configurado.

O LP2000 pode trabalhar em dois modos, simultaneamente ou não (GAI. 1999):

- 1) Tempo Real (*real-time*) – As soluções são computadas a medida que os dados dos sensores são recebidos pelo módulo. Este modo apresenta uma grande limitação: dados de sensores que sofram um atraso de comunicação maior que o limite de espera do sistema, não entram no cálculo das soluções. Esse fato pode não só degradar a qualidade das informações de descargas que possuam mais dados do que aqueles usados em sua solução (pois não chegaram a tempo de serem usados) como também nem registrar descargas que efetivamente tenham ocorrido;

- 2) Reprocessamento – As soluções são calculadas com base nas informações dos sensores gravadas em disco e ordenadas cronologicamente. Neste modo, elimina-se o problema da perda de informações por atraso de comunicação haja vista que todos os dados informados pelos sensores estão gravados nos arquivos em disco. Desta forma, os dados de descargas gerados através do reprocessamento do raw data utilizam todas as informações disponíveis (pois não há riscos de algumas se atrasarem) e, portanto, apresentam uma maior precisão com relação àquelas geradas em tempo real com eventuais perda de dados. Além disso, o reprocessamento garante que todas as descargas que tenham sido detectadas pelo sistema tenham suas informações calculadas, com exceção obviamente daquelas cujos dados sejam insuficientes ou gerem soluções inconsistentes.

Com relação à configuração dos parâmetros do LP2000, existem três formas de fazê-la:

- 1) Editando-se diretamente o arquivo texto denominado *locate.dfg* que permite a alteração de aproximadamente 60 parâmetros diferentes relacionados com: (I) a precisão da localização inicial da descarga e os métodos de otimização da solução final; (II) os critérios de seleção das informações fornecidas pelos sensores e das

soluções determinadas pelo LP2000 através de parâmetros de qualidade; (III) o modelo de propagação de sinais eletromagnéticos, usado no cálculo da corrente de pico da descarga com base na intensidade dos sinais EM detectados pelos sensores; (IV) os fatores de correção aplicáveis aos dados dos sensores em função de sua localização geográfica; (V) os critérios de discriminação de relâmpagos IN.

- 2) Utilizando o aplicativo *APAConfig* que possibilita a alteração de cerca de 40 parâmetros relacionados com: (I) os critérios de qualidade aplicáveis às soluções calculadas pelo LP2000; (II) os critérios de seleção dos dados fornecidos pelos sensores; (III) as informações sobre a configuração dos sensores e sobre os canais de comunicação entre a central e as antenas detectoras; (IV) as informações sobre as características dos dispositivos de visualização dos resultados que eventualmente estejam recebendo os dados da central.
- 3) Editando-se diretamente o arquivo texto chamado *flashcalc.cfg* o qual permite alterar, entre outros, 6 parâmetros básicos relacionados com o algoritmo de agrupamento de descargas para determinação da multiplicidade de um relâmpago (veja Seção 3.3.2.2). Neste arquivo estão definidos os valores usados pelo sistema para: (I) o tempo total de um relâmpago; (II) seu raio de abrangência; (III) o tempo entre descargas; (IV) qual descarga componente do relâmpago definirá seu valor de corrente de pico (a primeira descarga de retorno ou a descarga mais intensa); (V) a multiplicidade máxima permitida para um relâmpago; (VI) o raio de agrupamento de descargas.

O aplicativo *APAConfig* mostrado na Figura 3.9, permite a configuração de diversos parâmetros de operação do LP2000, os quais se encontram organizados em grupos de acordo com o recurso do módulo ao qual se refere, através de uma interface gráfica que facilita a interação com o usuário. Entre esses grupos, os dois mais importantes são o grupo de parâmetros ligados ao núcleo de processamento (*locatθ*) e o grupo relacionado com os sensores (*sensor*). Uma característica muito atraente deste aplicativo é a possibilidade de criar-se cenários de configuração diferentes, armazenando-os em arquivos distintos no disco, para serem utilizados posteriormente em diversas situações de interesse. Um cenário corresponde a uma configuração específica de todos os parâmetros disponíveis. Desta

forma, de posse desses arquivos, pode-se utilizar o LP2000 em modo reprocessamento inúmeras vezes, fazendo uso de diferentes cenários de configuração simultaneamente. Para utilizar-se o LP2000 no modo tempo real, deve haver um arquivo chamado *realtime* no disco que define um único cenário de configuração a ser usado pelo módulo neste modo de operação. Não é permitido, portanto, criar-se diferentes arquivos para o modo tempo real.

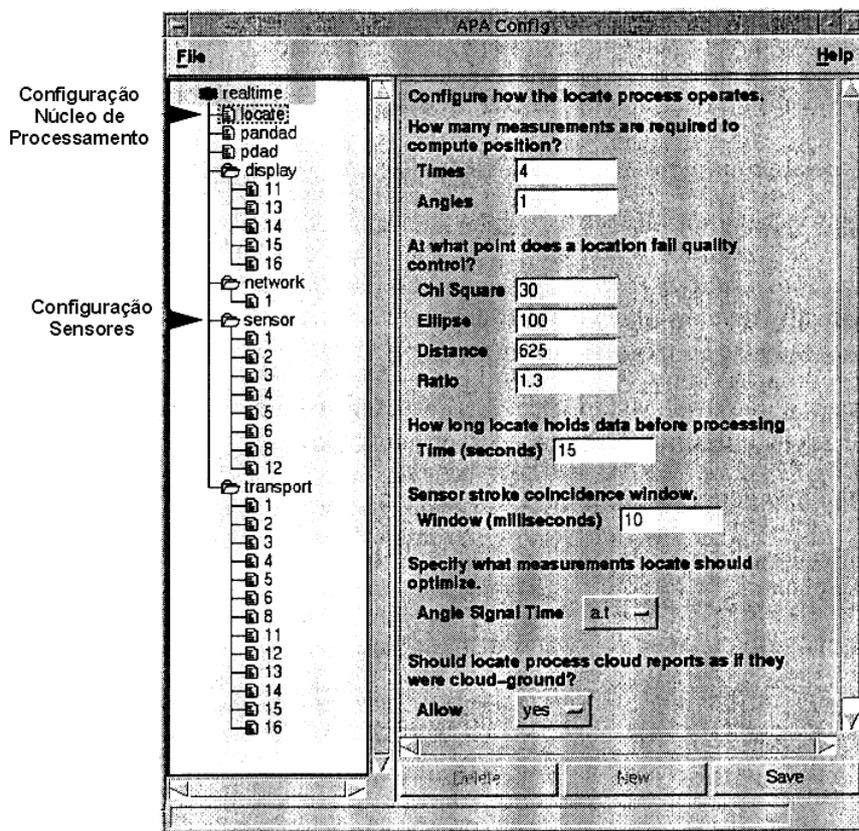


Fig. 3.9 – Janela do aplicativo *APAConfig* mostrando, no detalhe, o grupo de parâmetros de configuração do núcleo de processamento do LP2000 e aos sensores.
 FONTE: Adaptada de GAI (1999, p. 2-11)

Muitos parâmetros de configuração podem ser definidos tanto no arquivo *locate.dfg* como no aplicativo *APAConfig*. O LP2000 considera primeiramente os valores especificados no *APAConfig*. Caso contrário, vale então a configuração dada pelo arquivo *locate.dfg*.

CAPÍTULO 4

INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

4.1. O SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO USADO NO BRASIL

Atualmente, a região centro-sul do Brasil conta com uma rede de detecção de relâmpagos híbrida, ou seja, composta de sensores LPATS e IMPACT, instalados em seis estados: Goiás, Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Rio de Janeiro e Espírito Santo totalizando 14 antenas detectoras. Conforme já discutido na Seção 3.2, uma rede híbrida apresenta boa precisão de localização devido à combinação das tecnologias TOA e MDF. Na realidade, esta rede é constituída por duas sub-redes menores, cujos sensores foram comprados da GAI (nos Estados Unidos) e instalados pelo INPE juntamente com a CEMIG e por Furnas Centrais Elétricas, conforme mostra a Figura 4.1. É importante ressaltar, entretanto, que todos os 14 sensores ativos (formando a rede principal), sendo oito da rede CEMIG-INPE e seis da rede Furnas, podem ser vistos simultaneamente pelas duas centrais de processamento atualmente existentes, também adquiridas da GAI e administradas pela CEMIG, com sede em Belo Horizonte/MG, e por Furnas, com sede no Rio de Janeiro/RJ. Paralelamente a esses sistemas, existe ainda uma terceira central de processamento importada da GAI pelo Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR), juntamente com mais seis sensores LPATS Série III, a qual forma um outro SLT concomitante no Brasil. Essa central, com sede em Curitiba/PR, além de receber os dados dos seis sensores do próprio SIMEPAR, está conectada aos seis sensores de Furnas, abrangendo assim o sul do estado de São Paulo, o Paraná e o norte de Santa Catarina. Os seis sensores do SIMEPAR também fornecem dados à central de Furnas ao contrário da central da CEMIG que não recebe os dados desses sensores.

Neste trabalho, todos os dados foram obtidos a partir da central de processamento da CEMIG, conectada aos 14 sensores listados na Tabela 4.1. Além disso, de acordo com a Figura 4.1, observa-se que apenas três antenas IMPACT encontram-se dentro da área principal da malha de sensores. Por outro lado, embora a antena de Manoel Ribas/PR

localize-se fora da malha, ela continuou participando das soluções de descargas dentro das regiões consideradas por estarem ainda dentro de seu raio de alcance.

TABELA 4.1 – DISTRIBUIÇÃO DOS SENSORES DO SLT NO BRASIL

Sub-Rede CEMIG-INPE					
Sensor ID	Latitude	Longitude	Nome	UF	Modelo
01	-18,22604	-45,24897	Três Marias	MG	IMPACT
02	-19,47610	-42,53148	Ipatinga	MG	LPATS III
03	-21,24885	-45,00428	Lavras	MG	LPATS III
04	-20,02583	-48,22056	Volta Grande	MG	IMPACT
05	-16,31723	-43,72241	Capitão Enéas	MG	LPATS III
06	-18,45650	-48,00371	Emborcação	MG	LPATS III
07	-19,84953	-43,91383	Belo Horizonte	MG	LPATS III
08	-22,68600	-44,99930	Cachoeira Paulista	SP	IMPACT
Sub-Rede Fumas					
Sensor ID	Latitude	Longitude	Nome	UF	Modelo
09	-22,95550	-43,19150	Rio de Janeiro	RJ	LPATS IV
0A	-20,19995	-40,29122	Vitória	ES	LPATS IV
0B	-23,66018	-47,10349	Ibiúna	SP	LPATS IV
0C	-20,78050	-51,60594	Jupia	SP	LPATS IV
0D	-17,78542	-50,97649	Rio Verde	GO	LPATS IV
0F	-24,53300	-51,65090	Manoel Ribas	PR	IMPACT

Conforme discutido no capítulo anterior, os sensores IMPACT possuem parâmetros de configuração internos dos quais a largura de pulso constitui o critério de discriminação de descargas IN efetivamente usado pelo sensor. Para os dados usados neste trabalho, as quatro antenas IMPACT ativas da rede de sensores apresentavam a mesma configuração interna, listada na Tabela 4.2.

TABELA 4.2 – CONFIGURAÇÃO DAS ANTENAS IMPACT DA REDE

	Negativos		Positivos	
	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Mínimo	Valor Máximo
Razão E/B	0,2	10,0	0,2	10,0
Tempo de Subida	0,0	24,0	0,0	24,0
Largura de Pulso	11,0	31,0	11,0	31,0
Erro de Ângulo	± 2,5			

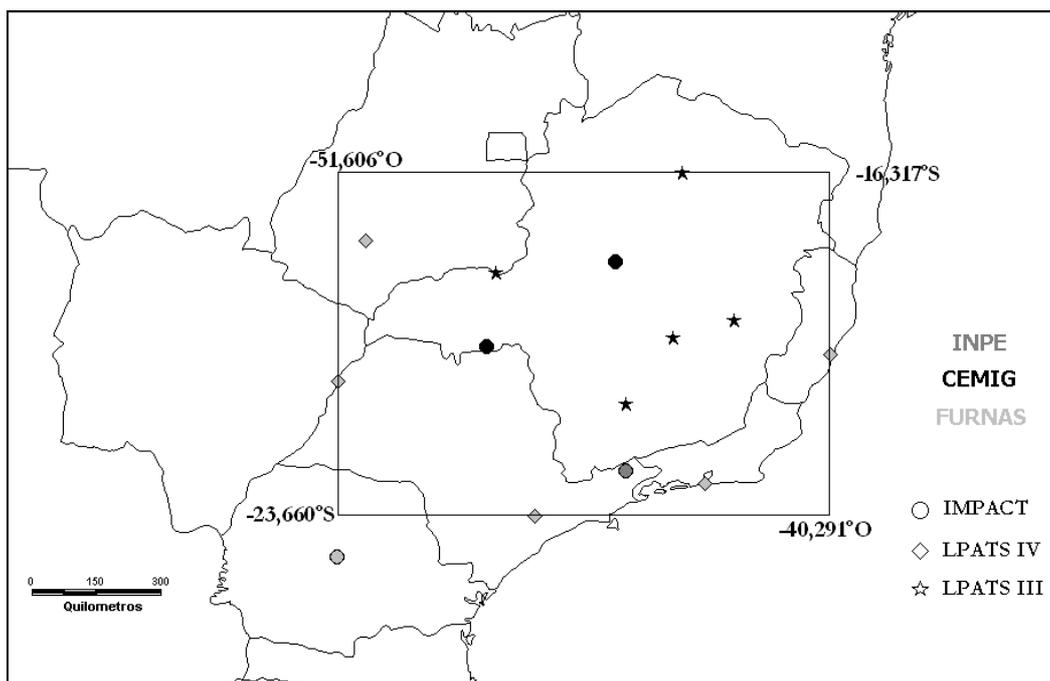


Fig. 4.1 - Delimitação da área principal da rede incluindo todos os sensores ativos do SLT utilizado neste trabalho, com exceção de Manoel Ribas/PR (ID 0F).

4.2. METODOLOGIA DE TRABALHO

4.2.1. Análise de Desempenho do Sistema

Em linhas gerais, esta análise propõe-se a avaliar o desempenho do SLT com base nos arquivos de configuração da central de processamento APA2000 e no conjunto de dados de relâmpagos extraído da base de dados do sistema. Esse último engloba tanto os dados gerados em tempo real, armazenados no respectivo banco de dados (*real-time database*), como os dados reprocessados a partir das informações registradas pelos sensores (*raw data*). Todas essas informações combinadas serviram para extrair diversas características do comportamento do SLT em função de alguns parâmetros pré-definidos. Tais características possuem um papel vital em qualquer análise dos dados de relâmpagos fornecidos pelo sistema, haja vista sua influência direta nos resultados finais para diferentes situações conforme será discutido no próximo Capítulo.

Cabe ressaltar, entretanto, que não se pretende aqui obter conclusões definitivas sobre todos os aspectos relacionados com o desempenho do sistema devido, fundamentalmente, a dois fatores: (1) a necessidade de um amplo conhecimento técnico da maior parte dos recursos do SLT, tarefa bastante dispendiosa em função da escassez de informações disponíveis; (2) o grande volume de dados relacionados com seu desempenho gerados pelo próprio SLT, o que inviabiliza o desenvolvimento de estudos mais aprofundados face ao curto período de tempo disponível, obrigando assim a enfatizar-se apenas os pontos mais relevantes. Desta forma, a idéia central desta análise restringiu-se apenas à verificação da influência dos parâmetros de configuração da central de processamento sobre os resultados gerados, os quais estão ligados aos dados de relâmpagos. O desempenho do sistema relacionado com a configuração geral da central de processamento e a configuração e distribuição geográfica dos sensores não será avaliado por sair do escopo desse trabalho.

Para realizar este estudo prévio de análise de desempenho do SLT, foram organizadas três abordagens distintas em função do objetivo desejado:

- 1) Estudo de Qualificação - Visa analisar a influência direta dos parâmetros de configuração da APA2000 sobre os resultados gerados;
- 2) Estudo de Degradação - Pretende avaliar a degradação das informações geradas pelo sistema a medida que as descargas se afastam da malha principal de sensores;
- 3) Estudo de Efeito de Propagação - Propõe estudar a distorção dos resultados causada pelo modelo de propagação eletromagnética utilizado pelo sistema, quando se considera duas regiões distantes da malha de sensores, uma sobre o oceano e uma sobre o continente;

4.2.1.1. Período dos Dados

O conjunto de dados de relâmpagos foi selecionado de tal forma que permitisse realizar os três estudos supra mencionados. Desta maneira, decidiu-se por quatro períodos distintos: (1) Verão de 1999, dos dias 21/Dez/1998 a 20/Mar/1999; (2) Inverno de 1999, entre os

dias 21/Jun/1999 e 23/Set/1999; (3) Verão de 2000, compreendendo os dias 22/Dez/1999 a 20/Mar/2000; (4) Inverno de 2000, englobando os dias 05/Jun/2000 a 07/Set/2000. Este último período teve de ser adiantado em 15 dias em relação à data oficial (20/Jun/2000) devido à alterações efetuadas na configuração da central de processamento do SLT no dia 08/Set/2000, conforme será explicado mais adiante. Essa medida procurou evitar eventuais variações nos resultados em função de mudanças nos parâmetros de configuração do sistema.

Para o desenvolvimento da análise de desempenho do sistema, os períodos de dados em si não possuem relevância significativa nos resultados, uma vez que eventuais diferenças nos dados gerados pelo sistema em função das épocas do ano devem-se muito mais às variações sazonais do fenômeno em si que propriamente a fatores relacionados com o comportamento do sistema. O estudo sazonal das características dos relâmpagos com base nos aspectos de desempenho do SLT será feita na seção 5.2.

4.2.1.2. Regiões de Estudo

Os dados também foram limitados de tal forma a considerar apenas os relâmpagos que atingiram uma determinada região do Brasil, conforme ilustra a Figura 4.2. A grande área selecionada, abrangendo as regiões Centro-Oeste, Sul e Sudeste, foi então subdividida em três partes distintas:

- 1) **Área 1** – Localizada a oeste e denominada **Região Externa Continental**, possui uma área aproximada de 408.250 km² (dimensões leste-oeste: 500 km; norte-sul: 816,5km). Seus limites são -16,317230°N, -23,660185°S, -56,389121°O e -51,605938°L. Esta região encontra-se fora da malha de sensores e sobre o continente, sendo utilizada para os estudos de degradação e efeito de propagação;
- 2) **Área 2** – Localizada no centro e denominada **Região Interna**, possui uma área aproximada de 965.103 km² (dimensões L-O: 1.182 km; N-S: 816,5 km). Seus limites são -16,317230°N, -23,660185°S, -51,605938°O e -40,291222°L. Esta região define a área principal da malha de sensores, pois engloba todos os sensores ativos da

CEMIG e de Furnas, com exceção da IMPACT de Manoel Ribas/PR (Furnas), e será utilizada para os estudos de qualificação e degradação. É importante destacar que esta região agrega em si um valor inestimável para pesquisa de relâmpagos no Brasil e para estudos de análise de desempenho do sistema pois representa a única área do país com uma cobertura relativamente densa e uniforme de sensores. Conforme será discutido mais adiante, é fundamental para o avanço da pesquisa que esta área seja ampliada e aperfeiçoada, promovendo um aumento da área de abrangência e da quantidade de dados confiáveis. Isso permitirá o desenvolvimento de estudos cada vez mais detalhados, abrangentes e precisos;

- 3) **Área 3** – Localizada a leste e denominada **Região Externa Oceânica**, possui uma área igual a Região Interna Continental e seus limites são $-16,317230^{\circ}\text{N}$, $-23,660185^{\circ}\text{S}$, $-40,291222^{\circ}\text{O}$ e $-35,508039^{\circ}\text{L}$. Esta região também encontra-se fora da malha de sensores porém, sobre o oceano, sendo também utilizada para os estudos de efeito de propagação e degradação.

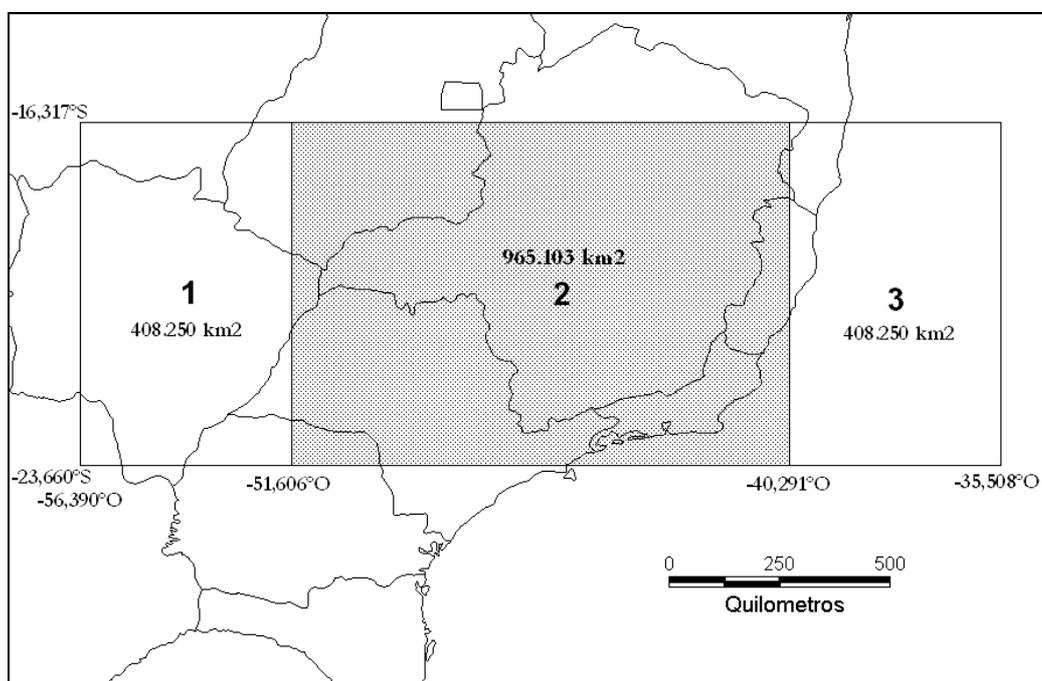


Fig. 4.2 – Regiões de estudo utilizadas na análise de desempenho do SLT com destaque para a Região (2) que corresponde à malha principal de sensores.

Convém observar ainda que as três regiões foram escolhidas em uma mesma faixa de latitude visando eliminar sua influência sobre certas características dos relâmpagos, conforme já revelaram estudos prévios (Orville. 1990; Pinto Jr. et al. 1997, 1999).

4.2.1.3. Definição dos Cenários de Configuração

Em função do grande número de parâmetros configuráveis do SLT e visando tornar esta primeira análise viável no tempo disponível, optou-se apenas pelo estudo dos principais parâmetros especificados no aplicativo *APAConfig*. Essa escolha baseou-se em dois fatores: 1) Na própria recomendação da GAI de não se alterar os valores pré-definidos dos parâmetros constantes nos arquivos *locate.cfg* e *flashcalc.cfg* (GAI. 1999); 2) Nas poucas informações concretas sobre o papel da maioria desses parâmetros nos algoritmos matemáticos do LP2000 e, conseqüentemente, nos resultados gerados pelo sistema. Como já discutido no capítulo anterior, no aplicativo *APAConfig* existem, entre outros, o grupo de parâmetros relacionados com o núcleo de processamento e o grupo relacionado com a seleção das informações provenientes dos sensores. Os parâmetros dos grupos restantes são definidos uma única vez durante a instalação do módulo e não devem ser alterados, salvo casos excepcionais. Desta forma, este estudo concentrou-se unicamente na análise dos parâmetros de configuração do núcleo de processamento.

Quando a nova central de processamento APA2000 foi instalada na CEMIG em 21/Nov/1996, o módulo LP2000 foi configurado utilizando-se um arquivo *locate.cfg* com parâmetros típicos definidos pela GAI segundo critérios de qualidade específicos. Em 05/Ago/1998 e em 25/Out/1999, quando a GAI concluiu os dois relatórios técnicos da análise de desempenho do SLT da CEMIG (Murphy. 1998) e de Furnas (Murphy. 1999), foram propostas alterações em vários parâmetros do arquivo *locate.cfg*. Tais modificações foram efetivamente implementadas na central da CEMIG em 16/Dez/1998 e em 08/Set/2000, referentes, respectivamente, às sugestões do primeiro e segundo relatórios. Como os dados extraídos do SLT para este estudo têm início no verão de 1999 (21/Dez/1998), descartou-se a primeira alteração na configuração. Sendo assim, parte do estudo de qualificação procurou verificar a influência da segunda alteração nas informações

geradas pelo sistema, incluindo as configurações do arquivo *locate.cfg* antes e depois das mudanças na confecção dos cenários.

Dentre os parâmetros de configuração do núcleo de processamento disponíveis no aplicativo *APAConfig* seguindo a filosofia de uma análise mais geral, selecionou-se apenas aqueles que poderiam causar os impactos mais significativos sobre os resultados. A Tabela 4.3 apresenta os quatro parâmetros escolhidos juntamente com uma breve descrição de cada um. Os parâmetros restantes foram mantidos em seus valores pré-definidos pois sua influência sobre os resultados pode ser prevista com base no conhecimento de sua função no núcleo de processamento. A Tabela 4.4 lista esses parâmetros, seus valores estabelecidos e sua descrição.

Desta forma, preferiu-se manter inalterados os parâmetros apresentados na Tabela 4.4 de acordo com a configuração do LP2000 na ocasião da coleta dos dados pois julgou-se que eles não influenciariam significativamente os resultados dos estudos. Os valores dos parâmetros *Chi Square* e *Confidence Ellipse* afetam apenas as soluções de descargas muito distantes da malha de sensores (quando então os desvios das informações dos sensores e a incerteza da localização crescem muito). Por outro lado, as regiões de estudo definidas neste trabalho encontram-se no máximo a cerca de 1.200km de distância do centro da malha (Figura 4.2). Desta forma, alterar os valores desses parâmetros não traria nenhum resultado significativo aos estudos. Por esse mesmo motivo, os valores dos parâmetros *Distance*, *Hold Period* e *Coincidence Window* também foram mantidos com seus valores originais.

TABELA 4.3 – PARÂMETROS DO NÚCLEO DE PROCESSAMENTO SELECIONADOS PARA O ESTUDO DE QUALIFICAÇÃO

Parâmetro	Descrição
<i>Times</i>	Número mínimo requerido de medidas temporais (horários) a serem usadas no cálculo da localização da descarga. Este parâmetro define o número mínimo exigido de sensores IMPACT e/ou LPATS nas soluções, uma vez que ambos os tipos fornecem dados temporais das descargas.
<i>Angles</i>	Número mínimo requerido de medidas angulares (direção) a serem usadas no cálculo da localização. Como as medidas de ângulo são feitas apenas por sensores IMPACT, este parâmetro define então o número mínimo exigido de sensores deste tipo nas soluções.
<i>Allow</i>	Define se o LP2000 deve considerar ou não, nas soluções, dados de descargas classificadas pelos sensores como IN. Quando o valor desse parâmetro for <i>yes</i> , o LP2000 irá incluir no cálculo das informações da descarga todas as mensagens fornecidas pelos sensores, independentemente de sua classificação como NS ou IN. Caso algum sensor classifique-a como NS, então a solução também será NS. Desta forma, uma descarga somente será classificada como IN se todas as mensagens dos sensores referentes a ela estiverem classificando-a como tal. Esta opção possui um inconveniente: como a classificação das descargas pelos sensores costuma ser imprecisa, pode haver contaminação das soluções por dados de descargas IN ou eliminação de dados de descargas NS válidas. Em virtude das características distintas das descargas NS e IN, a eliminação de dados NS reais costuma ser muito menor que a contaminação por dados IN. Isso porque os sensores tendem a classificar mais relâmpagos IN como NS que o inverso. Por outro lado, se o valor do parâmetro for <i>no</i> , qualquer mensagem recebida dos sensores que classifique a descarga como IN não será incluída no processamento de sua solução. Desta forma, obtém-se uma situação mais exigente pois somente as informações dos sensores que classificarem a descarga como NS serão utilizadas na localização final.
<i>Ratio</i>	Corresponde ao máximo valor aceitável da razão entre dois valores de intensidade de sinal normalizado (RNSS) de uma solução calculada com base em duas medidas de ângulo. Essa razão é calculada comparando-se o maior valor de RNSS com o menor. Desta forma, o valor do RNSS de cada sensor que informou a descarga deve estar abaixo da razão especificada caso contrário, a solução será rejeitada.

FONTE: GAI (1999, p. 7-22 a 7-25).

TABELA 4.4 – PARÂMETROS EXCLUÍDOS DO ESTUDO DE QUALIFICAÇÃO

Parâmetro	Valores	Descrição
<i>Chi Square</i>	20	Representa uma medida do desvio existente nas informações dos sensores usadas no cálculo da localização. Este valor define o máximo desvio permitido para que uma localização seja classificada como aceitável.
<i>Confidence Ellipse</i>	50 km	Define uma região elíptica, chamada elipse de segurança, em torno da localização calculada pelo sistema onde existe 50% de probabilidade de que a descarga tenha ocorrido. Este valor corresponde ao máximo comprimento do semi-eixo maior da elipse aceitável para a localização da descarga. Em outras palavras, este parâmetro define a incerteza da localização. Valores cada vez maiores do semi-eixo maior da elipse significam incertezas maiores com relação à localização da descarga.
<i>Distance</i>	2.000 km	Define uma distância em relação à localização da descarga dentro da qual exista pelo menos um sensor que tenha participado da solução. Se nenhum sensor estiver a essa distância, a solução é rejeitada.
<i>Hold Time</i>	20 s	Corresponde ao tempo máximo de espera para o recebimento das informações dos sensores referentes a uma descarga. Durante esse tempo, o LP2000 vai armazenando as mensagens dos sensores a medida que vão chegando. Esgotado o tempo de espera, ele inicia o processamento da solução e eventuais mensagens retardatárias são então desprezadas.
<i>Coincidence Window</i>	10 ms	Define uma janela de tempo, denominada janela de coincidência, utilizada inicialmente para correlacionar os dados dos sensores referentes a uma possível localização da descarga. Em outras palavras, esse tempo corresponde ao atraso sofrido pelo sinal ao ser detectado por dois sensores muito distantes um do outro e permite ao sistema determinar quais mensagens dos sensores correspondem a uma mesma descarga. Uma onda eletromagnética, devido ao fato de se propagar com uma velocidade finita (próxima à velocidade da luz), irá atingir sensores muito distantes entre si em tempos diferentes. Essa diferença constitui a janela de coincidência e é calculada com base na velocidade da luz e na maior distância em linha reta entre dois sensores da malha. Com base nesse tempo, o sistema desconta os eventuais atrasos de propagação devido às diferentes distâncias dos sensores da rede e determina quais sensores detectaram a descarga.

FONTE: GAI (1999, p. 7-22 a 7-25).

Com base nessas informações, definiu-se então os cenários de configuração para os quais os dados dos sensores (*raw data*) seriam reprocessados. A Tabela 4.5 contém os parâmetros que compõem os oito cenários utilizados neste estudo, bem como seus respectivos valores. O arquivo de configuração *locate.cfg* contendo os valores dos parâmetros antes das alterações de 08/Set/2000 será chamado de *old*. O arquivo com os valores posteriores às alterações será chamado de *new*. Devido a problemas técnicos durante a operação do sistema, não foi possível obter os dados dos cenários A e B referentes ao verão de 1999.

TABELA 4.5 – COMPOSIÇÃO DOS CENÁRIOS DE CONFIGURAÇÃO

Cenário	Parâmetros					Modo de Operação	Períodos Não Disponíveis
	Arquivo <i>locate.cfg</i>	<i>Times</i>	<i>Angles</i>	<i>Allow</i>	<i>Ratio</i>		
R	<i>old</i>	4	0	<i>yes</i>	1,5	tempo real	–
A	<i>old</i>	4	0	<i>yes</i>	1,5	reprocess.	Verão/1999
B	<i>new</i>	4	0	<i>yes</i>	1,5	reprocess.	Verão/1999
C	<i>old</i>	4	0	<i>yes</i>	1,3	reprocess.	–
D	<i>new</i>	4	0	<i>yes</i>	1,3	reprocess.	–
E	<i>new</i>	4	0	<i>no</i>	1,3	reprocess.	–
F	<i>new</i>	4	1	<i>yes</i>	1,3	reprocess.	–
G	<i>new</i>	4	1	<i>no</i>	1,3	reprocess.	–

De acordo com as descrições dos parâmetros apresentadas na Tabela 4.3, conclui-se que os cenários listados na Tabela 4.5 apresentam critérios de qualidade em escala crescente de exigência. Em outras palavras, o cenário A possui a configuração dos parâmetros menos exigente em termos de qualidade dos resultados gerados, pois contempla a utilização do arquivo *locate.cfg* antigo, considera as soluções dadas apenas por 4 medidas de tempo, despreza a classificação NS ou IN das mensagens dos sensores e adota a razão de RNSS igual a 1,5. A medida que se avança pelos cenários, esse grau de exigência vai crescendo, conforme ilustra os valores dos parâmetros utilizados, até chegar em um nível máximo, dado pelo cenário G, considerado então o mais exigente.

