

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA**

**ESTUDO PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM PREVISOR DE
DESCARGAS ELÉTRICAS ATMOSFÉRICAS APLICADO À REGIÃO
COSTEIRA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO**

Gisele dos Santos Zepka

Dissertação apresentada à Comissão de Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica da Fundação Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Sebastião Cícero Pinheiro Gomes, Dr.

Rio Grande, abril de 2005.

Aos meus pais, Gilberto e Paula.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tornar tudo possível.

À minha família, meus pais, Gilberto Zepka e Paula Rosângela dos Santos Zepka, e minha irmã, Ana Paula dos Santos Zepka, pela presença confiante e pelo apoio incondicional em todos momentos de minha vida.

Ao meu orientador, Dr. Sebastião Cícero Pinheiro Gomes, pela amizade, pelo respeito, pela dedicação e pelo incentivo concedidos a mim no desenvolvimento deste trabalho e na minha vida profissional.

Aos colegas do Núcleo de Matemática Aplicada, em especial ao Diego da Silva Gomes e ao Paulo Lilles Jorge Drews Junior, pela dedicada colaboração indispensável no estudo com o Modelo de Mesoescala MM5.

Ao Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Dr. Volnei Andersson, pela amizade e pelos momentos de compreensão e confiança.

Ao professor e amigo, Dr. João Baptista da Silva, pelas valiosas sugestões.

Ao professor, Dr. Osmar Pinto Jr., pela gentileza do envio de artigos científicos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro.

À FURNAS Centrais Elétricas S. A., pelo fornecimento dos dados de descargas elétricas atmosféricas.

RESUMO

A dinâmica da atmosfera é evidentemente bastante complexa. Muitos são os processos físicos de macro e micro escalas e as variáveis meteorológicas envolvidos nos fenômenos atmosféricos. As tempestades com descargas elétricas destacam-se, dentre estes fenômenos, pelas conseqüências danosas causadas aos seres humanos, direta ou indiretamente. Diversos pesquisadores têm procurado investigar a possibilidade de prever a ocorrência de tempestades com descargas elétricas, principalmente nas últimas três décadas, entretanto, progressos na performance da previsão ainda não foram alcançados devido à complexidade do fenômeno. O principal objetivo da presente dissertação foi realizar um estudo para determinar a viabilidade ou não de construir um sistema de previsão de descargas elétricas atmosféricas a partir de técnicas de inteligência artificial, mais precisamente redes neurais artificiais (RNA). A base do sistema constituiu-se de resultados de simulações numéricas da dinâmica atmosférica obtidos com o modelo de mesoescala MM5. Variáveis meteorológicas (saídas do MM5), que teriam alguma correlação com as descargas elétricas, foram identificadas e selecionadas como entradas na RNA, a qual gera a previsão, isto é, o número de descargas elétricas que atingirá o solo algum tempo posterior ao tempo relativo dos campos atmosféricos simulados. A região escolhida para este estudo, abrangendo o Estado do Rio de Janeiro, o sul do Estado do Espírito Santo, o sudeste do Estado de Minas Gerais e o Oceano Atlântico, além de possuir um sistema de detecção e monitoramento de descargas elétricas, contém a mais importante concentração de plataformas de petróleo do Brasil, sendo, portanto, estratégico conhecer melhor o seu comportamento atmosférico. Antes de desenvolver o sistema de previsão baseado em RNA, alguns testes comparativos foram realizados usando resultados de simulação do MM5 e imagens infravermelhas de satélite geoestacionário, a fim de aferir a capacidade preditiva do modelo. O sistema de previsão apresentou resultados razoáveis, indicando que a aplicação da RNA é um caminho promissor na previsão de descargas elétricas. Contudo, faz-se necessária uma melhor investigação, principalmente quanto à realização de outros testes com um conjunto maior de dados reais de descargas elétricas.

Palavras-Chave: sistema de previsão, descargas elétricas atmosféricas, simulação numérica, modelo de mesoescala MM5, redes neurais artificiais.

ABSTRACT

The atmospheric dynamics evidently is very complex. There are many macro and micron scales processes and meteorological variables involved in the atmospheric physical phenomena. The storms with electrical discharges are distinguished, among these phenomena, by the damage consequences to the human beings, directly or indirectly. Many researchers have pursued the possibility of forecasting the occurrence of a storm with electrical discharges, principally in the last three decades. However, there are not improvements in forecast performance, mainly due to phenomenon complexity. The main objective of the present dissertation was to accomplish a study to determine the viability or not of constructing a forecast system of atmospheric electrical discharges from artificial intelligence techniques, specifically artificial neural networks (NN). The base of the system was constituted of numerical simulations results of the atmospheric dynamics obtained from the mesoscale model MM5. It was identified meteorological variables (outputs of MM5) that would have some correlation with the electrical discharges. These variables act as input in the NN, which generate the forecast, consisting in the number of electrical discharges that will reach the ground some posterior time to the relative time of the simulated atmospheric fields. The region chosen for this study includes the state of Rio de Janeiro, the south of Espírito Santo, the southeast of Minas Gerais and the Atlantic Ocean. Besides possessing a detection system of electrical discharges, this region contains the most important concentration of oil platforms of Brazil, being strategic to better know the atmospheric behavior in this place. Before developing the forecast system based on NN, some comparative tests were made using the MM5 simulation results and GOES infrared imagery, in order to survey the model prognostic capability. The forecast system showed reasonable results, indicating that the NN application may be a promising way to the electrical discharge forecast. However, it is necessary a better investigation, mainly with relation to the accomplishment of others tests with a bigger set of electrical discharges real data.

Keywords: forecast system, atmospheric electrical discharges, numerical simulation, mesoscale model MM5, artificial neural networks.

SUMÁRIO

| | Página |
|--|---------------|
| LISTA DE SÍMBOLOS..... | 15 |
| LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS..... | 17 |
| LISTA DE TABELAS..... | 19 |
| LISTA DE FIGURAS..... | 21 |
| | |
| CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO..... | 25 |
| 1.1 APRESENTAÇÃO..... | 25 |
| 1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA..... | 26 |
| 1.3 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS..... | 27 |
| 1.4 ESTRUTURA DO TEXTO..... | 28 |
| 1.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA COMENTADA..... | 29 |
| | |
| CAPÍTULO 2. DESCARGAS ELÉTRICAS ATMOSFÉRICAS..... | 45 |
| 2.1 INTRODUÇÃO..... | 45 |
| 2.2 ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA..... | 47 |
| 2.2.1 Formação de uma Nuvem de Tempestade..... | 47 |
| 2.2.2 Mecanismos de Geração e Separação de Cargas em Nuvens de Tempestade..... | 48 |
| 2.2.3 Estrutura Elétrica de uma Nuvem de Tempestade..... | 51 |
| 2.3 RELÂMPAGOS..... | 52 |
| 2.3.1 Classificação..... | 52 |
| 2.3.2 Relâmpagos Nuvem-Solo..... | 53 |
| 2.4 SISTEMA DE DETECÇÃO DE DESCARGAS ELÉTRICAS ATMOSFÉRICAS..... | 55 |
| 2.5 DESCARGAS ELÉTRICAS ATMOSFÉRICAS..... | 59 |
| 2.5.1 Descrição dos Dados..... | 59 |
| 2.5.2 Metodologia para Análise dos Dados..... | 60 |
| 2.5.3 Análise dos Dados..... | 61 |
| | |
| CAPÍTULO 3. MODELO DE MESOESCALA MM5..... | 71 |
| 3.1 INTRODUÇÃO..... | 71 |
| 3.2 EQUAÇÕES BÁSICAS..... | 73 |
| 3.3 CÓDIGO NUMÉRICO..... | 77 |
| 3.4 DADOS DE ENTRADA E CONDIÇÕES DE CONTORNO..... | 78 |
| 3.4.1 NCEP/NCAR Global Reanalyses..... | 79 |
| 3.4.2 NCEP Global Tropospheric Analyses..... | 80 |
| 3.4.3 NCEP ADP Global Surface Observations..... | 80 |
| 3.4.4 NCEP ADP Global Upper Air Observation Subsets..... | 81 |
| 3.4.5 Global Monthly Mean Radiosonde Observations..... | 82 |
| 3.5 PARAMETRIZAÇÕES FÍSICAS..... | 82 |
| 3.6 DOMÍNIOS DE INTEGRAÇÃO..... | 85 |
| 3.7 VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS..... | 86 |
| | |
| CAPÍTULO 4. ESTUDOS DE CASOS..... | 89 |
| 4.1 INTRODUÇÃO..... | 89 |
| 4.2 CASO: 19 DE NOVEMBRO DE 2003..... | 91 |

| | |
|---|-----|
| 4.2.1 Análise das Descargas Elétricas Atmosféricas..... | 91 |
| 4.2.2 Análise das Imagens de Satélite..... | 94 |
| 4.2.3 Análise das Simulações com o Modelo de Mesoescala MM5..... | 98 |
| 4.2.4 Tratamento das Saídas de Simulação..... | 104 |
| 4.3 CASO: 12 DE DEZEMBRO DE 2003..... | 107 |
| 4.3.1 Análise das Descargas Elétricas Atmosféricas..... | 107 |
| 4.3.2 Análise das Imagens de Satélite..... | 109 |
| 4.3.3 Análise das Simulações com o Modelo de Mesoescala MM5..... | 113 |
| 4.3.4 Tratamento das Saídas de Simulação..... | 119 |
| | |
| CAPÍTULO 5. CLASSIFICAÇÃO DE TEMPESTADES VIA REDES NEURAI ARTIFICIAIS..... | 123 |
| 5.1 INTRODUÇÃO..... | 123 |
| 5.2 NOÇÕES SOBRE REDES NEURAI ARTIFICIAIS..... | 124 |
| 5.3 ARQUITETURA DA RNA UTILIZADA..... | 125 |
| 5.4 VARIÁVEIS DE ENTRADA NA RNA..... | 127 |
| 5.5 TREINAMENTO E RESULTADOS..... | 129 |
| | |
| CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES..... | 135 |
| | |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 141 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------|---|
| D_θ | termos referentes ao vórtices turbulentos |
| K | número de camadas verticais |
| Q | quantidade de calor devido a processos diabáticos |
| R_d | constante do gás para o ar seco |
| T | temperatura |
| T_0 | temperatura no estado de referência |
| T' | perturbação de temperatura |
| V | vetor velocidade do ar |
| c_p | calor específico do ar à pressão constante |
| eu | componente horizontal da Força de Coriolis |
| ev | componente meridional da Força de Coriolis |
| ew | componente vertical da Força de Coriolis |
| f | parâmetro de Coriolis |
| g | aceleração da gravidade |
| m | fator de escala do mapa |
| n | incremento de tempo |
| p | pressão |
| p_0 | pressão no estado de referência |
| p_s | pressão na superfície |
| p_t | pressão constante no topo da atmosfera |
| p' | perturbação de pressão |
| q | razão de mistura |
| t | tempo |
| u | velocidade horizontal do vento |
| v | velocidade meridional do vento |
| w | velocidade vertical do vento |
| x | coordenada espacial horizontal |
| y | coordenada espacial meridional |
| z | coordenada espacial vertical |
| Δt | intervalo de tempo |
| Ω | velocidade angular de rotação da Terra |
| γ | razão entre os calores específicos do ar à pressão constante e a volume constante |
| θ | temperatura potencial |
| θ_0 | temperatura potencial no estado de referência |
| λ | latitude |
| ρ | densidade |
| ρ_0 | densidade no estado de referência |
| σ | coordenada vertical |
| σ | velocidade coordenada |
| ϕ | longitude |
| ϕ_c | longitude central |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|---------|---|
| ADP | Automated Data Processing |
| AR | Relâmpagos no Ar |
| ASOS | Automated Surface Observing System |
| AVHRR | Advanced Very High Resolution Radiometer |
| AWOS | Automated Weather Observing System |
| BLM | Boundary Layer Model |
| CAD | Descargas Atmosféricas à Terra |
| Cb | Cumulonimbus |
| CEMIG | Companhia Energética de Minas Gerais |
| COPEL | Companhia Paranaense de Energia |
| CPTEC | Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos |
| CTA | Centro Técnico Aeroespacial |
| ECMWF | European Center for Medium Range Weather Forecasts |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| EN | Relâmpagos Entre-Nuvens |
| ENSO | El Niño Southern Oscillation |
| ERA | ECMWF Reanalysis |
| FNL | NCEP Final Reanalysis |
| FURG | Fundação Universidade Federal do Rio Grande |
| GDAS | Global Data Assimilation System |
| GOES | Geostationary Operational Environmental Satellite |
| GrADS | Sistema de Análise e Exibição de Grade |
| GTS | Global Telecommunications System |
| IAG | Instituto de Astronomia e Geofísica |
| IMPACT | Improved Accuracy from Combined Technology |
| IN | Relâmpagos Intranuvem |
| INPE | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| LF | Low Frequency |
| LFM | Limited-Area Fine-Mesh |
| LIS | Lightning Imaging Sensor |
| LPATS | Lightning Positioning and Tracking System |
| LPM | Laboratório de Prognóstico em Mesoescala |
| LSM | Land Surface Model |
| MATLAB | Matrix Laboratory |
| MDF | Método Magnético de Localização de Direção |
| METAR | Meteorological Aerodrome Reports |
| MJO | Oscilação Madden-Julian |
| MM5 | Fifth-generation Mesoscale Model |
| MRF | Medium-Range Forecast |
| NCAR | National Center for Atmospheric Research |
| NCDC | National Climatic Data Center |
| NCEP | National Center for Environmental Prediction |
| NDEaPH | Número de Descargas Elétricas Atmosféricas por Hora |
| NESDIS | National Environmental Satellite Data Information Service |
| NI | Relâmpagos da Nuvem para Ionosfera |
| NMC | National Meteorological Center |

| | |
|---------|---|
| NNRP | NCEP/NCAR Reanalysis Project |
| NOAA | National Oceanic and Atmospheric Administration |
| NORAPS6 | Navy Operational Regional Prediction System Version 6 |
| NS | Relâmpagos Nuvem-Solo |
| NSSL | National Severe Storms Laboratory |
| NuMA | Núcleo de Matemática Aplicada |
| PSU | Pennsylvania State University |
| RAMS | Regional Atmospheric Modeling System |
| RIDAT | Rede Integrada de Detecção de Descargas Atmosféricas |
| RINDAT | Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas |
| RNA | Rede Neural Artificial |
| RRTM | Rapid Radiative Transfer Model |
| RWM | Relocatable Window Model |
| SLT | Sistema de Localização de Tempestades |
| SiB | Simple Biosphere Model |
| SIMEPAR | Sistema Meteorológico do Paraná |
| SN | Relâmpagos Solo-Nuvem |
| SYNOP | International Synoptic Surface Observation |
| TDL | Techniques Development Laboratory |
| TOA | Time Of Arrival |
| TOGA | Tropical Ocean and Global Atmosphere |
| TRRM | Tropical Rainfall Measuring Mission |
| UFPeI | Universidade Federal de Pelotas |
| UFRJ | Universidade Federal do Rio de Janeiro |
| USGS | United States Geological Survey |
| USP | Universidade de São Paulo |
| UTC | Coordenada Universal de Tempo |
| VLF | Very Low Frequency |
| WRF | Weather Research and Forecasting |
| ZCAS | Zona de Convergência do Atlântico Sul |
| dph | Descargas por hora |
| Lat. | Latitude |
| Long. | Longitude |

LISTA DE TABELAS

| | Página |
|--|---------------|
| 2.1 Lista de sensores de detecção de descargas atmosféricas da RINDAT no Brasil..... | 57 |
| 4.1 Horários das simulações realizadas no modelo MM5..... | 98 |
| 4.2 Horários das simulações realizadas no modelo MM5..... | 113 |
| 5.1 Parâmetros relativos à sub-região de interesse da Figura 5.5, sendo <i>dph</i> a unidade representativa de descargas por hora..... | 127 |
| 5.2 Variáveis do MM5 utilizadas como entradas na RNA..... | 128 |
| 5.3 Casos selecionados para o estudo com a RNA..... | 130 |
| 5.4 Valores numéricos da previsão com a <i>RNA1</i> | 134 |
| 5.5 Valores numéricos da previsão com a <i>RNA2</i> | 134 |

LISTA DE FIGURAS

| | Página |
|--|---------------|
| 2.1 Esta seqüência de fotografias mostra o processo de transformação de nuvens cúmulos <i>congustus</i> para cumulonimbus durante um período de 55 minutos..... | 45 |
| 2.2 Descrição esquemática do ciclo de vida de uma nuvem de tempestade: (a) estágio de desenvolvimento, (b) estágio de maturação e (c) estágio de dissipação..... | 47 |
| 2.3 Processo Colisional Indutivo..... | 49 |
| 2.4 Processo Colisional Termoelétrico..... | 50 |
| 2.5 Processo Gravitacional..... | 50 |
| 2.6 Processo Convectivo..... | 51 |
| 2.7 Configuração dos centros de carga elétrica em uma nuvem de tempestade segundo modelo idealizado..... | 52 |
| 2.8 Etapas do desenvolvimento de um relâmpago nuvem-solo negativo: (a) a (f) formação do líder escalonado, (g) e (h) primeira descarga de retorno, (i) a (k) formação do líder contínuo e (l) segunda descarga de retorno..... | 54 |
| 2.9 Localização dos sensores de detecção de descargas atmosféricas da RINDAT | 56 |
| 2.10 Região de estudo dos dados de descargas elétricas atmosféricas..... | 59 |
| 2.11 Distribuição anual das descargas elétricas atmosféricas..... | 61 |
| 2.12 Distribuição mensal das descargas elétricas atmosféricas para o ANO 1..... | 62 |
| 2.13 Distribuição mensal das descargas elétricas atmosféricas para o ANO 2..... | 62 |
| 2.14 Distribuição das tempestades em níveis de severidade para o ANO 1..... | 63 |
| 2.15 Distribuição das tempestades em níveis de severidade para o ANO 2..... | 64 |
| 2.16 Distribuição mensal dos quatro níveis de tempestades para o ANO 1..... | 64 |
| 2.17 Distribuição mensal dos quatro níveis de tempestades para o ANO 2..... | 65 |
| 2.18 Distribuição mensal das descargas elétricas atmosféricas nos quatro níveis de tempestades para o ANO 1..... | 65 |
| 2.19 Distribuição mensal das descargas elétricas atmosféricas nos quatro níveis de tempestades para o ANO 2..... | 66 |
| 2.20 Distribuição das descargas elétricas atmosféricas em terra, mar e litoral..... | 67 |
| 2.21 Classificação das tempestades em terra, mar e litoral..... | 67 |
| 2.22 Tempestade nível 1 ocorrida em 07/12/2002 sobre o continente..... | 68 |
| 2.23 Tempestade nível 4 ocorrida em 12/12/2003 sobre o mar..... | 68 |
| 2.24 Tempestade nível 2 ocorrida em 19/11/2002 no litoral..... | 69 |
| 3.1 Representação esquemática da estrutura vertical do modelo. O exemplo é para quinze camadas verticais. As linhas pontilhadas denotam níveis sigma intermediários e as sólidas, todos níveis sigma considerados..... | 74 |
| 3.2 Fluxograma dos principais programas e possíveis conjuntos de dados do MM5..... | 78 |
| 3.3 Domínios de integração do modelo de mesoescala MM5..... | 85 |
| 4.1 Distribuição horária das descargas elétricas atmosféricas para o evento de tempestade ocorrido nos dias 19 e 20 de novembro de 2003..... | 92 |
| 4.2 Distribuição espacial das descargas elétricas atmosféricas para o evento de tempestade ocorrido nos dias 19 e 20 de novembro de 2003..... | 93 |
| 4.3 Seqüência de fragmentos de imagens infravermelhas de satélite geoestacionário GOES-12 referente à tempestade em estudo (continuação na página seguinte)..... | 96 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.4 | Comparação entre (a) imagem infravermelha de satélite geoestacionário com a temperatura do topo das nuvens realçada, (b) precipitação convectiva simulada no domínio 1 e (c) precipitação convectiva simulada no domínio 2 | 99 |
| 4.5 | Comparação entre (a) imagem infravermelha de satélite geoestacionário em tons de cinza, (b) precipitação convectiva simulada no domínio 1 e (c) precipitação convectiva simulada no domínio 2..... | 100 |
| 4.6 | Simulações das 18 UTC da divergência, em superfície (a) e 200 mb (b), razão de mistura, em superfície (c) e 850 mb (d), advecção de temperatura, em 850 (e) e 500 mb (f), e velocidade vertical, em 500 mb (g)..... | 101 |
| 4.7 | Simulações das 21 UTC da divergência, em superfície (a) e 200 mb (b), razão de mistura, em superfície (c) e 850 mb (d), advecção de temperatura, em 850 (e) e 500 mb (f), e velocidade vertical, em 500 mb (g)..... | 102 |
| 4.8 | Simulações das 22 UTC da divergência em superfície (a), razão de mistura em superfície (b), advecção de temperatura em 850 mb (c) e velocidade vertical em 500 mb (d)..... | 103 |
| 4.9 | Núcleos escolhidos na tempestade do dia 19 de novembro de 2003..... | 105 |
| 4.10 | Área total, área recortada e área recortada interpolada para uma matriz 11x11 pontos de, respectivamente, divergência em 850 e 200 mb, razão de mistura em superfície e 850 mb, advecção de temperatura em 500 mb e velocidade vertical em 500 mb..... | 105 |
| 4.11 | Distribuição horária das descargas elétricas atmosféricas para o evento de tempestade ocorrido nos dias 12 e 13 de dezembro de 2003..... | 107 |
| 4.12 | Distribuição espacial das descargas elétricas atmosféricas para o evento de tempestade ocorrido nos dias 12 e 13 de dezembro de 2003..... | 108 |
| 4.13 | Seqüência de fragmentos de imagens infravermelhas de satélite geoestacionário GOES-12 referente à tempestade em estudo (continuação nas páginas seguintes)..... | 111 |
| 4.14 | Comparação entre (a) imagem infravermelha de satélite geoestacionário em tons de cinza, (b) precipitação convectiva simulada no domínio 1 e (c) precipitação convectiva simulada no domínio 2..... | 114 |
| 4.15 | Comparação entre (a) imagem infravermelha de satélite geoestacionário em tons de cinza, (b) precipitação convectiva simulada no domínio 1 e (c) precipitação convectiva simulada no domínio 2..... | 115 |
| 4.16 | Simulações das 19 UTC da divergência, em superfície (a) e 200 mb (b), razão de mistura, em superfície (c) e 850 mb (d), advecção de temperatura, em 850 (e) e 500 mb (f), e velocidade vertical, em 500 mb (g)..... | 117 |
| 4.17 | Simulações das 22 UTC da divergência, em superfície (a) e 200 mb (b), razão de mistura, em superfície (c) e 850 mb (d), advecção de temperatura, em 850 (e) e 500 mb (f), e velocidade vertical, em 500 mb (g)..... | 118 |
| 4.18 | Simulações das 23 UTC da divergência em superfície (a), razão de mistura em superfície (b), advecção de temperatura em 850 mb (c) e velocidade vertical em 500 mb (d)..... | 119 |
| 4.19 | Núcleo escolhido na tempestade do dia 12 de dezembro de 2003..... | 120 |
| 4.20 | Área total, área recortada e área recortada interpolada para uma matriz 11x11 pontos de, respectivamente, divergência em 850 e 200 mb, razão de mistura em superfície e 850 mb, advecção de temperatura em 500 mb e velocidade vertical em 500 mb..... | 120 |
| 5.1 | Esquema básico do sistema de previsão de descargas elétricas..... | 123 |
| 5.2 | Uma RNA com m camadas..... | 125 |
| 5.3 | Arquitetura da RNA..... | 126 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.4 | Arquitetura dos neurônios utilizada..... | 126 |
| 5.5 | Um caso de ocorrência de tempestade com descargas elétricas..... | 127 |
| 5.6 | Razão de mistura em superfície e em 850 mb, para os domínios (domínio maior (a) e (d) e sub-região de interesse (b), (c), (e) e (f)) apresentados na Figura 5.5..... | 128 |
| 5.7 | Resultados ressaltando o aprendizado da <i>RNA1</i> | 131 |
| 5.8 | Erros após o treinamento da <i>RNA1</i> (erro médio = 39,46 <i>dph</i>)..... | 131 |
| 5.9 | Resultados ressaltando o aprendizado da <i>RNA2</i> | 132 |
| 5.10 | Erros após o treinamento da <i>RNA2</i> (erro médio = 32,56 <i>dph</i>)..... | 132 |
| 5.11 | Resultados com a <i>RNA1</i> da previsão aplicada aos casos não treinados (erro médio = 246,72 <i>dph</i>)..... | 133 |
| 5.12 | Resultados com a <i>RNA2</i> da previsão aplicada aos casos não treinados (erro médio = 241,32 <i>dph</i>)..... | 133 |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Entre tantos fenômenos naturais que fazem parte da formação e evolução da Terra, as tempestades e os relâmpagos despertam particular interesse de admiradores e pesquisadores, quer pela beleza quer pelo caráter destrutivo que possuem. Embora estudados ao longo de vários séculos, estes fenômenos permanecem, em muitos aspectos, ainda como grandes mistérios para o homem. A dinâmica de uma célula de tempestade, os próprios processos de formação e separação de cargas elétricas no interior da nuvem (em cumulonimbus, por exemplo), a influência dos relâmpagos na química da atmosfera terrestre, bem como o seu papel no monitoramento do aquecimento global da Terra são alguns temas sob investigação em pesquisas recentes.

Os relâmpagos são descargas elétricas na atmosfera, acompanhadas de luz intensa, que ocorrem devido à existência de cargas que produzem um campo elétrico local excedente à capacidade dielétrica ou isolante do ar. Normalmente, estão associados a tempestades podendo também ocorrerem em tempestades de neve, tempestades de areia, durante erupções vulcânicas ou mesmo em outros tipos de nuvens, embora, nestes outros casos, costumam ter extensões e intensidades bem menores.

O que realmente se passa no interior de uma nuvem de tempestade ou nuvem cumulonimbus é muito pouco conhecido. A sua estrutura elétrica é bastante complexa, sendo o resultado de processos microfísicos, que atuam em escalas de quilômetros, e processos microfísicos, que atuam em escalas de milímetros, ambos ocorrendo simultaneamente dentro da nuvem. Basicamente, é assumido que em seu interior movimentos de ar ascendentes e descendentes fazem partículas de gelo acumularem cargas elétricas opostas quando colidem entre si. As partículas de água menores, carregadas positivamente, dirigem-se ao topo da nuvem e as maiores, por sua vez, mais pesadas e carregadas negativamente, localizam-se na base. Estas cargas elétricas intensas justamente originam as descargas atmosféricas.

O Brasil, devido a sua grande extensão territorial e ao fato de ser o maior país tropical do mundo, apresenta intensa atividade elétrica. Com base em dados obtidos por sensores óticos a bordo de satélites na última década, é estimado que cerca de 50 a 70 milhões de relâmpagos nuvem-solo atinjam o solo brasileiro por ano, ou seja, dois relâmpagos por segundo. Isto equivale a uma média de sete relâmpagos por quilômetro quadrado (Pinto Jr., 2005). Anualmente, os relâmpagos são responsáveis por milhares de mortes no mundo e prejuízos incalculáveis, como incêndios em florestas, acidentes na aviação, colapso na rede de energia elétrica, interferência em rádio transmissão e queima de aparelhos eletrônicos. Segundo López *et al* (1995), as descargas elétricas estão entre as três principais causas de mortes por ano no Colorado e, tratando-se de mortes por fenômenos meteorológicos durante os anos de 1940 e 1973 nos Estados Unidos, a principal.

Em virtude da crescente dependência pela sociedade de tecnologias sensíveis ao impacto destes fenômenos, as pesquisas nesta área têm-se intensificado, principalmente no que diz respeito ao conhecimento das condições meteorológicas propícias ao aparecimento das descargas elétricas atmosféricas. Modelos numéricos e estatísticos são largamente utilizados em análises de fenômenos meteorológicos, a fim de inferir mais objetivamente os padrões atmosféricos.

Atualmente, o rápido desenvolvimento de modelos numéricos atmosféricos de mesoescala e de estações de trabalho com múltiplos processadores, complementadas com as novas tecnologias de observação em superfície e no espaço, tem permitido acelerar avanços científicos e contribuir para o melhor entendimento de determinados fenômenos relacionados com o prognóstico do tempo e do clima. A utilização da modelagem numérica, como ferramenta de verificação do estado dinâmico da atmosfera, em estudos de tempestades severas, por exemplo, associada às análises física, temporal e espacial de dados reais de descargas elétricas atmosféricas, resultaria em uma integração interessante de informações sobre a estrutura do fenômeno.

1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A proposta desta dissertação é elaborar um estudo inicial, a partir da geração de correlações entre dados de descargas elétricas atmosféricas e campos simulados de variáveis meteorológicas no *Pennsylvania State University – National Center for Atmospheric*

Research (PSU – NCAR) fifth-generation Mesoscale Model (MM5) (Dudhia *et al*, 2002), que contribua, futuramente, para o desenvolvimento de sistemas de previsão de descargas elétricas atmosféricas utilizando técnicas de inteligência artificial. Este estudo fornecerá as condições primariamente necessárias à construção de um previsor de ocorrência de descargas elétricas baseado em redes neurais artificiais.

1.3 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Constatou-se, segundo a pesquisa bibliográfica realizada, que provavelmente não há, até o presente momento, trabalhos publicados abordando a análise de dados reais de descargas elétricas atmosféricas, simulações numéricas em modelo de mesoescala e técnicas de inteligência artificial, na tentativa de desenvolver e relacionar ferramentas para a construção de um previsor de descargas elétricas.

A região de estudo foi escolhida dentre vários fatores que favoreceram e estimularam o principal objetivo desta dissertação que é a realização de um estudo para o desenvolvimento de um sistema de previsão de descargas elétricas atmosféricas. O Estado do Rio de Janeiro trata-se, primeiramente, de uma área ampla coberta por um sistema de detecção de relâmpagos em operação, o que possibilita trabalhar com dados reais de ocorrência. O litoral é uma região influenciada climatologicamente por terra e mar, aspecto interessante visto que a atividade e o comportamento de relâmpagos são distintos em relação a estas duas superfícies. A região Sudeste do Brasil apresenta uma incidência significativa de descargas elétricas, como pode ser constatado em alguns trabalhos pesquisados na revisão bibliográfica comentada. Por fim, a mais importante concentração de plataformas de extração de petróleo do Brasil está aí compreendida, sendo estrategicamente interessante conhecer melhor a ocorrência de descargas elétricas atmosféricas nesta região.

É evidente a aplicabilidade prática dos resultados obtidos neste trabalho. A possibilidade de conhecer, com alguma antecedência, o local da ocorrência de uma tempestade com descargas elétricas atmosféricas é uma informação bastante valiosa, mesmo que nela esteja certamente adicionado algum percentual de erro.

1.4 ESTRUTURA DO TEXTO

O *segundo capítulo* inicia apresentando uma revisão sobre eletricidade atmosférica, processos de formação e eletrificação das nuvens de tempestade e sua estrutura elétrica, assim como, classificação e morfologia dos relâmpagos, com ênfase nos relâmpagos nuvem-solo que serão aqui estudados. Finalmente, é abordada a análise das distribuições espacial e temporal realizada com os dados reais de descargas elétricas atmosféricas provenientes do sistema de detecção de descargas de FURNAS Centrais Elétricas S. A. para o período de março de 2002 a fevereiro de 2004.

O *terceiro capítulo* apresenta a descrição do modelo de mesoescala MM5, responsável pelas simulações numéricas do comportamento dinâmico da atmosfera. São elaborados comentários sobre equações básicas e método de resolução numérica, código numérico dividido em módulos, condições iniciais e de contorno, opções de parametrizações físicas escolhidas, configuração dos domínios de integração e variáveis meteorológicas selecionadas para visualização após a realização de simulações.

O *quarto capítulo* discute dois casos de tempestade com intensa atividade elétrica, a partir da análise das distribuições temporal e espacial das descargas atmosféricas associadas aos eventos escolhidos, de imagens de satélite geostacionário e de campos de simulação do modelo de mesoescala MM5 para as variáveis meteorológicas divergência, razão de mistura, advecção de temperatura e velocidade vertical. Na tentativa de aferir o desempenho do modelo MM5, é também apresentado um estudo comparativo entre o comportamento simulado da variável precipitação convectiva e as imagens de satélite. Por fim, é introduzido o tratamento matemático conferido às saídas de simulação do modelo numérico MM5 para cada variável, em seus respectivos níveis e horários de interesse, com o intuito de posterior aplicação das técnicas de inteligência artificial.

O *quinto capítulo* concentra todo um esforço de utilização de uma rede neural artificial (RNA) na tentativa de prever, com uma hora de antecedência, a ocorrência de tempestades com descargas elétricas atmosféricas. Faz-se inicialmente uma breve descrição sobre o que são e como funcionam as redes neurais artificiais. Em seguida, apresenta-se a estrutura de rede escolhida para a realização dos testes. O pré-processamento das variáveis de entrada na RNA e a sua forma de treinamento, bem como os testes com casos não treinados, são apresentados e comentados. Os resultados finais são importantes por constituírem testes que

aferem a possibilidade ou não de utilização de uma RNA para fins de previsão de descargas elétricas atmosféricas.

O *sexto capítulo* resume as principais conclusões, bem como apresenta algumas sugestões para melhorar os resultados obtidos numa perspectiva de trabalhos futuros.

1.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA COMENTADA

Não foram encontrados, na literatura, trabalhos abordando a previsão de descargas elétricas atmosféricas a partir de técnicas de inteligência artificial, logo, acredita-se que este seja o primeiro estudo a relacionar ocorrência de descargas, simulações numéricas do comportamento dinâmico da atmosfera e inteligência artificial, na tentativa de desenvolver ferramentas para a construção de um sistema de previsão de descargas elétricas. Em vista disso, a revisão bibliográfica foi realizada de modo a fundamentar cada passo da metodologia que será seguido.

Foram consultados importantes trabalhos relatando estudos sobre as propriedades físicas das descargas elétricas atmosféricas em tempestades na América do Sul e nos Estados Unidos (e.g. Gin, 1992; Pinto *et al*, 1992; Pinto Jr. *et al*, 1992; Reap & MacGorman, 1989), as climatologias baseadas em observações usando uma rede relativamente densa de detectores de raios (e.g. Beneti *et al*, 2002; Gin *et al*, 2000; Naccarato, 2001; Pinto *et al*, 1999; Pinto & Pinto Jr., 2003; Pinto Jr. *et al*, 1996; Pinto Jr. *et al*, 1999; Pinto Jr. *et al*, 2003; Pinto Jr. *et al*, 2003a) e a constante investigação de descargas elétricas atmosféricas como fonte de gênese, orientação e movimento de sistemas de mesoescala (e.g. Abdoulaev *et al*, 2000; Abdoulaev *et al*, 2000a; Abdoulaev *et al*, 2001; Abdoulaev & Lenskaia, 2000).

Com relação ao sistema de modelagem numérica MM5 utilizado neste estudo, a maioria dos artigos pesquisada está vinculada à caracterização dos esquemas de parametrizações físicas (e.g. Kain, 2002; Oliveira & Menezes, 2004; Schultz, 1995; Wang & Seaman, 1997) e à análise de desempenho do modelo na previsão de fenômenos meteorológicos a partir de estudos de casos (Figueroa *et al*, 1998; Pereira *et al*, 2002; Roebber & Eise, 2001; Yamazaki *et al*, 2004).

A seguir, serão apresentados comentários resumidos sobre alguns trabalhos que mereceram relevância nesta revisão bibliográfica.

R. M. Reap & D. R. MacGorman (1989)

Cloud-to-Ground Lightning: Climatological Characteristics and Relationships to Model Fields, Radar Observations and Severe Local Storms

Este trabalho apresenta a análise de dados de relâmpagos nuvem-solo provenientes da rede *National Severe Storms Laboratory* (NSSL) localizada em Kansas e Oklahoma. Várias características físicas e climatológicas das descargas registradas na região de cobertura da rede durante os anos de 1985 e 1986 foram examinadas, entre elas, multiplicidade, polaridade, relações com topografia e variações espacial, temporal e sazonal. Os relâmpagos nuvem-solo foram comparados a observações de radar, relatórios de eventos climáticos extremos e campos de simulação de modelos numéricos operacionais, a fim de encontrar relações entre os dados que poderiam ser utilizadas na elaboração de previsões de tempo severo. Dentre os principais resultados, foram obtidas boas correlações entre descargas positivas e negativas e fluxo de umidade e circulação em baixos níveis, quando na presença de convergência de umidade, vorticidade relativa ciclônica e forte movimento vertical na camada limite. Contrariando as expectativas, a altura da camada de gelo e o cisalhamento do vento não foram variáveis importantes na formação de tempestades.

I. R. C. A. Pinto *et al* (1992)

A Coordinated Study of a Storm System over the South American Continent 2. Lightning – Related Data

Reportar uma apresentação detalhada dos relâmpagos associados aos sinais do campo elétrico vertical estratosférico (*sferics*) obtidos em 13 de dezembro de 1989 durante o estudo dirigido de um sistema convectivo de mesoescala ocorrido sobre a América do Sul foi o objetivo deste artigo. Durante aproximadamente seis horas de vôo, medições do detector de campo elétrico a bordo de um balão meteorológico registraram mais de uma centena de descargas que poderiam ser intranuvens ou nuvem-solo positivas de, na grande maioria, amplitudes menores do que 7 V/m associadas aos sinais de campo elétrico estratosférico. Os sinais dos *sferics* apresentaram diferentes curvas de decaimento, algumas vezes ajustadas por uma exponencial, outras por duas. De acordo com os autores, este fato pareceu estar relacionado às diferentes condições de propagação entre descargas elétricas e trajetória do balão, sendo a primeira vez que dados de campo elétrico estratosférico revelaram tal comportamento. A rede *Lightning Positioning and Tracking System* (LPATS) registrou 326

descargas nuvem-solo a distâncias menores do que 100 km do balão, das quais 60% foram positivas, contrariando observações realizadas durante o verão no Hemisfério Norte. A partir da análise do tempo de ocorrência das descargas, conforme medidas na altitude do balão e no solo, apenas uma pequena fração ocorreu simultaneamente com os sinais do campo elétrico estratosférico, indicando que grande parte dos *sferics* foram então resultados de descargas intranuvens. Um estudo dos dados de vento e temperatura durante o fenômeno de tempestade mostrou que a predominância de descargas elétricas nuvem-solo positivas não é aparentemente sustentada pela hipótese do dipolo inclinado, sendo necessário evocar outros mecanismos para explicá-la.

O. Pinto Jr. *et al* (1992)

A Coordinated Study of a Storm System over the South American Continent 1. Weather Information and Quasi-DC Stratospheric Electric Field Data

Este artigo apresenta os principais resultados de um estudo dirigido em 13 de dezembro de 1989 no Brasil com a finalidade de analisar o comportamento elétrico associado a uma intensa tempestade sobre o continente da América do Sul a partir de informações meteorológicas e dados estratosféricos de temperatura e campo elétrico quasi-DC. Balão estratosférico transportando sensor externo de temperatura e detector de campo elétrico, estações meteorológicas de superfície e radiossondagens, imagens infravermelhas do satélite GOES-7, radares meteorológicos e *Lightning Positioning and Tracking System* (LPATS) foram as diferentes técnicas empregadas para aquisição dos dados observacionais. Radiossondagens revelaram o desenvolvimento de grandes células convectivas no interior da tempestade estendendo-se além da tropopausa. As análises das imagens no canal infravermelho indicaram a tendência de as descargas elétricas ocorrerem próximo, mas não exatamente abaixo, dos topos mais frios das nuvens. Os mapas de radar, por sua vez, localizaram as descargas perto, mas fora, das áreas mais intensas de precipitação (níveis de refletividade acima de 40 dBz). A altitude do balão meteorológico e o perfil da temperatura ambiente mostraram variações significativas em associação com o sistema de tempestade, sugerindo que a ocorrência do fenômeno pode consideravelmente afetar a estratosfera. O campo elétrico vertical quasi-DC permaneceu praticamente durante todo o percurso do balão numa direção contrária relativa à orientação descendente usual de tempo bom com valores tão grandes quanto 4 V/m. Contrariando a maioria das medidas de campo elétrico realizadas em outras regiões, nenhuma indicação de intensificação do campo vertical no sentido descendente

de tempo bom foi observada. Este fato acorda com observações passadas na América do Sul e pode indicar que existem diferenças no processo de eletrificação de nuvens nesta região.

R. B. B. Gin (1992)

Estudo Coordenado de um Sistema de Tempestade sobre a América do Sul

Esta dissertação de mestrado foi pioneira em utilização e análise conjuntas de diferentes técnicas para o estudo de nuvens de tempestade e relâmpagos na América do Sul. Estudar a estrutura elétrica das nuvens de tempestade e a sua influência na estratosfera e no Circuito Elétrico Atmosférico Global, bem como as características dos relâmpagos nuvem-terra associados a regiões de grande instabilidade na América do Sul, foram os objetivos deste trabalho. Para tanto, analisaram-se dados obtidos de um detector de campo elétrico a bordo de um balão estratosférico, os quais foram complementados com dados de radiossondagem, radar, satélite e detector de relâmpagos em superfície. Os resultados mostraram que a estrutura elétrica das nuvens, sua influência na estratosfera e as características dos relâmpagos nuvem-terra parecem ser diferentes das obtidas no Hemisfério Norte.

O. Pinto Jr. *et al* (1996)

Cloud-to-Ground Lightning Flash Characteristics in Southeastern Brazil for the 1992–1993 Summer Season

Neste artigo, são apresentadas em caráter inédito características das descargas elétricas atmosféricas nuvem-solo negativas, positivas e bipolares obtidas pelo *Lightning Positioning and Tracking System* (LPATS) no sudeste do Brasil para o período compreendido entre dezembro de 1992 e março de 1993. Cerca de 300.000 descargas foram registradas e estudadas em termos de polaridade, multiplicidade, corrente de pico da primeira descarga de retorno, intensidade máxima da corrente de pico e distribuição horária de ocorrência. Os resultados preliminares foram comparados a dados similares obtidos por sistemas de detecção e localização de relâmpagos nos Estados Unidos, Austrália, Suíça e Japão, a medições recentes de campo elétrico e a dados passados de descargas elétricas obtidos na África do Sul e na Suíça.

W. Wang & N. L. Seaman (1997)

A Comparison Study of Convective Parameterizations Schemes in a Mesoscale Model

Um estudo comparativo entre quatro esquemas de parametrização cumulus, Anthes-Kuo, Betts-Miller, Grell e Kain-Fritsch, foi conduzido neste artigo usando PSU/NCAR MM5. O principal objetivo não foi descartar ou favorecer quaisquer parametrizações, mas tentar identificar características responsáveis e erros sistemáticos associados com aplicações de mesoescala desses esquemas em sistemas continentais. Suas performances foram examinadas em seis eventos precipitantes nos Estados Unidos para as estações quente e fria. Precipitação, pressão reduzida ao nível médio do mar, vento e temperatura foram os parâmetros escolhidos para simulações em grades de resolução horizontal de 36 e 12 km. As previsões de precipitação foram comparadas a observações e avaliadas quantitativamente a partir de índices estatísticos. O esquema Kain-Fritsch pareceu apresentar melhor desempenho.

H. H. Faria (1998)

Estudo das Características dos Relâmpagos Nuvem-Solo Durante Dias de Grande Atividade no Estado de Minas Gerais nos Anos de 1992 a 1994

Esta dissertação de mestrado tem como principal objetivo analisar as características dos relâmpagos nuvem-solo em dias de grande atividade na região Sudeste do Brasil no período de 1992 a 1994, associando-os a sistemas convectivos em escala sinótica. A partir de dados obtidos através de um sistema de localização de tempestades (LPATS), com cerca de 450.000 descargas de retorno, foram estudadas a polaridade, a multiplicidade, a intensidade de corrente e a distribuição temporal dos relâmpagos. Dos dezoito eventos selecionados, divididos em períodos diurno e noturno, onze encontravam-se no período de transição inverno-verão. Nos resultados obtidos, as características dos relâmpagos nuvem-solo não variaram em relação aos períodos diurno e noturno e à mudança de estação.

J. C. Fernandes *et al* (1998)

Ocorrência de Relâmpagos sobre a Região Sul e Sudeste do Brasil

Este trabalho apresenta um estudo sobre a incidência de relâmpagos nas regiões Sul e Sudeste do Brasil a fim de identificar épocas e horários mais favoráveis ao seu aparecimento. A cidade do Rio de Janeiro apresentou a maior ocorrência média de relâmpagos, enquanto que

Porto Alegre, a menor. A atividade elétrica predominou entre as 18 e 22 horas nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro para todas as cidades estudadas, Belo Horizonte, São Paulo, Rio de Janeiro e Porto Alegre. Cabe salientar que os dados analisados neste estudo resultam de observações meteorológicas de superfície, ou seja, o observador da estação necessita ver um relâmpago ou ouvir um trovão para registrar a ocorrência. Além da forma subjetiva do procedimento, este somente é realizado no momento da hora cheia, não sendo registrado o relâmpago que ocorre antes ou depois desse período.

R. Cox *et al* (1998)

A Mesoscale Model Intercomparison

Um estudo comparativo foi realizado neste trabalho na tentativa de determinar qual modelo numérico de mesoescala melhor satisfaria aos requisitos de operações da Força Aérea Americana. Os modelos *Penn State University/ NCAR Mesoscale Model 5 (MM5)*, *Colorado State University Regional Atmospheric Modeling System (RAMS)*, *Navy Operational Regional Prediction System Version 6 (NORAPS6)* e *Relocatable Window Model (RWM)* selecionados foram configurados com os melhores parâmetros e avaliados quanto a sua performance de desempenho na previsão numérica em diferentes regiões climáticas no mundo, durante diferentes estações do ano. Uma comparação direta dos resultados gerados pelos modelos com dados reais observados e com os critérios de precisão estabelecidos pela Força Aérea Americana e Agência de Defesa Nuclear indicou estatisticamente o modelo RAMS, seguido pelo MM5, como aqueles de melhor desempenho. Entretanto, apesar do NORAPS6 e RWM terem sido, respectivamente, os últimos colocados, não houve grande disparidade na classificação, visto que todos os modelos numéricos mostraram as mesmas dificuldades na predição de algumas variáveis.

S. N. Figueroa *et al* (1998)

Aplicación Operacional del Modelo MM5 para el Pronóstico del Tiempo y la Modernización de la Meteorología en el Perú

Este trabalho descreve as características, os resultados preliminares e o potencial do modelo de mesoescala MM5 operacional desde 23 de março de 1998 no Instituto Geofísico do Peru. A configuração do MM5 em tempo real inclui dois domínios, o primeiro, com resolução horizontal de 81 km, cobrindo quase toda a América do Sul, e o segundo, com

resolução horizontal de 27 km, centrado sobre o Peru. A análise dos resultados revelou boa performance do modelo para norte e leste do Peru, assim como, surpreendentemente, alto desempenho no prognóstico de precipitação na Argentina, Uruguai, Paraguai e sul do Brasil. Cabe ressaltar que o El Niño é o evento climatológico mais importante que ocorre no Peru e as análises preliminares dos prognósticos numéricos mostraram um bom desempenho do modelo para sua região de ocorrência.