4.2.1.4 Obtenção dos Dados

Entre 18/Set/2000 e 20/Out/2000, foram definidos os períodos, regiões e cenários necessários para a realização dos estudos propostos neste trabalho. Nesta etapa inicial, procurou-se familiarizar-se com o sistema, conhecer seus principais recursos, os princípios de seu funcionamento e, principalmente, entender como os dados dos relâmpagos eram gerados, desde o recebimento das mensagens dos sensores, passando pelo processamento até o armazenamento dos resultados no banco de dados. A partir daí, após uma boa compreensão dos recursos físicos e computacionais do sistema, passou-se à etapa de seleção dos dados de relâmpagos registrados em tempo real e o reprocessamento dos dados dos sensores para os diferentes cenários, regiões e períodos de tempo selecionados. Os detalhes técnicos computacionais envolvidos nesta etapa serão omitidos aqui pois fogem ao escopo do trabalho e constituem informações muito específicas, de interesse apenas dos operadores do sistema.

O SLT constitui um grande e valioso aliado na pesquisa de relâmpagos por fornecer inúmeros parâmetros físicos relacionados com o fenômeno. Além disso, o sistema também disponibiliza informações sobre a qualidade dos resultados gerados e indicadores de seu desempenho como instrumento físico de medida. Como o objetivo geral da dissertação concentra-se no estudo das características dos relâmpagos e, em particular, a análise de desempenho do SLT preocupa-se com a qualidade dos resultados gerados pelo sistema, foram selecionadas quatro informações relacionadas com as características das descargas e duas relacionadas com a qualidade das soluções. Com base nesses dados, fornecidos diretamente pelo sistema, derivou-se então os dados de interesse para os estudos através de processamento computacional utilizando programas comerciais de análise de dados (*Microsoft Excel*, *MicroCal Origin*) e programas específicos desenvolvidos em *Borland Delphi*. A Tabela 4.6 resume os dados gerados pelo SLT e os resultados obtidos após o processamento. É importante destacar que os dados referentes às características dos relâmpagos foram levantados tanto para relâmpagos negativos quanto positivos.

Analisando as informações apresentadas na Tabela 4.6, observa-se uma limitação da faixa de valores imposta aos dados de largura de pulso e de tempo de subida. Isso deve-se às

antenas IMPACT que estão configuradas para fornecerem apenas informações de descargas cuja largura de pulso da radiação esteja na faixa entre $11\ \mu s$ e $31\ \mu s$ (correspondente ao critério de discriminação, veja Tabela 4.2). Já o tempo de subida foi limitado em $24\ \mu s$ devido, novamente, à configuração interna dos sensores IMPACT. Desta forma, como os sensores LPATS não impõem nenhuma restrição quanto aos valores de tempo de subida e largura de pulso, há uma distorção das informações do tempo de subida acima de $24\ \mu s$ e da largura de pulso abaixo de $11\ \mu s$ e acima de $31\ \mu s$ provocada pelo registro das informações por apenas um tipo de sensor, uma vez que a rede utilizada no Brasil é híbrida. Em função disso, decidiu-se impor limites aos valores dessas duas informações com o objetivo de uniformizar os dados.

TABELA 4.6 – INFORMAÇÕES DERIVADAS DOS DADOS DO SLT UTILIZADAS NA ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SISTEMA

	Dados SLT	Dados Derivados
Parâmetros Físicos	Intensidade de Corrente	No. Efetivo de Relâmpagos
		No. de Relâmpagos Positivos com Corrente Abaixo de $10kA$
		Média da Corrente
		Média da Corrente dos Relâmpagos Simples
		Média da Corrente dos Relâmpagos Múltiplos
	Multiplicidade	Média da Multiplicidade
	Largura de Pulso	Média da Largura de Pulso (entre 11 e $30\ \mu s$)
Tempo de Subida	Média do Tempo de Subida (abaixo de $24\ \mu s$)	
Medidas de Qualidade	Chi-Quadrado (χ^2)	Média do Chi-Quadrado
	Informações usadas nas soluções (Tempo e/ou Ângulo)	No. de Sensores IMPACT Participantes No. de Relâmpagos IN

4.2.1.5. Método Estatístico de Análise

Como em todos os estudos realizados neste trabalho devem ser feitas comparações entre duas médias de dados para a verificação de diferenças significativas entre elas, utilizou-se um teste estatístico bastante simples que fornece o nível de significância dessas diferenças com base na variância dos dados. Entretanto, este teste, denominado **Teste-Z**, somente pode ser aplicado a uma população de dados que apresente uma distribuição normal de

probabilidades. Porém, essa restrição estatística não oferece problemas à aplicação deste teste às amostras obtidas neste trabalho porque, se o número de dados de uma amostra da população for grande (maior que 30), o Teorema do Limite Central garante que a distribuição das médias das várias amostras dessa população será normal (Brase e Brase, 1995). Além disso, é possível também aproximar-se a variância da população pela variância da respectiva amostra. Sendo assim, como o número de relâmpagos nos períodos, regiões e cenários considerados é, na maior parte das vezes, muito grande, o Teste-Z pode ser aplicado para testar a diferença entre duas médias de amostras quaisquer retiradas das populações, que não precisam necessariamente serem as mesmas.

Desta forma, dado um número grande de elementos da população 1 (n_1), um número grande de elementos da população 2 (n_2), a média da amostra n_1 (\bar{x}_1), a média da amostra n_2 (\bar{x}_2), a variância da amostra n_1 (s_1^2) e a variância da amostra n_2 (s_2^2), a estatística do teste z é calculada através da fórmula:

$$z = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (4.1)$$

Através de uma tabela da distribuição normal padrão, valores de $|z|$ maiores que 2,58 permitem afirmar que há uma diferença significativa entre as médias para um nível de significância α menor que 1% ($\alpha < 0,01$). Em outras palavras, este resultado revela que existe menos de 1% de probabilidade de erro em afirmar que há realmente diferença entre as médias consideradas. Para valores de $|z|$ compreendidos entre 1,96 e 2,58, o nível de significância α fica entre 1% e 5% ($0,01 \leq \alpha \leq 0,05$), ou seja, agora a probabilidade de erro da afirmação está entre 1% e 5%. Se o $|z|$ for menor que 1,96, então não se pode afirmar que há diferença significativa entre as médias pois a probabilidade de erro torna-se maior que 5% ($\alpha > 0,05$), invalidando a hipótese do teste.

Através deste método, é possível então comparar as médias dos dados para: (1) verificar se os cenários de configuração afetam realmente os dados de relâmpagos e como isso

acontece (estudo de qualificação); (2) verificar variações nos resultados do sistema em função de diferentes regiões consideradas (estudos do efeito de propagação e de degradação); (3) verificar diferenças entre as características dos relâmpagos em função da época do ano.

Convém destacar que, no próximo capítulo, serão apresentados e discutidos apenas os resultados comparativos que possuam diferenças significativas entre as médias dos dados considerados. Eventuais aspectos que não possam ser comparados serão omitidos, deixando que outros trabalhos futuros abordem essas questões com o nível de detalhes mais adequado.

4.2.1.6. Estudo de Qualificação

Na análise da influência da configuração do sistema sobre os resultados, foram utilizados os dados gerados pelos oito cenários listados na Tabela 4.5, efetuando-se uma comparação do número efetivo de relâmpagos negativos e positivos, descontados eventuais relâmpagos IN e positivos com corrente inferior a 10kA. Estes últimos foram computados separadamente visando avaliar o nível de contaminação de IN e a confiabilidade dos dados dos relâmpagos NS em função do cenário adotado. Foram comparadas também duas informações referentes às características dos relâmpagos (intensidade de corrente e multiplicidade), obtidas tanto para negativos como para positivos, uma informação relacionada com a qualidade das soluções do sistema (χ^2) e o percentual de participação de antenas IMPACT nas soluções. Para este estudo, foram considerados apenas os dados de relâmpagos que atingiram a **Região Interna** (ou seja, a área interna da malha de sensores). Isso porque, nessa região, a uniformidade da distribuição das antenas detectoras permite uma melhor precisão das informações, conforme discutido na Seção 4.2.1.2. A Tabela 4.7 ilustra como os oito cenários foram comparados entre si e quais aspectos da configuração do sistema pretendeu-se avaliar.

TABELA 4.7 – COMPARAÇÕES DOS DADOS ENTRE OS OITO CENÁRIOS APLICADOS AOS DADOS DE RELÂMPAGOS DA REGIÃO INTERNA

Comparação	Aspecto da Configuração Avaliado
Cenário R x Cenário A	Efeito do reprocessamento dos dados dos sensores
Cenário A x Cenário B	Efeito das alterações feitas no arquivo <i>locate.cfg</i>
Cenário A x Cenário C	Efeito do parâmetro <i>Ratio</i> sobre dados gerados na configuração do arquivo <i>locate.cfg</i> antigo
Cenário B x Cenário D	Efeito do parâmetro <i>Ratio</i> sobre dados gerados na configuração do arquivo <i>locate.cfg</i> atual
Cenário D x Cenário E	Efeito do parâmetro <i>Allow</i> sobre os dados gerados sem a exigência da participação de uma antena IMPACT nas soluções.
Cenário D x Cenário F	Efeito de se exigir a participação de uma antena IMPACT nas soluções
Cenário F x Cenário G	Efeito do parâmetro <i>Allow</i> sobre os dados gerados exigindo-se a participação de uma antena IMPACT nas soluções.

4.2.1.7. Estudos de Efeito de Propagação e Degradação

Para os estudos de efeito de propagação e degradação do sistema, foram utilizados os dados de relâmpagos das **Regiões Externas Continental e Oceânica** e da **Região Interna** gerados apenas a partir do cenário G, o qual possui o maior nível de exigência em termos de parâmetros de configuração, conforme discutido na Seção 4.1.2.3. Essa opção por um cenário mais exigente visa garantir uma melhor qualidade das informações com o intuito de tornar as conclusões mais precisas, minimizando a influência da configuração. Vale ressaltar, entretanto, que para os períodos com menos relâmpagos (durante os invernos) levantados através do cenário G, que reduz consideravelmente o número de eventos em função de seu caráter mais restritivo, algumas comparações não foram possíveis pois não satisfizeram as condições impostas pela análise estatística, as quais exigem amostras com mais de 30 elementos (veja Seção 4.2.1.5).

Para estes dois estudos, que consistem na comparação dos dados das Regiões Externas com a Região Interna, foram utilizadas informações do número efetivo de relâmpagos

positivos e negativos detectados pelo SLT, a intensidade de corrente e multiplicidade (tanto para positivos quanto negativos) e o valor do χ^2 das medidas dos sensores.

4.2.2. Estudo das Características dos Relâmpagos

Com base nas conclusões da análise de desempenho do sistema, obteve-se elementos suficientes a respeito da potencialidade e limitações do SLT os quais nortearam um estudo das características dos relâmpagos na Região Sudeste do Brasil. Com isso, definiu-se como objetivo principal deste estudo verificar as variações sazonais dos relâmpagos ocorridos nessa região nos últimos dois anos (1999 e 2000) em função de sua intensidade de corrente e multiplicidade. Convém ressaltar, também, que não poderá ser avaliada a influência da latitude nas características dos relâmpagos devido à pequena região disponível para estudo, cuja extensão norte-sul é de apenas 7°.

4.2.2.1. Cenário de Configuração e Região de Estudo

Para estudar mais detalhadamente as características dos relâmpagos de uma determinada região continental são necessários dados com os melhores níveis de qualidade e confiabilidade possíveis dentro das limitações intrínsecas do sistema. Desta forma, optou-se por analisar somente os relâmpagos ocorridos na **Região Interna** da malha de sensores (Figura 4.2) que abrange quase a totalidade da Região Sudeste. Esta área, conforme já discutido na Seção 4.2.1.2, apresenta a distribuição mais densa e uniforme de sensores do SLT, contribuindo assim para a obtenção de informações mais precisas e confiáveis. Além da melhor área de cobertura da rede, decidiu-se também utilizar os dados gerados a partir do cenário G, devido ao seu melhor desempenho no que se refere à qualidade e confiabilidade das informações. Em suma, a escolha da área de estudo e do cenário de configuração para geração dos dados procurou agrupar todos os recursos estudados do SLT de forma a maximizar seu desempenho e, com isso, minimizar a influência da instrumentação nos resultados finais.

4.2.2.2. Período dos Dados

Visando estudar a sazonalidade das características dos relâmpagos, utilizou-se os mesmos períodos de tempo empregados na análise de desempenho do SLT: o verão e o inverno dos anos de 1999 e 2000, conforme descrição na Seção 4.2.1.1. Devido ao grande volume de dados registrado em um ano completo e a conseqüente dificuldade no processamento e interpretação dessas informações no tempo disponível, optou-se pela análise dos relâmpagos em apenas duas estações do ano (verão e inverno). A escolha dos anos de 1999 e 2000 para a realização do estudo garantiu que o sistema não sofrera nenhuma alteração de sua rede de sensores e nem de suas configurações básicas durante todo o período de tempo considerado. Desta forma, elimina-se a possibilidade de distorções nos resultados em função de mudanças nas características físicas do sistema.

4.2.2.3. Obtenção dos Dados

As informações utilizadas nesta parte do trabalho foram obtidas do mesmo conjunto de dados empregado na análise de desempenho. A Tabela 4.6 ilustra como as informações de interesse para o estudo das principais características dos relâmpagos foram derivadas dos dados do SLT via processamento computacional. Desta forma, considerou-se, nesta análise, os seguintes parâmetros físicos dos relâmpagos: a intensidade de corrente para os negativos e positivos, considerando também a corrente dos simples e múltiplos separadamente; a multiplicidade, o tempo de subida e a largura de pulso tanto para os positivos quanto para os negativos; o percentual de positivos e, finalmente, o número total de relâmpagos positivos e negativos estudados.

4.2.2.4. Método Estatístico de Análise

O método estatístico utilizado para comparar e identificar eventuais diferenças significativas entre os resultados foi o mesmo utilizado na análise de desempenho do sistema, tendo sido descrito na Seção 4.2.1.5.

4.2.3. Estudo Preliminar de Relâmpagos sobre Regiões Densamente Povoadas

Um outro importante aspecto do estudo de relâmpagos relaciona-se com a análise da influência das condições locais (sejam elas orográficas, climatológicas, meteorológicas, geográficas ou mesmo antropogênicas) no número de ocorrências do fenômeno e sobre suas características. Desta forma, esta parte do trabalho teve como objetivo fundamental realizar um levantamento preliminar de como as condições locais de uma dada região de interesse afeta, principalmente, o número de relâmpagos que ocorrem naquela região. Particularmente, as regiões selecionadas foram as grandes áreas urbanas as quais apresentam elevados índices populacionais e altos níveis de industrialização. A idéia básica foi verificar se as áreas densamente povoadas teriam algum efeito sobre a ocorrência de relâmpagos e, eventualmente, determinar se haveria alguma influência das condições locais em suas características. Devido ao caráter preliminar do estudo proposto, foram consideradas apenas a formação de ilhas de calor e acúmulo de poluição atmosférica como condições locais. Isso porque houve um interesse em verificar-se como a ação do homem, representada pela construção dos grandes centros urbanos, estaria interferindo no comportamento local dos relâmpagos.

Obviamente, este constitui um estudo bastante complexo, que envolve a análise de diversas variáveis relacionadas com as condições locais da região considerada e com o desempenho do sistema de localização nessa mesma região. Em termos das condições locais, seria necessário abordar também questões ligadas à orografia, meteorologia e geografia da área estudada. Já os aspectos do desempenho do SLT a serem abordados concentrar-se-iam na eficiência de detecção da rede e a precisão da localização e da determinação dos parâmetros físicos. Entretanto, para tornar o estudo proposto viável no tempo disponível, optou-se apenas por avaliar de forma quantitativa o impacto da ação antropogênica sobre a formação das nuvens de tempestades e, conseqüentemente, sobre os relâmpagos, sem a preocupação de obter-se as devidas explicações físicas e conclusões definitivas sobre o assunto. Desta forma, uma abordagem mais simplificada não invalida os resultados um vez que estes serão importantes para direcionar estudos mais completos no futuro.

4.2.3.1. Período dos Dados

O conjunto de dados selecionado teve como objetivo principal abranger um período no qual o SLT não tenha sofrido alterações em sua rede de sensores e em suas configurações físicas básicas. Além disso, houve a preocupação de incluir os dados do verão de 2001 nas análises devido não só ao elevado número de relâmpagos registrado nesse período, como também utilizar as informações mais recentes no estudo. Por outro lado, decidiu-se não incluir os dados de inverno devido ao reduzido número de descargas atmosféricas registrado, impossibilitando assim qualquer análise conclusiva de relevância estatística. Com isso, os períodos selecionados foram: (1) Verão de 2000, entre os dias 07/Nov/1999 e 06/Fev/2001; (2) Verão de 2001, compreendendo os dias 07/Nov/2000 a 06/Fev/2001.

Um elemento importante que teve papel decisivo na escolha do período de dados foi o sensor IMPACT de Cachoeira Paulista/SP, o qual esteve inoperante entre 10/Jan/1998 a 24/Fev/1999 e 07/Fev/2001 a 03/Mar/2001. Como este sensor é o principal responsável pela boa cobertura da região do Vale do Paraíba e a cidade de São Paulo, os dados de relâmpagos dessas regiões para os períodos em que o sensor esteve fora de operação, com certeza, estariam sujeitos a grandes imprecisões e baixos níveis de qualidade. Por esse motivo, o verão de 1999 foi descartado das análises e o verão de 2000 e 2001 foi adiantado em quase dois meses em relação às datas oficiais, que definem o início da estação no final de dezembro e seu término no final de março.

4.2.3.2. Regiões de Estudo

Para avaliar a influência dos grandes centros urbanos sobre o comportamento dos relâmpagos, foram selecionadas três regiões do estado de São Paulo onde notadamente haja grandes concentrações populacionais e elevados índices de atividade industrial: (1) Grande Campinas; (2) Grande São Paulo; (3) Vale do Paraíba, conforme mostra a Figura 4.3.

- 1) **Grande Campinas** – Com uma área de 4.900 km² (70 x 70 km), está centrada no município de Campinas e seus limites são -22,570344°N, -23,199870°S, -47,374660°O; -46,691348°L;

2) **Grande São Paulo** – Centrada no município de São Paulo, possui uma área de 10.000 km² (100 x 100 km). Seus limites são -23,218802°N, -24,118124°S, -47,146869°O; -46,164951°L;

3) **Vale do Paraíba** – Possui uma área de 16.500 km² (150 x 110 km) e seus limites são -22,465437°N, -23,454692°S, -46,148071°O; -44,683315°L.

Com o objetivo de estudar o comportamento dos relâmpagos em toda a extensão do Vale do Paraíba, acompanhando o trajeto da Rodovia Presidente Dutra (BR-116) desde o município de São Paulo/SP até o município do Rio de Janeiro/RJ, selecionou-se uma grande região de 92.400 km² (385 x 240 km), denominada **Dutra** (Figura 4.4), cujos limites são: -22,039866°N, -24,198238°S, -46,859256°O, -43,094687°L.

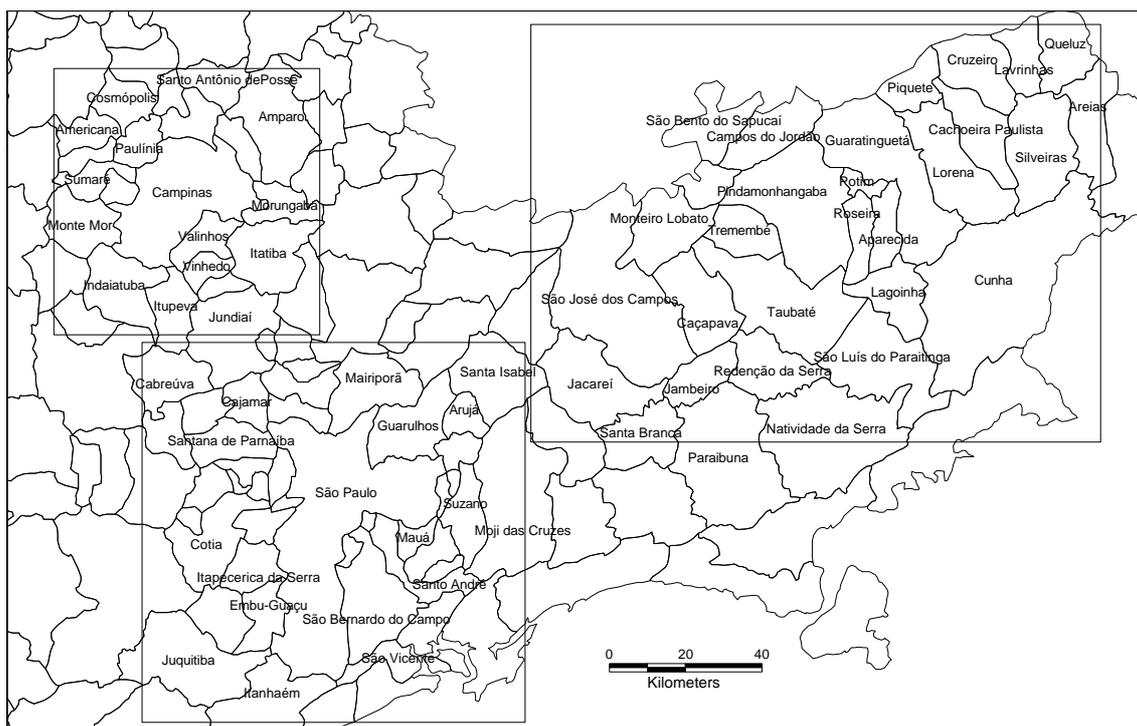


Fig. 4.3 – Regiões com elevada concentração populacional e intensa atividade industrial (Grande Campinas, Grande São Paulo e Vale do Paraíba) selecionadas para o estudo da influência da ação do homem sobre o comportamento dos relâmpagos.



Fig. 4.4 – Região do Vale do Paraíba que compreende a BR-116 ligando São Paulo/SP ao Rio de Janeiro/RJ com destaque para as principais cidades cortadas pela rodovia.

4.2.3.3. Cenários de Configuração e Obtenção dos Dados

Como este trabalho consiste em estudar tanto a ocorrência de relâmpagos nas regiões consideradas como suas características, houve a necessidade de utilizar-se dois cenários de configuração diferentes para a obtenção dos dados junto à central de processamento. Na análise do número de relâmpagos, era necessário um cenário que apresentasse boa qualidade das informações, sem restringir excessivamente o registro de relâmpagos NS. Por outro lado, na análise das características dos relâmpagos, era imprescindível um cenário mais exigente quanto à qualidade dos dados, sem se preocupar entretanto com o número de relâmpagos. A solução encontrada foi a utilização do cenário E para obtenção do número de relâmpagos em cada região e o cenário G para as informações referentes à suas características.

No período entre 05/Mar/2001 e 16/Mar/2001, foram reprocessados os dados dos sensores utilizando ambos os cenários para as regiões e períodos de tempo de interesse. Foram então selecionadas duas informações relacionadas com as características das descargas: intensidade de corrente e multiplicidade. Com base nesses dados, fornecidos diretamente pelo sistema, derivou-se então os dados de interesse para as regiões estudadas através de processamento computacional utilizando um programa comercial chamado *MapInfo Professional*. A Tabela 4.8 mostra os dados gerados pelo SLT e os resultados obtidos após o processamento.

TABELA 4.8 – INFORMAÇÕES DERIVADAS DOS DADOS DO SLT UTILIZADAS NO ESTUDO SOBRE REGIÕES DENSAMENTE POVOADAS

<i>Dados SLT</i>	<i>Dados Derivados</i>
Intensidade de Corrente	No. de Relâmpagos Negativos e Positivos
	Percentual de Positivos
	Intensidade de Corrente Negativos
	Intensidade de Corrente Positivos
Multiplicidade	Multiplicidade dos Negativos
	Multiplicidade dos Positivos

Através do programa *MapInfo*, as regiões de estudo foram divididas em pequenos quadrados de 4 km². Para cada quadrado, foram então contabilizados o número de relâmpagos positivos e negativos, o percentual de positivos, a intensidade média de corrente dos negativos e positivos e a multiplicidade média dos positivos e negativos, gerando assim os chamados mapas temáticos, que representam, cada um, uma única informação (por ex.: intensidade de corrente dos negativos ou número de relâmpagos negativos). Esses mapas são construídos automaticamente pelo programa com base em um determinado número de intervalos de valores, identificados por diferentes tons de cinza (os mais claros representando valores menores e os mais escuros, valores mais elevados) e calculados usando um algoritmo que minimiza a diferença entre os valores dos dados e suas respectivas médias dentro de cada intervalo, produzindo assim uma representação mais exata das informações. A partir daí, verifica-se em qual intervalo cada um dos quadrados se enquadra, o qual é então preenchido com o respectivo tom de cinza do intervalo. Finalmente, determina-se quantos quadrados foram associados a cada intervalo.

CAPÍTULO 5

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SLT

5.1.1. Contaminação por Relâmpagos IN

Utilizar o SLT para detectar relâmpagos IN e, conseqüentemente, determinar suas características não representa uma tarefa de grande valor prático devido basicamente a três fatores: (1) Apenas os relâmpagos que atingem o solo são efetivamente os responsáveis pelos danos diretos e indiretos sobre os seres humanos sendo, portanto, o foco das pesquisas de relâmpagos; (2) Os relâmpagos IN ocorrem a grandes distâncias dos sensores (a pelo menos 1.500m de altitude), apresentam formas de ondas de radiação EM distintas dos relâmpagos que atingem o solo e possuem baixa intensidade de corrente em comparação com os relâmpagos NS. Por esses motivos, tais relâmpagos são detectados com baixíssimo nível de qualidade pelo sistema e, portanto, apresentam dados de localização e características pouco confiáveis; (3) Os modelos matemáticos empregados pelo LP2000 no cálculo das soluções assumem apenas eventos na superfície terrestre. Desta forma, embora o SLT possa detectar relâmpagos IN, essa informação deve ser usada com muito critério e apenas em caráter quantitativo. Além disso, na maioria das aplicações práticas, deseja-se justamente que os relâmpagos IN não sejam detectados em conjunto com os NS.

A atual composição da rede de sensores do SLT em estudo não permite a detecção de relâmpagos IN. Isso porque as antenas IMPACT estão configuradas para discriminá-los através dos critérios de razão E/B, que permite diferenciar sinais de relâmpagos do ruído ambiente, e da largura de pulso. Desta forma, presume-se que todos os relâmpagos, em cujas soluções pelo menos uma antena IMPACT tenha participado, sejam relâmpagos NS pois os IN teriam sido descartados diretamente pelo(s) sensor(es). Com isso, conclui-se que os relâmpagos IN somente poderão ser detectados quando apenas antenas LPATS participarem das soluções, as quais não possuem critérios de discriminação. Tal fato pode

ser verificado analisando os dados gerados pelo sistema, que classifica os relâmpagos detectados e corretamente localizados como IN (C) ou NS (G). Neste caso, observa-se que, para os eventos classificados como C, apenas sensores LPATS participaram da solução. Além disso, o sistema também indica que as informações de horário desses eventos não são precisas, comprovando o que foi discutido sobre a qualidade das informações fornecidas.

Desta forma, cenários de configuração que não exijam a participação de pelo menos uma antena IMPACT nas soluções estão mais sujeitos à contaminação dos dados de relâmpagos NS por IN. Esta importante conclusão será comprovada na análise de qualificação realizada a seguir.

5.1.2. Estudo de Qualificação

Como já discutido no capítulo anterior, a análise da influência dos parâmetros de configuração do sistema sobre os dados de relâmpagos baseia-se na confecção de diferentes cenários de configuração que englobam a variação de cinco parâmetros, seguida pela comparação dos resultados, objetivando assim avaliar o efeito de cada parâmetro sobre as características dos relâmpagos e sobre a qualidade das informações fornecidas pelo sistema. Todos esses dados foram obtidos somente para os relâmpagos que atingiram a **Região Interna**, através dos registros do sistema operando em modo tempo real e do reprocessamento das informações dos sensores gravadas em disco utilizando-se sete cenários de configuração.

A Tabela 5.1 mostra o número total de relâmpagos NS válidos registrados pelo SLT para todos os oito cenários. Entenda-se por relâmpagos válidos, todos aqueles que tenham valores de largura de pulso entre 11 e 30 μ s, tempo de subida abaixo de 24 μ s e intensidade de corrente acima de 10kA para os positivos. Este último critério será explicado mais adiante. Observa-se nitidamente na Figura 5.1 como o número total de relâmpagos diminui a medida que os cenários tornam-se mais exigentes com relação aos parâmetros de configuração. Isso acontece simplesmente porque, quanto mais se aumenta o nível de exigência de qualidade para os resultados, cada vez menos relâmpagos enquadram-se nos critérios impostos sendo, então, eliminados pelo sistema. Vale lembrar que nenhuma

correção foi feita nos totais apresentados neste trabalho visando compensar a baixa eficiência de detecção do sistema para relâmpagos mais fracos (abaixo de 10kA).

TABELA 5.1 – NÚMERO TOTAL DE RELÂMPAGOS NS DA REGIÃO INTERNA

Cenários	Verão 2000	Verão 1999	Inverno 2000	Inverno 1999
R	466.496	778.170	66.704	37.923
A	563.507	–	86.325	53.028
B	501.037	–	74.384	41.753
C	562.223	1.043.940	86.281	53.015
D	499.307	887.615	74.318	41.730
E	460.585	810.597	67.217	37.715
F	405.081	535.197	56.907	30.858
G	403.543	533.094	56.560	30.594

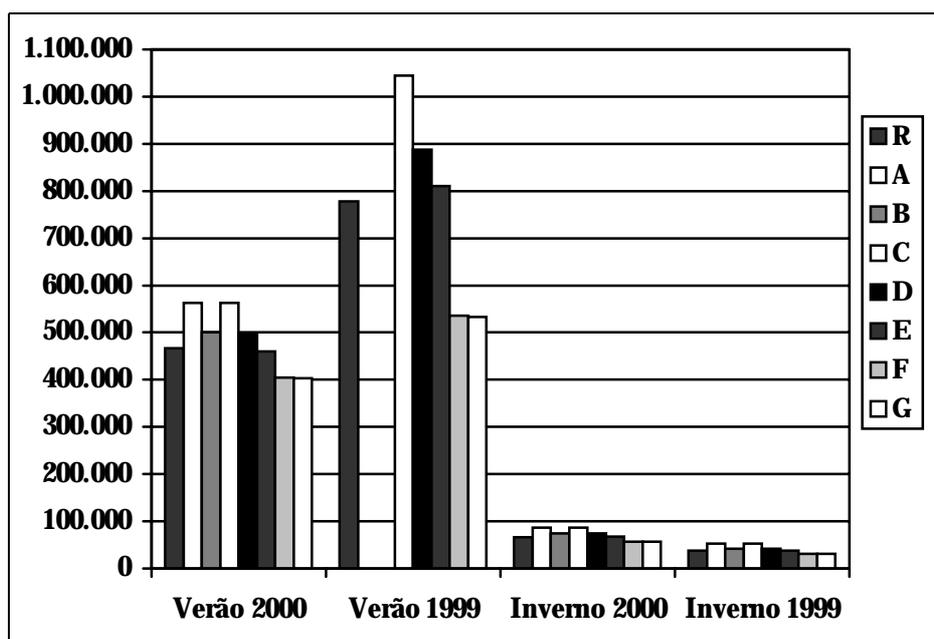


Fig. 5.1 – Número total de relâmpagos NS registrados na Região Interna.
 FONTE: Tabela 5.1

Observa-se também que o cenário R, correspondente ao SLT operando em modo tempo real, apresenta sempre um número de relâmpagos menor que o cenário equivalente operando em modo reprocessamento (cenário A). Isso confirma a discussão da Seção 3.5

onde comentou-se que o SLT perde muitos eventos operando em tempo real devido ao atraso no recebimento das informações de alguns sensores, o que invalida muitas soluções. No modo reprocessamento, entretanto, os dados dos sensores desconsiderados anteriormente, são agora incorporados nas soluções, aumentando assim o número de eventos válidos.

A Tabela 5.2 mostra o percentual de participação das antenas IMPACT nas soluções para os quatro períodos considerados em função de apenas seis cenários. Os cenários F e G foram retirados dessa análise porque exigem a participação de pelo menos um sensor IMPACT nas soluções e, por esse motivo, para estes cenários, o percentual será sempre 100%. A média apresentada na tabela não inclui os valores obtidos através do cenário R (modo tempo real).

TABELA 5.2 – PERCENTUAL DE PARTICIPAÇÃO DOS SENSORES IMPACT

Cenários	Verão 2000	Verão 1999	Inverno 2000	Inverno 1999
R	80,02%	54,84%	71,79%	73,64%
A	71,72%	–	66,67%	63,41%
B	78,25%	–	73,66%	71,27%
C	71,65%	48,54%	66,65%	63,40%
D	78,19%	55,39%	73,64%	71,26%
E	85,01%	60,77%	81,59%	78,71%
Média	76,96%	54,90%	72,44%	69,61%

Claramente a Figura 5.2 mostra que o verão de 1999 sofreu uma significativa redução da média de participação de sensores IMPACT nas soluções para todos os cenários. Isso porque, a antena de Cachoeira Paulista/SP esteve fora de operação durante o período de 10/Jan/1998 a 24/Fev/1999, o qual engloba quase 70% do verão de 1999. Desta forma, durante a maior parte deste período, somente três antenas IMPACT estiveram efetivamente fornecendo informações de descargas nas regiões de estudo. Como esses sensores são mais sofisticados que as antenas LPATS, supõe-se que suas informações sejam mais confiáveis e precisas e, desta forma, espera-se que um menor número de antenas IMPACT na rede implique em um prejuízo da qualidade dos dados gerados pelo sistema

para aquela região naquele período de tempo. Com a discussão a seguir, tratando da confiabilidade dos cenários de configuração, incluindo aqueles que exigem a participação de antenas IMPACT, poder-se-á avaliar o papel destas na qualidade dos resultados e verificar como a ausência do sensor de Cachoeira Paulista/SP pode afetar o comportamento do sistema na região.

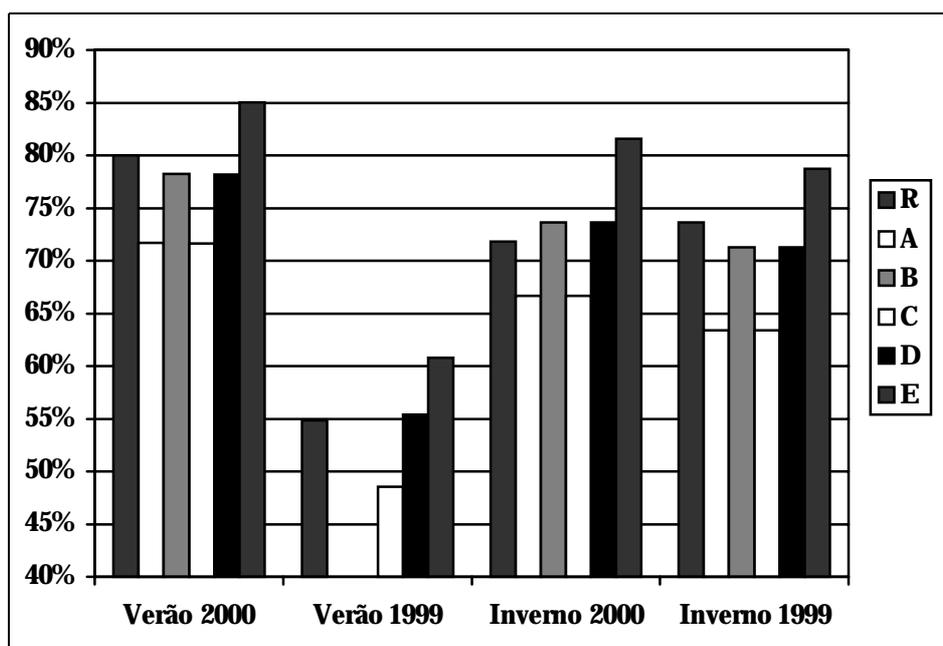


Fig. 5.2 – Percentual de participação dos sensores IMPACT (Região Interna).
 FONTE: Tabela 5.2.

A Tabela 5.3 apresenta os valores de chi-quadrado (χ^2) obtidos para os oito cenários nos quatro períodos estudados. Como o χ^2 representa o desvio das informações dos sensores participantes em relação à solução final de uma descarga então, quanto menores os valores desta grandeza, menores serão os desvios associados às soluções. Conseqüentemente, mais precisas serão as localizações dadas pelo sistema e, assim, mais confiáveis serão também os valores de intensidade de corrente, uma vez que a determinação do RNSS de uma descarga está intimamente relacionada com sua distância aos sensores que, por sua vez, depende de sua localização.

Observa-se nitidamente através da Figura 5.3 uma redução do valor do χ^2 para os cenários mais exigentes em todos os períodos. Este resultado possui uma relevância significativa para este estudo pois confirma o fato de que cenários mais exigentes levam a melhores índices de qualidade dos resultados. Como os cenários F e G, que exigem a participação de pelo menos uma antena IMPACT, apresentaram os menores valores de χ^2 , conclui-se que a participação desses sensores nas soluções garantem uma melhor qualidade dos dados.

TABELA 5.3 – VALORES MÉDIOS DE χ^2 NA REGIÃO INTERNA

Cenários	Verão 2000	Verão 1999	Inverno 2000	Inverno 1999
R	3,71	3,66	4,15	4,21
A	3,51	–	3,93	4,07
B	1,97	–	1,92	1,98
C	3,51	4,15	3,93	4,07
D	1,95	2,00	1,92	1,98
E	1,93	2,00	1,86	1,92
F	1,88	1,86	1,77	1,76
G	1,87	1,86	1,76	1,75

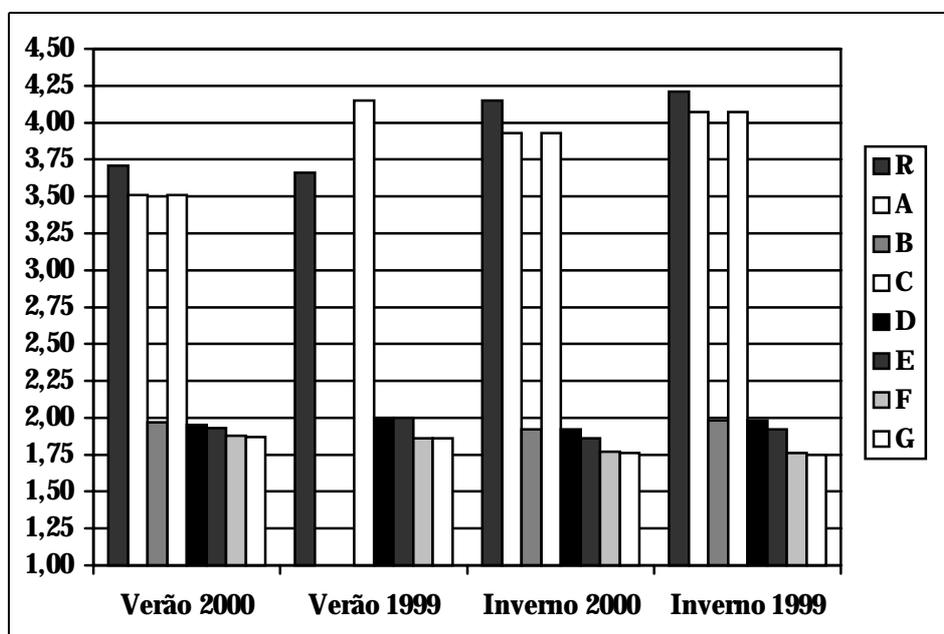


Fig. 5.3 – Valores médios do erro de localização (χ^2) para a Região Interna.
 FONTE: Tabela 5.3.

Entretanto, um fato interessante também pode ser constatado através da Tabela 5.3. A ausência de uma antena IMPACT durante a maior parte do verão de 1999, ao contrário do que se esperava, não alterou a qualidade dos dados desse período. Basta observar a proximidade dos valores de χ^2 para os cenários F e G nos verões de 1999 e 2000. A explicação mais provável para isso está no fato de que, dentro da Região Interna como um todo, somente os três sensores IMPACT foram suficientes para manter a qualidade das informações (incluindo Manoel Ribas/PR).

Um outro parâmetro de qualidade que pode ser usado para avaliar os cenários está relacionado com a contaminação dos dados por relâmpagos IN. Devido à grande dificuldade do SLT em discriminar os relâmpagos IN, costuma-se adotar o número de relâmpagos positivos com correntes inferiores a 10kA como um critério alternativo para medir a contaminação dos dados por IN. Isso porque, na maioria das vezes, os relâmpagos IN são erroneamente registrados pelo sistema como relâmpagos NS positivos com baixa intensidade de corrente (Orville e Huffines. 1999a). Por esse motivo, uma forma prática de minimizar os efeitos da contaminação dos dados de relâmpagos NS por IN consiste em desprezar todos os relâmpagos positivos com correntes menores que 10kA. Isso garante que eventuais erros de classificação do sistema não interfiram nos dados de relâmpagos positivos reais. Este procedimento foi adotado no processamento de todos os dados utilizados neste trabalho.

A Tabela 5.4 e as Figuras 5.4 e 5.5 mostram o número de relâmpagos IN e de positivos com corrente abaixo de 10kA detectados pelo sistema em função de cada cenário para os quatro períodos de estudo. Os valores percentuais abaixo dos números absolutos representam a proporção em relação ao número total de relâmpagos detectados.

TABELA 5.4 – NÚMERO DE RELÂMPAGOS IN E POSITIVOS ABAIXO DE 10kA

Cenários	Relâmpagos IN				Positivos < 10kA			
	Verão 2000	Verão 1999	Inverno 2000	Inverno 1999	Verão 2000	Verão 1999	Inverno 2000	Inverno 1999
R	6.692	7.132	1.080	321	3.043	13.934	766	65
	1,27%	0,89%	1,31%	0,65%	0,58%	1,74%	0,93%	0,13%
A	5.180	–	650	125	6.872	–	1.495	243
	0,90%	–	0,74%	0,23%	1,19%	–	1,69%	0,46%
B	4.151	–	646	115	4.495	–	908	145
	0,81%	–	0,85%	0,27%	0,88%	–	1,20%	0,35%
C	5.180	11.692	650	125	6.872	43.288	1.495	243
	0,90%	1,06%	0,74%	0,23%	1,20%	3,94%	1,69%	0,46%
D	4.151	10.854	646	115	4.495	28.640	908	145
	0,82%	1,17%	0,85%	0,27%	0,89%	3,09%	1,20%	0,35%
E	0	0	0	0	2.175	13.635	388	40
	0%	0%	0%	0%	0,47%	1,65%	0,57%	0,11%
F	0	0	0	0	223	392	45	10
	0%	0%	0%	0%	0,06%	0,07%	0,08%	0,03%
G	0	0	70	0	192	254	42	5
	0%	0%	0%	0%	0,05%	0,05%	0,07%	0,02%

Analisando os dados da Tabela 5.4, observa-se uma redução tanto no número de IN como de relâmpagos positivos abaixo de 10kA para os cenários mais exigentes. Mais especificamente, para os cenários E, F e G, o números de relâmpagos IN chega a ser nulo e os percentuais de positivos abaixo de 10kA, em geral, são menores que 0,5%. Isso confirma novamente a maior confiabilidade dos cenários F e G em relação aos demais. Curiosamente, em termos do número de relâmpagos IN, o cenário E, que não exige a participação de antenas IMPACT, apresentou o mesmo resultado obtido para aqueles que exigem (cenários E e F). Isso mostra seu melhor desempenho quando comparado com os demais cenários que também não exigem a participação de sensores IMPACT nas soluções (cenários A, B, C e D).

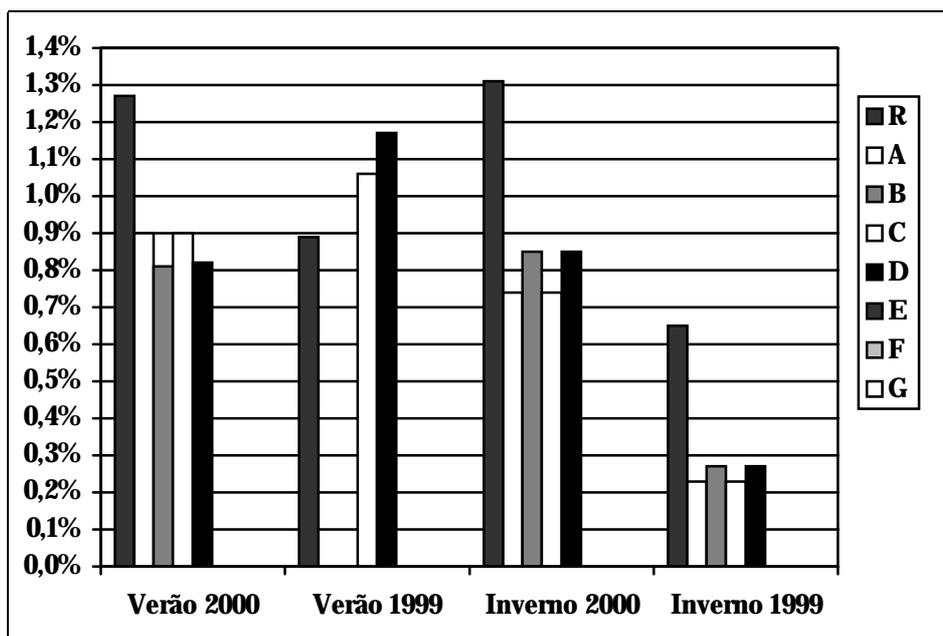


Fig. 5.4 – Percentual de relâmpagos IN detectados pelo SLT (Região Interna).
 FONTE: Tabela 5.4.

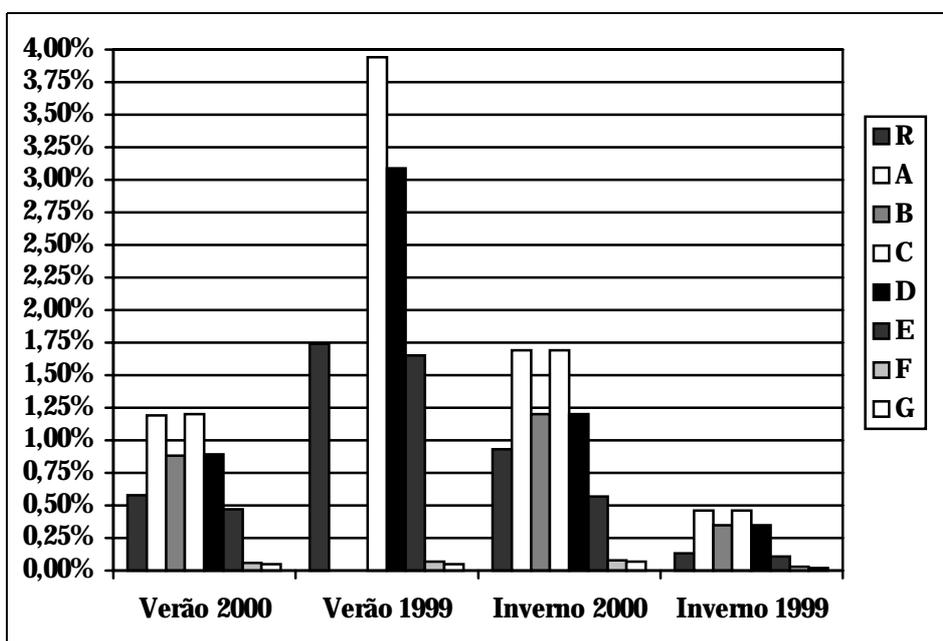


Fig. 5.5 – Percentual de relâmpagos positivos abaixo de 10kA (Região Interna).
 FONTE: Tabela 5.4.

As Tabelas 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8 apresentam os resultados do teste estatístico aplicado sobre os valores médios de dois cenários para os quatro períodos estudados. Cada par de cenários foi escolhido visando comparar um parâmetro específico, conforme mostrado na Tabela 4.7. Os valores representam as diferenças percentuais entre as médias das respectivas informações para os dois cenários considerados. O sinal negativo indica que houve uma redução do valor médio de um cenário para outro. Por outro lado, o sinal positivo indica um aumento. A diferença percentual entre duas médias é calculada pela expressão:

$$\frac{a_1 - a_2}{\text{máx}(a_1, a_2)} \quad (5.1)$$

onde a_1 e a_2 são os valores médios dos cenários para os quais se deseja calcular a diferença em relação ao maior valor entre a_1 e a_2 (considerado como 100%). Os números em cinza indicam que não há diferença significativa entre os valores médios daquela informação para os dois cenários considerados. Neste trabalho, somente serão consideradas diferenças com nível de significância igual ou inferior a 1%. Já os valores em preto indicam que há uma diferença significativa, ou seja, $\alpha \leq 0,01$. Esta será a convenção empregada em todo trabalho.

Analisando as Tabelas 5.5 e 5.6, observa-se que não há diferenças significativas entre os cenários A x C, B x D e F x G para a maioria dos dados em ambos os verões. Isso significa que a redução do parâmetro *Ratio* de 1,5 para 1,3 (A x C e B x D) e a utilização do parâmetro *Allow* com valor *No* para os cenários que exigem a participação de uma antena IMPACT (F x G) não apresentaram influência significativa sobre os resultados. Já era esperado que o efeito do parâmetro *Allow* em cenários que exigem a participação de sensores IMPACT fosse pouco significativo uma vez que esse parâmetro com valor *No* tende a reduzir a contaminação de relâmpagos IN (conforme Tabela 4.3). Como essas antenas possuem critérios de discriminação para esses relâmpagos, a contaminação tende a ser barrada nos próprios sensores. Mesmo assim, observa-se uma pequena parcela chegando até a central de processamento através da diferença nos dados de corrente dos positivos, mostrando que o parâmetro *Allow* ainda atuou sobre os resultados. Essa diferença é ainda mais evidente no verão de 1999 (incluindo negativos e positivos),

provavelmente, devido à ausência da IMPACT de Cachoeira Paulista/SP. Esse seria um primeiro efeito importante sobre o comportamento do sistema devido à falta de um sensor IMPACT em uma rede com poucas antenas deste tipo.

TABELA 5.5 – COMPARAÇÃO ENTRE CENÁRIOS PARA O VERÃO DE 2000

Verão 2000	χ^2	Corrente		Multiplicidade	
		Negativos	Positivos	Negativos	Positivos
R x A	-5,42%	6,25%	-10,82%	2,91%	1,92%
A x B	-43,97%	2,01%	3,27%	-4,24%	-1,32%
A x C	-0,07%	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%
B x D	-0,58%	0,03%	-0,04%	0,01%	0,01%
D x E	-1,31%	0,86%	13,95%	-0,05%	-1,48%
D x F	-3,88%	3,40%	37,33%	-4,59%	-2,98%
F x G	-0,25%	0,31%	1,53%	-0,11%	-0,03%

TABELA 5.6 – COMPARAÇÃO ENTRE CENÁRIOS PARA O VERÃO DE 1999

Verão 1999	χ^2	Corrente		Multiplicidade	
		Negativos	Positivos	Negativos	Positivos
D x E	-0,03%	1,03%	12,83%	-0,12%	-1,53%
D x F	-6,87%	5,41%	42,61%	-8,05%	-2,61%
F x G	-0,16%	0,58%	4,38%	-0,06%	-0,06%

Para os dados dos invernos de 1999 e 2000 (Tabelas 5.7 e 5.8), fica ainda mais evidente que não há diferenças significativas entre os cenários A x C, B x D e F x G. Desta forma, confirma-se que não há influência da redução do parâmetro *Ratio* e a utilização do parâmetro *Allow* com valor *No* quando se exige antenas IMPACT nas soluções.

TABELA 5.7 – COMPARAÇÃO ENTRE CENÁRIOS PARA O INVERNO DE 2000

Inverno 2000	χ^2	Corrente		Multiplicidade	
		Negativos	Positivos	Negativos	Positivos
R x A	-5,29%	5,34%	-13,74%	-0,13%	0,95%
A x B	-51,24%	2,18%	9,01%	-3,52%	-1,14%
A x C	-0,01%	0,00%	-0,07%	0,02%	0,00%
B x D	-0,01%	0,03%	-0,03%	0,02%	0,00%
D x E	-3,07%	0,49%	15,02%	-0,13%	-1,33%
D x F	-7,56%	5,30%	27,09%	-5,28%	-2,36%
F x G	-0,37%	0,13%	1,03%	-0,03%	-0,06%

TABELA 5.8 – COMPARAÇÃO ENTRE CENÁRIOS PARA O INVERNO DE 1999

Inverno 1999	χ^2	Corrente		Multiplicidade	
		Negativos	Positivos	Negativos	Positivos
R x A	-3,25%	10,84%	-10,49%	0,82%	0,96%
A x B	-51,36%	3,64%	6,94%	-8,06%	-1,07%
A x C	-0,02%	0,02%	0,00%	0,01%	0,00%
B x D	-0,02%	0,03%	-0,03%	0,01%	0,00%
D x E	-2,99%	0,65%	11,71%	-0,11%	-0,87%
D x F	-11,17%	4,21%	20,35%	-3,26%	-1,21%
F x G	-0,42%	0,20%	0,84%	-0,08%	-0,02%

Por outro lado, a comparação entre os outros cenários (R x A, A x B, D x E, D x F) mostraram diferenças significativas entre os resultados para todos os períodos estudados, as quais referem-se, respectivamente, ao efeito do reprocessamento dos dados dos sensores em relação aos dados gerados em tempo real, à mudança para o arquivo *locate.cfg* novo, ao efeito do parâmetro *Allow* com valor *No* sobre os dados de cenários que não exigem a participação de sensores IMPACT e ao efeito de exigir-se a participação de antenas IMPACT nas soluções. Estes resultados levam a conclusões muito importantes do ponto de vista do comportamento do sistema associado à configuração dos sensores e da central. Fica claro que o reprocessamento (R x A) apresenta diferenças significativas nos resultados quando comparados com os dados gerados em tempo real, chegando a valores da ordem de 10% para a intensidade da corrente de pico. Um outro resultado esperado refere-se à

mudança dos valores dos parâmetros de configurações do arquivo *locate.cfg* (A x B) com base no relatório da GAI, o qual também apresentou reduções expressivas (de até 50% em média) no valor do χ^2 das soluções, mostrando que o objetivo da GAI foi efetivamente melhorar a qualidade dos resultados gerados pelo SLT. A influência do parâmetro *Allow* com valor *No* sobre dados de cenários que não exigem antenas IMPACT também já era esperada, uma vez que cerca de 25% a 30% das soluções, em média, envolvem apenas sensores LPATS (veja Tabela 5.2). Desta forma, não havendo discriminação dos relâmpagos IN diretamente nas antenas, resta à central de processamento extrair os possíveis IN. Além disso, conforme já foi discutido, o cenário E apresentou os menores níveis de contaminação mesmo sem exigir pelo menos uma IMPACT (veja Tabela 5.4). Por fim, a exigência da participação de pelo menos uma IMPACT nas soluções também leva a diferenças significativas nos resultados uma vez que tais sensores apresentam melhor desempenho na medição das características da radiação e discriminação de sinais que não sejam provenientes de relâmpagos NS. Esse resultados também são expressivos, com destaque para a corrente dos positivos, a qual apresentou aumentos de até 40% em seus valores médios absolutos. Este resultado está provavelmente associado à redução da contaminação dos dados por relâmpagos IN mais intensos, devido à participação das antenas IMPACT em 70% a 75% das soluções. Como acredita-se que tais relâmpagos sejam erroneamente classificados pelo sistema como relâmpagos NS positivos de baixa intensidade (podendo algumas vezes ultrapassar 10kA), uma menor taxa de contaminação por IN, eleva a média da corrente dos relâmpagos positivos.

Todas essas conclusões permitem traçar perfis de comportamento do sistema em função de cada cenário utilizado. Entre os cenários que trabalham com dados reprocessados (do A até o G), observou-se que o cenário G apresentou a melhor qualidade dos resultados, associada com as menores taxas de contaminação por IN. Entretanto, pela Figura 5.1, observa-se que o número de relâmpagos registrados por este cenário é relativamente pequeno, com uma redução média de 40% em relação ao cenário A, o qual apresentou, entretanto, os maiores valores de χ^2 em comparação com os outros cenários, obtendo assim o pior índice de qualidade dos dados, aliado a altas taxas de contaminação por IN. Desta forma, o cenário E configurou-se como um intermediário que soube balancear uma boa quantidade de

relâmpagos detectados (cerca de 23% a menos que o cenário A, em média) com bons níveis de qualidade (χ^2 médio próximo ao valor do cenário G) e baixa taxa de contaminação por IN (em torno de 0,40%)

Analisando ainda os dados da Tabela 5.3, observa-se que o cenário B possui um nível de qualidade aceitável quando comparado com o cenário G. Com relação à contaminação de IN, os valores são mais discrepantes, como era esperado de um cenário que não exige participação de antenas IMPACT. O cenário B possui um valor médio de contaminação de 0,8%. Observa-se também, através da Tabela 5.1, que o número de descargas detectadas pelo cenário B possui a mesma ordem de grandeza do cenário A, o qual apresenta cerca de 40% mais relâmpagos que o cenário G. Por outro lado, o percentual de participação de antenas IMPACT constitui um dos menores valores (Tabela 5.2), fato que explica a alta taxa de contaminação por IN. Com base nessas conclusões, pode-se afirmar que o cenário B (equivalente a atual configuração do SLT) é satisfatório se o objetivo for monitorar o avanço das tempestades e acompanhar a evolução dos relâmpagos em larga escala. Para análises mais específicas de eventos isolados e das características dos relâmpagos, é fortemente recomendável o reprocessamento das informações utilizando cenários mais exigentes, como E ou G, dependendo dos níveis de qualidade e precisão desejados.

5.1.3. Estudo de Degradação e Efeito de Propagação

Conforme conclusões da seção anterior, para a região interna da malha de sensores, o cenário G apresentou o melhor desempenho no que se refere à qualidade e confiabilidade dos resultados. Com isso, para o estudo da degradação e do efeito de propagação sobre as informações geradas pelo SLT, foram utilizados os dados do cenário G para três regiões distintas em torno da malha de sensores: 1) a Região Interna, que engloba a própria rede de antenas detectoras; 2) a Região Externa Continental, que constitui uma área à oeste da malha sobre o continente e na mesma latitude; 3) a Região Externa Oceânica, que define uma área à leste da malha sobre o oceano e na mesma latitude. Com esses dados em mãos, foram feitas então várias análises para os quatro períodos de estudo (verão e inverno de 1999; verão e inverno de 2000) comparando-se os dados entre as regiões através das informações do número efetivo de relâmpagos positivos e negativos, os valores do χ^2 ,

intensidade de corrente e multiplicidade de negativos e positivos. Essas comparações permitiram estabelecer as diferenças de comportamento do sistema para relâmpagos detectados dentro e fora da malha da sensores (degradação), sobre o continente e sobre o oceano (efeito do modelo de propagação utilizado pelo SLT).

A Tabela 5.9 e a Figura 5.6 mostram o total de relâmpagos registrados pelo sistema nas Regiões Externas Continental e Oceânica para os quatro períodos estudados usando dados do cenário G.

TABELA 5.9 – N.º TOTAL DE RELÂMPAGOS NS NAS REGIÕES EXTERNAS

Regiões Externas	Verão 2000	Verão 1999	Inverno 2000	Inverno 1999
Continental	55.569	33.644	21.102	7.379
Oceânica	8.883	4.474	401	904

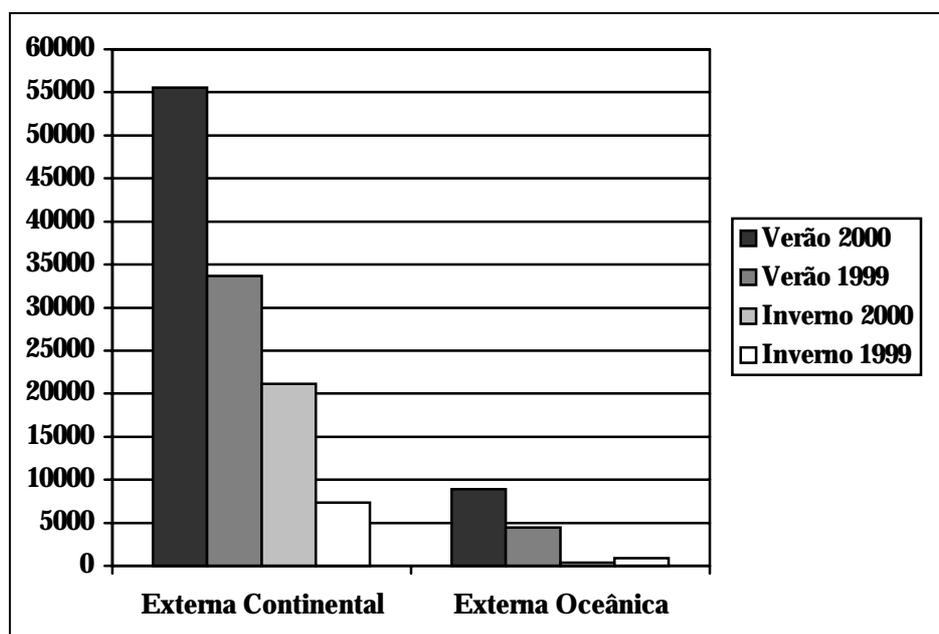


Fig. 5.6 – Total de relâmpagos NS nas Regiões Externas (dados do cenário G).
FONTE: Tabela 5.9.

Para verificar o nível de qualidade das informações geradas pelo sistema para essas regiões em comparação com a Região Interna, foram levantados os valores de χ^2 para as três

regiões nos quatro períodos estudados, os quais encontram-se na Tabela 5.10 e Figura 5.7. Os testes estatísticos para as médias do χ^2 entre todas as regiões resultaram em diferenças significativas para todos os períodos, conforme mostra a Tabela 5.11.

TABELA 5.10 – VALORES MÉDIOS DE χ^2 NAS TRÊS REGIÕES ESTUDADAS

Região	Verão 2000	Verão 1999	Inverno 2000	Inverno 1999
Externa Continental	2,49	1,58	2,66	2,98
Interna	1,87	1,86	1,76	1,75
Externa Oceânica	2,29	1,74	2,03	1,98

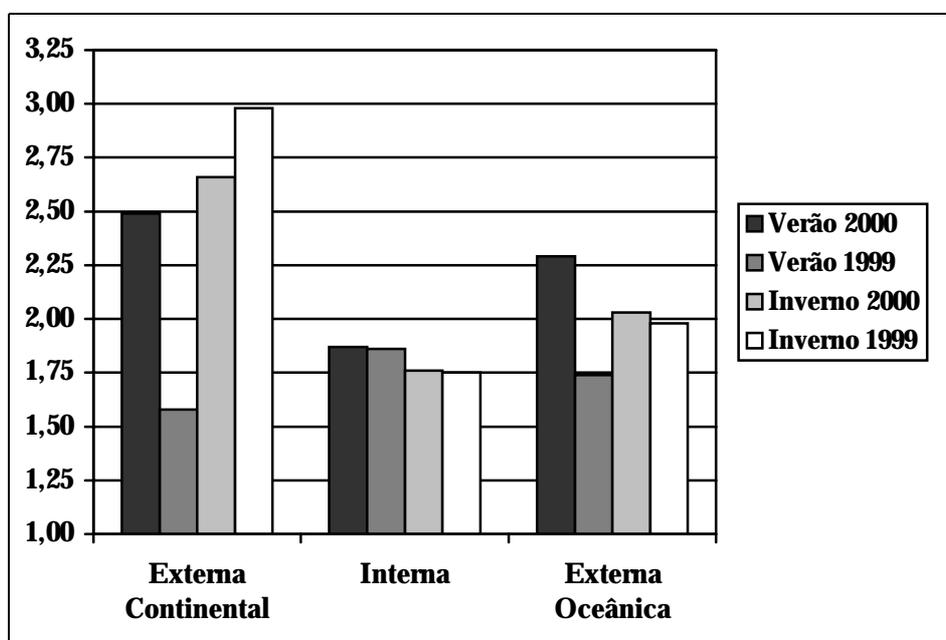


Fig. 5.7 – Valores médios de χ^2 para as três regiões de estudo (dados do cenário G).
FONTE: Tabela 5.10.