O. Pinto Jr. *et al* (1999)

Cloud-to-Ground Lightning in Southeastern Brazil in 1993 1. Geographical Distribution

Neste artigo, os resultados da análise de aproximadamente 1,1 milhão de descargas elétricas atmosféricas nuvem-solo, registradas pelo *Lightning Positioning and Tracking System* (LPATS) no sudeste do Brasil para todo o ano de 1993, são apresentados em termos da distribuição geográfica da densidade total de descargas, da porcentagem de descargas positivas, das densidades das descargas negativas e positivas e da intensidade da corrente de pico das descargas negativas e positivas. A possível dependência da densidade e da corrente de pico com a latitude, a altitude e a resistividade do solo foi também investigada. Enquanto que a corrente de pico para as descargas negativas correlacionou-se inversamente com a latitude, a distribuição geográfica das descargas nuvem-solo negativas não apresentou nenhuma relação significativa com tal parâmetro, sendo aparentemente influenciada por fenômenos meteorológicos de grande escala e pela topografia. A distribuição geográfica das descargas nuvem-solo positivas indicou que a localização dos sensores LPATS provavelmente tem alguma influência nos registros, de modo que tal constatação pôde ser explicada pelo fato das descargas positivas estarem contaminadas com descargas do tipo intranuvens. Os valores da máxima densidade ($7,7 \text{ km}^{-2} \text{ ano}^{-1}$), da porcentagem (36,5%) e da média geométrica da corrente de pico (17,8 kA) das descargas elétricas positivas não foram considerados realmente representativos para a região de estudo devido à contaminação. Desta forma, negligenciando as descargas positivas com corrente de pico inferior a 15 kA e assumindo que estas correspondem a descargas intranuvens erroneamente identificadas pelo sistema de detecção, os valores correspondentes às características anteriores seriam de 3.9 descargas/ km^2 por ano, 23% e 38.7 kA. Os resultados encontrados foram comparados no contexto a referências de outros autores que realizaram análises similares em diferentes partes do mundo.

I. R. C. A. Pinto *et al* (1999)

Cloud-to-Ground Lightning in Southeastern Brazil in 1993 2. Time Variations and Flash Characteristics

Neste artigo, são apresentadas em caráter inédito as variações mensal, sazonal (verão/inverno) e diurna da atividade de descargas elétricas atmosféricas nuvem-solo no Brasil ao longo de todo um ano. O conjunto de dados trabalhado foi discriminado em Pinto Jr. *et al* (1999), assim como sua distribuição geográfica. Além dos registros do *Lightning Positioning and Tracking System* (LPATS), também dados do campo de radiação das descargas elétricas foram utilizados, a partir de medições obtidas da torre CTA localizada em São José dos Campos (SP), com a finalidade de comparar a multiplicidade das descargas detectadas por ambos os sistemas. O comportamento mensal da atividade elétrica mostrou dois picos característicos de região tropical nos meses de março e novembro, enquanto que as variações sazonais indicaram maior ocorrência de descargas elétricas nas estações da primavera e do verão. Os valores de multiplicidade encontrados pelo sistema LPATS foram muito inferiores aqueles registrados na mesma região do Brasil pelos campos de radiação. A corrente de pico foi mais alta no verão do que no inverno, contrariando resultados obtidos em outras partes do mundo. A atividade elétrica negativa foi máxima entre 15 e 18 horas local, associada à intensa convecção ocorrida durante este período, e mínima nas primeiras horas da manhã. A variação diurna das descargas positivas seguiu o mesmo comportamento apenas durante o inverno, apresentando dois picos de máximo no verão entre 14 e 15 horas e às 19 horas local. Tal fato pareceu estar relacionado à contaminação por descargas do tipo intranuvens. Os resultados igualmente foram relacionados a outros obtidos por diferentes autores.

R. B. B. Gin *et al* (2000)

Estudo de Descargas Elétricas Atmosféricas no Sul e Sudeste do Brasil: Análise Preliminar

Atividade mensal e distribuição geográfica da densidade de descargas atmosféricas, intensidade de corrente média e porcentagem de descargas positivas foram analisadas para os Estados de São Paulo e Paraná durante o período de outubro de 1998 a fevereiro de 1999. Os dados deste estudo são do sistema de detecção contínua de descargas elétricas *Lightning Positioning and Tracking System* (LPATS) do Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR).

R. B. B. Gin & R. L. Guedes (2000)

Climatologia de Relâmpagos no Brasil: Análise Preliminar

As distribuições temporal e espacial da atividade elétrica em regiões de diferentes latitudes no Brasil durante um período de 10 anos foram analisadas neste trabalho através do cálculo do índice ceráunico. Como principais resultados, ressalta-se maior atividade de relâmpagos no território brasileiro nos meses de janeiro e março nos horários entre 19 e 21 horas. As cidades do Rio de Janeiro, Salvador e Belo Horizonte apresentaram, em média, a maior frequência anual de relâmpagos, em função, segundo os autores, da associação de fenômenos meteorológicos com fatores locais.

K. P. Naccarato (2001)

Estudo de Relâmpagos no Brasil com Base na Análise de Desempenho do Sistema de Localização de Tempestades

O objetivo desta dissertação de mestrado foi avaliar o desempenho do *Sistema de Localização de Tempestades* (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. Com base nesses resultados, foram obtidos os principais aspectos dos relâmpagos em função das condições geográficas e sazonais usando dados do verão e do inverno de 1999 e 2000. Um estudo preliminar sobre a ocorrência de relâmpagos em regiões densamente povoadas no verão de 2000 e 2001 também foi realizado.

S. Abdoulaev *et al* (2001)

Análise de Sistemas de Mesoescala Utilizando Dados de Descargas Nuvem-Terra

O objetivo deste trabalho foi verificar a possibilidade do acompanhamento operacional da formação e evolução de sistemas de mesoescala de precipitação na região Sul da América do Sul e no Oceano Atlântico, observados por satélite e radar, a partir de Campos Acumulados de Descargas Atmosféricas à Terra (CAD). Apesar da distância significativa dos detectores de raios da *Rede Integrada de Detecção de Descargas Atmosféricas* (RIDAT) em relação à região de estudo, a sobreposição dos CAD, em intervalos de tempo de 0,5 a 2 horas, permitiu determinar orientação e velocidade das frentes frias, seções frontais do ciclone e onda frontal e convecção em desenvolvimento e dissipação.

A. S. Silva *et al* (2002)

Impacto do Aumento da Resolução Espacial na Previsão de Tempo Regional

Neste trabalho são descritos os resultados de previsões de 72 horas realizadas com o modelo de mesoescala MM5 no Laboratório de Prognóstico em Mesoescala (LPM)/ UFRJ, usando uma resolução de 20 km, incluindo o aninhamento subsequente de duas outras grades com resoluções de 6,6 e 2,2 km centradas no município do Rio de Janeiro. Com este novo esquema de previsões, os autores puderam constatar um aumento na quantidade e na qualidade da informação que é disponibilizada ao usuário. As previsões de circulação atmosférica e temperatura do ar mostraram-se boas, enquanto que as de precipitação ainda estão abaixo da expectativa.

C. Beneti *et al* (2002)

Efeitos Geográficos e Orográficos na Incidência de Descargas Elétricas Atmosféricas no Paraná – Estudo Preliminar

Relacionar a incidência de descargas elétricas no Paraná com a orografia e a localização geográfica deste Estado foi o objetivo deste trabalho. Os autores processaram mais de 8,7 milhões de descargas elétricas detectadas durante seis anos (1996-2001). Como principais resultados, ressalta-se que a orografia, em conjunto com os sistemas meteorológicos predominantes no período, foi determinante para os altos valores da densidade de descargas encontrados nas regiões do Vale do Rio Ribeira do Iguape e da Serra Geral, os quais, em ambos os casos, foram superiores a 10 descargas/km²/ano, enquanto que a média para todo o Estado foi inferior a 5 descargas/km²/ano.

H. H. Faria (2002)

Estudo Comparativo da Atividade e Características dos Relâmpagos nas Regiões de Rondônia e Sudeste, no Período de Outubro de 1999 a Março de 2000

Esta tese de doutorado é pioneira no estudo da atividade elétrica na região de Rondônia e na comparação da atividade de relâmpagos com as condições meteorológicas em ambas as regiões. Seu principal objetivo, portanto, foi analisar comparativamente a atividade e as características dos relâmpagos nuvem-solo e intranuvem nas regiões de Rondônia e Sudeste, identificando, assim, seus comportamentos elétricos e relacionando-os às

características de precipitação das tempestades, a partir da análise dos principais fenômenos meteorológicos.

R. B. B. Gin & C. Beneti (2002)

Estudo das Tempestades Elétricas de Grande Impacto sobre o Estado de São Paulo: Verão de 2001

O presente estudo apresenta características surpreendentes das descargas atmosféricas associadas a tempestades convectivas severas que ocorreram em dias de grande impacto para o Estado de São Paulo durante o verão de 2001. Foram analisadas atividade, densidade, polaridade e intensidade de corrente média. De aproximadamente 450.000 descargas registradas pelo sistema de detecção contínua LPATS do SIMEPAR nos meses de janeiro e fevereiro, 80.900 ocorreram em apenas sete episódios convectivos neste período. O máximo de atividade elétrica de um sistema convectivo de mesoescala, que provocou ao todo 22.000 descargas, foi de 4.000 descargas/hora, em torno das 18 horas local, com uma atividade média de 50 descargas/hora.

T. R. A. Pereira *et al* (2002)

Análise do Desempenho do Modelo Numérico MM5 na Previsão de Chuva sobre o Estado do Rio de Janeiro

O objetivo deste trabalho foi a partir da comparação com dados observados qualificar a performance do modelo de mesoescala MM5, implementado no Laboratório de Prognósticos em Mesoescala (LPM)/ UFRJ, na previsão de precipitação. A análise dos resultados mostrou que o desempenho do modelo é melhor para as primeiras 24 horas de integração. Em previsões acumuladas de 6 em 6 horas, a ocorrência do evento é prevista com um certo atraso temporal.

I. R. C. A. Pinto & O. Pinto Jr. (2003)

Cloud-to-Ground Lightning Distribution in Brazil

Uma revisão da distribuição das descargas elétricas atmosféricas nuvem-solo no Brasil é realizada neste artigo com base em todos dados disponíveis de índice cerâmico, contadores de descargas, redes de detecção LF/VLF, precipitação e sensores óticos a bordo de satélites.

As análises sugeriram que 50 a 70 milhões de descargas nuvem-solo ocorrem por ano no país, estando a maioria delas concentrada nas regiões Norte, Centro e Sudeste com densidades superiores a $10 \text{ descargas km}^{-2} \text{ ano}^{-1}$. Apesar do progresso significativo verificado na última década em relação à obtenção de registros do comportamento das descargas elétricas, informações sobre a distribuição da corrente de pico, multiplicidade e porcentagem de descargas nuvem-solo positivas ainda são bastante limitadas e controversas.

O. Pinto Jr. *et al* (2003)

A Comparative Analysis of Lightning Data from Lightning Networks and LIS Sensor in the North and Southeast of Brazil

Dados de descargas elétricas intranuvens e nuvem-solo das regiões Norte e Sudeste do Brasil são comparados neste artigo com base em observações obtidas de redes de detecção em superfície e do *Lightning Imaging Sensor* (LIS) a bordo do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRRM) para o período de 01 de outubro de 1999 a 13 de abril de 2000. Uma análise detalhada das informações mostrou que a ocorrência de descargas nuvem-solo na região Norte é cerca de 20% superior àquela verificada na região Sudeste para uma área de tamanho similar, enquanto que a porcentagem de descargas intranuvens é praticamente a mesma em ambas as regiões (~60–65%). Outro estudo realizado com os dados registrados pelo LIS indicou serem estes representativos da atividade elétrica nuvem-solo detectada pelos sistemas em terra. Também foi encontrada correlação entre a porcentagem de descargas elétricas nuvem-solo positivas e intranuvens em toda a área de estudo da região Norte. Tal relação não ocorreu na região Sudeste.

O. Pinto Jr. *et al* (2003a)

A Seven-Year Study About the Negative Cloud-to-Ground Lightning Flash Characteristics in Southeastern Brazil

Os resultados do estudo das distribuições anual, mensal e horária do número, intensidade da corrente de pico e multiplicidade de aproximadamente 10 milhões de descargas elétricas atmosféricas nuvem-solo negativas registradas pelo *Lightning Positioning and Tracking System* (LPATS) na região Sudeste do Brasil para o período de novembro de 1988 a dezembro de 1995 são apresentados neste artigo. O conjunto de dados citado é o maior já obtido nos trópicos usando praticamente uma configuração constante para a rede de detecção.

A distribuição anual do número de descargas exibiu variações tão grandes quanto 80% que não se correlacionaram claramente com quaisquer fenômenos meteorológicos, indicando possíveis interações complexas entre diferentes processos responsáveis pela ocorrência de atividade elétrica. As distribuições mensal, com dois picos característicos de região tropical em fevereiro e novembro, e horária, com máximos entre 16 e 18 horas local, pareceram seguir fielmente o comportamento da temperatura do ar. As variações anuais da corrente de pico mostraram um valor médio de 40,4 kA e uma diminuição significativa nos anos de 1991 a 1994 aparentemente relacionada aos efeitos sazonais do fenômeno El Niño. Sua distribuição mensal apresentou valores mais baixos no inverno do que no verão, em contraste com resultados recentemente publicados nos Estados Unidos, parecendo bem correlacionada ao comportamento mensal do número de descargas. A distribuição anual da multiplicidade das descargas apresentou um aumento sistemático após 1992, aparentemente não provocado por quaisquer sistemas meteorológicos, enquanto que a mensal foi consistente com a hipótese da multiplicidade estar relacionada com a altura média alcançada pelas nuvens de tempestade. A sua distribuição horária mostrou-se influenciada por efeitos do nascer e do pôr do sol. Os resultados foram comparados a outros similares obtidos em diferentes regiões do mundo.

A. Bomfim Júnior (2004)

Implementação de uma Rede Neural Artificial na Associação de Imagens do Radar Meteorológico e Dados de Descargas Elétricas

O principal objetivo desta dissertação de mestrado foi elaborar um estudo comparativo entre a ocorrência de descargas elétricas e as imagens de refletividade de radar a partir de *redes neurais artificiais* (RNA), o que permitiu estabelecer relações entre as descargas atmosféricas e os dados do radar meteorológico. Os resultados obtidos foram promissores, observando-se, em alguns casos, correlações de até 80%, enquanto que, em outros, não foi possível quantificar as saídas das redes neurais, apenas verificar uma tendência de similaridade entre a saída da rede e os dados observados.

C. Oliveira & W. F. Menezes (2004)

Estudo de Configurações de Parametrizações Físicas em um Modelo Numérico via Estudo de Caso

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho do modelo numérico MM5 sob diferentes parametrizações físicas, fundamentais na formação de sistemas precipitantes, com a finalidade de determinar aquelas que melhor caracterizam a precipitação associada a estes eventos. Para o estudo de caso do sistema convectivo de mesoescala que atingiu a região metropolitana do Rio de Janeiro em 15 de novembro de 2001, três parametrizações de microfísica (Schultz, Goddard e Dudhia) e uma parametrização de convecção (Kain-Fritsch 2) foram selecionadas. Os autores concluíram que o modelo obteve um excelente desempenho independente da parametrização escolhida, conseguindo simular com boa precisão a localização espacial do evento, apesar do pequeno atraso na determinação do seu momento de início e dissipação. Embora os experimentos tenham apresentado resultados similares, é destacado o desempenho da parametrização de Schultz e, ainda, observado que a inclusão da parametrização de Kain-Fritsch 2, na escala estudada, não acrescentou informação relevante.

N. O. Moraes *et al* (2004)

Uso do Modelo MM5 na Simulação da Distribuição Horizontal da Temperatura na Região Metropolitana do Rio de Janeiro sob a Influência de Efeitos Sinóticos

O objetivo principal deste estudo consistiu em comparar prognósticos do modelo MM5 com dados observados provenientes de estações meteorológicas dos aeroportos da Região Metropolitana do Rio de Janeiro e, por fim, estabelecer a relação entre a ocorrência de sistemas sinóticos e a intensificação e o surgimento de gradientes térmicos horizontais. Foram utilizados na metodologia o modelo numérico MM5, informações observacionais do METAR, imagens de satélite e dados de reanálise do *National Center for Environmental Prediction* (NCEP). Nas simulações, duas grades aninhadas foram estabelecidas: a de menor resolução espacial, 9 km, abrangendo todo o Estado do Rio de Janeiro, e a segunda, com 3 km, centrada na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Os resultados mostraram, através das comparações realizadas a partir do cálculo de índices estatísticos, que o MM5 teve um comportamento termodinâmico bastante coerente em resposta às situações sinóticas apresentadas. A análise da simulação da distribuição horizontal de temperatura prognosticada

pelo modelo demonstrou a existência de núcleos mais quentes na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, caracterizando a existência de ilhas de calor.

Y. Yamazaki *et al* (2004)

Análise de um Caso de Chuvas Intensas em Pelotas – RS Usando o Modelo MM5

Os sistemas de mesoescala que se desenvolveram no Estado do Rio Grande do Sul e no Uruguai, particularmente nas proximidades da cidade de Pelotas, durante o período de 3 a 5 de fevereiro de 2003, foram avaliados utilizando resultados do processamento do modelo de mesoescala MM5. As configurações usadas para simular e reproduzir a situação observada, como também, um breve sumário do sistema MM5 implantado, os procedimentos incluídos e os resultados das análises foram apresentados. Apesar do estabelecimento de três domínios aninhados, o de maior resolução é o que apresentou melhor resultado, quando comparado às observações de superfície da Estação Agroclimatológica de Pelotas (Convênio EMBRAPA/UFPel). Os resultados das análises revelaram que a performance do modelo foi promissora, mostrando grande potencialidade em fornecer prognósticos com boa resolução temporal e espacial sobre a região Sul do País.

CAPÍTULO 2

DESCARGAS ELÉTRICAS ATMOSFÉRICAS

2.1 INTRODUÇÃO

Uma típica nuvem de tempestade apresenta um diâmetro de 10 a 20 km, alcança altitudes de 10 a 20 km e dura em média de 30 a 90 minutos. Algumas vezes, permanece fixa em um dado lugar, outras vezes, movimenta-se com uma velocidade de 40 a 50 km/h. Conforme mostra a Figura 2.1 abaixo, normalmente pode ser identificada por seu largo e brilhante topo esbranquiçado que se projeta na direção dos ventos formando uma saliência denominada bigorna (Pinto Jr. & Pinto, 2000).

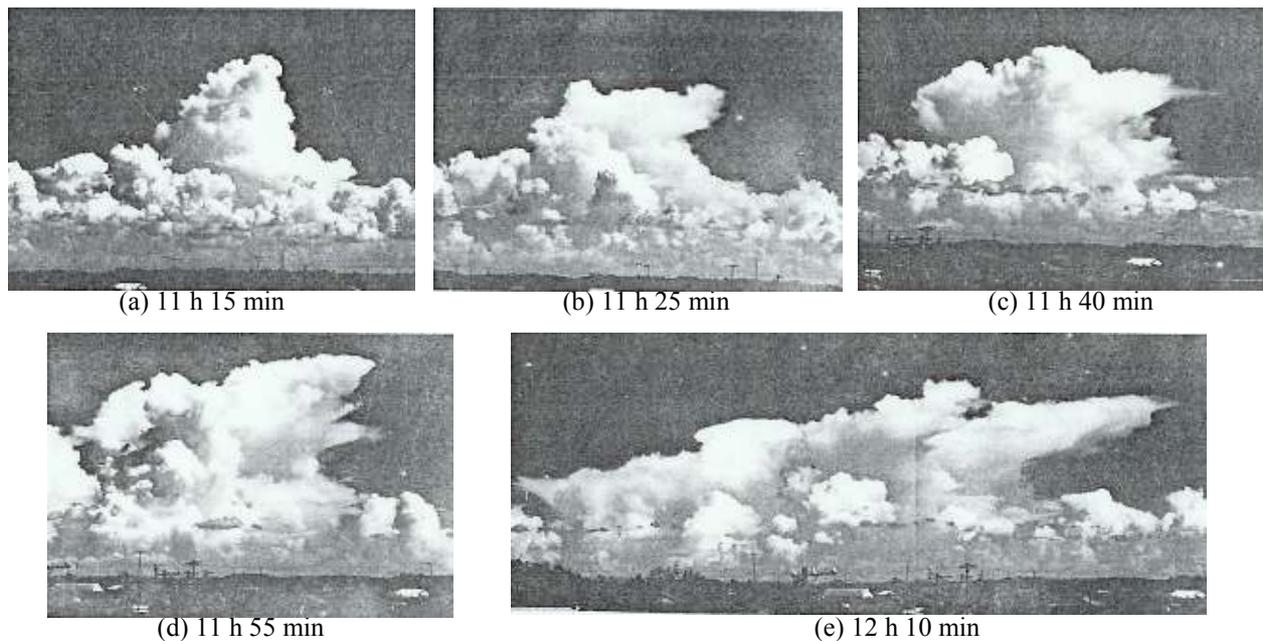


Figura 2.1 – Esta seqüência de fotografias mostra o processo de transformação de nuvens cúmulos *congestus* para cumulonimbus durante um período de 55 minutos.

FONTE: Wallace & Hobbs (c1977, p.219)

O vapor d'água, existente nas camadas mais baixas da atmosfera, à medida que ascende por convecção, devido a maior temperatura das parcelas de ar próximas à superfície, passa do estado de vapor para os estados líquido e sólido em determinadas alturas da atmosfera, adquirindo formas de 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. Deste processo, forma-se uma nuvem que 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, em diferentes estágios de desenvolvimento (Naccarato, 2001). Segundo Gin (1992), é denominada célula, a região onde ocorre a atividade convectiva dentro da nuvem.

Nuvens de tempestade, também conhecidas como nuvens cumulonimbus (Cb), comumente são classificadas em tempestades isoladas e tempestades organizadas. As isoladas têm duração de aproximadamente 1 ou 2 horas e sua ocorrência está relacionada a fatores locais como convecção, orografia, aquecimento diurno e teor de umidade local. Por outro lado, as tempestades organizadas ou sistemas convectivos de mesoescala, além da duração e atividade elétrica intensas, costumam ser mais severos, apresentando chuvas fortes, ventos bastante violentos e granizo. Alguns tipos particulares destes últimos sistemas são as linhas de tempestade, as linhas de instabilidade e os complexos convectivos de mesoescala (Pinto Jr. & Pinto, 2000).

A eletrificação das células de tempestade é causada por colisões mútuas e fricções da água em suas várias fases no interior da nuvem, em função dos fortes movimentos ascendentes e descendentes do ar. Grandes centros de carga positivos e negativos surgem, então, como resultado da geração e separação das cargas através de processos microfísicos e microfísicos ainda pouco conhecidos (Gin, 1992; Gomes, 2002; Pinto Jr. & Pinto, 2000). Com o acúmulo de cargas, o campo elétrico intensifica-se dando origem às descargas elétricas atmosféricas ou relâmpagos, causados pela ruptura dielétrica do ar no interior da nuvem de tempestade (Naccarato, 2001).

As próximas seções abordarão mais detalhadamente conceitos e características fundamentais no estudo da eletricidade atmosférica, uma breve apresentação do sistema de detecção de relâmpagos no solo, a descrição e o comportamento dos dados de descargas elétricas atmosféricas e a metodologia empregada para sua análise. Na seção 2.2, serão apresentados o processo de formação, os mecanismos de geração e separação de cargas e a estrutura elétrica das nuvens de tempestade. Características físicas dos relâmpagos, com ênfase naqueles nuvem-solo estudados neste trabalho, serão discutidas na seção 2.3. A seção 2.4 apresentará resumidamente a técnica de detecção de relâmpagos no solo utilizada no Brasil, bem como seus sensores. Já a seção 2.5 descreverá as características e a atividade dos

dados de descargas elétricas atmosféricas na região de estudo escolhida e a metodologia empregada na sua análise, visando à continuação do estudo proposto nesta dissertação.

2.2 ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA

2.2.1 Formação de uma Nuvem de Tempestade

O ciclo evolutivo de uma nuvem de tempestade, representado na Figura 2.2, é composto por três estágios diferentes: estágio de desenvolvimento ou estágio cúmulos, estágio de maturação e estágio de dissipação, cada um com duração de 20 a 40 minutos.

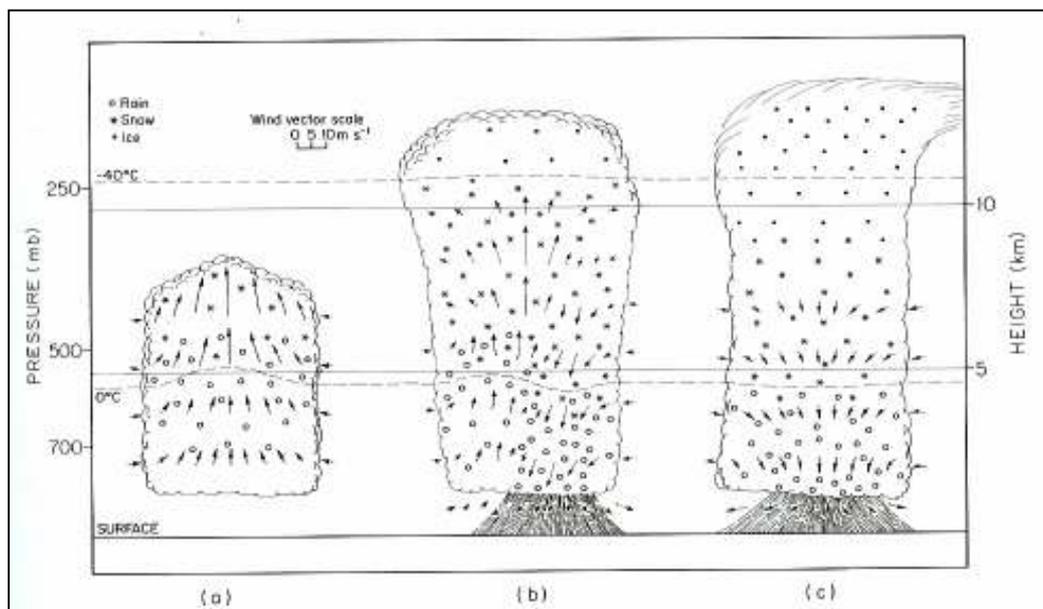


Figura 2.2 – Descrição esquemática do ciclo de vida de uma nuvem de tempestade: (a) estágio de desenvolvimento, (b) estágio de maturação e (c) estágio de dissipação.

FONTE: Wallace & Hobbs (c1977, p.239)

O estágio de desenvolvimento inicia-se a partir da reunião de pequenas nuvens brancas que se formam tipicamente em torno de 1 km de altura possuindo uma extensão tanto horizontal quanto vertical de algumas centenas de metros chamadas nuvens cúmulos. Nesta fase, os movimentos verticais são predominantemente ascendentes, arrastando partículas de gelo e gotículas de água para cima. A extensão horizontal da célula convectiva pode chegar a 10 km de diâmetro, com a base situada a uma altura de 1,5 km e o topo, a 8 km, aproximadamente. O conteúdo de água no interior da nuvem aumenta da base para o topo e, com isso, percebe-se claramente o crescimento, observando-se a rápida formação de torres

que surgem e, logo depois, abatem-se, sendo substituídas por outras maiores, que também se abatem, mas atingindo um nível mais elevado que o anterior e, assim, sucessivamente. Durante esta etapa do desenvolvimento não ocorre precipitação.

O início do estágio de maturação é considerado ocorrer quando a precipitação atinge a superfície. Nesta fase coexistem correntes ascendentes e subsidentes muito intensas no interior da nuvem. Os movimentos descendentes, gradualmente intensificados horizontal e verticalmente, acontecem devido a não sustentação das gotículas de água e partículas de gelo que cresceram de tamanho. O aumento na frequência de relâmpagos e trovões denuncia o clímax da atividade da célula convectiva neste estágio. O diâmetro da nuvem é tipicamente de 10 km, embora possa atingir, em alguns casos, dezenas de quilômetros. A altura da base pode variar de 1 km até cerca de 4 km, dependendo da umidade. O topo atinge alturas que variam de 8 a 20 km, alcançando e mesmo ultrapassando, muitas vezes, a tropopausa. Sua forma também costuma apresentar um alargamento em relação ao diâmetro da nuvem, decorrente do espalhamento horizontal das partículas de gelo, o que, devido à influência dos ventos, confere à região um aspecto de bigorna.

Durante o estágio de dissipação, a intensidade da precipitação diminui, ficando progressivamente mais raras as descargas elétricas. O movimento de ar é quase exclusivamente subsidente, provocando um resfriamento da nuvem em relação a sua vizinhança. A altura do topo tende a diminuir e este a adquirir nitidamente um aspecto cirroso. A chuva passa de moderada a fraca e toda a nuvem começa a se desagregar.

2.2.2 Mecanismos de Geração e Separação de Cargas em Nuvens de Tempestade

Não estão totalmente esclarecidos os processos físicos responsáveis pela acumulação de cargas elétricas diferentes no interior da nuvem. Em parte, isto se deve ao fato de a estrutura elétrica de uma nuvem de tempestade ser bastante complexa, resultado de processos microfísicos e macrofísicos que ocorrem simultaneamente em seu interior.

A teoria mais aceita para explicar a geração de cargas requeridas para eletrificar uma nuvem de tempestade assume que as partículas carregadas são produzidas por colisões de diferentes partículas de gelo no interior da nuvem. Entretanto, detalhes da transferência de cargas durante o processo de colisão não são muito bem conhecidos (Faria, 1998; Faria, 2002;

Pinto Jr. & Pinto, 2000). Os dois processos microfísicos mais considerados são o *processo colisional indutivo* e o *processo colisional termoelétrico*.

O *processo colisional indutivo*, representado na Figura 2.3, consiste na polarização de partículas de gelo grandes, como o granizo, devido à presença do campo elétrico atmosférico externo. Sendo o campo elétrico descendente e havendo colisões de partículas menores, como cristais de gelo, na parte inferior do granizo, o mesmo transfere para o cristal as cargas positivas em excesso, tornando-se negativamente carregado. À medida que as partículas de cristais de gelo e granizo ficam carregadas, elas são separadas por processos microfísicos. Esta separação resulta em um reforço do campo elétrico dentro de uma nuvem eletrificada, o que provocará novas induções nos granizos.

O *processo colisional termoelétrico* estabelece que a polaridade da carga transferida durante uma colisão entre diferentes partículas de gelo depende da temperatura no local da colisão, conforme ilustrado na Figura 2.4. Se a temperatura local for maior que uma dada temperatura, denominada *temperatura de inversão de carga* e estimada ser em torno de -15°C a aproximadamente 6 km de altitude, o granizo ficará positivamente carregado e o cristal de gelo negativamente carregado. O cristal de gelo, devido a movimentos ascendentes subirá, criando assim um centro de cargas positivas na parte inferior da nuvem, devido a grande quantidade de granizo que permanecerá no local da colisão. Caso a colisão ocorra em temperatura inferior à temperatura de inversão de carga, o granizo tornar-se-á negativamente carregado e o cristal de gelo positivamente carregado, criando assim dois centros de cargas, um positivo e um negativo, ambos acima da temperatura de inversão. Dessa forma, a célula de tempestade terá três centros de cargas, ou seja, uma estrutura tripolar.



Figura 2.3 – Processo Colisional Indutivo.
FONTE: Pinto Jr. & Pinto (2000, p.71)

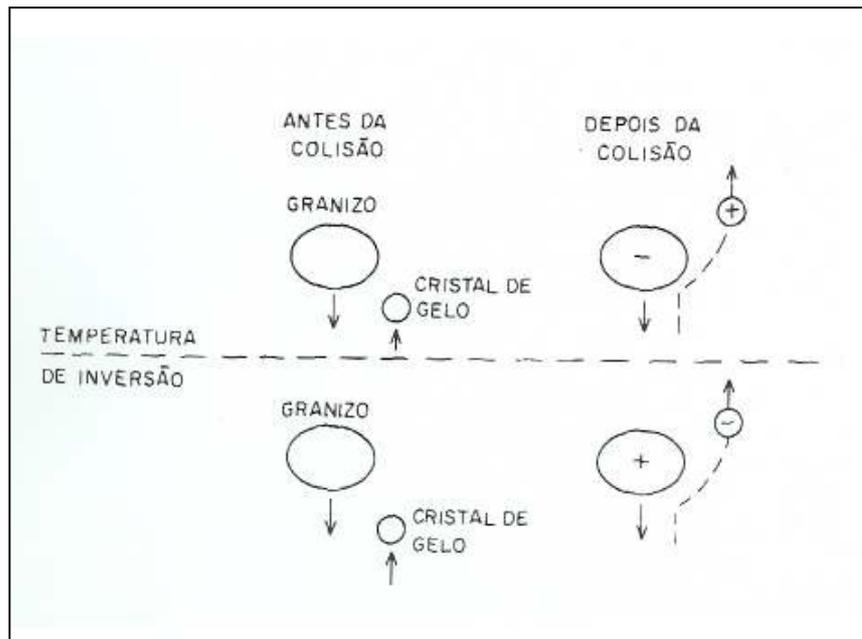


Figura 2.4 – Processo Colisional Termoelétrico.
 FONTE: Pinto Jr. & Pinto (2000, p.72)

Depois de geradas, as partículas carregadas são separadas por processos macrofísicos, a partir da ação gravitacional, no *processo gravitacional*, e do efeito de correntes de ar ascendentes e descendentes, no *processo convectivo*. Ambos, mostrados nas Figuras 2.5 e 2.6, respectivamente, são considerados processos importantes para o transporte de cargas dentro das nuvens de tempestade.

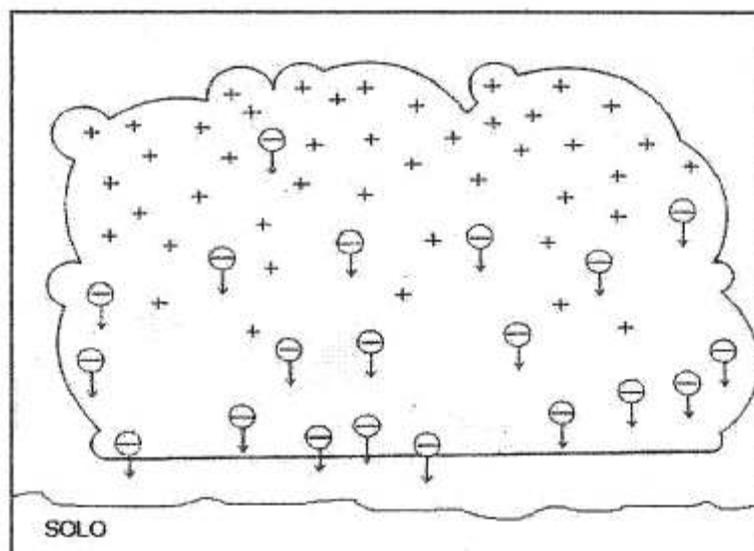


Figura 2.5 – Processo Gravitacional.
 FONTE: Faria (2002, p.44)

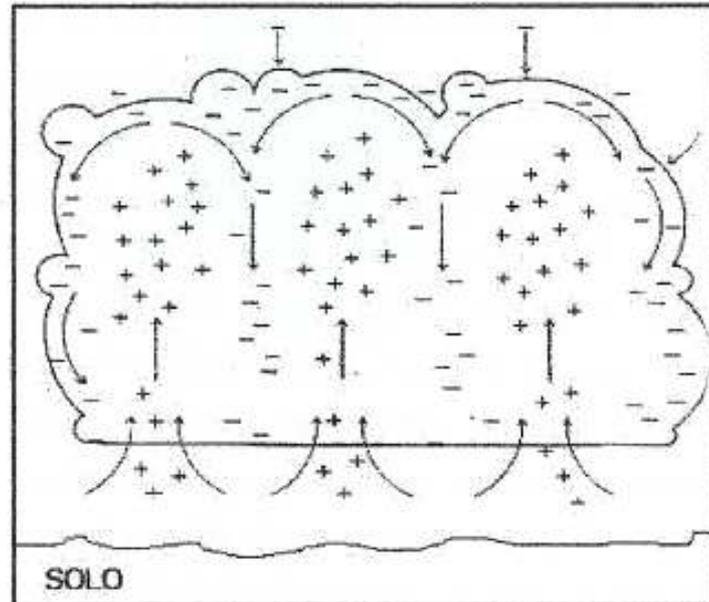


Figura 2.6 – Processo Convectivo.
FONTE: Faria (2002, p.45)

O *processo gravitacional*, também conhecido como a teoria de precipitação, assume que a ação da gravidade, atuando sobre diferentes partículas de gelo com tamanhos que variam de uma fração de milímetro até alguns poucos centímetros, tende a fazer com que as partículas maiores permaneçam na parte inferior da nuvem, enquanto que as partículas menores permaneçam na parte superior da nuvem de tempestade.

O *processo convectivo* assume que as correntes ascendentes e descendentes dentro das nuvens transportam as partículas carregadas e atuam de modo a manter as partículas menores suspensas na parte superior da nuvem.

2.2.3 Estrutura Elétrica de uma Nuvem de Tempestade

Um modelo idealizado da estrutura elétrica de uma nuvem de tempestade estabelece dois centros de cargas principais, um negativo localizado na metade inferior da nuvem e um positivo situado na parte superior, como pode ser visto na Figura 2.7. A carga nestes centros pode variar consideravelmente de um local para outro e de nuvem para nuvem, com valores desde uma dezena a algumas centenas de Coulombs. Eventualmente, um pequeno centro de cargas positivo pode estar presente na base da nuvem, abaixo do centro negativo principal. Seu aparecimento é considerado como sendo associado às cargas positivas provenientes do

solo por efeito corona. As finas camadas de cargas positivas e negativas, na base e no topo da nuvem, respectivamente, correspondem à blindagem dos centros de carga principais. Estas camadas são produzidas pelo aprisionamento de íons, provenientes do ar claro adjacente, às partículas da nuvem, carregando-as eletricamente (Naccarato, 2001; Pinto Jr. *et al*, 1992).

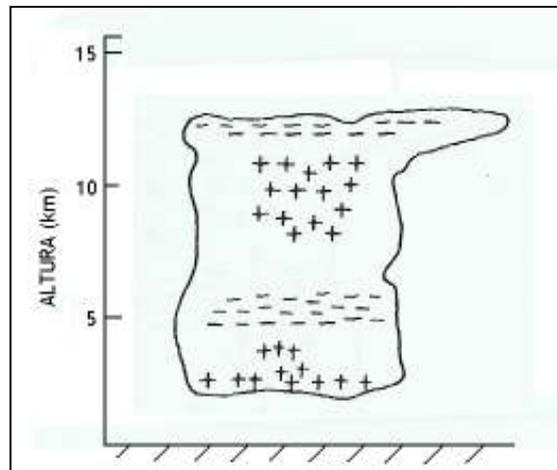


Figura 2.7 – Configuração dos centros de carga elétrica em uma nuvem de tempestade segundo modelo idealizado.

2.3 RELÂMPAGOS

2.3.1 Classificação

O relâmpago consiste em uma descarga elétrica de grandes proporções na atmosfera que apresenta imensuráveis fenômenos relacionados, não só próximos ao local de sua ocorrência, mas também a grandes distâncias.

Existem diversos tipos de relâmpagos, classificados de acordo com o local onde se originam e terminam: *relâmpagos nuvem-solo* (NS), caracterizados por descargas elétricas que, partindo de uma nuvem, atingem a superfície da Terra; *relâmpagos solo-nuvem* (SN), que ocorrem a partir do solo em direção à nuvem; *relâmpagos intranuvem* (IN), os quais ocorrem no interior de uma mesma nuvem de tempestade; *relâmpagos entre-nuvens* (EN), que ocorrem entre nuvens diferentes; *relâmpagos no ar* (AR), que partem de uma nuvem e terminam na própria atmosfera, sem alcançar uma outra nuvem ou o solo; ou ainda, *relâmpagos da nuvem para ionosfera* (NI).

Os *relâmpagos intranuvem* (IN) são os mais freqüentes, em parte devido ao fato de a capacidade isolante do ar diminuir com a altura em função da diminuição da densidade do ar, facilitando com que uma partícula possa ser acelerada a ponto de iniciar uma descarga, e em parte devido às regiões de cargas opostas estarem mais próximas. Eles representam, em média, cerca de 80% do número total de relâmpagos, podendo este percentual variar de acordo com a latitude geográfica (Pinto Jr. & Pinto, 2000).

Comparativamente raros são os *relâmpagos entre-nuvens* (EN), os *relâmpagos no ar* (AR) e os *relâmpagos da nuvem para ionosfera* (NI). Devido a grande dificuldade em obter-se informações detalhadas sobre seus mecanismos físicos, estes relâmpagos no céu permanecem pouco conhecidos. Por outro lado, os relâmpagos que envolvem o solo, também chamados de *raios*, são os mais estudados e, conseqüentemente, melhor compreendidos, devido não só a maior facilidade na realização de medidas, como também a sua ação destrutiva na superfície terrestre. Depois daqueles que ocorrem no interior das nuvens, os *relâmpagos nuvem-solo* (NS) são os mais freqüentes. Já os *relâmpagos solo-nuvem* (SN), em geral, ocorrem a partir de pontos altos no solo, como prédios, torres e árvores.

Neste trabalho foram estudadas a atividade e as características físicas apenas dos *relâmpagos nuvem-solo* (NS). Portanto, somente este tipo de descarga elétrica será discutida com maiores detalhes a seguir.

2.3.2 Relâmpagos Nuvem-Solo

Os relâmpagos nuvem-solo (NS) também são classificados pela polaridade das cargas efetivamente transferidas ao solo: *relâmpagos nuvem-solo negativos*, que transferem cargas negativas de uma região carregada negativamente dentro da nuvem para o solo, e *relâmpagos nuvem-solo positivos*, que transportam cargas positivas de uma região carregada positivamente dentro da nuvem para o solo, o que na realidade, equivale à transferência de elétrons do solo para a nuvem (Pinto Jr. & Pinto, 2000).

Aproximadamente 90% do total de relâmpagos nuvem-solo são negativos. Os restantes 10% são basicamente relâmpagos positivos. Entretanto, existem alguns fatores básicos que parecem influir no percentual de relâmpagos positivos, que, em alguns casos, pode ser até superior ao de negativos, tais como, a altitude das cargas positivas próximas ao

topo da nuvem, relacionada com a latitude geográfica e com as estações do ano, a variação da velocidade horizontal dos ventos com a altura, associada diretamente às condições meteorológicas, e a dissipação da nuvem de tempestade (Faria, 2002; Gin, 1992; Naccarato, 2001; Pinto Jr. & Pinto, 2000).

O *relâmpago nuvem-solo negativo*, conforme ilustrado na Figura 2.8 abaixo, origina-se dentro da nuvem, próximo à base, na forma de uma descarga invisível ao olho humano chamada de líder escalonado, a qual move-se para baixo, em direção ao solo, em uma série de passos discretos.

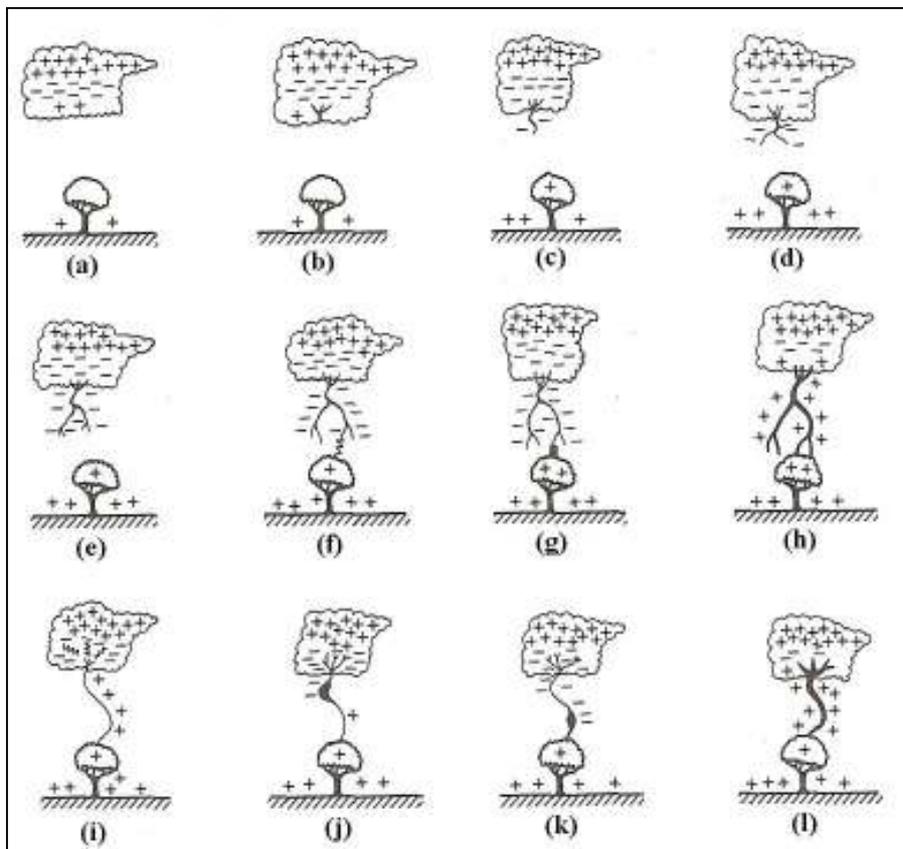


Figura 2.8 – Etapas do desenvolvimento de um relâmpago nuvem-solo negativo:
 (a) a (f) formação do líder escalonado, (g) e (h) primeira descarga de retorno,
 (i) a (k) formação do líder contínuo e (l) segunda descarga de retorno.