TABELA 5.11 – COMPARAÇÃO DOS VALORES DE χ^2 ENTRE AS REGIÕES

Período	Região	Externa Continental	Interna
Verão 2000	Interna	-24,84%	–
	Externa Oceânica	-8,32%	18,03%
Verão 1999	Interna	15,10%	–
	Externa Oceânica	9,45%	-6,24%
Inverno 2000	Interna	-33,81%	–
	Externa Oceânica	-23,75%	13,19%
Inverno 1999	Interna	-41,22%	–
	Externa Oceânica	-33,62%	11,45%

Analisando os dados das Tabelas 5.10 e 5.11, nitidamente percebe-se que os desvios das medidas dos sensores nas Regiões Externas são maiores que os desvios na Região Interna, uma vez que as regiões continental e oceânica encontram-se distantes da malha de sensores. Comparando-se ambas as Regiões Externas, surge um outro fato curioso: a qualidade dos dados da região oceânica é melhor que a região continental (segundo dados da Tabela 5.11, que indicam diferenças significativas para todas as comparações). Este fato deve-se, possivelmente, à menor atenuação sofrida pela radiação EM de um relâmpago quando se propaga sobre o oceano em comparação com o continente para uma mesma distância (Cooray. 1987, 2000). Sofrendo uma menor atenuação em relação ao continente, o sinal proveniente do oceano é mais intenso e, portanto, detectado com maior eficiência pelos sensores. Com isso, as informações de relâmpagos ocorridos no oceano são melhor aproveitadas pelo sistema que aquelas referentes a relâmpagos no continente para uma mesma distância da rede de sensores. Diante deste fato, pode-se afirmar que o alcance e a precisão dos dados do sistema para tempestades sobre o oceano é maior que para tempestades sobre o continente.

5.1.4. Influência do SLT sobre as Características dos Relâmpagos

5.1.4.1. Associada à Configuração

Na Seção 5.1.3, discutiu-se como a qualidade e confiabilidade das informações geradas pelo SLT variavam em função dos cenários de configuração. Nesta seção, será apresentado

como esses mesmos cenários influenciam na proporção de relâmpagos positivos e negativos e nos valores de corrente e multiplicidade para os diferentes períodos de tempo considerados. Como já se sabe, os cenários estão dispostos nas tabelas em ordem crescente de qualidade e confiabilidade, sendo o cenário G, o mais confiável e exigente.

Com base nos dados de corrente mostrados na Tabela 5.12, observa-se claramente através das Figuras 5.8 e 5.9 que, em todos os períodos, houve um aumento do valor absoluto da corrente de pico em direção aos cenários mais exigentes tanto para os relâmpagos negativos quanto para os positivos. Os resultados revelam também que cenário B (referente à atual configuração do sistema) apresenta valores de corrente menores que o cenário de referência G, com destaque para os relâmpagos positivos, cujas diferenças chegaram a cerca de 30% em média (Figura 5.9).

TABELA 5.12 – VALORES MÉDIOS ABSOLUTOS DE CORRENTE (kA)

Cenários	Negativos				Positivos			
	Verão 2000	Verão 1999	Inverno 2000	Inverno 1999	Verão 2000	Verão 1999	Inverno 2000	Inverno 1999
R	-34,68	-29,75	-26,09	-24,77	32,21	27,08	38,85	40,80
A	-36,99	–	-27,56	-27,78	28,72	–	33,51	36,52
B	-37,75	–	-28,17	-28,83	29,69	–	36,83	39,24
C	-37,00	-32,93	-27,56	-27,79	28,72	23,98	33,49	36,52
D	-37,76	-33,41	-28,16	-28,84	29,68	25,40	36,82	39,23
E	-38,09	-33,75	-28,30	-29,03	34,49	29,13	43,33	44,43
F	-39,09	-35,32	-29,74	-30,10	47,36	44,25	50,50	49,25
G	-39,21	-35,52	-29,78	-30,17	48,10	46,28	51,02	49,67

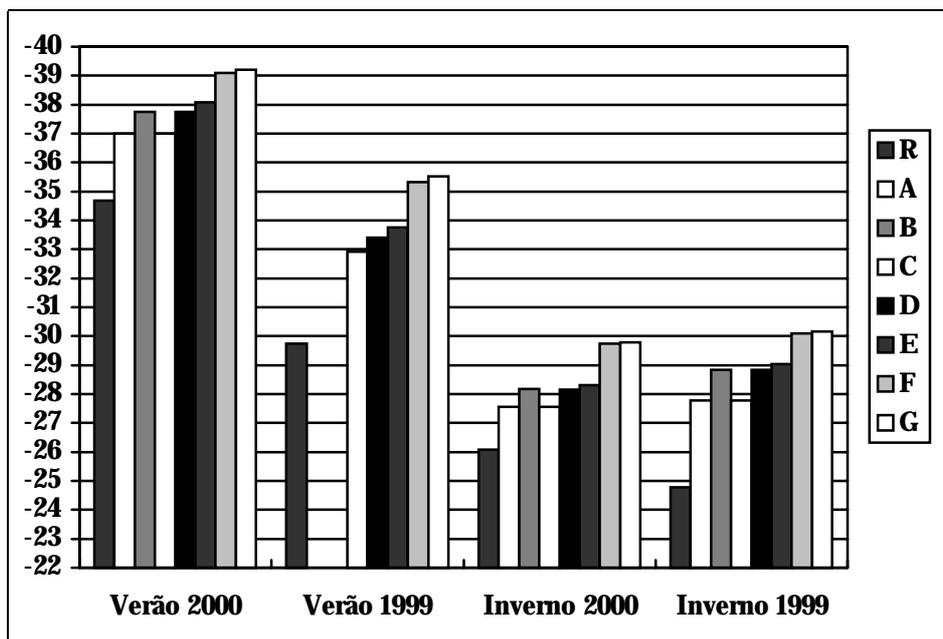


Fig. 5.8 – Valores médios da corrente (kA) para relâmpagos negativos na Região Interna.
 FONTE: Tabela 5.12.

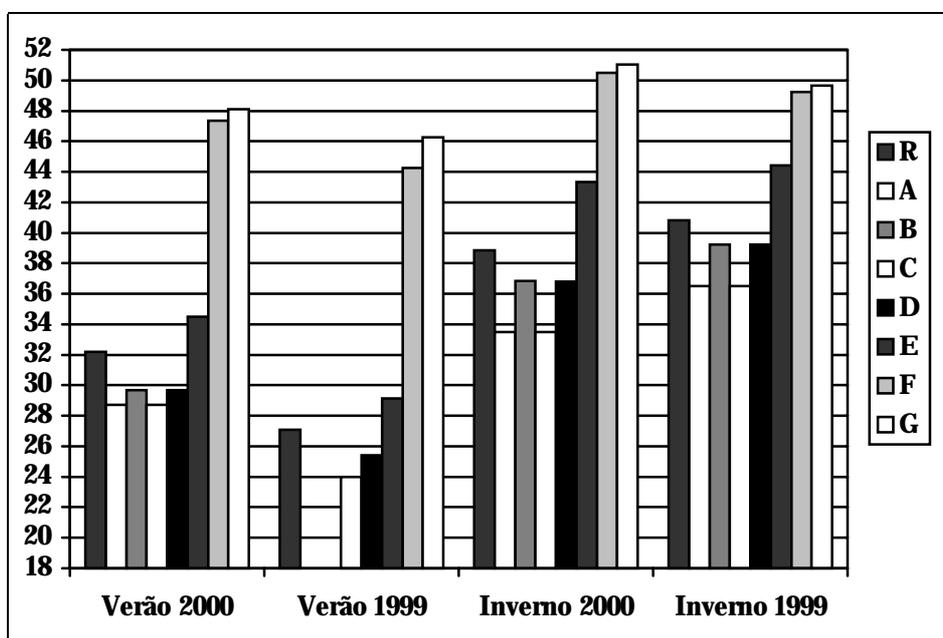


Fig. 5.9 – Valores médios de corrente (kA) para relâmpagos positivos na Região Interna.
 FONTE: Tabela 5.12.

A grande discrepância nos valores de corrente entre positivos e negativos para os cenários B e G pode ter sido causada, novamente, pela contaminação dos dados de relâmpagos NS por IN. Como o cenário B não exige a participação de antenas IMPACT (com uma média de participação de 74,4%), é grande a probabilidade de haver registros de relâmpagos IN intensos classificados erroneamente pelo SLT como positivos de baixa intensidade (porém, acima de 10kA). Com isso, tem-se uma redução significativa da média da corrente dos positivos em relação ao cenário G, conforme pode ser visto nos dados. Este resultado mostra que, mesmo eliminando-se os relâmpagos positivos abaixo de 10kA dos dados, a contaminação por relâmpagos IN ainda é significativa para cenários que não exigem a participação de sensores IMPACT.

A mesma análise pode ser feita para os valores médios absolutos da multiplicidade. Com base nos dados da Tabela 5.13, observa-se a redução da multiplicidade em direção aos cenários mais exigentes (Figuras 5.10 e 5.11), um comportamento contrário ao verificado para a corrente. Desta forma, verifica-se que os valores de multiplicidade obtidos através do cenário B (atual configuração do SLT) são maiores que os valores obtidos através do cenário G.

TABELA 5.13 – VALORES MÉDIOS ABSOLUTOS DA MULTIPLICIDADE

Cenários	Negativos				Positivos			
	Verão 2000	Verão 1999	Inverno 2000	Inverno 1999	Verão 2000	Verão 1999	Inverno 2000	Inverno 1999
R	1,93	1,93	2,02	1,70	1,08	1,06	1,09	1,06
A	1,99	–	2,02	1,71	1,11	–	1,10	1,07
B	1,90	–	1,95	1,58	1,09	–	1,09	1,06
C	1,99	1,96	2,02	1,71	1,11	1,10	1,10	1,07
D	1,90	1,83	1,95	1,58	1,09	1,08	1,09	1,06
E	1,90	1,83	1,95	1,57	1,07	1,06	1,07	1,05
F	1,82	1,68	1,85	1,52	1,06	1,05	1,06	1,04
G	1,82	1,69	1,85	1,52	1,06	1,05	1,06	1,04

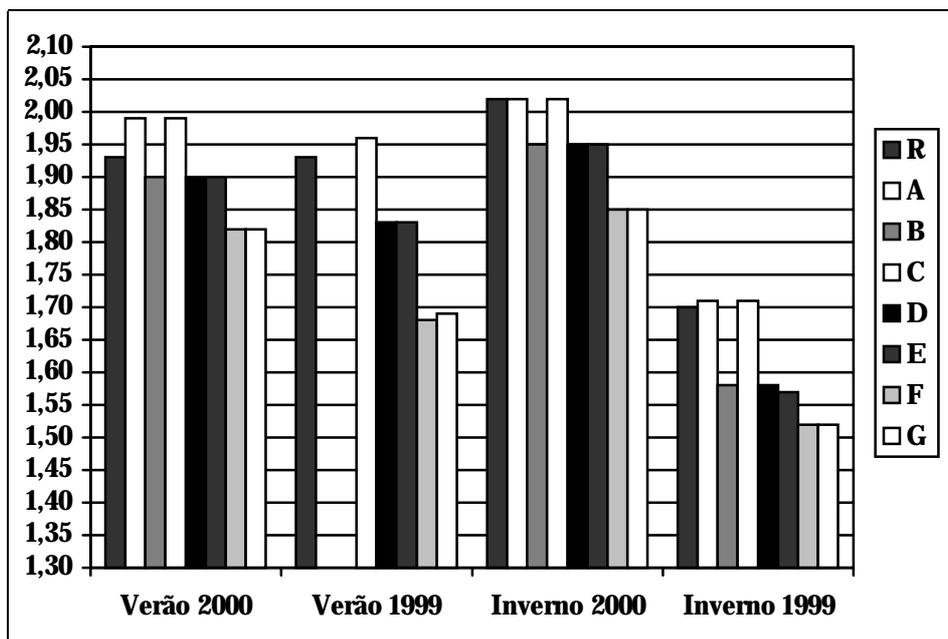


Fig. 5.10 – Valores médios da multiplicidade dos relâmpagos negativos na Região Interna.
 FONTE: Tabela 5.13.

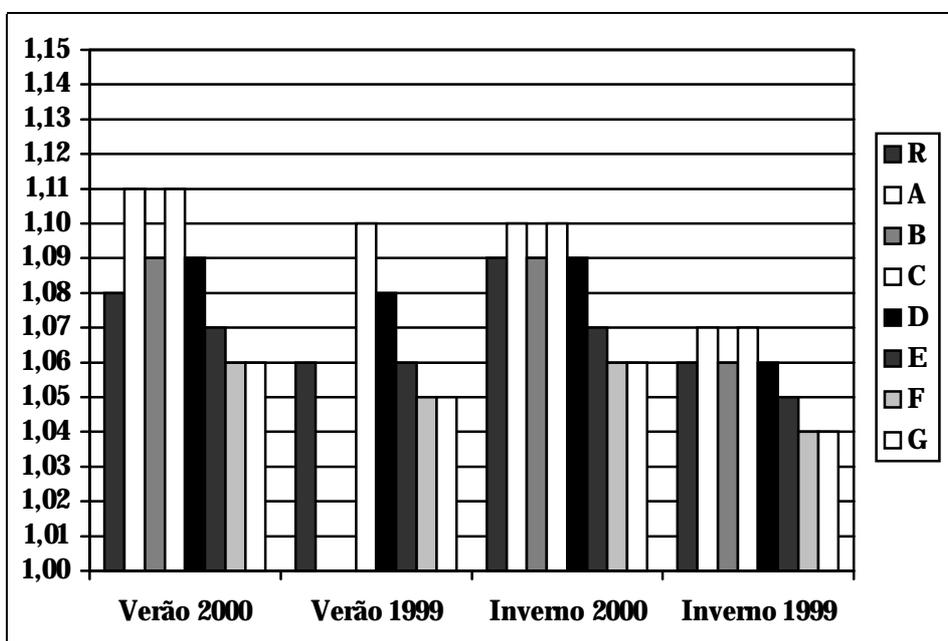


Fig. 5.11 – Valores médios de multiplicidade para relâmpagos positivos na Região Interna.
 FONTE: Tabela 5.13.

Para a multiplicidade, não há grandes diferenças entre os resultados dos cenários uma vez que a determinação da multiplicidade pelo sistema não depende diretamente da precisão da localização do evento. O algoritmo de agrupamento das diversas descargas que compõem um relâmpago possui critérios próprios para obtenção da solução e, embora estejam baseados na localização do relâmpago, estabelecem margens de segurança amplas o suficiente para minimizar os efeitos da incerteza da localização. O cálculo da multiplicidade depende também da precisão com que os sensores registram o horário das diversas descargas componentes, fator que independe da central de processamento. Desta forma, as pequenas diferenças observadas nos valores de multiplicidade entre os cenários B e G devem-se, possivelmente, à imprecisão das informações provenientes dos sensores LPATS nas soluções onde nenhuma IMPACT tenha participado (25% a 30% dos dados do cenário B). Além disso, as descargas subsequentes dos relâmpagos, por serem menos intensas que as primeiras descargas de retorno (Rakov e Uman. 1990; Rakov et al. 1994; Pinto et al. 1997), são detectadas por um número menor de sensores, gerando assim informações com baixa precisão. Desta forma, essas descargas são eliminadas pelos cenários mais exigentes, reduzindo assim a média da multiplicidade em relação aos cenários menos exigentes. Com isso, conclui-se que a multiplicidade, embora ainda sofra influência da configuração, suas variações são bem menores quando comparadas com os dados de corrente de pico.

Para finalizar, avaliou-se também o percentual de relâmpagos positivos e negativos registrados nos quatro períodos de estudo para os oito cenários de configuração. Analisando os dados apresentados na Tabela 5.14, observa-se, tanto no verão quanto no inverno, um crescimento do percentual de negativos em detrimento dos positivos para os cenários mais exigentes em relação aos menos exigentes (Figura 5.12). Estudos já comprovaram que o percentual de negativos é sempre superior ao de positivos (Orville e Silver. 1997; Orville e Huffines. 1999a,b; Pinto et al. 1999; Pinto Jr. et al. 2000) e, no caso atual, observa-se que esse comportamento se mantém.

TABELA 5.14 – NÚMERO DE RELÂMPAGOS NS NEGATIVOS E POSITIVOS NA REGIÃO INTERNA

Cenários	Negativos				Positivos			
	Verão 2000	Verão 1999	Inverno 2000	Inverno 1999	Verão 2000	Verão 1999	Inverno 2000	Inverno 1999
R	405.568	668.433	49.412	26.964	60.928	109.737	17.292	10.959
	86,94%	85,90%	74,08%	71,10%	13,06%	14,10%	25,92%	28,90%
A	437.778	–	56.207	33.648	125.729	–	30.118	19.380
	77,69%	–	65,11%	63,45%	22,31%	–	34,89%	36,55%
B	413.948	–	51.041	26.944	87.089	–	23.343	14.809
	82,62%	–	68,62%	64,53%	17,38%	–	31,38%	35,47%
C	436.543	791.838	56.170	33.635	125.680	252.102	30.111	19.380
	77,65%	75,85%	65,10%	63,44%	22,35%	24,15%	34,90%	36,56%
D	412.287	713.242	50.980	26.925	87.020	174.373	23.338	14.805
	82,57%	80,36%	68,60%	64,52%	17,43%	19,64%	31,40%	35,48%
E	410.511	711.152	50.486	26.457	50.074	99.445	16.731	11.258
	89,13%	87,73%	75,11%	70,15%	10,87%	12,27%	24,89%	29,85%
F	379.060	503.373	44.825	22.481	26.021	31.824	12.082	8.377
	93,58%	94,05%	78,77%	72,85%	6,42%	5,95%	21,23%	27,15%
G	378.911	504.122	44.714	22.406	24.632	28.972	11.846	8.188
	93,90%	94,56%	79,06%	73,24%	6,10%	5,44%	20,94%	26,76%

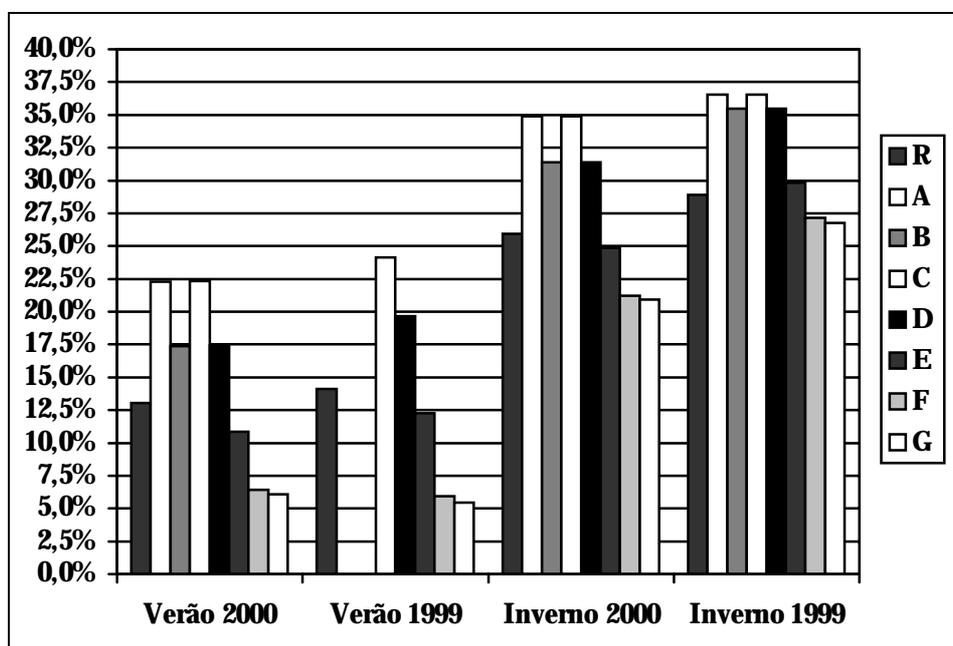


Fig. 5.12 – Percentual de positivos registrados na Região Interna.
FONTE: Tabela 5.14.

Com relação aos dados do cenário B, comparando-os com os valores do cenário G (que apresenta os menores percentuais de positivos), observa-se uma grande discrepância entre os percentuais de positivos, possivelmente ligada à contaminação por relâmpagos IN, chegando a uma diferença de cerca de 65% no verão e 30% no inverno. Esse fato pode estar associado eventualmente à maior quantidade de relâmpagos IN intensos que ocorrem durante o verão e provocam uma maior contaminação dos dados para o cenário B neste período.

5.1.4.2. Associada à Distância da Malha de Sensores

Para avaliar como a distância à rede de sensores influencia os resultados gerados pelo SLT, analisou-se o comportamento do percentual de positivos, da intensidade da corrente de pico e da multiplicidade para os relâmpagos detectados nas Regiões Interna e Externas, utilizando dados do cenário G para os quatro períodos considerados. Na Tabela 5.15 são apresentados o número de relâmpagos negativos e positivos registrados e os respectivos percentuais em relação ao número total (Tabela 5.9). Devido à pequena quantidade de relâmpagos positivos detectados na Região Externa Oceânica (indicados pela cor cinza na tabela), não foram realizados estudos estatísticos e análises para estes dados no sentido de evitar-se falsas conclusões.

TABELA 5.15 – NÚMERO DE RELÂMPAGOS NS NEGATIVOS E POSITIVOS NAS TRÊS REGIÕES ESTUDADAS

Regiões	Negativos				Positivos			
	Verão 2000	Verão 1999	Inverno 2000	Inverno 1999	Verão 2000	Verão 1999	Inverno 2000	Inverno 1999
Externa Continental	51.496	31.689	16.230	3.545	4.073	1.955	4.872	3.834
	92,67%	94,19%	76,91%	48,04%	7,33%	5,81%	23,09%	51,96%
Interna	378.911	504.122	44.714	22.406	24.632	28.972	11.846	8.188
	93,90%	94,56%	79,06%	73,24%	6,10%	5,44%	20,94%	26,76%
Externa Oceânica	8.808	4.329	367	884	75	145	34	20
	99,16%	96,76%	91,52%	97,79%	0,84%	3,24%	8,48%	2,21%

Observa-se, através da Tabela 5.15 e da Figura 5.13, uma média de 5,8% de positivos no verão contra 23,8% de positivos no inverno para a Região Interna. Para o verão, os

percentuais de positivos da Região Externa Continental estão bem próximos dos valores registrados na Região Interna. Entretanto, no inverno, ocorrem diferenças significativas entre os percentuais das duas regiões, principalmente no ano de 1999. O motivo dessas disparidades pode estar associado às diferenças na distribuição geográfica das tempestades durante o inverno, uma vez que a eficiência de detecção da rede de sensores não é uniforme em todas as direções devido à geometria espacial dos sensores (seção 3.3.1.2). Desta forma, diferentes tempestades que venham a ocorrer em diferentes pontos da malha, certamente apresentarão algumas variações nos dados dos relâmpagos associados. Esse efeito, entretanto, não é tão evidente no verão pois a frequência das tempestades neste período é muito grande e, assim, sua distribuição geográfica sobre a área de cobertura da rede torna-se uniforme, minimizando assim sua influência sobre os dados dos relâmpagos. No inverno, entretanto, sendo mais escassas, as tempestades podem se concentrar mais sobre determinadas regiões da área de cobertura, provocando assim distorções nas características do relâmpagos detectados. Isso explicaria as discrepâncias observadas nos dados do inverno de 1999 e 2000 para a Região Externa Continental em comparação com a Região Interna.

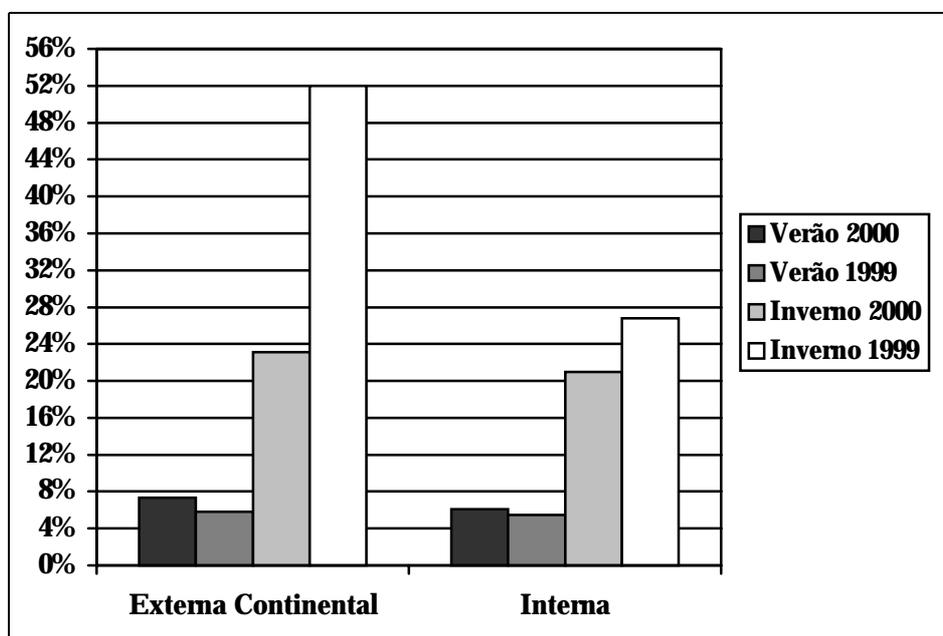


Fig. 5.13 – Percentual de positivos obtido com dados do cenário G. Não foi registrado um número significativo de eventos na Região Externa Oceânica.
 FONTE: Tabela 5.15.

A Tabela 5.16 resume os valores absolutos de corrente e multiplicidade de relâmpagos negativos obtidos a partir do cenário G para as Regiões Interna e Externas Continental e Oceânica nos quatro períodos considerados. A aplicação dos testes estatísticos aos dados revelaram que as diferenças são significativas em todas as comparações feitas para os valores de corrente e multiplicidade entre as regiões, conforme mostra a Tabela 5.17.

Com base nas Figuras 5.14 e 5.15, observa-se que as regiões mais distantes da malha de sensores apresentam valores médios de corrente maiores (em torno de 27% para a Região Externa Continental e 44% para a Região Oceânica) que a Região Interna, pois somente os relâmpagos mais intensos são detectados a grandes distâncias das antenas. Desta forma, longe da malha de sensores, todos os relâmpagos de baixa intensidade são perdidos enquanto que, no interior da malha, tanto os relâmpagos fracos como os intensos são registrados em suas proporções normais. Esse fato provoca, portanto, o aumento da média da corrente observado nos dados das Regiões Externas. Para a multiplicidade, há uma nítida redução de seu valor médio (cerca de 26% para a Região Externa Continental e 35% para a Região Oceânica) em relação à Região Interna. Isso porque, conforme já discutido, as descargas de retorno subsequentes dos relâmpagos múltiplos costumam ser menos intensas que as primeiras descargas de retorno e, portanto, a grandes distâncias das antenas, muitas dessas descargas subsequentes de menor intensidade são perdidas pelo sistema provocando, assim, uma queda na média da multiplicidade desses relâmpagos. Esse efeito é mais evidente para os relâmpagos negativos pois sua multiplicidade é muito maior que a multiplicidade dos positivos.

TABELA 5.16 – MÉDIA DA CORRENTE E MULTIPLICIDADE PARA OS RELÂMPAGOS NEGATIVOS

Região	Corrente Negativos (kA)				Multiplicidade Negativos			
	Verão 2000	Verão 1999	Inverno 2000	Inverno 1999	Verão 2000	Verão 1999	Inverno 2000	Inverno 1999
Externa Continental	-60,05	-50,97	-49,01	-41,85	1,31	1,18	1,32	1,20
Interna	-39,21	-35,52	-29,78	-30,17	1,82	1,69	1,85	1,52
Externa Oceânica	-62,67	-56,47	-60,80	-54,89	1,13	1,09	1,04	1,12

TABELA 5.17 – COMPARAÇÕES ENTRE AS REGIÕES INTERNA E EXTERNAS

Período	Região	Corrente Negativos		Multiplicidade Negativos	
		Externa Continental	Interna	Externa Continental	Interna
Verão 2000	Interna	34,70%		-27,76%	
	Ext. Oceânica	-4,18%	37,43%	14,24%	-38,05%
Verão 1999	Interna	30,31%		-30,21%	
	Ext. Oceânica	-9,74%	37,10%	6,98%	-35,08%
Inverno 2000	Interna	39,25%		-28,48%	
	Ext. Oceânica	-19,38%	51,02%	21,28%	-43,70%
Inverno 1999	Interna	27,91%		-21,48%	
	Ext. Oceânica	-23,76%	45,04%	6,04%	-26,22%

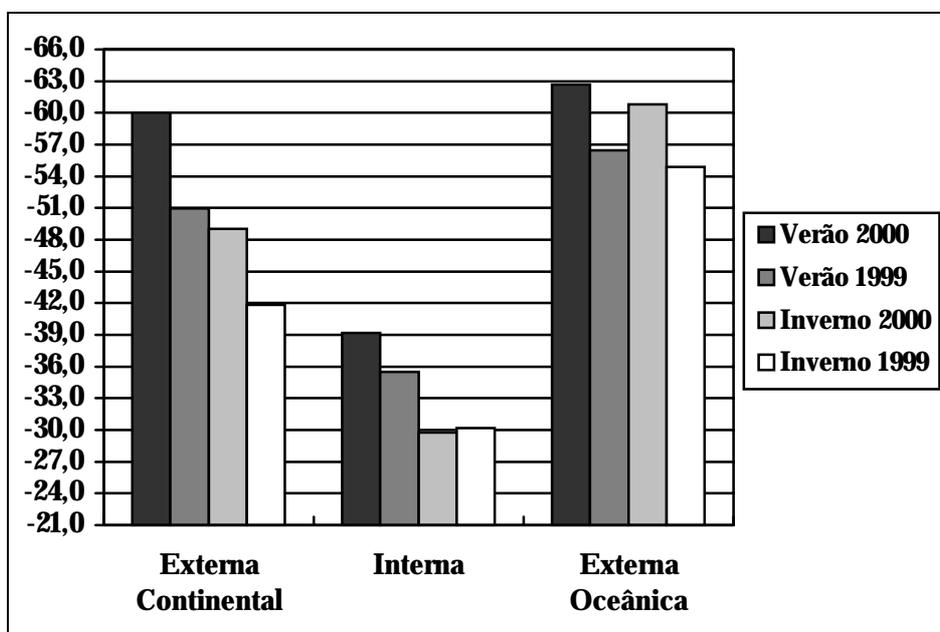


Fig. 5.14 – Valores médios da corrente de pico dos relâmpagos negativos (kA) obtidos através do cenário G.
 FONTE: Tabela 5.16.

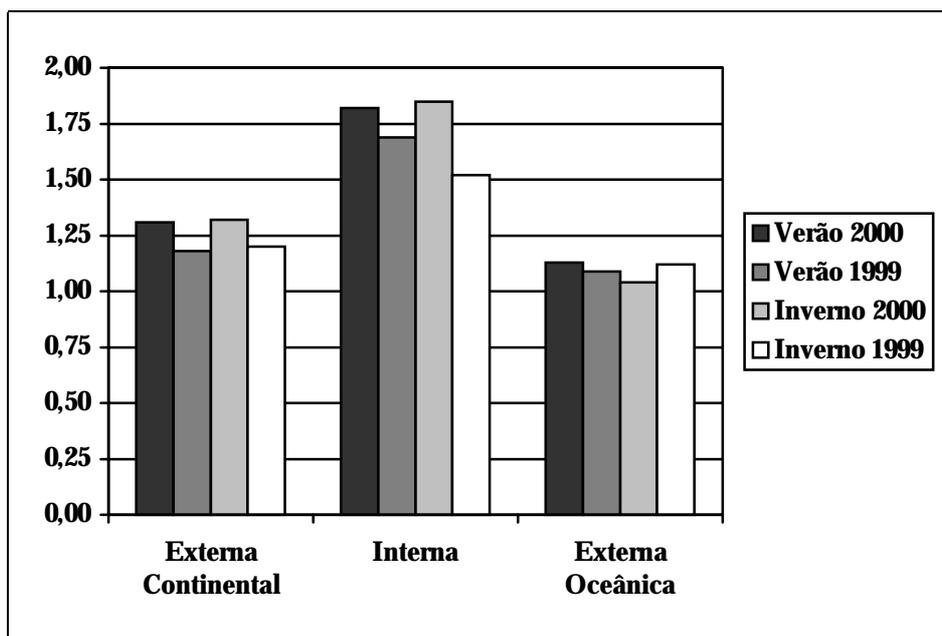


Fig. 5.15 – Valores médios da multiplicidade dos relâmpagos negativos obtidos utilizando o cenário G.
 FONTE: Tabela 5.16.

Através das Tabelas 5.16 e 5.17, observa-se que, no verão, a corrente média dos relâmpagos negativos na Região Oceânica é cerca de 6,5% mais intensa que na Região Continental. Já no inverno, a corrente média dos negativos na Região Oceânica é cerca de 21,5% maior que na Região Continental. Isso pode ser explicado pela diferença de atenuação sofrida pela radiação do relâmpago quando se propaga sobre o oceano e sobre o continente. O modelo de propagação usado pelo SLT não diferencia se uma descarga ocorreu sobre o oceano ou não, ou seja, o sistema adota um coeficiente de atenuação único para todos os casos, calculado com base na atenuação sobre o continente. Desta forma, como a radiação que se propaga sobre o oceano sofre uma atenuação menor que sobre o continente então, para um mesmo coeficiente de atenuação, as descargas sobre o oceano apresentarão uma intensidade de corrente maior. Este mesmo resultado foi encontrado por Cramer e Cummins (1999) através de um estudo sobre detecção de relâmpagos no oceano a grandes distâncias da rede de sensores utilizando uma central de processamento específica para esse fim. Galván et al. (1999), entretanto, mostraram que essas diferenças nos valores da intensidade de corrente existem exclusivamente devido ao efeito de propagação diferenciado da radiação sobre o continente e sobre o oceano. Com isso, pode-se concluir

que as características das descargas de retorno dos relâmpagos sobre regiões oceânicas tendem a ser iguais aos relâmpagos que ocorrem sobre o continente. Como consequência, ambos deverão apresentar valores de correntes da mesma ordem de grandeza.

Ainda pelos dados das Tabelas 5.16 e 5.17, observa-se que, no verão, a multiplicidade média dos negativos na Região Continental foi cerca de 10,5% maior que na Região Oceânica. No inverno, essa multiplicidade média foi cerca de 13,5% maior na Região Continental, mostrando pequena variação sazonal em comparação com os dados de corrente. Nenhum fator relacionado com o sistema pode explicar essa diferença, uma vez que ambas as regiões estão a uma mesma distância da malha de sensores e, desta forma, não haveria porque o SLT detectar médias de multiplicidade diferenciadas para diferentes épocas do ano e regiões. Além disso, se considerarmos o efeito de propagação sobre as descargas subsequentes dos relâmpagos múltiplos, teríamos uma maior atenuação sobre o continente, prejudicando assim sua detecção pela rede de sensores. Com isso, a multiplicidade dos relâmpagos na Região Continental deveria ser menor que na Região Oceânica, um resultado contrário ao verificado. Desta forma, há fortes indícios de que haja possíveis diferenças entre as características físicas das tempestades sobre o continente e sobre oceano, induzindo assim comportamentos diferenciados de multiplicidade aos relâmpagos associados.

5.2. ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DOS RELÂMPAGOS

Este estudo foi desenvolvido utilizando-se apenas dados de relâmpagos que ocorreram na Região Interna (correspondente a área da malha de sensores do sistema) obtidos a partir do cenário de configuração mais exigente (G) para o verão e o inverno dos anos de 1999 e 2000. A escolha dessa área foi motivada pela distribuição uniforme dos sensores do SLT nessa região, garantindo assim, em conjunto com a configuração escolhida, uma melhor precisão das informações. Os resultados são apresentados nas Tabelas 5.18 e 5.19.

TABELA 5.18 – NÚMERO DE RELÂMPAGOS NS NA REGIÃO INTERNA

		Verão 2000		Verão 1999		Inverno 2000		Inverno 1999	
Negativos	Simples	220.912	58,30%	318.518	63,18%	25.955	58,05%	15.312	68,34%
	Total	378.911	93,90%	504.122	94,56%	44.714	79,06%	22.406	73,24%
Positivos	Simples	23.450	95,20%	27.830	96,06%	11.255	95,01%	7.877	96,20%
	Total	24.632	6,10%	28.972	5,44%	11.846	20,94%	8.188	26,76%
Total Geral		403.543		533.094		56.560		30.594	

TABELA 5.19 – VALORES MÉDIOS DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DOS RELÂMPAGOS NA REGIÃO INTERNA

	Negativos				Positivos			
	Verão 2000	Verão 1999	Inverno 2000	Inverno 1999	Verão 2000	Verão 1999	Inverno 2000	Inverno 1999
Corrente (kA)	-39,21	-35,52	-29,78	-30,17	48,10	46,28	51,02	49,67
Corrente dos Simples (kA)	-36,59	-34,76	-28,07	-29,14	47,37	45,84	50,12	49,00
Corrente dos Múltiplos (kA)	-42,88	-36,83	-32,14	-32,39	62,54	57,13	68,23	66,77
Multiplicidade	1,818	1,685	1,849	1,522	1,059	1,049	1,060	1,044
Tempo de Subida (μs)	5,08	4,80	4,27	4,21	6,64	6,46	7,17	7,01
Largura de Pulso (μs)	20,36	20,01	19,83	20,31	18,52	17,87	18,42	18,62

Na Tabela 5.18, os relâmpagos foram divididos em função de sua polaridade, cujos totais são apresentados em negrito. Os respectivos percentuais são dados em relação ao número total de relâmpagos, mostrado na última linha da tabela para cada período. Para cada polaridade, foram computados também o número de relâmpagos simples e múltiplos, cujos percentuais são dados em relação ao total de eventos da respectiva polaridade a que se refere. Na Tabela 5.19, são apresentados os valores médios dos principais parâmetros físicos dos relâmpagos para os quatro períodos. A corrente dos simples representa o valor médio da corrente de pico dos relâmpagos simples apenas. Por sua vez, a corrente dos múltiplos corresponde à média da corrente de pico da primeira descarga de retorno dos relâmpagos múltiplos.

Como neste trabalho foram levantados apenas dois anos de dados, não será possível desenvolver estudos conclusivos a respeito das variações anuais de certas características dos relâmpagos. Ao longo do texto, entretanto, serão abordados alguns aspectos importantes desses comportamentos com o objetivo de levantar questões para serem estudadas mais detalhadamente em trabalhos futuros. Por esse motivo, decidiu-se agrupar os dados referentes aos anos de 1999 e 2000 em valores únicos para o verão e para o inverno, representando assim as características gerais dos relâmpagos nessas épocas do ano.

A Tabela 5.20 mostra o número total de relâmpagos (incluindo as informações do número de simples, múltiplos, positivos e negativos) para o verão e o inverno dos anos de 1999 e 2000 enquanto que a Tabela 5.21 contém a média ponderada dos principais parâmetros dos relâmpagos para ambos os períodos considerados.

TABELA 5.20 - TOTAL DE RELÂMPAGOS NS PARA OS ANOS DE 1999 E 2000

		Verão		Inverno	
Negativos	Simple	539.430	61,09%	41.267	61,48%
	Total	883.033	94,28%	67.120	77,01%
Positivos	Simple	51.280	95,66%	19.132	95,50%
	Total	53.604	5,72%	20.034	22,99%
Total Geral		936.637		87.154	

TABELA 5.21 - MÉDIA PONDERADA DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS FÍSICOS DOS RELÂMPAGOS PARA OS ANOS DE 1999 E 2000

	Negativos		Positivos	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno
Corrente (kA)	-36,87	-29,91	46,89	50,50
Corrente dos Simples (kA)	-35,41	-28,48	46,35	49,68
Corrente dos Múltiplos (kA)	-39,14	-32,21	59,10	67,77
Multiplicidade	1,734	1,736	1,052	1,054
Tempo Subida (µs)	4,90	4,25	6,52	7,11
Largura Pulso (µs)	20,18	20,00	18,15	18,51

A seguir, serão discutidos os principais resultados que podem ser obtidos dos dados mostrados pelas quatro tabelas anteriores.

5.2.1. Percentual de Relâmpagos Positivos

A Figura 5.16 ilustra o comportamento do percentual de positivos para os quatro períodos estudados. Através da Tabela 5.20, observa-se claramente que este percentual é significativamente maior no inverno, atingindo 23% contra apenas 5,7% no verão. Estes resultados concordam com Orville e Silver (1997) e Orville e Huffines (1999a), cujos dados representam a média mensal sobre todo o território americano para os períodos de 1992-1995 e 1995-1997, respectivamente. Entretanto, os dados apresentados por Pinto et al. (1999) e Pinto Jr. et al. (2000) mostraram percentuais bem mais elevados no verão (em torno de 30%) enquanto que, no inverno, os valores foram bem próximos (cerca de 25%). Isso porque esses trabalhos utilizaram dados de um sistema de localização que não possuía sensores IMPACT em sua rede, resultando assim em altos índices de contaminação por relâmpagos IN intensos, principalmente no verão. O sistema atual, composto por uma rede híbrida mais moderna, utilizando uma configuração da central de processamento mais adequada, apresentou resultados mais confiáveis, em concordância com os valores médios obtidos por outras técnicas (Uman. 1987), os quais ficam em torno de 10%. Orville e Huffines (1999a,b) mostraram também que o percentual de positivos varia muito em função da geografia e da orografia da região estudada, as quais interferem na morfologia das nuvens de tempestade, conforme discutido também na Seção 2.2.1. Desta forma, os resultados encontrados nesse trabalho são característicos da região sudeste do Brasil e, portanto, eventuais extrapolações para outras regiões devem ser feitas com critério.

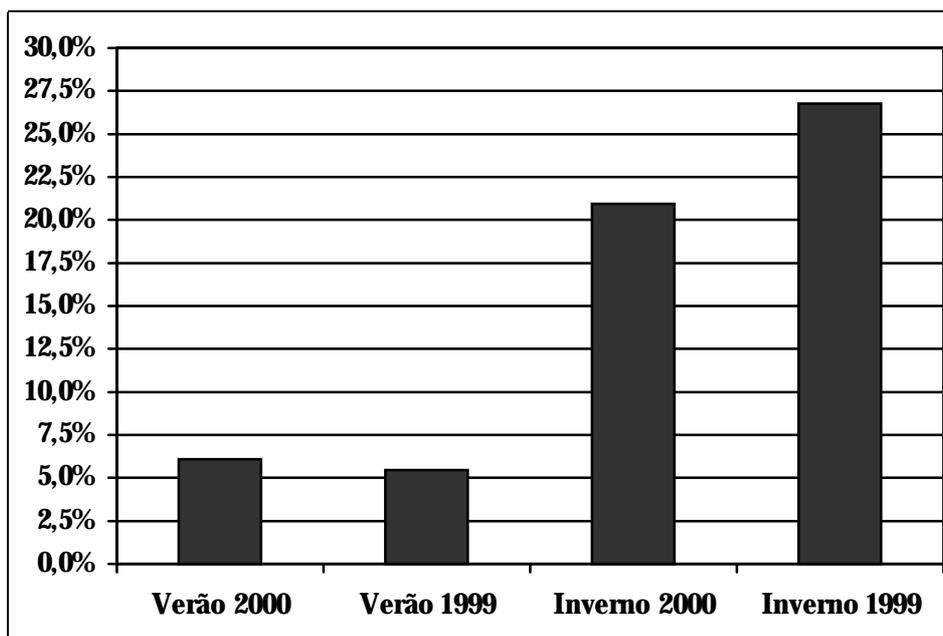


Fig. 5.16 – Percentual de relâmpagos positivos registrados na Região Interna utilizando o cenário de configuração G.
 FONTE: Tabela 5.18.

5.2.2. Intensidade da Corrente de Pico

A Figura 5.17 e a Tabela 5.21 mostram que os relâmpagos negativos apresentam uma intensidade de corrente 18,9% maior no verão que no inverno, enquanto que um comportamento contrário pode ser observado para os relâmpagos positivos, os quais são 7,2% mais intensos no inverno. Os valores absolutos encontrados estão de acordo com os valores típicos apresentados na literatura (Ogawa. 1995). Os relâmpagos negativos apresentam correntes médias da ordem de 30kA em geral, enquanto que os positivos tendem a ser mais intensos, porém não há um consenso quanto à valores típicos devido a grande variabilidade de sua intensidade de corrente em função das técnicas de medição, da localização geográfica e da época do ano (Uman. 1987; Rakov. 2000).

Estes resultados concordam parcialmente com Orville e Huffines (1999a) pois, nos Estados Unidos, os negativos não apresentaram variações sazonais significativas ao longo do ano. Já os positivos apresentaram variações bem mais acentuadas, sendo cerca de 34% mais intensos no inverno. Além disso, os valores médios de corrente registrados nos

Estados Unidos são significativamente menores tanto para os negativos (em torno de 20kA ao longo do ano) quanto para os positivos (cerca de 15,5kA no verão e 23,5kA no inverno). Isso pode ser explicado pelo fato da região escolhida para o estudo estar em latitudes bem mais baixas (entre -24°S e -16°S) que os Estados Unidos (cuja totalidade da área territorial está acima de 30°N). Orville (1990) e Pinto Jr. et al. (1997) mostraram que há uma tendência dos relâmpagos negativos serem mais intensos em regiões próximas do equador (latitudes baixas entre -30°S e 30°N) devido, provavelmente, ao aumento da profundidade das nuvens de tempestades face ao aumento da temperatura da atmosfera local.

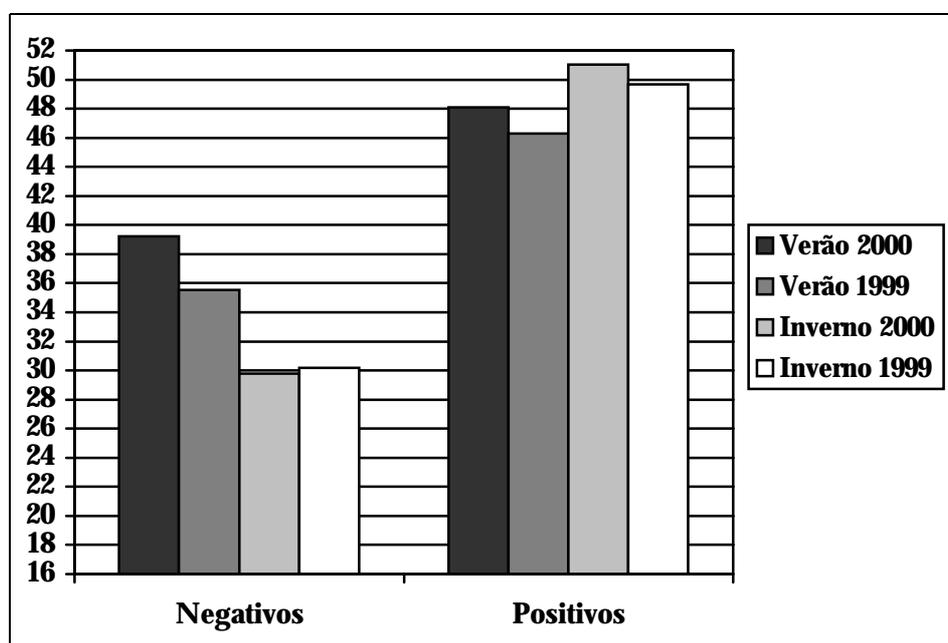


Fig. 5.17 – Valores médios da corrente de pico (kA) para relâmpagos negativos e positivos registrados na Região Interna utilizando o cenário de configuração G.
 FONTE: Tabela 5.19.

Este mesmo comportamento foi observado no Brasil por Pinto et al. (1999, 2000), porém os valores médios encontrados apresentaram algumas diferenças em relação aos resultados deste trabalho. Em Pinto et al. (1999), a corrente média dos relâmpagos negativos foi superior no verão (42kA) e muito próxima no inverno (29kA). Já os relâmpagos positivos apresentaram um comportamento contrário, com valores médios absolutos bem menores (22kA no verão e 19kA no inverno). Em Pinto et al. (2000), os valores médios de corrente dos positivos foram mais elevados (30kA no verão e 34kA no inverno) mas ainda ficaram

abaixo dos valores da Tabela 5.21. Novamente, surge a questão da confiabilidade da rede utilizada por Pinto et al. (1999, 2000) a qual está sujeita a uma alta contaminação por IN intensos, os quais são registrados erroneamente pelo sistema como relâmpagos positivos com baixa intensidade de corrente, contribuindo assim para reduzir sua média geral.

Um outro aspecto interessante que pode ser observado nos dados das Tabelas 5.18 e 5.19 corresponde à maior intensidade de corrente dos relâmpagos negativos nos períodos de menor número de ocorrências. No verão de 2000, foram registrados menos relâmpagos que o verão de 1999 que, por sua vez, apresentou uma intensidade de corrente média maior. O mesmo aconteceu no inverno de 1999 em relação à 2000. Embora dois anos de dados sejam insuficientes para obter-se conclusões definitivas, este mesmo comportamento foi observado por Huffines e Orville (2000), levando a fortes indícios de que este fato esteja relacionado com alguma característica física específica das nuvens de tempestades. Fica aqui então a necessidade de novas investigações futuras para averiguações mais detalhadas através da análise de vários anos de dados.

5.2.3. Multiplicidade

As Figuras 5.18 e 5.19 mostram claramente a maior multiplicidade dos negativos (média de 1,7) com relação aos positivos (média de 1,05), conforme já era esperado (Rakov. 2000), não sendo registradas variações sazonais significativas (veja Tabela 5.21). Pela Tabela 5.20, observa-se elevados percentuais de relâmpagos positivos simples (em torno de 96%), enquanto que os negativos apresentaram percentuais bem menores (cerca de 61%). Esses resultados concordam com Pinto et al. (1997, 2000), não só no comportamento sazonal como nos valores absolutos. Pinto et al. (1999), entretanto, encontrou um pequeno aumento do percentual de negativos simples no inverno em relação ao verão (para os negativos: 61% de simples no verão contra 70% no inverno; para os positivos: 90% de simples no verão contra 92% no inverno).

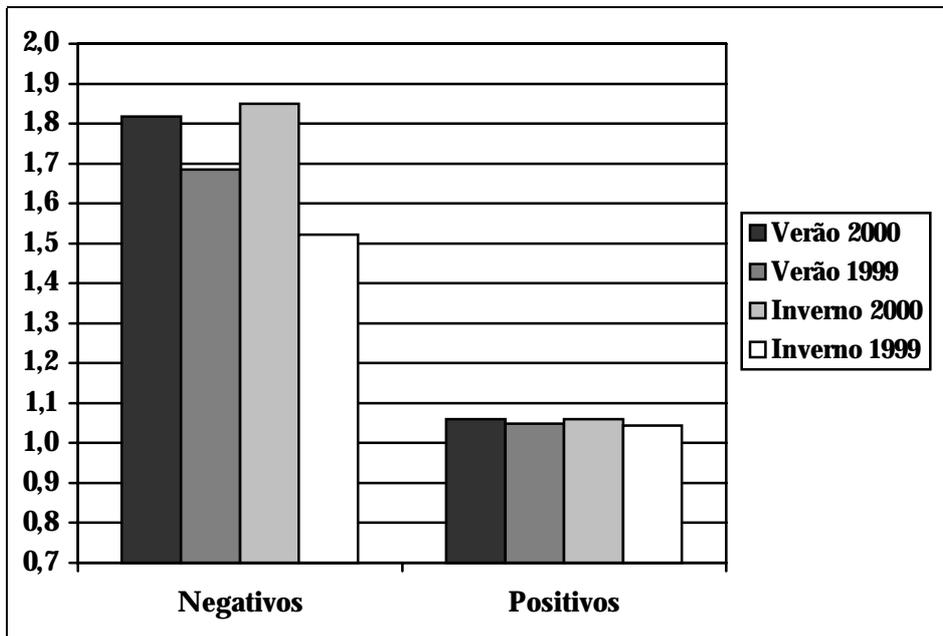


Fig. 5.18 – Valores médios de multiplicidade para relâmpagos negativos e positivos registrados na Região Interna utilizando o cenário de configuração G.
 FONTE: Tabela 5.19.

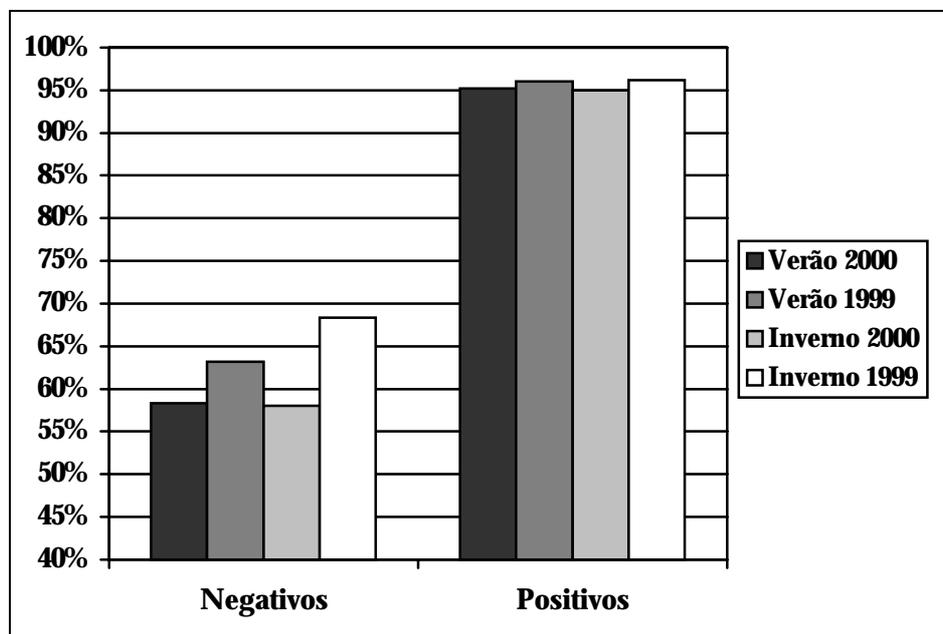


Fig. 5.19 – Percentual de relâmpagos negativos e positivos simples registrados na Região Interna utilizando o cenário de configuração G.
 FONTE: Tabela 5.18.

Por outro lado, Rakov et al. (1994) mostrou através de técnicas precisas de medição, que o percentual de relâmpagos negativos simples está em torno de 15%, muito abaixo do registrado pelos sistema de localização. Este fato, também pesquisado por Pinto Jr. et al. (1996) e Pinto et al. (1999), revela a dificuldade dos sistemas de localização em determinar com precisão a multiplicidade dos relâmpagos. Diendorfer et al. (1998) também registrou percentuais de simples mais elevados (média de 40%) e também atribuiu esse comportamento à limitação dos sistemas de localização em medir a multiplicidade dos relâmpagos. Este efeito instrumental, entretanto, não aparece para os relâmpagos positivos devido à sua baixa multiplicidade (Rakov. 2000). O menor percentual obtido por Diendorfer et al. (1998) em relação a este trabalho está associado ao elevado índice de desempenho do SLT utilizado por ele, o qual provavelmente melhorou significativamente a eficiência de detecção das descargas subsequentes.

Esta deficiência do SLT em obter a multiplicidade já foi discutida na Seção 5.1.4.2 quando analisou-se a degradação das informações fornecidas pelo sistema para relâmpagos ocorridos longe da malha de sensores. Entretanto, a baixa eficiência de detecção de descargas subsequentes parece ser uma limitação do sistema que ocorre em toda sua área de cobertura e não só nas regiões mais distantes da rede. Como consequência, observa-se então a redução da multiplicidade média dos relâmpagos. Desta forma, conclui-se que estudos de multiplicidade utilizando sistemas de localização devem ser realizados com muito critério.

5.2.4. Intensidade de Corrente *versus* Multiplicidade

Os relâmpagos simples, tanto negativos quanto positivos, apresentaram uma intensidade da corrente de pico da primeira e única descarga de retorno menor que os relâmpagos múltiplos para todos os períodos considerados, conforme mostram as Figuras 5.20 e 5.21. Esses resultados concordam com Rakov e Uman (1990), Rakov et al. (1994) e Pinto et al. (1997), porém os valores médios absolutos encontrados nestes trabalhos foram menores. Por exemplo, Pinto et al. (1997) encontrou valores de corrente para os relâmpagos negativos simples de 22,1kA no verão e 23,9kA no inverno.

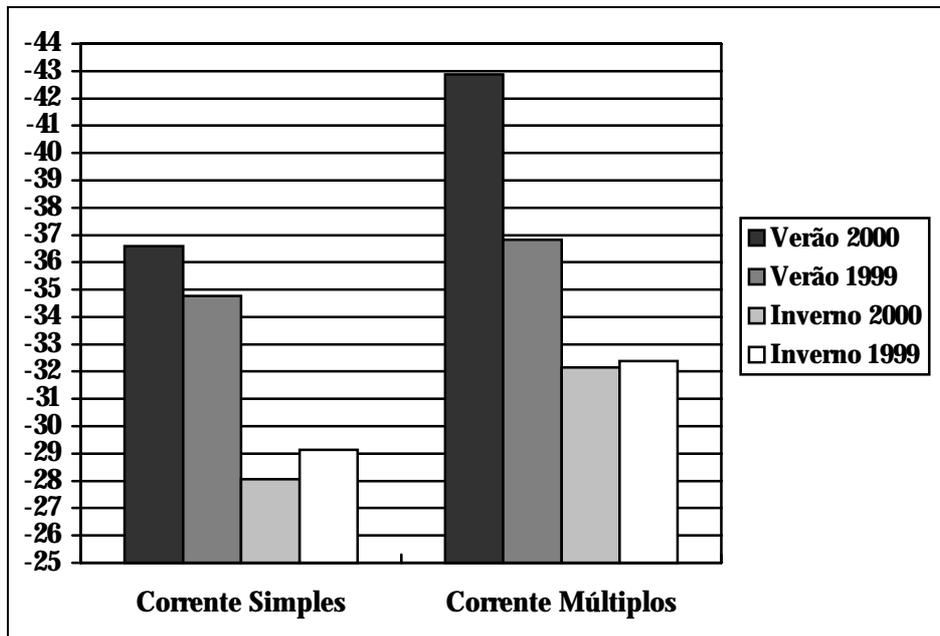


Fig. 5.20 – Valores médios de corrente de pico (kA) dos relâmpagos negativos simples e múltiplos registrados na Região Interna utilizando o cenário G.
 FONTE: Tabela 5.19.

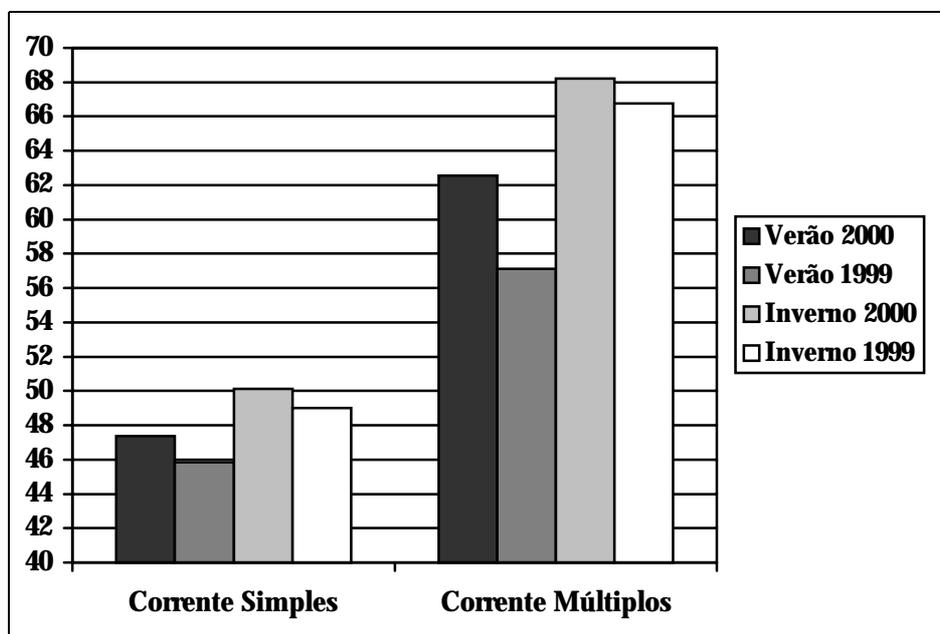


Fig. 5.21 – Valores médios de corrente de pico (kA) dos relâmpagos positivos simples e múltiplos registrados na Região Interna utilizando o cenário G.
 FONTE: Tabela 5.19.

Observou-se também que os relâmpagos negativos múltiplos tendem a ser mais intensos no verão que no inverno, um resultado contrário ao encontrado por Pinto et al. (1997) mas em concordância com Pinto Jr. et al. (1996). Pinto et al. (1997) explica essas diferenças de comportamento em função da elevada altitude da região estudada em seu trabalho (localizada no Pico das Agulhas Negras a 2787m) e reconhece que estudos mais completos sobre o assunto devem ser realizados para obtenção de conclusões definitivas.

5.2.5. Tempo de Subida e Largura de Pulso da Radiação Eletromagnética

A análise dos dados para o tempo de subida (Tabela 5.21) revelou que os valores obtidos para os relâmpagos negativos são menores que os tempos registrados para os positivos. A explicação para isso está no simples fato de os relâmpagos positivos serem mais intensos que os negativos e, portanto, o sinal tende a demorar mais para atingir o valor de pico. Analisando os valores em todos os períodos, observa-se que, quanto maior a intensidade média da corrente de pico, maior o tempo de subida. Um resultado curioso mostra, entretanto, que a derivada média dos relâmpagos é praticamente a mesma em ambos os períodos, sendo que os positivos apresentaram um valor médio de $7,2 \text{ kA}/\mu\text{s}$, enquanto que, para os negativos, o valor médio ficou em $7,5 \text{ kA}/\mu\text{s}$ no verão contra $7 \text{ kA}/\mu\text{s}$ no inverno. Desta forma, observa-se que tanto os relâmpagos negativos quanto os positivos apresentaram praticamente a mesma derivada, caracterizando assim formas de onda semelhantes.

Os valores registrados na literatura, embora apresentem grande variabilidade em função da técnica de medição utilizada, são em média menores que os resultados deste trabalho, variando de $2,4\mu\text{s}$ até $7\mu\text{s}$ segundo Rakov (2001), com valores típicos em torno de $2\mu\text{s}$ para relâmpagos com pico de corrente em torno de 30kA (Ogawa. 1995). Essa diferença entre os resultados da literatura e os valores fornecidos pelo SLT pode estar associada, entre outros fatores, ao efeito de propagação sofrido pela radiação até alcançar o sensor mais próximo da rede. Isso porque, relâmpagos muito próximos de um sensor tendem a saturá-lo, impedindo assim o registro dos parâmetros de sua forma de onda. Com isso, somente os sensores mais distantes podem detectar o sinal integral. Como, em geral, essa distância é sempre superior a 100km , ela é suficiente para provocar uma atenuação significativa do

pico do sinal e, conseqüentemente, um aumento de seu tempo de subida, conforme mostrou Cooray. (1987, 2000).

Diendorfer et al. (1998) também registrou tempos de subida de sinais EM de relâmpagos utilizando um SLT, obtendo valores mais elevados que a literatura (cerca de 8,4µs para relâmpagos negativos). Antes de continuar a discussão, é importante ressaltar que os dados de tempo de subida determinados pelo SLT não correspondem à definição usual de tempo de subida utilizada da literatura, o qual consiste no intervalo de tempo entre o zero e o valor de pico do sinal. Desta forma, conclui-se que os valores fornecidos pelo SLT são efetivamente menores que os valores reais, descontadas eventuais atenuações, pois o sistema registra o tempo entre o limiar de ativação do sensor (*threshold*) e o valor de pico. Diendorfer et al. (1998) propôs então uma correção para os valores do sistema de forma a obter o valor do tempo de subida usual (zero ao valor de pico). A expressão matemática usada foi:

$$t_s = t_{SLT} \frac{E_{pk}}{E_{pk} - E_{th}} \quad (5.2)$$

onde t_s corresponde ao tempo de subida usual; t_{SLT} é o tempo de subida registrado pelo sistema; E_{pk} é a intensidade do campo elétrico de pico da radiação e E_{th} é a intensidade mínima do campo elétrico necessária para ativar um sensor (*threshold level*).

Pela expressão (5.2), conclui-se que o tempo de subida usual é sempre maior que o tempo de subida fornecido pelo SLT. Com isso, os valores médios absolutos registrados pelo autor foram maiores que os obtidos neste trabalho devido possivelmente à correção aplicada aos dados. Neste trabalho, os tempos de subida não foram corrigidos porque os valores de E_{th} e E_{pk} não estavam disponíveis.