FONTE: Wallace & Hobbs (c1977, p.206)

Acredita-se que o líder escalonado inicie por uma ruptura preliminar da rigidez dielétrica do ar entre a pequena bolsa de cargas positivas na base e a região inferior carregada negativamente da nuvem de tempestade. Essa descarga local libera elétrons que neutralizam as cargas positivas e, em seguida, ramifica-se tortuosamente em direção ao solo, em busca de regiões com melhor condutividade elétrica. Como o líder escalonado está carregado

negativamente, ao aproximar-se do solo, induz o aparecimento de cargas positivas especialmente sobre objetos pontiagudos e irregularidades na superfície. A algumas dezenas de metros de distância, uma descarga ascendente, denominada descarga conectante, move-se do solo para encontrar o líder escalonado. Após o contato, um grande número de elétrons flui para o solo e uma descarga altamente luminosa e visível propaga-se para cima, de forma contínua, do solo para a nuvem, ao longo da trajetória seguida pelo líder escalonado. Esse fluxo de elétrons, chamado de descarga de retorno, é responsável pelo canal brilhante de luz que é observado como relâmpago. Apesar do fluxo descendente de elétrons, ambos, descarga de retorno e solo, permanecem carregados positivamente, em resposta ao restante de carga negativa na região inferior da nuvem. Seguintes à primeira descarga, que carrega a maior parte da corrente, subseqüentes descargas podem ocorrer ao longo do canal principal, caso elétrons adicionais forem depositados no seu topo. Um líder carregado negativamente, chamado de líder contínuo, move-se, então, continuamente em direção à terra através do canal residual e deposita mais elétrons no solo. O líder contínuo é seguido por outra descarga de retorno normalmente não tão brilhante quanto a primeira, nem tão ramificada.

Os *relâmpagos nuvem-solo positivos* seguem geralmente as mesmas etapas descritas para os negativos, salvo algumas diferenças. Iniciam-se a partir de um líder menos luminoso que se propaga de uma região de cargas positivas dentro da nuvem, não apresentando os mesmos passos distintos registrados nos líderes dos relâmpagos negativos e sim uma luminosidade contínua com variações periódicas de intensidade. Normalmente, os relâmpagos positivos costumam apresentar apenas uma descarga de retorno que transfere ao solo uma quantidade de carga maior quando comparada àquela de um relâmpago negativo. É este fato que os torna mais destrutivos e, portanto, responsáveis pela maioria dos incêndios em florestas (Gin, 1992; Pinto Jr. & Pinto, 2000).

2.4 SISTEMA DE DETECÇÃO DE DESCARGAS ELÉTRICAS ATMOSFÉRICAS

Recentemente, o interesse em estudar os complexos processos físicos associados às descargas eléctricas atmosféricas tem crescido por parte de diversas comunidades científicas e tecnológicas em todo o mundo, devido à instalação de sistemas de localização de tempestades, cobrindo grandes áreas continentais, que possibilitam conhecer características físicas, geográficas e sazonais dos relâmpagos.

No Brasil, em 1998, um convênio de cooperação técnico-científica, firmado entre COPEL – Companhia Paranaense de Energia através do SIMEPAR – Sistema Meteorológico do Paraná, CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais e FURNAS – Furnas Centrais Elétricas S.A., tornou possível a integração dos sistemas de detecção de descargas atmosféricas operados por estas empresas, formando a RIDAT – Rede Integrada de Detecção de Descargas Atmosféricas no Brasil. Em 2003, com a inclusão do INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, a rede passou a ser chamada RINDAT – Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (Beneti *et al*, 2000).

Além de os dados dos sensores serem compartilhados entre as centrais de processamento da RINDAT, localizadas em Curitiba/PR, Rio de Janeiro/RJ e Belo Horizonte/MG, estendendo a área de monitoramento e, conseqüentemente, melhorando a eficiência e a acurácia na detecção da informação de localização das descargas atmosféricas, o intercâmbio de informações técnico-científicas e a integração dos procedimentos de análise, manutenção e operação conjunta são também objetivos principais da rede (Beneti *et al*, 2000). A Figura 2.9 apresenta a localização dos sensores atualmente instalados no Brasil, integrados e operados pela RINDAT.



Figura 2.9 – Localização dos sensores de detecção de descargas atmosféricas da RINDAT.
FONTE: RINDAT (2004)

A detecção de relâmpagos no solo é feita a partir de um conjunto de antenas receptoras com a finalidade de localizar e determinar as características das descargas de retorno de uma

dada região. Diversos parâmetros podem ser obtidos das suas medidas, dentre eles, polaridade, intensidade de corrente de pico, latitude, longitude, data e horário. Conforme pode ser observado na Tabela 2.1, dois tipos básicos de sensores são utilizados na rede de detecção de descargas atmosféricas da RINDAT: LPATS série III (SIMEPAR e CEMIG) e série IV (FURNAS) e IMPACT (CEMIG, FURNAS e INPE). Diferenças entre ambos estão, principalmente, na forma de processamento da localização das descargas e no número mínimo de sensores para sua identificação.

Tabela 2.1 – Lista de sensores de detecção de descargas atmosféricas da RINDAT no Brasil.

| Cidade | UF | Empresa | Sensor |
|---------------------|-----------|----------------|---------------|
| Belo Horizonte | MG | CEMIG | LPATS III |
| Brasília | DF | FURNAS | IMPACT |
| Cachoeira Paulista | SP | INPE | IMPACT |
| Campo Grande | MS | INPE | IMPACT |
| Capitão Enéas | MG | CEMIG | LPATS III |
| Chavantes | PR | SIMEPAR | LPATS III |
| Curitiba | PR | SIMEPAR | LPATS III |
| Emborcação | MG | CEMIG | LPATS III |
| Foz do Areia | PR | SIMEPAR | LPATS III |
| Foz do Iguaçu | PR | SIMEPAR | LPATS III |
| Ibiúna | SP | FURNAS | LPATS IV |
| Ipatinga | MG | CEMIG | LPATS III |
| Jupia | SP | FURNAS | LPATS IV |
| Lavras | MG | CEMIG | LPATS III |
| Manoel Ribas | PR | FURNAS | IMPACT |
| Paranaguá | PR | SIMEPAR | LPATS III |
| Paranavaí | PR | SIMEPAR | LPATS III |
| Pirassununga | SP | INPE | IMPACT |
| Rio de Janeiro | RJ | FURNAS | LPATS IV |
| Rio Verde | GO | FURNAS | LPATS IV |
| São José dos campos | SP | INPE | IMPACT |
| Serra da Mesa | GO | FURNAS | LPATS IV |
| Três Marias | MG | CEMIG | IMPACT |
| Vitória | ES | FURNAS | LPATS IV |
| Volta Grande | MG | CEMIG | IMPACT |

FONTE: Adaptada de RINDAT (2004)

Os sensores *Lightning Positioning and Tracking System* – LPATS utilizam o Método de Detecção TOA (*Time of Arrival*) que consiste em calcular a diferença temporal relativa entre os horários de chegada de uma descarga de retorno registrados em, no mínimo, três sensores, a fim de definir com precisão a localização do evento (Faria, 2002; Gomes, 2002; Naccarato, 2001). Ao longo dos anos, os sensores LPATS sofreram inúmeros

aperfeiçoamentos tecnológicos, dando origem a diferentes séries de produtos, entre elas, as séries III e IV. O método TOA de detecção, contudo, permaneceu inalterado (Naccarato, 2001).

Os sensores *Improved Accuracy from Combined Technology* – IMPACT combinam o Método Magnético de Localização de Direção (MDF) e o Método TOA para alcançar maior precisão de localização e eficiência. 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 (Faria, 2002; Naccarato, 2001).

Os sinais dos sensores são transmitidos através de um canal de comunicação dedicado para as três centrais de processamento da RINDAT, onde são processados e distribuídos para unidades de visualização e armazenamento de dados. A qualidade dos resultados obtidos em termos de eficiência e precisão na detecção e localização das descargas atmosféricas é determinada por um grande número de fatores, incluindo a eficiência individual de cada sensor (ligada ao nível de ruído e ganho, por exemplo), o número médio de sensores que contribuem para a localização das descargas, a distância entre os sensores e as características das descargas (principalmente a intensidade) (Beneti *et al*, 2000; Pinto Jr., 2005). Dependendo desses fatores, a eficiência na detecção pode variar grandemente. Segundo Pinto Jr. (2005), em 2004, valores máximos de eficiência de detecção da RINDAT acima de 90%, bem como mínimos erros de localização das descargas elétricas, em torno de 0,5 km, com base no modelo fornecido pela empresa Vaisala, atual fabricante deste tipo de sistema de detecção de descargas atmosféricas, foram encontrados na região do Vale do Paraíba (SP) e suas vizinhanças, onde estão instalados os sensores mais próximos entre si (100 km). Tais características resultaram da comparação dos valores obtidos pelos modelos fornecidos pela Vaisala e por modelos e observações feitas pelo INPE, utilizando outras técnicas de medidas de descargas atmosféricas: câmeras de alta resolução, descargas artificiais induzidas pela técnica de foguetes e fios condutores e sensores óticos a bordo de satélites.

Neste trabalho, todos os dados foram obtidos dos sensores LPATS IV e IMPACT, a partir da central de processamento de FURNAS Centrais Elétricas S.A..

2.5 DESCARGAS ELÉTRICAS ATMOSFÉRICAS

2.5.1 Descrição dos Dados

Foram cedidos por FURNAS Centrais Elétricas S. A., dados reais de descargas elétricas atmosféricas do período de março de 2002 a fevereiro de 2004, para a região compreendida entre as seguintes coordenadas geográficas: longitude (44° e 36° O) e latitude (20° e 26° S), abrangendo Estado do Rio de Janeiro, sul do Estado do Espírito Santo, sudeste do Estado de Minas Gerais e Oceano Atlântico, conforme indicação na Figura 2.10. Cabe ressaltar que a extensão de mar presente na área de estudo citada concentra importantes reservas petrolíferas do Brasil, que respondem por mais de 80% da produção nacional de gás e petróleo, e diversas plataformas de navios e aeronaves, que para sua operação dependem muito das condições meteorológicas e oceanográficas. Torna-se, portanto, estratégico conhecer a ocorrência de tempestades com descargas elétricas atmosféricas nesta região.

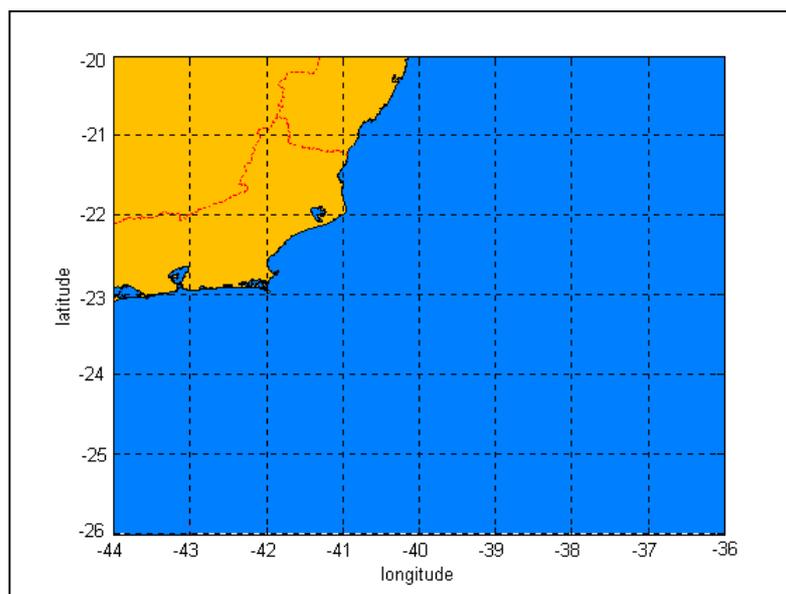


Figura 2.10 – Região de estudo dos dados de descargas elétricas atmosféricas.

Ano, mês, dia, hora, minuto, segundo, latitude e longitude da posição calculada (em graus decimais) e indicador da nuvem (sendo arbitrado, segundo referências do conjunto de dados, 1 para descargas intranuvem e 0 para descargas nuvem-solo) foram as principais características de descargas elétricas atmosféricas analisadas. Visando ao objetivo de estudar a viabilidade de desenvolver um previsor de descargas elétricas, uma vez que não foram encontradas referências de outros autores mencionando parâmetros representativos e ideais

para este propósito, buscou-se selecionar, primariamente, medidas horárias e de posição das descargas de retorno, importando apenas, neste estudo, quando da ocorrência ou não de relâmpagos nuvem-solo, conforme será discutido nas próximas subseções.

2.5.2 Metodologia para Análise dos Dados

Primeiramente, a partir de programas desenvolvidos em ambiente MATLAB, foram selecionados somente os dias com descargas elétricas atmosféricas do tipo nuvem-solo para cada ano e mês. De acordo com o parâmetro indicador da nuvem do conjunto de dados recebido, todas as descargas detectadas são do tipo nuvem-solo. Entretanto, em vários estudos realizados com dados de sistemas de detecção de relâmpagos a partir de suas descargas de retorno foi verificado que relâmpagos nuvem-solo positivos com baixa intensidade de corrente (<15 kA) podem ser detecções falsas de relâmpagos do tipo intranuvem; o mesmo não acontecendo para os relâmpagos nuvem-solo negativos (Faria, 1998; Faria, 2002; Gomes, 2002; Mendes Jr. *et al*, 1998; Pinto *et al*, 1999; Pinto Jr. *et al*, 1999; Zajac & Rutledge, 2001). Portanto, as descargas nuvem-solo positivas com corrente de pico menor que 15 kA foram aqui eliminadas.

Apesar do período estudado compreender 24 meses, os anos não estão completos de modo a serem tratados distintamente. A fim de facilitar a compreensão e a comparação dos gráficos analisados a seguir, definiu-se como ANO 1 o período de março de 2002 a fevereiro de 2003 e, como ANO 2 o período de março de 2003 a fevereiro de 2004.

Assis (1991) e Assis (1994), testando modelos para descrever a ocorrência de chuva com vistas ao planejamento das atividades dela dependentes, definiram, em sua metodologia, como seqüência (x) de dias sem chuva o número de dias consecutivos sem chuva precedido e seguido por um ou mais dias chuvosos e, de maneira análoga, assim o fizeram para uma seqüência de dias com chuva. Considerando ser produzida por uma ou mais nuvens cumulonimbus ou nuvens de tempestade e caracterizada por relâmpagos e trovões, definiu-se, por semelhança, tempestade como o período de dias consecutivos com descargas elétricas atmosféricas precedido e seguido por um ou mais dias sem descargas. Analogamente, pôde ser definido o período com ausência de tempestade.

A partir da construção de gráficos diários e horários para o período analisado, foi possível identificar diversos casos de tempestades, bem como, classificá-los, quanto a sua severidade, em diferentes níveis de ocorrência, segundo os valores mínimo e máximo de descargas elétricas observados durante uma hora no conjunto total. Tendo sido estabelecidos os limites extremos inferior e superior, respectivamente, de 100 e 4.500 descargas por hora, de acordo com os valores horários de descargas elétricas encontrados para cada tempestade identificada, quatro níveis de tempestades permitiram ser definidos: nível 1, para tempestades com 3.000 a 4.500 descargas por hora; nível 2, para tempestades com 2.000 a 3.000 descargas por hora; nível 3, para tempestades com 1.000 a 2.000 descargas por hora e nível 4, para tempestades com 100 a 1.000 descargas por hora. Seqüências de dias com menos de 100 descargas por hora foram desconsiderados neste estudo, salvo aquelas que compunham tempestades dos níveis citados.

A seguir, serão apresentadas as distribuições anual e mensal das descargas elétricas atmosféricas, bem como, das tempestades segundo seus níveis de classificação. Ainda será discutida, a partir de exemplos, a frequência de ocorrência de tempestades em terra, no mar e no litoral dos dados aqui analisados.

2.5.3 Análise dos Dados

A distribuição anual das descargas elétricas atmosféricas nuvem-solo para período e região citados anteriormente está apresentada na Figura 2.11. Foram registradas, no total, 976.989 descargas elétricas entre março de 2002 e fevereiro de 2004, sendo 525.106, no ANO 1, e 451.883, no ANO 2. Observa-se a ocorrência de 73.223 descargas elétricas a mais no primeiro ano, um aumento de aproximadamente 14%.

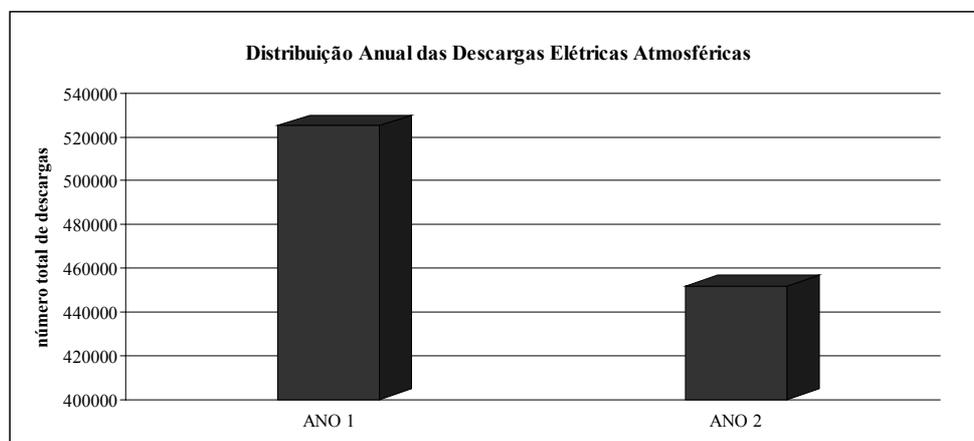


Figura 2.11 – Distribuição anual das descargas elétricas atmosféricas.

As Figuras 2.12 e 2.13, respectivamente, ilustram a atividade elétrica mensal para os ANOS 1 e 2. Os gráficos, a princípio, parecem concordar em relação ao comportamento das descargas elétricas atmosféricas ao longo dos meses, haja visto a semelhança de seus formatos. Entretanto, percebe-se uma diferenciação na incidência das descargas elétricas nos três últimos meses de ambas as figuras. Analisando estas diferenças a partir da Figura 2.12, o mês de dezembro de 2002 foi aquele da série que apresentou maior atividade elétrica, 134.127 descargas, enquanto que fevereiro de 2003 bruscamente registrou 105.023 descargas a menos do que janeiro e 91.725 a menos do que fevereiro do ano seguinte, uma diminuição quantitativa de 86% e 84%, respectivamente. Na Figura 2.13, a ocorrência de descargas elétricas atmosféricas para os meses de dezembro de 2003 e janeiro de 2004 praticamente caiu pela metade em relação ao ano anterior, visto as 73.377 e 55.756 descargas registradas, respectivamente. Fevereiro de 2004, contudo, destacou-se, no ANO 2, pela maior ocorrência de 108.716 descargas elétricas.

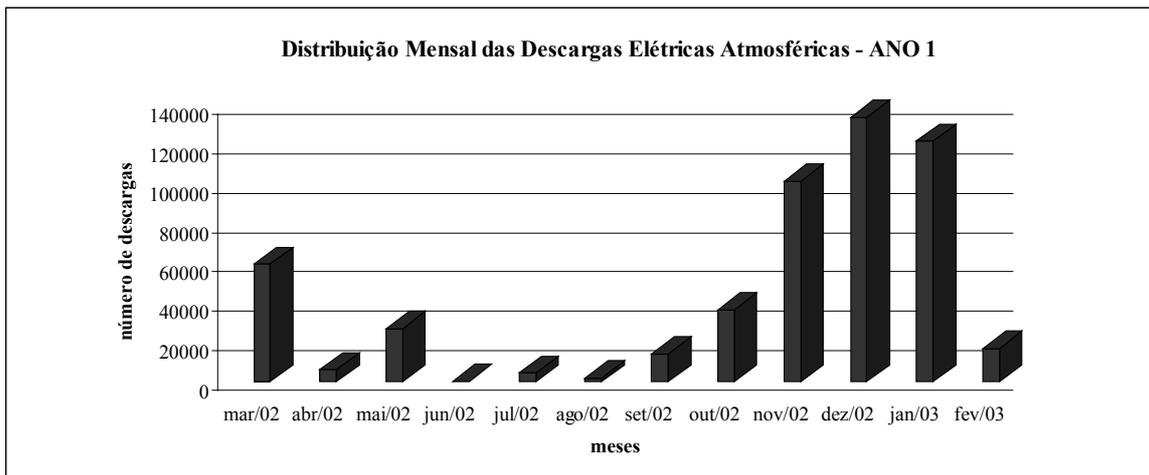


Figura 2.12 – Distribuição mensal das descargas elétricas atmosféricas para o ANO 1.

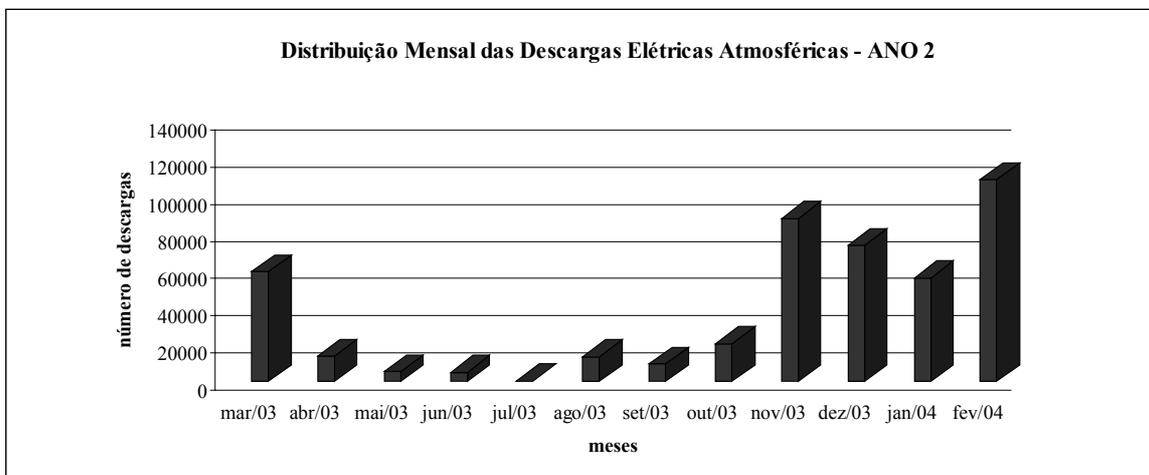


Figura 2.13 – Distribuição mensal das descargas elétricas atmosféricas para o ANO 2.

Junho de 2002 e julho de 2003 foram os meses de mínima atividade elétrica em ambos os gráficos, apresentando os respectivos totais de 253 e 245 descargas. Maio e agosto tiveram comportamentos antagônicos nos anos de 2002 e 2003. O primeiro, no ANO 1, com 27.048 descargas elétricas, registrou, no ANO 2, somente 5.267 descargas, um decréscimo em quantidade de 80%; o segundo, por sua vez, de 1.977 descargas no ANO 1, apresentou um total de 13.161 descargas elétricas atmosféricas no ano seguinte, um aumento significativo de 85%. Os resultados mensais, de um modo geral, revelaram um maior número de relâmpagos nuvem-solo no final da primavera e início do verão, fato este já esperado e podendo ser associado ao forte aumento da atividade convectiva sobre o continente durante este período do ano em resposta ao ciclo diurno da insolação (Bourscheidt *et al*, 2003; Gin & Guedes, 2000; Pinto Jr. *et al*, 2003a).

Nas Figuras 2.14, para o ANO 1, e 2.15, para o ANO 2, pode-se observar a distribuição do número de tempestades quanto aos níveis de severidade definidos anteriormente. Em ambos os casos, as tempestades de nível 4, com 100 a 1.000 descargas elétricas por hora, foram predominantes, somando ao todo cento e quarenta e um eventos e representando do total 67% das tempestades identificadas no ANO 1 e 70% no ANO 2. No nível 3, puderam ser classificadas dezesseis tempestades no ANO 1 e vinte e duas no ANO 2. O número de tempestades com 2.000 a 3.000 descargas por hora no nível 2 diminuiu pela metade no segundo ano, totalizando seis eventos. Durante o ANO 1, seis tempestades de nível 1, com 3.000 a 4.500 descargas elétricas por hora, ocorreram, enquanto que, no ANO 2, apenas três.

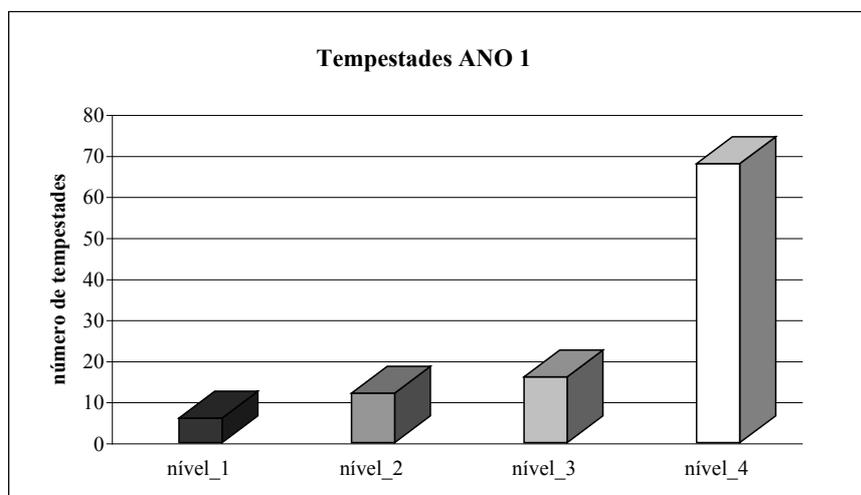


Figura 2.14 – Distribuição das tempestades em níveis de severidade para o ANO 1.

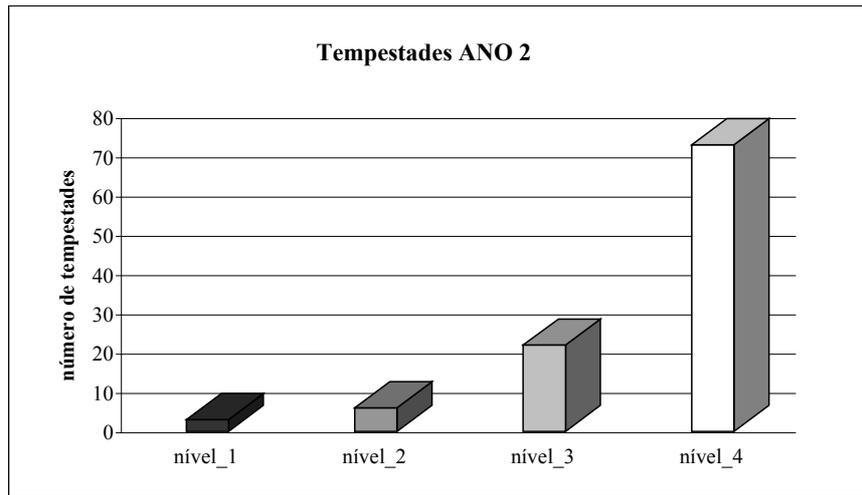


Figura 2.15 – Distribuição das tempestades em níveis de severidade para o ANO 2.

A distribuição mensal dos quatro níveis de tempestades está ilustrada nas Figuras 2.16 e 2.17. Praticamente, em todos os meses dos dois anos, houve, pelo menos, a ocorrência de uma categoria de tempestade. Salienta-se que, apesar de descargas elétricas atmosféricas terem sido registradas nos meses de junho de 2002 no ANO 1 e julho de 2003 no ANO 2, estas não satisfizeram aos critérios estabelecidos para a classificação das tempestades. As tempestades nível 4 foram as mais frequentes ao longo dos meses totalizando quatorze casos em março de 2002 e apenas um em julho de 2002 durante o ANO 1. No ANO 2, dezoito destas tempestades ocorreram em dezembro de 2003. Somente nos meses de primavera e verão dos dois anos estudados, observou-se a incidência de tempestades níveis 1 e 2.

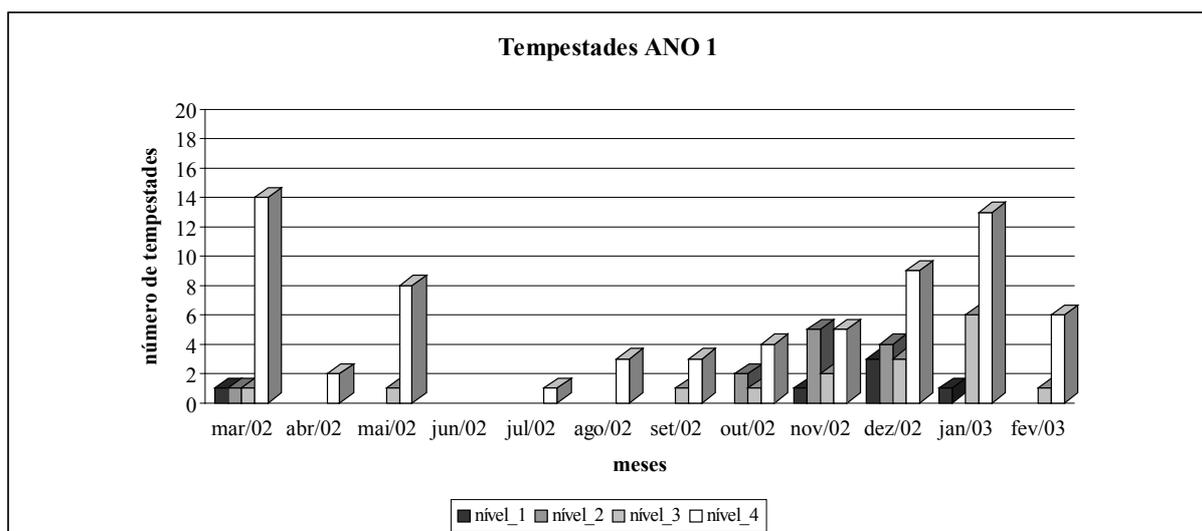


Figura 2.16 – Distribuição mensal dos quatro níveis de tempestades para o ANO 1.

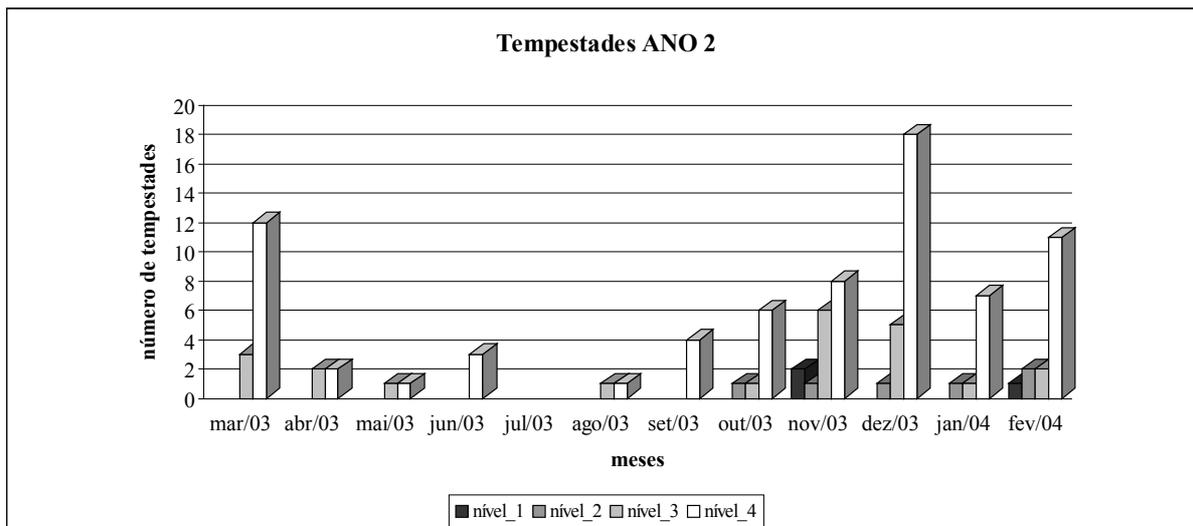


Figura 2.17 – Distribuição mensal dos quatro níveis de tempestades para o ANO 2.

De acordo com a Figura 2.16, novembro de 2002 apresentou o maior número de tempestades nível 2, cinco eventos, enquanto que dezembro de 2002 registrou três tempestades nível 1, destaque nesta categoria, e quatro nível 2. Já no gráfico do ANO 2, percebe-se a ocorrência de tempestades classificadas como nível 3 em todos os meses, exceto em junho, julho e setembro de 2003. Somente um caso de tempestade nível 2 foi registrado por mês durante outubro de 2003 a janeiro de 2004. O mês seguinte, fevereiro, encerrou o ANO 2 com dois eventos. Apenas novembro de 2003 e fevereiro de 2004 apresentaram tempestades nível 1, dois e um casos, respectivamente.

As Figuras 2.18 e 2.19 apresentam a distribuição mensal das descargas elétricas atmosféricas nos quatro níveis de tempestades para os ANOS 1 e 2.

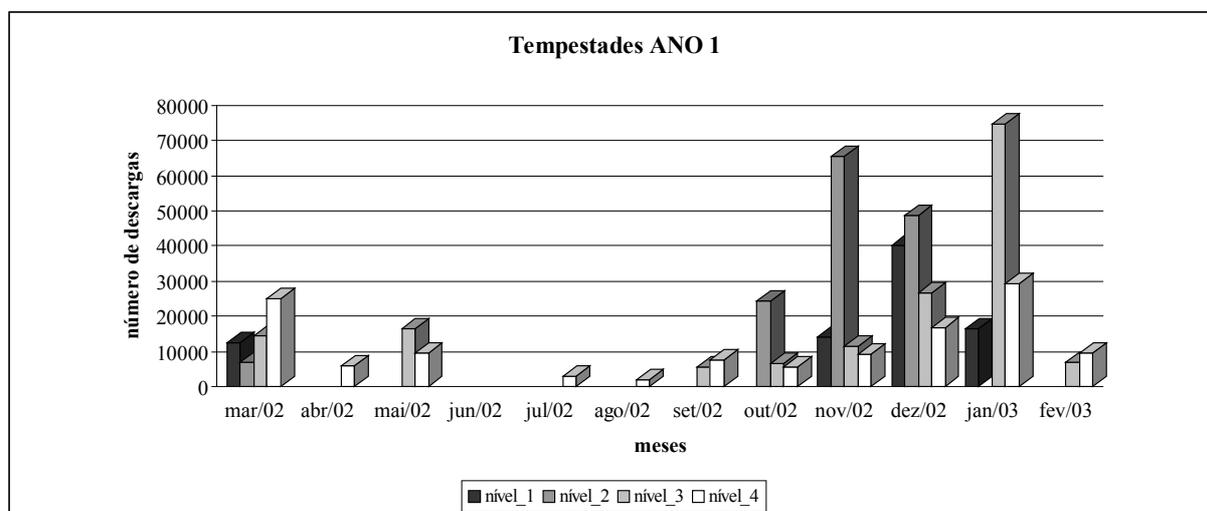


Figura 2.18 – Distribuição mensal das descargas elétricas atmosféricas nos quatro níveis de tempestades para o ANO 1.

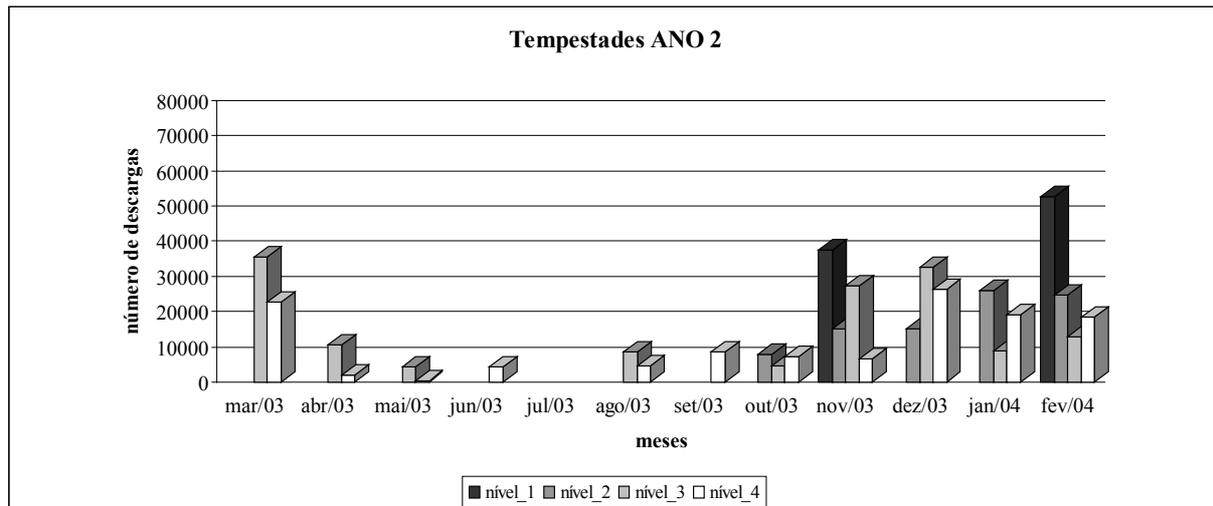


Figura 2.19 – Distribuição mensal das descargas elétricas atmosféricas nos quatro níveis de tempestades para o ANO 2.

No gráfico referente ao ANO 1, observa-se que as tempestades níveis 1 e 2 concentram a maior quantidade de descargas elétricas, apesar de suas frequências de ocorrência serem menores comparadas àquelas dos níveis 3 e 4. A exemplo disso, tem-se que quatorze casos nível 4 ocorridos em março de 2002 resultaram em 24.864 relâmpagos e apenas duas tempestades nível 2 em outubro de 2002 chegaram a 24.304 descargas. O mês de dezembro de 2002, contemplado com as quatro categorias de tempestades, registrou um total de 40.153 descargas atmosféricas em três tempestades nível 1, enquanto que nove casos nível 4 somaram somente 16.951. Janeiro de 2003, em todos seus vinte eventos de tempestades, totalizou 120.543 descargas, sendo que destas, 62% em seis tempestades nível 3. Analisando a Figura 2.19, os meses de novembro de 2003 e fevereiro de 2004 apresentaram ocorrências de tempestades em todos os quatro níveis, perfazendo para o ANO 2 os maiores totais mensais de, respectivamente, 86.648 e 108.360 descargas elétricas atmosféricas, equivalentes a 44% do somatório anual de descargas registradas. É possível observar também que dezoito eventos de tempestades nível 4 em dezembro de 2003 apresentaram 26.432 descargas elétricas e apenas duas tempestades nível 2 contaram com 25.940 descargas. Fevereiro de 2004, do conjunto de dois anos estudados, foi o único mês a totalizar o maior número de descargas em apenas um caso de tempestade nível 1, 52.791.

Todas as tempestades definidas a partir do conjunto de dados analisado puderam ainda ser classificadas, quanto à região de ocorrência das descargas elétricas atmosféricas, em terra, mar ou litoral. Conforme pode ser visto na Figura 2.20, as descargas concentraram-se

principalmente sobre o continente e somente uma parcela reduzida delas, sobre o litoral e o Oceano Atlântico. Em média, para todo o período estudado, 69% dos dados de descargas nuvem-solo detectados pelos sensores de FURNAS Centrais Eléctricas S. A. ocorreram em terra, 13%, no mar e 18%, no litoral. Conseqüentemente, segundo a Figura 2.21, de um total de duzentas e seis tempestades para os ANOS 1 e 2, cento e cinquenta casos foram identificados sobre o continente, vinte e sete, no mar e vinte e nove, na faixa costeira delimitada por terra e mar considerada como o litoral.

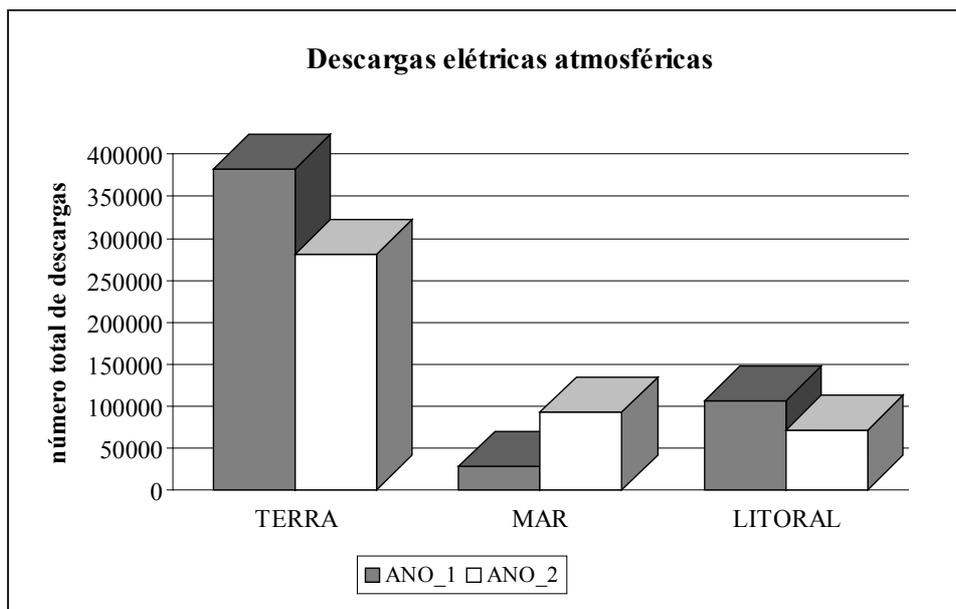


Figura 2.20 – Distribuição das descargas eléctricas atmosféricas em terra, mar e litoral.

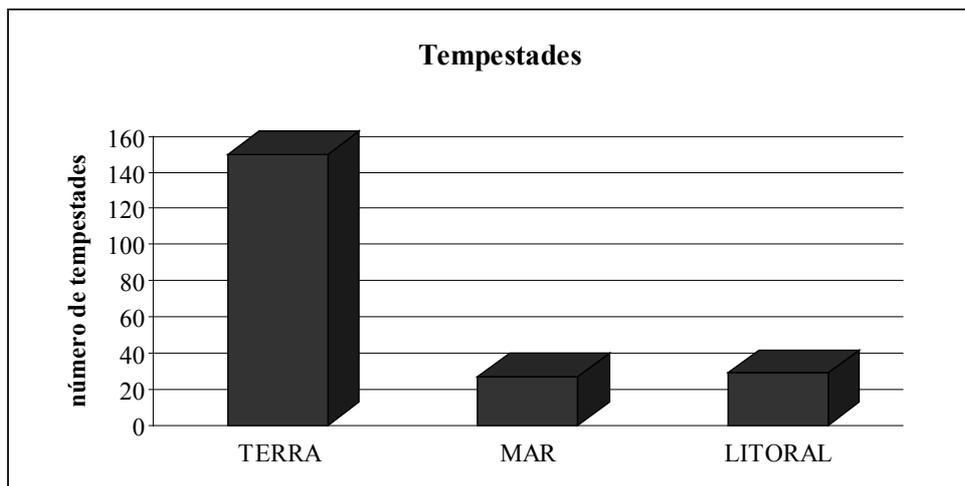


Figura 2.21 – Classificação das tempestades em terra, mar e litoral.

Bourscheidt *et al* (2003), analisando dados do sensor de relâmpagos por imageamento LIS (*Lightning Imaging Sensor*) da região abrangendo territórios do Brasil, Argentina, Uruguai, Paraguai e Bolívia para os anos de 1998 a 2002, encontraram também em seu estudo

maior incidência de descargas elétricas sobre a terra. Tal constatação foi atribuída ao fato de o oceano, além de ter mais estabilidade térmica (maior capacidade calorífica), não possuir elevações (extremidades/pontas) que poderiam facilitar a formação de tempestades e, ao mesmo tempo, diminuir a resistência dielétrica do ar, tornando possível a descarga.

As seqüências das Figuras 2.22, 2.23 e 2.24 ilustram, respectivamente, um exemplo de tempestade sobre terra, mar e litoral, a partir da visualização da distribuição espacial das descargas durante o intervalo de tempo em que foi verificada maior atividade elétrica.

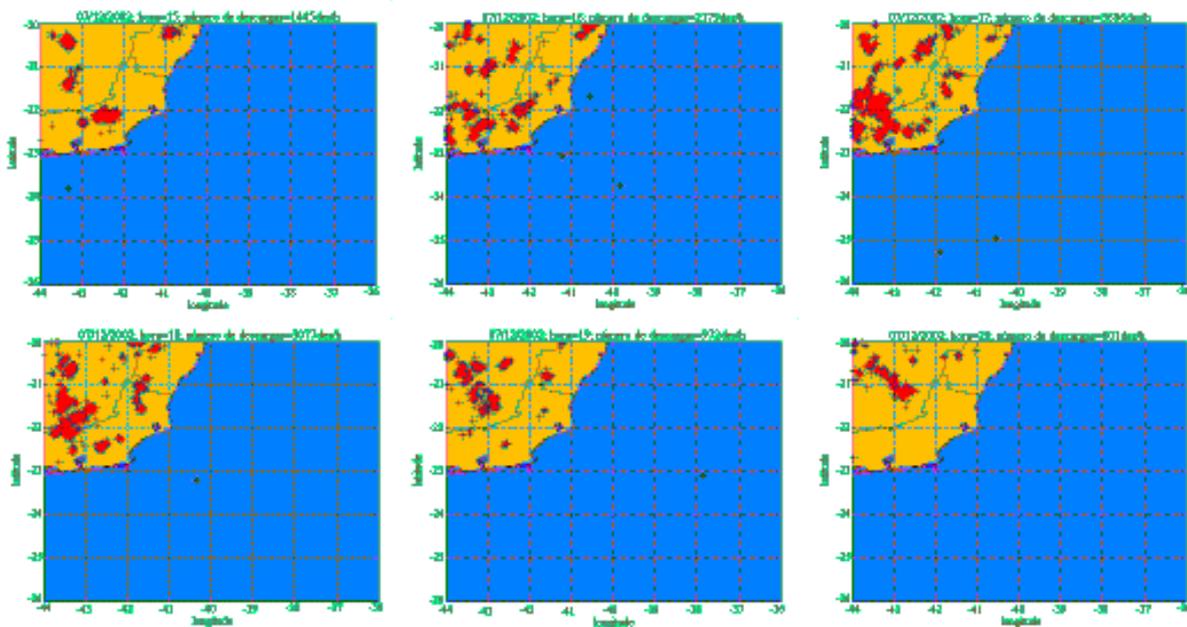


Figura 2.22 – Tempestade nível 1 ocorrida em 07/12/2002 sobre o continente.

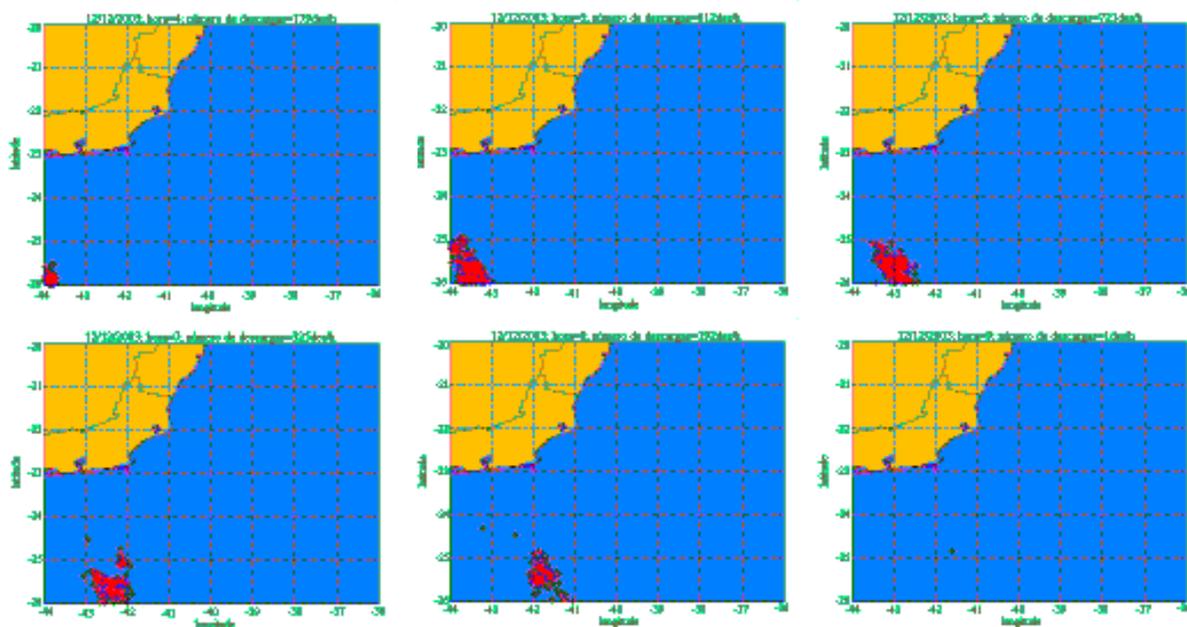


Figura 2.23 – Tempestade nível 4 ocorrida em 12/12/2003 sobre o mar.

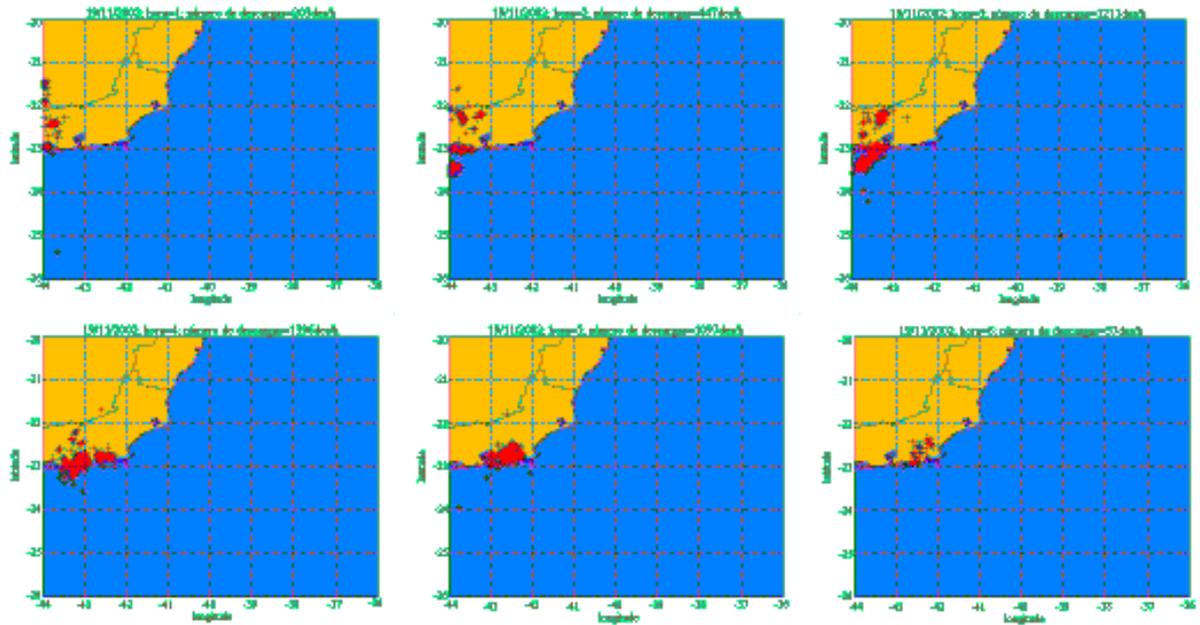


Figura 2.24 – Tempestade nível 2 ocorrida em 19/11/2002 no litoral.

CAPÍTULO 3

MODELO DE MESOESCALA MM5

3.1 INTRODUÇÃO

O sucesso da modelagem numérica acoplado ao rápido crescimento do poder computacional tem conduzido ao avanço dos modelos de mesoescala no ambiente operacional das previsões de tempo. Usufruir, ao máximo, dos benefícios proporcionados por estes sistemas implica dominar técnicas capazes de processar e analisar a quantidade excessiva de informações provenientes das saídas numéricas. Apesar do conhecimento empírico da performance dos modelos, sob determinados cenários de tempo, constituir-se em componente importante na avaliação das previsões de mesoescala, o entendimento da física básica da modelagem e dos seus esquemas de parametrização tornou-se hoje, em relação ao passado, elemento indispensável (Cortinas Jr. & Stensrud, 1995).

Ainda que dependentes da física parametrizada e das configurações de processamento que incorporam, os modelos numéricos de mesoescala representam uma ferramenta meteorológica bastante precisa no prognóstico do tempo e do clima. Menezes (1998), citado por Lima & Menezes (2004), comenta que, em termos de modelagem numérica, para se obter resultados satisfatórios quanto à previsibilidade de uma tempestade em si, caracterizada por dimensões espacial e temporal muito reduzidas, faz-se necessários dados de entrada de alta qualidade e com altas resoluções temporal e espacial, assim como, alta resolução da grade do modelo, em torno de 1 km, o que é bastante viável em estudos de casos puramente com objetivos de pesquisa. Contudo, a deficiência de redes observacionais e o acréscimo de tempo computacional, tornam tais requisitos, muitas vezes, impraticáveis, de modo que as adversidades de natureza localizada, resultantes de manifestações atmosféricas atípicas, desafiam a possibilidade de prover uma previsão de tempo detalhada, com antecedência suficiente capaz de permitir a tomada de medidas preventivas contra a ocorrência de eventuais danos econômicos e sociais.

O sistema de modelagem numérica MM5, desenvolvido na *Pennsylvania State University* (PSU) em conjunto com o *National Center Atmospheric Research* (NCAR), foi

implementado com vistas à proposta de poder ser usado em um amplo espectro de estudos meteorológicos teóricos e em tempo real. Programas, que permitem realizar análises e interpretações gráficas dos resultados de suas simulações preditivas, possibilitam o acompanhamento e a avaliação de diversos fenômenos como monções, furacões e ciclones e até mesmo estudos envolvendo sistemas convectivos de mesoescala, frentes, brisas marítima e terrestre, circulações de vale-montanha e ilhas urbanas de calor.

O *Pennsylvania State University – National Center for Atmospheric Research (PSU – NCAR) fifth-generation Mesoscale Model (MM5)* (Dudhia *et al*, 2002) é um simulador de domínio público, construído para simulação e previsão da circulação atmosférica de escala regional ou mesoescala, que tem sua utilização e aquisição totalmente gratuitas, sendo melhorado continuamente por contribuições de usuários em diversas universidades e centros de pesquisa governamentais em todo o mundo. O MM5 foi posto em operação por técnicos do Núcleo de Matemática Aplicada da FURG (NuMA – FURG), local onde a presente dissertação foi desenvolvida.

Modelo de área limitada, não-hidrostático, utiliza a coordenada vertical sigma para o contorno do terreno e apresenta seu código numérico dividido em módulos, o que facilita o desenvolvimento computacional (Cox *et al*, 1998; Moraes *et al*, 2004; Oliveira & Menezes, 2004; Silva *et al*, 2002; Yamazaki *et al*, 2004). Dentre suas características, cita-se a possibilidade de múltiplos aninhamentos de grade e a assimilação quadridimensional de dados (“*nudging*”). Inúmeras opções de parametrizações físicas são também oferecidas aos usuários. O MM5 é um modelo de equações primitivas em coordenadas (x, y, σ) finitamente diferenciadas usando a grade tipo B de Arakawa (Cox *et al*, 1998; Dudhia, 1993). Alguns de seus termos são integrados no tempo por um esquema “*leapfrog*” de segunda ordem, enquanto que os restantes, por um esquema “*time-splitting*” (Dudhia *et al*, 2002).

As variáveis em três dimensões prognosticadas pelo modelo MM5 são: vento zonal, vento meridional, temperatura, razão de mistura de vapor d’água, razão de mistura de água em nuvem, razão de mistura de precipitação, razão de mistura degelo, razão de mistura de neve, granizo, número de concentração de gelo, energia cinética turbulenta, tendência de radiação atmosférica, velocidade vertical e perturbação de pressão. As variáveis com duas dimensões, por sua vez, são: pressão na superfície, temperatura do solo, precipitação convectiva acumulada, precipitação não-convectiva acumulada, altura da camada limite planetária, regime da camada limite planetária, fluxos de calor sensível e latente na superfície, velocidade

friccional, radiação de onda curta e de onda longa em direção à superfície, temperatura e umidade do solo em n níveis, *runoff* superficial, *runoff* subterrâneo, cobertura de neve, profundidade de neve, umidade do dossel vegetativo, radiação de onda curta e de onda longa no topo da atmosfera, temperatura do ar a 2 metros, razão de mistura de vapor d'água a 2 metros, vento zonal e meridional a 10 metros, comprimento de Monin-Obukov, radiação líquida em superfície, albedo da superfície, fluxo de calor no solo, resistência aerodinâmica, resistência da superfície, índice de área foliar, fração de vegetação, comprimento de rugosidade, tipo de textura do solo, fluxo de massa ascendente e camada fonte do fluxo em ascensão. As constantes bidimensionais prescritas a cada integração são: elevação do terreno, fator de escala do mapa, parâmetro de Coriolis, temperatura do reservatório térmico, latitude, longitude, uso do solo, temperatura da superfície do mar e cobertura oceânica de gelo (Dudhia *et al*, 2002).

As próximas seções abordarão em maiores detalhes as configurações escolhidas para o modelo de mesoescala MM5 responsável neste estudo pelas simulações numéricas do comportamento dinâmico da atmosfera. Na seção 3.2, as equações básicas do modelo serão apresentadas, assim como uma breve introdução do seu método de resolução numérica. A seção 3.3 mostrará a estrutura do código numérico do MM5 e as respectivas funções de cada módulo. Os dados de entrada e as condições de contorno utilizados na realização de simulações com o modelo serão descritos na seção 3.4. As opções definidas para as parametrizações físicas do modelo serão discutidas na seção 3.5. Na seção 3.6, serão apresentadas as características dos domínios de integração e, por fim, na seção 3.7, as variáveis meteorológicas escolhidas como representativas do fenômeno em análise.

3.2 EQUAÇÕES BÁSICAS

O sistema de modelagem MM5 usualmente recebe e analisa seus dados em níveis de pressão. Entretanto, antes destes tornarem-se condições iniciais do modelo, são interpolados verticalmente em níveis sigma (Dudhia *et al*, 2002). Próximo ao solo, as superfícies sigma seguem a configuração do terreno, enquanto que, na atmosfera superior, tendem a aproximar-se das superfícies isobáricas. A quantidade adimensional σ usada para definir os níveis verticais do modelo é expressa pela equação

$$\sigma = \frac{(p - p_t)}{(p_s - p_t)} = \frac{(p - p_t)}{p^*} \quad (3.1)$$

onde p é a pressão, p_t é a pressão constante no topo da atmosfera, p_s é a pressão em superfície e p^* é igual à diferença aritmética do campo bidimensional da pressão em superfície e da pressão constante no topo da atmosfera. Pode ser visto na Figura 3.1, que σ assume o valor zero no topo da atmosfera e a unidade na superfície terrestre. A resolução vertical do modelo é definida por uma seqüência de valores entre zero e um que não necessariamente têm de estar igualmente espaçados (Dudhia *et al*, 2002).

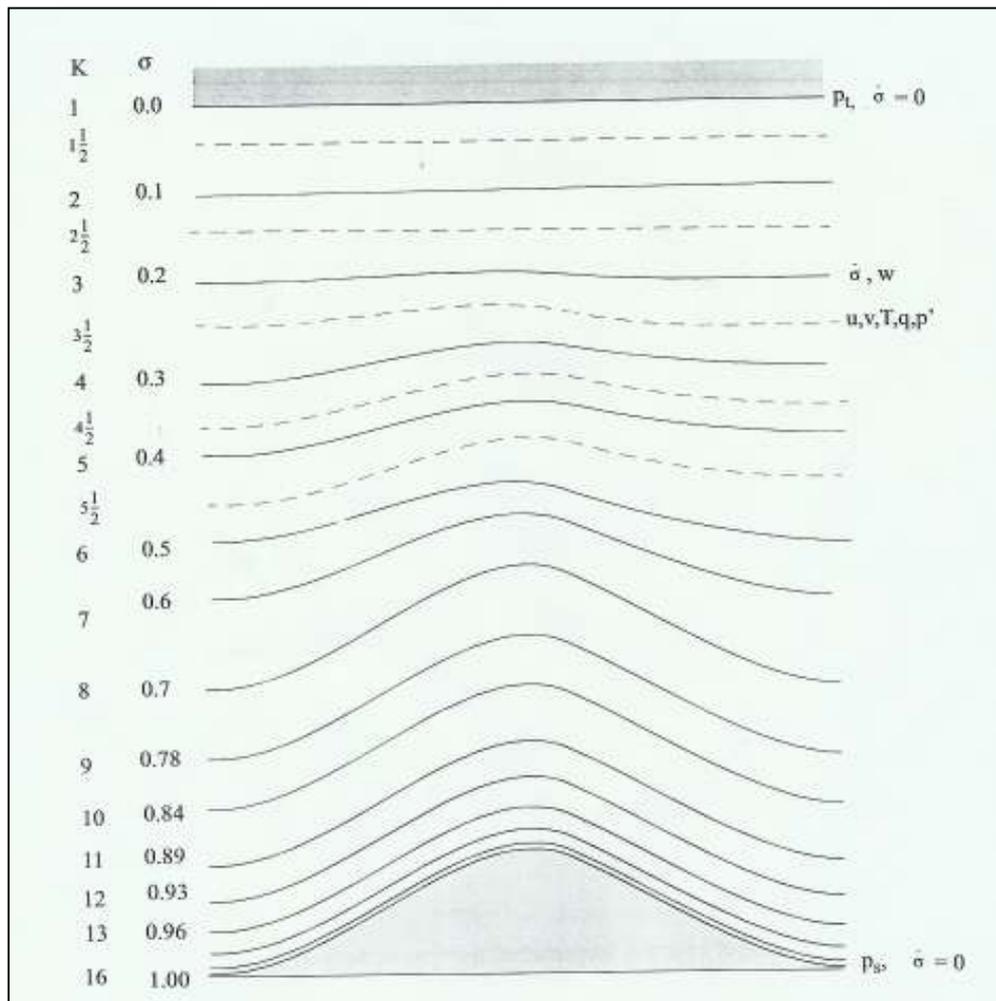


Figura 3.1 – Representação esquemática da estrutura vertical do modelo. O exemplo é para quinze camadas verticais. As linhas pontilhadas denotam níveis sigma intermediários e as sólidas, todos níveis sigma considerados.

FONTE: Dudhia *et al* (2002, p.1-6)

A versão não-hidrostática do modelo MM5 utiliza a pressão no *estado de referência* p_0 para estabelecer a coordenada σ . O estado de referência consiste em um perfil de temperatura idealizado em equilíbrio hidrostático (Dudhia *et al*, 2002). Segundo Dudhia (1993), em tal definição, o sistema p^* é constante no tempo e dependente apenas da altitude do terreno, de

modo que os níveis σ são também fixos no espaço e a altura de um determinado ponto na grade é constante. As alturas dos níveis σ no modelo são encontradas a partir de

$$p_0 = p^* \sigma + p_t \quad (3.2)$$

onde

$$p^* = p_0(\text{superfície}) - p_t. \quad (3.3)$$

A pressão em um ponto é dada por

$$p = p^* \sigma + p_t + p' = p_0 + p' \quad (3.4)$$

onde p' é uma quantidade prognosticada.

Para este estudo, os níveis verticais σ selecionados foram: 1.00, 0.99, 0.98, 0.96, 0.93, 0.89, 0.85, 0.8, 0.75, 0.7, 0.65, 0.6, 0.55, 0.5, 0.45, 0.4, 0.35, 0.3, 0.25, 0.2, 0.15, 0.1, 0.05 e 0.0.

As equações básicas do modelo não-hidrostático MM5, de acordo com Dudhia (1993) e Dudhia *et al* (2002), são escritas no sistema de coordenadas (x, y, σ) , com o subscrito 0 denotando o estado de referência. A equação da pressão é expressa por

$$\frac{\partial p'}{\partial t} - \rho_0 g w + \gamma p \nabla \cdot \vec{V} = -\vec{V} \cdot \nabla p' + \frac{\gamma p}{T} \left(\frac{\dot{Q}}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta \right) \quad (3.5)$$

onde p' representa a perturbação de pressão; ρ , a densidade; g , a aceleração devido à gravidade; w , a velocidade vertical; γ , a razão entre os calores específicos do ar à pressão constante e a volume constante; p , a pressão; \vec{V} , o vetor velocidade do ar; T , a temperatura; \dot{Q} , a quantidade de calor devido a processos diabáticos (i. e., calor latente e radiação); c_p , calor específico do ar à pressão constante; θ , a temperatura potencial; D_θ , os termos referentes aos vórtices turbulentos. No modelo, a equação 3.5 negligencia o último termo entre parênteses no lado direito da expressão, o qual representa um aumento na pressão devido à expansão do ar por aquecimento.

As equações das componentes x , y e z do momentum são mostradas, respectivamente, a seguir

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left(\frac{\partial p'}{\partial x} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right) = -\vec{V} \cdot \nabla u + v \left(f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) - ew \cos \alpha - \frac{uw}{r_{earth}} + D_u \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left(\frac{\partial p'}{\partial y} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right) = -\vec{V} \cdot \nabla v - u \left(f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) + e w \sin \alpha - \frac{vw}{r_{earth}} + D_v \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\rho_0}{\rho} \frac{g}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} + \frac{g p'}{\gamma p} = -\vec{V} \cdot \nabla w + g \frac{p_0}{p} \frac{T'}{T_0} - \frac{g R_d}{c_p} \frac{p'}{p} + e(u \cos \alpha - v \sin \alpha) + \frac{u^2 + v^2}{r_{earth}} + D_w \quad (3.8)$$

onde u e v são as velocidades horizontal e meridional do vento; f , o parâmetro de Coriolis; T' , a perturbação de temperatura; R_d , a constante do gás para o ar seco. As equações (3.6) a (3.8) incluem termos (eu e ew) representando a componente da força de Coriolis usualmente negligenciada, onde $e=2\Omega \cos \lambda$, Ω é a velocidade angular de rotação, $\alpha=\phi-\phi_c$, λ é a latitude, ϕ é a longitude e ϕ_c é a longitude central. Os termos $u(\partial m/\partial y)$, $v(\partial m/\partial x)$ e r_{earth} representam efeitos de curvatura e m , um fator de escala do mapa, o qual deve ser utilizado nas equações do modelo sempre que gradientes horizontais forem empregados.

A equação da termodinâmica é expressa por

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\vec{V} \cdot \nabla T + \frac{1}{\rho c_p} \left(\frac{\partial p'}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla p' - \rho_0 g w \right) + \frac{\dot{Q}}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta \quad (3.9)$$

Os termos advectivos podem ser expandidos, para qualquer variável A , como

$$\vec{V} \cdot \nabla A \equiv mu \frac{\partial A}{\partial x} + mv \frac{\partial A}{\partial y} + \dot{\sigma} \frac{\partial A}{\partial \sigma} \quad (3.10)$$

onde a “velocidade coordenada” usada para a advecção, $\dot{\sigma}$, está relacionada com as componentes da velocidade prognosticadas pelo modelo por

$$\dot{\sigma} = -\frac{\rho_0 g}{p^*} w - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} u - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} v. \quad (3.11)$$

As fronteiras superior e inferior são assumidas superfícies rígidas, logo, $\sigma=0$ é aplicado como condição de fronteira em $\sigma=0$ e $\sigma=1$. O termo divergente na equação 3.5 pode ser expandido nas coordenadas (x, y, σ) como

$$\nabla \cdot \vec{V} = m^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u}{m} \right) - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + m^2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v}{m} \right) - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{\rho_0 g}{p^*} \frac{\partial w}{\partial \sigma}. \quad (3.12)$$

Ao longo de uma superfície plana, p^* é constante e os segundo e quarto termos do lado direito da equação 3.12 desaparecem.

As equações prognósticas para vapor d'água e variáveis microfísicas, como nuvem e precipitação, podem também ser incorporadas ao modelo, incluindo tanto os termos de advecção como várias formas de fontes e sumidouros (Dudhia *et al*, 2002).

As equações do modelo de mesoescala MM5 são resolvidas numericamente por diferenças finitas, usando a grade tipo B de Arakawa e sendo integradas por um esquema centrado de segunda ordem que representa os gradientes. O esquema de integração em tempo é o “*leapfrog*” de segunda ordem, com um filtro para controlar o modo computacional, não obstante alguns termos sejam manipulados com esquemas de “*time-splitting*” (Dudhia *et al* 2002). Na técnica *leapfrog*, as tendências no tempo $n\Delta t$ são usadas para incrementar as variáveis de $(n-1)\Delta t$ para $(n+1)\Delta t$. Entretanto, para certos termos, o passo no tempo do modelo é muito longo para estabilidade e estes têm de ser prognosticados com um passo menor. O esquema *time-splitting* utiliza um número de passos discretos para estender o tempo de $(n-1)\Delta t$ para $(n+1)\Delta t$, a fim de prognosticar os campos de velocidade e pressão. Tipicamente podem existir de quatro a sete passos de discretização para cada passo *leapfrog* $2\Delta t$ (Dudhia, 1993).

3.3 CÓDIGO NUMÉRICO

A transmissão de dados entre as rotinas do MM5 é iniciada no módulo TERRAIN, o qual é responsável pela configuração das grades de mesoescala e pela interpolação horizontal de dados topográficos, gerando arquivos de entrada para os módulos seguintes. O módulo REGRID interpola dados meteorológicos em níveis de pressão, a partir de uma grade regular, para o domínio de mesoescala projetado pelo TERRAIN. Sua estrutura é composta por dois diferentes programas, o *pregrid* e o *regridder*. A função do *pregrid* é realizar um processamento prévio dos campos meteorológicos em níveis de pressão na grade, em virtude da existência de diversas fontes de dados em diferentes formatos. Este programa, na verdade, consiste em um conjunto de scripts específicos para conversão dos arquivos de entrada em um único formato intermediário. O *regridder*, por sua vez, a partir destes dados de entrada com nova formatação juntamente com a saída do TERRAIN, cria o chamado “primeiro chute” (*first guess*) para os programas subsequentes. O próximo módulo, RAWINS, lê dados de observações de superfície e de radiossondagem, refinando o “primeiro chute” com as novas informações meteorológicas. A seguir, o módulo INTERPF interpola verticalmente as

informações em níveis de pressão, fornecidas pelo REGRID, para dados em níveis sigma, gerando as condições iniciais e de contorno. Por fim, o MM5 fecha a simulação, resolvendo numericamente, por diferenças finitas, as equações diagnósticas e prognósticas do modelo, de acordo com as parametrizações físicas pertinentes. É o módulo em que a previsão numérica do tempo é realizada de fato (Dudhia *et al*, 2002). O diagrama esquemático da Figura 3.2 mostra a ordem dos programas e o fluxo de dados, descrevendo brevemente suas funções primárias.

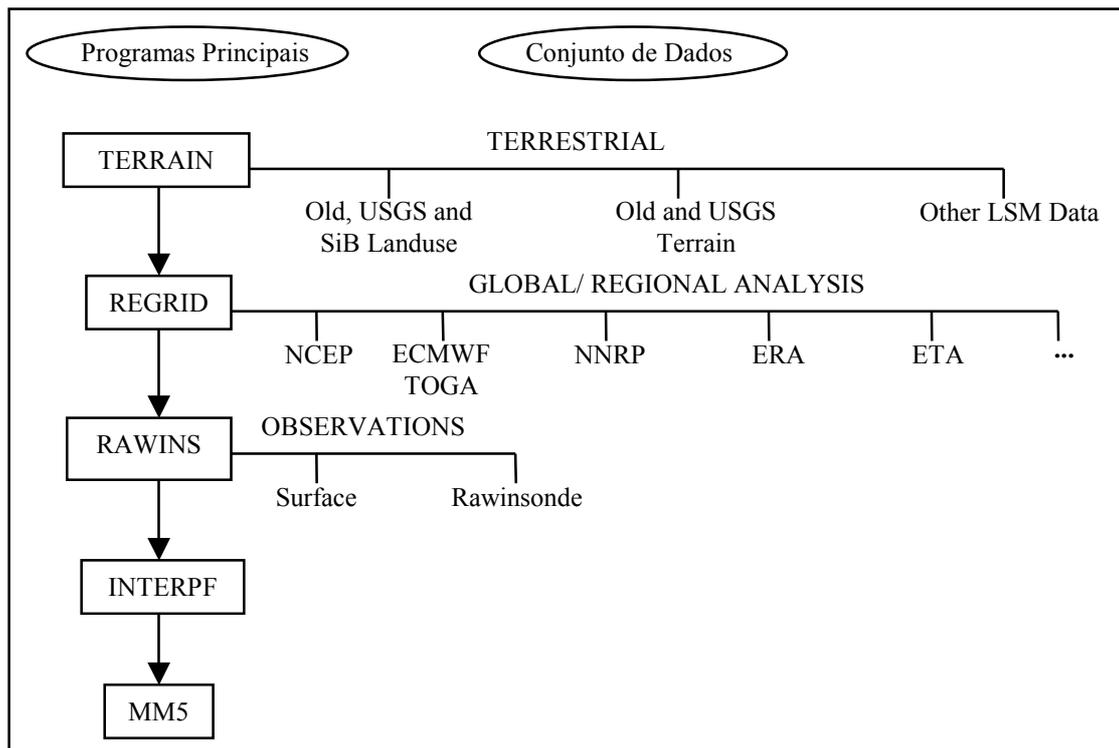


Figura 3.2 – Fluxograma dos principais programas e possíveis conjuntos de dados do MM5.
 FONTE: Adaptado de Dudhia *et al* (2002, p.1-4)

3.4 DADOS DE ENTRADA E CONDIÇÕES DE CONTORNO

Uma vez que o sistema de modelagem MM5 é primariamente designado para estudos e simulações com dados reais, seus programas requerem os seguintes conjuntos de dados para inicializar as rodadas: topografia e uso do solo (em categorias); dados atmosféricos em grade que apresentem, ao menos, as variáveis pressão reduzida ao nível médio do mar, vento, temperatura, umidade relativa e altura geopotencial, nos níveis de pressão de superfície, 1000, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150 e 100 mb; dados observacionais que contenham radiossondagens e relatórios de superfície (Dudhia *et al*, 2002).

Em adição às condições iniciais, qualquer modelo numérico regional de previsão de tempo precisa também de condições de contorno lateral para sua inicialização. No MM5, todas as quatro fronteiras têm especificados campos de vento horizontal, temperatura, pressão e umidade, além de, se estiverem disponíveis, campos microfísicos. Os valores de contorno são provenientes de análises em tempos futuros ou de uma simulação prévia na grade maior do modelo ou ainda de outras previsões numéricas (no caso de previsões em tempo real). Para esta última, as condições de fronteira dependerão da previsão do modelo global. Em estudos de eventos passados, as análises que fornecem as condições laterais podem ser complementadas por informações meteorológicas observacionais disponíveis pelo módulo RAWINS do mesmo modo que as condições iniciais o são. Quando as análises de ar superior são utilizadas, os valores de contorno podem somente ser disponibilizados a cada doze horas, enquanto que para as condições de fronteira geradas pelo modelo, a frequência aumenta para a cada seis ou até mesmo uma hora (Dudhia *et al*, 2002).

Neste estudo, o modelo de mesoescala MM5 foi inicializado com dados meteorológicos do *National Center for Environment Prediction* (NCEP), sendo estes interpolados verticalmente pelo módulo INTERPF para gerar as condições iniciais e de contorno. As próximas subseções descreverão brevemente os conjuntos de dados de entrada empregados, segundo informações adquiridas no site <http://dss.ucar.edu/datasets>.

3.4.1 NCEP/NCAR Global Reanalysis (NCAR, 2005)

Produtos do *NCEP/NCAR Reanalysis Project* (NNRP) estão arquivados neste conjunto de dados. O *Global Reanalysis Model* apresenta uma resolução horizontal de 209 km com 28 níveis verticais sigma, cujos resultados de cobertura global, processados a partir de 1948, são disponibilizados aos seus usuários a cada intervalo de seis horas. Dentre as oitenta variáveis oferecidas, as principais são: altura geopotencial, temperatura, umidade relativa, componente horizontal do vento, movimento vertical, divergência, vorticidade, temperatura potencial, água precipitável, pressão na superfície, pressão reduzida ao nível médio do mar, temperatura da superfície do mar, cisalhamento do vento, umidade específica, componente horizontal do vento a 10 metros, temperatura a 2 metros, rugosidade, *runoff* em rio, cobertura total de nuvens, cobertura de nuvem alta, cobertura de nuvem média, cobertura de nuvem baixa, altura da base da nuvem, radiação de onda longa e onda curta, profundidade de neve, umidade do solo, calor latente e calor sensível. As análises meteorológicas são apresentadas em diferentes

sistemas de coordenadas, como 17 níveis de pressão (1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20 e 10 mb) com resolução de grade igual a $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, 28 superfícies sigma (0.9950, 0.9821, 0.9644, 0.9425, 0.9159, 0.8838, 0.8458, 0.8014, 0.7508, 0.6943, 0.6329, 0.5681, 0.5017, 0.4357, 0.3720, 0.3125, 0.2582, 0.2101, 0.1682, 0.1326, 0.1028, 0.0782, 0.0580, 0.0418, 0.0288, 0.0183, 0.0101 e 0.0027) numa grade Gaussiana de 192×94 (aproximadamente $1,9^\circ \times 2,5^\circ$) e 11 níveis isentrópicos (270, 280, 290, 300, 315, 330, 350, 400, 450, 550 e 650 K) com resolução de grade igual a $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, sendo por isso organizadas em subgrupos distintos no arquivo. Em adição, relações diagnósticas, como calor radioativo e calor convectivo, e variáveis cumulativas, como taxa de precipitação, estão presentes.

3.4.2 NCEP Global Tropospheric Analyses (NCAR, 2005)

As análises globais (*NCEP Final Analyses* (FNL)), a partir de 1997, operacionalmente preparadas pelo NCEP em grades distintas de resolução igual a $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ para cada hemisfério, são disponibilizadas, a intervalos de doze horas, para superfície, 16 níveis mandatários de pressão (1000, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20 e 10 mb), camada limite, tropopausa e algumas superfícies sigma. Os parâmetros meteorológicos incluem altura geopotencial, temperatura, umidade relativa, umidade específica, componente horizontal do vento, movimento vertical, vorticidade, água precipitável, pressão reduzida ao nível médio do mar, pressão em superfície, temperatura superficial, temperatura do solo, temperatura da superfície do mar, pressão na tropopausa, temperatura na tropopausa, quantidade de água no solo, profundidade de neve e cobertura de gelo.

3.4.3 NCEP ADP Global Surface Observations (NCAR, 2005)

Neste conjunto sinótico global estão arquivadas informações provenientes de boletins de superfície, contendo dados de terra e mar, operacionalmente coletados pelo NCEP e disponíveis a intervalos de três horas. Os relatórios são recebidos via *Global Telecommunications System* (GTS) e decodificados e reformatados pelo *Automated Data Processing* (ADP). Diferentes tipos de registros de estações de superfície fornecem os dados em terra como SYNOP, METAR, e a partir do início da metade da década de 90, AWOS e

ASOS. Os dados da superfície do mar são obtidos de estações de superfície instaladas em navios em movimento ou atracados, MARS (em movimento ou parado) e bóias (amarradas ou à deriva). Os relatórios meteorológicos podem incluir as variáveis pressão na superfície, temperatura, direção do vento, intensidade do vento, depressão do ponto de orvalho, cobertura total de nuvens, tipo de nuvem, altura da base da nuvem, visibilidade, nevada, precipitação, pressão reduzida ao nível médio do mar, temperatura da superfície do mar e ondas.

3.4.4 NCEP ADP Global Upper Air Observation Subsets (NCAR, 2005)

Informações meteorológicas de altitude, provenientes de boletins de radiossondagens, balões piloto e aeronaves operacionalmente coletados pelo NCEP, são disponibilizadas a cada intervalo de seis horas neste conjunto sinótico de cobertura global. Os relatórios meteorológicos são recebidos via *National Environmental Satellite Data Information Service* (NESDIS) e *Global Telecommunications System* (GTS), sendo estes últimos ainda decodificados e reformatados pelo *Automated Data Processing* (ADP). Todos os dados registrados, além de comporem a entrada primária do *Global Data Assimilation System* (GDAS), usado para realizar previsões numéricas e *NCEP Final Analyses* (FNL), representam a principal fonte de entrada dos *NCEP/NCAR and ECMWF Reanalyses Projects*. Os dados de ar superior processados pelo ADP incluem registros de estações de lançamento de radiossondagens e balões piloto localizadas em terra e navios, nos níveis mandatários de superfície, 1000, 850, 700, 500, 400, 300, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10, 7, 5, 3, 2 e 1 mb. A coleta de informações envolve, às 00Z e 12Z, cerca de 650 a 1000 estações e, às 06Z e 18Z (na sua maioria, dados de balão), 150 a 400 estações. Os dados de altitude registrados em aeronaves são obtidos a partir da operação de aproximadamente 400 vôos comerciais, militares e de reconhecimento a cada doze horas e cerca de 20.000 deles a cada seis horas nos registros mais recentes. Além de dados observacionais de satélite no canal infravermelho e dados de vento derivados das análises via satélite do formato das nuvens, 5.000 a 10.000 relatórios são expedidos a cada seis horas na decolagem e aterrissagem de aeronaves. Os boletins meteorológicos, de um modo geral, apresentam informações das variáveis pressão, altura geopotencial, temperatura, direção e intensidade do vento e depressão do ponto de orvalho.

3.4.5 Global Monthly Mean Radiosonde Observations (NCAR, 2005)

Dados mensais de radiossondagem podem também ser adquiridos gratuitamente do *National Climatic Data Center* (NCDC). Entretanto, tais informações meteorológicas, irregularmente coletadas fora do território dos Estados Unidos, não apresentam a mesma confiabilidade daquelas imediatamente acima citadas, usadas pelo NCEP com rigoroso controle de qualidade. Além disso, encontram-se num formato bruto precisando de tratamento antes de serem usadas no módulo RAWINS. As variáveis altura geopotencial, temperatura, direção e intensidade do vento, umidade relativa e pressão são disponibilizadas nos níveis de superfície, 850, 700, 500, 300, 200, 150, 100, 50, 30 e 10 mb.

3.5 PARAMETRIZAÇÕES FÍSICAS

Uma grande variedade de esquemas chamados de parametrizações tem sido desenvolvida e incorporada aos modelos numéricos de mesoescala, a fim de representar processos físicos como, por exemplo, a convecção associada a nuvens e os fluxos ascendentes e descendentes na camada limite planetária. Cada parametrização foi implementada sob circunstâncias específicas, não necessariamente tendo de apresentar a mesma performance em qualquer situação. Desta forma, identificar características responsáveis e erros sistemáticos, associados às aplicações em mesoescala das parametrizações nos ambientes de simulação, tornou-se informação fundamental para o desempenho futuro dos sistemas de previsão numérica e para o aperfeiçoamento dos próprios esquemas físicos.

Segundo Wang & Seaman (1997), a precipitação é reconhecida como um dos parâmetros mais difíceis de ser previsto numericamente. Embora reduções substanciais nos erros de previsão das variáveis vento, temperatura, pressão reduzida ao nível médio do mar e altura geopotencial sejam constatadas nos modelos de mesoescala, o progresso na previsão da precipitação tem se mostrado lento. Dentre as dificuldades inerentes a esta realidade, a representação dos processos precipitantes com relação ao desempenho das principais parametrizações cumulus do modelo de mesoescala MM5 foi o objetivo do estudo comparativo proposto pelos autores. As análises mostraram que, para seis eventos de precipitação nas estações quente e fria ocorridos na área continental dos Estados Unidos, existem vantagens significativas quanto ao uso de determinadas parametrizações que

diretamente melhor representam as correntes descendentes convectivas úmidas, como as parametrizações de Kain-Fritsch e Grell.

No Brasil, estudos também têm sido realizados para entender adequadamente como as parametrizações físicas interagem com outros componentes dos modelos de mesoescala. Oliveira e Menezes (2004) avaliaram a performance das principais parametrizações de microfísica e convecção no modelo numérico MM5 via estudo de caso de um Sistema Convectivo de Mesoescala que atingiu a região metropolitana do Rio de Janeiro em novembro de 2001. Seis simulações com o modelo, envolvendo as parametrizações de microfísica de Schultz, Goddard e Dudhia, ora com a parametrização cumulus de Kain-Fritsch 2 ora sem qualquer esquema de convecção acionado, não apresentaram resultados com diferenças de desempenho significativas. As simulações conseguiram reproduzir com eficiência diversos aspectos da morfologia e da dinâmica do evento, além dos processos em escala convectiva, como os fluxos de umidade alimentando as nuvens e as correntes ascendentes e descendentes. Apesar da pequena defasagem espacial e temporal na localização do sistema, o modelo obteve um excelente desempenho independentemente da parametrização escolhida. A inclusão da parametrização cumulus Kain-Fritsch 2 acrescentou pouca informação; por outro lado, alguns aspectos permitiram destacar a parametrização de Schultz como a mais apropriada para estudos de mesoescala.

No estudo aqui apresentado, para todos os domínios de integração escolhidos, foi utilizada a mesma combinação de esquemas. Comparações entre simulações numéricas realizadas no modelo de mesoescala MM5 com diferentes conjuntos de opções físicas, sugeridos pela bibliografia consultada, permitiram identificar aquelas parametrizações que melhor reproduziram as tempestades selecionadas para tal avaliação. Dois estudos de casos serão analisados com maiores detalhes no próximo capítulo.

A parametrização cumulus escolhida foi a de Kain-Fritsch 2. O esquema de Kain-Fritsch tem sido utilizado satisfatoriamente durante muitos anos no modelo numérico MM5 e mais recentemente incorporado a versões experimentais dos modelos ETA e *Weather Research and Forecasting* (WRF). Derivado da parametrização cumulus de Fritsch-Chappell, seu desenvolvimento vem sendo intensamente estudado pela comunidade científica, de modo que diversas sugestões para problemas constatados ao longo do tempo foram reunidas numa série de melhorias para implementação que deram origem à parametrização cumulus de Kain-Fritsch 2 (Kain, 2002). O esquema Kain-Fritsch original consiste basicamente na identificação

das possíveis camadas geradoras de movimento vertical a partir de testes de instabilidade. Em seguida, pelo método da parcela Lagrangeana, a velocidade vertical é determinada ao longo da coluna de ar. Caso esta mantenha-se positiva por uma altura típica de 3 a 4 km, a convecção profunda é ativada. As modificações propostas pela versão Kain-Fritsch 2 incluem uma taxa mínima de entranhamento, que primariamente suprime o disparo de convecção em ambientes não favoráveis; o raio teórico da nuvem, que controla o máximo possível de entranhamento, sendo variável e dependente da convergência sob a nuvem; uma opção de ocorrência de convecção rasa (*Shallow Cumulus*) e um novo algoritmo para correntes descendentes (Kain, 2002).

A parametrização de microfísica de Schultz selecionada para este estudo tem como característica principal o baixo custo computacional demandado na implementação da modelagem de processos relativamente complexos. Esta vantagem, apesar de irrelevante no tratamento da pesquisa em questão, mostra-se bastante importante na previsão operacional do tempo, em que a busca por bons resultados com o menor gasto possível é constante. O esquema contempla cinco categorias de água condensada: água de nuvem, cristais de gelo, água de chuva, neve e gelo precipitante, inclusive granizo e saraiva, cujas produção e conversão consistem em processos físicos de grande complexidade (Schultz, 1995). Entretanto, a parametrização de Schultz trata-os simplificada a partir de equações baseadas em constantes empíricas. As expressões completas para os diversos tipos de hidrometeoros podem ser encontradas em Schultz (1995). Cabe salientar que a presença das constantes empíricas nas equações matemáticas torna este esquema aplicável a uma série de eventos atmosféricos, uma vez que tais constantes podem ser calibradas facilmente de acordo com a realidade dos processos intranuvens existentes na região onde o estudo venha a ser desenvolvido.

A parametrização escolhida para a camada limite planetária foi a MRF (*Medium-Range Forecast*), um eficiente esquema implementado no *NCEP MRF Model* e baseado na representação de *Troen-Mahrt* para o termo de contragradiente e o perfil K na camada de mistura (Dudhia *et al*, 2002). No conjunto, os processos radiativos foram representados pela parametrização de onda longa RRTM (*Rapid Radiative Transfer Model*), na qual o esquema de radiação de nuvem é também combinado, computando as interações de ondas curtas e longas com nuvens e ar limpo, além dos fluxos de radiação da superfície nos cálculos do balanço de energia no solo. Este esquema de onda longa é um método novo altamente preciso

e eficiente que utiliza um modelo correlacionado-k para representar os efeitos do espectro de absorção considerando vapor d'água, dióxido de carbono e ozônio (Dudhia *et al*, 2002). É implementado no MM5 para também interagir com o modelo de nuvem e os campos de precipitação. O esquema de superfície adotado foi o *Land-Surface Model* (LSM), capaz de prognosticar a umidade e a temperatura do solo em quatro camadas (10, 30, 60 e 100 cm de espessura), assim como a profundidade de neve, a umidade do dossel vegetativo, as acumulações de *runoff* superficial e subterrâneo. O LSM utiliza os tipos de vegetação e de solo no tratamento da evapotranspiração e tem resultados como condutividade no solo e fluxo de umidade gravitacional (Dudhia *et al*, 2002).

3.6 DOMÍNIOS DE INTEGRAÇÃO

O modelo numérico MM5, para as simulações de tempestades com descargas elétricas atmosféricas foi configurado com dois domínios de integração de grade centrada em 23° S e 40° O, conforme mostra a Figura 3.3. O domínio 1 (D1) possui resolução horizontal de 90 km, com 35x41x23 pontos, referente à área localizada entre 35° S a 12° S de latitude e 54° O a 26° O de longitude, e o domínio 2 (D2), por sua vez, aninhado ao domínio maior, resolução horizontal de 30 km, com 49x52x23 pontos, referente à área localizada entre 28° S a 17° S de latitude e 46° O a 34° O de longitude.

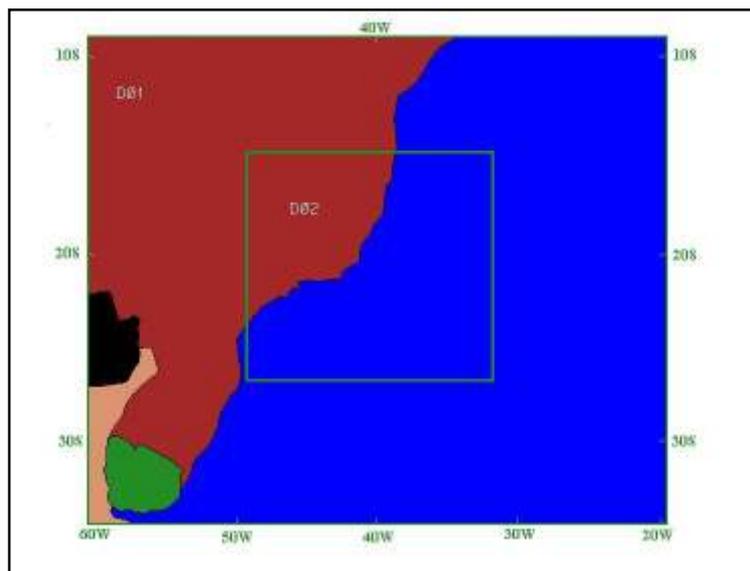


Figura 3.3 – Domínios de integração do modelo de mesoescala MM5.

3.7 VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

Descobrir relações envolvendo dados de descargas elétricas atmosféricas que poderiam ser aplicadas na previsão operacional de tempo severo foi o objetivo principal do estudo realizado por Reap & MacGorman (1989). Aproximadamente dois milhões de dados de descargas nuvem-solo da rede *National Severe Storms Laboratory* (NSSL) durante o período de 1985 e 1986 para as estações quentes tiveram suas características analisadas e estatisticamente comparadas a observações de radar, boletins de eventos climáticos extremos e saídas numéricas de modelos prognósticos. Com a finalidade de determinar quais parâmetros atmosféricos são bons preditores de descargas nuvem-solo, relacionando sua ocorrência com os campos de simulação obtidos do *National Meteorological Center's (NMC) Limited-Area Fine-Mesh (LFM) model* e *Techniques Development Laboratory's (TDL) high resolution Boundary Layer Model (BLM)*, técnicas de regressão linear foram utilizadas. Dentre as diversas variáveis candidatas de ambos modelos para tal avaliação estavam temperatura, umidade relativa, componente horizontal do vento U e V , pressão na superfície, índices de estabilidade, advecção de temperatura, cisalhamento do vento, divergência, vorticidade, velocidade vertical e altura do nível de congelamento. Como resultados principais, foram obtidas boas correlações entre descargas positivas e negativas e fluxo de umidade e circulação em baixos níveis, quando na presença de convergência de umidade, vorticidade relativa ciclônica e forte movimento vertical na camada limite. Contrariando as expectativas, a altura da camada de gelo e o cisalhamento do vento não foram variáveis importantes na formação de tempestades.

A região Sudeste do Brasil é reconhecida por apresentar intensa atividade elétrica associada a condições meteorológicas locais, como tempestades convectivas e sistemas convectivos de mesoescala, e de grande escala, como passagem e ocorrência de frentes frias, Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Alta da Bolívia (Faria, 2002; Pinto & Pinto Jr., 2003; Pinto Jr. *et al*, 2003). Também tem sido sugerido que a convecção nesta região brasileira e, conseqüentemente, a ocorrência de descargas atmosféricas, pode estar relacionada ao fenômeno El Niño (ENSO), à temperatura da superfície do Oceano Atlântico e à Oscilação *Madden-Julian* (MJO) (Pinto Jr. *et al*, 2003a).