Os dados da Tabela 5.21 mostram que a largura de pulso também depende da intensidade da corrente de pico do relâmpago e que os relâmpagos positivos apresentam formas de onda de radiação mais “altas e estreitas” que os negativos. Por esse motivo, conclui-se que os relâmpagos positivos medidos pelo SLT, em sua maioria, enquadram-se no grupo das

formas de onda com escala de microssegundos (Rakov. 2000), conforme mostra a Figura 5.22a. Segundo o autor, os relâmpagos positivos pertencentes este grupo seriam produzidos pelos mesmos processos físicos dos relâmpagos NS negativos, produzindo assim formas de ondas semelhantes (conforme constatado pelos dados da Tabela 5.21). Já os positivos enquadrados no grupo das formas de onda com escala de milissegundos (Figura 5.22b) seriam produzidos por longas descargas conectantes ascendentes geradas a partir de estruturas elevadas da superfície (como montanhas, torres, edifícios, árvores, etc.), dando origem a formas de ondas mais lentas e intensas.

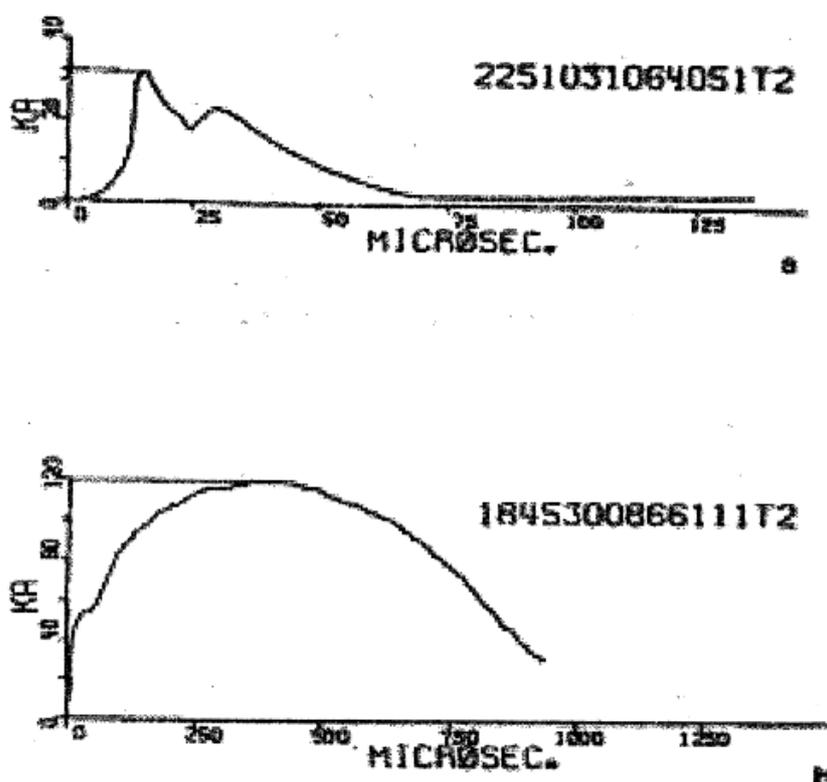


Fig. 5.22 – Dois grandes grupos de formas de onda de relâmpagos positivos atualmente conhecidos: (a) escala de microssegundos. (b) escala de milissegundos.
FONTE: Rakov (2000, p. 105).

Não foi encontrada na literatura nenhum trabalho abordando larguras de pulso da radiação de relâmpagos utilizando dados de sistemas de localização de larga escala. A análise apresentada constitui, portanto, um primeiro estudo sobre esse assunto com resultados

extraídos do SLT. Desta forma, fica clara a necessidade de novos estudos no futuro a fim de obter-se conclusões mais precisas e amplas sobre esse assunto.

De maneira semelhante ao tempo de subida, os sistema de localização não registram a largura de pulso da radiação segundo a definição usual da literatura, a qual consiste no intervalo de tempo entre o valor de pico do sinal e o zero. Como a largura de pulso fornecida pelo SLT corresponde ao tempo entre o valor de pico e o limiar de ativação do sensor e devido à influência dos efeitos de propagação sobre as formas de onda discutidos anteriormente, os dados da literatura, obtidos através de outras técnicas, tendem a ser mais altos. Em Rakov (2001) foram apresentados valores entre $49\mu\text{s}$ e $89\mu\text{s}$ em função da técnica, do local das medidas e da intensidade dos relâmpagos. Alguns autores utilizam o intervalo de tempo entre o valor de pico e 50% desse valor, obtendo larguras típicas de $40\mu\text{s}$ para relâmpagos com pico de corrente de 30kA (Ogawa. 1995).

As Figuras 5.23 e 5.24 ilustram formas de ondas típicas de relâmpagos NS negativos e positivos, respectivamente. Para um relâmpago negativo de 84kA , observa-se uma largura de pulso em torno de $50\mu\text{s}$, enquanto que para um relâmpago positivo de 52kA , a largura de pulso registrada foi de $30\mu\text{s}$, aproximadamente. Tais resultados novamente encontram-se acima dos valores registrados nesse trabalho, mostrando mais uma vez a necessidade de efetuar-se correções nos dados do SLT para obter-se valores mais próximos da realidade.

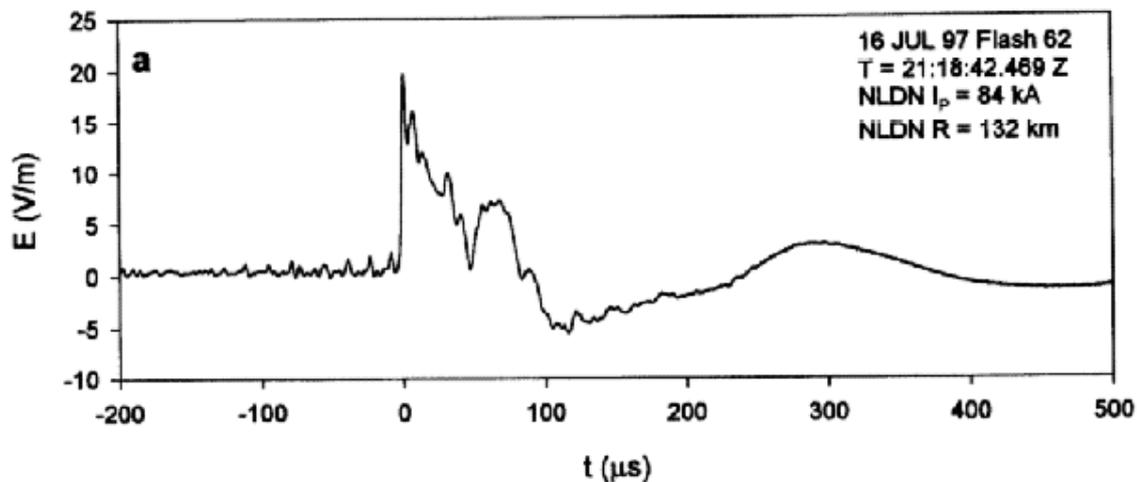


Fig. 5.23 – Forma de onda típica de um relâmpago NS negativo registrado nos Estados Unidos. A distância do evento ao local da medida ($R = 132$ km) e sua intensidade de corrente ($I_p = 84$ kA) foram estimadas através da NLDN. FONTE: Adaptada de Rakov (1999, p. 565).

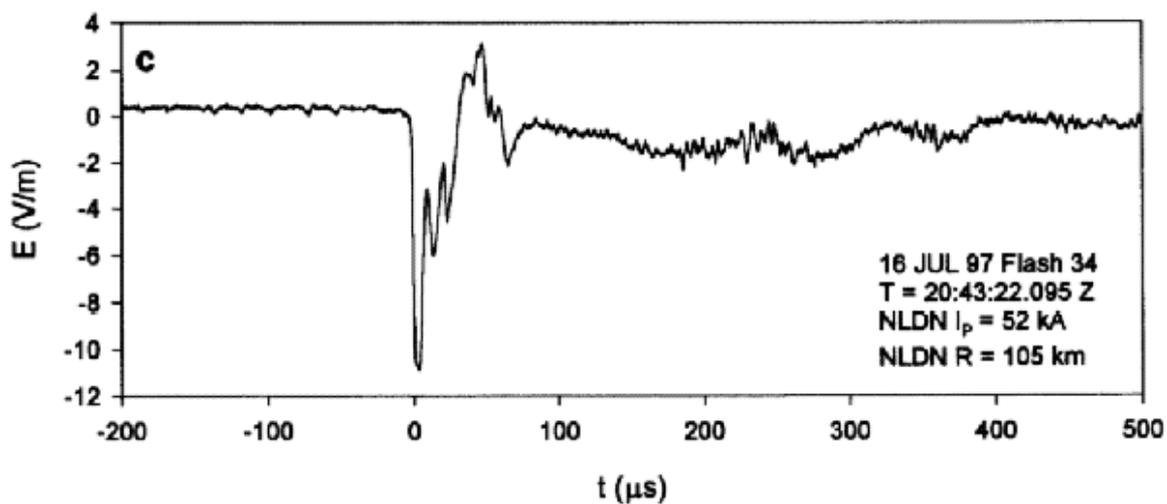


Fig. 5.24 – Forma de onda típica de um relâmpago NS positivo registrado nos Estados Unidos. A distância do evento ao local da medida ($R = 105$ km) e sua intensidade de corrente ($I_p = 52$ kA) foram estimadas através da NLDN. FONTE: Adaptada de Rakov (1999, p. 565).

5.3. ESTUDO PRELIMINAR DE RELÂMPAGOS SOBRE REGIÕES DENSAMENTE POVOADAS

5.3.1. Grande São Paulo

As Figuras 5.25 e 5.26 mostram a distribuição acumulada do número de relâmpagos na região da Grande São Paulo, o maior centro urbano do país, durante o verão dos anos de 2000 e 2001. As legendas trazem os intervalos do mapa temático para o número de relâmpagos e os valores entre parênteses representam a quantidade de quadrados de 4 km² cujo número de relâmpagos esteja naquele intervalo. Conforme discutido no Capítulo anterior, os dados referentes ao inverno não foram considerados para todas as regiões estudadas devido a baixa incidência de relâmpagos registrada em comparação com o verão.

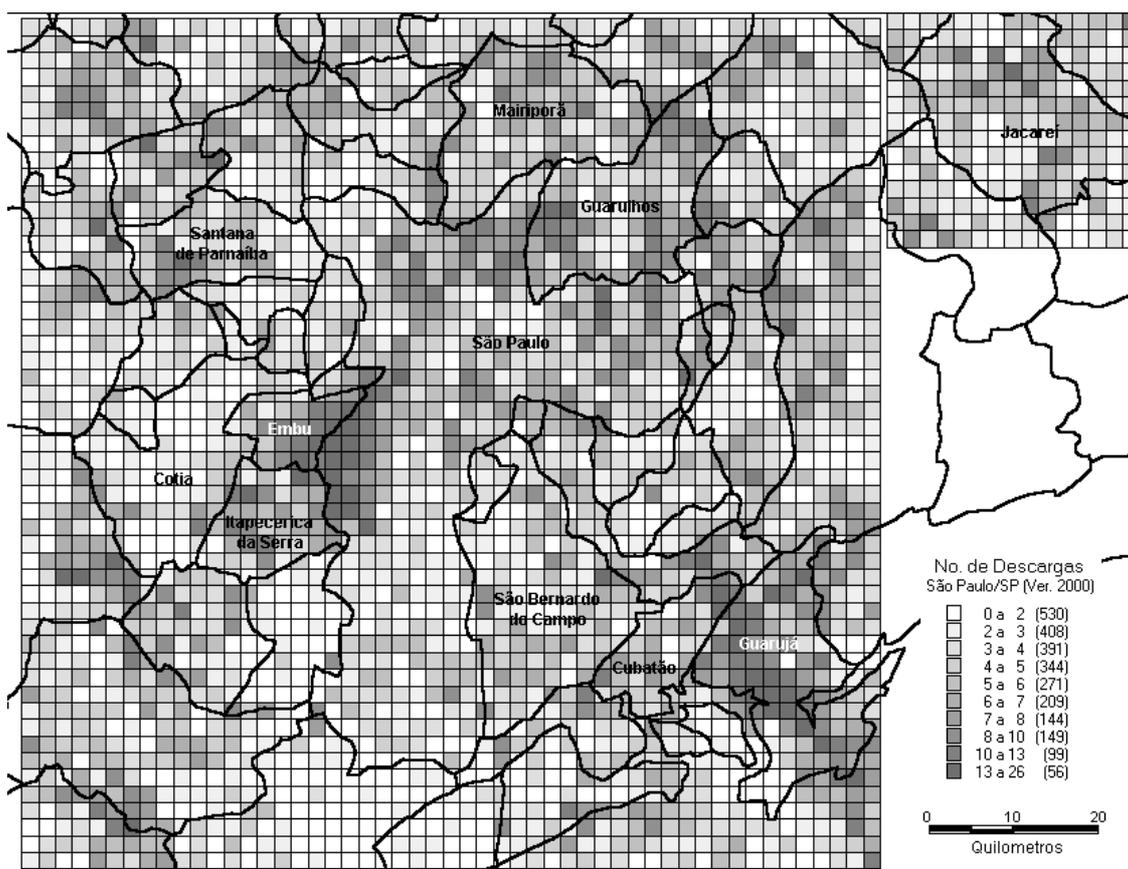


Fig. 5.25 – Distribuição do número de relâmpagos na região da Grande São Paulo durante verão de 2000 (dados do cenário E).

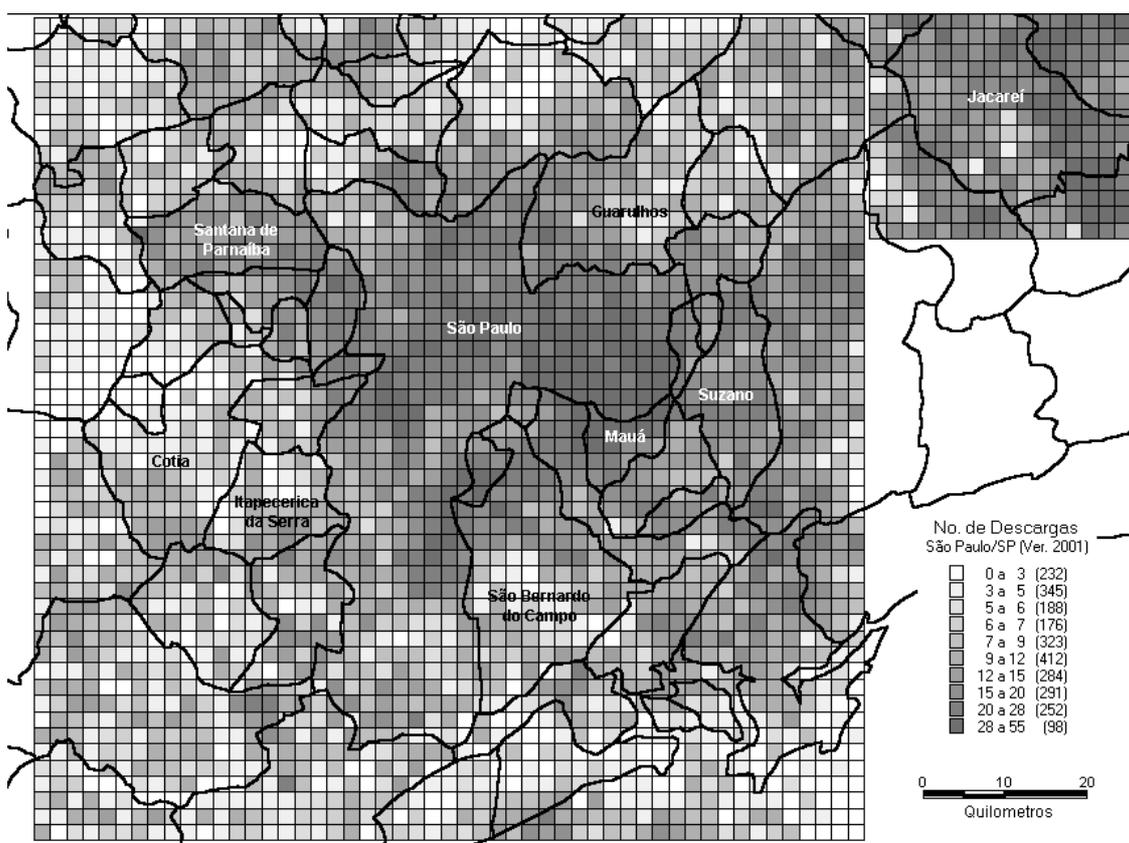


Fig. 5.26 – Distribuição do número de relâmpagos na região da Grande São Paulo durante verão de 2001 (dados do cenário E).

A Figura 5.27 apresenta o número de relâmpagos registrados durante o verão na região da Grande São Paulo para os anos de 2000 e 2001 utilizando-se o cenário de configuração E. Claramente, observa-se um aumento na ocorrência de relâmpagos (cerca de 164%) no ano de 2001 em comparação com 2000. Entretanto, quando se compara as Figuras 5.25 e 5.26, percebe-se nitidamente que esse aumento não ocorreu de forma uniforme em toda a região, havendo uma significativa concentração de relâmpagos sobre a região metropolitana da cidade (mostrada na Figura 5.28). Este curioso efeito constitui uma forte evidência de que a atividade humana teve sua parcela de contribuição na alteração das condições ambientes locais, provocando assim o aumento concentrado do número de relâmpagos sobre as regiões mais densamente povoadas.

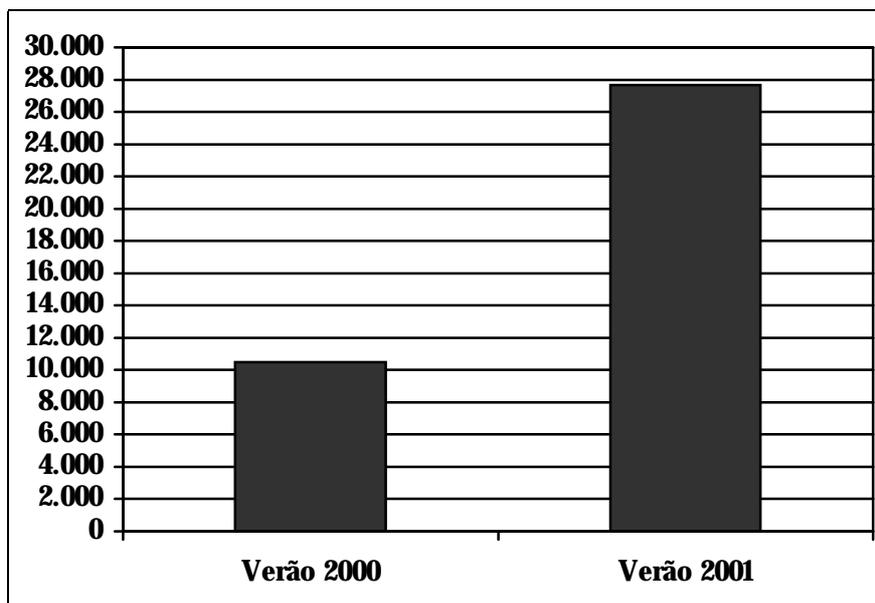


Fig. 5.27 – Número total de relâmpagos registrados na região da Grande São Paulo durante o verão dos anos de 2000 e 2001 (dados do cenário E).

Por outro lado, a comparação da Figura 5.26 com a Figura 5.28 revela uma relação surpreendente entre a temperatura do solo, registrada via satélite, e a concentração do número de relâmpagos. Fisicamente, isso é facilmente explicado devido a estreita relação entre a temperatura e a morfologia das nuvens de tempestades, conforme mostrado por Orville (1990). Quanto maior a temperatura, maior será a energia de ascensão do ar, dando origem a nuvens mais profundas. Estas, por sua vez, apresentarão centros de cargas maiores, aumentando assim a ocorrência de relâmpagos.

Além disso, comparando-se as Figuras 5.28 e 5.29, observa-se que a distribuição geográfica da temperatura também acompanha com extrema fidelidade a região de maior concentração populacional e industrial do município de São Paulo. Embora o mapa de temperatura apresentado tenha sido obtido em setembro de 1999, acredita-se que essa configuração da temperatura local, denominada ilha de calor, venha se repetindo anualmente, com efeitos ainda mais acentuados no verão. Isso porque, se esse fenômeno estiver realmente associado à poluição atmosférica, devastação da vegetação e construção

das estruturas urbanas, sua ocorrência será permanente ao longo dos anos em função do constante desenvolvimento econômico da região. Este constitui, portanto, um outra forte evidência de que o grande centro urbano esteja atuando significativamente nas características locais dos relâmpagos.

Resultados semelhantes foram encontrados por Westcott (1995) em dezesseis grandes centros urbanos dos Estados Unidos utilizando quatro anos de dados (1989-1992) obtidos através da rede de detecção de relâmpagos americana (NLDN). Neste trabalho, observou-se um acréscimo de 40% a 85% na densidade de relâmpagos sobre várias das cidades estudadas. Diversos fatores, físicos e antropogênicos, foram levantados como possíveis causas para o fenômeno observado, embora nenhum deles pareça ser preponderante sobre os demais, estando todos inter-relacionados: 1) as dimensões físicas do centro urbano; 2) sua densidade populacional; 3) os elevados níveis de poluição atmosférica; 4) a ocorrência de ilhas de calor e 5) as características topográficas específicas da região, como a presença de lagos, rios, vales e cadeias montanhosas.

Orville e Huffines (2000) também observaram variações significativas no número de relâmpagos, especialmente no percentual de positivos, nas regiões metropolitanas de *Houston* e *Dallas* e na região das refinarias de *Lake Charles*. O fator apontado neste trabalho como possível causa primária do fenômeno seria a poluição atmosférica presente nas áreas estudadas.

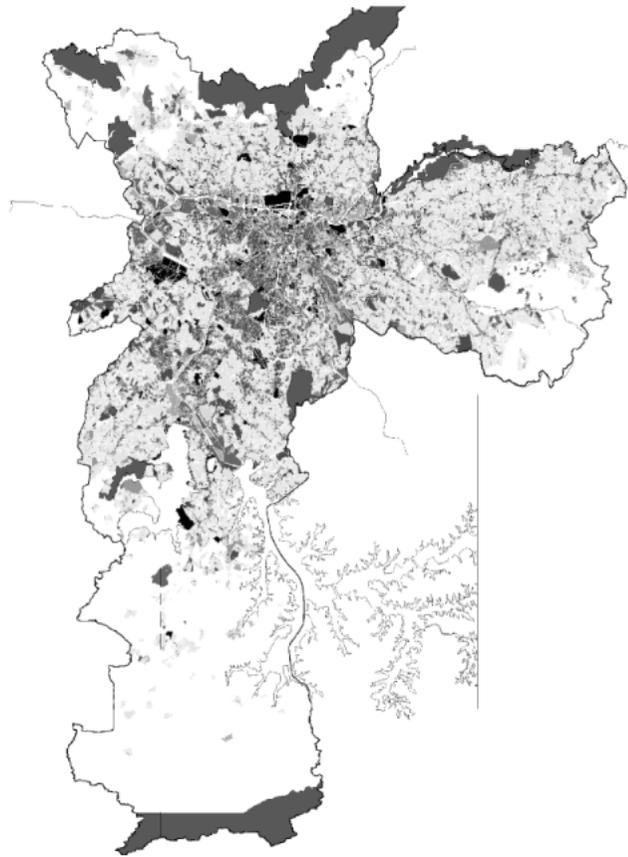


Fig. 5.28 – Mapa de ocupação do solo do município de São Paulo para o ano de 1999. As regiões em tons mais escuros representam uma ocupação superior a 60% por residências, estabelecimentos comerciais e indústrias.
FONTE: Adaptada de São Paulo.
SVMA/SEMPA/PRODAM (2000).

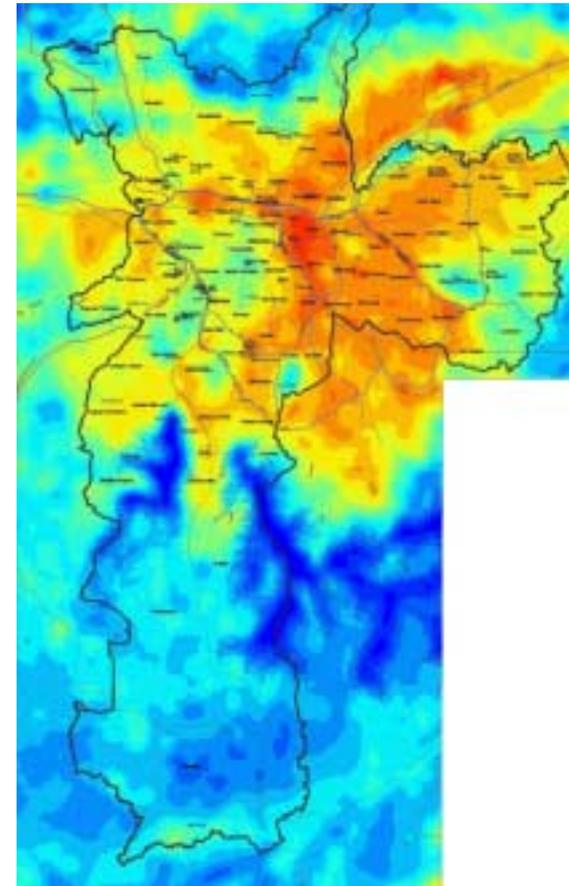


Fig. 5.29 – Mapa da banda termal do município de São Paulo obtido pelo satélite LandSat-7 em 03/Set/1999. As cores vermelha e azul indicam, respectivamente, maior e menor temperatura aparente do solo.
FONTE: Adaptada de São Paulo.
SVMA/SEMPA/PRODAM (2000).

Com objetivo de ampliar os resultados obtidos anteriormente para a área urbana da Grande São Paulo, analisou-se também os dados da corrente de pico e multiplicidade dos relâmpagos através dos mapas temáticos apresentados nas Figuras 5.30 e 5.31, respectivamente. Para a construção desses mapas, os dados dos anos de 2000 e 2001, obtidos através do cenário de configuração G, foram agrupados em um único conjunto, visando assim aumentar sua significância estatística. Os dados de relâmpagos positivos foram excluídos desta análise devido ao reduzido número de ocorrências em comparação com os negativos, impedindo assim qualquer resultado estatístico relevante. As legendas dos mapas mostram os intervalos de valores para a corrente e a multiplicidade e a contagem dos quadrados cujos valores médios estejam naquele intervalo.

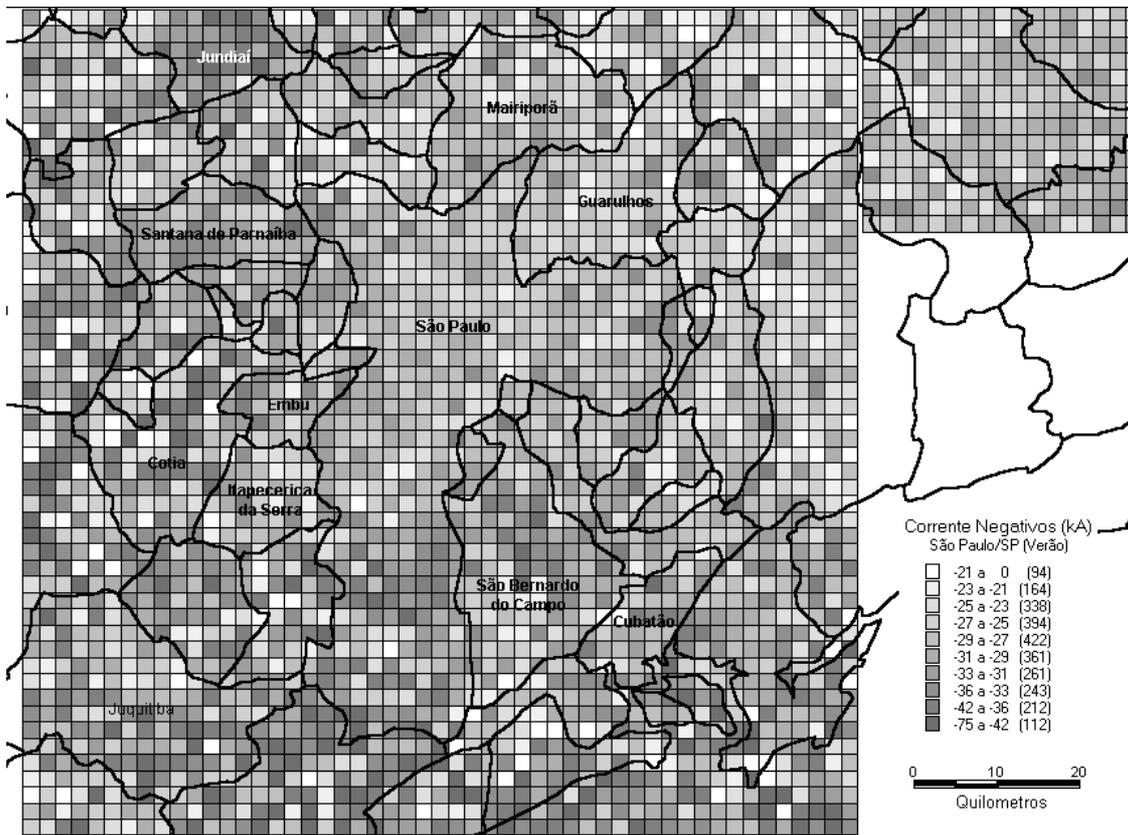


Fig. 5.30 – Distribuição acumulada da intensidade de corrente de pico (kA) dos relâmpagos negativos na região da Grande São Paulo para o verão dos anos de 2000 e 2001 (dados do cenário G).

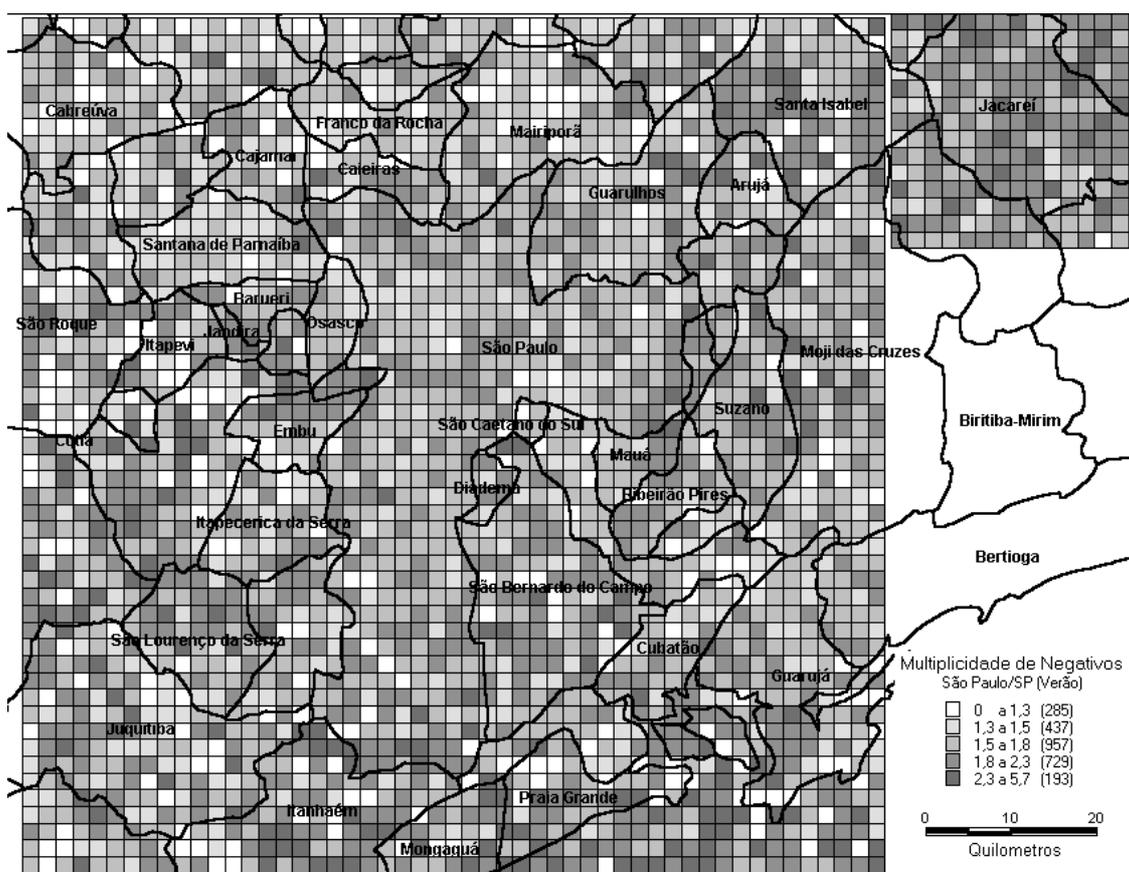


Fig. 5.31 – Distribuição acumulada da multiplicidade dos relâmpagos negativos na região da Grande São Paulo para o verão dos anos de 2000 e 2001 (dados do cenário G).