Para a realização da pesquisa contida na presente dissertação, possíveis variáveis meteorológicas predictoras da ocorrência de descargas elétricas atmosféricas foram

selecionadas com base nas condições primariamente necessárias para a formação de tempestades, isto é, perfil térmico da atmosfera, umidade e movimento ascensional. Assim, serão analisados campos de simulação de divergência (10^{-4} s^{-1}), em superfície e 200 mb, advecção de temperatura (K/h), nos níveis de pressão de 850 e 500 mb, razão de mistura (10^{-3} g/Kg), em superfície e 850 mb, e velocidade vertical (10^{-2} m/s), em 500 mb. No próximo capítulo, estas variáveis, bem como suas correlações com a ocorrência de tempestades elétricas, serão descritas com maiores detalhes.

CAPÍTULO 4

ESTUDOS DE CASOS

4.1 INTRODUÇÃO

Em geral, o início da intensa eletrificação em tempestades está associado ao rápido desenvolvimento vertical e horizontal das nuvens. Quando as perturbações elétricas em seu interior tornam-se suficientemente grandes, ocorre a ruptura dielétrica do ar e, por consequência, a descarga elétrica atmosférica. O estudo de relâmpagos é considerado parte importante das investigações sobre tempestades, não só pelas descargas elétricas serem indicadores e, até mesmo, modificadores da eletricidade atmosférica, mas também pelo fato de representarem por si mesmas fenômenos ainda pouco conhecidos. Logo, mudanças instantâneas provocadas no campo elétrico podem informar a magnitude das cargas elétricas depositadas pelas descargas e sua possível localização pontual, caso medições sejam realizadas nos lugares de incidência. Medidas da grande quantidade de cargas transferidas pelas descargas elétricas são bastante variáveis, dependendo de fatores como posição geográfica e circunstâncias meteorológicas e sazonais.

Neste capítulo, serão discutidos dois estudos de caso de tempestades com intensa atividade elétrica. O monitoramento dos fenômenos dar-se-á a partir da análise das distribuições temporal e espacial das descargas atmosféricas associadas aos eventos escolhidos, de imagens de satélite geoestacionário e de campos de simulação do modelo de mesoescala MM5 para as variáveis meteorológicas selecionadas previamente. A incidência de descargas elétricas durante um determinado intervalo de tempo foi considerada, com base em definição estabelecida anteriormente, como parâmetro indicador das tempestades. A fim de identificar qual fenômeno meteorológico estava associado às descargas atmosféricas e de verificar a eficiência dos sensores de FURNAS Centrais Elétricas S.A. com relação à localização dos dados obtidos, imagens de satélite de órbita geoestacionária foram utilizadas. Além das variáveis meteorológicas divergência, advecção de temperatura, razão de mistura e velocidade vertical, citadas como aquelas a terem seus comportamentos estudados via modelo de mesoescala e possivelmente correlacionados com a ocorrência de tempestades com descargas elétricas, foi escolhida também a variável precipitação convectiva para a aferição

do desempenho do modelo com relação às imagens de satélite. Cabe ressaltar que esta variável não participou da discussão dos resultados juntamente com os demais parâmetros meteorológicos, visto que ainda existem incertezas a respeito dos detalhes da correlação entre a estrutura elétrica de uma tempestade e seu estado convectivo. Ora observações mostram que descargas elétricas e precipitação estão correlacionadas, ora que a atividade elétrica evita regiões de forte precipitação ou ocorre antes da máxima precipitação (Gin, 1992; Pinto Jr. *et al*, 1992).

Quando empregados coletivamente, dados provenientes de diversos equipamentos – incluindo radar, imagens de satélite, simulações numéricas, observações de superfície e ar superior – auxiliam o previsor a disponibilizar um melhor prognóstico da ocorrência de sistemas de tempo severo. Segundo Ferreira (2002), dados do sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) a bordo de satélites de órbita polar, que fornecem imagens nos canais visível e infravermelho dos fenômenos meteorológicos e das superfícies terrestre e marítima, podem ser utilizados na localização e no estudo das tempestades, embora apresentem limitações quanto ao tempo de recebimento entre uma imagem e outra. Usando os dados dos satélites de órbita geostacionária, com suas imagens em intervalos menores, e a técnica de animação, a observação pode ser facilitada. Isto permite acompanhar o movimento e a direção, o desenvolvimento e outras características dos fenômenos em um pequeno intervalo de tempo. Infelizmente, embora os satélites revelem as nuvens se movendo e crescendo, a imagem não permite sempre mostrar as características exatas das tempestades e o seu potencial de produzir o tempo severo.

Imagens infravermelhas do satélite GOES-12 com resolução espacial de aproximadamente 10 km foram utilizadas neste estudo para o monitoramento de ambos sistemas de tempestade. Obtidas do site da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*)/ NESDIS (*National Environmental Satellite Data and Information Service*), não mais disponíveis atualmente, as imagens com as temperaturas do topo das nuvens realçadas em cores diferentes numa escala de 180K a 300K foram recebidas a cada intervalo de meia hora. O realce é uma técnica comumente usada para localizar nuvens convectivas com topos mais frios (Ferreira, 2002). Entretanto, a ocorrência de falhas no recebimento da seqüência destas imagens foi freqüente, podendo chegar até a algumas horas, inclusive para os estudos de caso que serão abordados. Por esta razão, imagens no canal infravermelho em tons de cinza do satélite geostacionário GOES-12 disponíveis nos sites do CPTEC (*Centro de*

Previsão de Tempo e Estudos Climáticos) e do Laboratório Master do IAG (*Instituto de Astronomia e Geofísica*)/ USP (*Universidade de São Paulo*) foram investigadas com a finalidade de tentar substituir aquelas faltantes para as datas de interesse. Contudo, a substituição nem sempre foi possível, visto que tais imagens, principalmente nos horários em que a atividade elétrica foi mais significativa, também apresentaram falhas, quando não, problemas de resolução que impediram seu uso. De qualquer forma, correlações encontradas entre as descargas elétricas atmosféricas e as imagens disponíveis para análise, conforme será mostrado a seguir, possibilitaram identificar e monitorar o fenômeno meteorológico envolvido e aferir a localização espacial e temporal destes dados, justificando, assim, a utilização das imagens de satélite nas condições apresentadas.

Os campos meteorológicos simulados no modelo de mesoescala MM5 para os domínios de 90 e 30 km de resolução horizontal foram visualizados pelo Sistema de Análise e Exibição de Grade (GrADS) a cada intervalo de uma hora. Os horários de início das simulações realizadas serão especificados no decorrer da apresentação dos estudos de caso. Em seguida, será introduzido o tratamento estatístico conferido às saídas de simulação do modelo numérico MM5 para cada variável, em seus respectivos níveis e horários de interesse, com o intuito de posterior aplicação das técnicas de inteligência artificial.

4.2 CASO: 19 DE NOVEMBRO DE 2003

4.2.1 Análise das Descargas Elétricas Atmosféricas

Segundo Pinto *et al* (1999), a variação temporal da atividade elétrica é considerada ferramenta importante no melhor entendimento do comportamento de sistemas de tempestades em mesoescala e na predição de variações no circuito elétrico atmosférico global e na temperatura global. A variabilidade horária das descargas elétricas nuvem-solo sobre o continente é conhecida por apresentar pontos de máximo à tarde associados à intensa atividade convectiva deste período em resposta ao ciclo diurno da insolação. Diferenças, entretanto, podem existir quando relacionadas a aspectos meteorológicos e orográficos.

A tempestade nível 1 ocorrida no dia 19 de novembro de 2003 foi aquela que, de um total de duzentos e seis eventos identificados entre março de 2002 e fevereiro de 2004, apresentou o maior número de descargas elétricas atmosféricas durante uma hora (Zepka *et al*,

2005). De acordo com a Figura 4.1, o fenômeno iniciou às 15 horas do dia 19 com quarenta descargas e terminou às 5 horas do dia 20 com apenas uma descarga registrada, totalizando 19.851 descargas durante as quinze horas nas quais se encontrou ativo. Às 18 horas, 3.599 descargas antecederam o máximo de 4.242 descargas elétricas ocorrido às 19 horas do dia 19 de novembro. Uma hora depois, a tempestade registrava 2.543 descargas, ou seja, um decréscimo de 40% em relação ao período anterior. Apenas 5% do total de descargas elétricas concentraram-se nas primeiras horas do dia 20 de novembro.

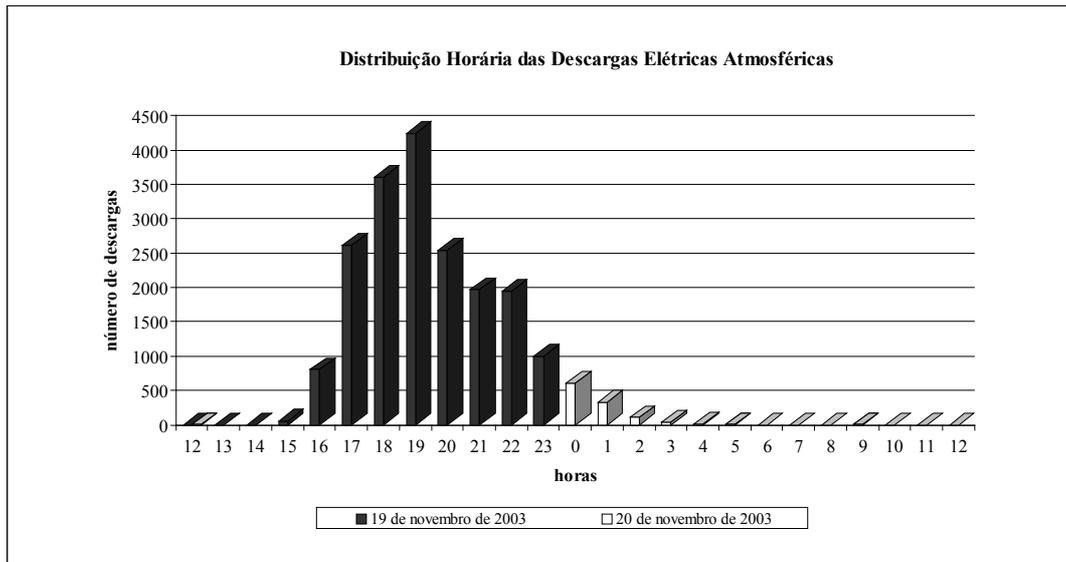


Figura 4.1 – Distribuição horária das descargas elétricas atmosféricas para o evento de tempestade ocorrido nos dias 19 e 20 de novembro de 2003.

A Figura 4.2 mostra a distribuição espacial da atividade elétrica associada ao evento de tempestade durante todo o seu estágio de vida. Das Figuras 4.2(a) a 4.2(c), é possível observar o início da formação e a intensificação de dois núcleos distintos de descargas atmosféricas sobre o sul e o centro do Estado de Minas Gerais. Às 17 horas do dia 19 de novembro, quando a atividade elétrica ultrapassou a quantidade de 1.000 descargas por hora, o sistema ingressou na sua fase mais intensa e, uma hora depois (Figura 4.2(d)), 3.599 descargas registradas já se estendiam também a sudoeste do Estado do Rio de Janeiro, pouco penetrando o Oceano Atlântico. Às 19 horas, como mostra a Figura 4.2(e), a tempestade atingiu o máximo de 4.242 descargas/hora, com a organização das descargas elétricas em núcleos propagando-se para nordeste. As diferentes posições uniformemente assumidas por tais núcleos até a sua total desintensificação representam possíveis indicadores da direção de deslocamento do fenômeno meteorológico associado. A partir das 20 horas (Figura 4.2(f)), pôde ser identificada a distribuição desigual das descargas elétricas ao longo de uma banda

localizada na direção noroeste–sudeste cobrindo parte dos Estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro. Tal organização começou a se desintensificar às 23 horas, na Figura 4.2(i), com a diminuição da atividade elétrica sobre Minas Gerais e concentração das descargas em forma de núcleo no Rio de Janeiro. Durante as primeiras horas do dia 20 de novembro, a incidência das descargas elétricas foi diminuindo continuamente, com apenas alguns poucos núcleos no litoral norte do Estado do Rio de Janeiro, antes de sua total dissipação.

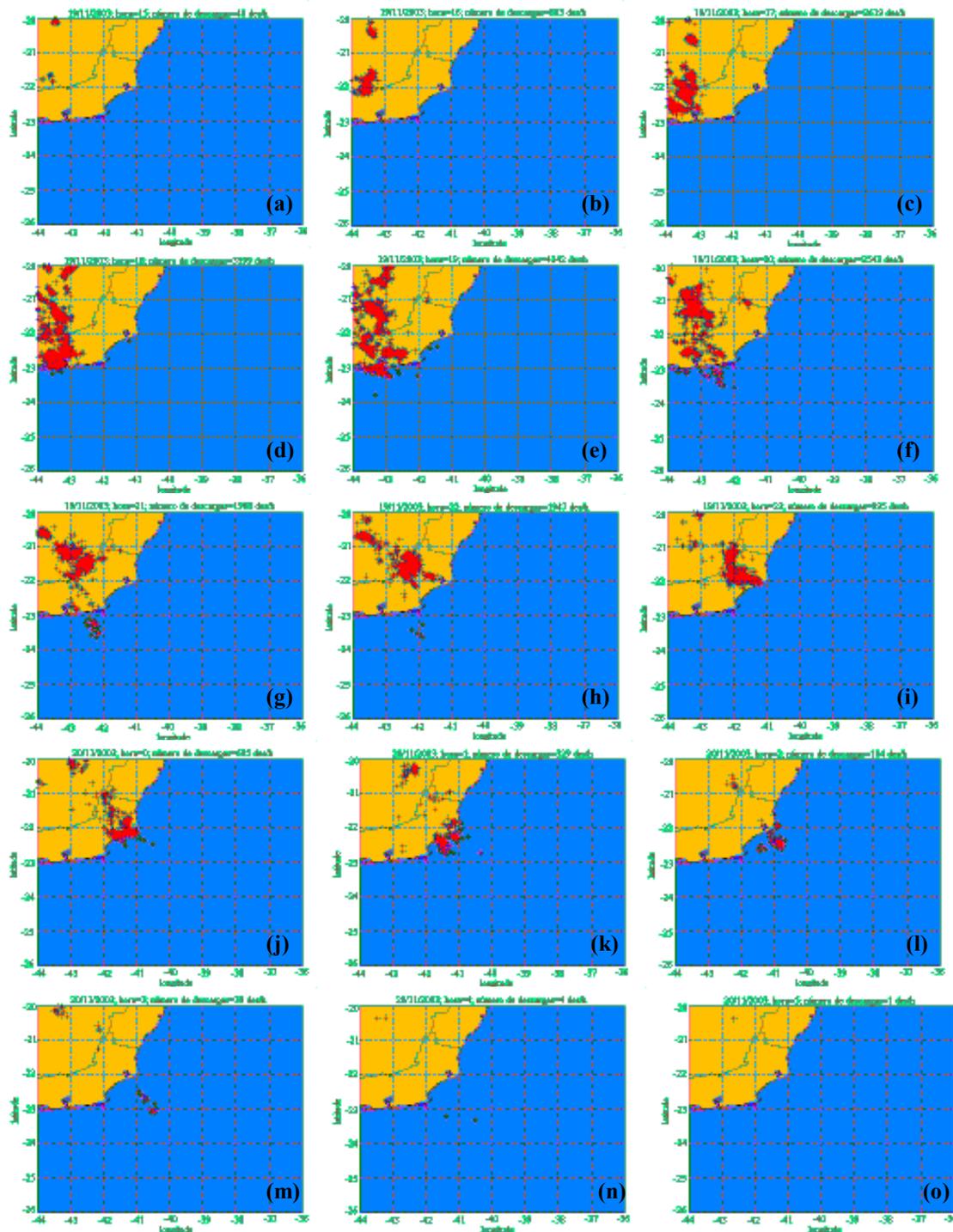


Figura 4.2 – Distribuição espacial das descargas elétricas atmosféricas para o evento de tempestade ocorrido nos dias 19 e 20 de novembro de 2003.

4.2.2 Análise das Imagens de Satélite

Neste estudo de caso, serão utilizadas imagens no canal infravermelho do satélite geostacionário GOES-12 a fim de identificar qual condição meteorológica estava associada às descargas elétricas atmosféricas e de verificar a eficiência dos sensores de FURNAS Centrais Elétricas S.A. com relação à localização dos dados obtidos. Também participarão desta análise informações sobre as perturbações atmosféricas que ocorreram no Brasil durante o mês de Novembro, fornecidas pelo Boletim Climanálise.

Segundo Pinto Jr. *et al* (1996), basicamente três condições meteorológicas diferentes identificadas por imagens de satélite foram responsáveis pela incidência de descargas elétricas nuvem-solo na região Sudeste do Brasil durante o verão de 1992–1993: convecção local, convecção tropical e convecção provocada por passagem de sistema frontal. Aproximadamente 70% do total de descargas registradas estavam associadas à convecção frontal produzida por massas de ar frio provenientes do Pólo Sul. Somente cerca de 10% puderam ser relacionadas puramente à convecção local. Os restantes 20% das descargas elétricas foram associadas à convecção tropical profunda com origem na região amazônica que se estendeu até a área de cobertura dos sensores. A fim de investigar as possíveis causas da variação anual da quantidade de descargas elétricas nuvem-solo negativas entre 1989 e 1995, Pinto Jr. *et al* (2003a) computaram separadamente o número anual de sistemas frontais e eventos ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul) que afetaram a região Sudeste do Brasil durante o período de interesse, muito embora estes fenômenos não sejam independentes. A ZCAS é tipicamente identificada nas imagens de satélite como uma banda de nebulosidade convectiva orientada no sentido noroeste/sudeste estendendo-se do sul da Amazônia até ao Oceano Atlântico Sul e permanecendo quasi-estacionária por períodos que variam de 4 a 20 dias (Faria, 2002). Apesar do número de descargas elétricas aparentemente ter tendido a aumentar quando da ocorrência de ZCAS, nenhuma correlação explícita foi encontrada entre os fenômenos analisados e a variabilidade anual das descargas elétricas, o que possivelmente indicou a existência de complexas interações entre diferentes processos responsáveis pela atividade elétrica.

A Figura 4.3 a seguir apresenta a seqüência de imagens de satélite correspondente ao período de ocorrência do evento de tempestade analisado neste estudo de caso. Apesar de não estarem igualmente intervaladas, devido a razões já justificadas anteriormente, foi possível

constatar o fenômeno meteorológico causador da atividade elétrica e aferir com precisão a localização das descargas elétricas (Zepka *et al*, 2005). Na Figura 4.3(a) do dia 19 de novembro de 2003 às 1445 UTC, observa-se um sistema frontal atuando no litoral da região Sudeste do Brasil com uma circulação ciclônica bem configurada em sua extremidade a sudeste do Rio Grande do Sul. Dois pequenos e distintos núcleos convectivos podem ser identificados ao sul de Minas Gerais. Segundo o Climanálise (2003), a atividade convectiva em novembro, observada em todas as pênaldas do mês como uma faixa orientada no sentido noroeste–sudeste e posicionada preferencialmente sobre o Brasil Central, esteve associada ao avanço dos sistemas frontais.

Passadas três horas, às 1745 UTC (Figura 4.3(b)), percebe-se a intensificação dos núcleos identificados na imagem anterior e a formação de outros, todos posicionados de forma linear desde o oeste do Estado de Minas Gerais até o sul do Estado do Rio de Janeiro e associados à extremidade da frente fria ainda ativa sobre o continente, conforme também pode ser visto nas áreas mais claras da mesma região na imagem das 1810 UTC (Figura 4.3(c)). Poucas descargas elétricas registradas às 15 horas local, horário do início da tempestade, estão relacionadas a esta atividade convectiva, de acordo com a Figura 4.2(a).

Às 2045 UTC, na Figura 4.3(d), constata-se o aumento de tamanho principalmente do núcleo convectivo com formato circular muito bem definido localizado sobre o Estado do Rio de Janeiro estendendo-se em parte sobre o Oceano Atlântico. As áreas brancas e brilhantes no oeste e sul de Minas Gerais indicam a presença de nuvens cumulonimbus e conseqüentemente forte atividade convectiva. Praticamente meia hora depois, na Figura 4.3(e), as características convectivas permanecem constantes na região de ocorrência das descargas elétricas. Conforme a Figura 4.2(d), a localização dos dados detectados pelos sensores de FURNAS para as 18 horas local coincide com as regiões de forte convecção identificadas na imagem de satélite para o mesmo horário. Infelizmente a existência de falhas na continuidade das imagens impossibilitou a observação meteorológica durante o período de máxima atividade elétrica da tempestade às 19 horas local; porém, tendo em vista as correlações de posição obtidas uma hora antes entre as regiões dos núcleos convectivos e da incidência de descargas atmosféricas, é esperado fisicamente para tal momento a intensificação da convecção em concordância com o aumento da quantidade de descargas.

Às 2345 UTC (Figura 4.3(f)), é possível observar, em relação à imagem anterior, o deslocamento do sistema frontal para nordeste, atingindo o litoral do Espírito Santo, bem

como dos núcleos com forte atividade convectiva a ele associados. A área de intensa convecção localizada no oeste de Minas Gerais enfraquece, permanecendo mais ativos apenas os dois núcleos posicionados lado a lado na região centro e leste do Estado, próximos ao núcleo atuante sobre o Rio de Janeiro. Comparativamente, a distribuição espacial das descargas elétricas para as 21 horas local apresenta boa correlação com a região de convecção mais intensa.

Duas horas depois, na Figura 4.3(g), percebe-se ainda que a passagem da frente fria provoca forte atividade convectiva na parte leste do Estado de Minas Gerais e principalmente sobre o núcleo bem configurado em formato circular no Rio de Janeiro e Oceano Atlântico, o qual é responsável pela ocorrência das descargas elétricas detectadas às 23 horas local, conforme mostra a Figura 4.2 (i). Cabe ressaltar que, apesar de as regiões convectivas manterem os topos das nuvens altos e com temperaturas mais frias, os dados de FURNAS indicam o início do processo de desintensificação da atividade elétrica.

A seqüência de imagens de satélite correspondente às primeiras horas do dia 20 de novembro de 2003, a partir da Figura 4.3(h) até a Figura 4.3(n), a cada intervalo de uma hora, apresenta o enfraquecimento do sistema frontal e da atividade convectiva associada sobre o continente. O desenvolvimento deste processo pôde ser acompanhado pelo deslocamento e pela diminuição das descargas elétricas atmosféricas mostrados na Figura 4.2. A detecção dos sensores de FURNAS Centrais Elétricas S.A. foi consideravelmente eficiente e confiável, visto que as posições dos dados estavam de acordo com as condições meteorológicas presentes.

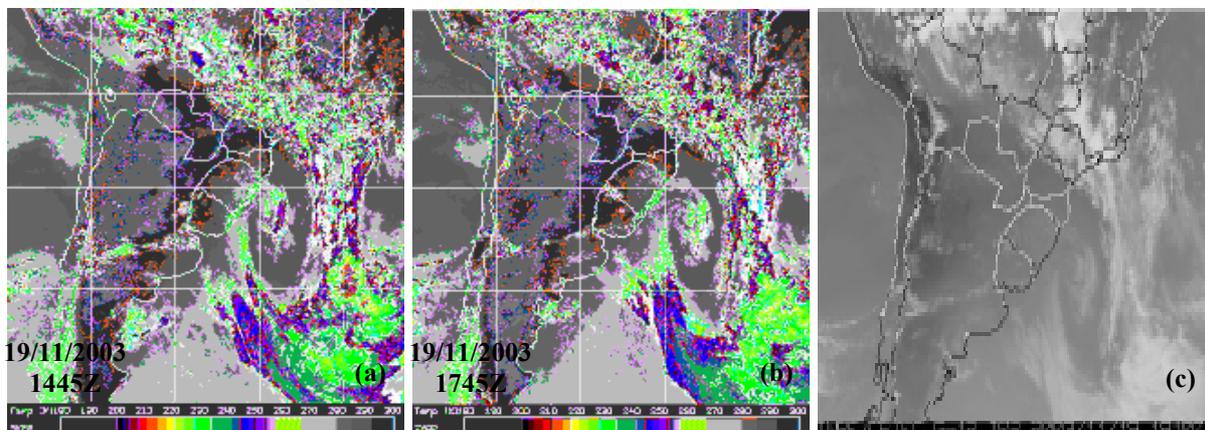
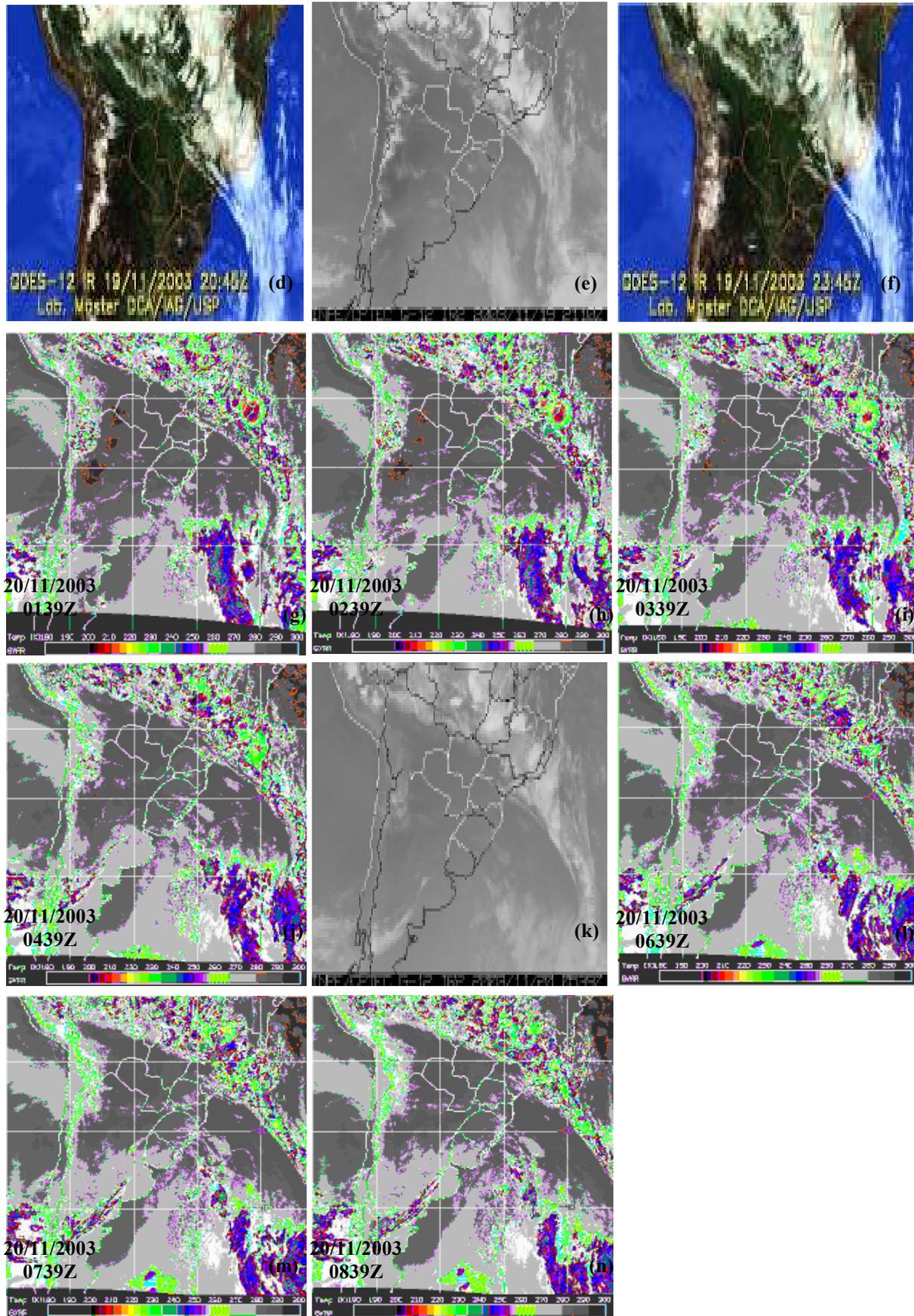


Figura 4.3 – Seqüência de fragmentos de imagens infravermelhas de satélite geostacionário GOES-12 referente à tempestade em estudo (continuação na página seguinte).



Continuação da Figura 4.3.

4.2.3 Análise das Simulações com o Modelo de Mesoescala MM5

A análise do comportamento das variáveis meteorológicas selecionadas para este caso de tempestade deu-se a partir da realização de duas simulações com o modelo numérico MM5, com duração de doze horas cada de modo a cobrir todo o período de atividade elétrica. A Tabela 4.1 abaixo mostra o horário de início e a data das respectivas simulações.

Tabela 4.1 – Horários das simulações realizadas no modelo MM5.

| | Simulação 1 | | Simulação 2 | |
|---------|-------------|------------------------|-------------|------------------------|
| | Hora | Dia | Hora | Dia |
| Início | 12 UTC | 19 de novembro de 2003 | 00 UTC | 20 de novembro de 2003 |
| Término | 00 UTC | 20 de novembro de 2003 | 12 UTC | 20 de novembro de 2003 |

Nesta seção serão mostrados inicialmente resultados de comparações entre os campos simulados da variável precipitação convectiva acumulada em superfície para ambos os domínios de 90 e 30 km de resolução horizontal e as imagens do satélite geoestacionário, com a finalidade de tentar aferir, para este estudo de caso, o desempenho do modelo MM5. A seguir divergência, em superfície e 200 mb, razão de mistura, em superfície e 850 mb, advecção de temperatura, nos níveis de pressão de 850 e 500 mb, e velocidade vertical, em 500 mb, serão apresentadas para horários de interesse da tempestade, buscando correlacioná-las com a ocorrência das descargas elétricas atmosféricas e com o sistema frontal identificado nas imagens de satélite. Apenas os resultados do domínio com resolução horizontal de 30 km serão analisados para a melhor observação dos detalhes das variações previstas pelo modelo de mesoescala MM5.

No horário das 1745 UTC (Figura 4.3(b), rerepresentada como Figura 4.4(a)), a imagem de satélite mostrou atividade convectiva estendendo-se desde o sul de Goiás, oeste e sul de Minas Gerais até o sul do Estado do Rio de Janeiro, sendo que neste último, um núcleo bem definido apresentava convecção mais intensa. Conforme a Figura 4.4(b), a localização da precipitação convectiva prevista para as 18 UTC aparece justamente ao longo da banda frontal, inclusive no ciclone associado à extremidade do sistema. A precipitação mais intensa está representada no sul de Goiás e oeste de Minas Gerais e sobre o Rio de Janeiro, praticamente coincidindo com as regiões convectivas identificadas nas imagens. No domínio com maior resolução horizontal, Figura 4.4(c), o núcleo precipitante também é bem representado, somente um pouco deslocado para leste da região convectiva.

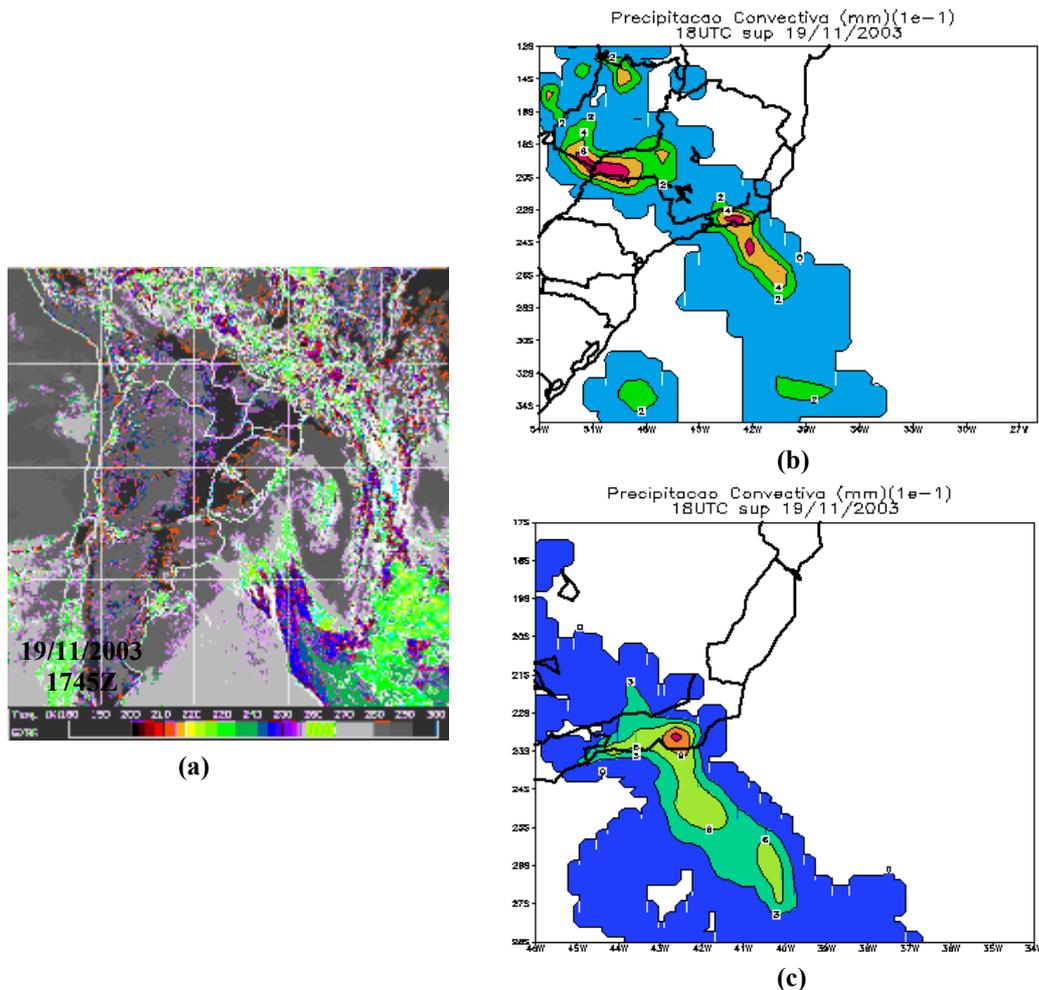


Figura 4.4 – Comparação entre (a) imagem infravermelha de satélite geostacionário com a temperatura do topo das nuvens realçada, (b) precipitação convectiva simulada no domínio 1 e (c) precipitação convectiva simulada no domínio 2.

A fim de analisar o desempenho do modelo quando da ocorrência da máxima atividade elétrica verificada durante a tempestade, foi escolhida a imagem das 2110 UTC (Figura 4.3(e), rerepresentada como Figura 4.5(a)) próxima, mas não equivalente, ao horário das 19 horas local, devido às falhas existentes na seqüência. Um núcleo de intensa convecção com formato circular muito bem definido sobre o Estado do Rio de Janeiro foi identificado a partir da área mais branca da imagem infravermelha em tons de cinza. Atividade convectiva também pôde ser localizada em grande parte de Minas Gerais e norte e leste de Goiás. Novamente, conforme a Figura 4.5(b), a precipitação convectiva, agora mais intensa, está associada à frente fria orientada no sentido noroeste–sudeste. O núcleo precipitante mais forte está posicionado sobre o Rio de Janeiro em concordância com a imagem de satélite. A precipitação prevista para o sul de Goiás não está coerente com a localização da atividade convectiva neste Estado. Tal fato pode estar relacionado à defasagem temporal de 40 minutos

entre a imagem de satélite e o campo simulado. A Figura 4.5(c) mostra intensa precipitação convectiva especificamente sobre o núcleo de maior atividade convectiva com boa precisão espacial.

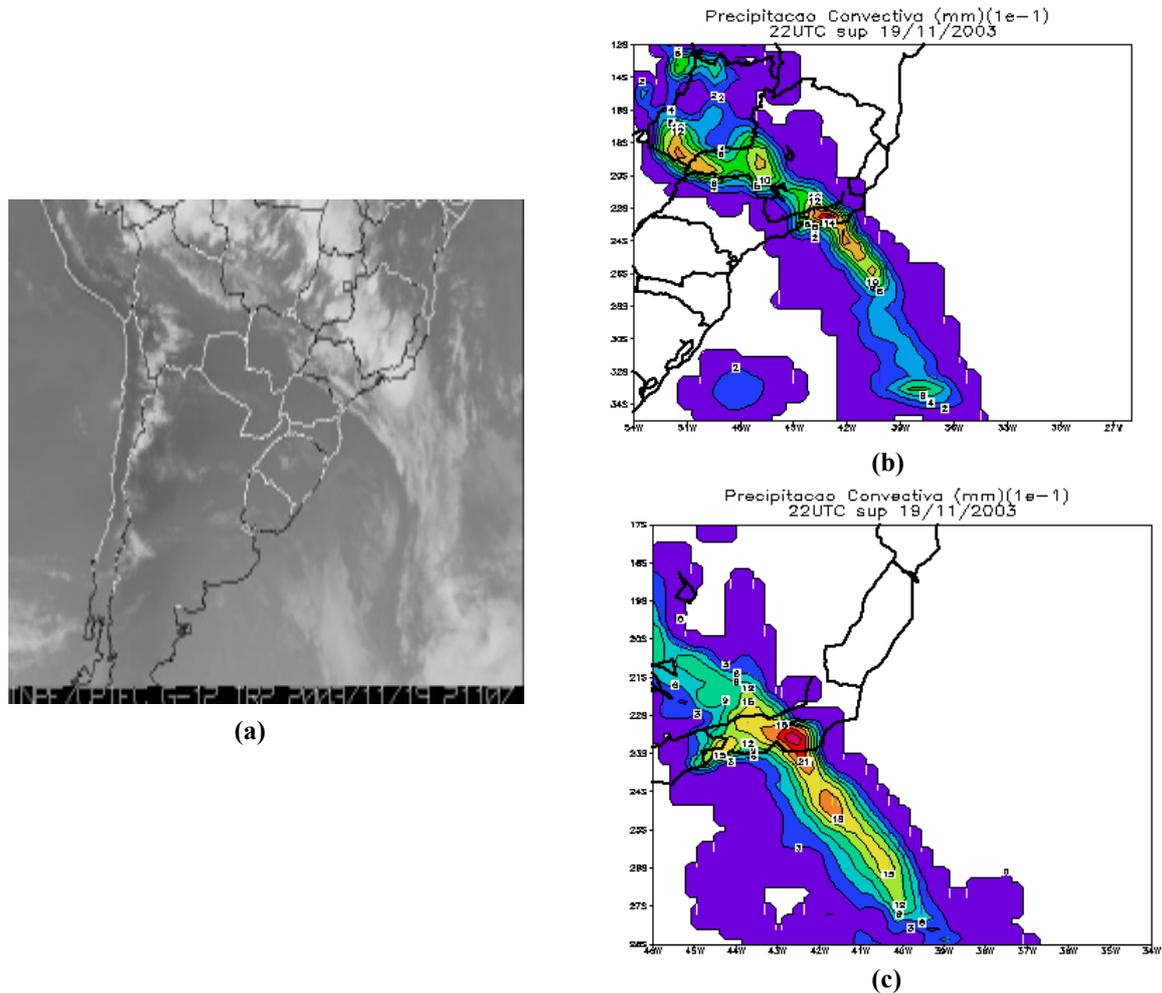


Figura 4.5 – Comparação entre (a) imagem infravermelha de satélite geostacionário em tons de cinza, (b) precipitação convectiva simulada no domínio 1 e (c) precipitação convectiva simulada no domínio 2.

Visando ao objetivo proposto nesta dissertação de elaborar um estudo para o desenvolvimento de um sistema de previsão de descargas elétricas atmosféricas para a região costeira do Estado do Rio de Janeiro, a partir da geração de correlações entre dados de descargas elétricas atmosféricas e campos simulados de variáveis meteorológicas, serão discutidas análises correspondentes a horários anteriores à máxima atividade elétrica da tempestade ocorrida às 19 horas local. Deste modo, a Figura 4.6 mostra o comportamento dos campos simulados às 15 horas local (18 UTC), horário em que iniciara a tempestade. Na Figura 4.6(a), observa-se um núcleo de forte convergência no litoral norte do Estado de São

Paulo, com valores em módulo maiores que $2,4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, indicando atividade convectiva intensa na região associada à passagem do sistema frontal. Praticamente em todo o Estado do Rio de Janeiro e diagonalmente sobre o Oceano Atlântico há convergência de massa em superfície. Um núcleo divergente de $0,8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ está posicionado sobre o Rio de Janeiro em altos níveis na atmosfera, Figura 4.6(b), em interação com a convergência presente na superfície. Uma grande massa úmida na Figura 4.6(c) estendeu-se desde o Oceano Atlântico até o litoral dos Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. A Figura 4.6(d), em 850 mb, mostra uma faixa de umidade coincidente com a posição da frente fria neste horário, desde o sudoeste de Minas Gerais, passando por grande parte do Rio de Janeiro até o oceano, com valores variando entre 10 g/kg e 13 g/kg.

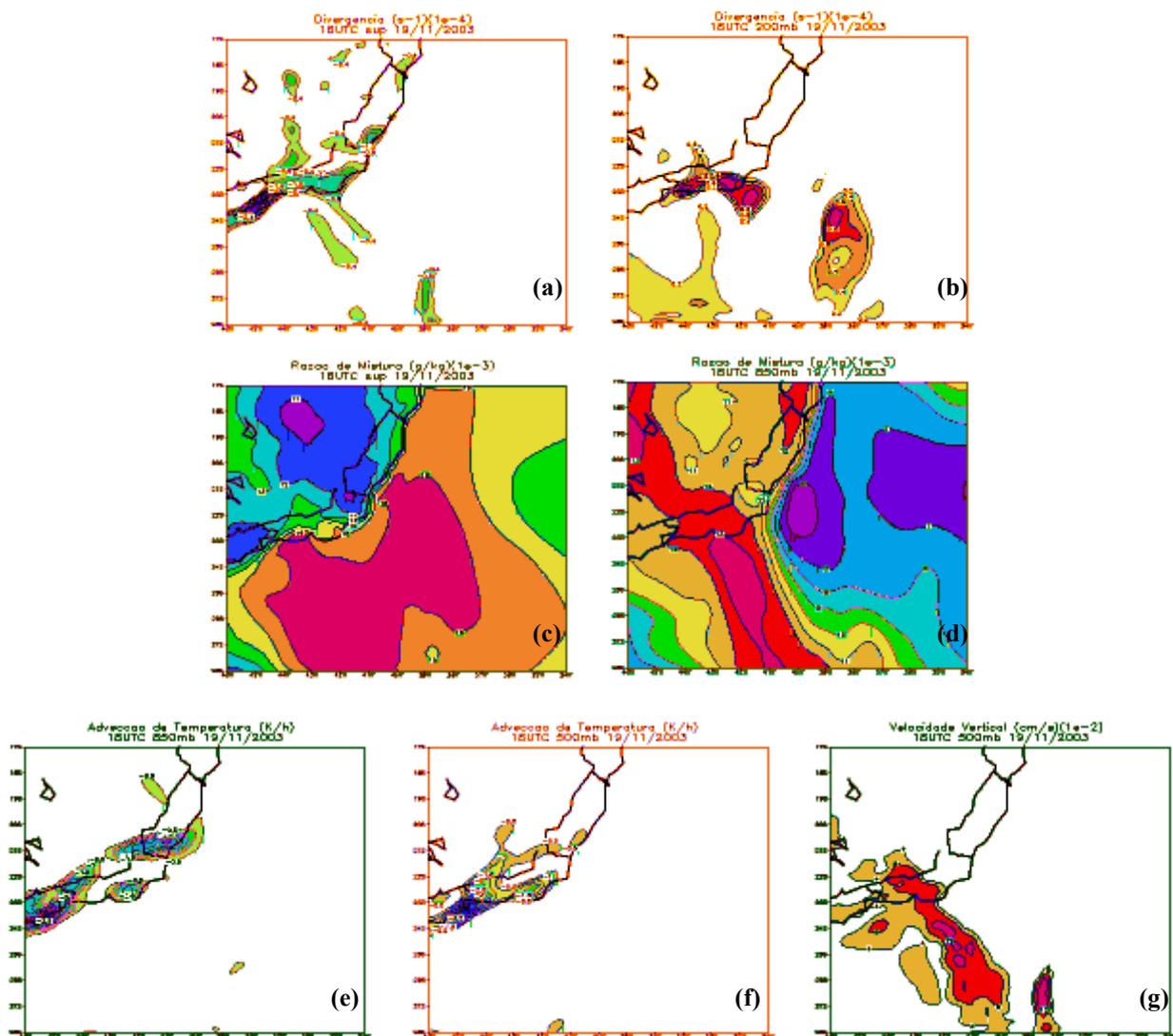


Figura 4.6 – Simulações das 18 UTC da divergência, em superfície (a) e 200 mb (b), razão de mistura, em superfície (c) e 850 mb (d), advecção de temperatura, em 850 (e) e 500 mb (f), e velocidade vertical, em 500 mb (g).

Em 850 mb, conforme mostra a Figura 4.6(e), observa-se dois núcleos de grande advecção negativa, com valores acima de -3 K/h, a nordeste de São Paulo e no sul do Espírito Santo. Esta advecção de ar frio faz com que a temperatura da camada passe a diminuir mais rapidamente com a altitude, gerando instabilidade. Em 500 mb, Figura 4.6(f), ocorre a intensificação do núcleo de advecção de ar frio localizado entre São Paulo e Rio de Janeiro. A velocidade vertical, na Figura 4.6(g), ao longo do sistema frontal apresenta movimento ascendente com valores de até 12 cm/s.

A Figura 4.7 apresenta o comportamento das variáveis meteorológicas para as 18 horas local (21 UTC), uma hora antes da ocorrência da máxima atividade das descargas elétricas atmosféricas.