Com base nos dados que deram origem aos dois mapas acima, calculou-se a média ponderada da intensidade de corrente e da multiplicidade dos relâmpagos na região da Grande São Paulo: **29,2kA** e **1,71**, respectivamente.

No intuito de verificar uma possível correlação entre a intensidade de corrente, a multiplicidade e a quantidade de relâmpagos, construiu-se três gráficos, mostrados nas Figuras 5.32, 5.33 e 5.34, relacionando esses parâmetros entre si para cada quadrado do respectivo mapa temático. Analisando esses resultados, observa-se que não há nenhuma correlação entre a intensidade de corrente de pico, a multiplicidade e o número de relâmpagos.

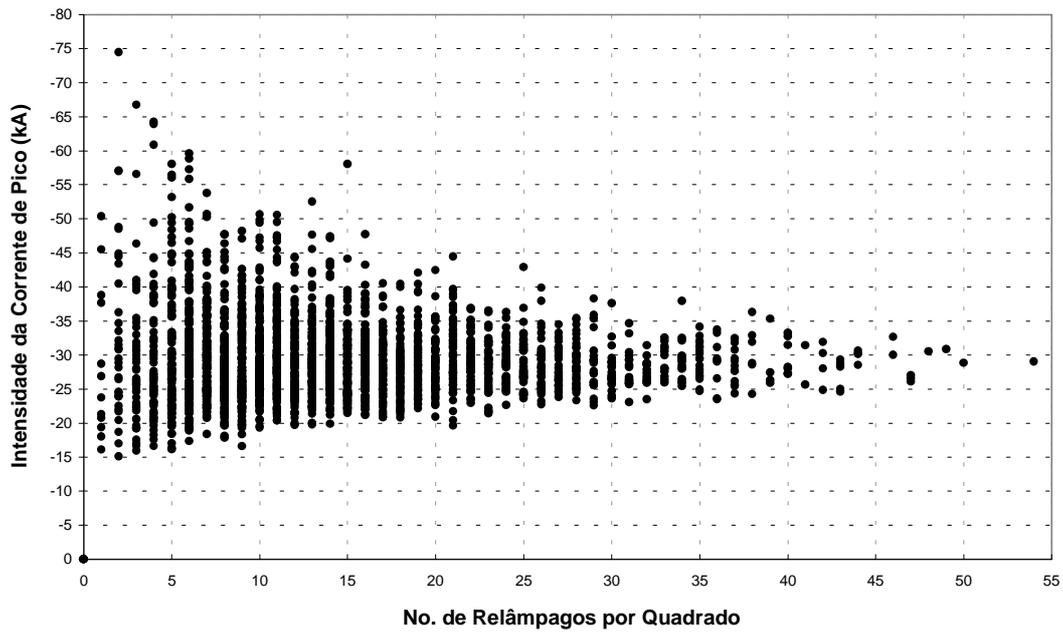


Fig. 5.32 – Correlação entre o número relâmpagos e a intensidade da corrente de pico dos negativos ocorridos na região da Grande São Paulo nos anos de 2000 e 2001.

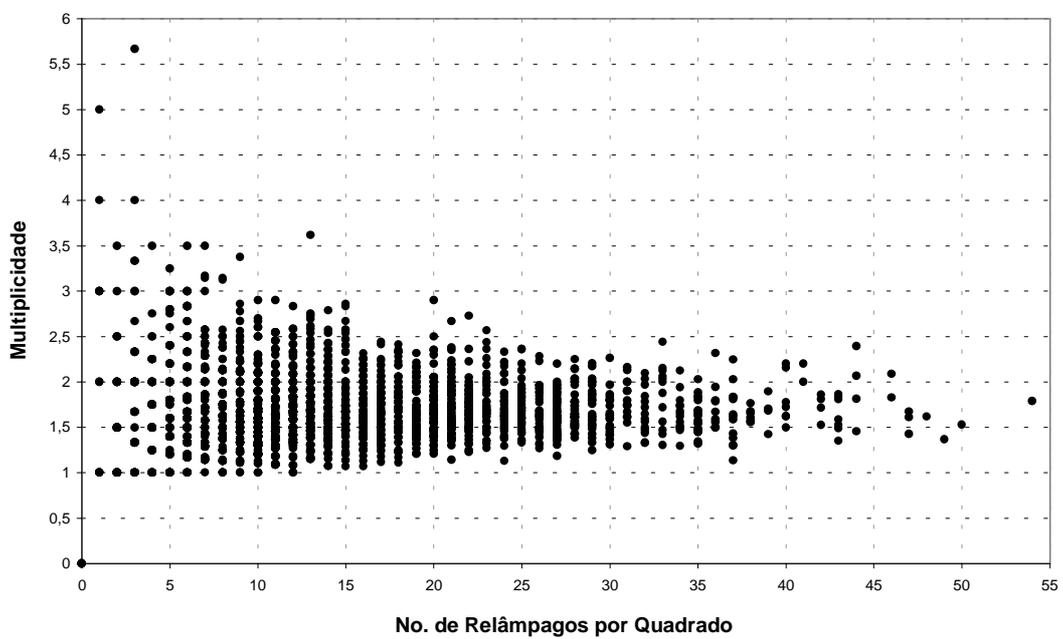


Fig. 5.33 – Correlação entre o número de relâmpagos e a multiplicidade dos negativos ocorridos na região da Grande São Paulo nos anos de 2000 e 2001.

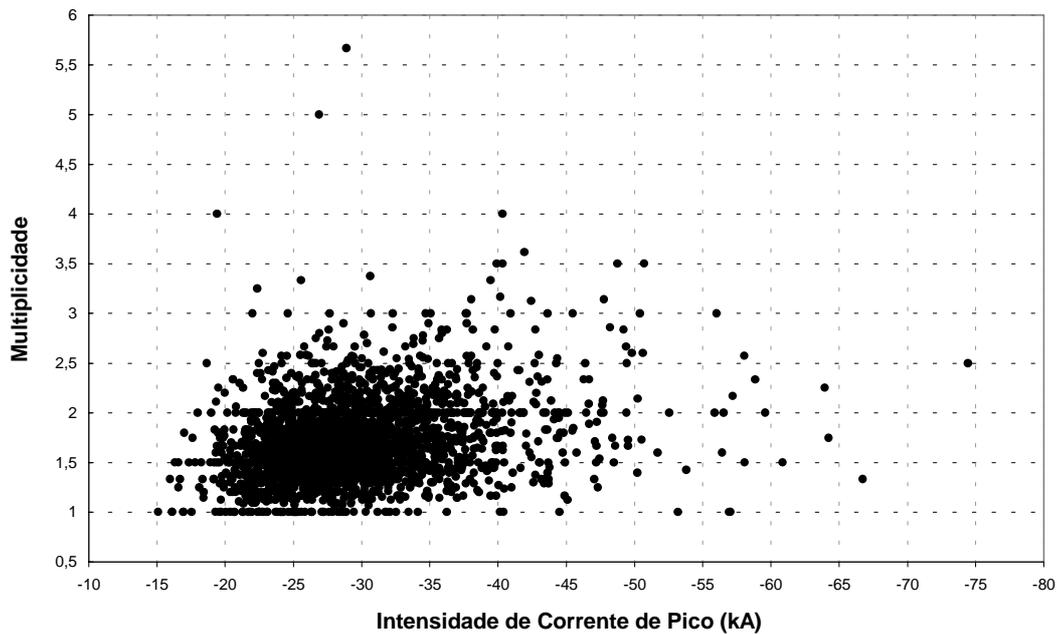


Fig. 5.34 – Correlação entre a intensidade da corrente de pico e a multiplicidade dos relâmpagos negativos ocorridos na região da Grande São Paulo nos anos de 2000 e 2001.

Para verificar se a concentração populacional e industrial estaria atuando sobre a ocorrência de relâmpagos em outros centros urbanos além da Grande São Paulo, analisou-se também a distribuição geográfica dos relâmpagos no verão dos anos 2000 e 2001 em duas outras importantes áreas urbanas do estado de São Paulo: a Grande Campinas e o Vale do Paraíba. Devido ao caráter preliminar deste estudo, não foram obtidos os mapas de ocupação e temperatura do solo para estas duas regiões. Por esse motivo, não serão feitas análises sobre a relação das condições ambientais com o comportamento dos relâmpagos (conforme discussão da Seção 5.3.1), limitando-se apenas à apresentação dos resultados e à formulação de hipóteses.

5.3.2. Grande Campinas

Os mapas temáticos do número de relâmpagos registrados na região da Grande Campinas são apresentados nas Figuras 5.35 e 5.36. Através da Figura 5.37, observa-se claramente observa-se um aumento de, aproximadamente, 136% no número de eventos em 2001 em relação a 2000. Os mapas também revelam que o aumento da ocorrência de relâmpagos não foi uniforme, dando origem às elevadas densidades registradas na região metropolitana da cidade, conforme mostra a foto da Figura 5.38.

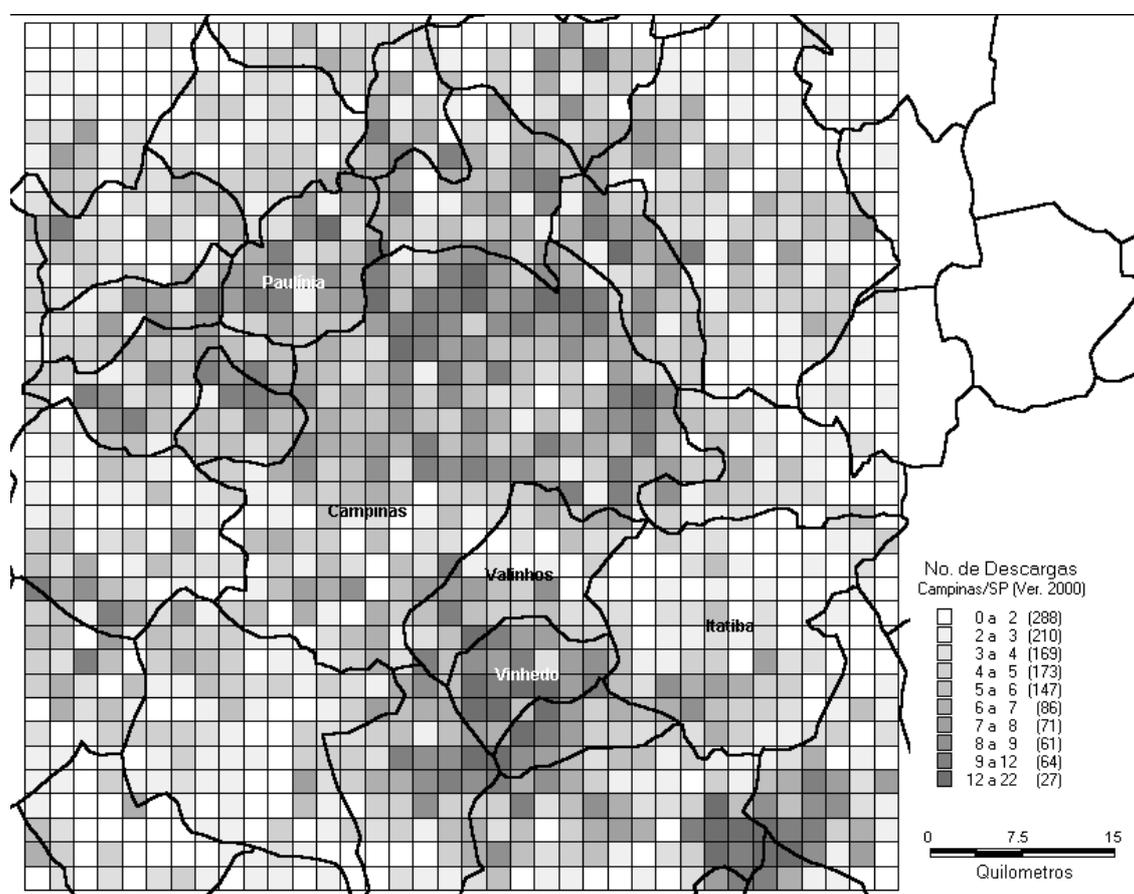


Fig. 5.35 – Distribuição do número de relâmpagos na região da Grande Campinas durante verão de 2000 (dados do cenário E).

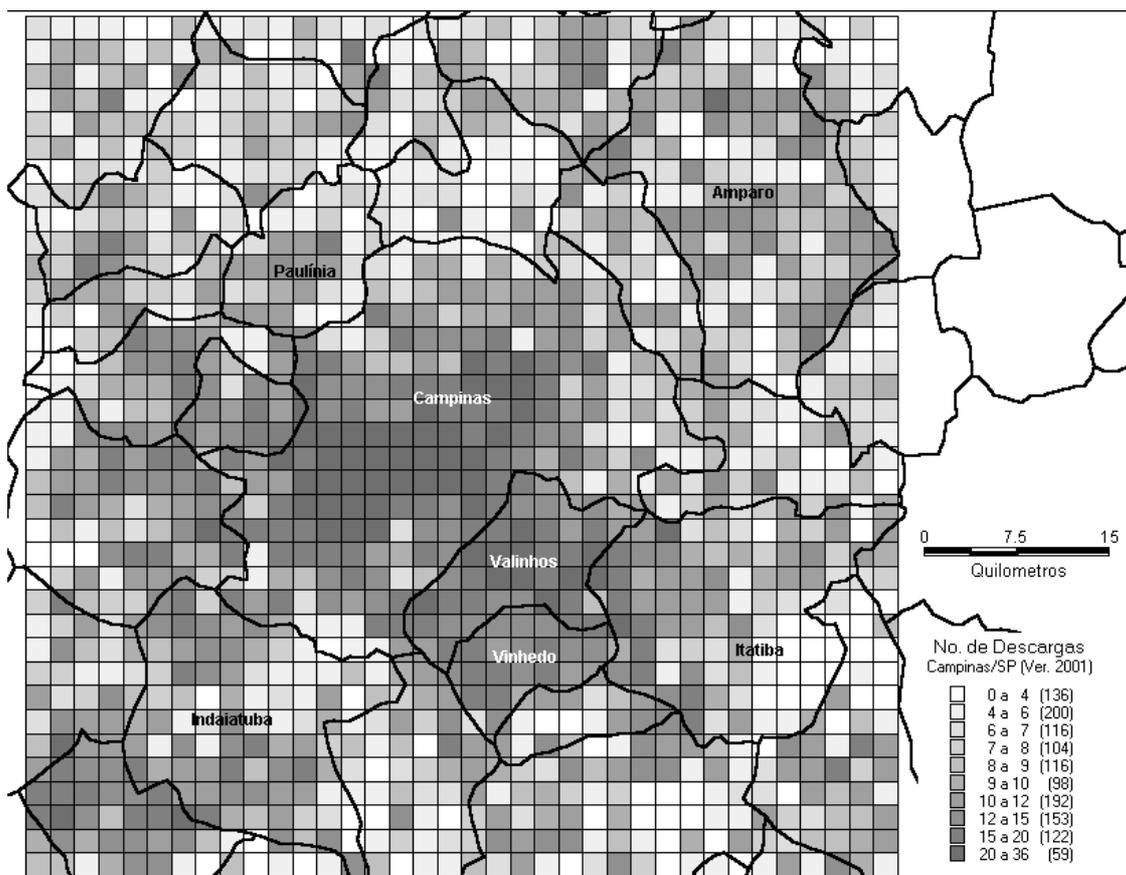


Fig. 5.36 – Distribuição do número de relâmpagos na região da Grande Campinas durante verão de 2001 (dados do cenário E).

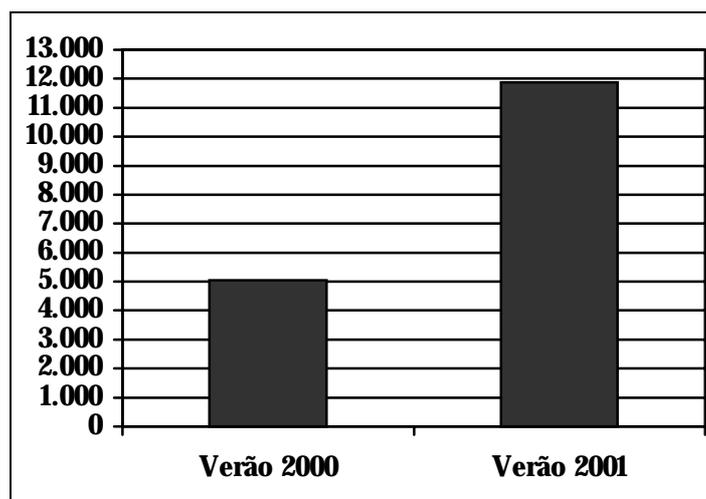


Fig. 5.37 – Número total de relâmpagos registrados na região da Grande Campinas durante o verão dos anos de 2000 e 2001 (dados do cenário E).

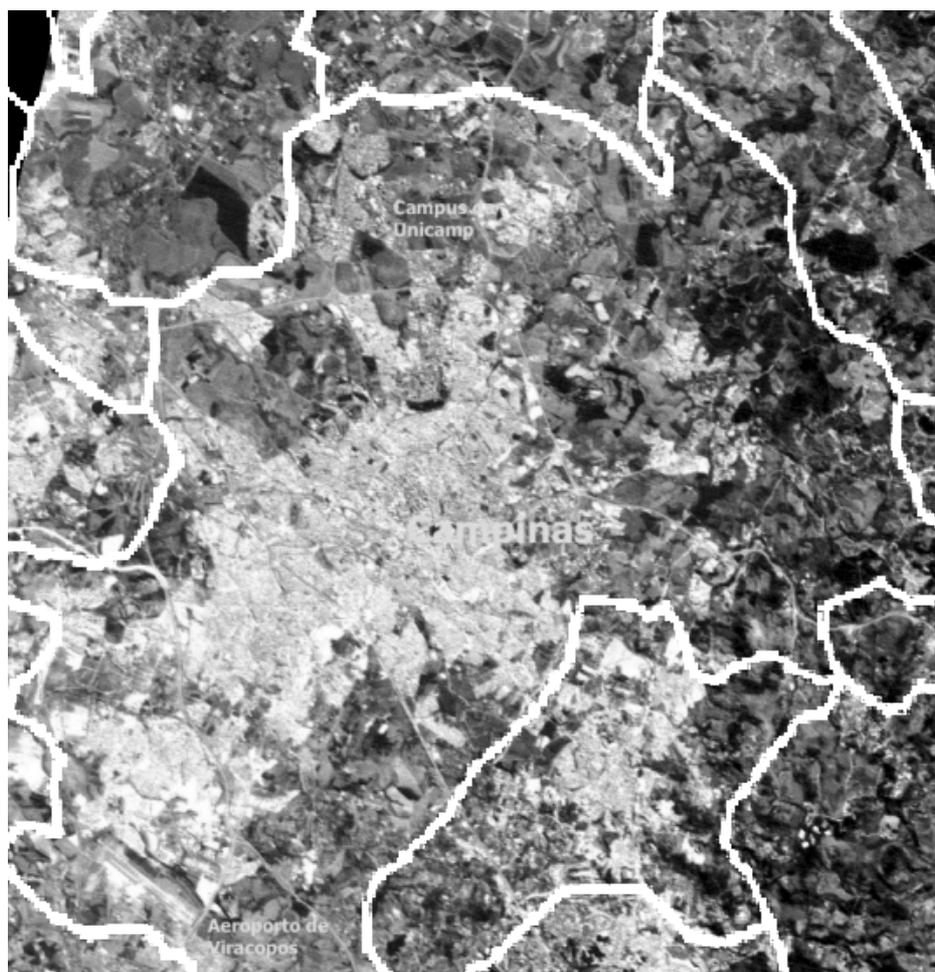


Fig. 5.38 – Foto da região metropolitana de Campinas/SP obtida pela câmara CCD do satélite CBERS em 27/Abr/2000, cobrindo uma área de aproximadamente 30x30km em torno do centro da cidade. As regiões bem escuras correspondem a vegetação, sendo que as áreas urbanas aparecem em tons mais claros. A linha branca indica aproximadamente os limites do município. A sudeste, encontram-se os municípios de Valinhos e Vinhedo.
FONTE: Adaptada de UNICAMP. IG (2000).

Com base nesses resultados, conclui-se que o comportamento dos relâmpagos observado para a região da Grande Campinas assemelha-se muito àquele observado para a Grande São Paulo. Isso leva a crer que, para esta região, estariam atuando os mesmos fatores físicos e antropogênicos responsáveis pela alteração da estrutura elétrica das nuvens de tempestade em São Paulo/SP. A formação das ilhas de calor em função da atividade humana (poluição atmosférica, destruição da vegetação e construção das estruturas urbanas) seria, novamente nesse caso, um possível fator responsável pela ocorrência desse efeito.

Como não foram observadas correlações entre a distribuição geográfica dos relâmpagos e suas respectivas intensidade de corrente e multiplicidade para a Grande São Paulo, esses parâmetros não foram analisados para as regiões da Grande Campinas e Vale do Paraíba. Apenas a título informativo, calculou-se as médias da intensidade de corrente de pico e da multiplicidade para os relâmpagos negativos registrados na Grande Campinas, obtendo-se os valores de **28,6kA** e **1,89**, respectivamente.

5.3.3. Vale do Paraíba

A Figura 5.39 apresenta o total de relâmpagos registrado no Vale do Paraíba para os verões de 2000 e 2001, revelando um número de ocorrências em torno de 459% maior em 2001 em comparação com 2000. As Figuras 5.40 e 5.41 mostram os mapas temáticos do número de relâmpagos para a região do Vale do Paraíba no verão dos anos 2000 e 2001, respectivamente. Com base nesses mapas, observa-se novamente elevadas densidades de relâmpagos sobre as áreas mais densamente povoadas (especialmente São José dos Campos e Jacareí), acompanhando o comportamento observado nas duas regiões anteriores.

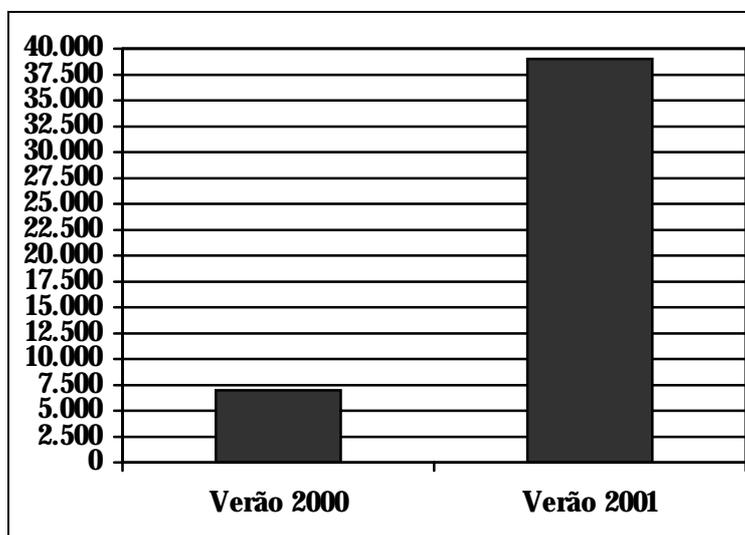


Fig. 5.39 – Número total de relâmpagos registrados no Vale do Paraíba durante o verão dos anos de 2000 e 2001 (dados do cenário E).

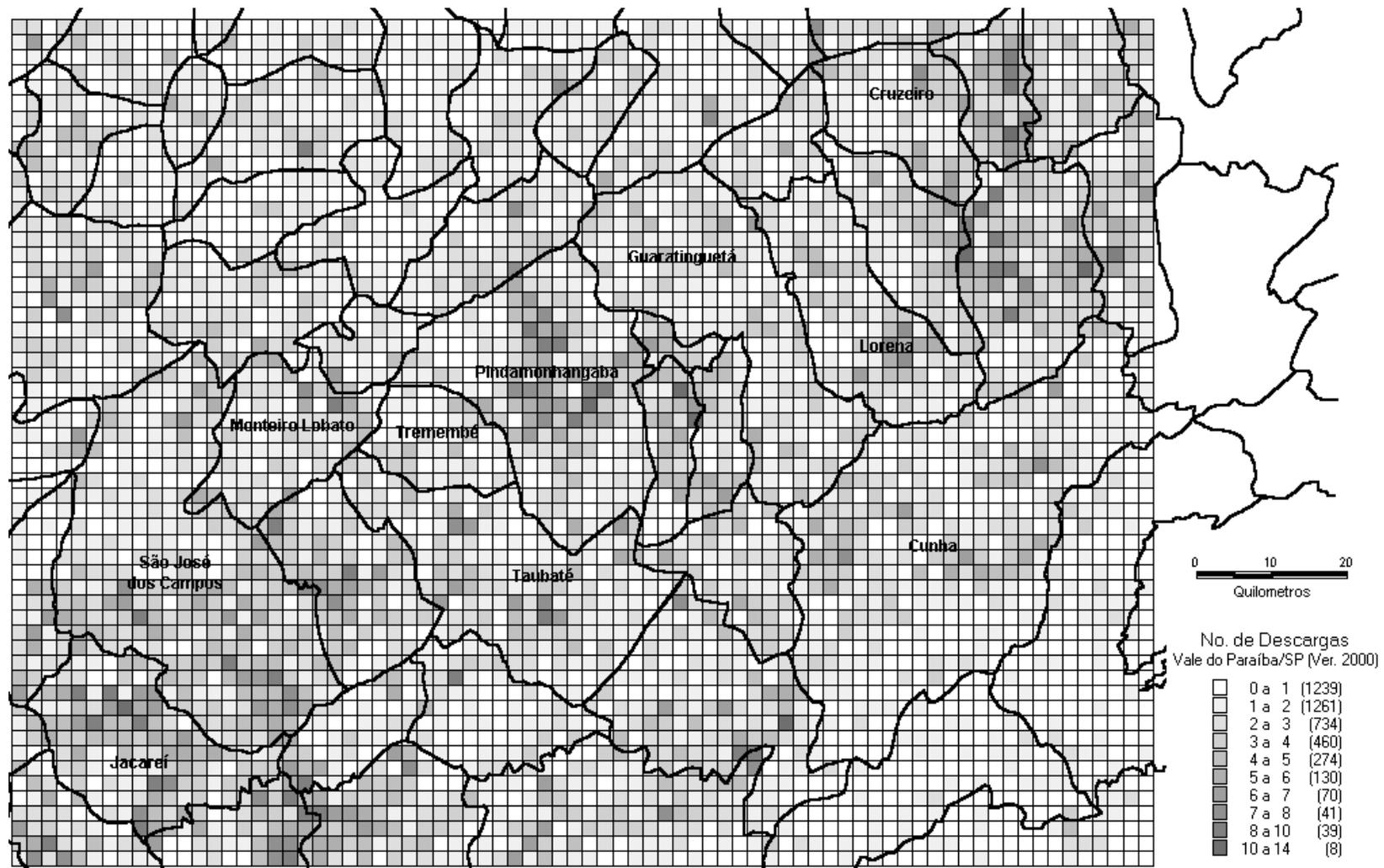


Fig. 5.40 – Distribuição do número de relâmpagos na região do Vale do Paraíba durante o verão de 2000 (dados do cenário E).

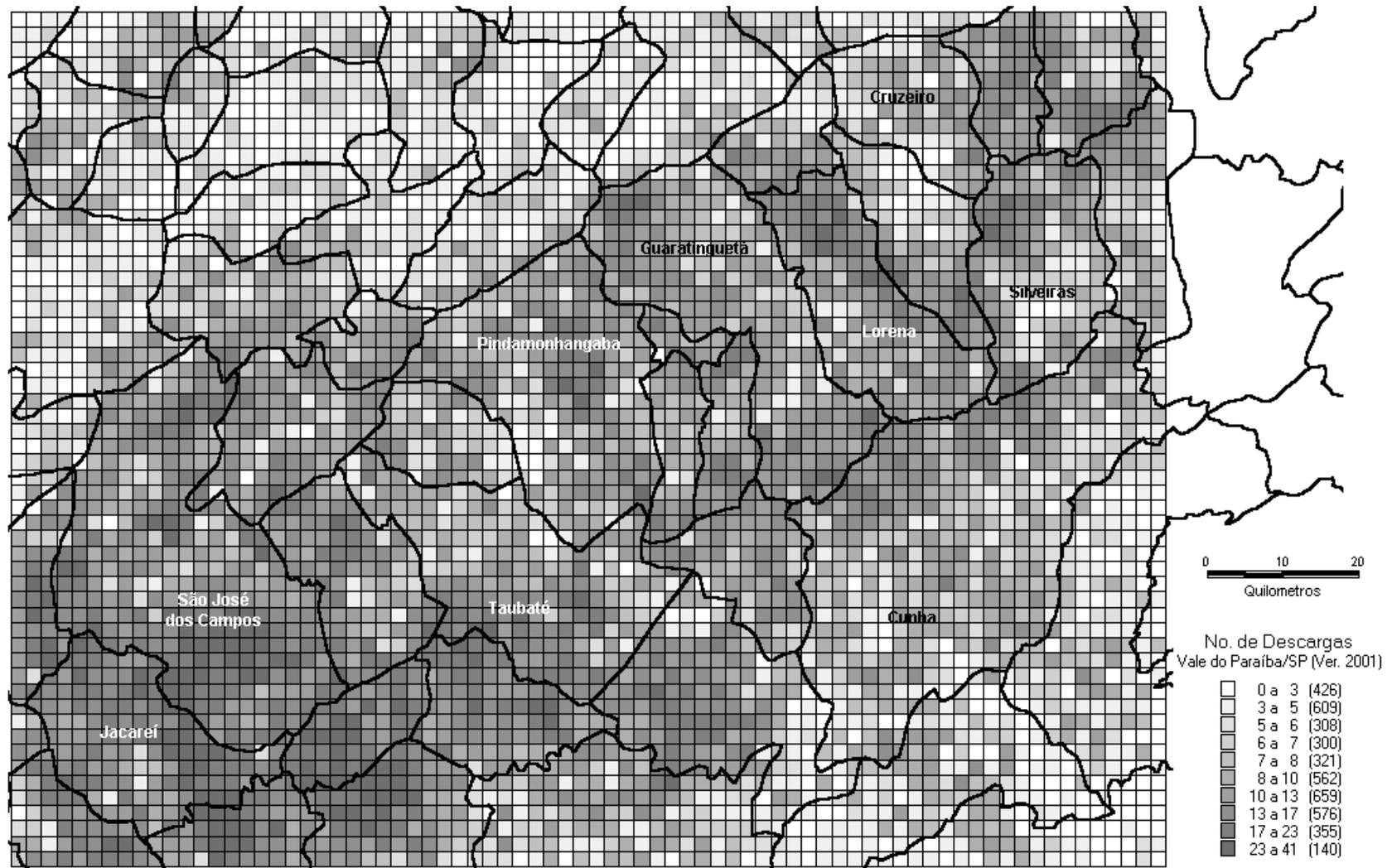


Fig. 5.41 – Distribuição do número de relâmpagos na região do Vale do Paraíba durante o verão de 2001 (dados do cenário E).

Não foi possível obter-se um mapa da distribuição populacional e industrial do Vale dos Paraíba mas percebe-se claramente que os relâmpagos concentram-se nos pontos onde há maior população e atividade industrial (principalmente nas cidades de Jacareí, São José dos Campos e ao longo da rodovia Presidente Dutra). Este aspecto pode ser melhor observado no mapa da Figura 5.43, o qual abrange toda a extensão da rodovia BR-116, partindo desde São Paulo/SP até o Rio de Janeiro/RJ, gerado com os dados acumulados do verão de 2000 e 2001. A Figura 5.42 apresenta o totais de relâmpagos para essa região. Obviamente, não se pode afirmar que a ação do homem seja o único fator responsável pelos efeitos observados, uma vez que os aspectos geográficos, climáticos e topográficos da área estudada também possuem sua significativa parcela de contribuição. Entretanto, os fatos apresentados neste trabalho constituem fortes indícios de que os centros urbanos estejam influenciando de alguma forma o comportamento dos relâmpagos porém, somente estudos mais detalhados no futuro poderão efetivamente mostrar se este fenômeno está realmente ocorrendo ou trata-se de um efeito isolado e quais suas possível causas.