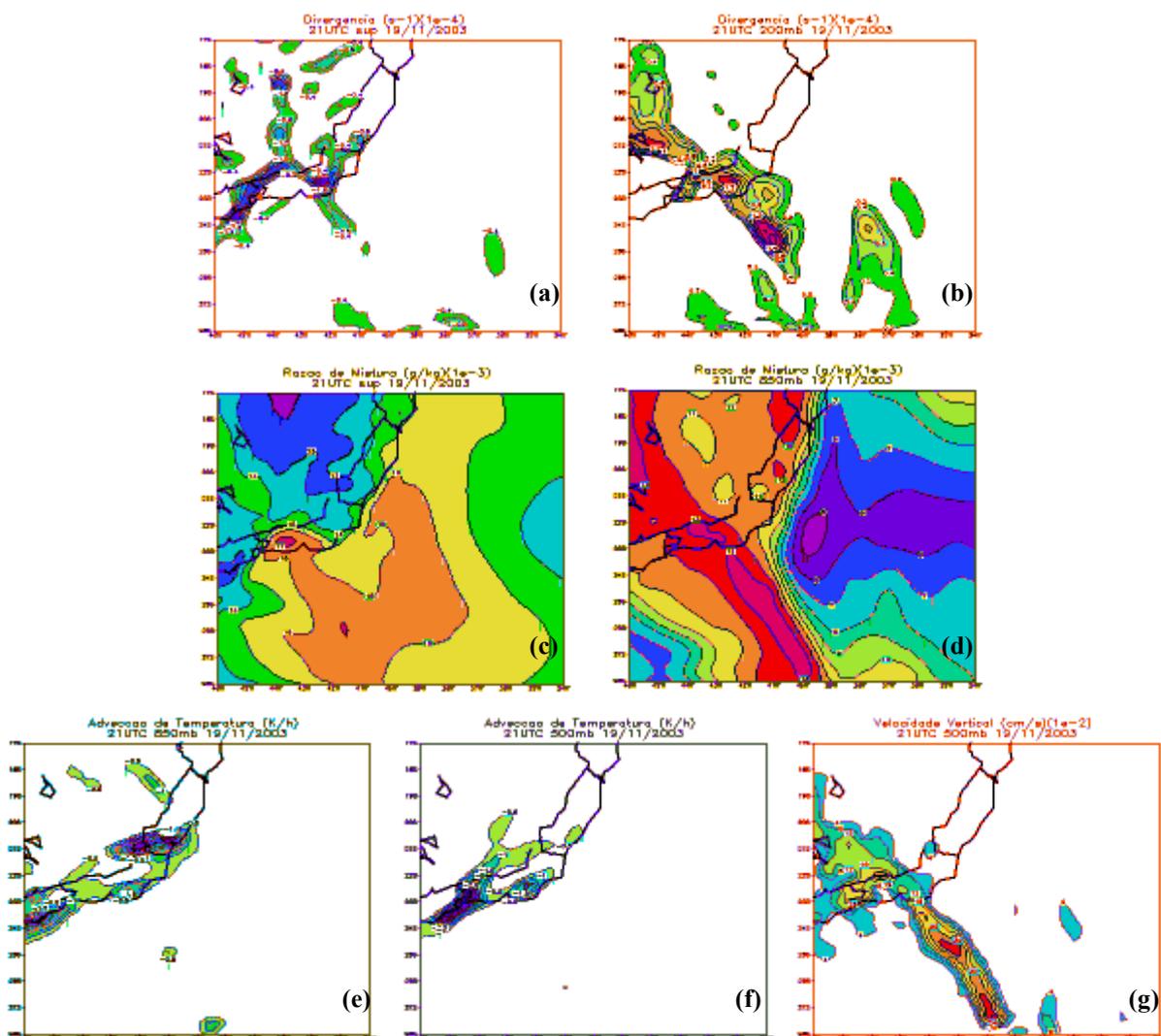


Figura 4.7 – Simulações das 21 UTC da divergência, em superfície (a) e 200 mb (b), razão de mistura, em superfície (c) e 850 mb (d), advecção de temperatura, em 850 (e) e 500 mb (f), e velocidade vertical, em 500 mb (g).

No campo divergência em superfície, observa-se na Figura 4.7(a) dois núcleos com convergência de massa de valores superiores em módulo a $1,8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, posicionados um ainda a nordeste de São Paulo e outro no centro do Estado do Rio de Janeiro, assegurando a continuação da atividade convectiva nesta região. Sobre Minas Gerais há também convergência favorável para a convecção identificada na imagem de satélite. Em 200 mb, na Figura 4.7(b), percebe-se divergência superior a $1,4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ acompanhando a banda frontal. A massa úmida mostrada na simulação das 18 UTC para a superfície intensificou-se com valores variando entre 14 e 17 g/kg, conforme a Figura 4.7(c), enquanto que, em 850 mb, na Figura 4.7(d), a faixa de umidade manteve as mesmas características. Passadas três horas, na Figura 4.7(e), percebe-se o enfraquecimento do núcleo de advecção de ar frio a nordeste de São Paulo e a intensificação do núcleo localizado no sul do Espírito Santo com dois centros de máxima em que a temperatura diminui cerca de 1 K a cada hora. Em 500 mb, na Figura 4.7(f), nota-se que o transporte horizontal de ar frio associado à passagem do sistema frontal desintensificou-se. A velocidade vertical na Figura 4.7(g) apresenta valores bastante elevados de 24 cm/s sobre o Oceano Atlântico e de até 18 cm/s no continente, indicando intenso movimento ascendente em regiões com atividade convectiva mostradas na imagem de satélite.

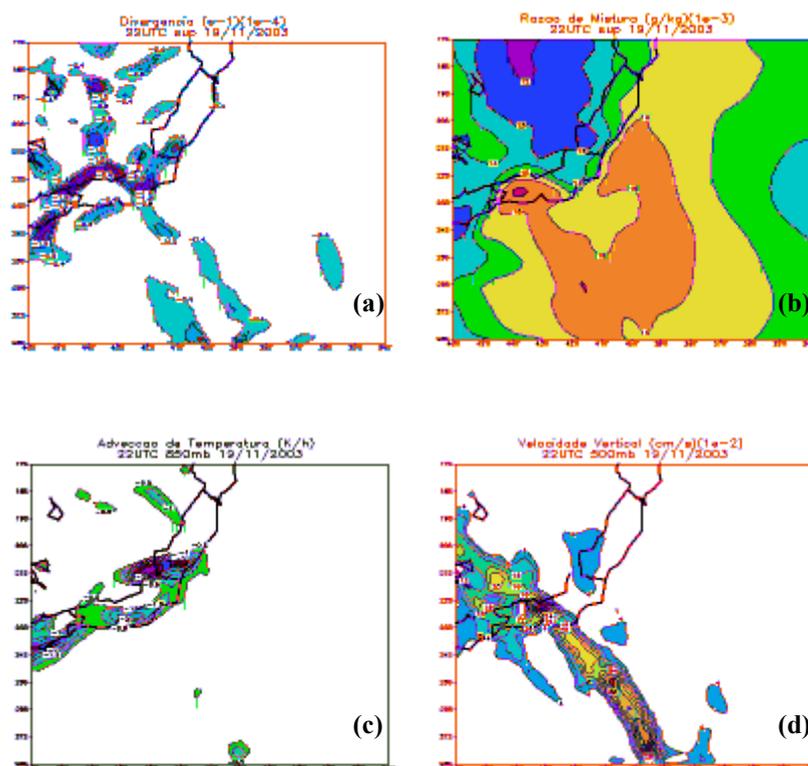


Figura 4.8 – Simulações das 22 UTC da divergência em superfície (a), razão de mistura em superfície (b), advecção de temperatura em 850 mb (c) e velocidade vertical em 500 mb (d).

Segundo a análise das descargas elétricas atmosféricas, às 19 horas local, ocorreu o pico de atividade elétrica da tempestade. As simulações para as 22 UTC com características significativas são mostradas na Figura 4.8 acima. A convergência em superfície, na Figura 4.8(a), aumentou principalmente no centro do Rio de Janeiro e no sudoeste de Minas Gerais onde a atividade convectiva foi mais intensa e as descargas atmosféricas ocorreram. A massa úmida ingressou no continente dominando a metade sul do Estado do Rio de Janeiro com valores entre 16 e 17 g/kg, como pode ser visto na Figura 4.8(b). Os núcleos de advecção fria, na Figura 4.8(c), sobre Espírito Santo e Rio de Janeiro intensificaram-se em 850 mb atingindo valores de -3 e -2 K/h, respectivamente. A Figura 4.8(d) mostra que o movimento ascendente alcançou intensidade superior a 24 cm/s no centro do Estado do Rio de Janeiro, retratando a forte atividade convectiva aí presente.

4.2.4 Tratamento das Saídas de Simulação

Assim como a tempestade do dia 19 de novembro de 2003, outros eventos, identificados e definidos a partir das descargas elétricas atmosféricas entre março de 2002 e fevereiro de 2004, foram selecionados e igualmente simulados no modelo MM5, com a finalidade de correlacionar o estado dinâmico da atmosfera durante sua ocorrência. Inconveniente seria relacioná-los todos, inclusive devido ao tratamento aplicado às suas saídas de simulação para posterior manipulação das técnicas de inteligência artificial. Por isso, o procedimento necessário será mostrado a partir de exemplos neste estudo de caso e no próximo.

Após selecionadas as tempestades mais severas e analisada a distribuição espacial das descargas elétricas associadas, núcleos dominando uma quantidade significativa de descargas e apresentando formato bem configurado tiveram suas coordenadas geográficas e número de descargas determinados. A Figura 4.9 abaixo mostra alguns dos núcleos escolhidos na tempestade deste estudo de caso. O primeiro representado pela Figura 4.9(a) está posicionado entre 21.2° e 22.8° S e 43° e 44° O, somando 2.439 descargas, 93% do total registrado às 17 horas local. O próximo, mostrado na Figura 4.9(b), localiza-se entre 21.1° e 22.2° S e 41.5° e 42.8° O, detendo 83% das descargas das 22 horas local. O último está entre 21° e 22.1° S e 41.2 e 42.3° O, totalizando 881 descargas, 88% do total das 23 horas local, como pode ser visto na Figura 4.9(c).

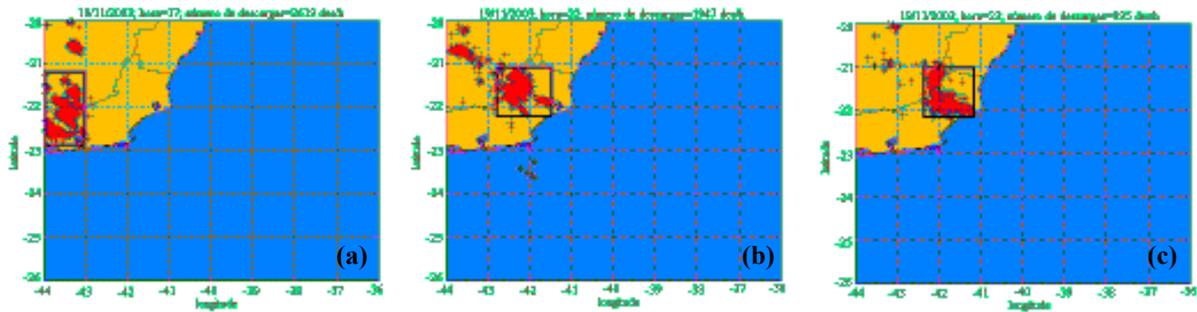


Figura 4.9 – Núcleos escolhidos na tempestade do dia 19 de novembro de 2003.

De posse destas informações, a área total de cada variável meteorológica em cada nível de pressão nas saídas de simulação geradas pelo GrADS em matriz de 150x150 pontos para o domínio com resolução horizontal de 30 km foi primeiramente visualizada em gráfico tridimensional, a fim de melhor estudar espacialmente suas variações. A seguir esta área foi recortada conforme as coordenadas geográficas do núcleo e imediatamente interpolada em duas dimensões usando expansão em Série de Taylor truncada na primeira ordem para uma matriz de 11x11 pontos. Tal tratamento, repetido para todos os núcleos de descargas determinados nas tempestades selecionadas, representou a tentativa de encontrar, para o tempo de uma hora de antecedência do aparecimento do núcleo, correlações entre as variáveis de estado da simulação e a ocorrência futura das descargas elétricas. Por exemplo, para o núcleo de descargas atmosféricas ocorrido às 17 horas local na tempestade deste estudo de caso, o procedimento das áreas total, recortada e interpolada foi aplicado aos resultados das variáveis previstas para as 16 horas local (19 UTC, simulação 1), conforme mostra a Figura 4.10. Da mesma forma, para os núcleos das 22 e 23 horas local, a manipulação matemática das áreas do domínio foi realizada nas saídas das 21 horas local (00 UTC, simulação 1) e 22 horas local (01 UTC, simulação 2), respectivamente.

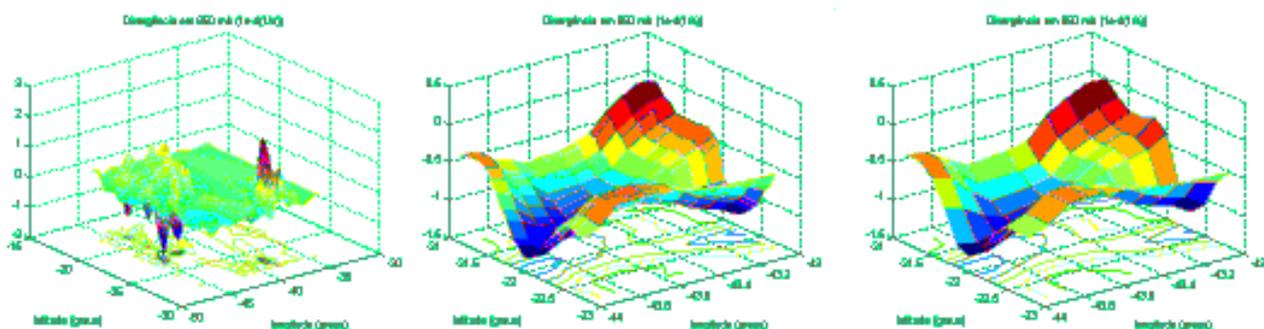
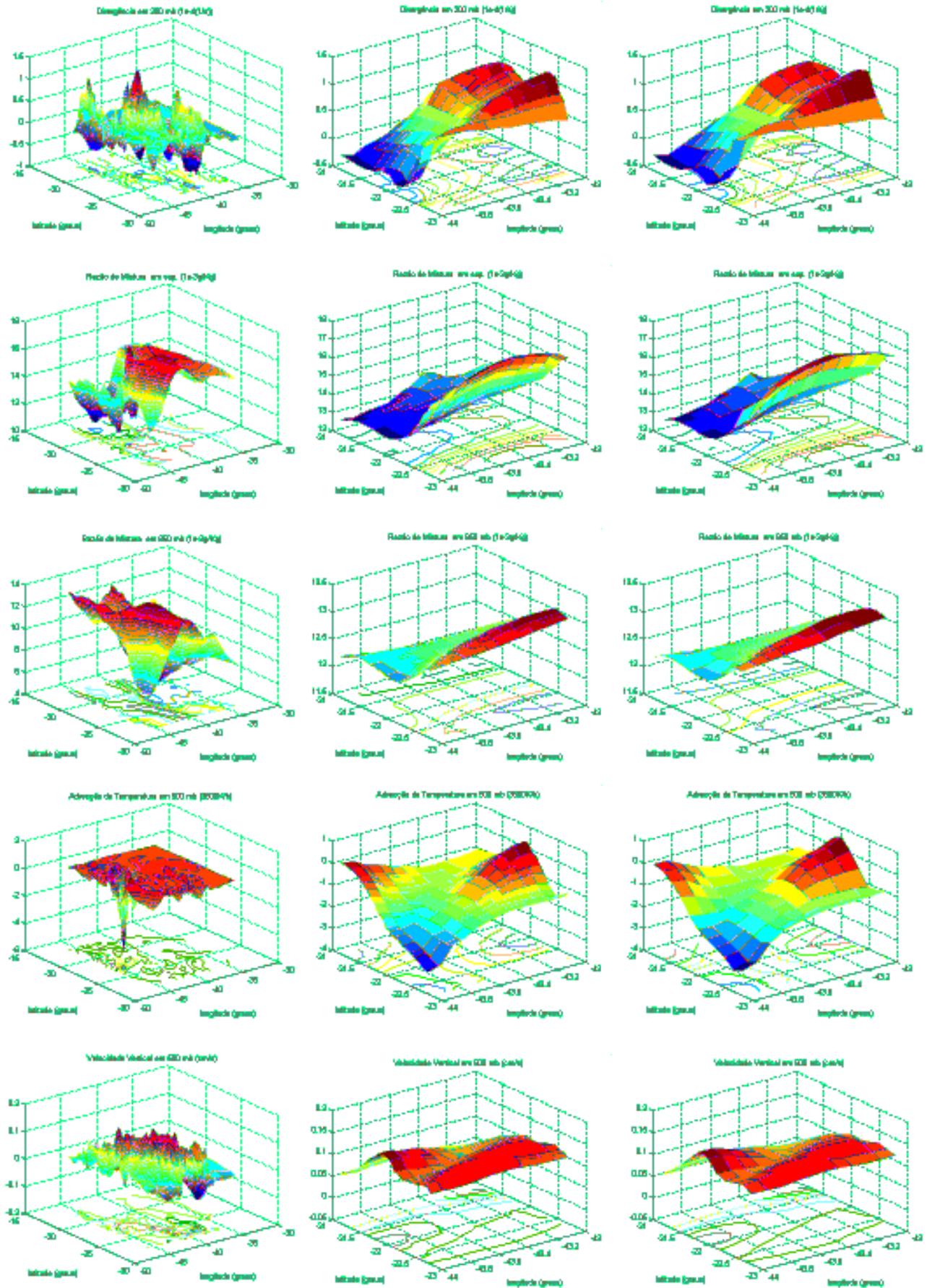


Figura 4.10 – Área total, área recortada e área recortada interpolada para uma matriz 11x11 pontos de, respectivamente, divergência em 850 e 200 mb, razão de mistura em superfície e 850 mb, advecção de temperatura em 500 mb e velocidade vertical em 500 mb.



Continuação da Figura 4.10.

4.3 CASO: 12 DE DEZEMBRO DE 2003

4.3.1 Análise das Descargas Elétricas Atmosféricas

Dentre os dezoito eventos classificados como nível 2 entre março de 2002 e fevereiro de 2004, a tempestade ocorrida no dia 12 de dezembro de 2003 foi aquela que apresentou a maior quantidade de descargas elétricas atmosféricas durante uma hora. Conforme o gráfico da Figura 4.11, o fenômeno teve início às 16 horas do dia 12 com cento e sessenta e nove descargas e, fim às 5 horas do dia 13 com o registro de apenas cinco descargas, perfazendo um total de 15.173 descargas durante suas quatorze horas de atividade elétrica. As seis primeiras horas de ocorrência da tempestade concentraram 87% do total de descargas elétricas detectadas, mantendo uma média de aproximadamente 2.205 descargas por hora. Às 19 horas, 2.722 descargas antecederam o máximo de 2.998 descargas elétricas ocorrido às 20 horas do dia 12 de dezembro. Duas horas depois, a tempestade registrou somente 843 descargas, ou seja, um rápido decréscimo de 72% em relação ao pico de máximo. Apenas 3% do número total de descargas foram registradas nas primeiras horas do dia seguinte.

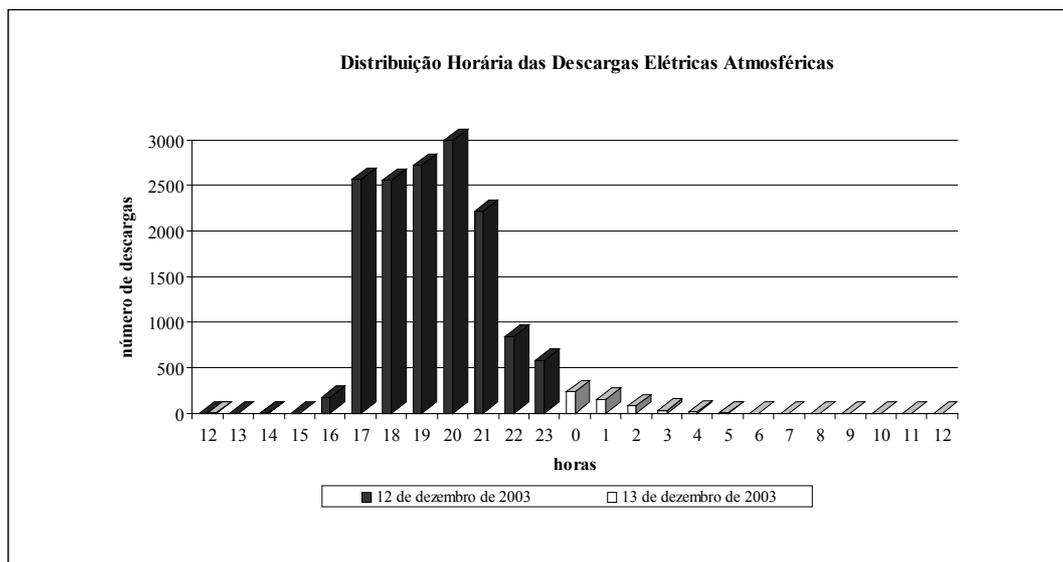


Figura 4.11 – Distribuição horária das descargas elétricas atmosféricas para o evento de tempestade ocorrido nos dias 12 e 13 de dezembro de 2003.

A Figura 4.12 mostra a distribuição espacial da atividade elétrica associada ao evento de tempestade durante todo o seu estágio de vida. Às 16 horas do dia 12 de dezembro, na Figura 4.12(a), observa-se a formação de dois pequenos núcleos distintos de descargas atmosféricas sobre o centro dos Estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro. Imediatamente uma hora depois (Figura 4.12(b)), além da intensificação dos núcleos recém formados, o

surgimento de outro bem definido no sul do Rio de Janeiro contribuiu para que o sistema de tempestade ingressasse em sua fase mais intensa com 2.566 descargas. Apesar de às 18 horas (Figura 4.12(c)) os núcleos terem expandido em tamanho, praticamente interligando-se, percebe-se que, na hora seguinte (Figura 4.12(d)), as descargas elétricas reuniram-se novamente em grupamentos individuais com formatos desiguais ao longo de uma banda localizada na direção noroeste–sudeste cobrindo parte dos Estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro. Às 20 horas, como mostra a Figura 4.12(e), a tempestade atingiu o máximo de 2.998 descargas/hora, com a permanência das descargas elétricas em núcleos propagando-se em conjunto para nordeste. Assim como no estudo de caso anterior, as diferentes posições uniformemente assumidas por tais núcleos até a sua total desintensificação representam possíveis indicadores da direção de deslocamento do fenômeno meteorológico associado. O sistema de tempestade começou o seu processo de enfraquecimento às 21 horas com a localização de grande parte das descargas atmosféricas sobre o sudeste de Minas Gerais (Figuras 4.12(f) e 4.12(g)) e, devido ao seu deslocamento para nordeste, sobre o Estado do Espírito Santo, até sua total dissipação nas primeiras horas do dia 13 de dezembro (Figura 4.12(h) a 4.12(n)).

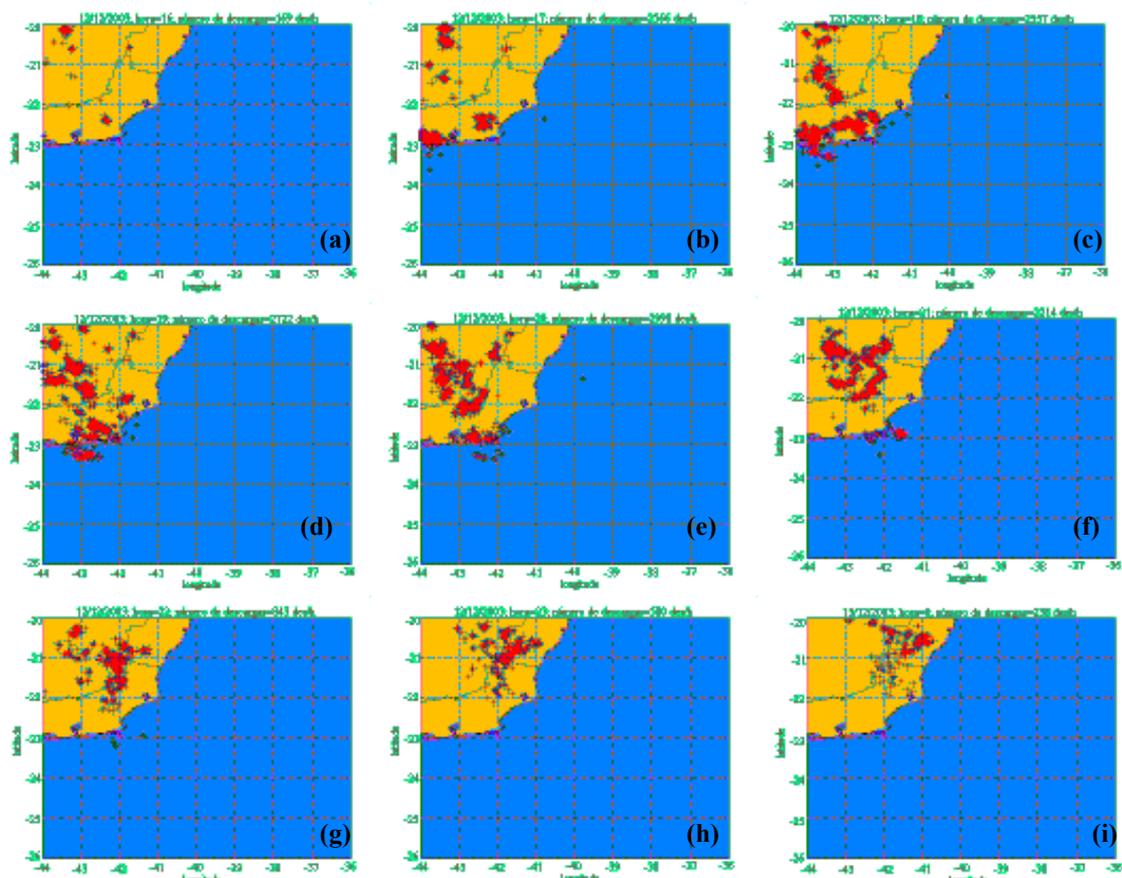
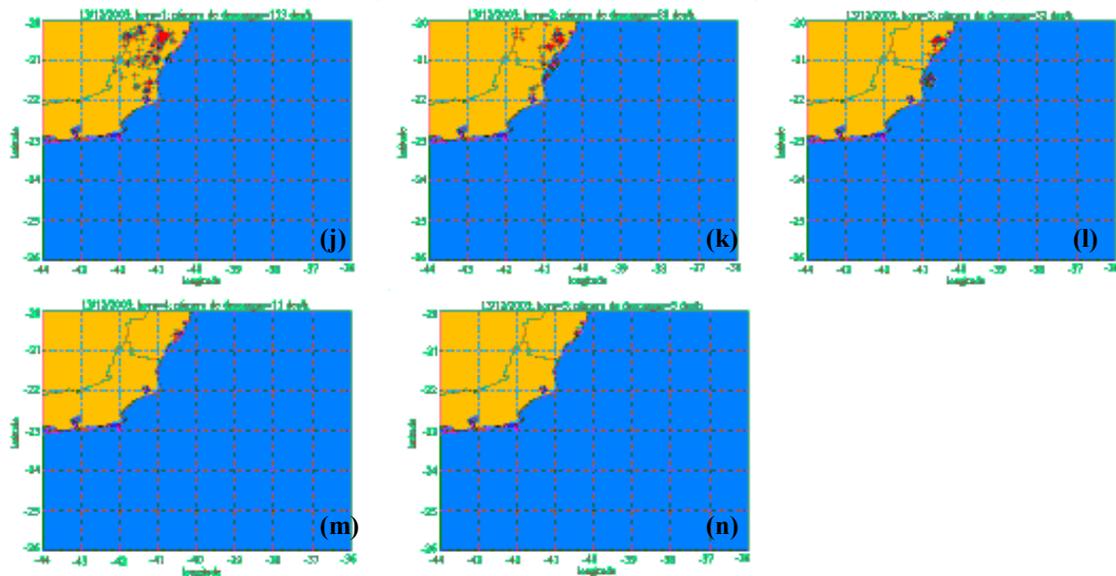


Figura 4.12 – Distribuição espacial das descargas elétricas atmosféricas para o evento de tempestade ocorrido nos dias 12 e 13 de dezembro de 2003.



Continuação da Figura 4.12.

4.3.2 Análise das Imagens de Satélite

Como no primeiro estudo de caso apresentado, serão utilizadas imagens no canal infravermelho do satélite geostacionário GOES-12 a fim de identificar qual condição meteorológica estava associada às descargas elétricas atmosféricas e de ainda verificar a eficiência dos sensores de FURNAS Centrais Elétricas S.A. com relação à localização dos dados obtidos. Também participarão da discussão informações sobre as perturbações atmosféricas que ocorreram no Brasil durante o mês de Dezembro, fornecidas pelo Boletim Climanálise.

A Figura 4.13 a seguir apresenta a seqüência de imagens de satélite correspondente ao período de ocorrência do evento de tempestade analisado neste estudo de caso. Novamente, apesar de não estarem igualmente intervaladas, foi possível constatar o fenômeno meteorológico relacionado à atividade elétrica e aferir com precisão a localização das descargas elétricas. Na Figura 4.13(a) do dia 12 de dezembro de 2003 às 1739 UTC, observa-se uma frente fria atuando em parte das regiões Sul e Sudeste do Brasil com um vórtice ciclônico associado a sua extremidade sobre o Oceano Atlântico. Segundo o Boletim Climanálise (2003a), este sistema frontal ingressou no litoral de Santa Vitória do Palmar – RS no dia 11 de dezembro, deslocando-se no dia seguinte para o litoral do Estado de São Paulo. Três pequenos núcleos convectivos podem ser identificados na metade sul de Minas Gerais e

outros dois, sobre o Estado do Rio de Janeiro, assumindo proporções semelhantes, conforme também mostrado na imagem das 1809 UTC (Figura 4.13(b)) .

Passada uma hora e meia, às 1939 UTC (Figura 4.13(c)), é possível perceber a intensificação da atividade convectiva principalmente nos núcleos localizados sobre o Rio de Janeiro, visto as áreas mais brancas e brilhantes na imagem, e, às 2009 UTC (Figura 4.13(d)), o início do processo de unificação destes núcleos com aqueles posicionados sobre o sul de Minas Gerais. Conforme a Figura 4.12(b), a localização dos dados detectados pelos sensores de FURNAS para as 17 horas local coincide com as regiões de forte convecção apontadas na imagem de satélite para o mesmo horário.

Às 2039 UTC (Figura 4.13(e)), apesar de o sistema frontal encontrar-se bastante enfraquecido sobre o continente, afetando apenas o litoral dos Estados de Santa Catarina, Paraná e São Paulo, a conjunção de todos os núcleos observados originou duas regiões distintas de forte convecção, visto a temperatura nos topos atingindo seus valores mais negativos, posicionadas no sudeste de Minas Gerais e no centro do Rio de Janeiro. Em seguida, às 2109 UTC (Figura 4.13(f)), tal configuração transforma-se em apenas um único núcleo bem definido de intensa atividade convectiva abrangendo o sudeste do Estado de Minas Gerais e grande parte do território do Estado do Rio de Janeiro, em plena concordância com a distribuição espacial das descargas elétricas das 18 horas local mostrada na Figura 4.12(c). Praticamente meia hora depois (Figura 4.13(g)), as características convectivas na região permanecem constantes, até que, às 2209 UTC (Figura 4.13(h)), percebe-se uma ramificação do núcleo para nordeste com o deslocamento do seu centro de convecção aproximando-se do sudoeste do Espírito Santo. Às 2239 UTC (Figura 4.13(i)), todo o Estado do Rio de Janeiro e o sudeste de Minas Gerais encontram-se sob a influência de intensa convecção a qual, às 2309 UTC (Figura 4.13(j)), horário da máxima atividade elétrica da tempestade, apresenta boa correlação de posição com a região de incidência das descargas atmosféricas (Figura 4.12(e)).

A seqüência de imagens representada pelas Figuras 4.13(k) a 4.13(p) acompanha a dissipação parcial do sistema frontal sobre o continente, bem como o enfraquecimento e o deslocamento sucessivo para nordeste do núcleo convectivo associado, atingindo o sul e o sudoeste do Estado do Espírito Santo. Comparações realizadas entre as posições assumidas pelas descargas elétricas e a região localizada de forte convecção mostrada nestas imagens de

satélite permitiram bem correlacionar as informações e monitorar o desenvolvimento da tempestade.

Durante as primeiras horas do dia 13 de dezembro de 2003, Figura 4.3(q) a 4.3(z), pode ser verificada a completa dissipação do sistema frontal e da atividade convectiva associada sobre o continente. Novamente neste estudo de caso a detecção dos sensores de FURNAS Centrais Elétricas S.A. foi consideravelmente eficiente e confiável, visto que as posições dos dados estavam de acordo com as condições meteorológicas presentes.

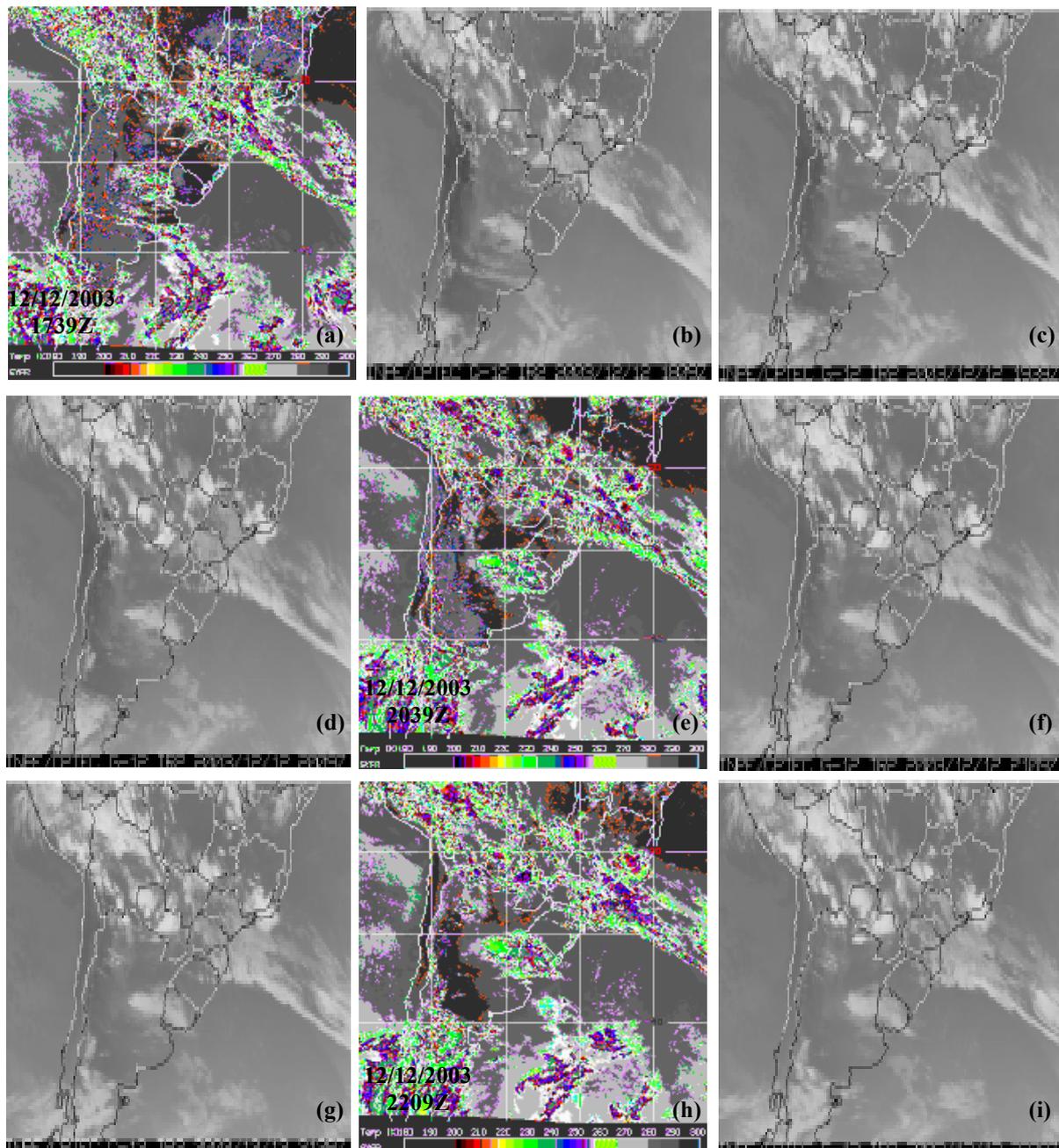
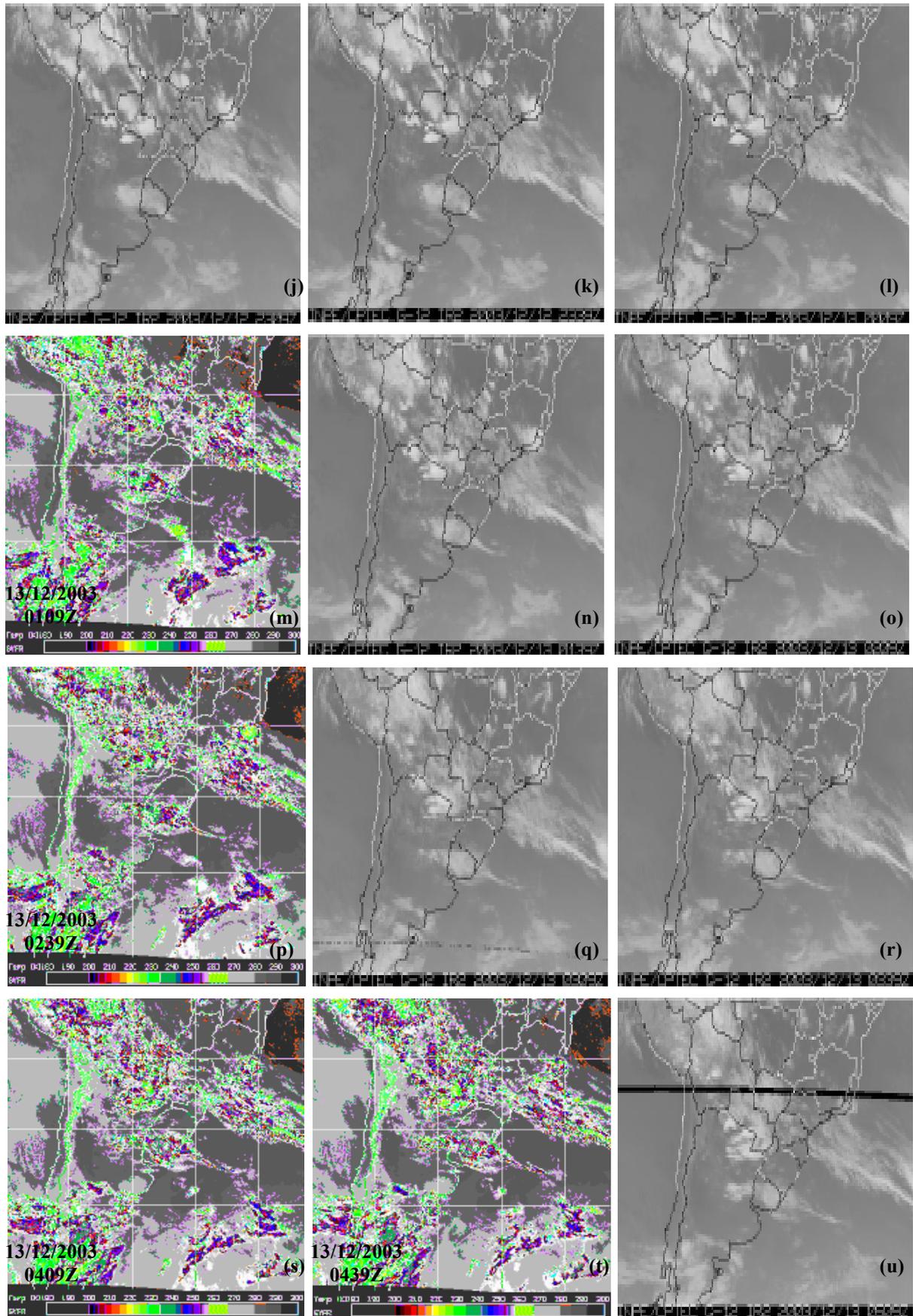
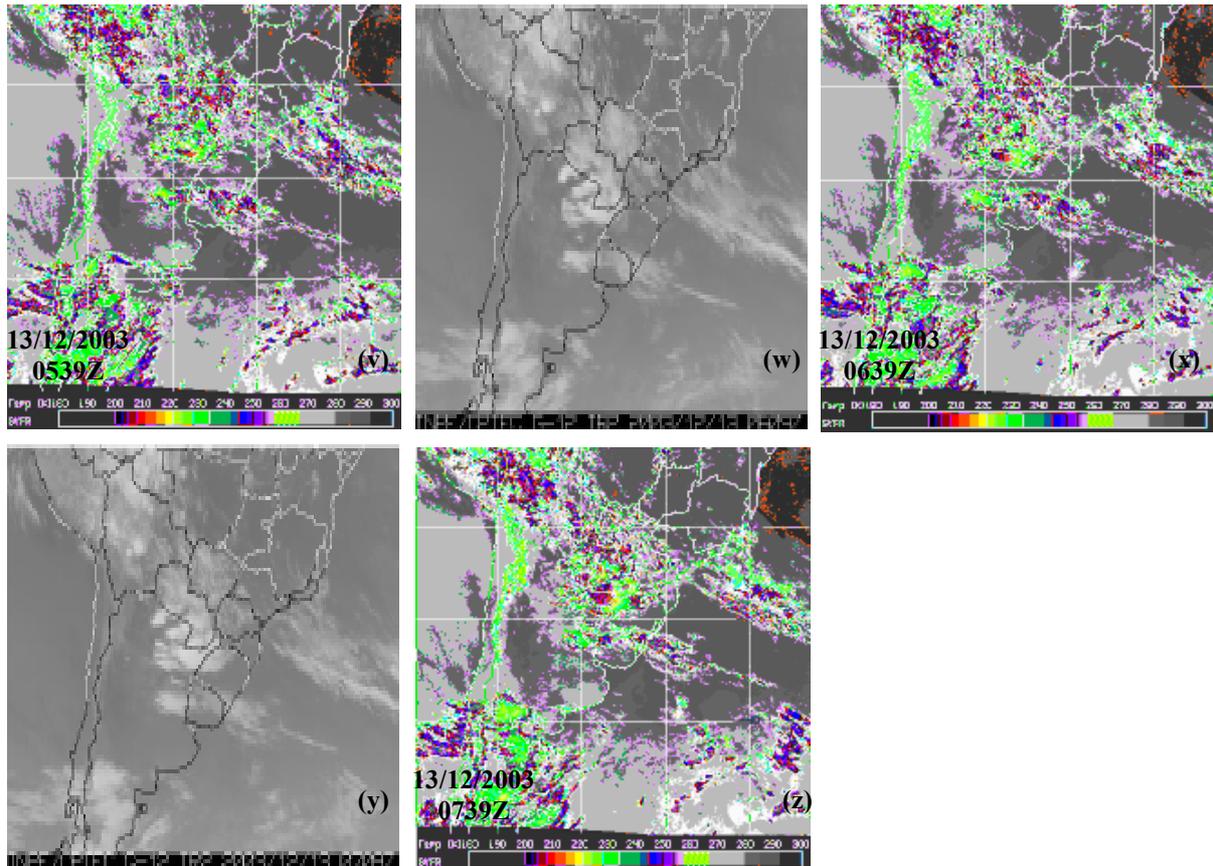


Figura 4.13 – Seqüência de fragmentos de imagens infravermelhas de satélite geoestacionário GOES-12 referente à tempestade em estudo (continuação nas páginas seguintes).



Continuação da Figura 4.13.



Continuação da Figura 4.13.

4.3.3 Análise das Simulações com o Modelo de Mesoescala MM5

Assim como no estudo de caso anterior, a análise do comportamento das variáveis meteorológicas relacionadas à tempestade ocorrida no dia 12 de dezembro de 2003 deu-se a partir da realização de duas simulações com o modelo numérico MM5, com duração de doze horas cada de modo a cobrir todo o período de atividade elétrica. A Tabela 4.2 abaixo mostra o horário de início e a data das respectivas simulações.

Tabela 4.2 – Horários das simulações realizadas no modelo MM5.

| | Simulação 1 | | Simulação 2 | |
|---------|-------------|------------------------|-------------|------------------------|
| | Hora | Dia | Hora | Dia |
| Início | 12 UTC | 12 de dezembro de 2003 | 00 UTC | 13 de dezembro de 2003 |
| Término | 00 UTC | 13 de dezembro de 2003 | 12 UTC | 13 de dezembro de 2003 |

Inicialmente serão mostradas comparações entre os campos simulados da variável precipitação convectiva acumulada em superfície para ambos os domínios de 90 e 30 km de

resolução horizontal e as imagens do satélite geostacionário, com a finalidade de tentar aferir, também para este estudo de caso, o desempenho do modelo MM5. A seguir resultados de divergência, em superfície e 200 mb, razão de mistura, em superfície e 850 mb, advecção de temperatura, nos níveis de pressão de 850 e 500 mb, e velocidade vertical, em 500 mb, para o domínio com resolução horizontal de 30 km, serão apresentados para horários de interesse da tempestade, buscando correlacioná-los com a ocorrência das descargas elétricas atmosféricas e com a atividade convectiva associada ao sistema frontal identificado nas imagens de satélite.

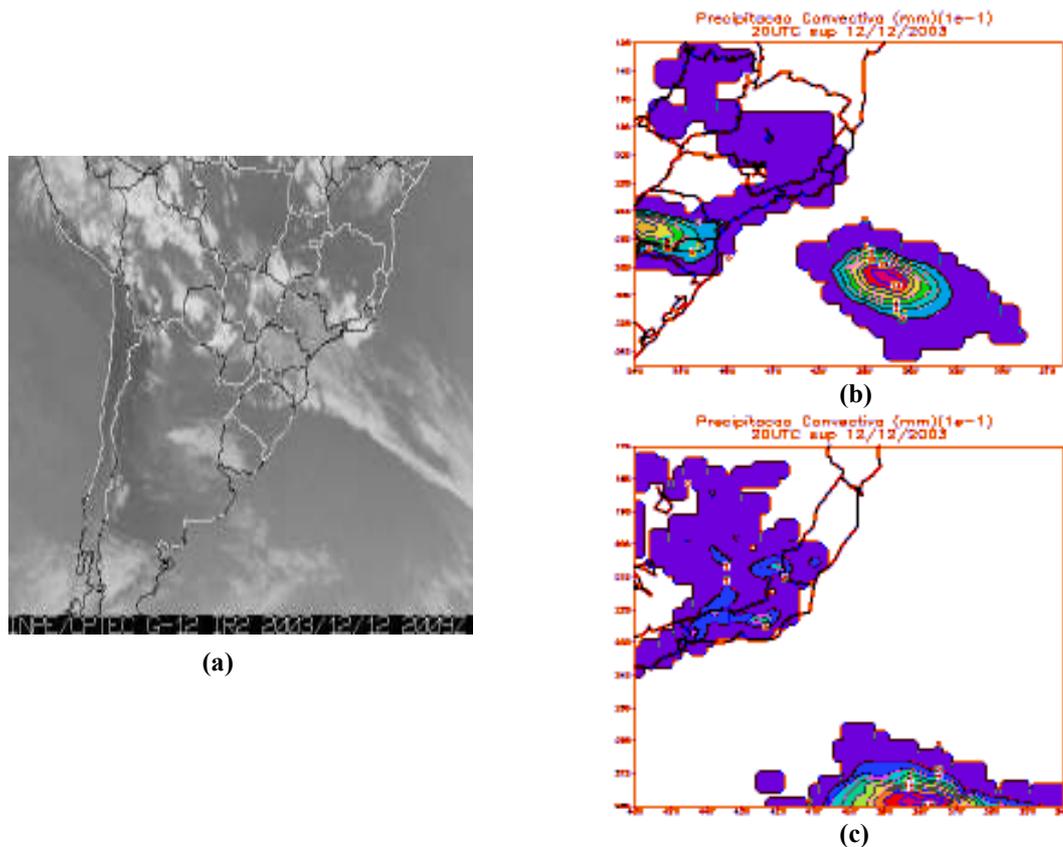


Figura 4.14 – Comparação entre (a) imagem infravermelha de satélite geostacionário em tons de cinza, (b) precipitação convectiva simulada no domínio 1 e (c) precipitação convectiva simulada no domínio 2.

A imagem de satélite das 2009 UTC (Figura 4.13(d)), reapresentada acima como Figura 4.14(a)), apresentou intensa atividade convectiva estendendo-se desde o sul e sudeste de Minas Gerais até grande parte do Estado do Rio de Janeiro, pouco penetrando o Oceano Atlântico. De acordo com a Figura 4.14(b), o modelo de mesoescala MM5 previu para as 20 UTC precipitação convectiva significativa no sudoeste do Estado do Paraná e no Oceano Atlântico, regiões ainda influenciadas pela ação do sistema frontal, porém, não coincidentes

com aquelas de forte convecção identificadas na imagem de satélite. No domínio com maior resolução horizontal, Figura 4.14(c), aparecem dois núcleos precipitantes de fraca intensidade, um no centro do Estado do Rio de Janeiro e outro a sudoeste do Espírito Santo, concordando espacialmente com a atividade convectiva observada. A princípio, os resultados do modelo MM5 para o domínio com 90 km de resolução horizontal não indicam uma boa correlação entre a intensidade e a localização espacial da precipitação convectiva e as características de convecção identificadas na imagem de satélite. Aparentemente a variável parece superestimada em regiões com ausência de atividade convectiva e subestimada na área de ocorrência das descargas elétricas em que a convecção mais intensa é evidente. Em toda extensão do sistema frontal não houve a previsão de incidência contínua de precipitação convectiva, mas, de um núcleo precipitante significativo provavelmente associado a sua extremidade no Oceano Atlântico.

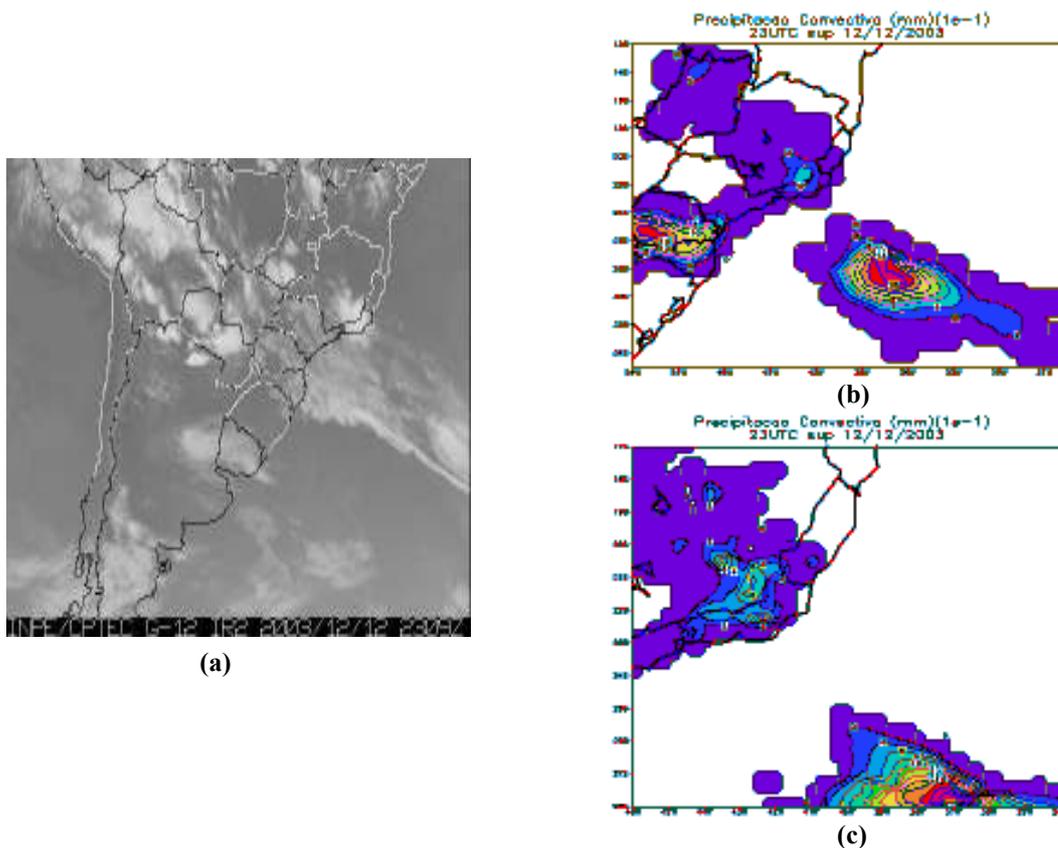


Figura 4.15 – Comparação entre (a) imagem infravermelha de satélite geostacionário em tons de cinza, (b) precipitação convectiva simulada no domínio 1 e (c) precipitação convectiva simulada no domínio 2.

Para verificar novamente o desempenho do modelo, foi escolhida a imagem das 2309 UTC (Figura 4.13(j)), representada acima como Figura 4.15(a)) quando da ocorrência da

máxima atividade elétrica durante a tempestade. Apesar do sistema frontal encontrar-se bastante enfraquecido sobre o continente, foi observada, a partir da área mais branca da imagem infravermelha em tons de cinza, convecção intensa disposta diagonalmente na região do sudeste de Minas Gerais e Estado do Rio de Janeiro. De acordo com a Figura 4.15(b), a precipitação convectiva prevista para as 23 UTC intensificou-se no sudoeste do Paraná, onde, segundo as imagens de satélite, não há praticamente a presença de nuvens. No sudeste de Minas Gerais constata-se um pequeno aumento na intensidade da variável convectiva. Já a Figura 4.15(c) mostra com precisão espacial a intensificação da precipitação sobre o núcleo convectivo identificado na imagem de satélite. De um modo geral, a precipitação convectiva quando simulada para o domínio com 90 km de resolução horizontal, em ambos exemplos mostrados, foi um tanto inconsistente com a situação meteorológica apresentada nas imagens de satélite. Entretanto, nos resultados do modelo para o domínio com 30 km de resolução horizontal, mostrou-se bem representada espacialmente.

A Figura 4.16 mostra o comportamento dos campos simulados às 16 horas local (19 UTC), horário em que iniciara a tempestade do dia 12 de dezembro de 2003. Na Figura 4.16(a), observa-se que o norte do Estado de São Paulo, grande parte do Estado do Rio de Janeiro e o sul/sudeste do Espírito Santo apresentam convergência de massa em superfície, indicando atividade convectiva na região. Apenas um pequeno núcleo divergente em 200 mb posicionado no centro do Rio de Janeiro aparece na Figura 4.16(b). Uma grande massa úmida, com valores variando entre 16 e 19 g/kg, conforme a Figura 4.16(c), está localizada desde o Oceano Atlântico até o litoral dos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro, em associação com o sistema frontal observado nas imagens de satélite. Em 850 mb, a Figura 4.16(d) mostra umidade superior a 14 g/kg em todo o Estado do Rio de Janeiro, sudeste de Minas Gerais e sul do Espírito Santo. Na Figura 4.13(e), observa-se um núcleo de advecção negativa com valores em módulo acima de 1,6 K/h no sudeste do Espírito Santo e outro menos intenso no litoral norte de São Paulo. Em 500 mb (Figura 4.16(f)), ocorre a intensificação deste último núcleo, com a predominância de advecção fria no norte de São Paulo e grande parte do Estado do Rio de Janeiro. O campo da velocidade vertical, Figura 4.16(g), indica pouco movimento ascendente sobre o continente, cuja localização coincide com a atividade convectiva identificada nas imagens de satélite e com a região de ocorrência das descargas elétricas atmosféricas.

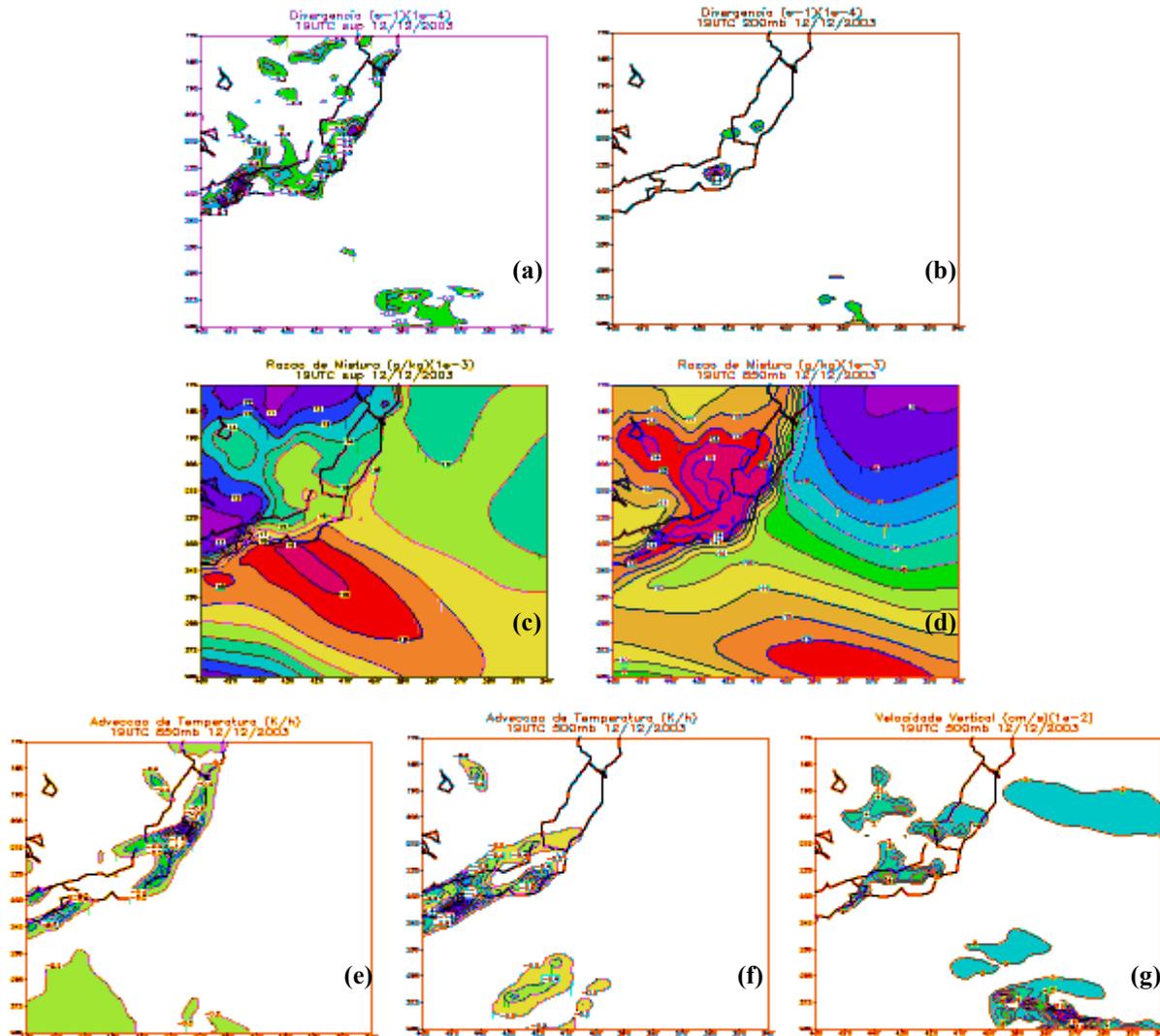


Figura 4.16 – Simulações das 19 UTC da divergência, em superfície (a) e 200 mb (b), razão de mistura, em superfície (c) e 850 mb (d), advecção de temperatura, em 850 (e) e 500 mb (f), e velocidade vertical, em 500 mb (g).

A Figura 4.17 apresenta o comportamento das variáveis meteorológicas para as 19 horas local (22 UTC), uma hora antes da ocorrência da máxima atividade das descargas elétricas atmosféricas. Observa-se, na Figura 4.17(a), o deslocamento para norte, inclusive estendendo-se sobre o sudeste de Minas Gerais, e a intensificação, com valores superiores em módulo a $1,8 \times 10^{-4} s^{-1}$, do núcleo convergente anteriormente localizado no norte de São Paulo. Constata-se também aumento da convergência em superfície no noroeste do Estado do Rio de Janeiro, acompanhando as observações da atividade convectiva nas imagens de satélite. Em altos níveis (Figura 4.17(b)), apenas dois núcleos divergentes estão posicionados lado a lado no sudeste de Minas Gerais. Assim como, em superfície (Figura 4.17(c)), a faixa de umidade alta permanece atuante no Oceano Atlântico mais próxima ao continente, em 850 mb (Figura

4.17(d)), no sudeste de Minas Gerais, em todo o Estado do Rio de Janeiro e em parte do Espírito Santo continuam predominado valores de umidade de até 16 g/kg. Na Figura 4.17(e), a intensidade do núcleo de advecção de ar frio no sul do Espírito Santo permanece constante. Em 500 mb, na Figura 4.17(f), enquanto que o núcleo de advecção negativa sobre o centro do Rio de Janeiro mantém as mesmas características, nota-se a temperatura diminuindo cerca de 1,6 K a cada hora no litoral norte de São Paulo. A velocidade vertical, na Figura 4.17(g), apresenta valores de até 14 cm/s no sudeste de Minas Gerais, assegurando a atividade convectiva na região, e superiores a 28 cm/s no Oceano Atlântico relativos ao sistema frontal observado.

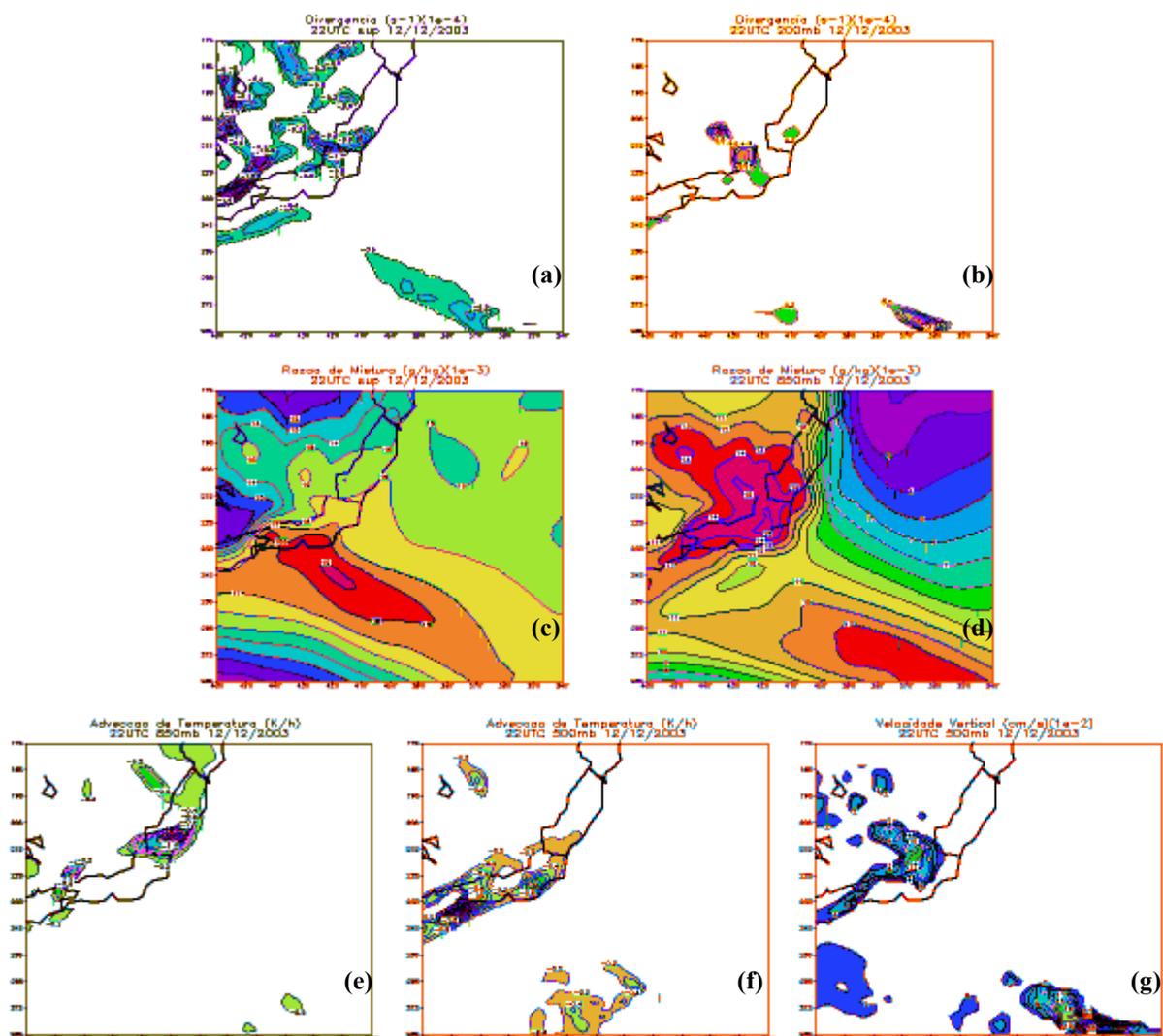


Figura 4.17 – Simulações das 22 UTC da divergência, em superfície (a) e 200 mb (b), razão de mistura, em superfície (c) e 850 mb (d), advecção de temperatura, em 850 (e) e 500 mb (f), e velocidade vertical, em 500 mb (g).

Segundo a análise das descargas elétricas atmosféricas, às 20 horas local, ocorreu o pico de atividade elétrica da tempestade. As simulações para as 23 UTC com características significativas são mostradas na Figura 4.18. A convergência em superfície, na Figura 4.18(a), aumentou principalmente no sul do Espírito Santo e no sudeste de Minas Gerais onde a atividade convectiva foi mais intensa e as descargas atmosféricas ocorreram. A massa úmida ingressou no continente dominando a metade sul do Estado do Rio de Janeiro com valores entre 16 e 18 g/kg, como pode ser visto na Figura 4.18(b). Em 850 mb, na Figura 4.18(c), o núcleo de advecção fria sobre o sul do Espírito Santo permanece constante em posição e intensidade. Observa-se a intensificação da advecção negativa a sudoeste do Estado do Rio de Janeiro, atingindo valores superiores a -1 K/h. A Figura 4.18(d) mostra movimento ascendente no sudeste de Minas Gerais, com a velocidade vertical assumindo valores de até 14 cm/s.

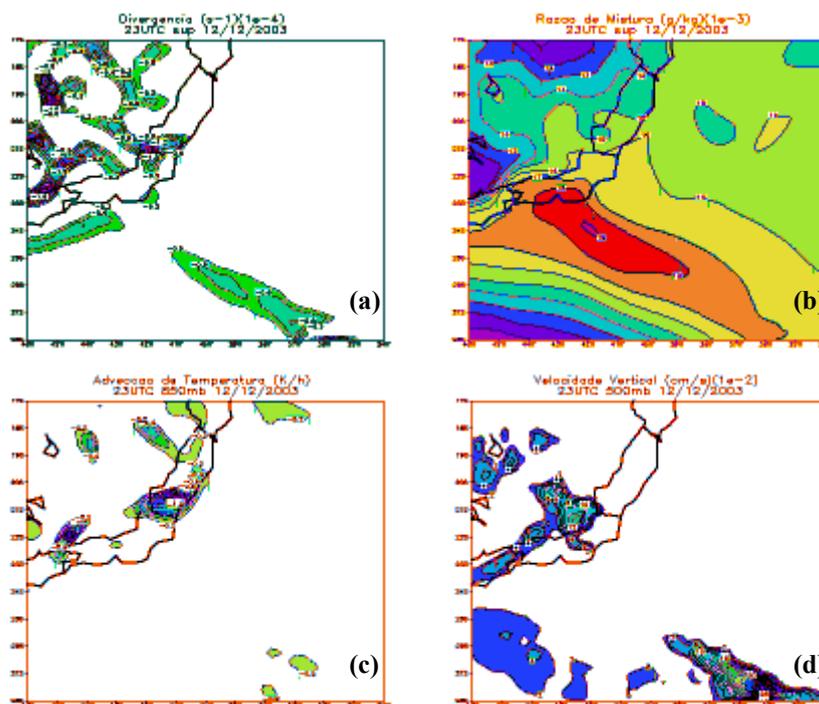


Figura 4.18 – Simulações das 23 UTC da divergência em superfície (a), razão de mistura em superfície (b), advecção de temperatura em 850 mb (c) e velocidade vertical em 500 mb (d).

4.3.4 Tratamento das Saídas de Simulação

Na tempestade deste estudo de caso, foi escolhido apenas um núcleo dominando uma quantidade significativa de descargas elétricas atmosféricas e apresentando formato bem

configurado. Conforme a Figura 4.19 abaixo, está posicionado entre 22.5° e 23.3° S e 43.2° e 44° O, somando 1.678 descargas, 65% do total registrado às 17 horas local.

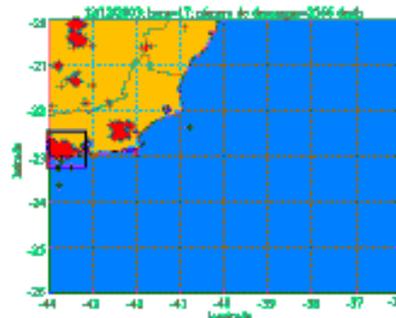


Figura 4.19 – Núcleo escolhido na tempestade do dia 12 de dezembro de 2003.

Para este núcleo ocorrido às 17 horas local, o tratamento matemático, conferido às áreas total, recortada e interpolada do domínio de cada variável meteorológica em cada nível de pressão, na tentativa de encontrar, para o tempo de uma hora de antecedência do aparecimento do núcleo de descargas atmosféricas, correlações entre as variáveis de estado da simulação e a ocorrência futura de atividade elétrica, foi aplicado aos resultados das variáveis previstas para as 16 horas local (19 UTC, simulação 1), segundo a Figura 4.20.

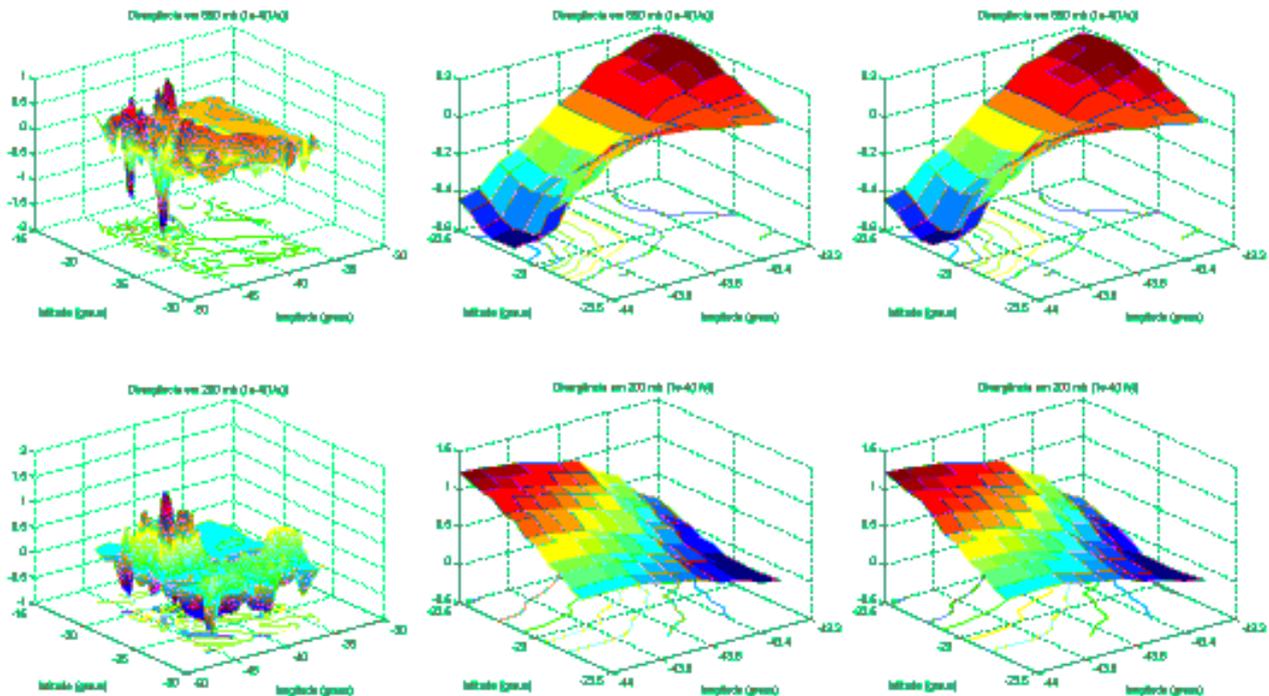
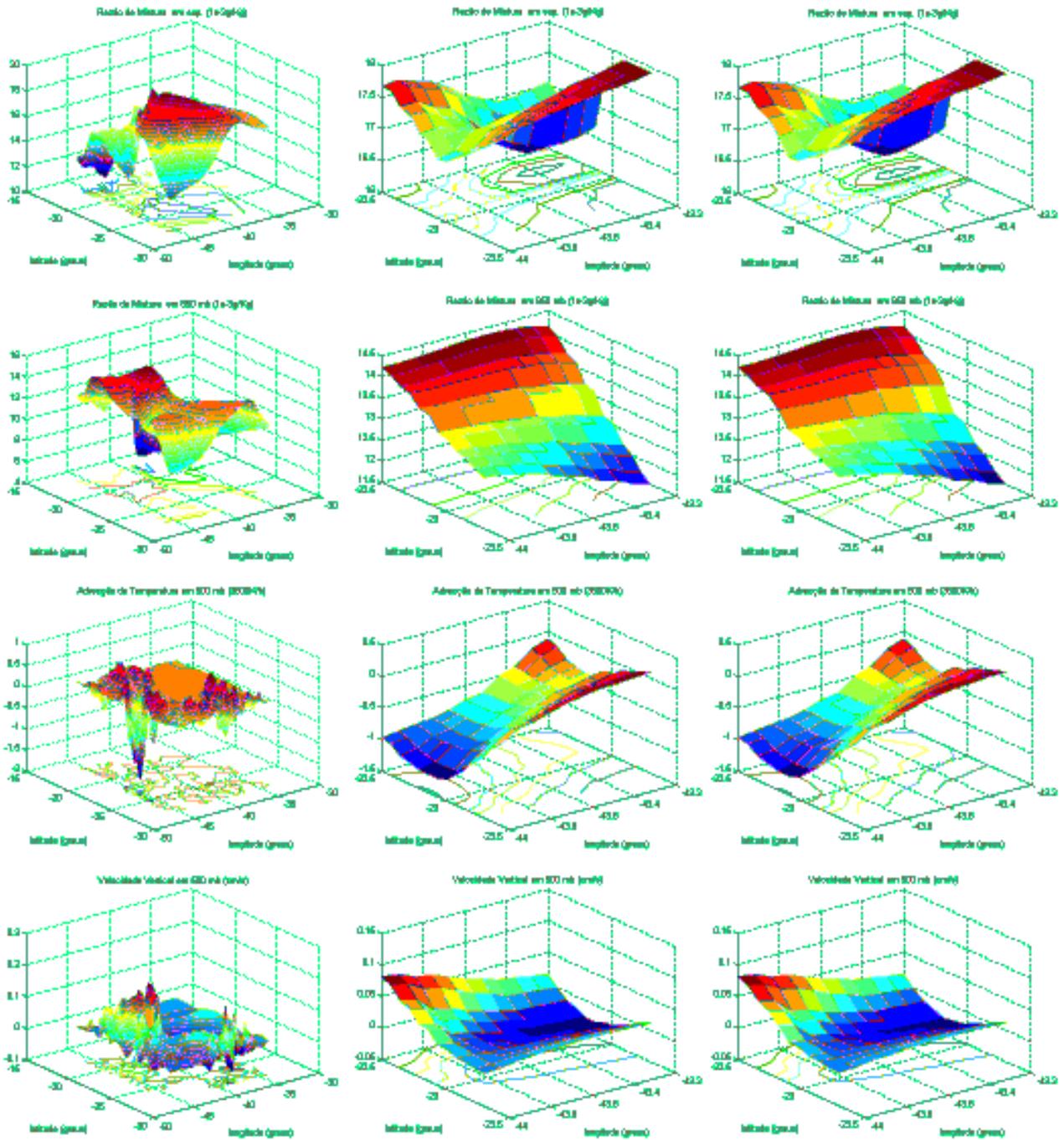


Figura 4.20 – Área total, área recortada e área recortada interpolada para uma matriz 11x11 pontos de, respectivamente, divergência em 850 e 200 mb, razão de mistura em superfície e 850 mb, advecção de temperatura em 500 mb e velocidade vertical em 500 mb.



Continuação da Figura 4.20.

CAPÍTULO 5

CLASSIFICAÇÃO DE TEMPESTADES VIA REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

5.1 INTRODUÇÃO

O objetivo do presente capítulo é realizar um estudo sobre a viabilidade de utilizar uma rede neural artificial (RNA) na tentativa de prever a ocorrência de tempestades com descargas elétricas atmosféricas. A idéia é, a partir de algumas variáveis meteorológicas simuladas no modelo de mesoescala MM5, alimentar a entrada da RNA, obtendo como saída o número de descargas elétricas do tipo nuvem-solo que deverá ocorrer em um futuro próximo, ou seja, em uma hora depois. A Figura 5.1 tenta ilustrar este objetivo. As variáveis provenientes de simulações com o MM5 passam por um pré-processamento, conforme será explicado na seção 5.4, antes de tornarem-se entrada para a RNA, a qual devolve a previsão (número de descargas elétricas atmosféricas por hora (NDEApH)). Neste caso, a RNA pode ser vista como uma função de transferência, relacionando algumas entradas com uma saída, ainda que exista um retardo no tempo de uma hora entre elas (Gomes *et al*, 2005). A dinâmica real da atmosfera que relaciona as entradas escolhidas com a saída é bastante complexa e, evidentemente, desconhecida. O esforço consiste em justamente fazer com que uma RNA aprenda esta dinâmica, de forma a prever como a atmosfera comportar-se-á uma hora depois, a partir do número de descargas elétricas que atingirá a superfície terrestre.



Figura 5.1 – Esquema básico do sistema de previsão de descargas elétricas.

Apesar da vasta pesquisa bibliográfica realizada para o desenvolvimento desta dissertação, não foram encontrados trabalhos que utilizassem técnicas de inteligência artificial na tentativa de prever tempestades com descargas elétricas. Esta carência de bibliografia semelhante acrescentou dificuldades extras ao alcance do objetivo final. Entretanto, para uma

RNA ter um caráter preditivo com real aplicabilidade prática, parece razoável supor que seja necessário e verdadeiro satisfazer as condições descritas a seguir:

- O simulador é confiável, ou seja, confere resultados numéricos (variáveis que definem o estado da atmosfera) com erros que se mantêm dentro de limites aceitáveis;
- Apesar de não linear, a natureza (dinâmica da atmosfera) comporta-se aproximadamente como uma função unívoca de várias variáveis, significando dizer que diferentes valores numéricos para um conjunto de variáveis induzem a diferentes saídas (quantidade de descargas elétricas) uma hora depois;
- O fenômeno é correlacionado no tempo, ou seja, há uma correlação entre as variáveis escolhidas como entrada (campos atmosféricos uma hora antes) e a quantidade de descargas elétricas que atinge a superfície terrestre (uma hora depois);
- As variáveis escolhidas para servirem como entrada no sistema neural de previsão são, de fato, representativas do fenômeno.

Conforme será evidenciado na seqüência deste capítulo, os resultados com a RNA indicam que este é um caminho promissor, devendo o mesmo ser explorado mais detalhadamente em trabalhos futuros.

5.2 NOÇÕES SOBRE REDES NEURAI ARTIFICIAIS

Referências bibliográficas sobre RNA podem ser facilmente encontradas na literatura. Por tratar-se de um assunto merecedor de grande atenção por parte da comunidade científica, existem atualmente diversas aplicações de redes neurais artificiais (RNA) nos mais variados domínios da ciência e da tecnologia (Ertugrul & Kaynak, 1997; Jung & Hsia, 1998; Gervini *et al*, 2003). Miller III *et al* (1995) relata uma importante descrição sobre o histórico das redes neurais artificiais.

As redes neurais conseguem apresentar algumas características de processamento inteligente, como os casos do aprendizado e da adaptação, que consistem na tentativa de reproduzir, a partir de um programa de computador, o princípio de funcionamento do cérebro humano. A Figura 5.2 resume, de forma bastante simplificada, o funcionamento básico de uma RNA com m camadas de neurônios. Cada conexão entre os neurônios das diferentes camadas tem um respectivo peso (valor numérico). Estes neurônios são constituídos de uma

função de ativação, cuja saída depende do somatório dos sinais, já multiplicados pelos respectivos pesos, que estão chegando ao neurônio. Quando a RNA tem treinamento supervisionado, sinais padrões são comparados aos sinais relativos à última camada de neurônios, formando, assim, o erro em um determinado passo de treinamento. Este erro é responsável por modificar os pesos das conexões, a partir de alguma estratégia de treinamento, sendo a mais utilizada o algoritmo *backpropagation* (Fausett, 1994). Este é precisamente o tipo de RNA empregado no presente trabalho, ou seja, uma rede multicamadas (*multilayer*) do tipo *feedforward* totalmente conectada (*fully connected*), com aprendizado supervisionado por retropropagação do erro.

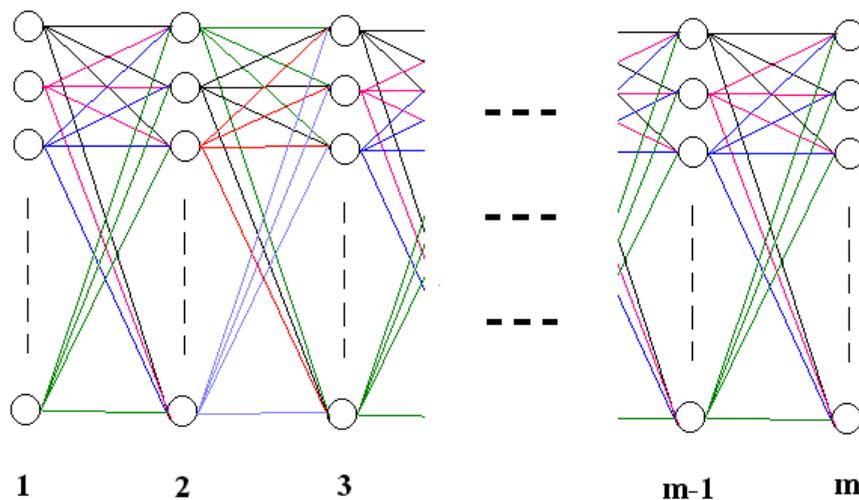


Figura 5.2 – Uma RNA com m camadas.

5.3 ARQUITETURA DA RNA UTILIZADA

A arquitetura de rede adotada para a previsão de descargas elétricas atmosféricas foi uma rede *backpropagation* (*multilayer, feedforward network, fully connected*), proposta em Gomes *et al* (2005). Utilizou-se, como regra de treinamento, o *backpropagation* com momentum (Fausett, 1994; Beale & Jackson, 1990). A Figura 5.3 apresenta a arquitetura de rede adotada. A camada de entrada foi composta de 727 neurônios, a única camada intermediária de 128 e a última camada (saída) de apenas um neurônio, representando a quantidade de descargas elétricas que ocorrerá em uma hora. As áreas físicas em estudo contêm variáveis de simulação (saídas do MM5) dispostas em matrizes 11x11, conforme será explicado na seção seguinte. Portanto, os neurônios da camada de entrada possuem a seguinte significação física:

- do neurônio 1 ao 121 (velocidade vertical em 500 mb);
- 122 ao 242 (divergência em 850 mb);
- 243 ao 363 (divergência em 200 mb);
- 364 ao 484 (razão de mistura em superfície);
- 485 ao 605 (razão de mistura em 850 mb);
- 606 ao 726 (advecção de temperatura em 500 mb);
- o neurônio 727 corresponde a área física em km².

Foi utilizada somente uma camada intermediária com 128 neurônios para aprender os padrões apresentados à rede. Números menores de neurônios (8, 16, 32 e 64) também foram testados, mas os melhores resultados foram obtidos com 128 neurônios.

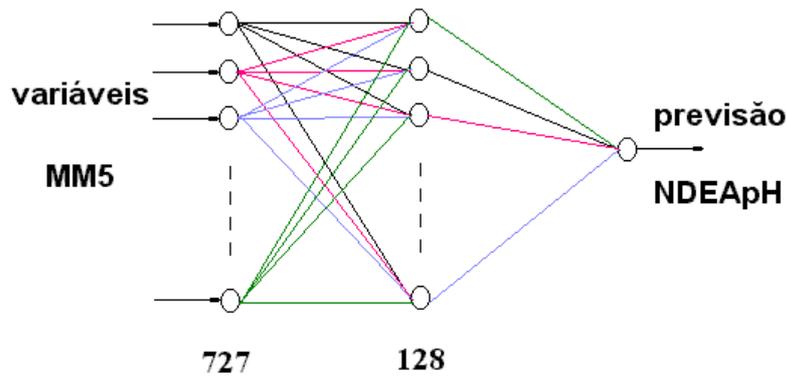


Figura 5.3 – Arquitetura da RNA.

A arquitetura dos neurônios é mostrada na Figura 5.4, tendo-se utilizado uma função de ativação sigmoidal (tanh).

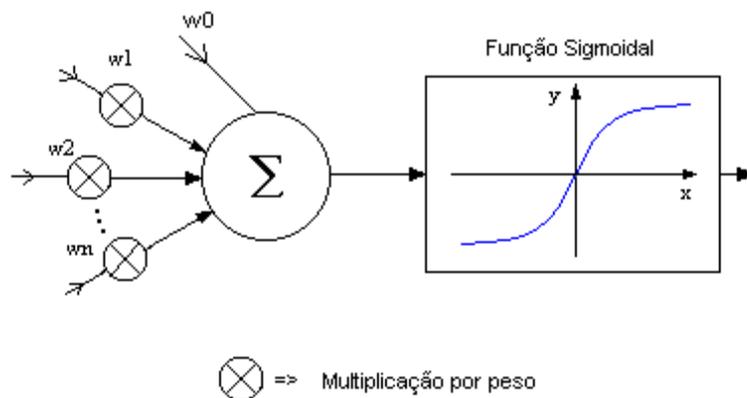


Figura 5.4. – Arquitetura dos neurônios utilizada.

5.4 VARIÁVEIS DE ENTRADA NA RNA

As áreas selecionadas para o estudo correspondem a sub-regiões dentro da grande região de estudo nas quais aconteceram as tempestades com descargas elétricas atmosféricas. A Figura 5.5 mostra um destes casos, cujos parâmetros estão contidos na Tabela 5.1. Um retângulo acrescentado à Figura 5.5 ressalta a sub-região de interesse em que ocorreram 2.057 descargas às 20 horas local.

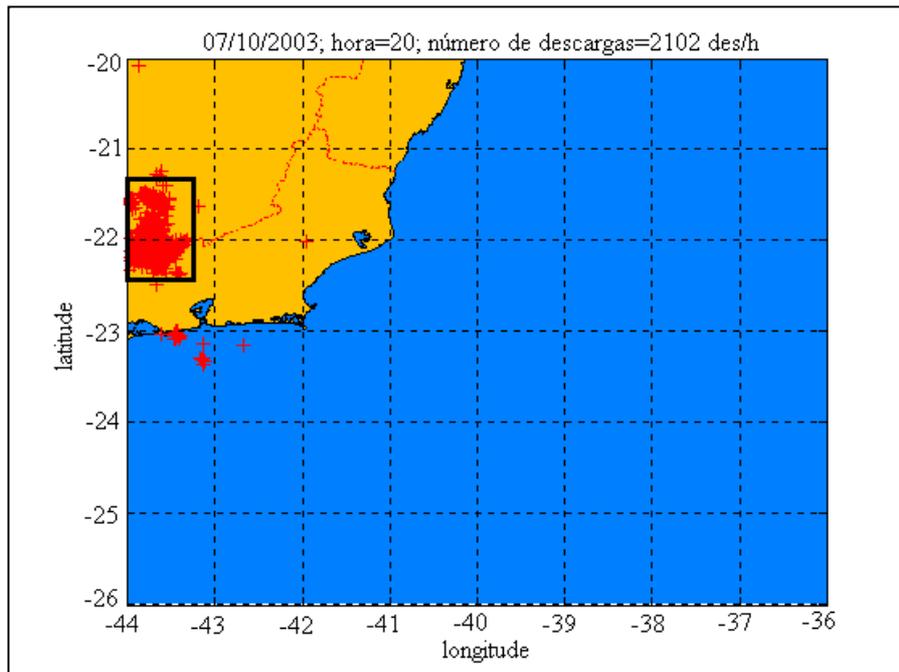


Figura 5.5 – Um caso de ocorrência de tempestade com descargas elétricas.

Tabela 5.1 – Parâmetros relativos à sub-região de interesse da Figura 5.5, sendo *dph* a unidade representativa de descargas por hora.

| Dia | Hora | Lat. inicial | Lat. final | Long. inicial | Long. final | <i>dph</i> |
|------------|-------------|---------------------|-------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
| 07/10/2003 | 20 | -21.4° | -22.4° | -43.2° | -44° | 2.057 |

Uma vez selecionada uma sub-região de interesse (Figura 5.5), uma simulação com o modelo de mesoescala MM5 é realizada. Alguns arquivos de dados são gerados a partir de variáveis que o MM5 disponibiliza após a realização da simulação. De acordo com as justificativas físicas de correlação com o fenômeno em estudo já apresentadas anteriormente, as variáveis de interesse estão descritas na Tabela 5.2:

Tabela 5.2 – Variáveis do MM5 utilizadas como entrada na RNA.

| Variável | Nível de Pressão |
|-------------------------|------------------|
| Velocidade vertical | 500 mb |
| Divergência | 850 mb |
| Divergência | 200 mb |
| Razão de mistura | Superfície |
| Razão de mistura | 850 mb |
| Advecção de temperatura | 500 mb |

A Figura 5.6 apresenta a variável razão de mistura para a sub-região de interesse da Figura 5.5, em superfície (Figuras 5.6 (a), (b), (c)) e em 850 mb (Figuras 5.6 (d), (e), (f)). Os gráficos (a) e (d) mostram os resultados no domínio maior, (b) e (e), as sub-regiões de interesse (recortadas do domínio maior), enquanto que (c) e (f), as respectivas interpolações para matrizes 11x11 pontos. Conforme explicado no Capítulo 4, estes gráficos provenientes das interpolações em duas dimensões são os formadores das entradas da RNA. A Figura 5.6 mostra apenas a razão de mistura, mas as entradas da RNA são compostas com os gráficos interpolados de todas as variáveis descritas nas Tabela 5.2, sendo o último neurônio a área em km^2 da sub-região de interesse. É importante ressaltar que as soluções (saídas do MM5) no domínio completo são matrizes (cada variável) com 150x150 pontos. No exemplo da Figura 5.5, a sub-região recortada diretamente do domínio completo corresponde a uma matriz 32x18 pontos (Figuras 5.6 (b) e (e)), enquanto que a sub-região interpolada corresponde a uma matriz 11x11 pontos (Figuras 5.6 (c) e (f)). É perceptível que, apesar da interpolação, não foram perdidas informações importantes com o processo de interpolação, pois os gráficos (c) e (f) são muito semelhantes aos (b) e (e).

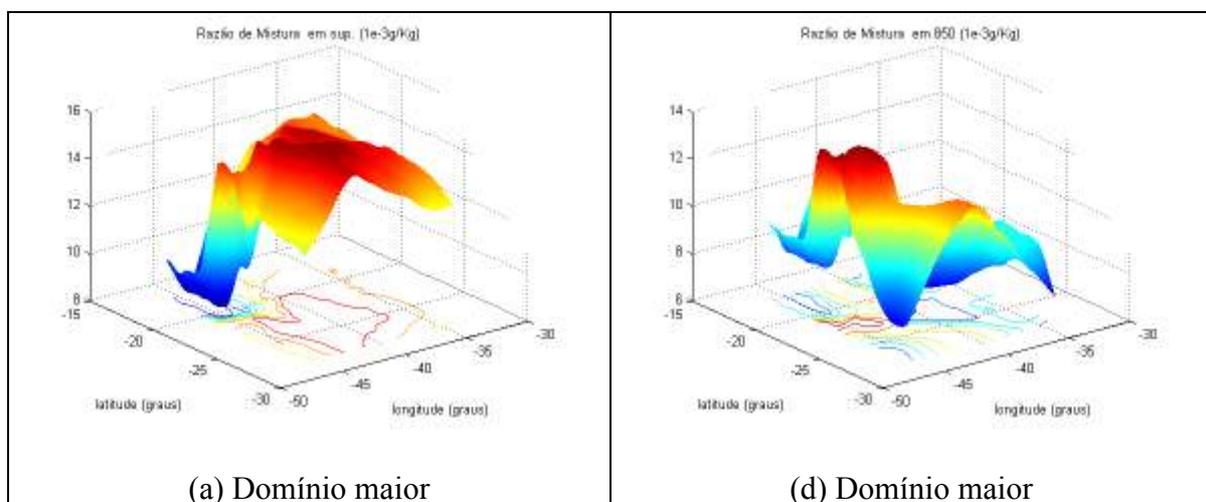
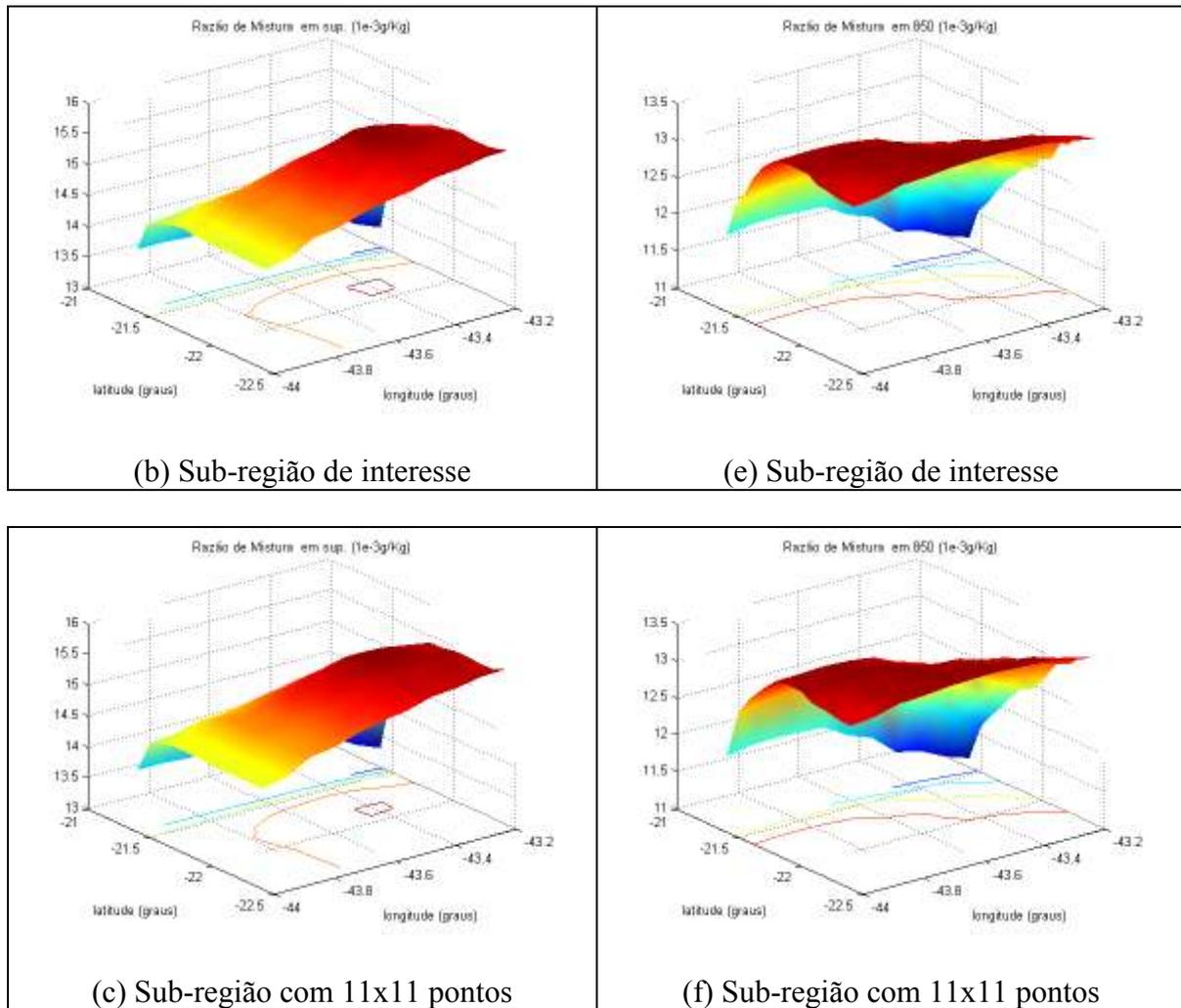


Figura 5.6 – Razão de mistura em superfície e em 850 mb, para os domínios (domínio maior (a) e (d) e sub-região de interesse (b), (c), (e) e (f)) apresentados na Figura 5.5.