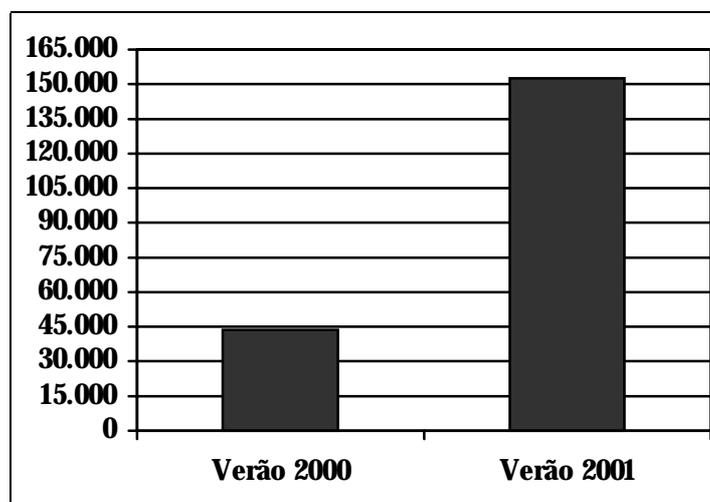


Fig. 5.42 – Número total de relâmpagos registrados ao longo da BR-116 no verão dos anos de 2000 e 2001 (dados do cenário E).

Para o Vale do Paraíba, os valores médios da intensidade de corrente e multiplicidade encontrados para os relâmpagos negativos foram **27,3kA** e **1,83**, respectivamente.

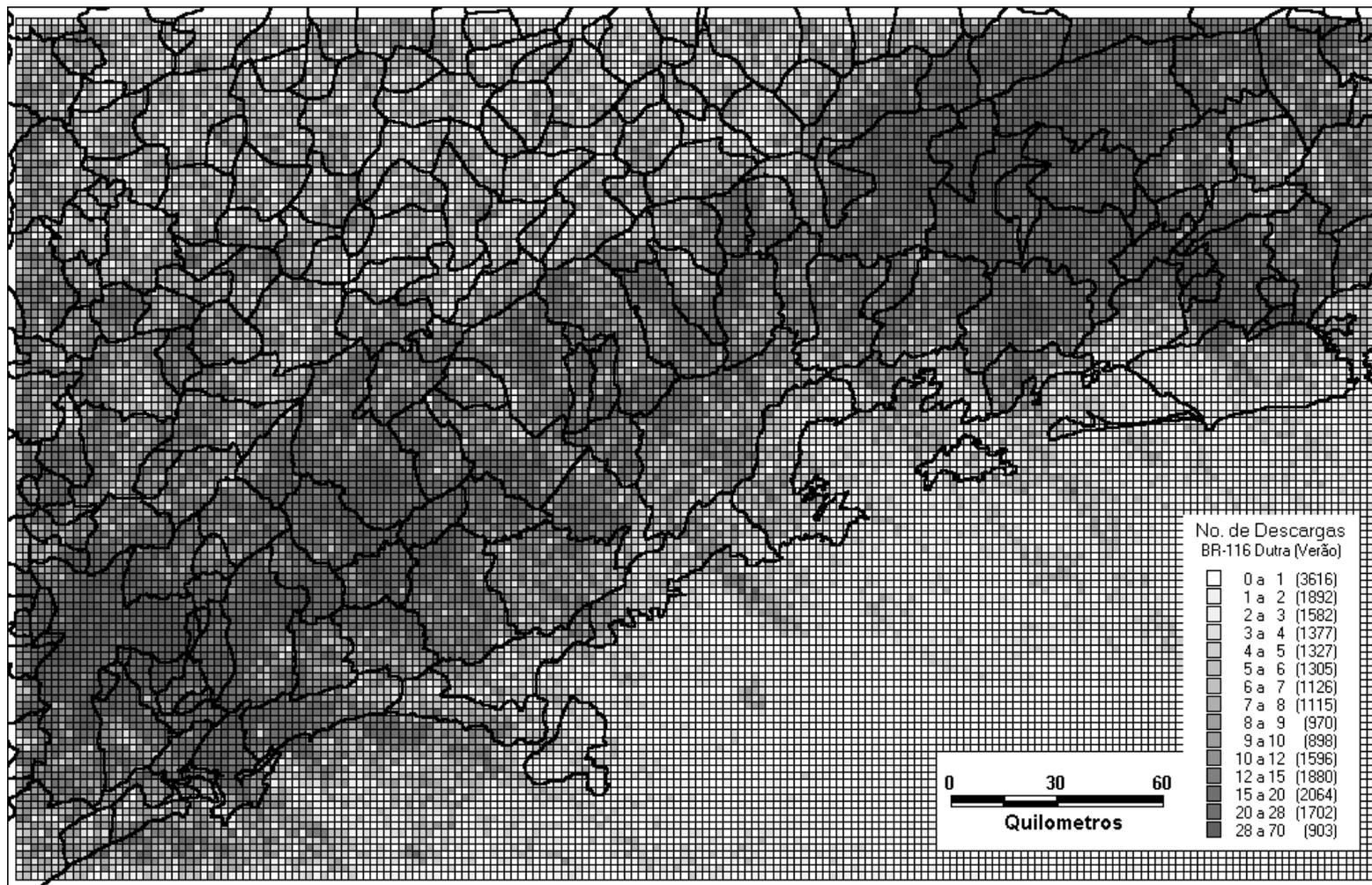


Fig. 5.43 – Distribuição acumulada do número de relâmpagos ao longo da rodovia Presidente Dutra (BR-116) durante o verão dos anos de 2000 e 2001 (dados do cenário E).

CAPÍTULO 6

PRINCIPAIS CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo resume as principais conclusões deste trabalho no que se refere aos três principais estudos realizados: 1) Análise de desempenho do SLT; 2) Estudo das características dos relâmpagos na região sudeste do Brasil; 3) Estudo preliminar de relâmpagos sobre regiões densamente povoadas. Muitas questões ainda não puderam ser respondidas devido aos conjuntos de dados insuficientes. Desta forma, ficam aqui várias sugestões para orientar trabalhos futuros com o objetivo de ampliar os conhecimentos já adquiridos e buscar outros ainda não consolidados.

6.1. ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SLT

Em termos de qualidade dos resultados e contaminação por relâmpagos IN, o cenário G apresentou o melhor desempenho, sendo indicado para análises mais detalhadas das características físicas e geográficas dos relâmpagos, nas quais o número de relâmpagos em si não constitui um fator importante. Como este cenário exige a participação de pelo menos uma antena IMPACT nas soluções, conclui-se que estes sensores, juntamente com a configuração da central de processamento, possuem um papel fundamental na melhoria da qualidade dos dados gerados pelo sistema. Esse resultado já era esperado em função do aprimoramento tecnológico das antenas IMPACT em relação a suas precursoras LPATS.

O cenário E constituiu uma configuração intermediária que soube balancear um bom número de relâmpagos detectados com bons níveis de qualidade, quando comparado com o cenário G, o qual apresentou um número reduzido de relâmpagos, devido a suas características mais restritivas. Desta forma, o cenário E define a configuração mais adequada quando se deseja realizar análises que dependam do número de relâmpagos mas que exijam certa confiabilidade dos dados.

A atual configuração do SLT foi avaliada através de dados reprocessados e os resultados revelaram que, do ponto de vista de detecção de relâmpagos em larga escala e monitoramento de tempestades, o SLT apresenta um desempenho satisfatório. Cabe ressaltar, entretanto, que para análises de eventos mais específicos limitados a regiões específicas, bem como a determinação de suas características, é altamente recomendado o reprocessamento das informações utilizando-se configurações mais confiáveis (cenários E ou G). Isso porque, o cenário B apresentou significativa contaminação dos dados por relâmpagos IN intensos detectados erroneamente pelo SLT como positivos válidos de baixa intensidade de corrente.

Este trabalho constitui uma primeira análise de desempenho do SLT desenvolvida com base nas características dos relâmpagos e em alguns parâmetros de qualidade fornecidos pelo sistema. Torna-se necessária no futuro, uma análise mais detalhada com base em todas as informações de desempenho geradas pelo sistema com o intuito de avaliar não só a configuração da central de processamento como um todo, mas também levantar a eficiência dos sensores individualmente e de toda rede de detecção.

O estudo de degradação revelou uma queda na qualidade das informações fornecidas pelo sistema para regiões fora da malha de sensores em comparação com a região interna da malha. Esse resultado foi comprovado pela análise dos dados de relâmpagos para regiões externas à rede, a qual mostrou que a qualidade das informações ficava prejudicada pela detecção de relâmpagos distantes dos sensores. Já o estudo do efeito de propagação mostrou que, a perda de qualidade das informações para uma região fora da malha de sensores sobre o oceano é menor que a perda ocorrida para uma região sobre o continente, ambas à mesma distância da região interna da malha e localizadas à mesma latitude. Esse resultado deve-se à menor atenuação sofrida pela radiação EM ao se propagar sobre o oceano que sobre o continente. Desta forma, pode-se afirmar que, para um mesmo nível de qualidade, o alcance do sistema sobre o oceano é maior que sobre o continente.

O estudo de efeito de propagação também revelou valores de corrente maiores para regiões fora da malha de sensores. Isso porque somente os relâmpagos mais intensos podem ser detectados à distâncias maiores, elevando assim a média da corrente. Entretanto, a menor

atenuação sofrida pela radiação EM sobre o oceano leva a valores médios de corrente maiores nestes locais que os valores obtidos sobre o continente. Isto deve-se ao modelo de propagação utilizado pelo SLT, o qual utiliza um único coeficiente de atenuação para todos os casos calculado, com base na atenuação sobre o continente. Trabalhos futuros poderiam aplicar correções aos dados de corrente gerados pelo SLT para compensar os efeitos de propagação diferenciados sobre o continente e oceano, conforme proposto na literatura (Cooray. 1987, 2000; Galván. 1999), com o objetivo de obter-se os valores reais da intensidade de corrente para os relâmpagos oceânicos. Isso permitiria estudos comparativos de suas características com os relâmpagos continentais.

Houve também uma diferença significativa entre a multiplicidade dos relâmpagos negativos detectados sobre as Regiões Oceânica e Continental, a qual não parece estar associada às limitações do SLT. Este fato necessita ser analisado com mais critério no futuro mas há indícios de que existam realmente diferenças físicas entre as nuvens de tempestades oceânicas e continentais, as quais se refletem na maior multiplicidade dos relâmpagos no continente.

6.2. ESTUDO DOS RELÂMPAGOS NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL

O percentual de relâmpagos positivos registrados na região sudeste do Brasil apresentou-se significativamente maior no inverno (média de 23%) em comparação com o verão (média de 5,7%), um resultado que concorda com as observações publicadas na literatura. Entretanto, trabalhos recentes nos Estados Unidos e no Brasil revelaram que esse parâmetro depende grandemente das condições geográficas e orográficas da região estudada, devido a influência na morfologia das nuvens de tempestade. Portanto, os resultados deste trabalho são próprios para a região sudeste do Brasil e, com isso, tornam-se necessários estudos complementares para a obtenção dos valores característicos de outras regiões do Brasil.

Os resultados mostraram também que os relâmpagos negativos apresentam uma intensidade de corrente de pico 18,9% maior no verão (média de 36,9kA) que no inverno (média de 29,9kA), enquanto que um comportamento contrário pôde ser observado para

os relâmpagos positivos (com médias de 50,5kA no inverno e 46,9kA no verão), sendo 7,2% mais intensos no inverno. Este resultado concorda com os dados apresentados na literatura, porém não há um consenso ainda quanto aos valores típicos dos relâmpagos positivos devido a grande variabilidade das medidas de corrente em função da técnica experimental, localização geográfica e época do ano. Os valores médios de corrente dos relâmpagos negativos registrados na região sudeste do Brasil (cerca de 33kA) foram significativamente maiores aos registrados nos Estados Unidos (média de 20kA ao longo do ano). Como a região estudada localiza-se em latitudes bem mais baixas que os E.U.A, comprova-se os resultados apresentados na literatura de que os relâmpagos negativos tendem a ser mais intensos em regiões próximas do equador (latitudes baixas entre -30°S e 30°N), provavelmente, em função do aumento da temperatura. Um outro aspecto interessante observado neste trabalho é a tendência dos relâmpagos negativos em serem mais intensos nos períodos de menor número de ocorrências de tempestades. Embora esse resultado já tenha sido mencionado na literatura, apenas dois anos de dados não são suficientes para obter-se conclusões definitivas sobre esse comportamento no Brasil, havendo assim a necessidade de novas investigações no futuro através da análise de um conjunto de dados maior.

Os relâmpagos negativos apresentaram uma maior multiplicidade (média de 1,7) em relação aos positivos (média de 1,05), sem registrarem variações sazonais significativas. Foram registrados elevados percentuais de relâmpagos positivos simples (em torno de 96%), enquanto que os negativos apresentaram percentuais bem menores (cerca de 61%). Entretanto, trabalhos da literatura mostraram, através de técnicas precisas de medição, que o percentual de relâmpagos negativos simples está muito abaixo do registrado pelos sistemas de localização (cerca de 15%). Este resultado revela a deficiência do SLT em determinar com precisão a multiplicidade dos relâmpagos, causada pela baixa eficiência de detecção de descargas subsequentes, levando assim à redução da multiplicidade média dos relâmpagos. Um outro resultado importante deste trabalho mostrou que os relâmpagos simples apresentaram uma intensidade da corrente de pico da primeira descarga de retorno menor que os relâmpagos múltiplos, concordando com os dados da literatura.

A análise das formas de onda de radiação EM registradas pelo SLT mostrou que tanto os relâmpagos negativos quanto os positivos apresentaram praticamente a mesma derivada da frente de onda, com um valor médio entre 7 e 7,5 kA/ μ s, e larguras de pulso proporcionais à intensidade da corrente de pico. Com isso, conclui-se que os relâmpagos positivos detectados pelo SLT, em sua maioria, apresentam formas de onda de radiação semelhantes aos negativos (notadamente “altas e estreitas”), enquadrando-se no grupo das formas de onda com escala de microssegundos, pois seriam produzidos pelos mesmos processos físicos dos relâmpagos NS negativos. Por outro lado, não foram encontrados na literatura estudos conclusivos sobre a radiação dos relâmpagos utilizando dados de sistemas de localização de larga escala. A análise apresentada neste trabalho, constitui, portanto, um primeiro estudo sobre esse assunto, havendo a necessidade de novos estudos no futuro a fim de obter-se conclusões mais amplas.

6.3. ESTUDO DOS RELÂMPAGOS EM CENTROS URBANOS

Os dados mostraram claramente um aumento significativo do número de relâmpagos no verão de 2001 em comparação com o verão de 2000 nas três regiões estudadas. Entretanto, observou-se que esse aumento não ocorreu de forma uniforme, havendo uma significativa concentração de relâmpagos sobre as regiões metropolitanas. Isto constitui um forte indício de que a atividade humana teve sua parcela de contribuição na alteração das condições locais, principalmente no aumento da temperatura ambiente, a qual possui uma estreita relação com a formação e morfologia das nuvens de tempestades. Acredita-se que este aquecimento local, conhecido como ilha de calor, seja causado pela emissão de poluentes na atmosfera, acompanhada da destruição da vegetação local e da construção crescente de estruturas urbanas.

A idéia central desta análise foi obter evidências significativas de que os grandes centros urbanos, caracterizados pela alta densidade populacional e elevados índices de industrialização, possam estar alterando as condições atmosféricas locais a ponto de modificar a estrutura elétrica das nuvens de tempestades que, por sua vez, se reflete nas características dos relâmpagos associados. Por se tratar de um estudo bastante complexo, procurou-se inicialmente apenas enfatizar os fatos e evidências, sem contudo enveredar-se

na busca de suas explicações físicas. Nenhuma conclusão definitiva pode ser obtida ainda devido ao grande número de fatores envolvidos, tanto do ponto de vista físico do fenômeno em si, como do ponto de vista da ação humana sobre o meio ambiente. De qualquer forma, os resultados mostrados motivam o desenvolvimento de estudos mais amplos e completos sobre esse assunto que levem às possíveis causas dessas constatações. Para isso, todavia, é imprescindível a obtenção de um conjunto de dados de relâmpagos maior, composto pelos registros médios mensais do evento durante vários anos. Além disso, são necessárias ainda informações mais detalhadas sobre as condições do meio ambiente nos locais estudados, como índices de emissão de poluentes, comportamento da temperatura do ar, configuração do relevo, circulação atmosférica, características meteorológicas, entre outras, a fim de se comprovar ou não tais indícios. Trata-se de um importante estudo a ser realizado no futuro com forte impacto sobre a vida das pessoas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bent, R. S.; Lyons, W. A. Theoretical evaluations and initial operational experiences of LPATS (Lightning Positioning and Tracking System) to monitor lightning ground strikes using a time-of-arrival (TOA) technique. In: International Conference on Atmospheric Electricity, 7., Albany, 1984. **Proceedings**. Albany: American Meteorological Society, 1984. p. 317-324.
- Brase C. H.; Brase C. P. **Understandable statistics: concepts and methods**. 5.ed. Lexington: D.C. Heath and Company, 1995. 849 p. Cap. 9: Hypothesis testing, p. 529-631.
- Brook, M.; Ogawa, T. The cloud discharge. In: Golde, R. H. ed. **Lightning**. London: Academic Press, 1977. v. 1, Cap. 6, p. 191-230.
- Casper, P. W.; Bent, R. B. Results from the LPATS U.S.A. National Lightning Detection and Tracking System for the 1991 lightning season. In: International Conference on Lightning Protection, 21., Berlin, 1992. **Proceedings**. Berlin: Association of German Electrical Engineers, 1992. p. 339-342.
- Cooray, V. Effects of propagation on the return stroke radiation fields. **Radio Science**, v. 22, n. 5, p. 757-768, Sept. 1987.
- Cooray, V.; Fernando, M.; Sörensen, T.; Götschl, T.; Pedersen, Aa. Propagation of lightning generated transient electromagnetic fields over finitely conducting ground. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 62, n. 7, p. 583-600, May 2000.
- Cramer J. A.; Cummins K. L. Long-range and trans-oceanic lightning detection. In: International Conference on Atmospheric Electricity, 11., Guntersville, 1999. **Proceedings**. Marshall Space Flight Center: NASA, p. 250-253.
- Cummins, K. L.; Hiscox W. L.; Pifer A. E.; Maier, M. W. Performance analysis of the U.S. National Lightning Detection Network. International Conference on Atmospheric Electricity, 9., St. Petersburg, 1992. International Commission on Atmospheric Electricity.
- Cummins, K. L.; Burnett, R. O.; Hiscox, W. L.; Pifer, A. E. Line reliability and fault analysis using the National Lightning Detection Network. Precise Measurements in Power Conference, Arlington, 1993. National Science Foundation and Center for Power Engineering at Virginia Tech.

- Cummins, K. L.; Bardo, E. A.; Hiscox, W. L., Pyle, R. B.; Pifer, A. E. NLDN'95: A combined TOA/MDF technology upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network. International Aerospace & Ground Conference on Lightning and Static Electricity, Williamsburg, 1995. National Interagency Coordination Group.
- Cummins, K. L.; Cramer, J.; Hiscox, W. L. **NLDN peak current estimates - 1996 update**. Tucson: Global Atmospheric, 1996. (Tech. Note 40700).
- Cummins, K. L.; Murphy, M. J.; Bardo, E. A.; Hiscox, W. L., Pyle, R. B.; Pifer, A. E. A combined TOA/MDF technology upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, D8, p. 9035-9044, Apr. 1998a.
- Cummins, K. L.; Krider, E. P.; Malone, M. D. The U.S. National Lightning Detection Network and applications of cloud-to-ground lightning data by electric power utilities. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 40, n. 4, Part 2, p. 465-480, Nov. 1998b.
- Diendorfer G; Schulz W.; Rakov V. A. Lightning characteristics based on data from the Austrian Lightning Location System. **IEEE Transactions of Electromagnetic Compatibility**, v. 40, n. 4, Part 2, p. 452-464, Nov., 1998.
- Galván, A.; Cooray V.; Götschl T.; Scuka, V. Signal strength of return strokes occurring over the sea and over land: a sensitivity analysis. In: International Conference on Atmospheric Electricity, 11., Guntersville, 1999. **Proceedings**. Marshall Space Flight Center: George C. Marshall Space Flight Center, 1999. p. 162-165.
- Global Atmospheric (GAI). **Advanced Lightning Direction Finder - Model 141-T ALDF: installation, operation, and maintenance manual**. Tucson, 1994.
- Global Atmospheric (GAI). **Technical manual for LPATS remote receiver series III**. Tucson, 1995.
- Global Atmospheric (GAI). **DA2000 - Distribution and Archive module user's guide**. Tucson, 1996.
- Global Atmospheric (GAI). **NM2000 - Network Management user's guide**. Tucson, 1997.
- Global Atmospheric (GAI). **Lightning Position & Tracking Sensor IV (LPATS IV): installation, operation, and maintenance manual**. Tucson, 1998.
- Global Atmospheric (GAI). **LP2000 - Lightning Processor user's guide**. Tucson, 1999.
- Murphy, M. **Performance analysis of the CEMIG Lightning Location Network**. Tucson: GAI, 1998. 33p.

- Murphy, M. **Network performance report for FURNAS**. Tucson: GAI, 1999. 38p.
- Hiscox, W. L.; Krider, E. P.; Pifer, A. E.; Uman, M. A. A systematic method for identifying and correcting site errors in a network of magnetic direction finders. International Aerospace & Ground Conference on Lightning and Static Electricity, Orlando, 1984. NASA, FAA, U.S. Departments of Navy, Army, and Air Force.
- Huffines, G. R.; Orville, R. E. Peak current variations in cloud-to-ground lightning over the continental United States: 1995-99. In: International Lightning Detection Conference, Tucson, 2000. **Proceedings**. Tucson: Global Atmospherics, 2000.
- Idone, V. P.; Saljoughy, A. B.; Henderson, R. W.; Moore, P. K.; Pyle, R. B. A reexamination of the peak current calibration of the National Lightning Detection Network. **Journal of Geophysical Research**, v. 98, D10, p. 18323-18332, Oct. 1993.
- Iribarne, J. V.; Cho, H. R. **Atmospheric physics**. Dordrecht: D. Reidel Publishing, 1980. 212p.
- Krider, E. P.; Noggle, R. C.; Uman, M. A. A gated, wide-band magnetic direction finder for lightning return strokes. **Journal of Applied Meteorology**, v. 15, n. 3, p. 301-306, Mar. 1976.
- Krider, E. P.; Pifer, A. E.; Vance, D. L. Lightning direction finding system for forest fire detection. **Bulletin of American Meteorological Society**, v. 61, n. 9, p. 980-986, Sept. 1980.
- Krider, E. P. 75 years of research on the physics of a lightning discharge. In: Fleming, J. R. ed. **Historical essays on meteorology 1919-1995**. Boston: American Meteorological Society, 1996. Cap. 11, p. 321-350.
- Le Vine, D. M.; Willet, J. C. Comment on the transmission-line model for computing radiation from lightning. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, D3, p. 2601-2610, Feb. 1992.
- Lee A. C. L. Ground truth confirmation and theoretical limits of an experimental VLF arrival time difference lightning flash locating system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 115, n. 489, Part B, p. 1147-1166, July 1989.
- Lewis, E. A.; Harvey, R. B.; Rasmussen, J. E. Hyperbolic direction finding with sferics of transatlantic origin. **Journal of Geophysical Research**, v. 65, n. 7, p. 1879-1905, July 1960.
- MacGorman, D. R.; Rust W. D. **The Electrical nature of storms**. Nova York: Oxford University Press, 1998. 422p.

- Miranda, F. J. **Estudo da forma de onda de campo elétrico de relâmpagos**. São José dos Campos. 119p. (INPE-8173-TDI/757). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000.
- Ogawa, T. Lightning currents. In: Volland, H. ed. **Handbook of atmospheric electrodynamics**. Boca Raton: CRC Press, 1995. v. 1, Cap. 4, p. 93-136.
- Orville, R. E. Peak-current variations of lightning return strokes as a function of latitude. **Nature**, v. 343, n. 6254, p. 149-151, Jan. 1990.
- Orville, R. E. Calibration of a magnetic direction finding network using measured triggered lightning return stroke peak currents. **Journal of Geophysical Research**, v. 96, D9, p. 17135-17142, Sept. 1991.
- Orville, R. E. Cloud-to-ground lightning flashes characteristics in the contiguous United States: 1989-1991. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, D5, p. 10833-10841, May 1994.
- Orville, R. E. Lightning detection from ground and space. In: Volland, H. ed. **Handbook of atmospheric electrodynamics**. Boca Raton: CRC Press, 1995. v. 1, Cap. 5, p. 137-149.
- Orville, R. E.; Silver, A. C. Lightning ground flash density in the contiguous United States: 1992-95. **Monthly Weather Review**, v. 105, n. 4, p. 631-638, Apr. 1997.
- Orville, R. E. Comments on "Large peak current cloud-to-ground lightning flashes during the summer months in the contiguous United States". **Monthly Weather Review**, v.127, n. 8, p. 1937-1938, Aug 1999.
- Orville, R. E.; Huffines, G. R. Lightning ground flash measurements over the contiguous United States: 1995-97. **Monthly Weather Review**, v. 127, n. 11, p. 2693-2703, Nov. 1999a.
- Orville, R. E.; Huffines, G. R. Lightning ground flash measurements over the contiguous United States: A ten-year summary 1989-1998. In: International Conference on Atmospheric Electricity, 11., Gunterville, 1999b. **Proceedings**. Marshall Space Flight Center: George C. Marshall Space Flight Center, 1999. p. 412-415.
- Orville, R. E.; Huffines, G. R. Eleven years of cloud-to-ground lightning in the continental United States, 1989-1999: Large scale and small scale results. In: International Lightning Detection Conference, Tucson, 2000. **Proceedings**. Tucson: Global Atmospheric, 2000.

- Pinto, I. R. C. A. **Estudos sobre campos elétricos e condutividade associados a nuvens eletrificadas na região da América do Sul.** São José dos Campos. 129p. (INPE-4487-TDL/325). Tese (Doutoramento em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1987.
- Pinto, I. R. C. A.; Pinto Jr., O.; Diniz, J. H.; Carvalho, A. M. About the intensity of strokes in negative lightning flashes. In: International Congress of Geophysics, 5., São Paulo, 1997. **Proceedings.** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geofísica, 1997. p. 1156-1157.
- Pinto, I. R. C. A.; Pinto Jr., O.; Rocha, R. M. L.; Diniz, J. H.; Carvalho, A. M.; Filho, A. C. Cloud-to-ground lightning in southeastern Brazil in 1993: 2. Time variations and flash characteristics. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, D24, p. 31381-31387, Dec. 1999.
- Pinto, I. R. C. A.; Pinto Jr., O.; Diniz, J. H.; Carvalho, A. M.; Filho, A. C.; Cherchiglia L. C. L.; Amorim, G. E. A long-term study of the lightning flash characteristics in the southeastern Brazil: 2. Peak current and multiplicity. In: International Lightning Detection Conference, Tucson, 2000. **Proceedings.** Tucson: Global Atmospheric, 2000.
- Pinto Jr., O. Recent research on South Atlantic magnetic anomaly. **Trends in Geophysical Research**, v. 2, p. 45-54, 1993.
- Pinto Jr., O.; Pinto, I. R. C. A. **Relâmpagos.** São Paulo: Brasiliense, 1996. 105p.
- Pinto Jr., O.; Gin, R. B. B.; Pinto, I. R. C. A.; Mendes Jr., O.; Diniz, J. H.; Carvalho, A. M. Cloud-to-ground lightning flash characteristics in the southeastern Brazil for the 1992-93 summer season. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, D23, p. 29627-29635, Dec. 1996.
- Pinto Jr., O.; Pinto, I. R. C. A.; Lacerda M.; Carvalho, A. M.; Diniz, J. H.; Cherchiglia L. C. L. Are equatorial negative lightning flashes more intense than those at higher latitudes? **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 59, n. 15, p. 1881-1883, Oct. 1997.
- Pinto Jr., O.; Pinto, I. R. C. A.; Gomes, M. A. S. S.; Vitorello, I.; Padilha, A. L.; Diniz, J. H.; Carvalho, A. M.; Filho, A. C. Cloud-to-ground lightning in southeastern Brazil in 1993: 1. Geographical distribution. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, D24, p. 31369-31379, Dec. 1999.
- Pinto Jr., O.; Pinto, I. R. C. A. **Tempestades e relâmpagos no Brasil.** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000. 185p.

- Pinto Jr., O.; Pinto, I. R. C. A.; Diniz, J. H.; Carvalho, A. M.; Filho, A. C.; Cherchiglia L. C. L.; Amorim, G. E. A long-term study of the lightning flash characteristics in the southeastern Brazil: 1. Flash density and polarity. In: International Lightning Detection Conference, Tucson, 2000. **Proceedings**. Tucson: Global Atmospherics, 2000.
- Proctor, D. E. VHF radio pictures of cloud flashes. **Journal of Geophysical Research**, v. 86, C5, p. 4041-4071, May 1981.
- Rakov V. A.; Uman M. A. Some properties of negative cloud-to-ground lightning flashes versus stroke order. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, D5, p. 5447-5453, Apr. 1990.
- Rakov, V. A.; Thottappillil, R.; Uman, M. A. On the empirical formula of Willett et al. relating lightning return-stroke peak current and peak electric field. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, D11, p. 11527-11533, July 1992.
- Rakov V. A.; Uman, M. A.; Thottappillil, R. Review of lightning properties from electric field and TV observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, D5, p. 10745-10750, May 1994.
- Rakov, V. A.; Uman, M. A. Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 40, n. 4, p. 403-426, Nov. 1998.
- Rakov V. A. Lightning electric and magnetic fields. In: International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 13., Zurich, 1999. **Proceedings**. p. 561-566. [on-line]. <<http://plaza.ufl.edu/rakov/selpubl.htm>>. Out. 2000.
- Rakov V. A. Positive and bipolar lightning discharges: a review. In: International Conference on Lightning Protection, 25., Rhodes, 2000. **Proceedings**. p. 103-108. [on-line] <<http://plaza.ufl.edu/rakov/selpubl.htm>>. Jan. 2001.
- Rakov V. A. Characterization of lightning electromagnetic fields and their modeling. In: International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 14., Zurich, 2001. **Proceedings**. p. 3-16. [on-line]. <<http://plaza.ufl.edu/rakov/selpubl.htm>>. Abr. 2001.
- São Paulo. Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente / Secretaria Municipal do Planejamento / Companhia de Processamento de Dados do Município de São Paulo. (SVMA/SEMPLA/PRODAM). **Atlas Ambiental do Município de São Paulo: primeiros resultados**, dez. 2000. <http://www.prodiam.sp.gov.br/svma/atlas_amb>. Abr. 2001.
- Saunders, C. P. R. Thunderstorm Electrification. In: Volland, H. ed. **Handbook of atmospheric electrodynamics**. Boca Raton: CRC Press, 1995. v. 1, Cap. 3, p. 61-92.

- Stansfield, R. G. Statistical theory of DF fixing. **Journal of Institution of Electrical Engineers**, v. 94, Part 3A, p. 762-770, 1947.
- Solorzano, N. N. **Aspectos meteorológicos associados à 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.
- Tavares, F. S. S. **Estudo da relação entre *sprites* e os relâmpagos das tempestades associadas**. São José dos Campos. 127p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999.
- Thottappillil, R.; Uman, M. A. Comparison of lightning return-stroke models. **Journal of Geophysical Research**, v. 98, D12, p. 22903-22914, Dec. 1993.
- Uman, M. A.; Mclain, D. K.; Krider, E. P. The electromagnetic radiation from a finite antenna. **American Journal of Physics**, v. 43, n. 1, p. 33-38, Jan. 1975.
- Uman M. A.; Krider, E. P. A review of natural lightning: experimental data e modeling. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 24, n. 2, p. 79-112, May 1982.
- Uman, M. A. **The Lightning Discharge**. Orlando: Academic Press, 1987. 376p.
- Universidade de Campinas. Instituto de Geociências. (UNICAMP. IG). **Foto da região metropolitana de Campinas/SP obtida pela câmara CCD do satélite CBERS**, abr. 2000. <<http://www.ige.unicamp.br/imagens.htm>>. Abr. 2001.
- Watt, R. A. W.; Herd, J. F. An instantaneous direct-reading radio goniometer. **Journal of Institution Electrical Engineers**, v. 64, p. 611-622, 1926.
- Westcott, N.E. Summertime cloud-to-ground lightning activity around major Midwestern urban areas. **Journal of Applied Meteorology**, v. 34, n. 7, p. 1633-1642, July 1995.
- Williams, E. R. The Electrification of Thunderstorms. **Scientific American**, v. 259, n. 5, p. 88-99, Nov. 1988.
- Williams, E. R. Meteorological aspects of thunderstorms. In: Volland, H. ed. **Handbook of atmospheric electrodynamics**. Boca Raton: CRC Press, 1995. v. 1, Cap. 2, p. 27-60.