Continuação da Figura 5.6.

5.5 TREINAMENTO E RESULTADOS

Vinte e três casos foram selecionados para compor o presente estudo, dos quais dezenove foram apresentados à rede como padrões de treinamento, restando quatro para testar a eficiência do previsor neural de tempestades. A Tabela 5.3 mostra informações sobre a data, a hora e as coordenadas geográficas dos locais de ocorrência das descargas elétricas (latitude inicial e final e longitude inicial e final) e, ainda, a quantidade de descargas nuvem-solo registradas por hora destes casos. Em vermelho, estão aqueles eventos escolhidos para teste, que, evidentemente, não foram introduzidos à rede como padrões de treinamento. Cabe ressaltar que três casos de ausência de descargas foram inclusos no estudo, sendo dois treinados e um de teste. Os casos selecionados para teste foram escolhidos suficientemente diferentes entre si, inclusive com uma ausência de descargas, de forma a não tornar os testes tendenciosos.

Tabela 5.3 – Casos selecionados para o estudo com a RNA.

| Data | Hora | Lat. inicial | Lat. final | Long. inicial | Long. final | dph |
|------------|------|--------------|------------|---------------|-------------|-------|
| 05/07/2003 | 17 | -21° | -22° | -42° | -43° | 0 |
| 22/07/2003 | 17 | -21° | -22° | -42° | -43° | 0 |
| 21/09/2003 | 17 | -21° | -22° | -42° | -43° | 0 |
| 07/10/2003 | 19 | -21.3° | -22.4° | -43.2° | -44° | 1.000 |
| 07/10/2003 | 20 | -21.4° | -22.4° | -43.2° | -44° | 2.057 |
| 08/10/2003 | 0 | -21° | -22° | -42.2° | -43° | 953 |
| 13/11/2003 | 16 | -22° | -23° | -43° | -44° | 1.378 |
| 13/11/2003 | 17 | -22.2° | -23.1° | -43° | -43.8° | 1.741 |
| 13/11/2003 | 18 | -20.3° | -21.1° | -42.8° | -43.6° | 1.080 |
| 13/11/2003 | 20 | -21.1° | -22° | -41.9° | -42.8° | 1.329 |
| 13/11/2003 | 21 | -21° | -22.3° | -41.4° | -42.3° | 953 |
| 18/11/2003 | 18 | -20.9° | -21.9° | -42.8° | -43.6° | 1.659 |
| 19/11/2003 | 17 | -21.2° | -22.8° | -43° | -44° | 2.439 |
| 19/11/2003 | 22 | -21.1° | -22.2° | -41.5° | -42.8° | 1.630 |
| 19/11/2003 | 23 | -21° | -22.1° | -41.2° | -42.3° | 881 |
| 26/11/2003 | 16 | -20.5° | -22.2° | -43.2° | -44° | 1.096 |
| 26/11/2003 | 19 | -22° | -23° | -42.8° | -43.6° | 973 |
| 12/12/2003 | 17 | -22.5° | -23.3° | -43.2° | -44° | 1.678 |
| 06/02/2004 | 19 | -20.8° | -21.6° | -42.8° | -43.6° | 994 |
| 06/02/2004 | 20 | -22.2° | -23° | -43° | -44° | 950 |
| 06/02/2004 | 21 | -20.2° | -21° | -42.8° | -43.6° | 971 |
| 06/02/2004 | 21 | -22° | -22.8° | -42.7° | -44° | 1.097 |
| 06/02/2004 | 22 | -21.9° | -22.7° | -42.3° | -44° | 1.202 |

O treinamento da RNA foi efetuado adotando-se uma única iteração com o algoritmo *backpropagation* para cada caso apresentado como padrão de treinamento. Após o treinamento dos dezenove casos, todos foram novamente treinados também com uma única iteração cada e assim por diante.

Inicialmente, os dezenove casos foram apresentados à RNA mil vezes. A Figura 5.7 apresenta o resultado deste treinamento, cujos valores reais (padrões) estão em vermelho. Os erros, formados a partir das diferenças entre padrões e saídas da rede após o treinamento, podem ser visualizados na Figura 5.8, sendo o erro médio relativo aos dezenove casos treinados de 39,46 *dph*. A RNA treinada com mil iterações foi chamada de *RNA1*.

Posteriormente, prosseguiu-se com o treinamento até atingir duas mil iterações, sendo esta nova rede intitulada *RNA2*. Portanto, a *RNA2* foi obtida aplicando-se, sobre a *RNA1*, mais mil iterações. A Figura 5.9 mostra o resultado do treinamento com a *RNA2*, estando os erros

com os dezenove casos treinados na Figura 5.10. O erro médio no treinamento obtido com a *RNA2* foi de 32,5 *dph*.

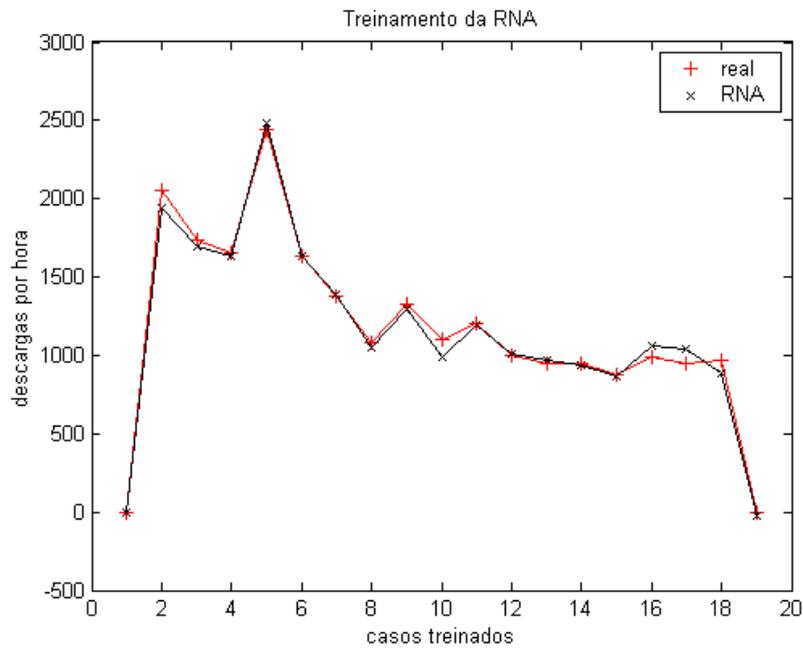


Figura 5.7 – Resultados ressaltando o aprendizado da *RNA1*.

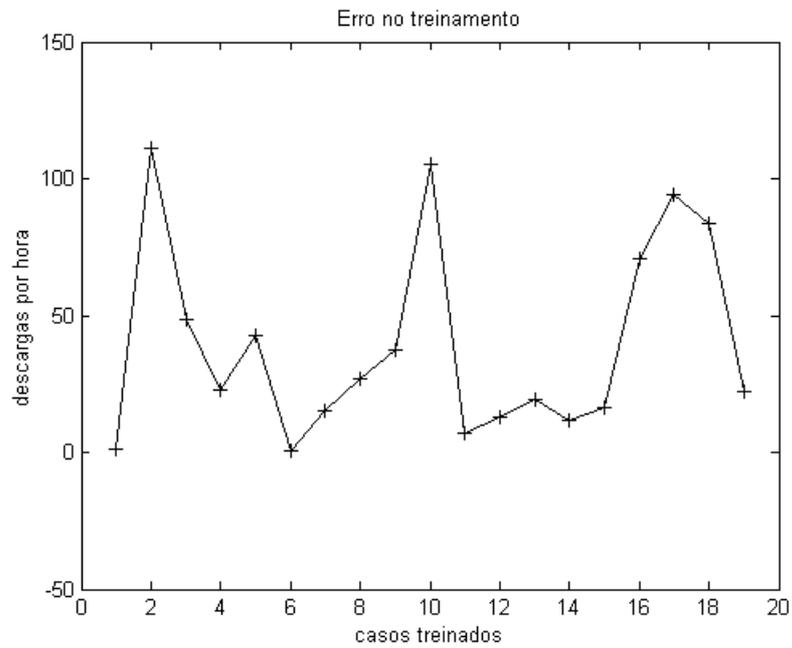


Figura 5.8 – Erros após o treinamento da *RNA1* (erro médio = 39,46 *dph*).

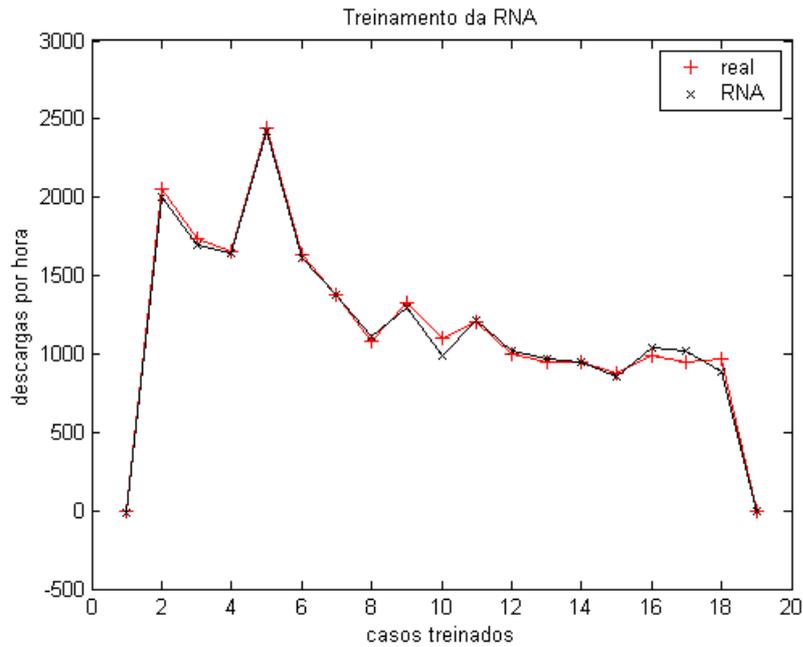


Figura 5.9 – Resultados ressaltando o aprendizado da *RNA2*.

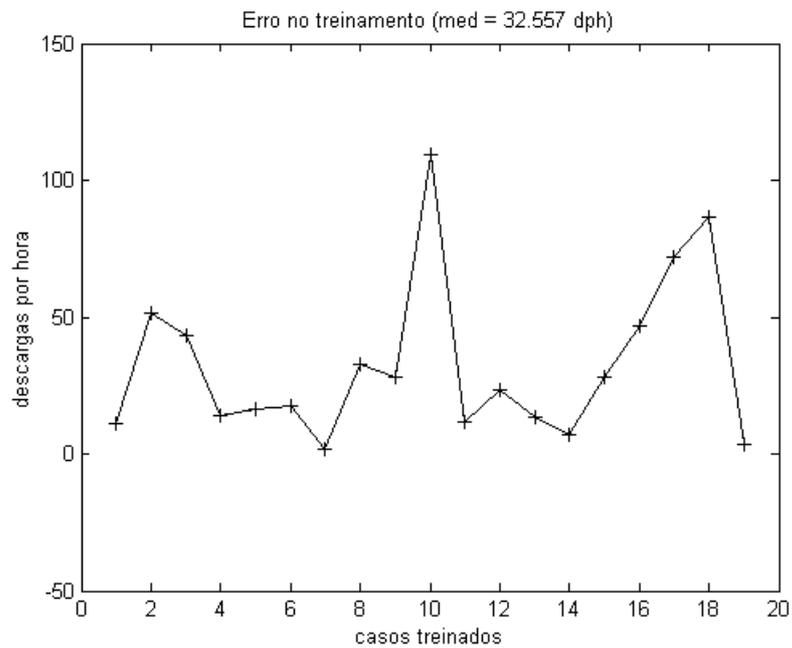


Figura 5.10 – Erros após o treinamento da *RNA2* (erro médio = 32,56 *dph*).

Após a obtenção das redes *RNA1* e *RNA2*, procedeu-se, então, à fase de testes. Os quatro casos, não treinados (em vermelho na Tabela 5.3), foram testados com as duas redes. A Figura 5.11 mostra os resultados com a *RNA1*, cujos valores reais, em *dph* e em vermelho, são confrontados com aqueles previstos pela rede. O erro médio da previsão foi de 246,72 *dph*. A Figura 5.12 mostra os mesmos resultados de previsão com a *RNA2* para os quatro casos não

treinados. O erro médio foi de 241,32 *dph*, apenas ligeiramente inferior ao erro do caso anterior. Neste momento, não adiantaria continuar o treinamento da rede, pois não mais haveria um ganho significativo em termos de previsibilidade do fenômeno.

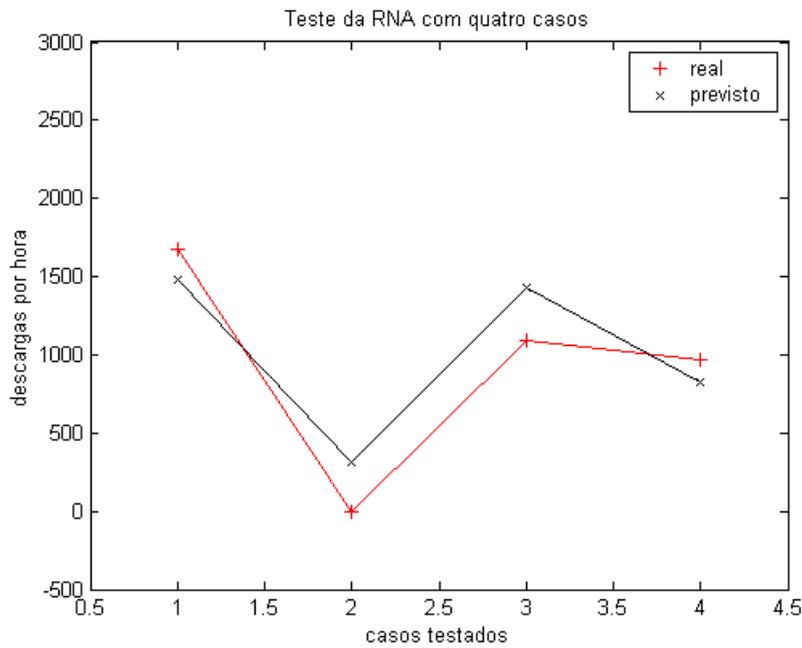


Figura 5.11 – Resultados com a *RNA1* da previsão aplicada aos casos não treinados (erro médio = 246,72 *dph*).

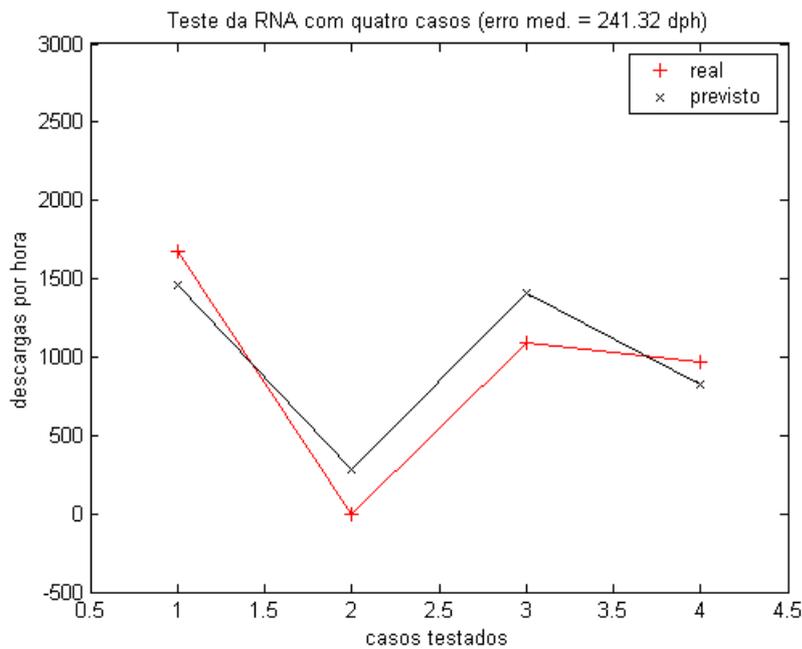


Figura 5.12 – Resultados com a *RNA2* da previsão aplicada aos casos não treinados (erro médio = 241,32 *dph*).

As Tabelas 5.4 e 5.5 expõem numericamente os resultados da previsão para os casos das redes *RNA1* e *RNA2*, respectivamente. É possível perceber que, realmente, as diferenças entre as previsões nestes dois casos não são significativas.

Tabela 5.4 – Valores numéricos da previsão com a *RNA1*.

| Real (dph) | Previsto (dph) |
|---|-----------------------|
| 1.678 | 1.479,248 |
| 0 | 308,54 |
| 1.096 | 1426,19 |
| 973 | 823,60 |
| Erro Médio da Previsão = 246,72 (39,46 no treinamento) | |

Tabela 5.5 – Valores numéricos da previsão com a *RNA2*.

| Real (dph) | Previsto (dph) |
|---|-----------------------|
| 1.678 | 1.463,36 |
| 0 | 282,01 |
| 1.096 | 1.412,36 |
| 973 | 820,70 |
| Erro Médio da Previsão = 241,32 (32,56 no treinamento) | |

O estudo apresentado no presente capítulo permite concluir que a utilização de redes neurais artificiais pode vir a ser uma importante ferramenta para a construção de um eficaz sistema de previsão de descargas elétricas atmosféricas. Esta conclusão, entretanto, por enquanto, é restrita ao caso de previsão de curtíssimo prazo. Pesquisas que darão seqüência a este trabalho deverão concluir sobre qual seria o intervalo de tempo de antecedência máxima que ainda permitiria uma previsão satisfatória.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O uso integrado de informações meteorológicas convencionais e não convencionais, associado a um conhecimento profundo dos mecanismos relacionados à formação de sistemas em mesoescala e em escala sinótica, conhecimento este apoiado por resultados de modelos prognósticos, diagnósticos e estatísticos, é que forma a base para um eficiente sistema de previsão a curto prazo. O objetivo principal deste trabalho foi correlacionar dados reais de descargas elétricas atmosféricas do tipo nuvem-solo, cedidos por FURNAS Centrais Elétricas S. A., imagens infravermelhas do satélite geoestacionário GOES-12 e campos meteorológicos obtidos de simulações numéricas com o modelo de mesoescala MM5, na elaboração de um estudo visando ao desenvolvimento de um sistema de previsão de descargas elétricas atmosféricas a partir de redes neurais artificiais.

A motivação concentrou-se, principalmente, no fato de esta ser uma proposta inédita de trabalho, segundo a pesquisa bibliográfica realizada, a abordar a análise associativa de informações até então tratadas separadamente. Não menos importante foi escolher uma região de estudo que favorecesse e estimulasse a aplicação da metodologia definida. Além de pertencer à região Sudeste do Brasil, que apresenta uma incidência significativa de descargas elétricas atmosféricas, o Estado do Rio de Janeiro compreende uma área ampla coberta por um sistema de detecção de relâmpagos em operação, fato que possibilita trabalhar com dados reais de ocorrência. O litoral é uma região influenciada climatologicamente por terra e mar, aspecto interessante visto que a atividade e o comportamento de relâmpagos são distintos em relação a estas duas superfícies. Por fim, a mais importante concentração de plataformas de extração de petróleo do Brasil, responsável por mais de 80% da produção nacional de gás, está aí compreendida, sendo, portanto, estrategicamente interessante conhecer melhor a ocorrência de descargas elétricas atmosféricas nesta região.

O caráter multidisciplinar envolvido na realização deste estudo, apesar de motivador, certamente acresceu dificuldades extras na obtenção dos resultados finais. Conhecimentos envolvendo meteorologia, física de nuvens, análise numérica, computação e inteligência artificial fizeram-se necessários a fim de que os objetivos propostos fossem alcançados. Para

tanto, a infra-estrutura e o apoio da equipe técnica do Núcleo de Matemática Aplicada (NuMA – FURG), local onde a presente dissertação foi desenvolvida, foram fundamentais. Torna-se, portanto, evidente a aplicabilidade real dos resultados obtidos. A possibilidade de conhecer, com antecedência de uma hora, o local da ocorrência de uma tempestade é uma informação bastante valiosa, mesmo que nela esteja adicionado algum percentual de erro.

Diante dos resultados e das discussões apresentadas, as principais conclusões deste estudo estão resumidas a seguir:

- Foram utilizados dados reais de descargas elétricas atmosféricas do tipo nuvem-solo do período de março de 2002 a fevereiro de 2004, cedidos por FURNAS Centrais Elétricas S. A., para a região abrangendo o Estado do Rio de Janeiro, o sul do Estado do Espírito Santo, o sudeste do Estado de Minas Gerais e o Oceano Atlântico. Tais dados foram fundamentais para a realização da pesquisa desenvolvida;
- A distribuição anual dos dados de descargas elétricas indicou, ao todo, 976.989 registros e um aumento de aproximadamente 14% na quantidade de descargas elétricas no ANO 1 em relação ao ANO 2. Quanto à distribuição mensal, a atividade elétrica nuvem-solo mais intensa foi observada para o ANO 1 em dezembro de 2002 e para o ANO 2 em fevereiro de 2004, com 26% e 24% do total de descargas registradas, respectivamente. De um modo geral, os resultados mensais revelaram um maior número de relâmpagos nuvem-solo no final da primavera e no início do verão, fato este já esperado e podendo ser associado ao forte aumento da atividade convectiva sobre o continente durante este período do ano em resposta ao ciclo diurno da insolação;
- Na distribuição do número de tempestades quanto aos níveis de severidade, as tempestades nível 4 representaram 68% das duzentas e seis tempestades identificadas no total, enquanto que aquelas nível 1, somente 4%. Praticamente, em todos os meses dos dois anos, houve, pelo menos, a ocorrência de uma categoria de tempestade, sendo os eventos nível 4 os mais frequentes. Somente nos meses de primavera e verão dos dois anos estudados, observou-se a incidência de tempestades níveis 1 e 2, concentrando 42% da quantidade total de descargas elétricas atmosféricas detectadas, apesar de suas freqüências de ocorrência serem menores comparadas àquelas dos níveis 3 e 4;

- As descargas concentraram-se principalmente sobre o continente e somente uma parcela reduzida delas, sobre o litoral e o Oceano Atlântico. Em média, para todo o período estudado, 69% dos dados de descargas nuvem-solo detectados ocorreram em terra, 13%, no mar e 18%, no litoral. Tal constatação foi atribuída ao fato de o oceano, além de ter mais estabilidade térmica (maior capacidade calorífica), não possuir elevações (extremidades/pontas) que poderiam facilitar a formação de tempestades e, ao mesmo tempo, diminuir a resistência dielétrica do ar, tornando possível a descarga;
- O modelo numérico MM5 foi configurado com dois domínios de integração de grade centrada em 23° S e 40° O: o domínio 1 com resolução horizontal de 90 km, referente à área localizada entre 35°S a 12°S de latitude e 54°O a 26°O de longitude, e o domínio 2, aninhado ao domínio maior, com resolução horizontal de 30 km, referente à área localizada entre 28°S a 17°S de latitude e 46°O a 34°O de longitude. Para todos os domínios de integração escolhidos, foi utilizada a mesma combinação de parametrizações: parametrização cumulus de Kain-Fritsch 2, parametrização de microfísica de Schultz, esquema MRF para camada limite planetária, parametrização de onda longa RRTM combinada com o esquema de radiação de nuvem para os processos radiativos e esquema de superfície LSM. Comparações entre simulações numéricas com diferentes conjuntos de opções físicas permitiram identificar estas parametrizações como aquelas que melhor reproduziram as tempestades selecionadas para avaliação;
- Para ambas as tempestades analisadas, nível 1 do dia 19 de novembro de 2003 e nível 2 do dia 12 de dezembro de 2003, correlações horárias e espaciais encontradas entre as descargas elétricas atmosféricas e as imagens no canal infravermelho do satélite geoestacionário GOES-12 possibilitaram identificar e monitorar o sistema frontal associado aos dois eventos e aferir a localização dos dados registrados pelos sensores de FURNAS Centrais Elétricas S.A. A detecção foi consideravelmente eficiente e confiável, visto que as posições dos dados estavam de acordo com as condições meteorológicas presentes;
- Para a aferição do desempenho do modelo MM5 com relação às imagens de satélite, foram utilizados campos da variável precipitação convectiva, simulados em ambos os domínios de integração, para os horários de início das duas tempestades, bem como, para os horários da sua máxima atividade elétrica. No caso da tempestade do dia 19 de

novembro de 2003, a previsão de localização da precipitação convectiva no domínio com 90 km de resolução horizontal apareceu justamente ao longo da banda frontal, inclusive no ciclone associado à extremidade do sistema. No domínio com maior resolução horizontal, a precipitação mais intensa praticamente coincidiu com as regiões convectivas identificadas nas imagens. Para o caso da tempestade do dia 12 de dezembro de 2003, os resultados do modelo MM5 para o domínio com 90 km de resolução horizontal não indicaram uma boa correlação entre a intensidade e a localização espacial da precipitação convectiva e as características de convecção identificadas nas imagens de satélite. Aparentemente a variável pareceu superestimada em regiões com ausência de atividade convectiva e subestimada na área de ocorrência das descargas elétricas em que a convecção mais intensa é evidente. Em toda extensão do sistema frontal não houve a previsão de incidência contínua de precipitação convectiva, mas, de um núcleo precipitante significativo provavelmente associado à sua extremidade no Oceano Atlântico. De um modo geral, a precipitação convectiva quando simulada para o domínio com 90 km de resolução horizontal, em ambas tempestades, foi um tanto inconsistente com a situação meteorológica apresentada nas imagens de satélite. Entretanto, nos resultados do modelo para o domínio com 30 km de resolução horizontal, mostrou-se bem representada espacialmente;

- Divergência, advecção de temperatura, razão de mistura e velocidade vertical foram selecionadas, com base nas condições primariamente necessárias para a formação de tempestades, isto é, perfil térmico da atmosfera, umidade e movimento ascensional, como possíveis variáveis meteorológicas preditoras da ocorrência de descargas elétricas atmosféricas. O comportamento dinâmico da atmosfera simulado no modelo MM5, para horários anteriores à máxima atividade elétrica dos casos apresentados, quando comparado ao desenvolvimento do sistema meteorológico nas imagens de satélite, revelou que a performance do modelo numérico foi satisfatória, mostrando potencial para fornecer prognósticos com boas resoluções temporal e espacial;
- O sistema de previsão baseado em uma RNA apresentado neste trabalho mostrou-se promissor. Os quatro casos não treinados previamente, que serviram para testar o sistema, foram escolhidos de modo a serem suficientemente diferentes entre si, inclusive com um caso apresentando ausência de descargas para não tornar os testes tendenciosos. Os resultados mostraram que a RNA conseguiu prever a ocorrência ou não de tempestades

com descargas elétricas com um erro médio de 241,32 *dph*. Um sistema de previsão, que apresentasse este erro médio, seria capaz de, pelo menos, indicar a ocorrência ou não de alguma tempestade com descargas atmosféricas e, ainda, em caso afirmativo, de classificá-la em quatro níveis de intensidade.

Os resultados alcançados com este sistema de previsão baseado em variáveis meteorológicas simuladas com o modelo MM5 alimentando as entradas de uma rede neural artificial, apesar de promissores, carecem de uma melhor confirmação a ser realizada em trabalhos futuros. Fundamentalmente, seriam necessários mais dados de descargas elétricas atmosféricas de outros anos aqui não analisados, a fim de ampliar a quantidade de padrões apresentados à RNA na fase de treinamento e de aumentar o número de testes com casos não treinados.

Visto a condição de primeiro trabalho, a opção foi testar uma previsão com apenas uma hora de antecedência. Portanto, resultados interessantes, a serem obtidos futuramente, consistiriam na identificação do tempo máximo em que ainda seria possível realizar uma previsão com um erro médio aceitável e nas adaptações necessárias à utilização do mesmo previsor para outras regiões do Brasil. Diferentes variáveis meteorológicas que possivelmente estabelecessem melhores correlações com a ocorrência das tempestades com descargas elétricas atmosféricas também poderiam ser avaliadas em um estudo futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdoulaev, S.; Lenskaia, O. Descargas à Terra em Sistemas de Mesoescala: Parte 3. Monitoramento das Tempestades. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XI, 2000, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2000. 1CD-ROM.

Abdoulaev, S.; Marques, V. S.; Pinheiro, F. M. A.; Martinez, E.; Lenskaia, O. Análise de sistemas de mesoescala utilizando dados de descargas nuvem-terra. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 19, n. 1, p.75-95, Dez. 2001.

Abdoulaev, S.; Marques, V. S.; Pinheiro, F. M. A.; Martinez, E.; Lenskaia, O. Descargas à Terra em Sistemas de Mesoescala: Parte 1. Campos Acumulados das Descargas VS. Radar e Satélite. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XI, 2000, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2000. 1CD-ROM.

Abdoulaev, S.; Marques, V. S.; Pinheiro, F. M. A.; Martinez, E.; Lenskaia, O. Descargas à Terra em Sistemas de Mesoescala: Parte 2. Variação da Intensidade da Tempestade VS. Polaridade das Descargas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XI, 2000a, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2000a. 1CD-ROM.

Assis, F. N. **Modelagem de ocorrência e da quantidade de chuva em Piracicaba, SP e Pelotas, RS**. Piracicaba, 1991. 134 p. Tese de Doutorado – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Universidade de São Paulo.

Assis, F. N. Probabilidade de ocorrência de dias sem chuva e chuvosos em Pelotas, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 2, p. 87-92, 1994.

Beale, R.; Jackson, T. **Neural computing: an introduction**. Bristol, UK: IOP Publishing Ltda., 1990. 264 p. ISBN 0-85274-262-2.

Beneti, C. A. A.; Leite, E. A.; Garcia, S. A. M.; Assunção, L. A. R.; Filho, A. C.; Reis, R. J. RIDAT – Rede Integrada de Detecção de Descargas Atmosféricas no Brasil: Situação Atual, Aplicações e Perspectivas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE

- METEOROLOGIA, XI, 2000, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2000. 1CD-ROM.
- Beneti, C.; Vasconcellos, C.; Calvetti, L.; Moreira, I. A. Efeitos Geográficos e Orográficos na Incidência de Descargas Elétricas Atmosféricas no Paraná – Estudo Preliminar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XII, 2002, Foz do Iguaçu. **Anais**. Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2002. 1CD-ROM.
- Bomfim Júnior, A. **Implementação de uma rede neural artificial na associação de imagens do radar meteorológico e dados de descargas elétricas**. São José dos Campos, 2004. 131 p. (INPE-10460-TDI/928). Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Bourscheidt, V.; Breunig, F. M.; Minussi, J. P.; Pinto Jr., O.; Schuch, N. J. Descargas elétricas no sul do Brasil. In: WORKSHOP BRASILEIRO DE MICROMETEOROLOGIA, III, 2003, Santa Maria. **Anais**. Santa Maria: Revista Ciência & Natura/ Universidade Federal de Santa Maria, 2003. p. 243-246.
- Climanálise – Boletim de Monitoramento e Análise Climática**. Cachoeira Paulista, v. 18, n. 11, 40 p., Nov. 2003, ISSN 0103-0019.
- Climanálise – Boletim de Monitoramento e Análise Climática**. Cachoeira Paulista, v. 18, n. 12, 41 p., Dez. 2003a, ISSN 0103-0019.
- Cortinas Jr., J. V.; Stensrud, D. J. The Importance of Understanding Mesoscale Model Parameterization Schemes for Weather Forecasting. **Weather and Forecasting**, v. 10, p. 716-740, Dec. 1995.
- Cox, R.; Bauer, B. L.; Smith, T. A Mesoscale Model Intercomparison. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, n. 2, p. 265-283, Feb. 1998.
- Dudhia, J. A Nonhydrostatic Version of the Penn State – NCAR Mesoscale Model: Validation Tests and Simulation of na Atlantic Cyclone and Cold Front. **Monthly Weather Review**, v. 121, p. 1493-1513, May 1993.

- Dudhia, J.; Gill, D.; Guo, Y. R.; Manning, K.; Bourgeois, A.; Wang, W.; Bruyere, C.; Wilson, J.; Kelly, S. PSU/NCAR Mesoscale Modeling System. MM5 Modeling System Version 3. **NCAR Technical Notes**, 2002.
- Ertugrul, M.; Kaynak, O. Neural Network Adaptive Sliding Mode Control and Its Application to SCARA Type Robot Manipulator. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA-97), April 1997, Albuquerque, USA. **Proceedings** of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Albuquerque, USA: IEEE Computer Society, 1997. p. 2932-2937.
- Faria, H. H. **Estudo das características dos relâmpagos nuvem-solo durante dias de grande atividade no Estado de Minas Gerais nos anos de 1992 a 1994**. São José dos Campos, 1998. 132 p. (INPE-7522-TDI/731). Dissertação (Mestrado em Ciência Espacial/Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Faria, H. H. **Estudo comparativo da atividade e características dos relâmpagos nas regiões de Rondônia e Sudeste, no período de outubro de 1999 a março de 2000**. São José dos Campos, 2002. 224 p. (INPE-9779-TDI/861). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Fausett, L. **Fundamentals of neural networks: Architecture, Algorithms and Applications**. 1st Edition. New Jersey: Prentice Hall, 1994. 461 p. ISBN 0-133-34186-0.
- Fernandes, J. C.; Carmo, R. M.; Lima, S. T. Ocorrência de relâmpagos sobre a região Sul e Sudeste do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, X, 1998, Brasília. **Anais**. Brasília: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1998. 1CD-ROM.
- Ferreira, A. G. **Interpretação de Imagens de Satélites Meteorológicos: uma visão prática e operacional do Hemisfério Sul**. Brasília, DF: Stilo Gráfica e Editora Ltda, 2002. 272 p. ISBN 85-89066-01-0.
- Figuroa, S. N.; Lagos, P.; Fernandez, J. P.; Takahashi, K. Aplicación operacional del modelo MM5 para el pronóstico del tiempo y la modernización de la meteorología en el Perú. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, X, 1998, Brasília. **Anais**. Brasília: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1998. 1CD-ROM.

- Gervini, V. I.; Gomes, S. C. P.; Rosa, V. S. A new robotic drive joint friction compensation mechanism using neural networks. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science & Engineering**, v. 25, n. 2, p. 129-139, April/June 2003.
- Gin, R. B. B. **Estudo coordenado de um sistema de tempestade sobre a América do Sul**. São José dos Campos, 1992. 167 p. (INPE-5388-TDI/477). Dissertação (Mestrado em Ciência Espacial/ Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Gin, R. B. B.; Beneti, C. C. A. Estudo das tempestades elétricas de grande impacto sobre o Estado de São Paulo: Verão de 2001. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XII, 2002, Foz do Iguaçu. **Anais**. Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2002. 1CD-ROM.
- Gin, R. B. B.; Filho, A. J. P.; Beneti, C. A. A.; Guedes, R. L. Estudo de descargas elétricas atmosféricas no Sul e Sudeste do Brasil: Análise Preliminar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XI, 2000, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2000. 1CD-ROM.
- Gin, R. B. B.; Guedes, R. L. Climatologia de Relâmpagos no Brasil: Análise Preliminar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XI, 2000, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2000. 1CD-ROM.
- Gomes, M. A. S. S. **Estudo dos relâmpagos na região sudeste do Brasil em função das características geográficas**. São José dos Campos, 2002. 149 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Gomes, S. C. P.; Zepka, G. S.; Gomes, R. G.; Gomes, D. S.; Drews Jr., P. Neural Network to Atmospheric Electric Storm Forecast. Submitted to Publication in 2005, [on line] preprints in <www.numa.furg.br>.
- Jung, S.; Hsia, T. C. Analysis of Nonlinear Neural Network Impedance Force Control for Robot Manipulators. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA-98), May 1998, Leuven, Belgium. **Proceedings** of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Leuven, Belgium: IEEE Computer Society, 1998. p. 1731-1736.

- Kain, J. S. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. To be submitted to Journal of Applied Meteorology. Dec. 2002. <<http://www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5-papers.html>>
- Lima, D. R. O.; Menezes, W. F. Queda de estruturas de linha de transmissão de energia elétrica em Cachoeira Paulista (SP) e a ocorrência de tempestades severas – Um estudo de caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XIII, 2004, Fortaleza. **Anais**. Fortaleza: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2004. 1CD-ROM.
- López, R. E.; Holle, R. L.; Heitkamp, T. A. Lightning Casualties and Property Damage in Colorado from 1950 to 1991 Based on *Storm Data*. **Weather and Forecasting**, v. 10, p. 114-126, March 1995.
- Mendes Jr., O.; Domingues, M. O.; Gin, R. B. B.; Pinto Jr., O.; Pinto, I. R. C. A. Climatological Evaluation of Parameters for a More Realistic Lightning Modeling. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, X, 1998, Brasília. **Proceedings**. Brasília: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1998. 1CD-ROM.
- Menezes, W. F. **Tempestades Severas: Um Modelo para Latitudes Subtropicais**. São Paulo, 1998. 174 p. Tese de Doutorado do Departamento de Ciências Atmosféricas – Instituto Astronômico e Geofísico – Universidade de São Paulo.
- Miller III, W. T.; Sutton, R. S.; Werbos, P. J. **Neural networks for control**. MIT Press, 1995. 544 p. ISBN 0-262-63161-X.
- Moraes, N. O.; Jourdan, P.; Corrêa, E. B.; Marton, E.; Pimentel, L. C. G. Uso do modelo MM5 na simulação da distribuição horizontal da temperatura na região metropolitana do Rio de Janeiro sob a influência de efeitos sinóticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XIII, 2004, Fortaleza. **Anais**. Fortaleza: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2004. 1CD-ROM.
- Naccarato, K. P. **Estudo de relâmpagos no Brasil com base na análise de desempenho do sistema de localização de tempestades**. São José dos Campos, 2001. 165 p. (INPE-8380-TDI/770). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

National Center for Atmospheric Research (NCAR) & the University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) Office of Programs. Data Support Section Research Data Archive. Datasets. MM5 Model Input Data. **Global Monthly Mean Radiosonde Observations**, [on line] <<http://dss.ucar.edu/datasets/ds430.0>> 17/01/2005.

National Center for Atmospheric Research (NCAR) & the University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) Office of Programs. Data Support Section Research Data Archive. Datasets. MM5 Model Input Data. **NCEP ADP Global Surface Observations**, [on line] <<http://dss.ucar.edu/datasets/ds464.0>> 17/01/2005.

National Center for Atmospheric Research (NCAR) & the University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) Office of Programs. Data Support Section Research Data Archive. Datasets. MM5 Model Input Data. **NCEP ADP Global Upper Air Observation Subsets**, [on line] <<http://dss.ucar.edu/datasets/ds353.4>> 17/01/2005.

National Center for Atmospheric Research (NCAR) & the University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) Office of Programs. Data Support Section Research Data Archive. Datasets. MM5 Model Input Data. **NCEP Global Tropospheric Analyses**, [on line] <<http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.0>> 17/01/2005.

National Center for Atmospheric Research (NCAR) & the University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) Office of Programs. Data Support Section Research Data Archive. Datasets. MM5 Model Input Data. **NCEP/NCAR Global Reanalysis**, [on line] <<http://dss.ucar.edu/datasets/ds090.0>> 17/01/2005.

Oliveira, I. C.; Menezes, W. F. Estudo de configurações de parametrizações físicas em um modelo numérico via estudo de caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XIII, 2004, Fortaleza. **Anais**. Fortaleza: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2004. 1CD-ROM.

Pereira, T. R. A.; Oliveira, I. C.; Menezes, W. F.; Silva, M. G. A. J. Análise do Desempenho do Modelo Numérico MM5 na Previsão de Chuva sobre o Estado do Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XII, 2002, Foz do Iguaçu. **Anais**. Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2002. 1CD-ROM.

- Pinto, I. R. C. A.; Pinto Jr., O. Cloud-to-ground lightning distribution in Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, p. 733-737, Feb. 2003.
- Pinto, I. R. C. A.; Pinto Jr., O.; Gin, R. B. B.; Diniz, J. H.; Araújo, R. L.; Carvalho, A. M. A Coordinated Study of a Storm System over the South American Continent 2. Lightning – Related Data. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D16, p. 18205-18213, Nov. 1992.
- Pinto, I. R. C. A.; Pinto Jr., O.; Rocha, R. M. L.; Diniz, J. H.; Carvalho, A. M.; Filho, A. C. Cloud-to-ground lightning in southeastern Brazil in 1993 2. Time variations and flash characteristics. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. D24, p. 31381-31387, Dec. 1999.
- Pinto Jr., O. **A Arte da Guerra Contra os Raios**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2005. 80 p. ISBN 85-86238-40-6.
- 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 southeastern Brazil for the 1992–1993 summer season. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. D23, p. 29.627-29.635, Dec. 1996.
- Pinto Jr., O.; Pinto, I. R. C. A. **Tempestades e Relâmpagos no Brasil**. São José dos Campos, SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000. 193 p. ISBN 85-901719-1-4.
- Pinto Jr., O.; Pinto, I. R. C. A.; Diniz, J. H.; Filho, A. C.; Cherchiglia, L. C. L.; Carvalho, A. M. A seven-year study about the negative cloud-to-ground lightning flash characteristics in Southeastern Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, p. 739-748, Feb. 2003a.
- Pinto Jr., O.; Pinto, I. R. C. A.; Faria, H. H. A comparative analysis of lightning data from lightning networks and LIS sensor in the North and Southeast of Brazil. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 2, p. 45-1 – 45-4, Jan. 2003.
- Pinto Jr., O.; Pinto, I. R. C. A.; Gin, R. B. B.; Mendes Jr., O. A Coordinated Study of a Storm System over the South American Continent 1. Weather Information and Quasi-DC

- Stratospheric Electric Field Data. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D16, p. 18195-18204, Nov. 1992.
- 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, n. D24, p. 31369-31379, Dec. 1999.
- Reap, R. M.; MacGorman, D. R. Cloud-to-Ground Lightning: Climatological Characteristics and Relationships to Model Fields, Radar Observations and Severe Local Storms. **Monthly Weather Review**, v. 117, p. 518-535, March 1989.
- Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT). **Localização dos sensores de detecção de descargas atmosféricas da RINDAT**, [on line] <<http://www.rindat.com.br/definicao.html>> 10/12/2004.
- Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT). **Lista de sensores de detecção de descargas atmosféricas da RINDAT no Brasil**, [on line] <<http://www.rindat.com.br/definicao.html>> 10/12/2004.
- Roebber, P. J.; Eise, J. The 21 June 1997 Flood: Storm-Scale Simulations and Implications for Operational Forecasting. **Weather and Forecasting**, v. 16, p. 197-218, April 2001.
- Schultz, P. An Explicit Cloud Physics Parameterization for Operational Numerical Weather Prediction. **Monthly Weather Review**, v. 123, p. 3331-3343, Nov. 1995.
- Silva, A. S.; Coelho, D. G.; Silva, M. G. A. J. Impacto do aumento da resolução espacial na previsão de tempo regional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XII, 2002, Foz do Iguaçu. **Anais**. Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2002. 1CD-ROM.
- Wallace, J. M.; Hobbs, P. V. **Atmospheric Science An Introductory Survey**. New York: Academic Press, c1977, 467p. ISBN 0-12-732950-1.
- Wang, W.; Seaman, N. L. A Comparison Study of Convective Parameterization Schemes in a Mesoscale Model. **Monthly Weather Review**, v. 125, p. 252-278, Feb. 1997.

Yamazaki, Y.; Carvalho, M. H.; Orgaz, M. L. D. M. Análise de um caso de chuvas intensas em Pelotas-RS usando o modelo MM5. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XIII, 2004, Fortaleza. **Anais**. Fortaleza: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2004. 1CD-ROM.

Zajac, B. A.; Rutledge, S. A . Cloud-to-ground lightning activity in the contiguous United States from 1995 to 1999. **Monthly Weather Review**, v. 129, n. 5, p. 999-1019, May 2001.

Zepka, G. S.; Gomes, S. C. P.; Gomes, D. S.; Drews Jr., P. L. J. Tempestade Severa – Um Estudo de Caso. Submetido para Publicação em 2005, <www.numa.furg.br>.